

№12 2013

декабрь

Научно-практический журнал для специалистов
Республика Беларусь, г. Минск

инфо
ЭЛЕКТРОНИКА

*Тема номера:
«Технологии проектирования СБИС»*

Клеммы, контроллеры, инструмент для монтажа, клеммы для строительного монтажа



FEK Группы компаний «ФЭК» РБ, 220015, г. Минск, пр. Пушкина, 29 Б,
тел./факс: +375 (17) 210-22-74, 210-23-21
e-mail: info@fek.by www.fek.by

ПОДПИСКА В БЕЛАРУСИ («Белпочта»):
индивидуальная – 00822,
Бюджетная – 008222

ISSN 1999-7515



9 1771999 1751006 1 30 12

ЭЛЕКТРОНИКА инфо декабрь №12

С НОВЫМ ГОДОМ!

Редакция журнала
«Электроника инфо»
поздравляет Вас
с Новым 2014 годом!

Желаем, чтобы этот год стал для Вас
годом новых свершений,
хороших дел и начинаний.
Пусть он будет наполнен
светом счастья и добра,
радостью успехов
и уверенностью в будущем.
Пусть на Вашем жизненном пути
надежными спутниками
будут искреннее слово,
хорошее настроение,
благополучие и мир!



кабель, провод,
электротехническая продукция,
электрические щиты, шкафы,
все для прокладки кабеля

СО СКЛАДА В МИНСКЕ И ПОД ЗАКАЗ



Отдел продаж:

(375 17) 313-09-03

(многоканальный)

(375 17) 376-55-93

(375 44) 550-90-20

(375 29) 378-47-91

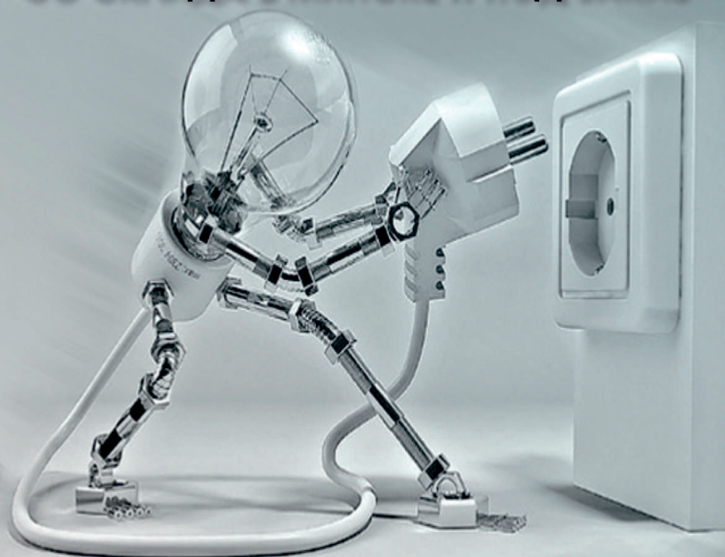
Факс: (375 17) 313-09-03

(375 17) 265-40-47

E-mail: darveyt@mail.ru
www.darveyt.by

ООО «Дарвейт»

223053, Республика Беларусь, Минский р-н, д. Боровляны, ул. 40 лет Победы, 17



ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКЕ
ФАКУЛЬТЕТА РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БЕЛГОСУНИВЕРСИТЕТА.
ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН В СПИСОК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ ВАК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

электроника
инфо

International magazine
of amateur and professional electronics
№12 (102) декабрь 2013

Зарегистрирован
Министерством информации
Республики Беларусь

Регистрационный №71
от 05 марта 2009 года

Главный редактор:
Раковец Леонид Иванович
electronica-info@yandex.ru

Заместитель главного редактора:
Асмоловская Ирина Михайловна
i.asmalouskaya@electronica.by

Редактор технический:
Бортник Ольга Викторовна

Редакционная коллегия:

Председатель:

Чернявский Александр Федорович
академик НАН Беларуси, д.т.н.

Секретарь:

Садов Василий Сергеевич, к.т.н.
e-mail: sadov@bsu.by

Члены редакционной коллегии:

Беляев Борис Илларионович, д.ф.-м.н.

Борздов Владимир Михайлович, д.ф.-м.н.

Голенков Владимир Васильевич, д.т.н.

Гончаров Виктор Константинович, д.ф.-м.н.

Есман Александр Константинович, д.ф.-м.н.

Ильин Виктор Николаевич, д.т.н.

Кугейко Михаил Михайлович, д.ф.-м.н.

Кучинский Петр Васильевич, д.ф.-м.н.

Мулярич Степан Григорьевич, д.т.н.

Петровский Александр Александрович, д.т.н.

Попечиц Владимир Иванович, д.ф.-м.н.

Рудницкий Антон Сергеевич, д.ф.-м.н.

Отдел рекламы и распространения:

Антоневич Светлана Геннадьевна
тел./факс: +375 (17) 204-40-00
e-mail: s.antonovich@fek.by

Учредитель:

ТЧУП «Белэлектронконтракт»
220015, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Пушкина, 29 Б,
тел./факс: +375 (17) 210-21-89,
+ 375 (17) 204-40-00

© Перепечатка материалов, опубликованных
в журнале «Электроника инфо», допускается
с разрешения редакции

За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несет

Подписной индекс в РБ:
00822 (индивидуальная),
008222 (ведомственная)

Цена свободная

Подготовка, печать:

150 экз. отпечатано
тип. ООО «Полиграфт»
г. Минск, ул. Кнорина, 50/4-401А
Лицензия №02330/0494199 от 03.04.2009 г.
Подписано в печать 04.12.2013 г.
Заказ №

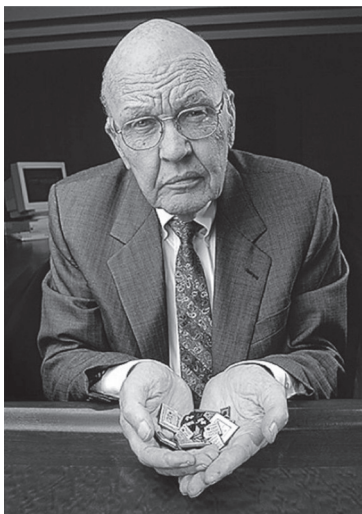
СЛАВНЫЕ ИМЕНА МИКРОСХЕМА, КОТОРУЮ ПОСТРОИЛ ДЖЕК.....	2
ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КАК СОЗДАВАЛАСЬ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА.....	5
С ПРАЗДНИКОМ! ДЕНЬ ЭНЕРГЕТИКА.....	7
НАШИ ИНТЕРВЬЮ «ПРОГРЕСС» В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СБИС.....	9
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБИС ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБИС ТИПА «СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ». МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. СИНТЕЗ СХЕМЫ. ЧАСТЬ 1 В. Стешенко, А. Руткевич, Е. Гладкова, Г. Шишкин, Д. Воронков.....	14
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБИС ТИПА СНК. МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. СИНХРОНИЗАЦИЯ И ТАКТОВЫЕ ДЕРЕВЬЯ. ЧАСТЬ 2 В. Стешенко, А. Руткевич, Е. Гладкова, Г. Шишкин, А. Бумагин, А. Гондарь.....	20
ЯЗЫК SYSTEMVERILOG. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБИС И СИСТЕМ А. Пеженков, Д. Радченко.....	26
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЕ СТАТЬИ	29-53
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОРФОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР PTSi/Si, СФОРМИРОВАННЫХ НА АМОРФНОМ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ О.Ю. Наливайко, А.С. Турцевич, К.В. Чиж, В.Я. Резник, В.А. Юрьев, С.А. Миронов, А.Г. Новиков, П.И. Гайдук.....	29
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В КАЧЕСТВЕ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ Н.В. Концевой, В.С. Садов.....	32
ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЛАЗЕРОФОРЕЗА Т.А. Железнякова, А.А. Рыжевич, С.В. Солоневич.....	36
РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ П.В. Тивунов, К.М. Шестаков.....	43
УСТАНОВКА ДЛЯ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ А.Т. Оганесян, Н.Н. Петросян, Г.И. Питкевич.....	50
ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ И ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ В МОБИЛЬНЫХ ПРОЕКТОРАХ И СКАНЕРАХ. НОВЫЙ ЭТАП ЭВОЛЮЦИИ С. Сысоева.....	54
ПРАЙС-ЛИСТ	64

СПИСОК РЕКЛАМОДАТЕЛЕЙ

«Алнар».....	64	«Чип электроникс».....	64
«Альфалидер групп».....	64	«ЭкоСнабГрупп».....	13
«Барс-электроникс».....	49		
«БелПлата».....	49	Обложки, цветные вставки	
«Вектор технологий».....	8	«Альфачип ЛТД».....	IV вст.
«ГорнТрейд».....	42	«Дарвейт».....	II обл.
«Минский часовой завод».....	28	«МинскЭкспо».....	III вст.
«Нанотех».....	4	«Рейнбоу».....	III обл.
«Приборостроительная компания».....	64	«Фаворит-ЭК».....	II вст.
«Промтехсервиснаб».....	42	«ФЭК».....	I обл., I вст.
«СветЛед решения».....	64	«Электроконтинент».....	IV обл.
«Тиком».....	4	«Элтмикон».....	IV обл.
«ФЭК».....	64		

МИКРОСХЕМА, КОТОРУЮ ПОСТРОИЛ ДЖЕК

Жарким летом 1958 года в рабочем лабораторном журнале Джека Килби, молодого сотрудника Texas Instruments, появилась историческая запись, которая открыла новую эпоху в электронике. Много лет спустя в своей Нобелевской лекции он говорил: «24 июля 1958 года я сформулировал «идею монолита» (the Monolithic Idea), как ее в дальнейшем стали называть. В этой записи утверждалось, что элементы схемы, такие как резисторы, конденсаторы, распределенные конденсаторы и транзисторы, могут быть интегрированы в одну микросхему при условии, что они будут сделаны из одного материала. Успехи интегральной электроники последующих сорока лет значительно превосходили все, что было достигнуто ранее, на протяжении 400 лет, прошедших после того, как Вильям Гильберт впервые употребил слово «электричество».



«У меня было ощущение, что транзистор указывает путь в будущее, и я хотел в этом участвовать».

Дж. С. Килби
(Нобелевская лекция, Стокгольм, 8 декабря 2000 г.)

Джек Килби родился в 1923 году в городке Грейт-Бенд (штат Канзас), получившем свое название потому, что был построен в середине штата – там, где река Арканзас делает крутой поворот. Его отец был управляющим небольшой электростанции, клиенты которой жили в малонаселенной сельской западной части штата Канзас. Однажды сильная зимняя буря повалила много столбов, несущих телефонные провода и линии электропередачи, и отец, воспользовавшись радиолюбительской связью, установил контакт с районами, оставшимися без телефона и электричества. В то время еще школьник, Джек Килби был поражен тем, какой замечательной вещью является радиосвязь. Этот случай пробудил его интерес к электронике, и тогда же он осознал, что это именно та область деятельности, которой ему хотелось бы заниматься.

После средней школы Килби изучал электротехнику в Иллинойском университете, посещал также лекции по электровакуумным приборам и радиофизике.

Университет он закончил в 1947 году – за год до того, как компания Bell Labs объявила об изобретении транзистора. Следуя своим интересам, сформировавшимся еще в Грейт-Бенде, поступил на предпринятие в Милуоки (штат Висконсин), изготавливающее детали для радиоприемников, телевизоров и слуховых аппаратов. В Висконсинском университете получил степень магистра по специальности «электротехника».

В 1958 году Килби переехал в Даллас (штат Техас) и устроился в корпорацию Texas Instruments, где ему поручили работу по миниатюризации электронных устройств. Здесь он и сделал свое гениальное изобретение.

«В начале 1950-х годов, – отмечал Килби в Нобелевской лекции, – англичанин Джефф Даммер (Geoff Dummer) из Royal Radar Establishment выдвинул идею, что всю электронику можно собрать в виде единого блока. При этом говорилось об использовании слоев, работающих в качестве усилителя, сопротивления и т.п. Электрические соединения можно было бы тогда реализовать простым вырезанием площадок в различных слоях. Предложение было замечательное, однако, Даммер не указал способа, как все это сделать.

В 1956 году Даммер подписал небольшой контракт с некой британской фирмой на создание подобного устройства, но у них ничего не получилось, в частности, потому что они работали с технологией транзисторов на р-п-переходе и затем пытались связать различные слои.

Хотя Даммер потерпел неудачу, он был на правильном пути. Объемное сопротивление самого полупроводника и емкость р-п-перехода внутри него можно было скомбинировать с транзисторами и создать завершенную схему из одного и того же материала. «Моя заслуга в том, что я взял эту идею и превратил ее в реальность».

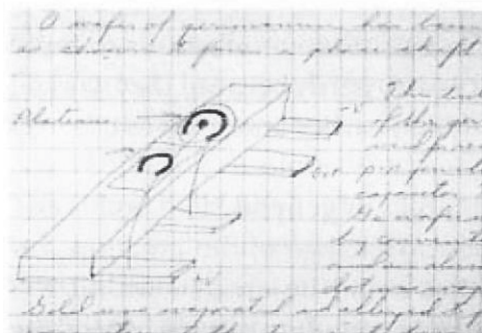
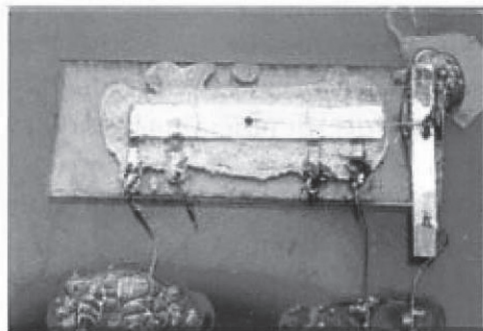


Рисунок 1

Первая работающая микросхема (рисунок 1) представляла собой генератор с фазовым сдвигом – популярный в то время объект для демонстрации функционирования линейных схем.

Вот как Дж. Килби описал процесс создания первой микросхемы: «Техники Пат Харбрехт (Pat Harbrecht) и Том Ярган (Tom Yeagan) разрезали пластины на бруски размером приблизительно 0,12×0,4. Соединение с объемными резисторами обеспечивалось металлическими контактами, припаянными к задней стороне брусков. Парафин наносился вручную, чтобы закрыть мезаструктуры: одну – для транзистора и другую, большую, – для области с диффузионным распределением примесей, образующей распределенную резистивно-емкостную цепочку.

12 сентября 1958 года завершилось изготовление первых трех генераторов этого типа. Когда было приложено напряжение, в первом из контуров возникла генерация на частоте 1,3 МГц.

Я быстро набросал конструкцию триггерной схемы, все элементы которой должны были выполняться из кремния. Резисторы использовали объемное сопротивление кремния, а конденсаторами служили емкости р-п-переходов.

Аналогичным способом был изготовлен триггер. Его испытания прошли 19 сентября».

В октябре команда Килби приступила к разработке новой, германиевой интегральной триггерной схемы. «Это была первая схема, – вспоминает Килби, – создаваемая «с нуля», полностью в одном куске полупроводника. Были использованы объемные резисторы, конденсаторы на р-п-переходах и мезатранзисторы. Изготовление первых работающих образцов завершилось в начале 1959 года, и уже в марте они были представлены на публичной презентации идеологии «монолитных твердотельных схем».

Сейчас в это трудно поверить, но в 1959 году, когда мы начали пропагандировать свои достижения, а компания Fairchild рекламировала нововведения Нойса, эти идеи весьма активно критиковались.

Имелось три главных возражения. Например, считалось, что практический выход пригодных изделий будет столь низким, что новая технология никогда не принесет выгоды (надо помнить, что в то время должным образом работали менее 10 % всех изготавливаемых транзисторов). Другая группа утверждала, что мы используем неподходящие материалы, поскольку лучшие резисторы и конденсаторы делались тогда отнюдь не из полупроводников. Кроме того, истинные «транзисторщики» не хотели видеть на микросхеме свои элегантные устройства вперемешку с остальной «дребеденью». Эти сомнения было трудно оспаривать, так как по сути своей они являлись обоснованными. Наконец, многие сотрудники больших компаний полагали, что если полупроводниковая технология окажется успешной, то проектировщики схем во всем мире останутся без дела. В действительности, конечно, занятость проектировщиков с течением времени только возрастала, но их работа стала совсем другой, чем в эпоху транзисторов».

Даже такой гигант транзисторных технологий, как Джек Мортон (Jack Morton) – вице-президент отдела электронной техники в Bell Labs (в Мюррэй Хилл, Нью-Джерси), под руководством которого сотрудникам лаборатории удалось превратить транзистор из многообещающего опытного образца в надежный товарный продукт, был активным противником разработки и внедрения микросхем («Bell Labs: упущенная возможность, или Роль личности в технологии»).

Он недооценил потенциал микрокристаллов и БИС (больших интегральных схем) и был убежден в «тирании больших чисел», полагая, что с ростом количества транзисторов на кристалле процент выхода годных интегральных микросхем станет неприемлемо низким. По его мнению, даже при том, что каждый отдельный компонент (чаще всего транзистор) мог бы производиться с выходом 99 %, это число следует умножить на количество компонентов в интегральной схеме, что должно привести к неприемлемо низкому выходу работающих микросхем. «Это эффект множества яиц: чем больше вы их накладываете в корзину чипа, тем вероятнее, что он будет плохой». И надежность страдала бы также, думал Мортон. А поскольку он занимал высокий пост (в 1958 году стал вице-президентом компании), то в начале 1960-х его мнение определяло направление исследований в Bell Labs.

Однако военные программы этого периода – подготовка полета космического корабля «Аполлон» на Луну и создание ракеты «Минитмен» – значительно ускорили разработки микросхем. С 1964 года интегральные схемы стали использоваться и в коммерческих изделиях. Килби и возглавляемая им группа создали также на основе этой технологии первую в мире военную систему и первый компьютер.

Если простейшие чипы состояли из десятка элементов, то к 1970 году микросхемы включали до 10 тыс. элементов, а после 50 лет развития, сегодня – свыше десяти миллиардов.

Этот прогресс сопровождался также быстрым удешевлением электронных устройств: если в 1958 году один транзистор стоил около 10 долл. США, то сегодня приблизительно за ту же цену можно купить микросхему с более чем ста миллионами транзисторов.

На экспоненциальный характер развития микроэлектроники (рисунок 2) обратил внимание Гордон Мур. В 1965 году он, тогда директор отдела исследований и развития в фирме Fairchild Semiconductor, а затем один из основателей Intel, написал для журнала «Electronics» статью «Втискивая еще больше компонентов в интегральные схемы». В статье Мур отметил, что количество транзисторов на чипе при минимальной их стоимости за год возрастает примерно вдвое. Это наблюдение стало известно как закон Мура. Позже закон был исправлен: число компонентов на ИС удваивается каждые 18-24 месяца.

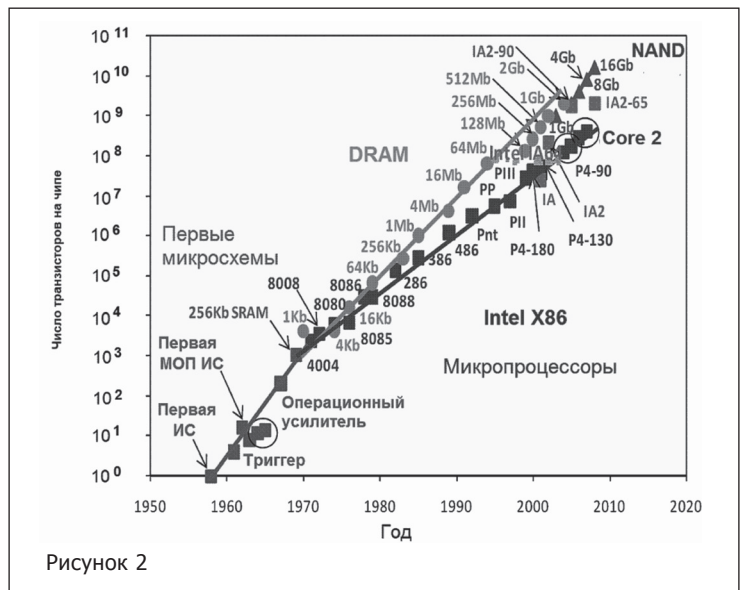


Рисунок 2

В 1975 году была опубликована вторая статья Мура – «Прогресс в цифровой интегральной электронике», рассматривающая достижения прошедших десяти лет. Теперь он анализировал уже вышедшие на рынок ИС. Оказалось, что число транзисторов в них действительно примерно удваивалось каждый год! Многие исследователи проверяли закон Мура и пришли к выводу, что период удвоения различен для разных параметров. Так, для микропроцессоров без учета кэш-памяти он составляет примерно 2 года и 3 месяца, а с учетом – 2 года. Плотность транзисторов на кристалле и производительность микропроцессоров возрастает вдвое каждые 20 месяцев, а тактовая частота – за 2 года и 1 месяц. Прогнозы аналитиков предусматривают качественное изменение электронных компонентов в силу достижения естественных физических пределов стандартными технологиями уже в обозримом будущем (рисунок 3).

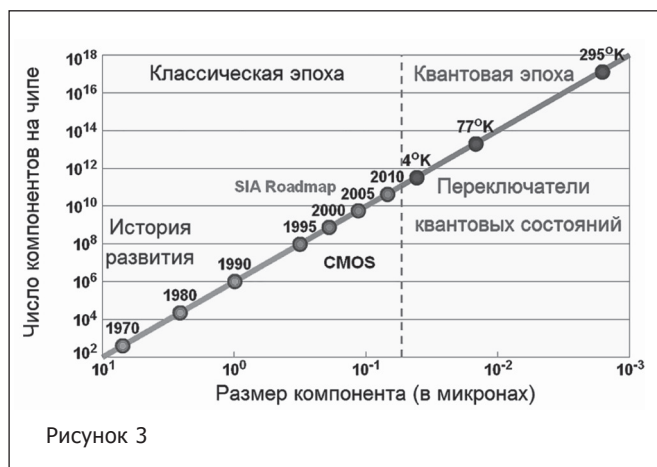


Рисунок 3

Ряд подходов для преодоления подобных ограничений предполагает использование, среди прочего, квантовых компьютеров и молекулярных переключателей. Многие считают, что с достижением этих нанометровых масштабов химически созданные структуры заменят нынешние рисованные и вытравленные.

Специалисты в области технологии единогласно причисляют Джека Килби к когорте великих новаторов-изобретателей. За свою жизнь он получил две самые престижные награды США: в 1970 году Национальную научную медаль и в 1982 году был занесен в списки американского Национального зала славы исследователей, наряду с Фордом, Эдисоном и братьями Райт, а также был удостоен Нобелевской премии в 2000 году.

Высоко отзывался о работах Джека Килби вице-президент фирмы Texas Instruments Фил Риттер: «Мы – не только наша компания, но и все общество – в неоплатном долгу перед ним и его изобретениями. Мы с благодарностью вспоминаем всю его жизнь».

Изобретением монолитной интегральной схемы – микрочипа – Килби заложил концептуальный и технический фундамент для широчайшей области современной микроэлектроники. От его первой простой схемы, которую он создал, работая в TI в 1958 году, начал развиваться мировой рынок интегральных схем, объем продаж которого в 2006 году достиг 210 млрд долл. США, а вместе с конечным оборудованием – 1402 млрд.

Джек Килби умер в 2005 году. Благодарные потомки планируют установить в городе Грейт-Бенд, где он родился,

на площади, уже носящей его имя, монумент «Дар», проект которого разработал местный скульптор Чет Кейл (Chet Cale) (рисунок 4).

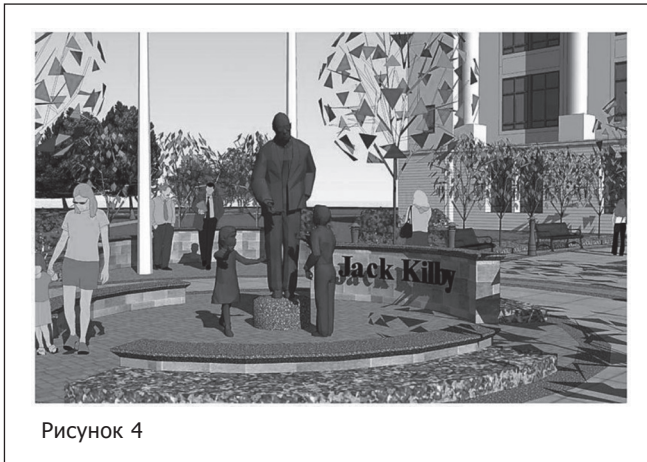


Рисунок 4

Проект включает три бронзовые фигуры, выполненные в масштабе 1,25 к реальным размерам. Фигура Килби высотой приблизительно 2,44 м будет стоять на цилиндрическом каменном основании. В руке он держит микрочип, который дарит мальчику. Справа от Килби маленькая девочка нетерпеливо протягивает руку к своему старшему компаньону. Идея скульптуры – передача знания одним поколением следующему, что и символизирует микрочип в руке Килби.

Проектная стоимость монумента – около 400 тыс. долл. США. Общественность активно включилась в сбор средств, а недавно один из спонсоров, пожелавший остаться неизвестным, перевел на счет комитета по созданию памятника 150 тыс. долл. США.

ko.com.ua

Программаторы

для любых микросхем

SEEPROM SEEPROM SEEPROM SEEPROM SEEPROM SEEPROM SEEPROM SEEPROM
 EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM EEPROM
 EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM EPROM
 FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH FLASH
 PIC
 MCU
 PAL

+375 (17) 266-32-09 www.chipstar.ru

НАНОТЕХ

ООО «Нанотех»
г. Минск, ул. Седых 12А, пом. 2Н

- Монтаж печатных плат (автоматический и ручной)
- Печатные платы (одно-, двухсторонние, многослойные, на алюминии)
- Трафареты для пасты (лазерной резкой из нержавеющей стали)
- Паяльные пасты (безотмывочные, канифольные, водосмываемые, и др.)

pcb@pcb.by тел: +375 17 237 29 34
 www.pcb.by тел: +375 17 237 29 35
 тел/факс: +375 17 237 29 36
 тел/факс: +375 17 281 35 36

КАК СОЗДАВАЛАСЬ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА

Д. Мурин

История создания интегральной схемы – типичный пример воплощения европейской мечты за океаном.

Самая престижная научная награда, Нобелевская премия по физике, обычно вручается ученым, которые внесли наибольший вклад в области фундаментальных исследований. Поэтому присуждение премии 2000 года американскому инженеру-электротехнику Джеку Килби за работы прикладного характера вызвало немалое удивление в научном сообществе. Однако удивление быстро сменилось осознанием того, что изобретение интегральной схемы представляет собой великолепный пример использования результатов фундаментальных исследований для создания новых инструментов, которые, в свою очередь, позволяют получать новые фундаментальные результаты.

Истоки

В начале 50-х годов представители оборонного и космического ведомств США первыми задумались над пределами прогресса ламповых систем. И стали оказывать сначала осторожно, а потом все более активно финансовую поддержку проектам, направленным на построение полностью интегрированных электронных систем из твердотельных компонентов. Это стало началом заката «ламповой эры», но философия электронной интеграции не претерпела существенных изменений и по-прежнему напоминала философию построения предложения. В электронике, как в человеческой речи, есть массив стандартных элементов, различающихся по своим функциональным особенностям: фраза всегда состоит из существительных, прилагательных, глаголов, причастных оборотов, а электронная схема – из емкостей, сопротивлений, триодов и диодов. Комбинируя эти элементы, можно придавать фразе тот или иной смысл, а схеме «поручать» решение тех или иных задач.

Твердотельными компонентами должны были стать транзисторы. Самые первые были изготовлены из монокристаллического германия и лишь значительно позже, к середине 50-х годов, когда в Texas Instruments была решена проблема роста монокристаллического кремния, транзисторы стали изготавливаться из этого кремния. Это само по себе сразу же стало коммерчески выгодным предприятием, несмотря на достаточно высокую по тем временам их стоимость (около 10 долл. за штуку).

1951 год ознаменовался тем, что Bell Labs провела свою первую конференцию по транзисторам и начала продавать патентные лицензии стоимостью 25 тыс. долл. на транзисторные технологии. Заинтересовались лицензией и в компании Centralab, где Килби и сделал первые шаги в направлении «германиевой» интеграции. Однако Centralab не была той компанией, деятельностью которой – производство слуховых аппаратов и пассивных телевизионных схем – могла бы заинтересовать военных в 1956 году, когда рынок военных кремниевых технологий становился перспективным. Неизмеримо большими возможностями обладала Texas Instruments, где Килби проработал без малого 45 лет и в стенах которой в рамках военного заказа были созданы первые кремниевая и германиевая интегральные схемы.

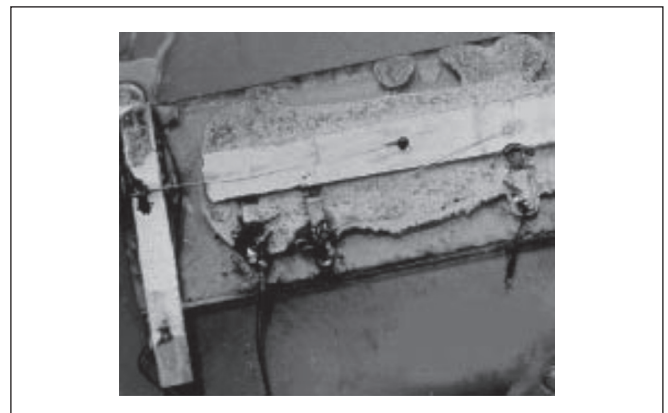
Идея

Еще в конце 40-х годов в Centralab были разработаны основные принципы миниатюризации и созданы ламповые толстопленочные гибридные схемы. Схемы выполнялись на единой подложке, а зоны контактов или сопротивления получались простым нанесением на подложку серебряной или типографской угольной краски. Когда же стала развиваться технология германиевых сплавных транзисторов, в Centralab было предложено монтировать бескорпусные приборы в пластиковую или керамическую оболочку, чем достигалась изоляция транзистора от окружающей среды. На этой основе можно было уже создавать транзисторные гибридные схемы, «печатные платы». Но, по сути дела, это был прообраз современного решения проблемы корпусирования и выводов интегральной схемы.

К середине 50-х годов Texas Instruments имела все возможности для производства дешевых полупроводниковых материалов. Но если транзисторы или диоды изготавливались из кремния, то резисторы в ТИ предпочитали делать из нитрида титана, а распределенные емкости из тефлона. Неудивительно, что многие тогда полагали, что при накопленном опыте создания гибридных схем нет проблем в сборке этих элементов, изготовленных по отдельности. А если удастся изготовить все элементы одинакового размера и формы, и тем самым автоматизировать процесс сборки, то стоимость схемы будет значительно снижена. Этот подход очень напоминает предложенный Генри Фордом процесс конвейерной сборки автомашин.

Таким образом, в основе доминировавших тогда схемных решений лежали различные материалы и технологии их изготовления. Но англичанином Джеффом Даммером из Royal Radar Establishment в 1951 году было выдвинуто предположение о создании электроники в виде единого блока при помощи полупроводниковых слоев одного и того же материала, работающих как усилитель, резистор, емкость и соединенных вырезанными в каждом слое контактными площадками. Как это сделать практически, Даммер не указал.

Собственно, отдельные резисторы и емкости можно было делать из того же кремния, однако, это было бы довольно дорогое производство. Кроме того, кремниевые резисторы и емкости были бы менее надежны, чем компоненты, изготовленные по стандартным технологиям и из привычных материалов,



тех же нитрида титана или тефлона. Но так как все же имелась принципиальная возможность изготовить все компоненты из одного материала, то следовало бы подумать об их соответствующем электрическом соединении в одном образце.

24 июля 1958 года Килби сформулировал в лабораторном журнале концепцию, получившую название «Идеи монолит» (Monolithic Idea), в которой было указано, что «...элементы схемы, такие как резисторы, конденсаторы, распределенные конденсаторы и транзисторы, могут быть интегрированы в одну микросхему при условии, что они будут выполнены из одного материала... В конструкции триггерной схемы все элементы должны изготавливаться из кремния, причем резисторы будут использовать объемное сопротивление кремния, а конденсаторы – емкости р-п-переходов».

Заслуга Килби – в практической реализации идеи Даммера.

Реализация

«Идея монолита» встретила снисходительно-ироничное отношение со стороны руководства Texas Instruments, где потребовали доказательств того, что подобная схема будет работоспособна.

Чтобы представить необходимые доказательства, прежде всего следовало убедиться в том, что будет работать схема, составленная из отдельных кремниевых элементов – транзистора на р-п-переходе, резисторов, нарезанных из стерженьков, и конденсаторов из пластины, которая была металлизирована с обеих сторон. Собранный прибор был продемонстрирован руководству компании в конце августа 1958 года. К удивлению присутствующих, он оказался вполне сносно работающим. Но это еще не была интегральная структура, скорее это была миниатюризированная «квазигибридная» схема.

Первой же действительно интегральной схемой, выполненной «с нуля», в одном куске полупроводника, оказалась германиевая триггерная схема. Здесь уже были использованы и объемное сопротивление Ge, и емкость р-п-перехода. Ее презентация состоялась в начале 1959 года. Вскоре Робертом Нойсом из Fairchild Semiconductor были продемонстрированы преимущества планарного технологического процесса.

Как Килби, так и Нойсу, пришлось выслушать немало критических замечаний по поводу своих новаций. Считалось, что практический выход интегральных схем будет очень низким, потому что всего 15 % изготавливаемых в то время транзисторов имели необходимый ресурс надежности. Во-вторых, многие полагали, что в интегральных схемах используются неподходящие материалы, поскольку лучшие электронные компоненты тогда делались отнюдь не из полупроводников.

Все сомнения были отброшены, когда интегральные схемы были успешно использованы в военных программах США, в программах подготовки полета космического корабля «Аполлон» на Луну и разработки ракеты «Минитмен». В 1964 году был создан первый портативный калькулятор на интегральных схемах. Началось их коммерческое использование, чем и было окончательно продемонстрировано их право на существование.

Как делают микросхемы?

Что может быть проще, чем обычный песок, и что может сравниться по сложности с компьютерными микросхемами? Между тем, кремний как раз и является исходным материалом для производства интегральных схем, которые сегодня

управляют всеми электронными устройствами, начиная от суперкомпьютеров и заканчивая сотовыми телефонами и микроволновыми печами.

Превращение песка в крошечные устройства, включающие в себя миллионы компонентов, – величайшее достижение ученых и инженеров, казавшееся совершенно невозможным всего полвека тому назад, до изобретения в 1947 году сотрудниками лаборатории Bell Labs транзистора. Кремний – естественный полупроводник. При определенных условиях он способен проводить электричество, в других же случаях выступает в роли изолятора. Электрические свойства кремния можно изменять, добавляя в него различные примеси. Этот процесс называется легированием. Подобные добавки превращают кремний в идеальный материал для изготовления транзисторов – простейших устройств, видоизменяющих электрические сигналы. Транзисторы могут также выполнять функции переключателей, комбинация которых позволяет реализовать логические операции «и», «или», «не».

Микросхемы выпускаются на заводах, в строительство которых необходимо вложить многие миллиарды долларов. На заводе песок плавится и очищается, превращаясь в однородные слитки кремния с чистотой 99,9999 %. Специальные ножи разрезают слитки на пластины толщиной с мелкую монету и диаметром в несколько дюймов. Пластины очищаются и шлифуются. Каждая из них служит для изготовления множества микросхем. Этот и последующий этапы выполняются в так называемой «чистой» комнате, в которой особо тщательно следят за отсутствием пыли и других инородных тел.

Непроводящий слой диоксида кремния на поверхности кремниевой пластины расширяется и покрывается светочувствительным химическим соединением.

Это соединение (фоторезист) подвергается воздействию ультрафиолетового облучения через специальный шаблон, или маску, для закрепления участков, обработанных излучением. Необработанные области протравливаются горячим газом, который обнажает подложку диоксида кремния, находящуюся внизу. Подложка и нижний слой кремния вытравливаются для получения пластины нужной толщины.

Фоторезист, задействованный в процессе фотолитографии, впоследствии удаляется, оставляя на микросхеме рельефные выступы, конфигурация которых повторяет схему цепи, представленную в маске. Электрическую проводимость отдельных компонентов микросхемы также можно изменить за счет легирования их специальным химическим составом при высокой температуре и давлении. Процедура фотолитографии с использованием различных масок, за которой следует вытравливание и легирование, повторяется для каждой микросхемы многократно. Таким образом, на каждом этапе мы получаем все более сложную интегральную схему.

Для формирования проводников, которые связывают отдельные компоненты, вытравленные ранее на микросхеме, она покрывается тонким слоем металла (как правило, это алюминий или медь). После этого путем литографии и вытравливания удаляется весь металл, за исключением тоненьких проводников. Иногда на микросхему накладывается несколько слоев проводников, разделенных стеклянными изоляторами.

ДЕНЬ ЭНЕРГЕТИКА

22 декабря в Республике Беларусь отмечается День энергетика – профессиональный праздник работников энергетической отрасли.

Праздник был установлен в мае 1966 года по Указу Президиума Верховного Совета СССР в память о принятии ГОЭЛРО – Государственного плана электрификации России, что произошло 22 декабря 1920 года. План, принятый на VIII Всероссийском съезде Советов, подразумевал строительство 30 электростанций на территории Советского Союза и был рассчитан на 15 лет. Однако данный план был выполнен уже к 1931 году. План ГОЭЛРО в значительной степени помог СССР занять лидирующие позиции в мировой экономике, дав мощный толчок для развития народного хозяйства страны.

В 1980 году по Указу Президиума Верховного Совета СССР для празднования Дня энергетика была установлена другая дата – третье воскресенье декабря.

В нашей республике День энергетика стал отмечаться по Указу президента Республики Беларусь от 27 ноября 1995 года.

Энергетическая безопасность страны – главная составляющая независимости государства. Энергетический комплекс страны является одной из ключевых, стратегически важных отраслей экономики. В Белорусской энергетической системе, других отраслях народного хозяйства активно реализуются мероприятия по нара-



щиванию объемов использования местных видов топлива, что позволит снизить зависимость республики от импорта энергоносителей. В 2010 году принята Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь на 2011–2015 годы и на период до 2020 года, основная цель которой – повышение уровня энергетической безопасности страны.

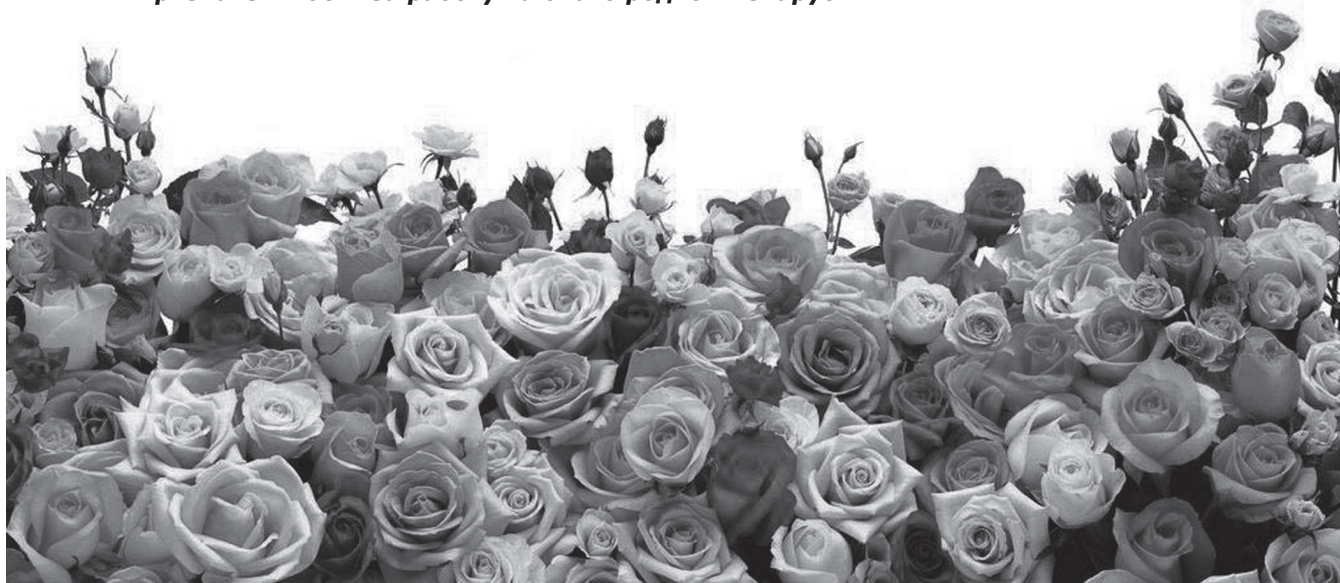
В настоящее время значительно возрос интерес к возможности использовать экологически чистые энергетические источники, такие как солнечная энергия и воздух. Исследования в этой области задают новое направление в развитии энергетики.

Жизнь современного человека немыслима без электричества и тепла. Плоды работы энергетиков ощутимы в повседневной жизни каждого россиянина. Именно работники энергетической отрасли обеспечивают уют и комфорт в жилых помещениях, рабочих офисах, аудиториях учебных заведений, больницах, различных учреждениях и т.д.

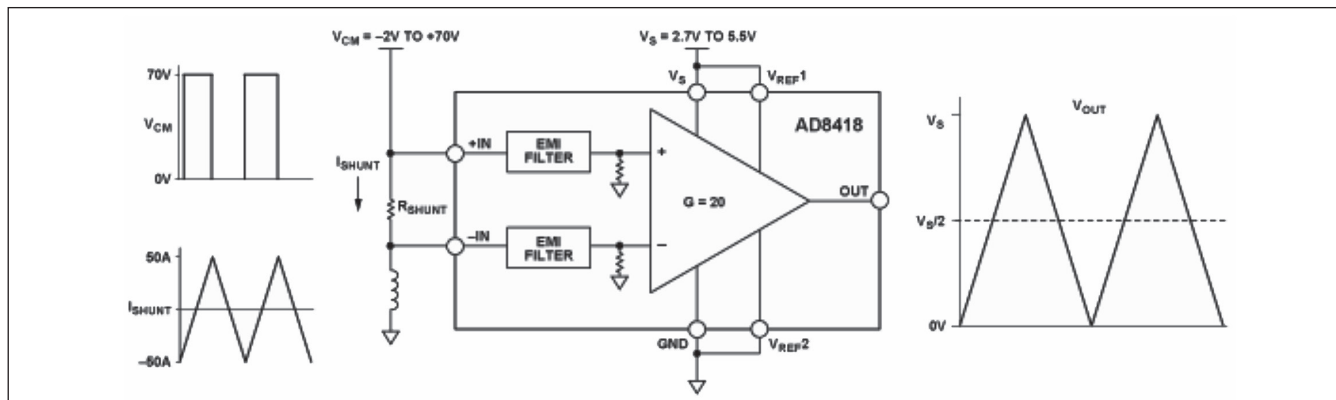
В День энергетика всем работникам энергетической отрасли выражается благодарность за их участие в создании комфортной жизни белорусов и за вклад в экономическое развитие всей страны. Лучшим энергетикам по традиции в этот день вручают грамоты, награды и ценные подарки.

Вместе с Беларусью День энергетика 22 декабря справляют Россия, Украина, Армения и Кыргызстан.

Редакция журнала «Электроника инфо» сердечно и искренне поздравляет всех энергетиков с этим знаменательным праздником. Людям одной из самых приоритетных отраслей народного хозяйства, которой принадлежит ключевая роль в стабильном развитии страны, мы выражаем благодарность и сердечные слова признательности за работу на благо родной Беларуси.



УСИЛИТЕЛЬ С НУЛЕВЫМ ДРЕЙФОМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДВУНАПРАВЛЕННЫХ ТОКОВ



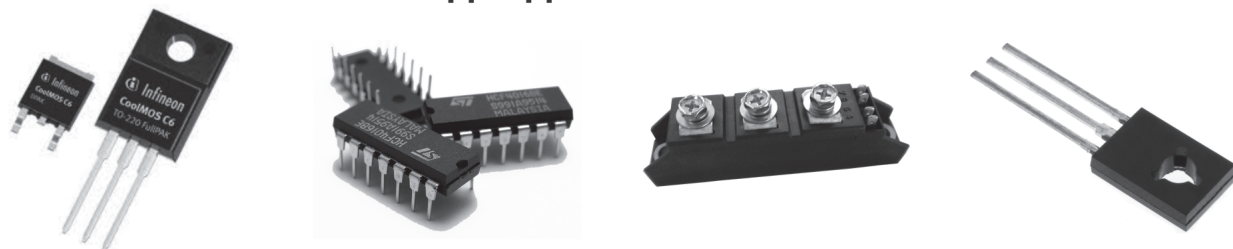
Высоковольтный усилитель-измеритель тока с высоким разрешением AD8418 предназначен для измерения двунаправленных токов через шунтирующий резистор в разнообразных областях применения, включая управление электрическими двигателями, контроль состояния аккумуляторных батарей и управление соленоидами. Его буферизированный выходной сигнал можно без применения дополнительных схем подавать на большинство АЦП. Компонент обладает коэффициентом ослабления синфазного сигнала 100 дБ в диапазоне от -2 В до +70 В, коэффициентом усиления, равным 20, и максимальной погрешностью усиления в диапазоне рабочих температур $\pm 0,15\%$. Благодаря архитектуре с нулевым дрейфом он под-

держивает напряжение смещения не хуже ± 200 мкВ и дрейф в пределах $0,1$ мкВ/°С в диапазоне рабочих температур и синфазных напряжений. Компонент полностью испытан на соответствие требованиям автомобильной промышленности, содержит фильтры электромагнитных помех и патентованную схему, которая гарантирует высокую точность выходного сигнала при широтно-импульсной модуляции синфазных напряжений. AD8418 работает с напряжением питания в диапазоне от 2,7 В до 5,5 В, потребляя 2,6 мА. Компонент выпускается в 8-выводных корпусах MSOP и SOIC, рабочий температурный диапазон составляет от -40°С до +125°С.

Альфачип ЛТД

VECTOR OF **A** TECHNOLOGIES

**Поставка электронных компонентов со склада и под заказ:
тиристорные модули, транзисторные модули,
микросхемы, диоды, транзисторы,
диодные мосты.**



**Компания «Вектор Технологий»
также является официальным дистрибьютором
на территории Республики Беларусь компаний
SICK, YASKAWA, DATALOGIC, STEUTE, FOTEK, WEG и VIPA.**

Наши специалисты с радостью помогут решить ваши задачи.
Tel: +375-17-265-60-15, fax: +375-17-265-60-16, mob: +375-29-685-60-15.
info@vec-tech.by, web: <http://www.vec-tech.by>

«ПРОГРЕСС» В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СБИС

Владимир Георгиевич Немудров – профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, главный конструктор САПР СБИС «система на кристалле» РАСУ, с 1989 года возглавляет Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры (НИИМА) «Прогресс». В 70-х годах Владимир Георгиевич в НИИМЭ впервые в стране разработал методы логико-схемотехнического проектирования



цифровых быстродействующих БИС, на основе которых были созданы хорошо известные серии сверхбыстродействующих ИС 100, 500 и 700. Он был одним из основных создателей в начале 80-х годов отраслевого центра автоматизированного проектирования БИС в Минпромсвязи – предшественника НИИМА «Прогресс». Неудивительно, что сегодня именно на его плечи легла непростая задача создания инфраструктуры проектирования специализированных СБИС типа «система на кристалле» и весь комплекс сопряженных с этим проблем. Очевидно, что от эффективности решения данной задачи во многом зависит дальнейшая судьба российской электроники в целом.

– Владимир Георгиевич, почему именно ваше предприятие взяло на себя столь нелегкий груз – создание инфраструктуры проектирования СБИС нового уровня, так называемых систем на кристалле?

– НИИМА «Прогресс» сегодня – это отраслевой центр РАСУ. Но организован он был 15 лет назад как центр микроэлектроники в структуре Министерства промышленности средств связи (МПСС). Наше основное назначение – создание специализированных СБИС для телекоммуникации, радиосвязи, навигации, радиолокации и т.д. Институт пережил ряд ведомственных трансформаций, но постоянно оставался отраслевым центром по проектированию специализированных СБИС.

Специфика работы еще в рамках МПСС вынуждала постоянно контактировать с десятками аппаратостроительных предприятий различных ведомств, у нас в этом плане более широкий кругозор, чем у многих других организаций. Сложилось хорошие отношения с ведущими фирмами-поставщиками программных средств САПР – с Cadence, Synopsys, мы входим в VSIA-альянс, о котором я скажу отдельно, и потому имеем постоянный доступ к информации по новейшим разработкам в области методоло-

гии и средств САПР «система на кристалле». Теперь наш институт в РАСУ – отраслевой научный центр проектирования СБИС типа «система на кристалле» на основе субмикронной и глубокой субмикронной технологий. Видимо, поэтому именно на нас возложена функция межотраслевого центра, формирующего стратегию и тактику создания инфраструктуры проектирования СБИС нового поколения в рамках планируемой программы «Развитие технологий создания электронной компонентной базы» (в виде отдельной подпрограммы ФЦП «Национальная техно-

логическая база»). Сегодня это одна из первоочередных задач, поскольку очевидно, что подъем мощного полупроводникового производства требует значительно больших ресурсов и времени, чем создание современной инфраструктуры проектирования.

Наш институт всегда занимался разработкой конкретных проектов специализированных СБИС (ASIC), работали мы с отечественными и зарубежными фирмами. Только за последнее десятилетие спроектированы десятки СБИС на базе субмикронной и глубокой субмикронной технологий для систем передачи данных, радиосвязи по стандарту CDMA, для навигационных приемников GPS-Glonass и т.д.

В отличие от традиционного МЭПовского подхода (хотя сами мы в основном из МЭПа), когда внимание концентрировалось исключительно на микросхемах, наши разработчики всегда тесно взаимодействовали с разработчиками аппаратуры, которые выступали соразработчиками создаваемых нами СБИС. Такой подход ускоряет путь к конечным изделиям. Например, при создании комплекта СБИС для абонентской станции CDMA совместно с Воронежским НИИ связи (ВНИИС) наши разработчики одновременно с разработчиками аппаратуры моделировали кристаллы на системном уровне, отработывали идеологию построения тестов и т.п., причем на единых программно-аппаратных средствах. Именно это позволило завершить проект с первой итерации. Иными словами, мы апробировали новую методологию, когда разработчик аппаратуры проводит моделирование на системном уровне, отработку и верификацию проекта и выдает нам задание на языках описания VHDL или Verilog. Затем мы совместно отработываем тесты и воплощаем схему в кристалле. Реализуется трехуровневая структура: разработка аппаратуры (системный уровень) – проектирование кристаллов СБИС (кристальный уровень) – изготовление СБИС. Эту идеологию мы стараемся внедрить при создании новой инфраструктуры проектирования СБИС на ведущих предприятиях радиоэлектронного комплекса.

– Как подобная структура будет реализована в масштабах России?

– Если говорить о системном уровне, выбраны базовые фирмы – холдинги, так называемые интегрированные структуры, при которых создается сеть дизайн-центров системного уровня. Они должны заниматься разработкой изделий на системном уровне и выдавать техническое задание на разработку кристаллов. За нами – научно-техническая и методологическая координация взаимодействия этих центров и центров следующих уровней. Мы предлагаем сквозной маршрут проектирования, набор единых программно-аппаратных средств, нормативную базу проектирования, проводим обучение персонала. Надо подготовить аппаратостроительные фирмы, которые в последнее десятилетие используют в основном импортную элементную базу – стандартные ИС, процессоры, память – и в полной мере не готовы к выдаче и сопровождению заказов на специализированную высокоинтегрированную элементную базу. Этим вопросом сегодня мы и заняты.

– Но ведь подобный подход к разработке ИС применяют уже давно. Почему сегодня во всем мире стали говорить о новом уровне проектирования СБИС?

– Прежде всего, новизна в том, что СБИС «система на кристалле» (SOC – System on Chip) – это аппаратно-программная реализация на одном кристалле значительной (если не всей) функционально законченной части аппаратуры. Поэтому средства моделирования системного уровня как самой аппаратуры, так и кристаллов SOC одни и те же. За рубежом сейчас действуют сотни дизайн-центров при аппаратостроительных фирмах и масса отдельных дизайн-центров. И в них соразработчиками элементной базы выступают разработчики аппаратуры. Они либо доводят проект до net-листа, который передается разработчикам кристаллов, либо делают только системный проект до RTL-уровня (уровень регистровых передач).

Кроме того, поскольку система на кристалле – изделие не только очень сложное, но и дорогое при небольших объемах выпуска, ошибки проектирования должны быть исключены. Поэтому в новой методологии, кроме математического моделирования, необходим этап создания прототипа устройства на базе неких специальных аппаратно-программных платформ, которые сегодня так и называются – алгоритмически ориентированные платформы проектирования. Они содержат некий джентльменский набор элементов – ПЛИС (программируемые логические ИС), процессорные ядра, память, определенную шинную архитектуру, интерфейсы и т.д., которые позволяют создать прототип схемы до ее воплощения в СБИС. А дальше разработчик решает, остановиться ему на уровне ПЛИС или производить специализированные СБИС SOC.

– Насколько российские разработчики аппаратуры готовы к работе по такой схеме?

– Сегодня немногие отечественные аппаратостроительные фирмы обладают необходимым набором современных средств САПР и квалифицированных специалистов для решения подобных задач. Это, например, ВНИИС, РИРВ, РНИИКП, ряд других фирм, которые способны грамотно провести весь цикл функционально-системного моделирования и прототипирования, и выдать в необходимом формате задание на разработку кристалла СБИС SOC. Важно расширить данный

круг. Все аппаратостроительные фирмы должны обладать средствами системно-функционального уровня проектирования и уметь их грамотно использовать. Если мы решим эту задачу в ближайшее время, то совершим значительный шаг вперед.

– А что происходит на уровне разработки кристаллов?

– Здесь ситуация несколько лучше. Мы исходим из того, что определенная инфраструктура дизайн-центров кристалльного уровня уже существует. Правда, их недостаточно, на Западе и Юго-Востоке они исчисляются сотнями. При разработке специализированных СБИС требуются усилия дизайн-центров, специализирующихся в различных областях. Поэтому и за рубежом, и у нас велика потребность в узкоспециализированных дизайн-центрах. Само понятие проектирования СБИС SOC – это квинтэссенция схемотехников различного профиля.

Принципиально, что новая методология проектирования базируется на использовании так называемых сложных функциональных блоков (СФ-блоков). За рубежом их называют IP-блоки, т.е. блоки интеллектуальной собственности. СФ-блоки – это некие функционально законченные устройства (процессорные ядра, сигнальные процессоры, блоки жесткой логики, например, декодер Витерби, АЦП и т.д.), которые отработаны, верифицированы и аттестованы либо в кристалле, либо на ПЛИСах. Их можно многократно использовать при проектировании различных схем SOC. Разработчик аппаратуры, имея системные модели СФ-блоков, задействует их при проектировании своего устройства, тем самым, сокращая сроки разработки, увеличивая надежность и безошибочность проекта.

Сейчас очень важно разработать отечественную номенклатуру СФ-блоков, для этого привлечены такие известные фирмы, как «Элвис», «Ангстрем», «Микрон», ВНИИС, лаборатории вузов (прежде всего МИЭТ, МИФИ). Совместно мы отработываем методологию проектирования, создавая набор стандартов и нормативных документов, описывающих формирование СФ-блоков и их использование при проектировании. Библиотеки СФ-блоков наряду с созданными нашими «кремниевыми мастерскими» библиотеками микроэлементов позволяют сформировать базовую инфраструктуру для перехода к новой методологии по схеме: СФ-блоки – на верхнем уровне, микроблиотеки – на нижнем уровне, плюс сквозной САПР, включающий системный, функциональный, логико-схемотехнический и физический уровни проектирования.

Кроме того, СФ-блоки – рыночный товар. На Западе бизнес СФ-блоков в этом году оценивается на уровне свыше 10 млрд долл. США только от продаж. Например, хорошо известные процессорные ядра ARM7, ARM9 компании ARM стоят порядка сотен тысяч долларов для разового использования. Сотни фирм вовлечены в эту индустрию, причем многие из них – совсем небольшие.

Более пяти лет назад я был на одном, можно сказать, историческом электронном форуме в Европе. Там собрались первые-вторые лица ведущих фирм – Intel, Texas Instruments, Motorola, Ericsson, Hitachi и т.д. – как полупроводниковых, так и аппаратостроительных. Что они обсуждали? Они констатировали, что наступила новая эра создания систем на кристалле и необходима новая методология проектирования SOC и новый алгоритм взаимодействия разработчиков систем

и аппаратуры, собственно разработчиков СБИС SOC, а также производителей микросхем. Компании договаривались об обмене интеллектуальной собственностью в виде IP-блоков. Была образована специальная международная ассоциация Virtual Socket Interface Alliance (VSIA), куда вступил и НИИМА «Прогресс» – пока единственный от России. Задача этого альянса – формировать методологию проектирования SOC, стандарты на описание СФ-блоков и микроблиотек, маршруты проектирования СБИС SOC. Тем самым обеспечивается единая информационная среда общения между различными фирмами. Казалось бы, такие мастодонты, как Motorola или Intel, могут все сами – нет, им также необходим интеллектуальный опыт и услуги других фирм. Проще и эффективнее что-то оперативно заимствовать за разумные деньги, но зато быстрее выйти на рынок и занять определенную нишу.

– А как у нас решается проблема интеллектуальной собственности, связанная с разработкой СФ-блоков?

– Мы работаем над этим, в начале будущего года должны появиться документы, регламентирующие права интеллектуальной собственности на СФ-блоки в России. Мы хотим взять за основу наработки VSIA-альянса, преломляя их в свете нашей действительности. Проблемы возникают, когда СФ-блоки разрабатываются в ходе некоего проекта за деньги заказчика, особенно если это спецзаказ. Здесь пока немало нерешенных вопросов. Но IP-блоки потому так и называются, что предназначены для повторного использования, иначе, это просто фрагмент схемы.

– Насколько реально для российских разработчиков выйти на международный рынок СФ-блоков?

– У нас уже сейчас есть возможность, сделав СФ-блоки в соответствии с международными стандартами, продавать их на внешнем рынке. Можно и нужно войти в международный фонд IP-блоков. Но, прежде всего, России необходим свой банк СФ-блоков, который может быть создан под эгидой, например, Федерального фонда развития электронной техники. Нужна структура, что-то вроде альянса производителей, которая поможет регулировать отношения между разработчиками и потребителями, поможет войти в международный бизнес.

– А в России возможен в ближайшее время свободный рынок СФ-блоков?

– Думаю, да. И его нужно форсированно создавать. У нас еще достаточно много людей, которые способны найти здесь точку приложения. Надо только создать им адекватную рыночную инфраструктуру. К сожалению, у нас нет полной информации о всех дизайн-центрах кристалльного уровня. Но использовать мы должны все возможности. Повторюсь, на Западе очень много небольших дизайн-центров по 15–20 человек, специализирующихся на определенных тонких вещах. Аналогичные фирмы есть и у нас. Например, при МИФИ есть ЗАО «Ангстрем-СБИС» – возглавляемая Герасимовым небольшая группа специалистов, успешно работающая в области разработки АЦП и специализированных схем памяти, имеющая определенный задел. В рамках формируемой инфраструктуры они будут разрабатывать СФ-блоки по своему направлению. Можно назвать и другие небольшие группы, которые мы рассматриваем как партнеров при создании крупных систем на кристалле.

Характерный пример – сейчас мы с рядом институтов разрабатываем чипсет для цифрового телевидения. В него входят три схемы – селектор каналов, MPEG-декодер и COFDM-демодулятор. Последнее устройство – самое сложное, насчитывает более 10 млн транзисторов и включает массу блоков жесткой логики, процессоры и т.д. Поэтому к его разработке мы привлекаем ряд фирм. Например, «Элвис» предлагает процессорное ядро на базе своей разработки Multicore, аналого-цифровую часть разрабатывают МИЭТ и «Ангстрем-СБИС» и т.д. В комплексе этой разработки задействовано 5–7 фирм. Задействованы и две алгоритмические фирмы – НИИ телевидения в Санкт-Петербурге (системная модель и отработка прототипа декодера MPEG2) и челябинский институт измерительной техники (системный проект и моделирование COFDM-демодулятора). Ряд СФ-блоков делаем сами. Затем все разработанные СФ-блоки мы будем интегрировать, формируя структуру кристаллов SOC.

– Складывается впечатление, что вы, как системный интегратор, монополизируете разработку СБИС в России.

– Конечно же, нет. Мы выступаем как головное предприятие в отдельных проектах, например, в разработке чипсета для цифрового телевидения, навигации и ряда других направлений. Кроме того, на нас сегодня, прежде всего, возложена задача научно-технической и методологической координации работ по созданию новой инфраструктуры проектирования СБИС SOC. Ведь у тех же «Ангстрема», «Элвиса», «Модуля» и других центров есть свои большие проекты. Число таких интеграторов SOC естественно ограничено – ведь для этой работы нужны очень дорогостоящие аппаратно-программные средства синтеза и моделирования проектов, реализации топологии, тестирования и верификации проектов SOC. Последняя проблема очень сложна – десятки миллионов транзисторов, колоссальное число конструкторско-технологических норм и ограничений, много тонкостей, связанных непосредственно с глубоким субмикронном. И чем дальше, тем будет сложнее. Поэтому для верификации больших проектов нужны колоссальные вычислительные мощности и дорогостоящие инструментальные средства. Далеко не все могут себе позволить обладать ими.

Мы понимаем, что невозможно объять необъятное, поэтому современными программно-аппаратными средствами системного уровня проектирования в первую очередь должны быть оснащены ведущие аппаратурные фирмы. На втором уровне – кристалльном – достаточно 5–8 фирм-интеграторов. Они есть, их просто надо дооснастить и предоставить им условия для совершенствования. Хорошо бы, чтоб их было больше, но в наших условиях это не реально – и по набору специалистов и по необходимым для этого вложениям. На Западе интегрирующих фирм тоже не так много. А вот инфраструктура разработчиков СФ-блоков, библиотек элементов должна быть максимально широкой, с привлечением лабораторий академических институтов РАН и ведущих вузов.

– Что препятствует массовому появлению подобных дизайн-центров?

– Прежде всего, существует кадровая проблема. Многие наши специалисты работают на такие центры, как Motorola, Samsung и др. Иностранцы компании в силу известных материальных причин забирают лучших дизайнеров. К со-

жалению, у нас не решен ряд правовых вопросов, в результате зарубежные компании в России оказываются в лучших условиях с точки зрения налоговой ответственности, чем российские фирмы. Подобная практика противоречит опыту развитых стран. Наши специалисты из «Прогресса» много работали по заказам зарубежных фирм – в Германии, Великобритании, в Италии и США, в Южной Корее и на Тайване. И везде строжайшее и четкое отслеживание того, чтобы все было в рамках действующего законодательства данной страны. Например, группа наших специалистов работала в известном Мюнхенском центре микроэлектроники по заказу фирм Motorola и VLSI Technology, представленных в Германии дочерними компаниями. И в соответствии с контрактами достаточно крупная сумма выплачивалась в бюджет земли Бавария – в соответствии с действующим немецким налоговым законодательством. Эти вопросы требуют решения на законодательном уровне. Безусловно, наши специалисты могут работать где угодно, но использующие их фирмы должны нести полную ответственность за них и полное налоговое бремя.

Вопрос этот, конечно, достаточно тонкий, поскольку специалист, даже работая на зарубежную фирму, даже полулегально с точки зрения оплаты труда, работает на российской земле, а это лучше, чем если бы он просто уехал за рубеж или сменил бы специальность. Здесь нужен нормальный цивилизованный подход, как это сделано во всех цивилизованных странах, – и не более того. Все субъекты деятельности в одной стране должны быть в равных условиях – будь то дизайн-центр ФГУП НИИМА «Прогресс», ЗАО НТЦ «Модуль» или российский дизайн-центр фирмы Motorola.

Кадровый вопрос в деле формирования дизайн-центров – один из важнейших. Подготовкой специалистов сегодня занимаются и в МИЭТе, и в МИРЭА, и в МИФИ. Был период, когда молодые люди охладели к этой специализации, поскольку не видели перспектив. Сейчас вновь обозначился интерес не просто к специальности программиста, но и к разработке и проектированию в области микроэлектроники. Перелом произошел. К нам приходят молодые ребята – и если правильно поставить процесс обучения, они через год-полтора становятся ведущими специалистами. Мы стараемся создать им такие же материальные условия, как и в российских дизайн-центрах зарубежных фирм – для этого сегодня есть все основания. А то, что часть специалистов работает в иностранных фирмах, надо воспринимать как должное.

Другой важный вопрос – это систематическое совершенствование квалификации работающих специалистов дизайн-центров всех уровней. Мы сейчас с рядом зарубежных фирм прорабатываем вопрос открытия в ближайшее время современного тренинг-центра по подготовке специалистов в области автоматизированного проектирования систем на кристалле.

– Вы говорили о разработке собственно схем. А инструментальные средства САПР предполагается использовать зарубежные?

– В основном, да. Однако и в этой области есть поле деятельности для наших компаний, несмотря на то, что средствами САПР в России в последнее десятилетие практически не занимались. Сейчас очевидно, что не надо создавать все средства в полном объеме, как в пакетах Cadence или Synopsys. На Западе сейчас десятки небольших фирм,

по 10–15 человек, в отдельных областях делают хорошие продукты, которые затем встраиваются в общую цепочку маршрута проектирования, со стандартными интерфейсами. То же самое возможно и у нас. Есть еще, особенно в вузах и институтах РАН, коллективы, способные в отдельных подсистемах – логического синтеза, синтеза топологии, тестирования, верификации – сделать программные продукты, которые могут быть встроены в единую систему проектирования СБИС SOC.

– Есть ли подобные примеры?

– Пожалуйста. В Институте проблем проектирования в микроэлектронике РАН (бывший НИИ САПР РАН) по заказу фирмы Motorola разрабатываются очень хорошие продукты. Есть и другие примеры. Но нужно понимать, что затраты на создание новых программных средств САПР колоссальны. Скажем, известная фирма Cadence только в этом году и только на НИОКР потратила 250 млн долл. собственных ресурсов. В России сложно найти такие средства, но отдельные подсистемы развивать нужно. Специалисты в данной области появляются, и они нужны, не случайно та же Cadence открыла в МИЭТе центр подготовки таких специалистов.

– Но СБИС мало разработать – ее надо еще и произвести.

– Это уже третий уровень в нашей инфраструктуре – «кремниевые мастерские». Отечественные заводы хорошо известны – «Ангстрем», «Микрон», сюда же можно отнести минский «Интеграл», должна быть запущена 0,35-мкм технологическая линейка в Институте системных исследований (ИСИ) РАН. Мы планируем ориентировать библиотеки СФ-блоков и микроэлементов на наши кремниевые мастерские, чтобы максимально использовать их ресурс. Вопрос стоит так – для субмикронной технологии мы используем возможности отечественных производителей. Если же необходим уровень глубокого субмикрона – используем зарубежные «кремниевые мастерские» в Юго-Восточной Азии и Европе. Этот механизм отработан и нами, и НТЦ «Модуль», и в ИСИ РАН, рядом других фирм. Наш опыт исчисляется десятилетием, мы работали и с кремниевой мастерской из Силиконовой Долины в Калифорнии, сейчас интенсивно работаем с Тайванем, с Германией, с Южной Кореей. Одно из самых дешевых мест сейчас – тайваньская Кремниевая Долина. Причем с точки зрения скорости исполнения и корректности там все на высоте. Механизмы передачи информации и верификации проектов отработаны, так что технических проблем нет.

Но мое мнение – нужно изыскивать средства, чтобы создать и в России одну-две мощные полупроводниковые фабрики, которые могли бы работать на самом современном уровне. Здесь крайне интересен опыт Китая, построившего в последние годы ряд мощных субмикронных производств.

– Вы можете привести примеры перспективных для российских разработчиков областей?

– Про цифровое телевидение и радиовещание я уже говорил. Очень перспективны связанные абонентские терминалы со встроенными навигационными приемниками. Мы уже создали один из лучших в мире по функциональным и массогабаритным характеристикам навигационный приемник GPS-Glonass и пытаемся продвинуть проект по выпуску тер-

миналов спутниковой связи со встроенным навигационным приемником. Если проект удастся, он позволит выйти и на внешний рынок.

В области радионавигации, однозначно уверен, приемники GPS-Glonass и системы на их основе в автомобильном транспорте, в авиации, на железной дороге должны быть только отечественные. Уже сейчас мы совместно с НИИ РИРВ создаем систему на двух кристаллах, возможен и однокристалльный двухсистемный приемник. Но для успешной реализации крупных проектов должны произойти определенные процессы на уровне формирования и регулирования отечественного радиоэлектронного рынка.

– О каких процессах идет речь?

– Нужен здоровый протекционизм. Я говорю только про близкие нам области – радионавигацию, цифровое телевидение и радиовещание, радиосвязь. Зачем отдавать их на откуп зарубежным фирмам? Скажем, за два года мы сделаем чипсет для цифрового телевидения. Но нужно, чтобы отечественные производители оборудования на его основе не захлебнулись в потоке зарубежных приставок и цифровых приемников, который неизбежно хлынет, как в свое время – абонентские станции сотовой связи.

Соответствующие структуры должны четко отслеживать перспективные области, знать о появлении новых образцов и обеспечивать им режим благоприятствования. Нужна взаимная заинтересованность производителей и министерств-потребителей, которые должны отслеживать ситуацию и создавать режим благоприятствования для конкурентоспособной отечественной продукции.

Возникает еще одна проблема, которая выходит за рамки нашего сегодняшнего разговора – организация массового производства. Я наблюдал, как на Тайване массовое производство абонентских терминалов радионавигации развернули в течение нескольких месяцев. Это наша ахиллесова

пята, данная проблема остро стоит перед отечественными аппаратостроительными фирмами. Надеюсь, соответствующая инфраструктура для ее решения будет создана.

– Достаточно ли средств, выделенных в рамках программы «Национальная технологическая база» для решения поставленных перед вами задач?

– Стартовать необходимо в рамках выделяемых ресурсов. С 2004 года, с появлением отдельной подпрограммы со значительно большими ресурсами, можно будет решить многие проблемы, связанные с созданием новой инфраструктуры проектирования. Средств в рамках конкурсов НИОКР, плюс средства на инвестиционные проекты, плюс собственные ресурсы предприятий, должно хватить для первого этапа. Затем второй этап программы, но там ситуация должна измениться, надеюсь, появится ощутимый поток инвестиций в отрасль.

– Что нужно, чтобы этот поток возник?

– Следует доказать, что в России можно разрабатывать конкурентоспособные системы на кристалле, на их основе создавать конкурентоспособную аппаратуру разного назначения, интересную не только здесь, но и на внешнем рынке. Все в значительной степени зависит от самих разработчиков. На рынке должно появиться новое поколение аппаратуры – не только специального назначения, но и массовой.

Я надеюсь, что реализация предложенного в рамках программы комплекса инвестиционных проектов и НИОКР позволит создать принципиально новую отечественную научно-технологическую и промышленную инфраструктуру разработчиков и производителей электронной компонентной базы и радиоэлектронных систем. И будет выгодно вкладывать значительные инвестиции в высокотехнологичные проекты в этой сфере. По крайней мере, НИИМА «Прогресс» сделает для этого все от себя зависящее.

по материалам STMicroelectronics



Частное предприятие
ЭкоСнабГрупп



220118, г. Минск,
ул. Машиностроителей,
д. 29, офис 236.
www.esg.by
info@esg.by

Энергосберегающие системы
Системы экономии газа
Альтернативные источники энергии

Тел/факс: +375(17)387 0299,
GSM:+375 29 605 8950,
+375 29 394 8594



Поздравляем Гродненскую табачную фабрику «Неман» с Днем Энергетика, с наступающим Рождеством и Новым годом!

Искренне желаем Вам крепкого здоровья, благополучия, успешной работы, неиссякаемой энергии и экономической стабильности.

С уважением,
директор А.А. Цалко и коллектив Частного предприятия «ЭкоСнабГрупп»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБИС ТИПА «СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ».

МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. СИНТЕЗ СХЕМЫ.

ЧАСТЬ 1

Владимир Стешенко, нач. отд. проектирования СБИС, ФГУП РН ИИКП;
Александр Руткевич, исп. директор, «Цифровые решения»;
Екатерина Гладкова, вед. инженер, «Цифровые решения»;
Григорий Шишкин, гл. конструктор, «Цифровые решения»;
Дмитрий Воронков, рук. проекта, «Цифровые решения»

Предлагаемая статья является первой в не-большом цикле статей, в котором авторы делают скромную попытку отразить опыт проектирования и организации производства СБИС типа СнК с учетом существующего в настоящее время положения дел в отрасли в стране и мире. Предлагаемые решения направлены на резкое сокращение сроков и, соответственно, стоимости разработки.

Известно [1–5], что полупроводниковая промышленность занимает в рыночной мировой экономике уникальное положение, определяемое тем, что она развивается по детально разработанному плану, который, однако, не только не препятствует повышению конкурентоспособности участников, но даже способствует ему. Этот план известен как International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) и представляет собой план-прогноз, ежегодно обновляемый и публикуемый международной организацией Semiconductor Industry Association (SIA). В основе ITRS лежит несколько простых принципов, в т.ч. закон Мура об удвоении числа элементов СБИС каждые 1,5–2 года. Закон Мура не отражает каких-либо фундаментальных законов природы, а лишь описывает ситуацию, складывающуюся на рынке в результате конкуренции между производителями, а также вследствие взаимного стимулирования радиоэлектронной и полупроводниковой отраслей. Огромную роль играет чисто психологический фактор: разработчики и производители стараются придерживаться прогнозных сроков закона Мура и ITRS, потому что знают, что так же действуют конкуренты. Более того, стремление обогнать конкурентов часто приводит к тому, что производители выводят на рынок новое изделие раньше, чем это предусмотрено ITRS. В результате в наши дни закон Мура, строго говоря, должен формулироваться иначе, поскольку из экспоненциального он превратился в суперэкспоненциальный. Главное значение ITRS состоит в том, что этот документ не только прогнозирует динамику параметров, но и содержит точные указания относительно

того, какими конструкторскими и технологическими средствами новые параметры могут быть достигнуты, когда и какие технические средства должны быть разработаны и освоены производством. Таким образом, ITRS является руководством к действию не только для разработчиков приборов, но и для разработчиков техпроцессов и технологического оборудования.

С переходом к проектным нормам глубокого субмикрона (130 нм и далее) в конструировании ИС возникли принципиально новые проблемы. Помимо трудностей технологического свойства, связанных с тем, что традиционная конструкция МОП-транзистора перестает работать из-за различных паразитных эффектов, проявляющихся в мало-размерных конструкциях, возникли проблемы, связанные с программно-аппаратным и методологическим обеспечением процесса проектирования.

Дело в том, что с улучшением проектных норм микроэлектронных изделий возрастает стоимость подготовки производства и, соответственно, цена риска технической и идеологической ошибок.

В настоящее время большинство фирм-разработчиков СБИС является фаблесс-компаниями (т.е. не имеют собственной производственной базы). В этом случае изготовление кристаллов осуществляется на мощностях специализированных кремниевых фабрик, которые предоставляют разработчикам библиотеки для логического синтеза. Собственно специалисты фабрик выполняют окончательную доработку фотошаблонов и изготовление кристалла. В этом случае актуальным становится использование СФ-блоков, которые представляют собой полностью отработанные и разведенные элементы, как правило, используемые в СнК.

В таблице 1 приведена средняя стоимость подготовки производства (изготовление фотошаблонов) и выпуска опытной партии в количестве 10–12 пластин (т.н. «инженерный лот») на фабриках Юго-Восточной Азии (X-fab Sarawak, Siltera и т.д.) с учетом доставки в Россию, а также

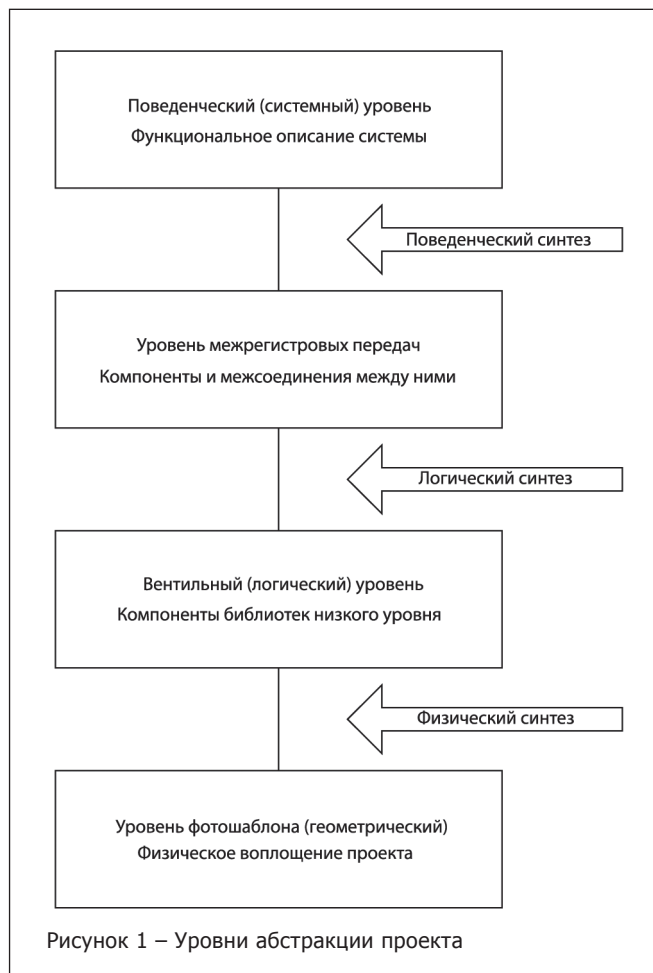
Таблица 1 – Средняя стоимость подготовки производства

Технология, мкм	Стоимость запуска тестовых кристаллов (шаттлов), тыс. долл.	Стоимость подготовки производства (комплект фотошаблонов), тыс. долл.	Стоимость 10-й пластины при серийном производстве без учета корпусирования, долл.	Ориентировочное кол-во кристаллов с одной пластины при типовом размере кристалла 3x4 мм по технологии 0,18 мкм, шт. (выход годных выше 93 %)
0,25	40	100	1200	1100
0,18	60	180	1200	1900
0,13	90	350	1300	3300–5000
0,09	1200	600	1400	6300–9000

налоговых и таможенных платежей. Конечно, цены имеют тенденцию снижения и колеблются в зависимости от конк­ретной технологии, фабрики, сроков и т.д.

Тенденция уменьшения проектных норм, в первую оче­редь, связана со стремлением получить как можно больше кристаллов с одной пластины, поскольку ее стоимость со­ставляет 1200–1800 долл. При этом с уменьшением размера кристалла в два раза выход увеличивается в четыре. Выход годных кристаллов не зависит от минимального размера, а с уменьшением размеров элементов увеличивается съем кристаллов с пластины, и они становятся дешевле. В то же время растут затраты на подготовку производства. Таким образом, разработчик массовой аппаратуры оказывается под дамокловым мечом ответственности за принимаемые проектные решения.

Значительно возрастает сложность процесса проек­тирования. При использовании традиционных методов проектирования хороший разработчик может выполнять проект со средней скоростью порядка 100 вентилях в день, или 30 строк RTL-кода. В этом случае, чтобы спроектиро­вать СБИС сложностью 100 тыс. вентилях, потребуется 1000 человеко-дней, т.е. команда из пяти человек сможет разработать такую СБИС в течение года. Следуя данной логике, чтобы разработать сложную СБИС порядка 10 млн вентилях в течение одного года, потребуется команда из 500 человек, что неприемлемо с точки зрения стоимости разработки.



Таким образом, «количество переходит в качество» – требуются совершенно новые приемы и стандарты при проектировании и подготовке производства. Ниже мы рассмотрим маршрут проектирования СБИС и его основные проектные процедуры.

Для успешного выполнения любого сложного проекта необходимо организовать его иерархическую декомпозицию – выделить простые составные части. Иерархическое деление проекта возможно в двух направлениях – снизу-вверх и сверху-вниз – и базируется на концепции абстракции проекта.

В процессе разработки выделяются различные уровни абстракции в зависимости от стадии проектирования: от идеи до производства. Так, на рисунке 1 показано, что, в зависимости от уровня представления, объектом абстракции является система, регистр, вентиль, геометрия библиотечного элемента на кристалле.

Системный уровень описания (system-level description) проекта состоит из поведенческого описания в терминах функций, выражений, алгоритмов. На уровне регистровых передач (register transfer level) проект представляется совокупностью арифметических и логических узлов, элементов памяти и т.д. Вентильный или логический уровень (logic level) описывает проект на уровне логических вентилях (logic gates) и триггеров (flipflops). В этом случае поведение схемы можно описать системой логических уравнений. Эти логические элементы представляются на кремниевом (топологическом) уровне (geometric level) в виде топологических элементов и межсоединений.

На рисунке 1 представлено поведенческое описание как начальный уровень абстракции, который отражает функциональные возможности проекта на системном уровне. Уровень регистровых передач включает компоненты и межсоединения между ними. Для большего количества сложных систем он может также включать типовые элементы типа ПЗУ, СБИС. Вентильный (логический) уровень соответствует представлению уровня логического элемента. Набор шаблонов топологических элементов кристалла соответствует геометрическому уровню. Следует обратить внимание на следующие моменты, показанные на рисунке 1. Во-первых, на нем отражены основные проектные процедуры и используемые средства САПР в зависимости от уровня представления проекта и, соответственно, уровня детализации. Во-вторых, этот процесс синтеза состоит из процессов поведенческого синтеза (behavioral synthesis), логического синтеза (logic synthesis) и физического синтеза топологии (physical synthesis). В дальнейшем изложении мы рассмотрим данные этапы подробнее.

Эти различные уровни представления проекта различаются типом отображаемой ими информации, поэтому их можно отнести к поведенческому, структурному и физическому типам.

Маршрут проектирования (design flow) определяет этапы проектных процедур, используемых на всех стадиях разработки – от представления и формализации идеи до тестирования готовых образцов.

Традиционно при проектировании специализированных БИС используется нисходящая модель маршрута проектирования (waterfall model). При такой организации маршрута проект проходит различные фазы, постоянно увеличивая детализацию представления. Нисходящее проектирова-

ние подразумевает минимальное взаимодействие между командами разработчиков на различных фазах проекта. Процесс начинается с разработки технических требований (specification), их последующего анализа, проведения предварительного моделирования с помощью специализированных пакетов или на языке высокого уровня (например, С).

Следует отметить, что несмотря на широкий набор инструментов моделирования, при проектировании СБИС для обработки сигналов задача моделирования усложняется необходимостью разработки не только модели системы, но и модели тестовых воздействий с учетом шумов, эффектов квантования и особенностей тракта. На выходе первого этапа должна быть выполнена полная функциональная проверка технических требований.

На следующем этапе осуществляется описание проекта с помощью одного из языков описания аппаратуры, как правило VHDL или Verilog, на уровне регистровых передач (register transfer level, RTL).

Функциональные возможности описания на уровне регистровых передач моделируются и верифицируются относительно исходных технических требований, например, модель на С или в MatLAB, которая используется как эталонная модель (golden model) для верификации проекта на каждом уровне абстракции. Данный этап называется функциональной верификацией модели.

По описанию на уровне RTL с помощью программы логического синтеза формируется список цепей (gate level netlist), который учитывает задержки на библиотечных элементах (но, как правило, не учитывает временные задержки на межсоединениях) и используется для временной верификации проекта (timing verification). Цель временного моделирования – проверить, удовлетворяет ли разрабатываемая БИС заданным временным ограничениям (timing constraints).

На основании данных синтеза топологии (physical design team) разрабатывается и оптимизируется разводка кристалла (floorplan) путем размещения библиотечных элементов и межсоединений неким оптимальным образом. После разработки топологии можно повторно выполнить формирование файла задержек и последующее временное моделирование, учитывающее влияние межсоединений. Затем кристалл можно передавать в производство и осуществлять последующее тестирование образцов.

Недостаток этой методологии проектирования в том, что с увеличением сложности проекта увеличивается опасность появления ошибок и затрудняется процесс их поиска. Более того, насколько удовлетворяет разрабатываемая БИС предъявляемым к ней требованиям, становится понятно только в самом конце процесса проектирования. Ошибки, обнаруженные в конце той или иной стадии проектирования, ведут к повторному ее выполнению, что в ряде случаев влечет за собой неоднократный выпуск прототипов (shuttles), приводит к значительному замедлению сроков выполнения проекта и резко повышает его стоимость.

Технические требования к проекту представляются его поведенческой моделью (behavioral model), которая определяет временные ограничения, ограничения по площади кристалла и потребляемой мощности, тестопригодность и т.д. Такая модель обычно задается в форме выполнимых функциональных описаний на языке типа С (или С++). По этим описаниям затем выполняется моделирование для широкого набора входных воздействий.

Маршрут синтеза СФ-блока (проектирование Front-End) представлен на рисунке 2. На начальной стадии декомпозиция выполняется на основе системных требований для определения выполнимости технических требований, стиля используемого проектирования, фабрики (foundry), на которой планируется выпуск, технологического процесса, библиотек и т.д. Некоторые другие параметры типа вида корпуса, рабочей частоты, число контактных площадок на кристалле, площадь, размер и вид используемой памяти также оцениваются на этом этапе. Традиционно ввод простых проектов выполняется после окончания проекта архитектуры более высокого уровня.

В качестве средства ввода проекта используются языки описания аппаратуры высокого уровня (hardware description languages, HDL) для задания начальных технических требований системы. В существующих методологиях проектирования специализированных интегральных схем, используемых в промышленности, на языках описания аппаратуры обычно описываются проекты на уровне межрегистровых пересылок. Однако в последнее время стала пользоваться популярностью методология Specify-Explore-Refine (methodology for system design – «описал – опробовал – доделал»). После этапа постановки задачи (спецификации исходных требований), на стадии ее выполнения, происходит оценка различных элементов системы для реализации функциональных возможностей в пределах указанных конструктивных ограничений. Технические требования модифицируются на стадии доводки проекта в соответствии с решениями, выполненными на стадии реализации.

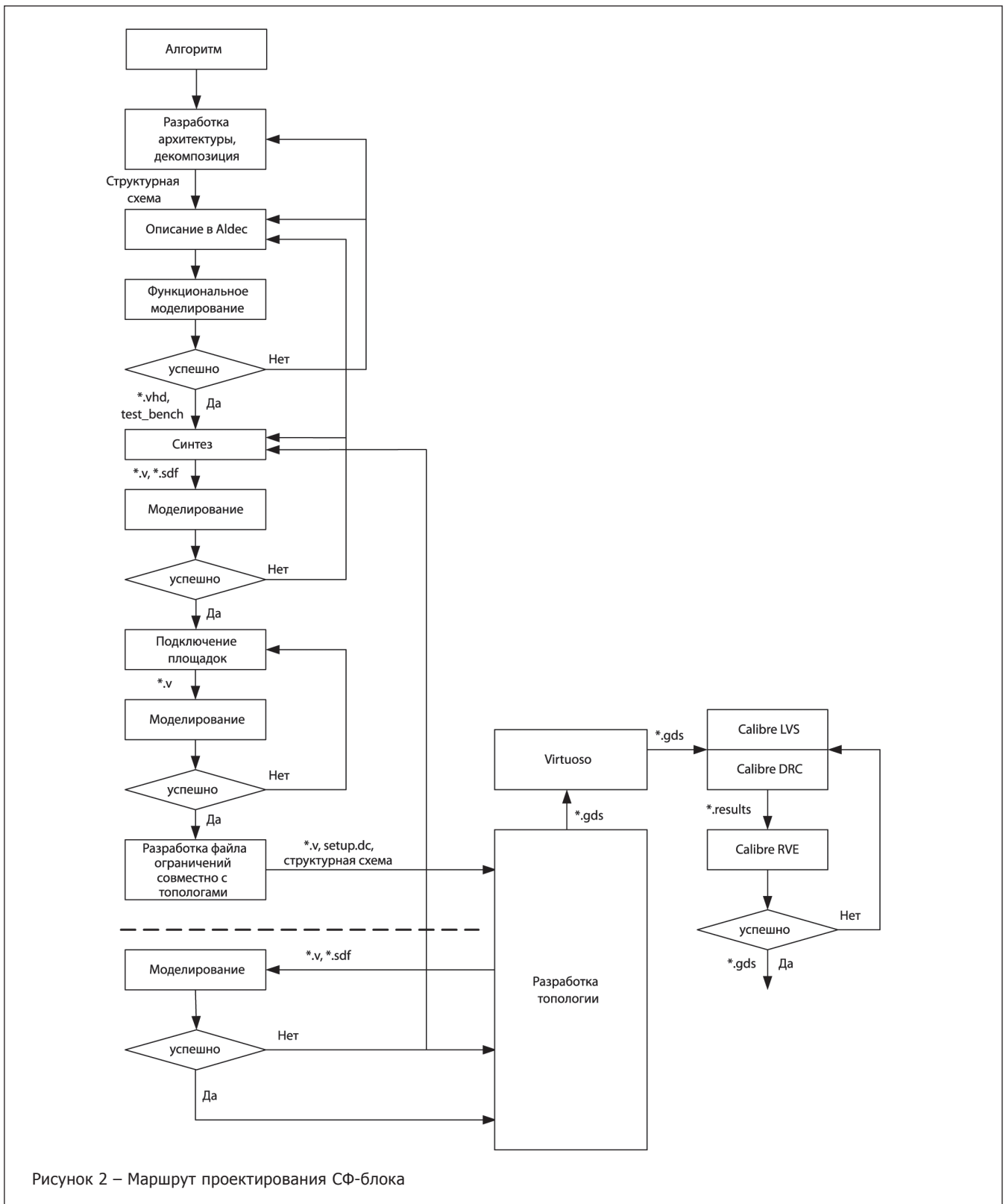
Эта методология ведет к лучшему пониманию функциональных системных возможностей на очень ранней стадии в процессе проектирования. Выполнимость технических требований целесообразно проверять на правильность функциональных возможностей изделия и пригодность для автоматической проверки. Рабочие технические требования легко моделируются, и та же самая модель может использоваться для синтеза. Обычно производят проверку функциональных моделей на языках С или С++ после завершения моделирования – проект вручную снова вводится в инструментальные средства САПР с использованием языков описания аппаратуры.

Таким образом, выбор языка для ввода описания системы является областью самых активных дискуссий и исследований. Недаром вопросы о том, какой из языков описания лучше, остаются актуальными в интернет-форумах и в стране, и за рубежом.

Существует несколько следующих принятых стандартов поведенческого описания работы системы.

1. Использование при описании элементов из стандартной библиотеки программы (SPW).
2. Описание с помощью высокоуровневых моделей СФБ на языках программирования С, С++.
3. Описание на языках VHDL, Verilog, SystemC.
4. Поведенческое описание, представленное в виде математической модели (например, в формате программного пакета MATLAB).

На начальном этапе также разрабатывается системная модель, включающая в себя поведенческое описание и окружение разрабатываемой системы, что позволяет отразить взаимодействие СБИС с другими элементами аппаратуры или объектами измерений.



При наличии системной модели можно разделить проект на аппаратную и программную части, а также подготовить спецификацию для этапа функционального проектирования. На основе этой модели оцениваются и основные физические параметры разрабатываемой

микросхемы: число выводов, потребляемая мощность, площадь кристалла. Для этого существуют программы прогноза, которые основаны на статистике завершенных проектов и дают погрешность до 20 % для освоенных технологий.

Для верификации разработанной системной модели необходимо создать тестовое окружение. Оно, как правило, включает в себя генераторы входных сигналов и блоки отображения выходной информации. Необходимо, чтобы тестовое окружение позволяло полностью верифицировать правильность функционирования системы. При составлении набора тестовых сигналов следует обратить внимание на то, чтобы тест покрывал все возможные состояния схемы.

Верификация разработанной системной модели должна выполняться путем компьютерного моделирования. Если в процессе верификации обнаружены какие-либо отклонения от требований системной спецификации, следует скорректировать поведенческую модель и повторить моделирование.

Системная верификация осуществляется одновременно с системным проектированием и связана с ним в единый итерационный цикл. При верификации проводится анализ архитектуры, возможности разработки недостающих СФБ и совместимость имеющихся, возможности разработки прикладных программ и требования к ним [8]. Также проводится проверка единства среды проектирования и совместимости модулей САПР, наличие средств управления данными и документирования проекта. На этом этапе выполняется сравнение результатов прогноза основных технических параметров с требованиями технического задания, а также оценивается себестоимость изделия.

Работа завершается подготовкой частных технических заданий на составляющие программные и аппаратные части проекта. В дальнейшем работа над этими частями может вестись параллельно.

Синтез поведенческого описания проводится в два этапа стандартными средствами САПР, имеющимися на рынке. Входными данными являются поведенческое описание и набор ограничений, определяемых пользователем с учетом специфики конкретного проекта.

На первом этапе из поведенческого описания получается RTL-описание (рисунок 3).

Кроме того, важной функцией синтезатора является оптимизация всей схемы с учетом специфических особенностей.

Рассмотрим основные ограничения, которые передаются на данный этап синтеза (таблица 2).

Логический синтез – процесс автоматизированного создания электрической (логической) схемы на базе RTL-описания и библиотек элементов логического уровня от производителя СБИС. Генерация выполняется в автоматизированном режиме под управлением разработчика. Для логического синтеза с этапа RTL-синтеза переходит описание на языке Verilog в элементах стандартной библиотеки, не привязанных к конкретному производству [5–11].

На втором этапе синтеза производится синтез списка соединений Verilog из RTL-описания, полученного на первом этапе. При синтезе используется набор базовых элементов, предоставляемый фабрикой-производителем микросхем (рисунок 4).

Рассмотрим основные ограничения, которые передаются на этот этап синтеза. Данные ограничения также транслируются по маршруту для дальнейшего физического синтеза схемы (таблица 3).

Вся информация передается далее по маршруту в виде двух файлов: один – в формате *.v содержит список соединений Verilog, второй – текстовый, который содержит информацию о временных ограничениях и ограничениях на взаимное рас-

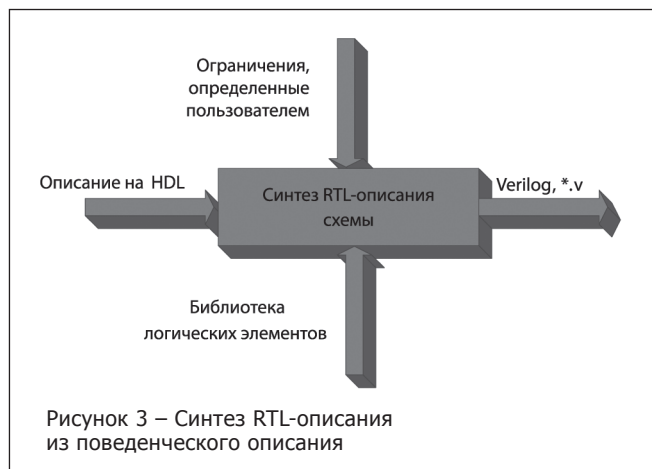


Таблица 2 – Основные ограничения при синтезе RTL-описания из поведенческого описания

Синтаксическое обозначение вводимого ограничения	Возможные значения параметров	Вводимое ограничение на действия синтезатора
Syn_opt_goal	SPEED/AREA	SPEED – синтезатор создает схему по поведенческому описанию, оптимальную с точки зрения скорости работы; AREA – синтезатор создает схему по поведенческому описанию, оптимальную с точки зрения занимаемого на кристалле места
Syn_max_fanout	Натуральное число	Задается максимальное число приемников для одной логической цепи
Syn_state_machine	One-hot, Gray, and Sequential	Выбирается метод синтеза конечных автоматов
Syn_trim_logic	ON/OFF	ON – синтезатор занимается оптимизацией логики и сворачивает избыточные элементы
Syn_sharing	ON/OFF	ON – позволяет синтезатору использовать те же ресурсы кристалла для обработки взаимоисключающих состояний
Syn-keep	Имя объекта	Не позволяет синтезатору заниматься какой-либо оптимизацией внутри названного объекта

Таблица 3 – Параметры физического синтеза схемы

Синтаксическое обозначение вводимого ограничения	Возможные значения параметров	Вводимое ограничение
Set_max_delay	Время, пс	Ограничение на время распространения сигнала между базовыми логическими элементами, формирующими один самосинхронный логический элемент
Set_rloc	Относительные координаты элементов	Ограничение на взаимное расположение базовых логических элементов, формирующих один самосинхронный логический элемент на кристалле микросхемы
Set_wireloadmodel	Название модели	Модель проводов, используемая при физическом синтезе схемы

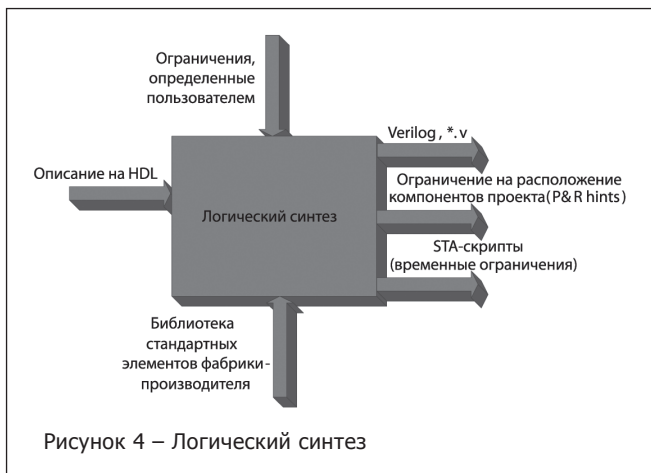


Рисунок 4 – Логический синтез

положение, наложенных синтезатором (STA-скрипты и P&R-hints).

Вентильная верификация обычно сводится к статистическому временному анализу списка цепей, полученному в результате логического синтеза. В отдельных случаях, когда размерность списка цепей невелика, можно выполнять моделирование на вентильном уровне.

Временной анализ проводится в том же программном пакете, что и логический синтез с уже подключенными библиотеками стандартных ячеек фабрики, в которой будет изготавливаться кристалл. Кроме того, для временного анализа подключаются ограничения, полученные на этапе синтеза, и виртуальная модель проводов, т.к. физические проводники еще отсутствуют и их реальные параметры неизвестны.

Моделирование системы на поведенческом уровне на языках VHDL/Verilog позволяет проверить работу функциональной модели, получить временные диаграммы работы СФБ и системы в целом, оценить основные динамические параметры СнК. Электрическая модель на транзисторном уровне не пригодна для детального моделирования СнК. Такая модель включает сотни тысяч и миллионы элементов и требует сотен и тысяч часов работы компьютера. Модель на транзисторном уровне используется для проверки задания на разработку топологии и для физической верификации проекта. В состав САПР многих фирм входят специальные программы – скоростные симуляторы. В этих программах используются упрощенные модели транзисторов и приближенные быстродействующие алгоритмы. При расхождении результатов в 10–20 %, по сравнению с точной моделью, скорость вычислений увеличивается в сотни раз [11, 12].

Таким образом, мы рассмотрели ту часть маршрута проектирования, которая предшествует разработке топологии СБИС и обычно называется Front-End design. В следующей статье мы рассмотрим вопросы проектирования топологии и физической верификации СБИС.

Литература:

1. Стешенко, В.Б. «Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер» / В.Б. Стешенко, А.В. Руткевич, А.В. Бумагин, Ю.Ю. Гулин, Д.И. Воронков, Д.Ю. Гречищев, Е.В. Евстигнеева, М.В. Синельникова // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9.
2. Немудров, В. «Системы на кристалле. Проектирование и развитие» / В. Немудров, Г. Мартин. – М. : Техносфера, 2004.
3. Рабаи, Жан М. «Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования» : пер. с англ. / Жан М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич. – 2-е изд. – М. : ООО «ИД Вильямс», 2007.
4. Бухтеев, А.В. «Методы и средства проектирования систем на кристалле» / А.В. Бухтеев // Chip news. – 2003. – № 4. – С. 4–14.
5. Weste, N.H. Principles of CMOS VLSI design / N.H. Weste, K. Eshraghian. – A systems perspective, Addison-Wesley publishing company, 1994.
6. Rubin, S. Computer aids for VLSI design / S. Rubin. – Addison-Wesley publishing company, 1994.
7. Chandrakasan, A.P. Low power digital CMOS design / A.P. Chandrakasan, R.W. Brodersen. – Kluwer Academic publishers, 1998.
8. Chandrakasan, A.P. Design of high-performance microprocessors circuits / A.P. Chandrakasan, W.J. Bowhill, F. Fox. – IEEE Press, 2001.
9. Abidi, A.S. Meyer, Integrated circuits for wireless communications / A.S. Abidi, P.G. Gray, R.G. Meyer. – IEEE Press, 1999.
10. Doering, R. Limits of integrated circuit manufacturing / R. Doering, Y. Nishi // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, № 3. – P. 375–393.
11. Bryant, R.E. Limitations and challenges of computer-aided design technology for CMOS VLSI / R.E. Bryant, K.-T. Cheng, A.B. Kahng [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, №3. – P. 341–362.
12. Chang, H. Surviving the SOC revolution: A guide to platform-based design, Norwell / H. Chang, L. Cooke, M. Hunt [et al.]. – MA : Kluwer, 1999.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБИС ТИПА СнК. МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. СИНХРОНИЗАЦИЯ И ТАКТОВЫЕ ДЕРЕВЬЯ.

ЧАСТЬ 2

Владимир Стешенко, к.т.н., начальник отдела, ФГУП «РНИИ КП»
 Александр Руткевич, генеральный директор, ЗАО «Ди Эс Технолоджи»
 Екатерина Гладкова, ведущий инженер, НПП «Цифровые решения»
 Григорий Шишкин, главный конструктор, ЗАО «Ди Эс Технолоджи»
 Алексей Бумагин, к.т.н., руководитель проекта, НПП «Цифровые решения»
 Алексей Гондарь, инженер, НПП «Цифровые решения»

Во второй статье цикла рассматриваются вопросы разработки топологии СБИС типа СнК с учетом как ограничений технологий, так и особенностей архитектуры схемы. Особое внимание уделено вопросам синхронизации схемы.

Целью топологического проектирования СБИС типа СнК является создание комплекта исходной информации и разработка сопроводительной документации, необходимой для производства кристалла на микронэлектронной фабрике. В процессе проектирования топологии основными критериями являются площадь предполагаемого кристалла, от которой зависит себестоимость производства микросхем на фабрике, и его быстродействие.

На рисунке 1 представлен маршрут проектирования топологии СБИС. Далее мы рассмотрим основные этапы проектирования и верификации топологии СБИС.

Для конструкторско-технологического проектирования топологии СБИС СнК используется специализированное программное обеспечение SoC Encounter, Olympus-SoC.

Этапы разработки топологии можно свести к следующим:

- импорт исходного списка цепей (Verilog net-листа);
- задание временных ограничений (STA-скриптов);
- задание ограничений на расположение компонентов проекта (P&R hints);
- подключение к проекту технологических библиотек и СФ-блоков;
- размещение компонентов проекта и шин питания и «земли» (floorplan);
- размещение стандартных ячеек библиотеки фабрики (place);
- трассировка сигнальных цепей (nanoroute);

– доработка проекта согласно требованиям производства.

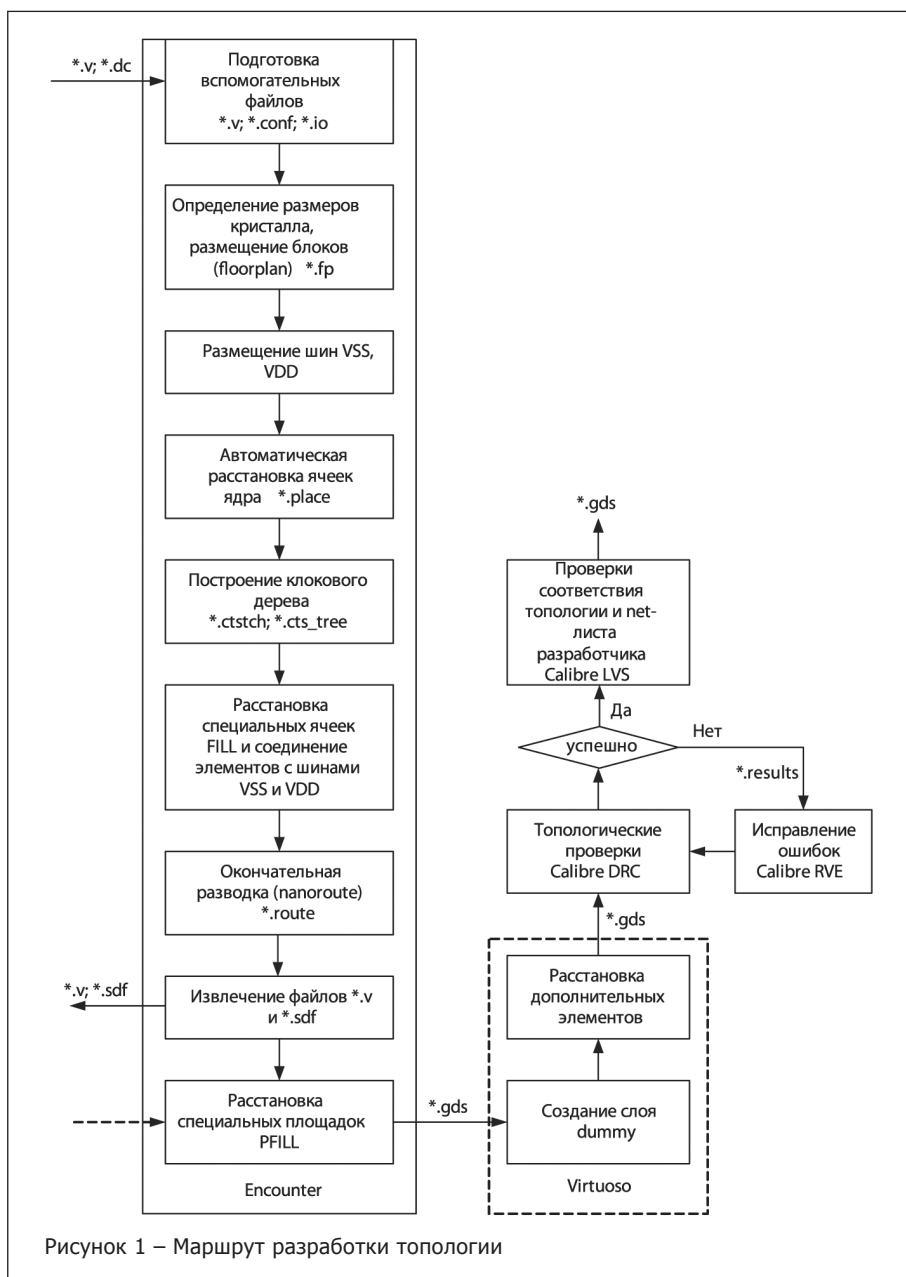
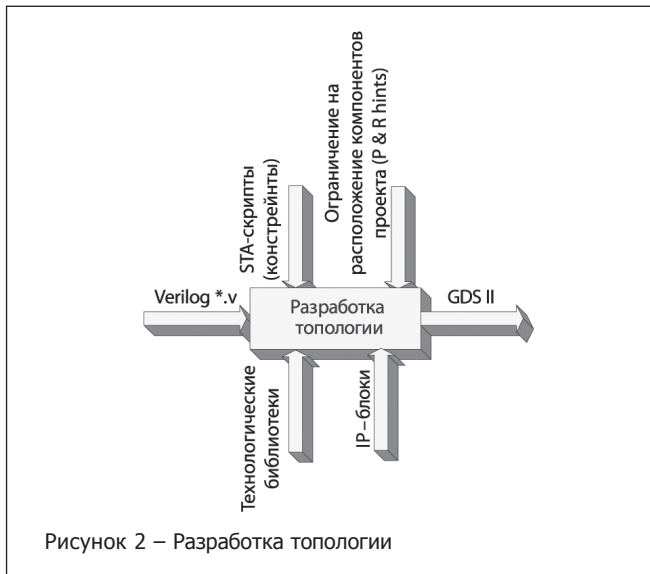


Рисунок 1 – Маршрут разработки топологии

В начале разработки топологии ССМ разработчик передает топологу файл после логического синтеза – Verilog нет-лист (*.v), временные ограничения (STA-скрипты), полученные на этапе синтеза ССМ, и ограничения на расположение компонентов проекта (P&R hints) (рисунок 2).



Для упрощения и систематизации процесса проектирования, на этапе разработки топологии вводится дополнительный этап создания физического виртуального прототипа. Физический виртуальный прототип микросхемы – это оценочная модель и предварительный топологический план кристалла микросхемы. Физический виртуальный прототип разрабатывается одновременно с функциональной моделью. На его основе рассчитываются размеры кристалла, уточняются требования к системам электропитания и синхронизации, делаются оценки потребляемой мощности и параметров линии связи. Прототип позволяет достаточно точно детализировать функциональную модель без трудоемкой разработки полной топологии кристалла. Задачей построения физического виртуального прототипа является оценка площади будущего кристалла микросхемы, оценка предварительного топологического размещения блоков, оценка разводки шин питания. При правильном выполнении расчетов при дальнейшем проектировании топологии не потребуются изменения в первоначальном топологическом плане кристалла и функциональной модели.

Если в состав СнК входят аналоговые блоки, то разработку топологии аналоговых блоков и их подключение к цифровой части необходимо осуществлять вручную. Важнейшая задача физического проектирования аналоговых блоков – снижение уровня помех – решается путем уменьшения плотности размещения элементов и сигнальных связей. Для трассировки используются только два-три слоя металлических соединений (металлов), на остальных слоях металлов размещают экраны и шины питания. Снижение подложечных шумов достигается введением охранных колец, соединенных (заземленных) с подложкой. Охранные кольца должны окружать каждый транзистор и каждый аналоговый блок [3, 4].

Отдельное внимание стоит уделить толщине проводников, соединяющих элементы СнК. Тонкие проводники

имеют большое сопротивление и вносят существенный вклад в задержку сигнала. Для длинных связей используется обратное масштабирование проводников – чем длиннее проводник, тем он шире. Правила выбора ширины рассчитываются из требуемого быстродействия линий связи и удельных параметров проводников. Для выравнивания задержек по сигнальным шинам используется буферизация с использованием регенераторов сигналов.

Специальные правила используются для линий связи аналоговых и высокочастотных сигналов. Обязательно экранирование сигнальных проводников шинами питания. Высокочастотные сигналы необходимо передавать по двум проводникам с противофазными уровнями напряжения. Для высокоскоростных цепей требуется согласование импедансов приемников, передатчиков и линий связи.

Расфазировка и дрожание тактовых импульсов в цифровых схемах – серьезные проблемы, способные ограничить быстродействие цифровой системы. Поэтому цепь тактовых импульсов проектируется так, чтобы влияние обоих факторов было минимальным. Особое внимание уделяется рассеянию мощности. В большинстве высокоскоростных цифровых схем основным источником рассеяния мощности является цепь разводки тактовых сигналов. Для снижения рассеяния необходимо предусмотреть возможность выключения фрагментов цепи тактовых импульсов. Подобная селекция дополнительно увеличивает неопределенность тактовой частоты.

При выборе структуры цепи тактовых импульсов доступно много степеней свободы, в т.ч. можно выбирать тип материалов проводников, топологию и иерархию схемы, относительные размеры проводов и буферов, время нарастания и спада, а также секционирование емкостей нагрузки.

Схемы цепей тактовых сигналов обычно включают цепь, которая применяется для доставки глобального опорного сигнала в различные части кристалла и в последний каскад, отвечающий за локальное распределение тактовых сигналов с учетом локальных колебаний нагрузки. В большинстве схем распределения тактовых сигналов абсолютная задержка распространения от центрального источника тактовых импульсов незначительна, значение имеет лишь разность фаз между двумя синхронизируемыми точками. Следовательно, одним из наиболее распространенных подходов к распределению тактовых сигналов является использование сбалансированных путей (деревьев). Наиболее распространенным типом схемы распределения тактовых импульсов является Н-дерево (рисунок 3).

В первую очередь, тактовый сигнал подается в центр кристалла. Затем по сбалансированным путям, включающим согласованные соединения и буферы, в различные узлы листья распространяется эталонный сигнал. В идеальном случае, если путь отлично сбалансирован, расфазировка тактовых импульсов равна нулю. Хотя на распространение сигнала от центральной точки к каждому конечному узлу может потребоваться несколько тактов, на все узлы тактовые сигналы поступают одновременно. В реальности из-за разбросов процесса и условий окружающей среды в схеме возникают расфазировка и дрожание.

Конфигурация «Н-дерево» применяется в схемах, основанных на регулярных структурах, где все элементы идентичны, и разводку тактового сигнала можно сделать в виде двоичного дерева. Описанную концепцию можно

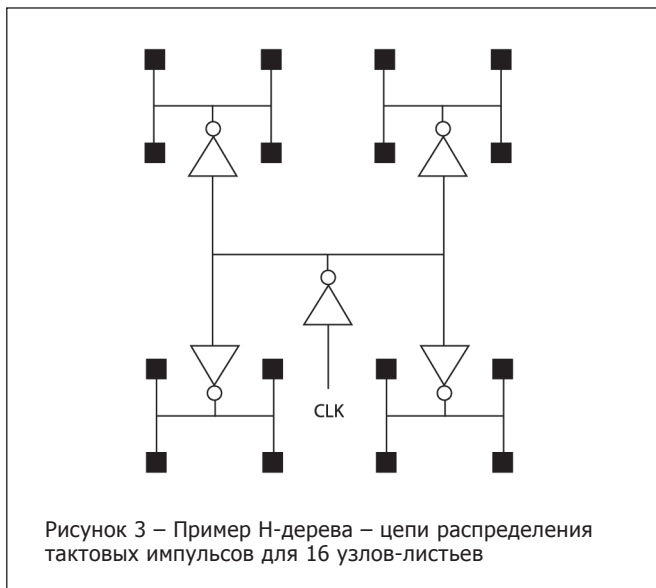


Рисунок 3 – Пример N-дерева – цепи распределения тактовых импульсов для 16 узлов-листьев

обобщить в согласованных RC-деревьях – компоновочном плане, позволяющем так распространить тактовые сигналы, чтобы межсоединения, по которым проходят тактовые сигналы к функциональным субблокам, имели одинаковую длину. Таким образом, общий подход не предполагает наличие правильной физической структуры.

Альтернативный подход к распределению тактовых сигналов представляет сетчатая структура, показанная на рисунке 4.



Рисунок 4 – Сетчатые структуры распределения тактового сигнала

Сети обычно используются в последнем каскаде цепи разводки тактовых импульсов для распределения тактовых сигналов синхронизируемым локальным нагрузкам. Данный подход полностью отличается от подхода с использованием сбалансированных RC-деревьев. Основное отличие заключается в том, что задержки конечного усилителя, вызванные всеми нагрузками, не согласовываются. Вместо этого, минимизируется абсолютная задержка в предположении, что размер сетки мал.

Основным достоинством подобной сетчатой структуры является то, что она позволяет вносить в проект изменения на более поздних стадиях разработки, поскольку тактовый сигнал легко провести в любую точку кристалла. Благодаря этому происходит сравнительно большое рассеяние

мощности, поскольку структура имеет много лишних межсоединений.

Как правило, цепь тактовой синхронизации сложных СнК проектируется в виде древовидной структуры. Но в отличие от «классических» согласованных RC-деревьев, синхронизации добиваются не выравниванием длины проводников цепи (что затруднительно в сложных проектах), а согласованием задержек, возникающих при прохождении тактовых импульсов до потребителей, расположенных в различных местах кристалла. Разводчик автоматически определяет наиболее длинную цепь и, вводя дополнительные усиливающие буферы и элементы задержки (имеются в библиотеке элементов) в более короткие цепи, добивается синхронного прихода тактовых импульсов.

На рисунке 5 представлена часть цепи тактовой синхронизации СнК демодулятора цифрового телевизионного сигнала (ДЦТС), разработанного НПП «Цифровые решения».

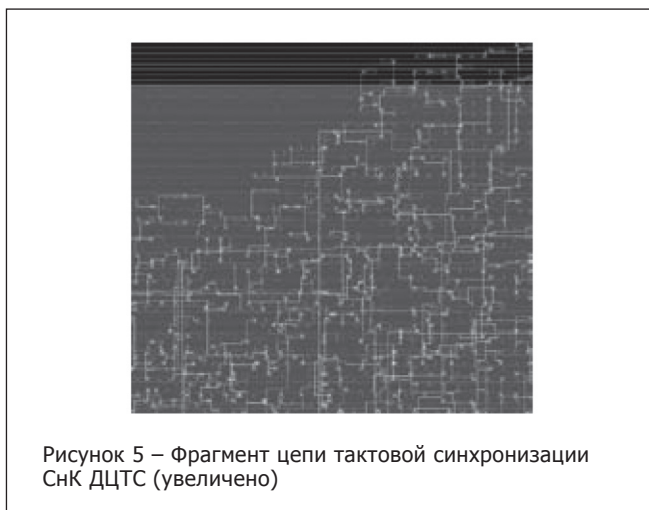


Рисунок 5 – Фрагмент цепи тактовой синхронизации СнК ДЦТС (увеличено)

На рисунке 6 схематично изображены усиливающие буферы и элементы задержек. Стрелкой показано увеличение задержки сигнала, проходящего через буфер, относительно опорного тактового сигнала, который подается на вход. С увеличением яркости задержка увеличивается.

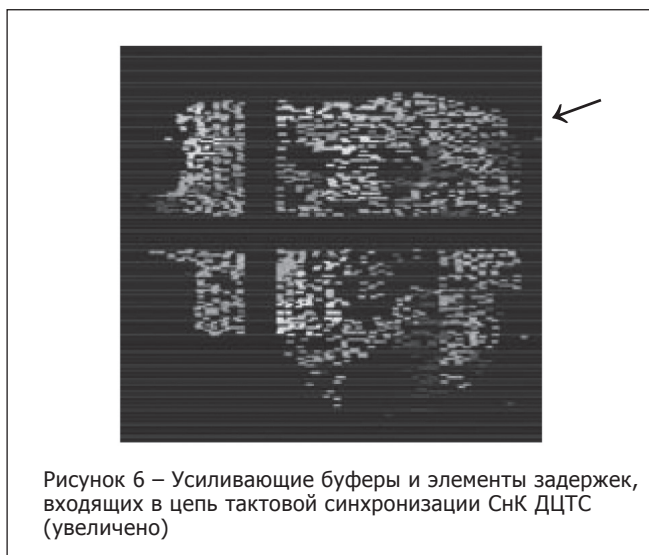


Рисунок 6 – Усиливающие буферы и элементы задержек, входящих в цепь тактовой синхронизации СнК ДЦТС (увеличено)

Распределение тактового сигнала необходимо рассмотреть на начальных фазах разработки сложной схемы, поскольку это может повлиять на форму компоновочного плана кристалла. Если игнорировать цепь разводки тактовых сигналов на ранних фазах проекта и рассматривать ее только в конце цикла разработки, когда основная часть топологии кристалла уже зафиксирована, возникнут неоптимальные цепи разводки тактовых импульсов и множество временных условий, которые снижают быстродействие конечной схемы. При внимательном планировании можно избежать многих подобных проблем, и распространение тактовых сигналов становится вполне управляемой операцией.

Основная сложность при проектировании цепей тактового сброса возникает на этапе схемотехники. Для синхронизации сигналов сброса всех субблоков проектируемого устройства и соблюдения минимального интервала времени между приходом переднего фронта тактового импульса на вход триггерного элемента и моментом изменения сигнала на входе этого элемента используется конвейерная прокладка цепей сброса. При ней сигнал сброса подается на отдельные СФ-блоки СнК через триггерные элементы, что обеспечивает синхронный сброс всех СФ-блоков СнК, несмотря на разные пути к ним эталонного сигнала. При топологическом проектировании возможно равномерное размещение вспомогательных триггеров и усилительных буферов по площади всего кристалла, однако, это является не обязательной процедурой и проводится только в исключительных случаях, когда разводчик не справляется со сложными схемами в автоматическом режиме и полученная топология кристалла не удовлетворяет требованиям ТЗ.

Большинство СФ-блоков, реализованных в системе на кристалле, разрабатывается традиционным способом, не учитывающим сложную структуру проекта. Однако если они состоят из миллионов логических вентилях, то это может привести к ограничениям на память и к большому времени запуска. В связи с этим, используется иерархический подход для уменьшения времени разработки больших проектов. Такие проекты можно разделить на более простые части; каждая часть может быть независимо привязана к различным группам проекта, которые разрабатываются независимо одна от другой.

Методика разработки

Создание сложного проекта можно разделить на три основных этапа: планирование кристалла, реализация и сборка кристалла.

1. Планирование кристалла – разделение на блоки, которые реализуются отдельно.

2. Реализация состоит из двух подэтапов – реализация каждого блока и реализация верхнего уровня, основанная на временных моделях и абстракциях блоков в проекте.

3. Сборка кристалла – соединение блоков в итоговом кристалле.

В соответствии с данной методикой имеются следующие способы выделения площади под отдельные части: «сверху-вниз» и «снизу-вверх».

Первая методика обычно состоит из этапов планирования «сверху-вниз», реализации и сборки кристалла. Такую методику используют для создания иерархической или верхнеуровневой топологии из общей топологии, основанной на отмеченных модулях. В данном подходе расположение

блока или части зависит от его размеров, формы и размещения входных/выходных контактов.

Планирование кристалла в данной методике начинается с загрузки текущего проекта в среду разработки. Следующим шагом является ручное предварительное расположение всех модулей, которые станут отдельными частями, или «черными ящиками», и запуск трассировщика цепей питания. Затем необходимо определить модули и «черные ящики», которые станут частями кристалла. При этом можно задать размеры этих частей. Также, если необходимо, можно вставить буферы в каждую из частей для защиты электрических цепей. Запускается первоначальная разводка, после которой выполняется первичное выравнивание контактных площадок для отдельной части. В соответствии с назначенными видами происходит регенерирование связей, после чего необходимо сбалансировать временные модели для блоков. Для каждого блока создается собственная директория, в которую записываются net-лист, топология и различные ограничения. Для верхних уровней также создается своя директория, содержащая net-лист, топологию, простую временную модель и физическую абстракцию для каждой части проекта или черного ящика.

После планирования кристалла осуществляется этап реализации каждого блока, которая проходит на основе ограничений по размеру и времени, а также расположению выводов, которые были определены на предыдущем этапе. В итоге получаем абстракции блоков, временные модели, DEF-файл, GDSII-файл каждого блока, которые необходимы для реализации верхнего уровня и сборки кристалла. Следующим шагом является реализация верхнеуровневых проектов с помощью данных о модели блока (LEF-файл), временной, энергетической и шумовой модели.

Сборка кристалла – последний этап в подходе «сверху-вниз», состоящий из объединения информации о верхнем и о внутренних блоках.

Методика «снизу-вверх» состоит из этапов реализации и сборки. Топология верхнего уровня в этой методике зависит от размера, формы и распределения выводов для блоков проекта.

Сначала реализуется каждый блок в отдельности. В процессе реализации можно выделить прямоугольные и непрямоугольные площади под каждый блок. Происходит назначение и расположение выводов каждого блока.

После блочной реализации создаются абстракции каждого блока, используемые в реализации верхнего блока. В подходе «снизу-вверх» создается топология верхнего блока проекта, в которой использованы абстракции внутренних.

Сборка кристалла реализуется практически так же, как и в подходе «сверху-вниз», т.е. объединяется информация по net-листу и разводке как каждого блока, так и верхнего.

Трудозатраты на создание топологии зависят от текущего уровня прототипирования проекта.

Создание топологии кристалла начинается с загрузки текущего проекта и изучения его внутренней структуры и связей. Для создания общей топологии кристалла нужно создать минимальное число внутренних топологий, или их создание вообще может не понадобиться. При просмотре общей топологии кристалла объекты, расположенные слева от ядра, являются модулями верхнего уровня, их можно двигать и изменять форму, а справа находятся блоки, которые можно двигать, не изменяя их форму. Можно посмотреть submodule в иерархии каждого модуля в отдельности.

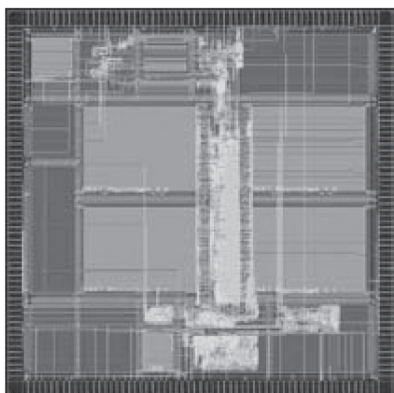


Рисунок 7 – Общий вид топологии СнК ДЦТС

На топологии общего вида (рисунок 7) выделяются контакты, шины питания и соединения блоков между собой, после чего отображаются соединительные линии, а также число этих связей между выделенным блоком и остальными (рисунок 8).

Соединительные линии помогают сориентировать блоки таким образом, чтобы показать их контакты в направлении наименьшей плотности разводки.

Трассировка сигнальных цепей производится автоматически при разводке кристалла. Однако в некоторых случаях возможно ручное редактирование сигнальных цепей: добавление, удаление, перенос в другой слой, объединение нескольких цепей, перемещение сигнальной цепи, увеличение ширины цепи.

Пример трассировки сигнальных цепей СнК ДЦТС показан на рисунке 9. Трассировка выполнялась автоматически.

Трассировка цепей питания

Цепи питания проекта (рисунок 10) разделяются на глобальные (электропитание ядер) и электропитание вентилях, называемое электрообвязкой. Глобальные цепи питания определяются оценкой потребления тока IP-ядер (например, память) и стандартных вентилях, что влияет на ширину колец цепей питания и число контактных площадок цепей питания.

Электрообвязка – важная часть обычной области кристалла. Как правило, стандартные области кристалла являются слишком большими, чтобы гарантировать доста-

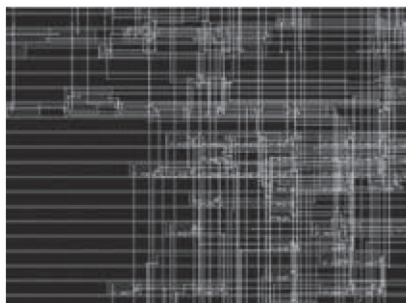


Рисунок 9 – Сигнальные цепи СнК ДЦТС

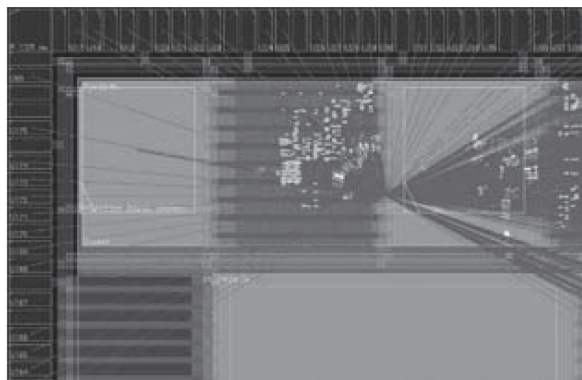


Рисунок 8 – Квадратурный демодулятор и его соединительные цепи, идущие на контактные площадки и другие СФБ, входящие в СнК ДЦТС

точное электропитание только через магистральные цепи питания. В зависимости от длины цепи питания, тактовой частоты, сопротивления шин питания и других параметров падение напряжения или увеличение потребления тока могут произойти по всей длине проводника.

Чтобы предотвратить эти эффекты, следует руководствоваться следующими принципами для проектирования ячеек питания.

1. Установка электропар на краях и внутренних частях ячеек.

Вначале и в конце стандартной ячейки всегда добавляется электропара – земля и питание (Vdd и Vss). Рекомендуется всегда проводить оба проводника рядом вокруг области кристалла, которую они питают.

2. Выбор ширины цепи питания.

Выбор правильной ширины цепи питания всегда взаимосвязан с числом проводников, которые необходимо разместить. Чем шире проводники, тем меньше

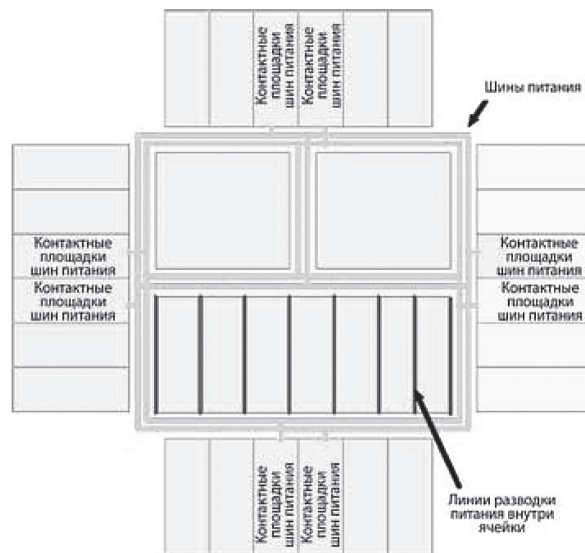


Рисунок 10 – Цепи питания в кристалле

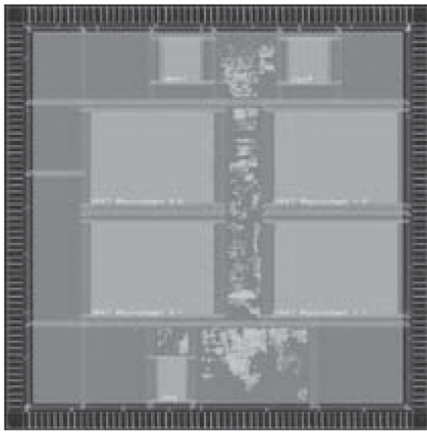


Рисунок 11 – Цепи питания в кристалле СнК ДЦТС

их требуется. Снижение числа проводников меньше необходимого минимума приводит к ухудшению энергообеспечения области между ними. Большое число проводников усложняет работу разводчика и увеличивает время топологического проектирования.

Выбор правильной ширины цепи питания является эмпирическим. Но она должна равняться как минимум двойной ширине стандартной ширины цепи питания вентиля.

Для основных шин питания анализируется потребление тока на IP-ядрах (например, память) и стандартных вентилях, что влияет на ширину колец цепей питания и число контактных площадок цепей питания.

В зависимости от технологии нанесения металлических слоев максимальный ток, проходящий через сечение проводника, может измениться в пределах 0,5...1 мА/мкм в первом слое металлизации (metal1). Ток в 0,8 мА/мкм может использоваться как основное значение. Поскольку толщина проводников в верхних слоях металлизации больше, их максимальные нагрузочные способности немного выше.

В библиотеке имеются две контактные площадки для соединения колец цепей питания с ними. Контактная площадка PVDB присоединяет к ядру питание, а PVOB – землю. Оба соединения имеют размер 62,5 мкм и в третьем слое металла (metal3) соединяются с кольцами питания. Их максимальная токовая нагрузка – около 50 мА. Основываясь на необходимости потребляемого тока устройства, вычисляется количество контактных площадок цепей питания, которые располагаются рационально с учетом необходимости в блоках.

Во время разводки цепей питания необходимо проверять длину проводников так, чтобы падение напряжения не превышало 0,1 В. В противном случае, необходимо добавлять усилительные буферы и подключать к шинам питания дополнительные контактные площадки.

При разработке СнК ДЦТС были получены шины питания, представленные на рисунке 11 (общий вид). На рисунке 12 показано подключение шин питания к контактным площадкам.

Таким образом, мы рассмотрели особенности проектирования топологии СБИС типа СнК. В следующей статье



Рисунок 12 – Цепи питания в кристалле СнК ДЦТС (увеличенный фрагмент)

цикла мы рассмотрим вопросы верификации топологии СБИС и ее подготовки к производству.

Литература:

1. Стешенко, В.Б. Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер / В.Б. тешенко, А.В. Руткевич, А.В. Бумагин, Ю.Ю. Гулин, Д.И. Воронков, Д.Ю. Гречищев, Е.В. Евстигнеева, М.В. Синельникова // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9.
2. Немудров, В. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие / В. Немудров, Г. Мартин. – М. : Техносфера, 2004.
3. Рабаи, Жан М. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования : пер. с англ. / Жан М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич. – 2-е изд. – М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2007.
4. Chang, H. Surviving the SOC revolution: A guide to platform-based design, Norwell / H. Chang, L. Cooke, M. Hunt [et al.]. – MA : Kluwer, 1999.
5. Бухтеев, А.В. Методы и средства проектирования систем на кристалле / А.В. Бухтеев // Chip news. – 2003. – № 4. – С. 4–14.
6. Weste, N.H. Principles of CMOS VLSI design. A systems perspective / N.H. Weste, K. Eshraghian. – Addison-Wesley publishing company, 1994.
7. Rubin, S. Computer aids for VLSI design / S. Rubin. – Addison-Wesley publishing company, 1994.
8. Chandrakasan, A.P. Low power digital CMOS design / A.P. Chandrakasan, R.W. Brodersen. – Kluwer Academic publishers, 1998.
9. Chandrakasan, A.P. Design of high-performance microprocessors circuits / A.P. Chandrakasan, W.J. Bowhill, F. Fox. – IEEE Press, 2001.
10. Abidi, A.S. Integrated circuits for wireless communications / A.S. Abidi, P.G. Gray, R.G. Meyer. – IEEE Press, 1999.
11. Doering, R. Limits of integrated circuit manufacturing / R. Doering, Y. Nishi // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, № 3. – P. 375–393.
12. Bryant, R.E. Limitations and challenges of computer-aided design technology for CMOS VLSI / R.E. Bryant, K.-T. Cheng, A.B. Kahng [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, № 3. – P. 341–362.

ЯЗЫК SYSTEMVERILOG. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБИС И СИСТЕМ

А. Пеженков, Д. Радченко

Развитие компонентной базы современной электроники требует создания новых средств проектирования. Когда-то основным инструментом разработчика интегральных микросхем был редактор принципиальных схем. При переходе к цифровым СБИС размерность схем стала такой, что ее описание средствами графического редактора принципиальных схем стало практически невозможным. Появилась идея проектирования цифровых СБИС на уровне межрегистровых передач с помощью специализированных языков, таких как Verilog и VHDL. Сегодня в рамках концепции «система на кристалле» перед разработчиками микросхем возникают задачи системного уровня. Идет поиск подходов, которые позволили бы решать их параллельно с традиционными задачами проектирования цифровых СБИС. Одним из перспективных направлений здесь может быть использование языка SystemVerilog. Компания Synopsys активно пропагандирует преимущества этого языка и использует его в своих средствах проектирования.

В поисках более эффективной организации процесса проектирования цифровых систем в микроэлектронной индустрии все больше внимания уделяется средствам проектирования системного уровня. Важная роль здесь принадлежит языкам описания проекта с более высоким, по сравнению с традиционными Verilog и VHDL, уровнем абстракции. Так, за последнее время появилось много проектов, работающих с такими языками, как C/C++, SystemC, «e» (система Vericity), «m» (система Matlab). В компании Synopsys большие надежды связывают с использованием языка SystemVerilog, как наиболее органичного при переходе от проектирования СБИС к задачам системного проектирования. Этот язык хорошо воспринимается разработчиками, уже работающими с языками Verilog и VHDL, он удобен при решении задач функциональной верификации и обеспечивает возможность эффективного логического синтеза проекта из описаний на этом языке. Рассмотрим некоторые особенности языка SystemVerilog и историю его создания.

Язык SystemVerilog. Краткая справка

Версия языка Verilog 1995 года включала возможности событийного моделирования, четырехзначную логику (1, 0, X, Z), поддержку аппаратного параллелизма, модульной организации, моделирования на уровне логических вентилях и переключателей (с учетом времени переключения), временного моделирования. Язык VHDL позволил разработчикам использовать новые типы данных, такие, как многомерные массивы, структуры, автоматические и строковые переменные, целочисленные переменные со знаком, перечисляемые и пользовательские типы, указатели. Были добавлены механизмы динамического распределения памяти, перегрузки операторов, организации пакетов (независимо транслируемых модулей). Появилась возможность конфигурации архитектуры и динамической аппаратной генерации. Адаптация языков, базирующихся на языке C, к проектированию аппаратуры стимулировала движение в направлении объектно-ориентированного подхода. Стандарт Verilog 2001 подтянул возможности этого

языка к возможностям языка VHDL, но поддержка развитых структур данных в нем все еще не была предусмотрена.

Язык SystemVerilog [1] – расширение стандарта языка Verilog 2001 (IEEE Std. 1364-2001). Первый официальный стандарт языка SystemVerilog был принят в ноябре 2005 года (IEEE Std. 1800-2005). Основой стандарта является руководство SystemVerilog 3.1a LRM, разработанное компанией Accellera. При его подготовке использовался положительный опыт следующих продуктов различных компаний:

- SUPERLOG ESS HDL (компания Co-Design Automation);
- OpenVera HVL (компания Synopsys);
- PSL Assertions (компания IBM) – язык описания и проверки свойств проекта;
- OpenVera Assertions (компания Synopsys) – другой вариант языка описания и проверки свойств проекта;
- DirectC и API (компания Synopsys) – языковые интерфейсы C/Verilog;
- принцип раздельной компиляции (компания Mentor Graphics).

SystemVerilog представляет собой новый тип языка – унифицированный язык описания и верификации аппаратуры (Hardware Description and Verification Language, HDVL). Включает в себя два подмножества конструкций:

- конструкции для описания проекта (Design Under Test, DUT);
- конструкции для создания тестового окружения (verification environment) и проверки функционирования проекта (functional verification).

К наиболее важным новым возможностям, предоставляемым языком SystemVerilog, относятся:

- объектно-ориентированное программирование (ООП);
- описание интерфейсов;
- новые базовые типы данных, перечисляемые типы (enum), многомерные массивы, структуры и объединения (union);
- строки, динамические и ассоциативные массивы, списки;
- описание новых типов (typedef) и преобразование типов;
- внешняя область объявлений (extern);
- операторы ++, --, += и другие;
- передача параметров процедур по ссылке (ref);
- специализированные блоки always (always_ff, always_latch, always_comb);
- специализированные операторы if и case (unique if/case, priority if/case);
- средства взаимодействия между параллельными процессами (semaphore, mailbox);
- унифицированный язык утверждений (assertions) для динамической и формальной верификации;
- генерация случайных данных, управляемая ограничениями (constraints);
- описание точек анализа функционального покрытия и их мониторинг;
- программные блоки (programm blocks) и схемы тактирования (clocking domain);

– прямой программный интерфейс (Direct Programm Interface, DPI) C/Verilog.

SystemVerilog предназначен для разработки и проверки сложных аппаратных проектов большого объема (в том числе систем на кристалле). Этот язык позволяет значительно ускорить подготовку описания проекта благодаря наличию новых более удобных и компактных языковых конструкций. Эффективность верификации повышается благодаря использованию единой унифицированной языковой среды, поддерживающей не только описание проекта, но и описание тестового окружения. Поддерживается общая семантика проверок на основе утверждений (assertions), причем как при моделировании, так и в тестовом окружении, а также при анализе функционального покрытия и в средствах динамического и статического формального анализа.

SystemVerilog в продуктах SYNOPSYS

На сегодняшний день язык SystemVerilog поддерживается в таких продуктах компании Synopsys, как системы логического и смешанного моделирования VCS и VCS MX, система синтаксического и семантического анализа HDL-описаний на основе заданных правил и стандартов кодирования Leda, система формальной проверки логической эквивалентности описаний, представленных на вентильном или RTL-уровне Formality, гибридная система Magellan (функциональная верификация RTL-описаний на основе заданных утверждений с использованием формальных методов и динамического моделирования) и система логического синтеза Design Compiler. Таким образом, обеспечивается поддержка полноценного маршрута проектирования, использующего преимущества SystemVerilog.

Системы логического и смешанного моделирования VCS и VCS MX – промышленный стандарт в области традиционных средств функциональной верификации. В традиционном процессе функциональной верификации для заданного набора тестов проводится моделирование поведения системы на логическом уровне, затем полученные результаты анализируются на предмет совпадения с ожидаемыми. Приходится работать с огромными объемами кода описания проектов и не меньшим объемом кода, описывающего тестовые воздействия. При этом тестовые воздействия часто необходимо формировать в другой языковой среде. Поддержка языка SystemVerilog в системах VCS и VCS MX позволяет разработчику значительно сократить объем кода, благодаря более удобным и компактным конструкциям этого языка. Это относится и к коду описания самого проекта, и к коду описания тестового окружения. Проект и тесты создаются в рамках единой языковой среды, что упрощает отладку и самого проекта, и системы тестов, а также обеспечивает постоянную взаимосогласованную отладку этих описаний.

Язык SystemVerilog позволяет перейти на новую ступень организации тестового окружения проекта благодаря использованию принципов объектно-ориентированного программирования, поддержке механизмов случайной генерации тестовых сигналов в рамках заданных ограничений и встроенных средств анализа покрытия. Специалистами компаний Synopsys и ARM на базе языка SystemVerilog разработана методология создания тестового окружения VMM (Verification Methodology Manual), следуя которой можно достигнуть наибольшей эффективности при разработке реальных промышленных проектов [2].

В этой методологии, помимо других возможностей языка, активно используется механизм встроенных проверок на основе утверждений. Такие проверки можно вставлять как в систему тестов, так и в описание самого проекта. Они намного повышают эффективность процесса отладки. Встраивание проверок в разрабатываемые IP-блоки позволяет в последующем предотвратить использование этих блоков в несанкционированных режимах. В рамках работы с языком SystemVerilog системы VCS и VCS MX поддерживают стандартные тестирующие модели на SystemC и интерфейс к программам на языке C, обеспечивают различные типы анализа покрытия (покрытие кода, функциональное покрытие), а также другие традиционные механизмы отладки, свойственные системам логического моделирования.

Система Leda предназначена для проверки правильности RTL-описаний с точки зрения стандартов кодирования. Помимо поддержки традиционных Verilog и VHDL поддерживается стандарт SystemVerilog. Система позволяет формулировать собственные правила и формировать на их основе фирменный стандарт описания, учитывающий специфику проектов. Предусмотрена возможность создания настраиваемых шаблонов правил. В описаниях на SystemVerilog система позволяет находить сложные ошибки, связанные с использованием нескольких схем синхронизации (clocking domain). Важное преимущество работы с SystemVerilog-описаниями в том, что здесь можно сформулировать правила проверки не только описания проекта, но и его тестового окружения. При работе в маршруте проектирования компании Synopsys могут быть использованы специальные шаблоны правил, соблюдение которых позволяет добиваться наилучших результатов логического синтеза в системе Design Compiler и обеспечивает наилучшую производительность моделирования в системе VCS.

Система Formality позволяет провести статический анализ функциональной эквивалентности различных представлений одного и того же проекта. Проверка производится на основе методов теории доказательств. Тестовых векторов не требуется. Система очень полезна при поиске оптимального варианта реализации функционирования схемы, например, выборе оптимальной расстановки регистров, минимизации потребления, подборе вариантов схемы тактирования. Formality позволяет быстро убедиться, что новые варианты эквивалентны исходному. Продукт полностью поддерживает описания на SystemVerilog, позволяет проверять эквивалентность не только для СБИС на базе стандартных ячеек, но и полностью заказных СБИС и схем памяти.

Система Magellan – гибридная модель моделирования и формальной верификации. Поскольку формальные методы позволяют провести верификацию RTL-описаний только в некоторой ограниченной области состояний, ошибки, расположенные вне этой области, остаются не выявленными. В данном случае формальный анализ в точке исходного состояния не позволяет выявить «спрятанную в углу» ошибку. Но если провести формальный анализ для множества промежуточных состояний, вероятность нахождения «спрятанной» ошибки значительно возрастает. Для перехода из одного состояния в другое используются средства моделирования (в систему встроено ядро VCS) и случайные (с учетом заданных ограничений) воздействия.

Возможности, которые предоставляет язык SystemVerilog в области поддержки механизма утверждений, чрезвычайно

важны для работы системы Magellan. Утверждения языка SystemVerilog могут использоваться как при формальной верификации (для описания характеристик правильности функционирования), так и в качестве индикаторов нарушений при моделировании. Кроме того, что важно для гибридной технологии верификации, утверждения языка SystemVerilog позволяют описать ограничения на воздействия, генерируемые для передачи в моделирующее ядро. Помимо утверждений, создаваемых разработчиками, SystemVerilog предусматривает наличие расширенной собственной библиотеки стандартных утверждений.

Система Design Compiler – один из признанных лидеров в области средств логического синтеза. Для разработчиков цифровых СБИС и систем на кристалле, использующих преимущества SystemVerilog в области создания RTL-описания и его верификации, в конечном счете, важно, чтобы из отлаженного RTL-описания можно было автоматически синтезировать принципиальную схему проекта и результат при этом не уступал бы результатам, полученным при использовании описаний на языках Verilog или VHDL. На сегодняшний день, можно сказать, что задача поддержки логического синтеза из описаний на языке SystemVerilog в системе Design Compiler в целом успешно решена. Для проведения логического синтеза используется то же самое описание, что и для верификации, включая утверждения, вставленные для формальной верификации и проверок в процессе моделирования, а также части описания, формирующие тестовое окружение. Использование новых конструкций языка поддерживается средствами логического синтеза.

SystemVerilog в маршруте проектирования SYNOPSIS

Использование системы Leda позволяет проверить стиль кодирования и скорректировать описание таким образом, чтобы предотвратить потенциальную возможность функционального рассогласования RTL-описания, подаваемого на этап логического синтеза, и описания на уровне логических вентилей, полученного в результате синтеза. Кроме того, Leda помогает обеспечить эквивалентность моделей на RTL-уровне и на уровне вентилей. Важно также то, что система Design Compiler обычно не применяется для всего проекта целиком, синтез проводится поблочно. Семантический анализ конструкций SystemVerilog проводится для отдельного блока. Использование же VCS, Magellan и Leda позволяет проверить проект в целом. Моделирование на уровне логических вентилей в системе VCS и формальная верификация в системе Formality также позволяют проверить соответствие исходного RTL-описания проекта полученным результатам для всего проекта.

Используя данный маршрут проектирования, нужно учитывать, что не все конструкции языка могут быть абсолютно адекватно преобразованы в аппаратное описание. Простой пример – применение битовых переменных обеспечивает поддержку только двух состояний сигнала (1, 0), в то время как для описания состояния на входе/выходе реального логического элемента необходимо, по крайней мере, четыре значения (1, 0, X, Z). Подобное утверждение справедливо для всех языков, но SystemVerilog содержит новые возможности, к которым разработчики еще не привыкли, поэтому имеет смысл определить набор конструкций, работа с которыми в предлагаемом маршруте проектирования обеспечит создание удобного для логического синтеза описания. Можно, например, использовать вариант такого набора, предложенный разработчиками

компании Synopsys [4]. С определенной степенью условности эти рекомендации могут быть отражены в виде таблицы, характеризующей элементы языка SystemVerilog. Надо заметить, что таблица отражает только текущее состояние, в перспективе возможности использования SystemVerilog в маршруте проектирования Synopsys будут постоянно расширяться.

На сегодняшний день стандарт языка SystemVerilog в той или иной мере поддерживается всеми ведущими производителями САПР микроэлектроники. Активно развиваются средства проектирования на его основе. У этого языка есть хорошие шансы в ближайшее время стать базовым средством проектирования СБИС и систем на кристалле.

Литература:

1. Sutherland, S. SystemVerilog for Design / S. Sutherland, S. Davidmann, P. Flake. – Springer-Verlag, Boston, Massachusetts. Copyright. – 2004. – ISBN : 1-4020-7530-8.
2. Bergeron, J. Verification Methodology Manual for SystemVerilog / J. Bergeron, E. Cerny, A. Hunter, A. Nightingale. – Springer, 2005. – 510 p. – ISBN : 0-387-25538-9.
3. Pieper, K. SystemVerilog from a Synthesis Perspective / K. Pieper // Design and Verification Conference (DVCon), 2004.
4. Sutherland, S. Modeling with SystemVerilog in a Synopsys Synthesis Design Flow Using Leda, VCS, Design compiler and Formality / S. Sutherland. – Sutherland HDL, Inc.

synopsys.com

Качество и компетентность в мире печатных плат

ОАО «Минский часовой завод»

ВАШ НАДЕЖНЫЙ ИЗГОТОВИТЕЛЬ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

220095, г. Минск,
пр. Независимости, 95,
т./ф. +375 (17) 280-49-55
моб. +375 (29) 750-45-50
bogdashich@mail.ru

Срок изготовления от 2 дней до двух недель

Типы плат

- ДПП, МПП (до 24 слоев) любого класса точности
- Гибкие печатные платы
- Платы для ВЧ/СВЧ
- Платы на алюминиевой подложке
- Платы для смарт-карт

Возможности

- Проектирование плат
- Технологическая поддержка
- Покрyтия: HASL, иммерсионное золото, иммерсионное олово, ПОС, Ni-B
- Формирование контура любой формы
- Материалы : FR-4, Rogers, Duroid, алюминий, лавсан

Качество

- Сертификат соответствия ВУ/112 05.01.0030030

МОРФОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР PtSi/Si, СФОРМИРОВАННЫХ НА АМОРФНОМ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

УДК 539.21; 539.23

О.Ю. Наливайко, А.С. Турцевич, ОАО «ИНТЕГРАЛ»;
К.В. Чиж, В.Я. Резник, В.А. Юрьев,
С.А. Миронов, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН;
А.Г. Новиков, П.И. Гайдук, БГУ, г. Минск

Аннотация

Исследованы структурно-морфологические особенности диодов Шоттки PtSi/Si, сформированных твердофазной реакцией платиновой пленки с поликристаллическим либо аморфным кремнием при температуре 550 °С в среде водорода. Методами рентгеноспектрального анализа и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР) установлено, что состав однородной области силицида платины соответствует PtSi. Измерены концентрация электрически активной примеси, холловская подвижность электронов в слое кремния и вольтамперные характеристики полученных структур PtSi/Si.

Введение

Силициды различных металлов находят широкое применение в приборах твердотельной электроники, оптоэлектронике и микроэлектромеханических системах (МЭМС) в качестве омических контактов, токопроводящих выпрямляющих элементов интегральных схем [1], [2], охлаждаемых приемников ИК-излучения [3], неохлаждаемых болометрических приемников ИК-излучения [4], в технологии «system-on-glass» (система на стекле), применяемой в производстве плоских дисплеев большого формата [5], [6]. Наиболее распространенными структурами данного класса являются силициды платины и никеля. Силицид никеля имеет меньшую высоту потенциального барьера с кремнием *n*-типа по сравнению с силицидом платины (0,7 eV и 0,87 eV соответственно [1]) и легче окисляется, что может приводить к ухудшению параметров структур. Применение силицида платины в приборах с использованием диодов Шоттки более предпочтительно и позволяет получать структуры с малыми обратными токами, большими пробивными напряжениями, высокой стабильностью параметров и хорошей воспроизводимостью. Обычно силициды платины получают путем низкотемпературной термической обработки структур пленки металла – монокристаллический кремний. Этот метод исследован достаточно подробно, например, в работе [7] методами Оже-электронной спектроскопии, рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии изучены особенности формирования структуры слоев PtSi, неоднородность их состава в зависимости от температурных режимов отжига. В то же время, свойства слоев PtSi/Si, сформированных на поликристаллическом и аморфном кремнии, изучены менее подробно. Одной из областей применения силицидов на поликристаллическом и аморфном кремнии является технология «system-on-glass». Особенность данной технологии состоит в том, что структуры и элементы устройств микроэлектроники формируются на органических подложках или на аморфных пленках, таких, как стекло, двуокись кремния, нитрид кремния. Кремниевый слой в таких структурах представляет собой аморфную, поликристалли-

ческую, нанокристаллическую пленку или их комбинацию в зависимости от технологии и режимов получения. Дальнейшая термообработка, формирующая силицид, приводит к рекристаллизации пленок и изменению их морфологии [8]. Граница раздела PtSi/Si также изменяется в процессе отжига и, как следствие, изменяются электрофизические свойства диода Шоттки [9].

Методика эксперимента

В данной работе исследованы характеристики диодов Шоттки PtSi/Si, сформированных на поликристаллическом и аморфном кремнии, в зависимости от уровня легирования и температуры активации примеси. Структуры диодов Шоттки формировались на пластинах монокристаллического кремния марки КДБ-12, на которых предварительно наносился слой пиролитического нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной ~0,12 мкм. На слое Si_3N_4 методом термического разложения моносилана в атмосфере водорода осаждался слой поликристаллического (поли-Si) либо аморфного (a-Si) кремния толщиной ~150 нм при температуре подложки ~600 °С. После осаждения пленки легировали ионами P⁺ до концентрации $1,25 \times 10^{18}$ – $6,25 \times 10^{19}$ см⁻³. Энергия ионов (60 кэВ) выбиралась исходя из условия однородности распределения примеси в слое кремния.

Активация фосфора в a-Si проводилась при температуре 850 °С, а в поли-Si – при температурах 1000 °С и 850 °С. Затем наносился пассивирующий (защитный) слой и методами литографии формировалась топология структуры. Диоды Шоттки PtSi/Si изготавливались путем нанесения пленки Pt толщиной 600 Å. Затем наносился слой Al толщиной ~400 нм для получения омического контакта к диодам Шоттки, формирования проводников и контактных площадок с последующей термической обработкой при температуре 550 °С в среде азота. Изображение диода, полученное с помощью оптического микроскопа, приведено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Оптическое изображение диода Шоттки:
1 – Al, 2 – PtSi, 3 – Si

Результаты и их обсуждение

Структурные особенности формирования тестовых диодов Шоттки PtSi/Si в процессе их изготовления исследованы с помощью светлопольной просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ). Изображения получены в условиях двулучевого дифракционного контраста с различными значениями векторов дифракции g и параметра отклонения s (рисунок 2).

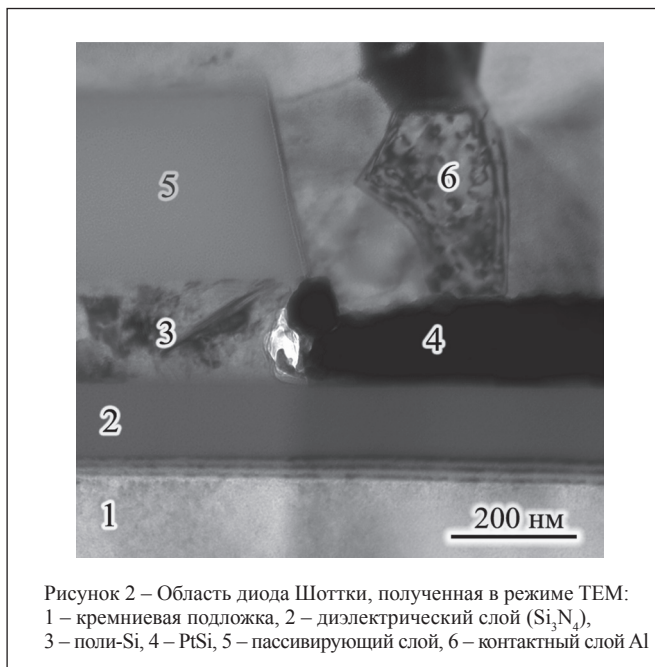


Рисунок 2 – Область диода Шоттки, полученная в режиме ТЕМ:
1 – кремниевая подложка, 2 – диэлектрический слой (Si_3N_4),
3 – поли-Si, 4 – PtSi, 5 – пассивирующий слой, 6 – контактный слой Al

Микрофотографии этой же области образца диода были проанализированы в режиме сканирующей просвечивающей электронной микроскопии STEM (рисунок 3).

Этот режим формирования электронно-микроскопического изображения использует Z-контраст, формируемый в скани-

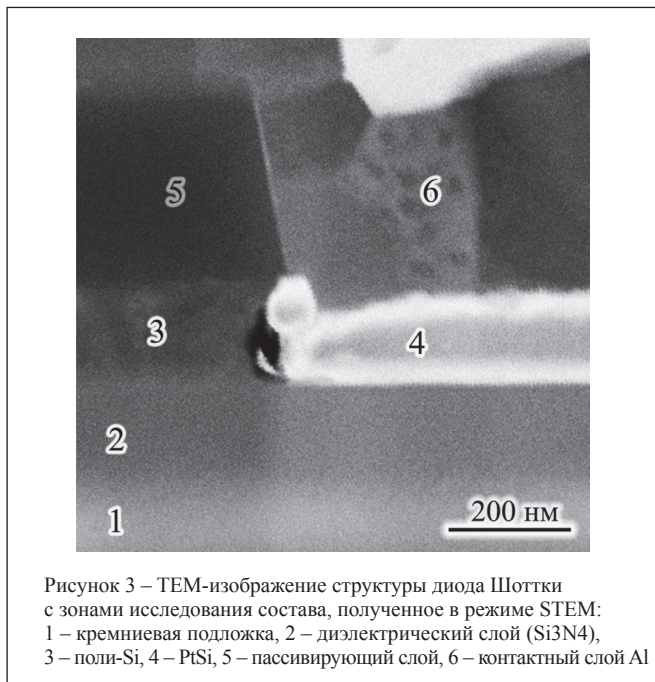


Рисунок 3 – ТЕМ-изображение структуры диода Шоттки с зонами исследования состава, полученное в режиме STEM:
1 – кремниевая подложка, 2 – диэлектрический слой (Si_3N_4),
3 – поли-Si, 4 – PtSi, 5 – пассивирующий слой, 6 – контактный слой Al

рующем режиме при помощи высокоуглового детектора темного поля. Данная методика наблюдения чувствительна к изменению элементного состава образца, содержащего слои материалов с различным составом. Величина контраста (при однородной толщине образца) имеет квадратичную зависимость от атомных номеров элементов, формирующих изображение. При используемой геометрии съемки сигнал детектора определяется исключительно электронами, рассеянными на углы, превышающие брегговский. Поэтому характер STEM-изображения является инверсным по сравнению со светлопольным ТЕМ-изображением. При этом более светлым областям отвечают участки образца, содержащие химические элементы с большим коэффициентом рассеяния – слой силицида платины. Анализ ТЕМ и STEM-изображений подтверждает образование силицида платины, при этом установлено, что весь слой поликристаллического кремния прореагировал с платиной. Из закона сохранения массы расчетная толщина полученного слоя PtSi составляет 140 нм (плотность силицида платины принималась равной $12,47 \text{ г/см}^3$ [10]), что хорошо согласуется с измеренным по электронному изображению значением толщины PtSi – 130 нм. Таким образом, барьер Шоттки PtSi/Si в данных экспериментах сформирован между областями 3, 4 и имеет малую площадь.

С помощью рентгеновского энергодисперсионного анализа определен состав силицида платины. В результате измерений элементного состава, проведенных в центральной области PtSi и с помощью специального программного обеспечения, был получен элементный состав (рисунок 4) и распределение элементов Si (50,64 % ат.), Pt (49,36 % ат.). Наличие меди в спектре обусловлено процессами предварительной подготовки образца.

Типичные ВАХ диодов Шоттки PtSi/Si приведены на рисунке 5, параметры слоев кремния которых представлены в таблице 1. Из рисунка 5 видно, что диодная ВАХ имеет малые токи обратной ветви (при запирающем напряжении 2 В ток не превышал 0,5 мкА) и отношение прямого и обратного токов превышает два порядка.

Основным и существенным недостатком изготовленных структур является последовательное сопротивление. Структуры №1 и №5 имеют наибольшее последовательное сопротивление, вследствие чего, ВАХ этих образцов были близки к линейным. Структуры №4 и №7 с высокой концентрацией активной примеси имели наименьшее последовательное сопротивление, но при этом барьер Шоттки PtSi/Si тунельно-прозрачен для основных носителей и ВАХ данных структур так же имели линейный характер. Из анализа полученных

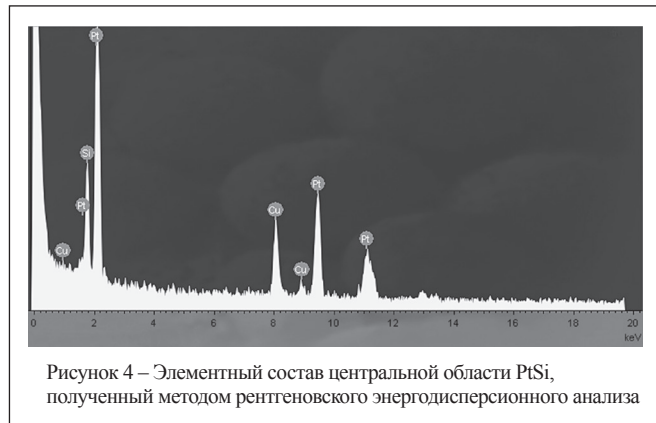
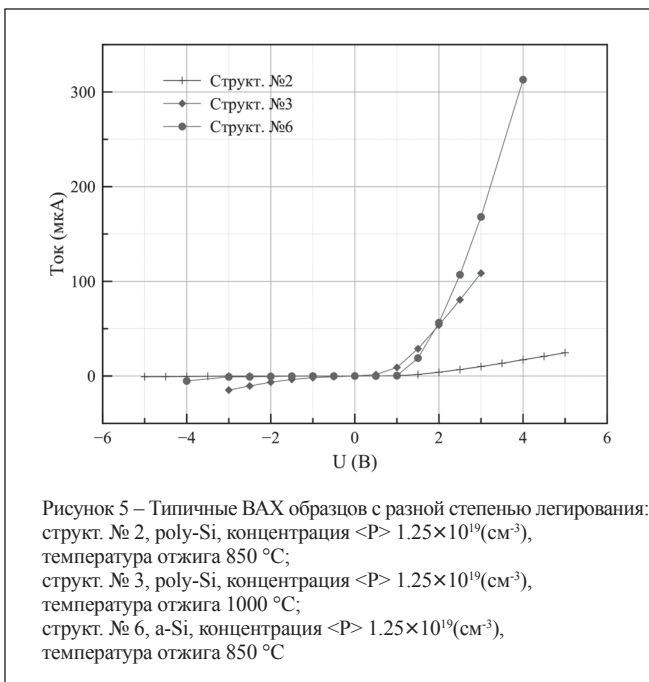


Рисунок 4 – Элементный состав центральной области PtSi, полученный методом рентгеновского энергодисперсионного анализа

Таблица 1 – Технологические и электрические параметры слоев кремния, выращенных для изготовления диодов Шоттки

Структура	Температура активации, °C	Концентрация, (см ⁻³)	ρ (Ом·см)	Концентрация активной примеси (см ⁻³)	μ (см ² /В·сек) T = 300 К
№1 poly-Si	850	1.25·10 ¹⁸	1.4·10 ⁴		
№2 poly-Si	850	1.25·10 ¹⁹	0.88-0.98	6.6·10 ¹⁷	4.3
№3 poly-Si	1000	1.25·10 ¹⁹	0.2-0.3	5.2·10 ¹⁸	6.3
№4 poly-Si	850	6.25·10 ¹⁹	0.018-0.026	5.8·10 ¹⁹	7.6
№5 a-Si	850	1.25·10 ¹⁸	28-45		
№6 a-Si	850	1.25·10 ¹⁹	0.05-0.08	1.0·10 ¹⁹	10
№7 a-Si	850	6.25·10 ¹⁹	(4.8-6.6)·10 ⁻³	7.5·10 ¹⁹	18



данных следует, что степень легирования ионами <P>, необходимая для получения диодов Шоттки PtSi/Si с хорошими ВАХ, должна составлять ~10¹⁹(см³) и активация примеси 850 °C, что ниже применяемой в стандартной технологии (1000 °C).

Заключение

Методами сканирующей просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа установлено, что термический отжиг в атмосфере водорода при 550 °C слоев Pt толщиной 60 нм на границе раздела a-Si или pc-Si приводит к образованию слоя PtSi толщиной 130 нм. Анализ рентгеновских энергодисперсионных спектров различных участков структуры показывает, что состав слоя силицида платины во всех областях близок к PtSi. Таким образом, установлена возможность использования аморфного негидрированного Si для создания диодов Шоттки на диэлектрических подложках. Сформированные диодные структуры имеют обратные токи на уровне 100 нА и обладают низким последовательным сопротивлением. Применение такой технологии позволяет снизить температуру некоторых технологических процессов, что дает возможность применять эту технологию при создании матричных многоэлемент-

ных приборов с предварительно сформированной схемой считывания.

Исследования проведены при поддержке ГПНИ «Электроника и фотоника 1.1.02», российская часть исследований профинансирована из средств грантов РФФИ №8744 и №14.132.21.1395.

Гайдук П.И. проводил исследования в рамках проекта Marie Curie International Incoming Fellowship 7th FP (N° 298932, call reference: FP7-PEOPLE-2011-IIF).

Литература:

1. Murarka, S.P. Silicides for VLSI Applications / S.P. Murarka. – Academic Press, 1983.
2. Достанко, А.П. Пленочные токопроводящие системы СБИС / А.П. Достанко, В.В. Баранов, В.В. Шаталов. – Минск, 1989. – 238 с.
3. M. Kimata, N. Yutani, N. Tsubouchi, T. Seto, Proceedings of SPIE 350–360, 1992.
4. Chizh K.V., Chapnin V.A., Kalinushkin V.P., Resnik V.Y., Storozhevykh M.S., Yuryev V.A., Nanoscale Research Letters, 2013, 8:177.
5. Lin, C.P., Tsui, B.Y., Yang, M.J., Huang, R.H. Electron Device Letters, IEEE, 27(5), 360–363.
6. Seung-Min Jung and Won-Ju Cho, Journal of the Korean Physical Society, 60.1 (2012): 6–9.
7. Chang C.A., Segmüller A. Huang H.C.W. [et al.] // J. Electrochem. Soc. 1986. – Vol. 133, № 6. – P. 1256–1260.
8. Jin-Wook Shin, Won-Ju Cho, Chel-Jong Choi, and Moongyu Jang, Appl. Phys. Lett. 94, 053502 (2009).
9. T. Sadoh, Y. Ohyama, A. Kenjo, K. Ikeda, Y. Yamashita, and M. Miyao, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 45, 4370 2006.
10. Самсонов, Г.В. Силициды / Г.В. Самсонов, Л.А. Дворина, Б.М. Рудь. – М.: «Металлургия», 1979. – 271 с.

Abstract

The structural and morphological features of a PtSi/Si Schottky diode formed by the solid phase reaction of a platinum film with a polycrystalline or amorphous silicon at the temperature of 550 °C in hydrogen atmosphere are explored. X-ray microanalysis and high-resolution transmission electron microscopy show that the composition of a homo-geneous area of platinum silicide are shown to correspond to the PtSi phase. The concentration of electrically active dopant, the Hall mobility of electrons in the silicon layer and the current-voltage characteristics of the PtS/Si structures are studied.

Поступила в редакцию 17.10.2013 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В КАЧЕСТВЕ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ

УДК 003.26

Н.В. Концевой, В.С. Садов,
БГУ, г. Минск

Аннотация

В статье приводятся результаты исследования возможности использования хаотических последовательностей в качестве стеганографического контейнера.

Введение

На протяжении долгого времени люди ищут ответ на вопрос: «Как защитить информацию от ее прочтения другими?». Шифрование появилось вместе с речью. Более того, древние люди изначально писали с помощью криптографических знаков, значение которых знали лишь некоторые.

Криптографические методы защиты информации обладают некоторыми особыми свойствами, присущие только им. Они базируются на свойствах передаваемой информации. При этом неважно, на каких носителях сохранена информация, неважно, как она хранится, и неважен используемый канал связи. Современные криптографические методы позволяют защитить данные, но всегда остается вопрос надежности этой защиты. Одной из задач криптографии является получение случайной последовательности, которая могла бы быть восстановлена спустя некоторое время.

В настоящее время для секретной передачи информации широко используются стеганографические методы. Стеганография основана на встраивании секретной информации, сохраненной в виде файла, в другие компьютерные файлы.

При использовании в качестве стеганографического контейнера случайной последовательности стоит вопрос о степени нарушения ее хаотичности, так как этот вопрос является определяющим при оценке стойкости контейнера.

Генерирование хаотической последовательности

Электронные цепи могут генерировать хаотический, непериодический сигнал, применяемый для различных целей. В работе исследована цепь Чуа, способная генерировать случайную последовательность чисел (рисунок 1) [1].

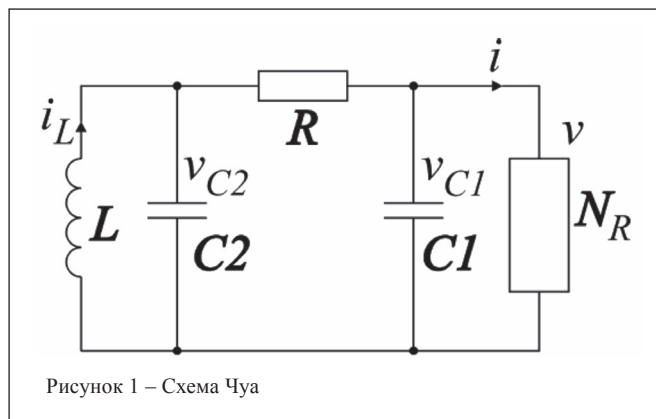


Рисунок 1 – Схема Чуа

Цепь Чуа состоит из двух конденсаторов, двух индуктивностей, резистора и одного нелинейного элемента, который называют диодом Чуа. При этом вольтамперная характеристика элемента NR имеет область отрицательных сопротивлений. Приведенная цепь – это генератор, а нелинейный элемент в ней позволяет получить хаотические колебания.

Математическое описание такой цепи выводится с использованием закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_{c1}}{dt} &= G(v_{c2} - v_{c1}) - g(v_{c1}), \\ C_2 \frac{dv_{c2}}{dt} &= G(v_{c1} - v_{c2}) + i_L, \\ L \frac{di_L}{dt} &= v_{c2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где функция g – кусочно-линейная, непрерывная. Ее определяют следующим отношением

$$g(v_{c1}) = G_b v_{c1} + \frac{1}{2} (G_a - G_b)(|v_{c1} + E| - |v_{c1} - E|). \quad (2)$$

Видно, что контур описывается тремя дифференциальными уравнениями. В качестве переменных выбирают напряжение на двух конденсаторах и сила тока через индуктивность. Численное решение этих уравнений показывает, что при определенных соотношениях между компонентами цепи, изменение значений переменных во времени приобретает хаотический характер.

Введем следующие замены для того, чтобы система дифференциальных уравнений приняла более простой вид.

$$\begin{aligned} m_0 &= \frac{G_a}{G}; m_1 = \frac{G_b}{G}; \alpha = \frac{C_2}{C_1}; \beta = \frac{C_2}{LG^2}; \\ \tau &= \frac{tG}{C_2}; x = \frac{v_{c1}}{E}; y = \frac{v_{c2}}{E}; z = \frac{i_L}{G}. \end{aligned} \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения, описывающие систему, можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= \alpha[y - x - h(x)], \\ \frac{dy}{d\tau} &= x - y + z, \\ \frac{dz}{d\tau} &= -\beta y, \end{aligned} \quad (4)$$

где $h(x) = m_1 x + \frac{1}{2} (m_0 - m_1)(|x + 1| - |x - 1|)$.

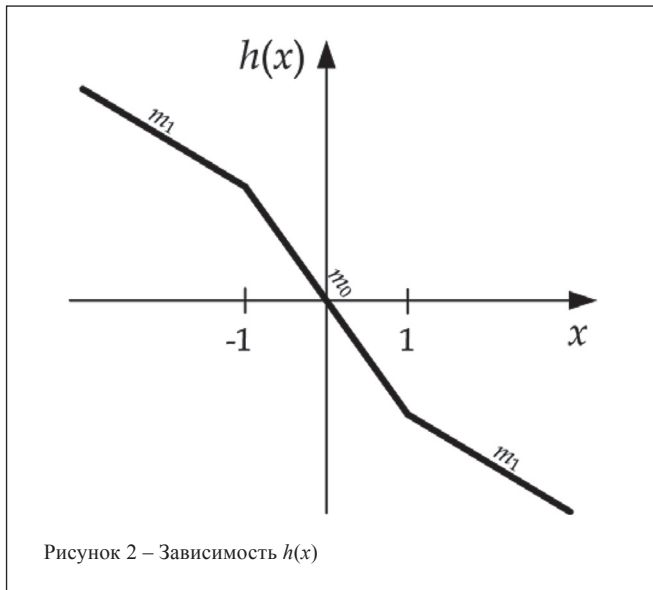


Рисунок 2 – Зависимость $h(x)$

Зависимость $h(x)$ представлена на рисунке 2.

Схема Чуа ведет себя хаотично только при определенных значениях компонентов и управляющих параметров.

Рассмотрим различные соотношения между параметрами α , β . Результаты исследований представлены в таблице 1.

Различные фазовые портреты при изменении параметра β представлены на рисунке 3.

Разбиение плоскости управляющих параметров системы Чуа на характерные режимы представлено на рисунке 4.

После проведенного анализа становится очевидно, что при различных параметрах α и β цепь Чуа ведет себя по-разному, т.е. она чувствительна к элементам схемы

Таблица 1 – Фазовые портреты при различных значениях α , β

α	β		α	β	
5	6,05	разгон	15	21,1	разгон
5	6,1	аттрактор double scroll	15	21,15	аттрактор double scroll
5	6,46	аттрактор double scroll	15	26,9	аттрактор double scroll
5	6,47	спираль Чуа	15	27	спираль Чуа
5	6,5	спираль Чуа	15	29,5	спираль Чуа
5	6,6	гармонический осциллятор	15	29,6	гармонический осциллятор
10	13,43	разгон	20	29,55	разгон
10	13,5	аттрактор double scroll	20	29,6	аттрактор double scroll
10	15,5	аттрактор double scroll	20	39,6	аттрактор double scroll
10	16	спираль Чуа	20	39,7	спираль Чуа
10	16,8	спираль Чуа	20	45,2	спираль Чуа
10	16,9	гармонический осциллятор	20	43,2	гармонический осциллятор

R, C1, C2 и L. Если зафиксировать емкости и индуктивности (что наиболее удобно), то определяющим для цепи станет сопротивление R. Изменяя его, будут изменяться и фазовые портреты.

Возьмем конкретные значения. Пусть емкость C1 = 100 пФ, C2 = 900 пФ. Тогда значение управляющего параметра $\alpha = 9$. Индуктивность L = 90 мГн, следовательно $\beta = R \cdot 10^{-4}$. При $\beta > 15,4$ ($R > 154$ кОм) имеем поведение цепи такое же, как и у гармонического осциллятора (рисунок 4 а). При $\beta = 15,7$ ($R = 157$ кОм)

существуют 4 различные амплитуды колебания, а траектория в фазовой плоскости заканчивается после четырех поворотов (рисунок 4 б). При дальнейшем уменьшении β траектории становятся все более частыми и все более плотными вплоть до формирования траектории с бесконечным периодом (аттрактор Чуа, рисунок 4 в), который представляет собой хаотический режим работы цепи. Это достигается при значении $\beta = 15,4$ ($R = 154$ кОм). При дальнейшем уменьшении параметра β до 14,2 ($R = 142$ кОм) спиральный аттрактор Чуа переходит в аттрактор «double scroll» – траектории вокруг двух состояний (рисунок 4 г).

Более сложная модификация схемы Чуа может быть получена путем усложнения функции $h(x)$. В литературе [2, 3] показано, что возможно получение и более сложных форм аттрактора. Для этого предложено видоизменить функцию $h(x)$ следующим образом:

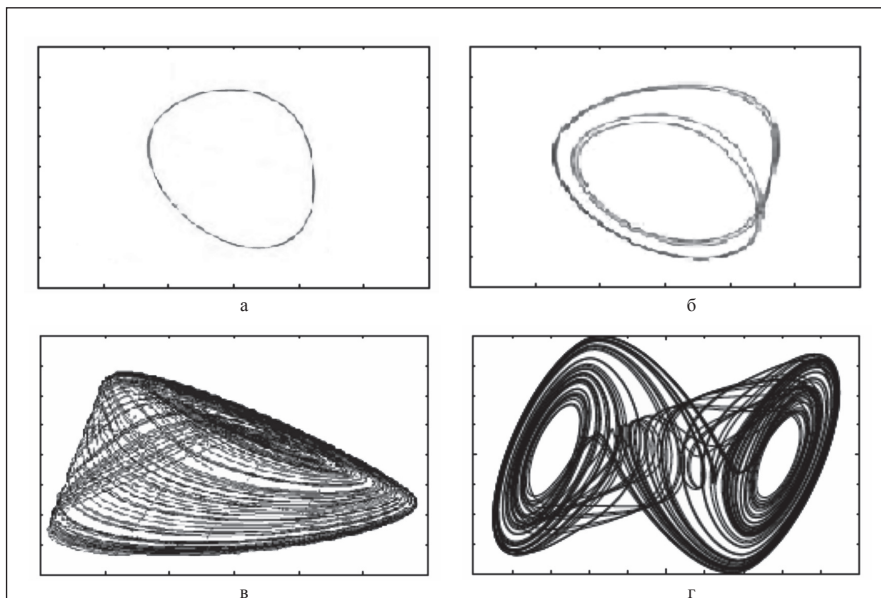


Рисунок 3 – Поведение цепи Чуа при различном значении управляющего параметра β : а) периодические колебания с периодом T ($\beta = 18$); б) периодические колебания с периодом 4T ($\beta = 16,9$); в) спираль аттрактора Чуа ($\beta = 16,3$); г) аттрактор «double scroll» ($\beta = 14$)

$$h(x) = m_1 x + \frac{1}{2} (m_0 - m_1) (|x + 1| - |x - 1|). \quad (5)$$

Если ввести для каждого шага свои параметры c_i и m_i , то в результате можно получить «3-, 4-, 5-scroll» аттракторы (рисунок 5).

Анализ схемы с помощью критерия случайности Ляпунова (рисунок 6) [4] показывает, что чувствительность схемы Чуа к начальным условиям увеличивается со сложностью хаотических аттракторов (для схемы с 5-scroll аттракторами параметр Ляпунова на 24 % выше, чем для схемы, генерирующей 2-scroll аттракторы).

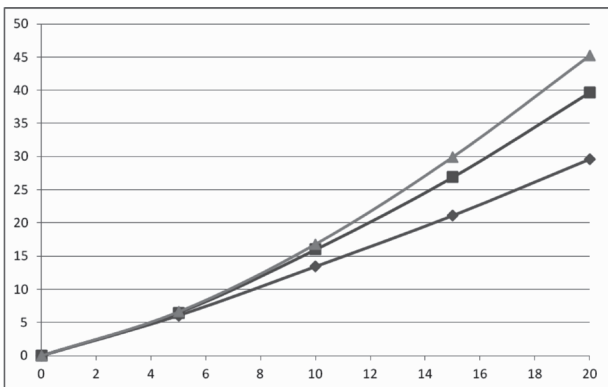


Рисунок 4 – Разбиение плоскости управляющих параметров системы Чуа на характерные режимы: 1 – периодические колебания; 2 – спираль Чуа; 3 – аттрактор «double scroll»; 4 – разгон

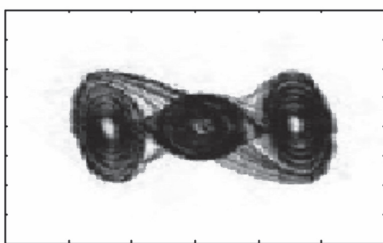
Начальные условия, а также управляющие параметры системы представляют собой секретный ключ, которым обмениваются для шифрования и дешифрования информации. При этом управляющие параметры выбираются таким образом, чтобы в криптографическом смысле чувствительность к начальным условиям была настолько большой, насколько это возможно. Поэтому для генератора случайных чисел (как следует из примеров в работе) следует выбирать вариант схемы Чуа, способный генерировать 5-scroll хаотические аттракторы, а управляющие параметры такими, при которых показатель Ляпунова максимален. Секретный ключ не может быть произвольно заданным. Он должен быть адекватно и тщательно подобран для получения качественного шифрования.

Использование случайной последовательности в качестве стеганографического контейнера

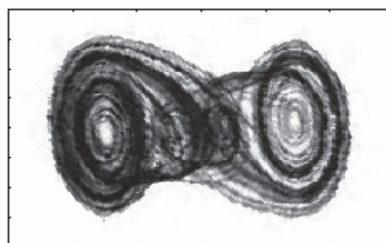
Полученный ряд чисел можно использовать для шифрования данных (например, гаммированием). Однако последовательность можно использовать в качестве стеганографического контейнера. Зададимся целью встроить текст. Поток символов текста можно перевести в двоичное число и каждый битовый символ вставлять вместо последнего символа в отчетах исходной последовательности.

В системе MATLAB эту операцию можно провести, используя функцию `bitxor(a1, t)`, где a – символ, полученный по схеме Чуа последовательности, t – число, соответствующее символу из встраиваемого текста.

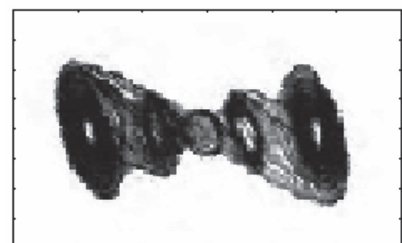
На стороне дешифрования проводят ту же операцию `bitxor(a1, a2)`, только уже между символами из полученной по схеме Чуа последовательности и набором чисел, полученных после передачи из центра шифрования.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Фазовые портреты: а) «3-scroll»; б) «4-scroll»; в) «5-scroll»

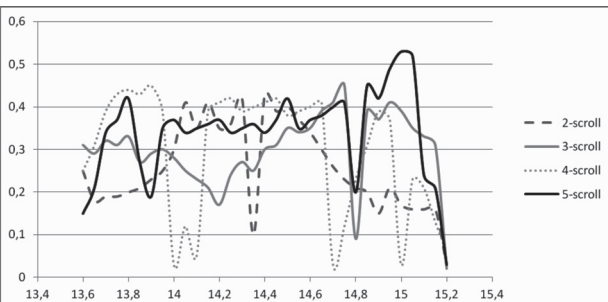


Рисунок 6 – Средние значения показателей Ляпунова λ при различных значениях параметра β в случае цепи Чуа с 2-, 3-, 4- и 5-scroll аттракторами

Встает вопрос – насколько встраиваемый текст «ухудшает» свойства исходной последовательности.

Рассмотрим график, представленный на рисунке 7.

Видно, что при вставке текста в некоторых случаях «случайность» набора чисел падает значительно (это особенно заметно при встраивании текста длиной 530 символов), а в некоторых случаях показатель Ляпунова остается на уровне, который соответствует исходной последовательности.

В связи с этим, целесообразно найти критерии оценки качества встраивания текстов или степени нарушения хаотичности исходной последовательности. Для этого для различных встраиваемых текстов фиксированной длины (например, 200 символов) оценена колмогоровская сложность [5] модифицированной последовательности. Результаты отражены в таблице 2 и на рисунке 8.

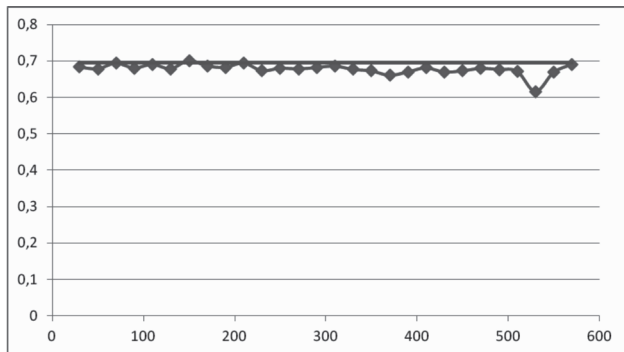


Рисунок 7 – Зависимость среднего показателя Ляпунова λ от длины встраиваемого текста l (прямой линией показан показатель Ляпунова последовательности без встраивания)

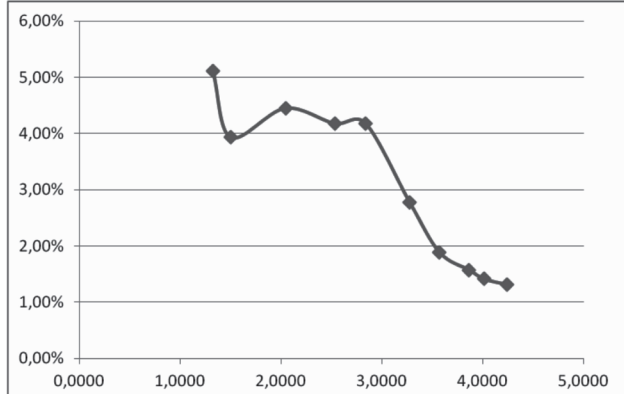


Рисунок 8 – Зависимость отклонения среднего показателя Ляпунова от колмогоровской сложности встраиваемого текста

Как видно из результатов исследования, при колмогоровской сложности менее 3,5 показатель Ляпунова меняется менее, чем на 2 %, что сильно искажает исходную последовательность. Поэтому, если исходный текст был с большим показателем колмогоровской сложности, то его можно сразу встраивать.

Замечания

1. Особенности перевода символа в число. В пакете MATLAB первой прописной букве русского алфавита соответствует число 1040, а последней строчной – 1103. Буквы латинского алфавита, знаки препинания, пробелы и другие специальные символы соответствуют числам из первых двух сотен. Таким образом, если в тексте используются символы, соответствующие сильно различающимся числам, то встраивание такого текста не приведет к сильному снижению показателя Ляпунова. Например, если текст в 200 символов представляет собой периодически записанную строчку «Белорусский государственный университет Belarusian State University», то даже при низкой колмогоровской сложности (менее 1,8) изменение параметра Ляпунова будет небольшим (около 2,5 %).

Таблица 2 – Критерии оценки качества встраивания текстов в хаотическую последовательность

Средний показатель Ляпунова (послед. без вставкой)	Средний показатель Ляпунова (послед. со вставкой)	Колмогоровская сложность	Отличие в показателях Ляпунова
0,6935	0,6580	1,3269	5,12 %
0,6935	0,6662	1,5028	3,94 %
0,6935	0,6626	2,0422	4,46 %
0,6935	0,6645	2,5327	4,18 %
0,6935	0,6645	2,8397	4,18 %
0,6935	0,6742	3,2736	2,78 %
0,6935	0,6804	3,5698	1,89 %
0,6935	0,6826	3,8654	1,57 %
0,6935	0,6837	4,0120	1,41 %
0,6935	0,6844	4,2385	1,31 %

2. Длина встраиваемого текста. Начиная с некоторого момента времени, последовательность начинает расходиться, и поэтому наборы чисел, полученные в центрах шифрования и дешифрования, будут отличаться. Очевидно, что это приведет к неправильному дешифрованию передаваемой информации. Например, если имеется русскоязычный текст в 250 символов, то для описания его любого символа в пакете MATLAB необходимо 11 двоичных символов. Тогда исходная последовательность должна содержать минимум 2750 чисел.

Заключение

В работе приведены критерии оценки возможности встраивания текста в случайную последовательность, сгенерированную усовершенствованной цепью Чуа, при которой полученный набор чисел все еще будет обладать степенью хаотичности, близкой к первоначальной.

Литература:

1. Бугаевский, М.Ю. Исследование поведения цепи Чуа / М.Ю. Бугаевский, В.И. Пономаренко. – Саратов: «Колледж», 1998. – 29 с.
2. Jaydip, S. Applied cryptography and network security / Sen Jaydip. – Croatia, 2012. – P. 295–320.
3. Suykens, J. Between n-double sinks and n-double scrolls / J. Suykens, J. Vandewalle. – Hawaii, 1993. – 7 p.
4. Calculating the entire Lyapunov Spectra of the Lorenz Attractor [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.math.tamu.edu/~mpilant/math614/Matlab/Lyapunov/LorenzSpectrum.pdf>. – Дата доступа : 01.05.2013.
5. Kaspar, F. Easily Calculable Measure for the Complexity of Spatiotemporal Patterns / F. Kaspar, H.G. Schuster // Physical Review A. – Vol. 36, № 2, P. 842.

Abstract

This article presents the results of research the possibility of using chaotic sequences as steganography container.

Поступила в редакцию 05.11.2013 г.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЛАЗЕРОФЕРЕЗА

УДК 615.849.19

Т.А. Железнякова, А.А. Рыжевич, С.В. Солоневич,
БГУ, Институт физики НАН Беларуси, г. Минск

Аннотация

С применением серийно выпускаемых полупроводниковых лазерных модулей экспериментально реализовано электронно-оптическое устройство для формирования динамического градиентного светового поля (ДГСП) интерференционного типа с полосчатым распределением интенсивности в поперечном сечении. Максимумы интенсивности ДГСП можно контролируемо перемещать в зоне интерференции. Исследована возможность проведения приповерхностного лазерофореа с помощью полученного ДГСП. В рамках модели с неравновесным поглощением излучения микроструктурами внутри биотканей показано, что результат воздействия формируемым ДГСП на биоткань может быть описан как сумма эффектов от непрерывного и синусоидально модулированного по интенсивности излучения. Частота пульсации интенсивности ДГСП на облучаемой поверхности может быть выбрана в соответствии с микропараметрами биоткани.

Введение

В ряде клинических случаев в качестве способа доставки лекарственного препарата целесообразно применять лазерофорез – введение препарата в биоткань под действием лазерного излучения [1–4]. Зачастую, когда патологические процессы локализованы на внешних поверхностях организма – коже и слизистой оболочке, имеет смысл вводить лекарственный препарат только в пораженные области биоткани, т.е. на небольшую глубину. Для проведения приповерхностного лазерофореа в [5] нами впервые было предложено применять динамические градиентные световые поля (ДГСП), представляющие собой суперпозицию двух или более [6, 7] когерентных световых пучков, разность фаз между которыми изменяется по определенному закону. Поскольку когерентность лазерного излучения при распространении вглубь биоткани быстро уменьшается [8], глубина модуляции интенсивности в ДГСП так же быстро уменьшается, а эффективность лазерофореа с глубиной снижается. Гелий-неоновые, гелий-кадмиевые и аргоновые лазеры генерируют когерентные и качественные по распределению интенсивности световые пучки необходимой мощности, из которых, как следствие, формируются и качественные ДГСП. Однако в силу конструктивных особенностей газовые лазеры, особенно аргоновые, имеют довольно большие габариты.

В настоящее время во всех сферах человеческой деятельности, в том числе и в медико-биологической, все более широкое распространение получают небольшие по размерам, имеющие высокий КПД и в тоже время недорогие полупроводниковые лазеры. В своих работах, связанных с лазерофорезом, мы неоднократно использовали серийно выпускаемые лазерные полупроводниковые

модули KLM-D532-30-5 и KLM-M650-40-5 производства ЗАО «ФТИ-Оптроник», С.Петербург, Россия. Некоторые параметры используемых лазерных модулей согласно паспорту приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры используемых лазерных модулей

Характеристика	Значение	
	KLM-D532-30-5	KLM-M650-40-5
Длина волны, нм	532	650±5
Мощность лазерного излучения, мВт	35	40
Начальный диаметр пучка излучения, мм	≤5	≤5
Расходимость светового пятна ЛЛ, мрад	0,5	≤1

Эти компактные электронные приборы предоставляют возможность для импульсной модуляции выходного излучения внешним генератором, благодаря чему модуль KLM-M650-40-5, генерирующий на длине волны 650 нм, является хорошим инструментом для глубинного лазерофореа импульсно-модулированным излучением [9]. Для проведения поверхностного лазерофореа лучше подходит излучение модуля KLM-D532-30-5 с длиной волны 532 нм в силу его сильного поглощения биотканями. Однако в некоторых случаях излучение этой длины волны не годится по причине негативного воздействия на вводимый препарат и нужно использовать красное излучение, при этом эффективность лазерофореа на глубине становится существенно меньшей, чем на поверхности.

На выходе из модулей KLM-D532-30-5 и KLM-M650-40-5, благодаря наличию в них трехлинзовых коллиматоров, формируются слабо расходящиеся световые пучки. С точки зрения когерентности и распределения интенсивности, излучения полупроводниковых и газовых лазеров различаются, поэтому в данной работе нами исследована возможность применения полупроводниковых лазерных модулей для проведения процедуры приповерхностного лазерофореа посредством ДГСП.

Формирование динамического градиентного светового поля

Для формирования ДГСП авторами данной работы была предложена модифицированная интерференционная схема, представленная на рисунке 1. В этой схеме для изменения разности хода интерферирующих между собой лучей периодически изменяется пространственное положение укрепленного на пьезоэлектрическом элементе зеркала 4. При плавном изменении оптического пути

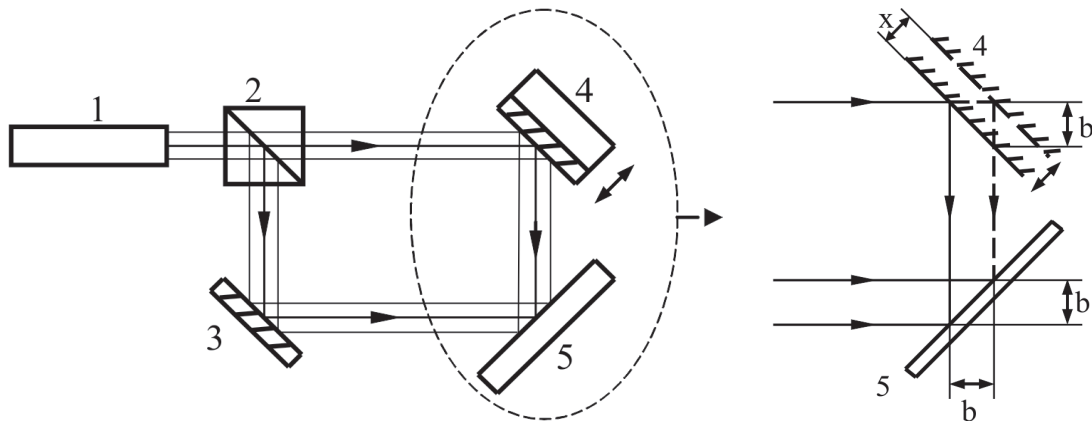


Рисунок 1 – Оптическая схема установки для формирования динамического градиентного светового поля на поверхности объекта воздействия: 1 – лазер, 2 – светоделительный элемент, 3 – зеркало, 4 – зеркало на пьезокерамической подложке, 5 – поверхность объекта

одного из световых потоков посредством увеличения напряжения, подаваемого на пьезоэлектрический элемент, распределение интенсивности интерференционного светового поля в виде параллельных полос смещается на поверхности облучаемого объекта.

Зеркало 4 под действием управляющего переменного напряжения может смещаться на величины, сравнимые и большие, чем длина волны светового излучения. Благодаря этому интерференционные полосы на поверхности объекта 5 могут смещаться на период световой волны и более.

Если излучение имеет высокую степень когерентности, при периодическом смещении полос ровно на один период, интенсивность в конкретной точке поверхности объекта описывается функцией вида $\sin^2 x$, что с точки зрения лазерной обработки аналогично облучению поверхности импульсным излучением, интенсивность которого промодулирована по синусоидальному закону. При периодическом смещении зеркала 4, как показано на рисунке 1, на расстояние $x = (2m+1)\lambda/2^{3/2}$, где $m = 0, 1, 2, \dots$ в каждой точке поля происходит $2m+1$ изменений значения интенсивности от минимального до максимального значения и наоборот, от максимального до минимального. Необходимые значения

управляющего напряжения можно задавать посредством генератора импульсных сигналов.

В оптической схеме на рисунке 1 интерферирующие лазерные пучки распространяются под углом 90° друг к другу, из-за чего период интерференционной картины довольно мал, а частота колебаний интенсивности в неподвижной точке зоны интерференции при изменении разницы фаз между пучками излишне высока. Оптическая схема на рисунке 2 позволяет получить ДГСП с гораздо большим периодом.

По этой схеме и была создана экспериментальная установка для формирования и исследования динамического градиентного светового поля, фотография которой представлена на рисунке 3.

В данную установку по очереди устанавливали лазерные модули KLM-D532-30-5 и KLM-M650-40-5. Для подачи на пьезокерамическую подложку зеркала периодически изменяющегося по синусоидальному закону напряжения нами использовался генератор-осциллоскоп Handyscope HS3-50, сопряженный с портативным компьютером. На мониторе компьютера (рисунок 3) отображается осциллограмма электрического напряжения,

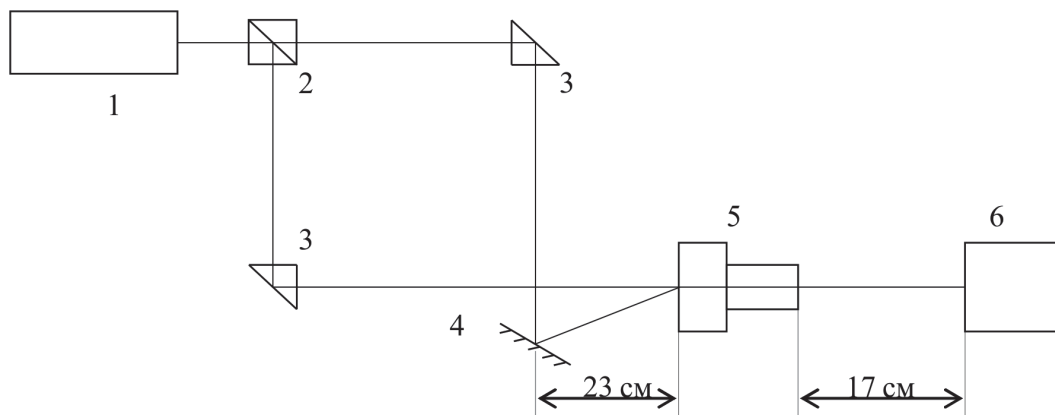


Рисунок 2 – Оптическая схема установки для формирования динамического градиентного светового поля с помощью пьезоэлектрического элемента: 1 – лазер, 2 – светоделительный элемент, 3 – зеркало, 4 – зеркало, укрепленное на пьезокерамической подложке, 5 – микроскоп; 6 – CCD-камера

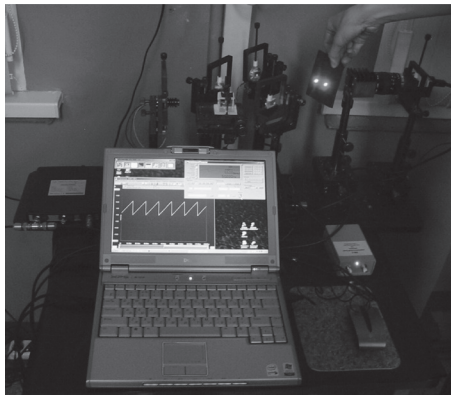


Рисунок 3 – Фотография установки для формирования динамического градиентного светового поля

подаваемого на пьезокерамическую подложку зеркала 4 (рисунок 2).

С помощью этой установки получены представленные на рисунке 4 кадры распределения интенсивности интерференционного светового поля при плавном изменении оптического пути одного из световых потоков посред-

ством увеличения напряжения, подаваемого на пьезоэлектрический элемент. Световое поле зарегистрировано с помощью CCD-камеры USB 2.0 AV.0010.1.21100.00 UI-2250-MM (разрешение 1600×1200 пикс, размер чувствительного элемента $7,04 \times 4,28$ мм², размер пиксела $4,4 \times 4,4$ мкм²), оснащенной объективом-микроскопом.

В этой установке для изменения разности хода интерферирующих между собой лучей периодически изменяется пространственное положение укрепленного на пьезоэлектрическом элементе зеркала 4. Характерной особенностью пьезоэлектрических элементов является отсутствие рабочего тока и безинерционность, что делает их особенно востребованными при генерации колебаний высоких частот.

Определение контрастности градиентного светового поля

Для характеристики качества интерференционной картины обычно используют видность, которая рассчитывается по максимальному и минимальному значению интенсивности в этой картине: $v = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$. В случае, когда интенсивность двух интерферирующих пучков одинакова, видность интерференционной картины равна доле когерентного света, присутствующего в интер-

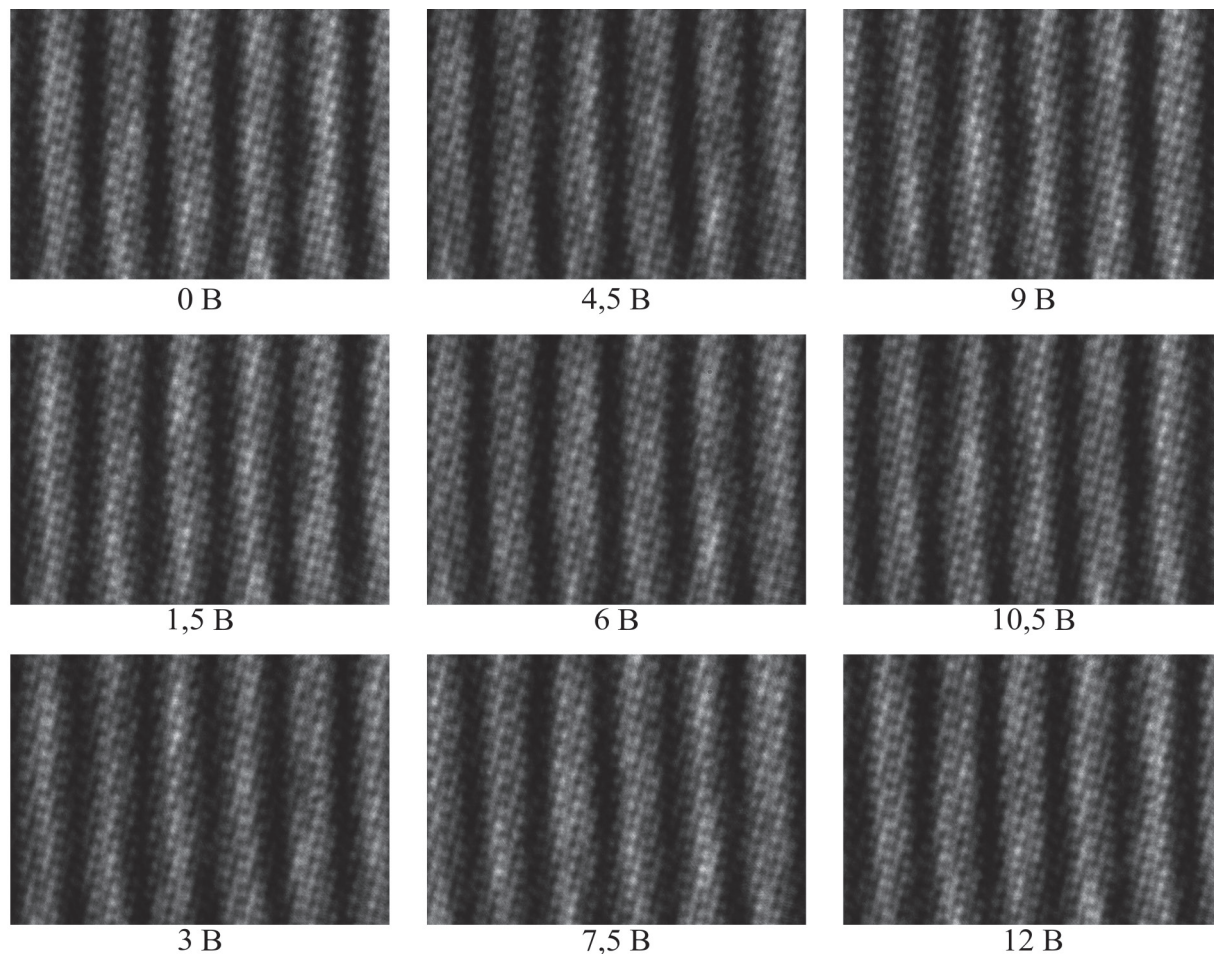


Рисунок 4 – Распределение интенсивности интерференционного светового поля при подаваемом на пьезоэлектрический элемент напряжении 0–12 В

ферирующих световых пучках. Кроме того, видность также имеет смысл коэффициента амплитудной модуляции. Полученная нами с помощью модуля KLM-D532-30-5 динамическая интерференционная картина оказалась далеко не идеальной, однако, интерференционные полосы были достаточно хорошо различимы (рисунок 5 а).

Расчет видности v по экспериментально зарегистрированному распределению интенсивности в ДГСП осуществляли двумя способами. Первый способ заключается в том, что для каждой из 10 рассматриваемых строк полученного изображения определяется значение видности по выражению вида $y = y_0 + A \sin [\pi(x-x_c)/w]$, аппроксимирующего распределение интенсивности в каждой строке (см., например, рисунок 5 б). Результат усреднения v по десяти строкам дает $v_1 = (0,335 \pm 0,008)$, относительная погрешность $\varepsilon_{v1} = 2,4 \%$ (рисунок 5 в), скорректированный коэффициент детерминации R^2 при аппроксимации для всех строк принимал значения $0,58 \pm 0,01$. Для расчета v вторым способом нужно значения интенсивности в десяти строках распределения просуммировать, разделить на 10, и уже после этого аппроксимировать усредненную зависимость интенсивности от координаты функцией вида $y = y_0 + A \sin [\pi(x-x_c)/w]$ (рисунок 5 г).

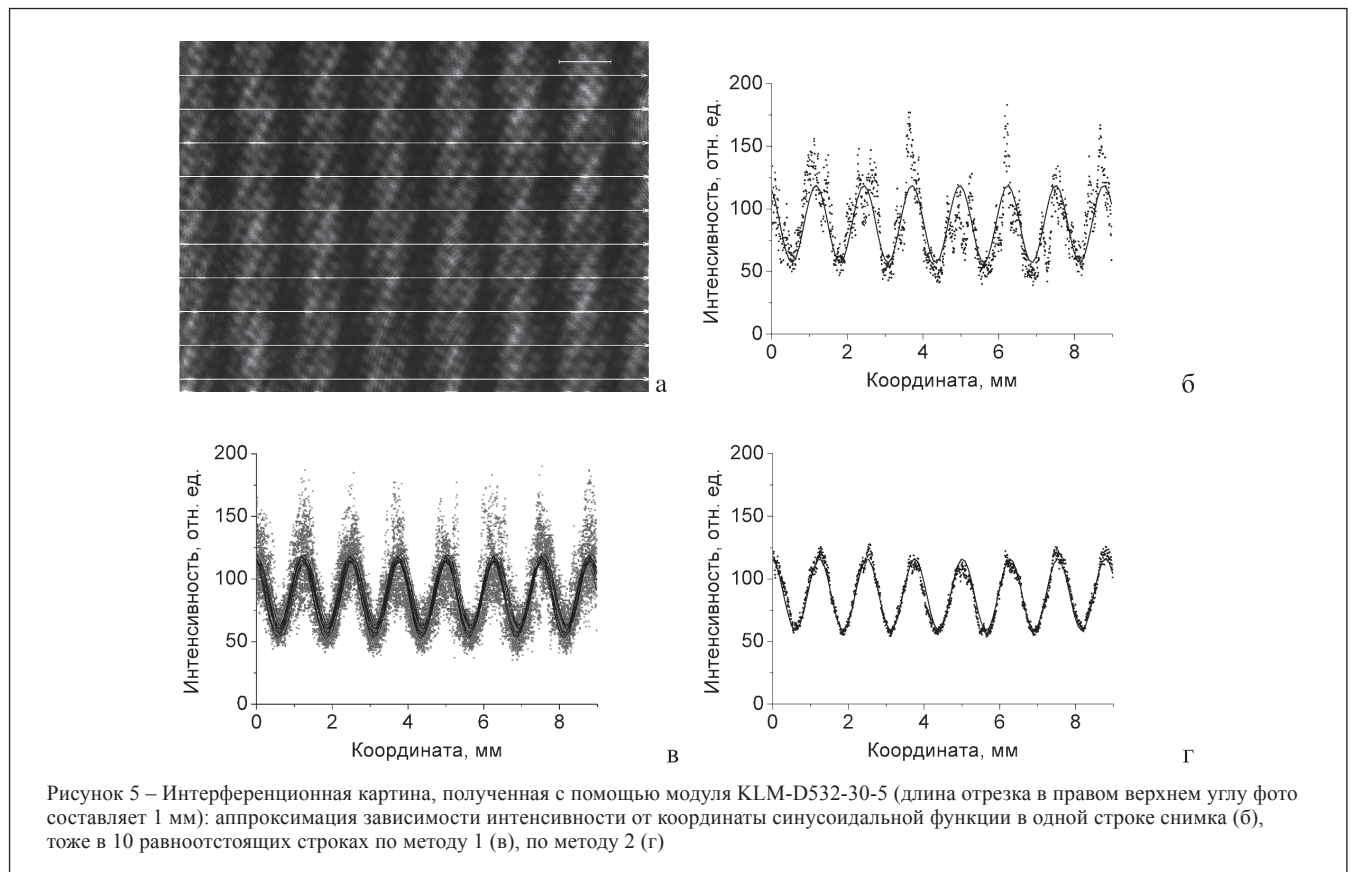
В результате получаем, что $v_2 = (0,326 \pm 0,003)$, относительная погрешность $\varepsilon_{v2} = 0,9 \%$, скорректированный коэффициент детерминации R^2 равен 0,94. Рассмотренные методы расчета видности интерференционной картины дают очень близкие результаты, причем второй метод позволяет гораздо быстрее производить расчеты по всем строкам распределения и находить более точную аппроксимирующую функцию.

Анализ распределений интенсивности в ДГСП, сформированных излучением модуля KLM-M650-40-5, показал очень близкие результаты как по виду интерференционных картин, так и по численным характеристикам (видность ни на одном из распределений не превышает значения 0,35).

Влияние ДГСП на процесс лазерофреза

В настоящее время для описания биофизических процессов в большинстве биотканей принята предложенная в 1972 году Синджером и Николсоном жидкомозаичная модель мембраны, в основе которой лежит липидная бислоиная мембрана, представляющая собой двумерный растворитель (тонкая пленка), в который погружены белки. Несмотря на белковый каркас, мембраны являются подвижными структурами. Рассмотрим с точки зрения молекулярной физики и термодинамики процессы, происходящие при облучении биоткани лазерным излучением.

В начальный момент облучения некоторая часть излучения начинает поглощаться. Поскольку коэффициент поглощения излучения у структурных элементов биоткани, в частности, клеток, существенно больше (например, на $10^3 \div 10^4 \text{ см}^{-1}$ для излучения с длиной волны $\lambda = 632 \text{ нм}$), чем у жидкости, заполняющей промежутки между ними, большая часть энергии поглощается именно структурными элементами биоткани. За счет теплоотдачи часть энергии уходит в окружающие промежутки, однако, при облучении температура структурных элементов в облучаемой области ткани обязательно увеличивается. Нагревание жидкости внутри структурных элементов



приводит к увеличению ее объема и, как следствие, к сдвигу наружу липидов бислойной мембраны. Этому противодействуют сила поверхностного натяжения на выдвигающихся липидных головках и сила вязкого трения, возникающая во время движения липида, величина которой прямо пропорциональна скорости выдвижения липидов. Сила поверхностного натяжения на несколько порядков меньше силы упругости, за счет нагревания жидкости, поэтому воспрепятствовать выдвижению она не может, однако, из-за ее существования, в первую очередь, выдвигаются те области билипидной мембраны, где сила поверхностного натяжения меньше.

Поскольку сила поверхностного натяжения прямо пропорциональна периметру выдвигаемой области, наиболее предпочтительно выдвижение не отдельных липидов, а их объединений (кластеров), размеры которых задаются белковым цитоскелетом. Кластер может объединять от нескольких десятков до нескольких тысяч липидов. Наиболее энергетически выгодно выдвижение больших по размеру кластеров (при увеличении радиуса кластера его площадь и объем растут быстрее периметра). При небольшом выдвижении подвижного элемента, т.е. одиночного липида или кластера липидов, периметр выдвигаемой области не изменяется и поэтому сила поверхностного натяжения также остается без изменения до выдвижения липида или липидного кластера на величину гидрофильной головки. Сила поверхностного натяжения для следующих за головками гидрофобных хвостов значительно больше, чем для гидрофильных головок, поэтому, если происходит дальнейшее увеличение объема жидкости, начинается выдвижение другого подвижного элемента. При остывании жидкости внутри структурных элементов биоткани после прекращения воздействия лазерного излучения происходит обратный процесс. Первыми возвращаются в прежнее положение подвижные элементы, на которые действует большая сила поверхностного натяжения, в данном случае уже являющаяся возвращающей.

При воздействии на биоткань излучения с постоянной интенсивностью происходит один цикл нагрев-остывание, т.е. подвижный элемент начинает выдвигаться после начала облучения и начинает возвращаться в исходное положение после прекращения облучения.

Поскольку лазерофорез представляет собой проникновение молекул препарата внутрь ткани, то есть основания считать, что чем большее количество подвижных элементов выдвинется на максимальное расстояние в результате воздействия лазерного излучения и чем больше таких изменений конфигурации мембраны будет происходить в единицу времени, тем больше будет проницаемость мембраны и соответственно выше эффективность лазерофореза.

Изменение объема структурного элемента в зависимости от изменения температуры равно

$$\Delta V(t) = \beta_T V_0 \Delta T(t), \quad (1)$$

где β_T – термический коэффициент объемного расширения вещества; V_0 – первоначальный объем некоторой замкнутой области; $\Delta T(t)$ – изменение температуры.

При облучении рассматриваемого участка в течение времени t излучением с длиной волны λ и интенсивностью $I(t)$ при наличии оттока тепла из нагретой области струк-

турного элемента величина отклонения температуры от первоначального значения в момент времени t на расстоянии z от поверхности биоткани описывается уравнением:

$$\Delta T(t)'_z = bI(t) - \Delta T(t)/\tau, \quad (2)$$

где $\tau = L^2/\chi$ – характерное время температурной релаксации структурного элемента; L – линейный размер структурного элемента; $\chi = \kappa/(\rho c)$ – коэффициент температуропроводности биоткани; κ – коэффициент теплопроводности биоткани; $b = \Delta\alpha(\lambda)/(\rho c)$, $\Delta\alpha(\lambda) = \alpha_1(\lambda) - \alpha_2(\lambda)$, $\alpha_1(\lambda)$ и $\alpha_2(\lambda)$ – коэффициенты поглощения среды на длине волны λ для областей 1 (структурного элемента) и 2 (жидкости, окружающей структурный элемент) соответственно; ρ , c – плотность и удельная теплоемкость среды в структурном элементе.

Для случая, когда интенсивность излучения постоянна во времени $I(t) = I_0$ и в начальный момент времени ($t = 0$) $\Delta T(0) = 0$, решение уравнения выглядит следующим образом:

$$\Delta T(t) = bI_0 \tau [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (3)$$

Отсюда для случая облучения биоткани непрерывным лазерным излучением с постоянной интенсивностью для достаточно большого времени облучения ($t = \infty$) получаем предельно возможное изменение температуры $\Delta T^{\text{lim}} = bI_0 \tau$. После прекращения облучения происходит постепенное охлаждение структурного элемента.

При воздействии лазерного излучения с модулированной во времени интенсивностью в мембранах происходит периодическое смещение кластеров липидов и возвращение их в положение, близкое к первоначальному.

Для случая, когда интенсивность излучения изменяется по закону $I(t) = I_0 \sin^2(\omega t)$, где I_0 и ω – амплитуда и циклическая частота колебаний соответственно, изменение температуры рассчитывается так:

$$\Delta T(t) = bI_0 \tau \times \frac{-4\omega^2 \tau^2 e^{-\frac{t}{\tau}} + 4\omega^2 \tau^2 + 1 - \cos(2\omega t) - 2\omega \tau \sin(2\omega t)}{8\omega^2 \tau^2 + 2}. \quad (4)$$

Модуляция интенсивности излучения дополнительно и в значительной мере увеличивает эффективность лазерофореза за счет многократных циклических процессов увеличения-уменьшения объема структурных элементов биоткани [5].

Для оценки эффективности воздействия модулированного излучения мы вводим величину B , равную отношению амплитуды колебаний температуры $A_{\Delta T}$ к предельно возможному изменению температуры ΔT^{lim} :

$$B = \frac{A_{\Delta T}}{\Delta T^{\text{lim}}}. \quad (5)$$

Для импульсов излучения произвольной формы величина B определяется численными методами, однако, для синусоидальных импульсов она может быть определена и аналитически при допущении, что колебания температуры уже установились ($t \gg \tau$). В таком случае, функция (4) имеет экстремумы в моменты времени

$$t_e = \frac{\beta + \pi n}{2\omega}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

где $\beta = \arctg(2\omega\tau)$. В момент времени $t_{e1} = \beta/(2\omega)$ величина $\Delta T(t)$ достигает минимального значения ΔT_{\min} , а при $t_{e2} = (\beta+\pi)/(2\omega)$ – максимального ΔT_{\max} . Амплитуда колебаний температуры структурного элемента определяется выражением $A_{\Delta T} = \Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}$. После подстановки соответствующих значений получаем:

$$A_{\Delta T} = \frac{bI_0 \tau}{8\omega^2 \tau^2 + 2} (\cos \beta + 2\omega\tau \sin \beta - \cos(\beta + \pi) - 2\omega\tau \sin(\beta + \pi)) = \frac{bI_0 \tau}{8\omega^2 \tau^2 + 2} (2 \cos \beta + 4\omega\tau \sin \beta) = \frac{bI_0 \tau}{4\omega^2 \tau^2 + 1} (\cos \beta + 2\omega\tau \sin \beta). \quad (7)$$

С учетом того, что $\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2 \beta}} = \frac{1}{\sqrt{1+4\omega^2 \tau^2}}$ и $\sin \beta = \frac{tg \beta}{\sqrt{1+tg^2 \beta}} = \frac{2\omega\tau}{\sqrt{1+4\omega^2 \tau^2}}$, из (7) получим следующее выражение:

$$A_{\Delta T} = \frac{bI_0 \tau}{4\omega^2 \tau^2 + 1} \left(\frac{1}{\sqrt{1+4\omega^2 \tau^2}} + \frac{4\omega^2 \tau^2}{\sqrt{1+4\omega^2 \tau^2}} \right) = \frac{bI_0 \tau}{\sqrt{1+4\omega^2 \tau^2}}. \quad (8)$$

Выражаем циклическую частоту ω через период пульсации излучения $\omega = \pi/t_{\text{неп}}$, подставляем в (8) и получаем:

$$A_{\Delta T} = \frac{bI_0 \tau}{\sqrt{1+4\pi^2 \tau^2 / t_{\text{неп}}^2}} = \frac{bI_0 \tau (t_{\text{неп}} / \tau)}{\sqrt{(t_{\text{неп}} / \tau)^2 + 4\pi^2}}. \quad (9)$$

После подстановки (9) в (5) получим окончательно:

$$B = \frac{t_{\text{неп}} / \tau}{\sqrt{(t_{\text{неп}} / \tau)^2 + 4\pi^2}}. \quad (10)$$

Расчетная формула (10) находится в полном согласии с полученными в компьютерном эксперименте данными, приведенными в [5].

По причине наличия в излучении полупроводниковых лазерных модулей значительной доли некогерентного излучения, экспериментально полученная зависимость интенсивности $I(t)$ в каждой точке ДГСП характеризуется наличием постоянной составляющей I_{\min} . Эта составляющая будет давать дополнительное однократное увеличе-

ние температуры структурных элементов биоткани после начала облучения (рисунок 6 а).

Когерентная составляющая излучения обеспечивает циклическое изменение температуры структурных элементов биоткани (рисунок 6 б), поскольку смещающиеся с течением времени по облучаемой поверхности интерференционные полосы аналогичны по своему воздействию синусоидально-модулированному по интенсивности излучению. Общий эффект определяется суммированием этих эффектов (рисунок 6 в).

Чтобы обеспечить максимальную эффективность процесса лазерофореза посредством ДГСП, интерференционные полосы должны смещаться по облучаемой поверхности на одно межполосное расстояние за время от 4 до 20 τ [5]. Это осуществляется подачей на пьезокерамическую подложку зеркала переменного напряжения с соответствующей частотой пульсации.

Заключение

Экспериментально реализовано электронно-оптическое устройство для формирования динамического градиентного светового поля (ДГСП) интерференционно-го типа с полосчатым распределением интенсивности в поперечном сечении с применением серийно выпускаемых полупроводниковых лазерных модулей. Максимумы интенсивности ДГСП можно контролируемо перемещать в зоне интерференции. Исследована возможность проведения приповерхностного лазерофореза с помощью полученного ДГСП. В рамках модели с неравновесным поглощением излучения микроструктурами внутри биотканей показано, что результат воздействия формируемым ДГСП на биоткань может быть описан как сумма эффектов от непрерывного и синусоидально модулированного по интенсивности излучения определенных интенсивностей. Частота пульсации интенсивности ДГСП на облучаемой поверхности может быть оптимизирована в соответствии с микропараметрами биоткани.

Динамические градиентные световые поля, полученные с помощью полупроводниковых лазеров, могут применяться для проведения лазерофореза в тех случаях, когда нужно локально воздействовать препаратом только на приповерхностные слои биоткани. При распространении в сильно рассеивающих биотканях интерферирующие парциальные когерентные пучки быстро теряют когерентность и деполаризуются, из-за чего контрастность ин-

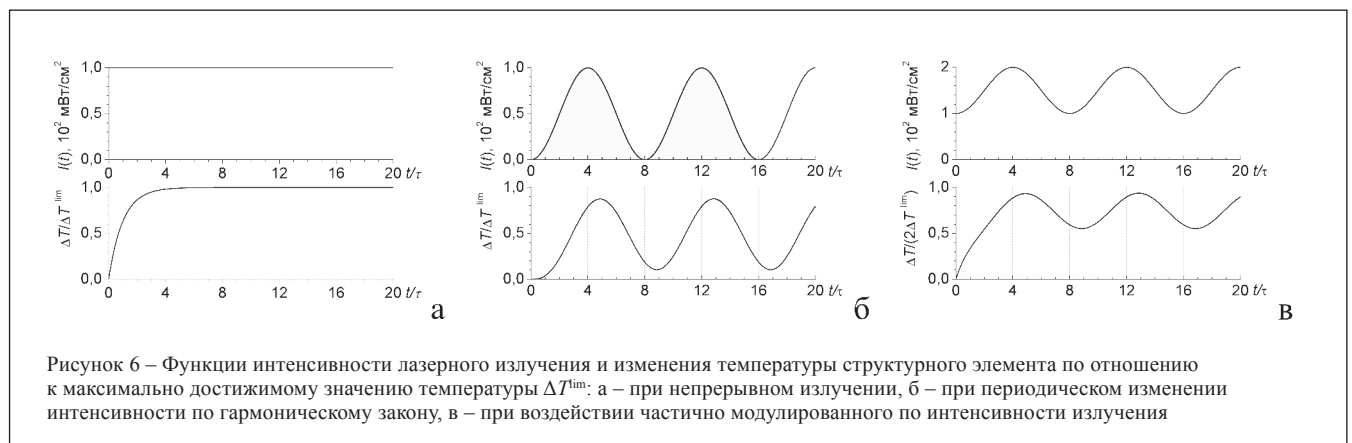


Рисунок 6 – Функции интенсивности лазерного излучения и изменения температуры структурного элемента по отношению к максимально достижимому значению температуры ΔT_{lim} : а – при непрерывном излучении, б – при периодическом изменении интенсивности по гармоническому закону, в – при воздействии частично модулированного по интенсивности излучения

терференционной картины так же быстро падает. Вследствие этого эффективность лазерофореа при облучении биоткани ДГСР в более глубоких слоях будет намного меньше, чем в поверхностных. Таким образом, применяя ДГСР, можно существенно ослабить нежелательное поступление лекарственного препарата в глубокие слои биоткани и общий кровоток.

Литература:

1. Корниловский, И.М. Современные аспекты применения лазерного излучения различного спектрального диапазона при заболеваниях роговицы / И.М. Корниловский // Лазерная биология и лазерная медицина: практика: материалы докл. респ. школы-семинара, Тарту-Пюхьярве, 23–30 апреля 1990 г., Ч. 2 / Тартуск. ун-т. – Тарту, 1991. – С. 43–52.
2. Красногорская, В.Н. Лечение атеросклеротических макулодистрофий методом прямого лазерофореа : автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.00.08 / В.Н. Красногорская ; Амурская государственная медицинская академия. – Красноярск, 1996. – 22 с.
3. Москвин, С.В. Механизм переноса лекарственных веществ через кожу методом лазерофореа / С.В. Москвин, А.А. Миненков // Клиническая дерматология и венерология. – 2010. – Т. 79, № 5. – С. 79–84.
4. Введение препаратов в организм под действием лазерного излучения. Экспериментальная база, закономерности, область применения и перспективы развития лазерофореа / А.А. Рыжевич, Т.А. Железнякова, С.В. Солоневич. – Саарбрюккен: Lambert Academic Publishing, 2011. – 216 с. – ISBN 978-3-8433-1371-1.
5. Железнякова, Т.А. Метод лазерофореа посредством излучения с периодически изменяющейся во времени интенсивностью / Т.А. Железнякова, М.М. Кугейко, С.В. Солоневич, А.А. Рыжевич // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2009. – № 3. – С. 24–30.
6. Способ формирования переменного градиентного светового поля: пат. 10393 Респ. Беларусь, МПК (2006) G 02F 1/01 / А.А. Рыжевич, Ю.А. Куприянова ; заявители ГНУ «Институт физики Б.И. Степанова НАН Беларуси», Куприянова Юлия Андреевна. – № а 20050993; заявл. 17.10.2005; опубл. 28.02.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1 (60). – Ч. 1. – С. 146–147.

7. Устройство для формирования динамического градиентного светового поля: пат. № 7053 Респ. Беларусь, МПК (2009) G 02F 1/01 / А.А. Рыжевич, Т.А. Железнякова, С.В. Солоневич; заявитель ГНУ «Институт физики Б.И. Степанова НАН Беларуси». – № а 20100682; заявл. 30.07.2010; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 1 (78). – С. 223–224.

8. Кару, Т.И. Зависимость биологического действия низкоинтенсивного видимого света на клетки от параметров излучения, когерентности, дозы и длины волны / Т.И. Кару, Г.С. Календо, В.В. Лобко // Изв. АН СССР. Сер. физич. – 1983. – Т. 47, № 10. – С. 2017–2022.

9. Способ введения лекарственного препарата в организм через кожу или слизистую оболочку: пат. 15009 Респ. Беларусь, МПК (2006) А 61М 37/00, А 61Н 5/067 / Т.А. Железнякова, А.А. Рыжевич, С.В. Солоневич ; заявитель Белорус. гос. ун-т. – № а 20091047; заявл. 10.07.2009; опубл. 30.10.2011 // Афіцыйны бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5 (82). – С. 82.

Abstract

An experimental electron-optical device is implemented to generate the dynamic gradient of the light field (DGLF) of interference type with banded intensity distribution in the cross-section with the use of production-run semiconductor laser modules. Guided intensity maxima of DGLF can be moved in the interference zone. The possibility of using the resulting DGLF for laser phoresis is investigated. In the model with a nonequilibrium absorption of radiation inside the microstructures of biological tissues we showed that feedback formed by DGLF can be described as the sum of the effects of continuous radiation and sinus-modulated intensity radiation with certain intensities. The pulse frequency of DGLF intensity on the irradiated surface can be selected in accordance with biological tissue microparameters.

Поступила в редакцию 04.07.2013 г.



поставка электронных компонентов

контрактное производство

тел.: +375 17 290 0082
факс: +375 17 290 0084
e-mail: info@horntrade.net

ПТСС ЗАО «Промтехсервиснаб»

г. Минск, ул. Богдановича, 120 Б, ком. 6,
e-mail: uslugi@zapservis.by,
www.zapservis.by

Тел.: 266-23-94; 266-23-92,
моб.: (029) 676-02-56,
моб.: (044) 773-72-04,
факс: 266-23-94.

Контрактное производство РЭА:

- ✓ Автоматизированный монтаж SMD-компонентов любой сложности.
- ✓ Комбинированный монтаж с использованием компонентов DIP (выводных), а также SMD (планарных).
- ✓ Сборка корпусных деталей и узлов.
- ✓ Ультразвуковая отмычка печатных плат и узлов высококачественными импортными растворами.
- ✓ Нанесение влагозащитных покрытий.

*Высокотехническое импортное оборудование обеспечивает высокое качество производимой продукции.

Продажа неликвидов ПКИ для РЭА:

- ✓ Резисторы, конденсаторы, транзисторы, микросхемы и т.д.

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 004.946

П.В. Тивунов, К.М. Шестаков,
БГУ, г. Минск

Аннотация

Показана эффективность задания нескольких вариантов различной степени детализации (числа полигонов) трехмерного объекта и их адаптивного переключения. Оценена эффективность применения такого подхода при формировании виртуальных миров в тренажерных комплексах. Показан подход к переключению моделей по мере их приближения к зрителю. Учтено нарушение зрительного восприятия с одной стороны и малые потери в производительности вычислительного комплекса с другой. Представлен набор смоделированных в 3ds Max объектов различной полигональности. Предлагается подробное описание файлов хранимых объектов. Созданы различные варианты сцен для демонстрации проводимых исследований. Проведена оценка влияния детализации объектов на количество занимаемых ресурсов и время обработки.

Введение

В наше время 3D-технологии стали неотъемлемой частью творческих процессов. Использование трехмерных полигональных моделей охватывает весьма обширную область применения. В первую очередь, разработка 3D-моделей этого типа актуальна для индустрии компьютерных игр, в том числе и их перенос на мобильные платформы, рекламе, кинематографу, архитектуре, различные направления дизайна. Уровень развития современных информационных технологий позволяет использовать полученные 3D-модели для решения задач проектирования, строительства, моделирования объектов в тренажерах, оценки состояния и эксплуатационной пригодности создаваемых объектов, прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций. Актуален вопрос задания минимального числа полигонов на объекте для детализированной и качественной визуализации, с приемлемыми потерями в производительности.

В результате полигонального моделирования все объекты должны состоять из мелких плоских поверхностей (полигонов). В противном случае форма объекта будет иметь угловатый вид, будут видны и грани. Вблизи от наблюдателя находится только небольшое количество объектов с высокой степенью полигональности. По мере удаления от наблюдателя излишние грани объектов становятся не различимыми. Производительность графики уменьшается с ростом числа прорисовываемых полигонов. Замена моделей на модели с уменьшенной полигональностью позволяет рассчитать и «нарисовать» требуемое множество объектов. Целью данной работы является оценка влияния полигональности модели на время расчета и нахождения критериев адаптивного изменения числа полигонов. Это означает, что если объект на сцене приближается к камере наблюдателя, его модель замещается на модель с большим количеством полигонов. Применение объектов различной степени полигональности при сохранении уровня производительности является перво-степенной задачей для работы с различными тренажерами. Оптимизация работы одного из таких тренажеров продемонстрирована в данной статье.

1 Технологии исследования виртуальной сцены.

Х-формат и особенности его структуры

При построении 3D-объектов сегодня используют несколько редакторов и вспомогательных программ. Общее стремление – формирование X-файла, получившего статус признанного стандарта.

Для получения и работы с X-файлами применены просмотрщик трехмерных файлов Deep Exploration и плагин для 3ds Max – PandaDirectXMaxExporter [1, 2, 3].

X-формат – один из самых распространенных форматов хранения трехмерных моделей. Он хранит в себе информацию о координатах нормалей, вершин, текстур, анимацию и привязки, а также используемые материалы. Главной особенностью является то, что в X-файле модель хранится в полигональном виде. Кроме того в X-файле много избыточных данных. Поэтому можно привести описание его структуры в слегка укороченном виде на примере нашей модели.

Заголовок X-файла выглядит следующим образом: xof 0303txt 0032, xof обозначает сам x-формат, далее указывается версия формата, тип формата (текстовый (txt), бинарный (bin) или сжатый (com)), может указываться тип сжатия для com формата и количество бит в перемешанных (32 либо 64).

После заголовка следует описание хранимой информации об объекте, представленное в виде так называемых templates – шаблонов, которые содержат имена типов данных, идентификаторы, списки полей. Эти шаблоны являются аналогами классов/структур в C++.

Основная конструкция (каркас) объекта:

```
template Frame {
<3d82ab46-62da-11cf-ab39-0020af71e433>
[...]
```

В общем случае в этом шаблоне могут содержаться экземпляры других шаблонов для создания иерархии связанных объектов.

Шаблон Matrix4x4 определяет матрицу 4x4, которая используется в качестве преобразований.

```
template Matrix4x4 {
<f6f23f45-7686-11cf-8f52-0040333594a3>
array FLOAT matrix[16];
}
```

Шаблон FrameTransformMatrix – матрица трансформации для преобразования локальных координат объекта в глобальные.

```
template FrameTransformMatrix {
<f6f23f41-7686-11cf-8f52-0040333594a3>
Matrix4x4 frameMatrix;
}
```

Шаблон Vector определяет вектор с трехмерными координатами.

```
template Vector {
<3d82ab5e-62da-11cf-ab39-0020af71e433>
```



```

FLOAT x;
FLOAT y;
FLOAT z;
}

```

Шаблон MeshFace содержит массив вершин сетки для ее построения. Далее он используется в шаблоне Mesh.

```

template MeshFace {
<3d82ab5f-62da-11cf-ab39-0020af71e433>
DWORD nFaceVertexIndices;
array DWORD faceVertexIndices[nFaceVertexIndices];
}

```

Шаблон Mesh – описание геометрии объекта. Он содержит количество вершин и граней, список вершин, которые являются экземплярами шаблона Vector, в виде массива, и массив индексов, образующих грани на объекте.

```

template Mesh {
<3d82ab44-62da-11cf-ab39-0020af71e433>
DWORD nVertices;
array Vector vertices[nVertices];
DWORD nFaces;
array MeshFace faces[nFaces];
[...]
}

```

Шаблон MeshNormals содержит количество и массивы нормалей. Первый массив – сами векторы нормалей. Второй – массив индексов, указывающий нормали данной грани.

```

template MeshNormals {
<f6f23f43-7686-11cf-8f52-0040333594a3>
DWORD nNormals;
array Vector normals[nNormals];
DWORD nFaceNormals;
array MeshFace faceNormals[nFaceNormals];
}

```

Шаблон ColorRGB определяет основные цвета RGB объекта.

```

template ColorRGB {
<d3e16e81-7835-11cf-8f52-0040333594a3>
FLOAT red;
FLOAT green;
FLOAT blue;
}

```

Шаблон Material содержит применяемые на различных поверхностях объекта цвета и оттенки их применения.

```

template Material {
<3d82ab4d-62da-11cf-ab39-0020af71e433>
ColorRGBA faceColor;
FLOAT power;
ColorRGB specularColor;
ColorRGB emissiveColor;
[...]
}

```

Шаблон MeshMaterialList содержит список материалов и текстур, использованных при создании объекта, и ссылки на них, т.к. сами текстуры в X-файлах не хранятся.

```

template MeshMaterialList {
<f6f23f42-7686-11cf-8f52-0040333594a3>
DWORD nMaterials;
DWORD nFaceIndexes;
array DWORD faceIndexes[nFaceIndexes];

```

```

[Material <3d82ab4d-62da-11cf-ab39-0020af71e433>]
}

```

Шаблон TextureFilename содержит имена текстур, применяемых для различных поверхностей объекта.

```

template TextureFilename {
<a42790e1-7810-11cf-8f52-0040333594a3>
STRING filename;
}

```

Шаблон Coords2d содержит двумерный вектор для определения текстуры сетки по координатам (u и v).

```

template Coords2d {
<f6f23f44-7686-11cf-8f52-0040333594a3>
FLOAT u;
FLOAT v;
}

```

Шаблон MeshTextureCoords содержит текстурные координаты, с помощью которых на объект накладываются текстуры.

```

template MeshTextureCoords {
<f6f23f40-7686-11cf-8f52-0040333594a3>
DWORD nTextureCoords;
array Coords2d textureCoords[nTextureCoords];
}

```

После описания всех шаблонов идет описание всех объектов, содержащихся в нашей сцене. Указывается геометрия для каждого объекта со своими координатами, нормальями и текстурами [4, 5, 6].

2 Факторы, влияющие на распознавание объектов

Взаимосвязь между величиной рассматриваемого объекта и удаленностью его от глаза характеризует угол, под которым виден объект. Угол, образованный крайними точками рассматриваемого объекта и узловой точкой глаза, называется углом зрения. Минимальный угол зрения, позволяющий различать воспринимать две точки, характеризует остроту зрения глаза (способность глаза к восприятию мельчайших деталей наблюдаемых объектов). Условно принято считать, что глаз с нормальной остротой зрения способен увидеть различно две далекие точки, если угловое расстояние между ними равно одной-трем угловым минутам. При расстоянии 50 метров это соответствует 14...44 миллиметрам. Плюс определенное влияние на распознавание предметов оказывает контраст наблюдаемой картины и яркости фона.

При удалении объекта исчезнут мелкие промежутки между деталями изображения.

Распознавание несглаженных углов в моделях зависит, в основном, от следующих факторов:

1.) Контраста наблюдаемой картины. Визуальное восприятие объекта возможно только при условии его отличия от окружающего фона. Определяется контраст как отношение разности яркостей объекта и фона к одной из этих величин:

$$K \approx \frac{dI_1(Q) - dI_2(Q)}{dI_1(Q)},$$

где K – контраст, $dI_1(Q)$, $dI_2(Q)$ – яркости объекта и фона, Q – угол между нормалью к поверхности и вектором направления камеры. Именно изменение последнего при переключении степени полигональности приводит к смене контраста текстуры и яркости объекта.

2.) Видимого углового расхождения в форме фигуры. Угловой размер объекта определяется следующим образом:

$$Y \approx \arctg \frac{D}{2L},$$

где Y – угловой размер объекта, D – длина объекта, расположенного перпендикулярно линии наблюдения, L – расстояние от наблюдателя до рассматриваемого объекта. Причем при удалении объекта от наблюдателя, его угловой размер уменьшается.

3 Исследование объектов виртуальной сцены. Формирование порогов переключения числа полигонов

Представим перечень х-файлов для моделей одного типа техники, используемых в тренажере, начиная с самой простой и заканчивая самой сложной (рисунки 1-5) [7-11].

Связь полигональности с временем расчета и объемом памяти (ресурсов)

Первое изображение (рисунок 6) реализовано за счет использования всех пяти моделей при условии смены детализации при увеличении расстояния до объекта. Данная сцена состоит из 129 753 полигонов. Объем занимаемой памяти – 30 516 036 байт. Второе изображение (рисунок 7) реализовано с использованием пяти моделей без изменения уровня детализации с увеличением расстояния до объекта. Данная сцена состоит из 527 920 полигонов. Объем занимаемой памяти – 125 683 151 байт!

Разница в картинке практически не заметна, а объем занимаемой памяти отличается в 4,12 раза.

Результаты расчета требуемых ресурсов для формирования различных полигонов приведены в таблице 1 и на рисунках 8, 9.

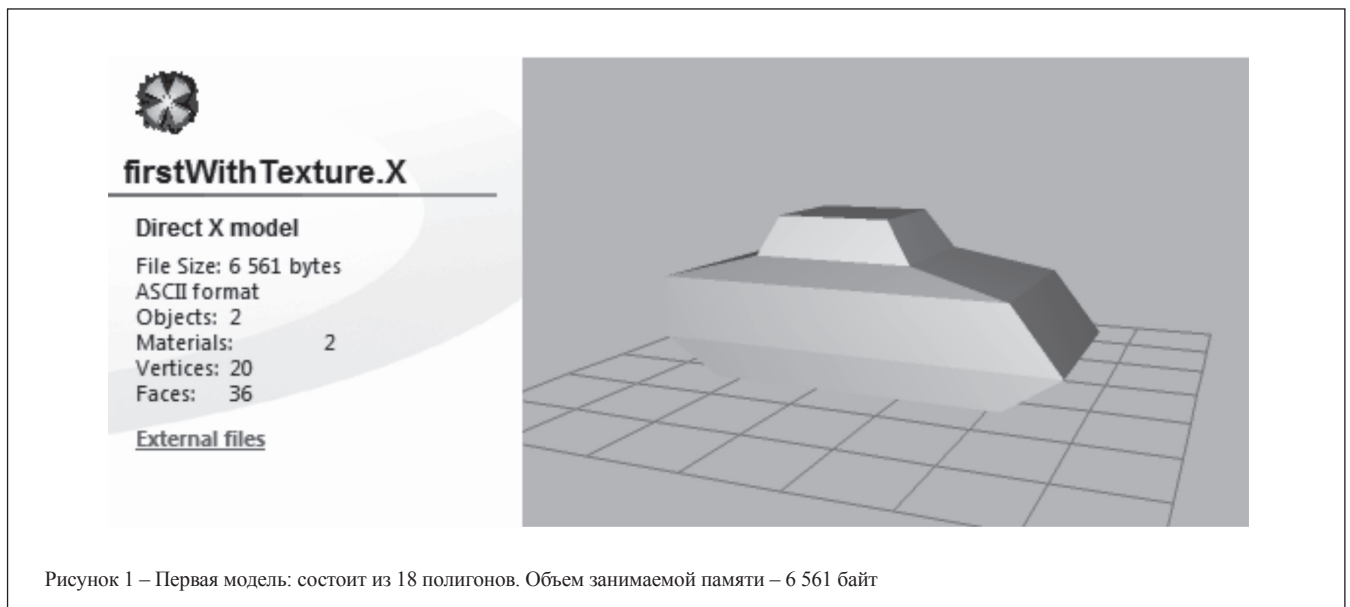


Рисунок 1 – Первая модель: состоит из 18 полигонов. Объем занимаемой памяти – 6 561 байт



Рисунок 2 – Вторая модель: состоит из 1225 полигонов. Объем занимаемой памяти – 169 183 байт



thirdB.X

Direct X model

File Size: 244 974 bytes

ASCII format

Objects: 2

Materials: 2

Vertices: 1 075

Faces: 1 780

[External files](#)

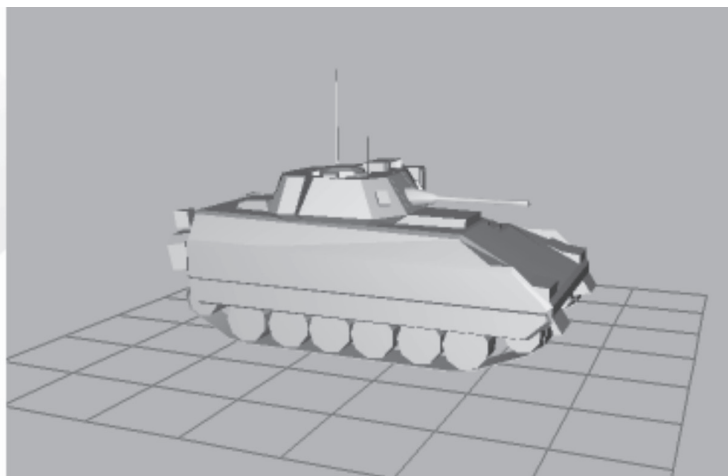


Рисунок 3 – Третья модель: состоит из 1780 полигонов. Объем занимаемой памяти – 244 974 байт



fourthB.X

Direct X model

File Size: 4 964 959 bytes

ASCII format

Objects: 2

Materials: 2

Vertices: 22 795

Faces: 42 284

[External files](#)



Рисунок 4 – Четвертая модель: состоит из 21 146 полигонов. Объем занимаемой памяти – 4 964 959 байт



fifthB.X

Direct X model

File Size: 25 138 245 bytes

ASCII format

Objects: 2

Materials: 2

Vertices: 109 458

Faces: 211 160

[External files](#)

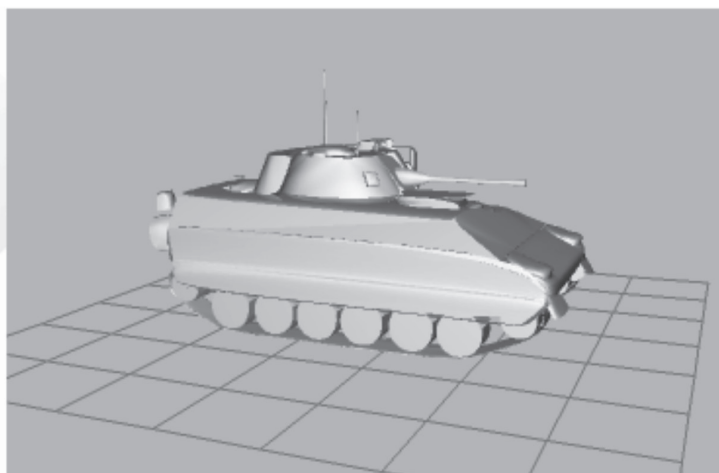


Рисунок 5 – Пятая модель: состоит из 105 584 полигонов. Объем занимаемой памяти – 25 138 245 байт

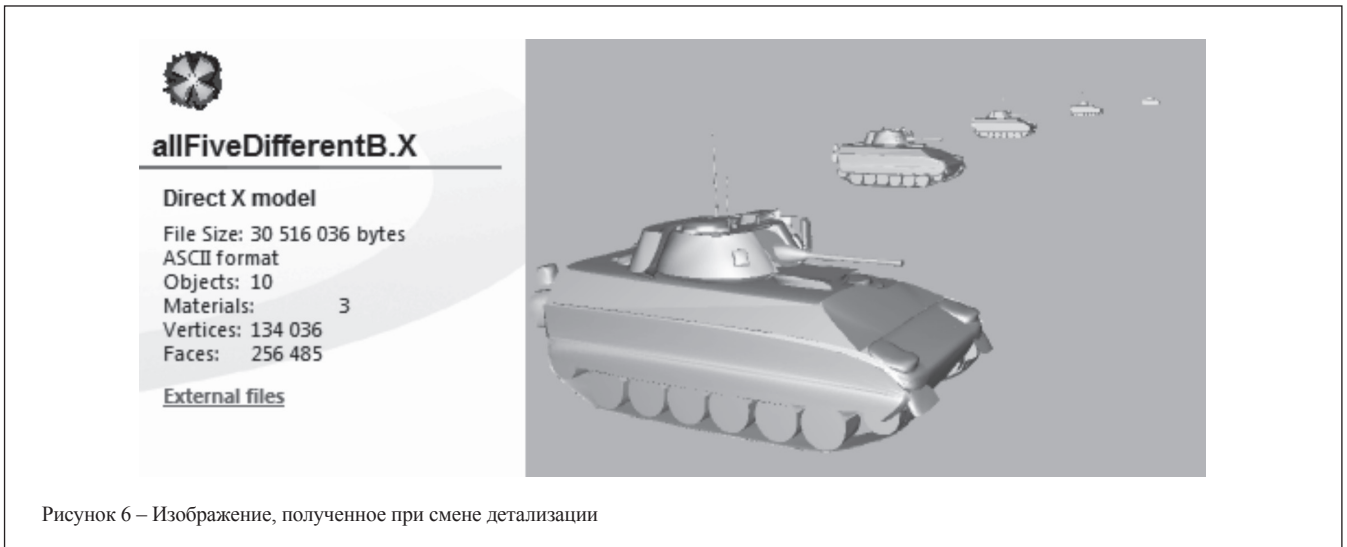


Рисунок 6 – Изображение, полученное при смене детализации

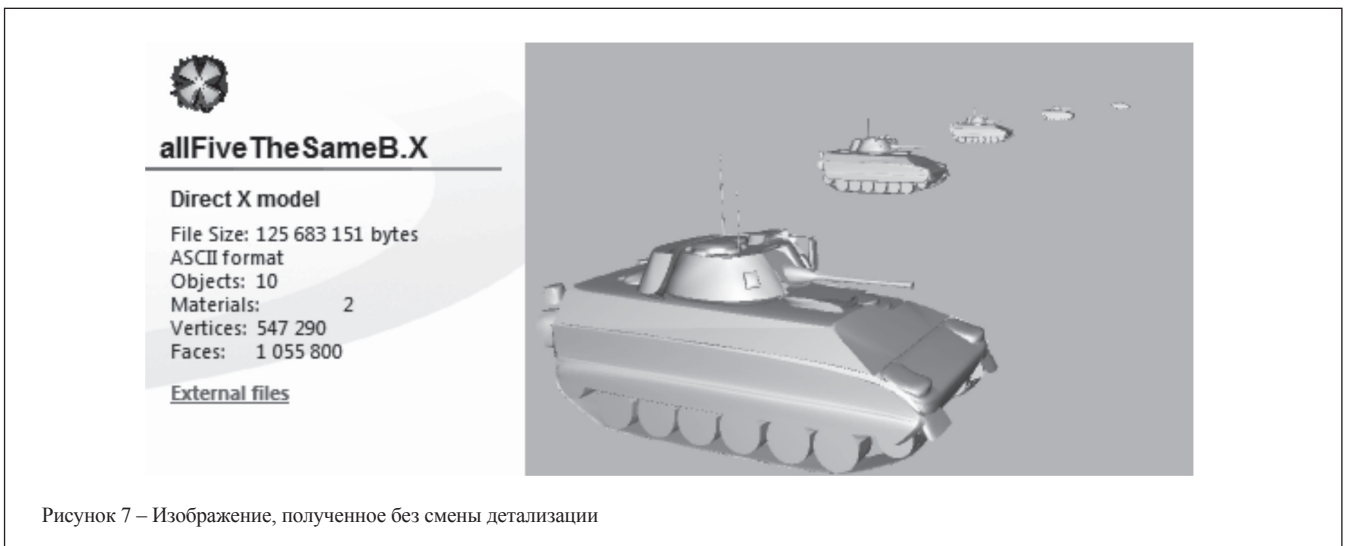


Рисунок 7 – Изображение, полученное без смены детализации

Таблица 1 – Значения количества полигонов и соответствующего количества занимаемых ресурсов и времени обработки

Количество полигонов	18	1225	1780	21 146	105 584	129 753	527 920
Объем ресурсов, байт	6561	169 183	244 974	4 964 959	25 138 245	30 516 036	125 683 151
Время обработки, мсек	0	16	47	375	1825	2278	9033

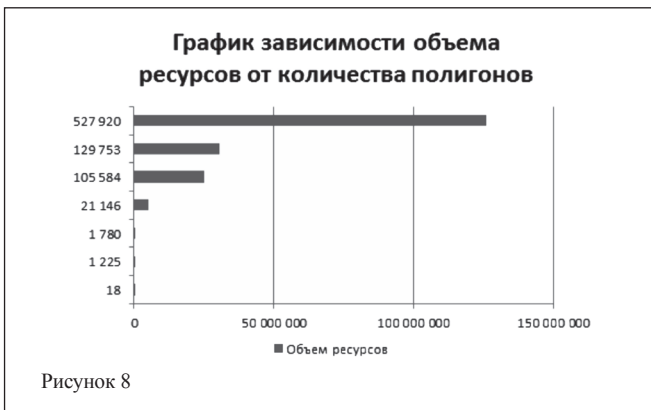


Рисунок 8

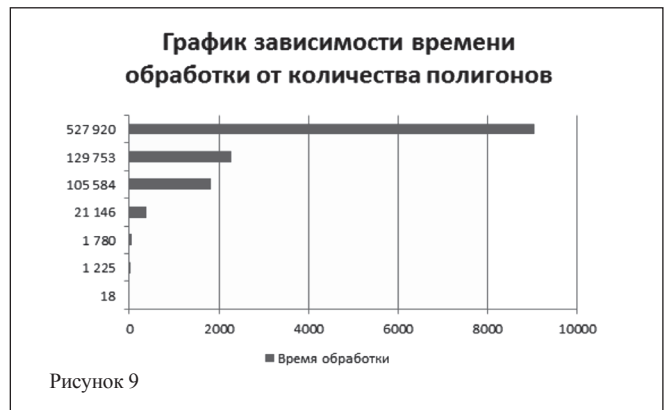


Рисунок 9

Таблица 2 – Параметры объектов, примененных в тренажере

Количество полигонов	Дистанци до объекта, м
18	200
1225	600
4 964 959	1500

Значимость полученных результатов можно продемонстрировать в тренажере танка, разместив модели различной детализации (таблица 2) с наложенными текстурами (рисунок 10, 11).

Отличия в представленных моделях неразличимы, но размещение менее полигональных моделей на большем расстоянии позволяет увеличить быстродействие и уменьшить объем занимаемой памяти, что было продемонстрировано ранее. При этом на одинаковом расстоянии (200 м) модели выглядят следующим образом:

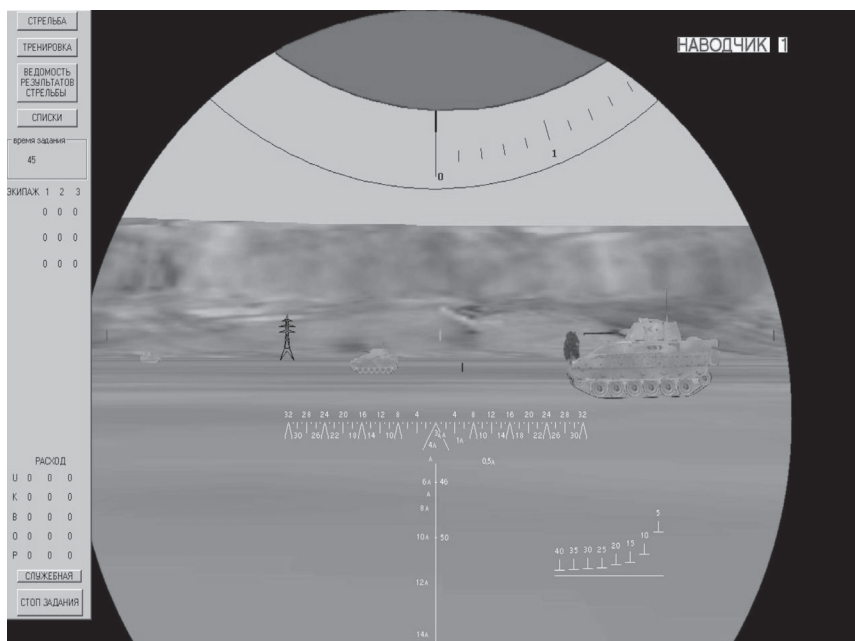


Рисунок 10 – Тренажер танка с моделями различной детализации на различных расстояниях

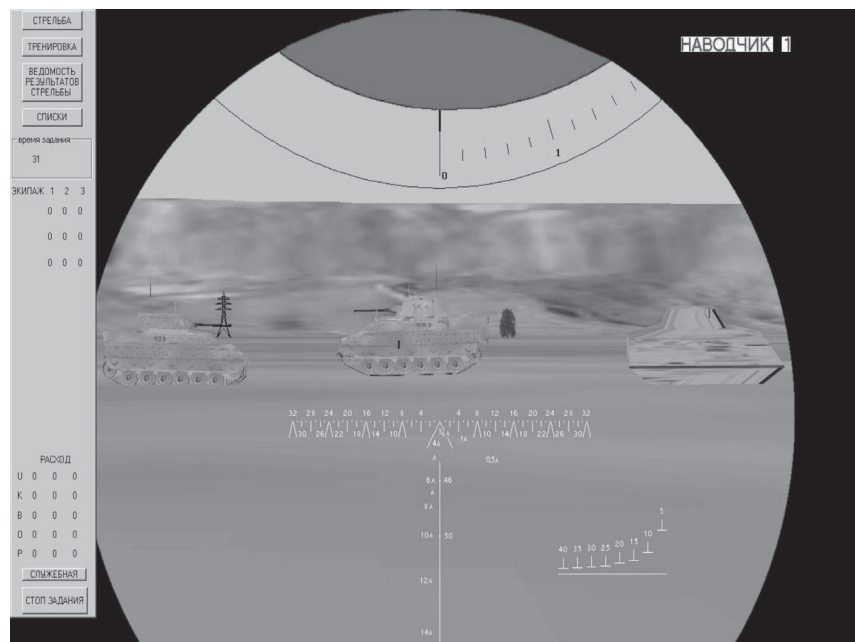


Рисунок 11 – Тренажер танка с моделями различной детализации на одинаковом расстоянии

Заключение

Таким образом, в тех случаях, когда в обрабатываемой сцене объект близко располагается к камере, предпочтительно использование модели с максимумом деталей, чтобы использовались все полигоны для максимально возможного качества объекта. Но на очень большом расстоянии от камеры в итоговом изображении он будет занимать лишь несколько пикселей, и смысла в обработке всех 105 000 полигонов для максимально детализированного объекта никакого нет.

Объект вдалеке лишь приближенно передает характеристики своего реального прототипа, однако, благодаря ограниченным возможностям зрительного аппарата, наблюдатель не ощущает возникающих различий. В этом случае будет достаточно тех же 18 полигонов для примерно такого же отображения модели. Соответственно, на средних расстояниях имеет смысл использовать модель, состоящую из большего количества полигонов, чем у самой простой модели, и меньше, чем у самой сложной.

При использовании модели с меньшей детализацией для разных расстояний, время обработки сцены и объем занимаемых ресурсов снижаются, почти не ухудшая общего восприятия изображения. Эта оценка особенно эффективна, если количество объектов в сцене велико, и они расположены на разных расстояниях от камеры.

Литература:

1. Моделирование и плагины 3dsMax [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.mo3del.ru>. – Дата доступа : 09.04.2012.

2. SAP Visual Enterprise Solutions. Deep Exploration Editions [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.righthemisphere.com>. – Дата доступа : 15.03.2012.

3. Autodesk 3ds Max Products [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.usa.autodesk.com>. – Дата доступа : 15.03.2012.

4. MSDN. X File Format Reference [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.msdn.microsoft.com>. – Дата доступа : 25.03.2012.

5. Работа с X файлами Direct3D. Доступ к координатам вершин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gamedev.ru>. – Дата доступа : 02.04.2012.

6. Daniele, T. Poly-Modelling with 3ds Max. Thinking Outside of the Box / T. Daniele. – 2009.

7. Работа с X-файлами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.netlib.narod.ru>. – Дата доступа : 03.04.2012.

8. Мэрдок, К. 3ds Max 2012 Bible / К. Мэрдок. – Вильямс : изд-во Диалектика, 2012. – 1294 с.

9. Lapidus, R. Tradigital 3ds Max: A CG Animator's Guide to Applying the Classic Principles of Animation / R. Lapidus. – Изд-во Focal Press, 2012. – 288 с.

10. Тимофеев, С. 3ds Max 2012. Применение материалов и текстур / С. Тимофеев. – Изд-во БХВ Петербург, 2012. – 496 с.

11. Chopine, A. 3D Art Essentials / A. Chopine. – Изд-во Focal Press, 2011. – 288 с.

Abstract

The efficiency of setting several variations with different detail level (number of polygons) on three-dimensional object and their adaptive switching is shown. The effectiveness of this approach in the formation of virtual worlds in simulators is evaluated. The approach to switching models as they get closer the viewer is implemented. It is considered a vision violation on one side and the small loss in computing system performance with another. A set of modeled in 3ds Max objects of different polygonal level is represented. A detailed description of the files stored objects. Created different versions of scenes to showcase the research. Assessing the impact of different detailed objects on occupied resources number and processing time.

Поступила в редакцию 06.05.2013 г.



БелПлата тел. +375 17 287 85 66
факс +375 17 287 85 65
тел. моб. +375 29 684 43 09
220068, г. Минск, ул. Некрасова, 114,
оф. 238, 2 этаж, e-mail: info@belplata.by

Разработка и поставка печатных плат:
любой класс точности, широкий спектр покрытий, изготовление образцов от 5 дней.

Поставка фотошаблонов

Поставка трафаретов:
из нержавеющей стали и латуни.

Материалы для печатных плат:
защитные маски, маркировочные краски, фоторезисты, паяльные пасты.

Поставка изделий из феррита:
любые виды сердечников Cl, Ee, EEM, EP, EER, ETD, EC, EF, ED, EFD, EI, EPO, EPX, EPC и т.д.

Поставка электронных компонентов:
STMicroelectronics, NXP Semiconductors, Vishay, Holtek Semiconductor.

www.belplata.by



ООО «БАРС-ЭЛЕКТРОНИКС»
г. Минск, ул. Притыцкого, 62/2-1035,
тел.: +375 17 254-72-11,
моб.: +375 29 647-53-76,
+375 29 705-04-15,
e-mail: info@elbars.com
pcb@elbars.com
web: www.elbars.com

1. Трафареты для поверхностного монтажа печатных плат. Электрополировка. Срок изготовления 3 дня.

2. Разработка и поставка печатных плат.

3. Монтаж печатных плат.

4. Поставка электронных компонентов.

5. Светодиодное оформление витрин, фасадов зданий.

Изготовление LED прожекторов.

УСТАНОВКА ДЛЯ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

УДК 621.318.25

А.Т. Оганесян, Н.Н. Петросян, Г.И. Питкевич,
Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

Аннотация

Предлагаются новый режим работы, структура электромагнита размагничивающей установки, упрощенная структурная схема, принципиальная электрическая схема и принцип работы системы управления размагничивающей установки. Принцип размагничивания основан на способе воздействия частичного нагрева и затухающего разнополярного магнитного поля на постоянные магниты.

Введение

Размагничивание (РМ) – это процесс, в результате которого под воздействием внешнего магнитного поля уменьшается намагниченность ферромагнитного материала [1].

На рисунке 1 приведены основные методы РМ ферромагнитных материалов.

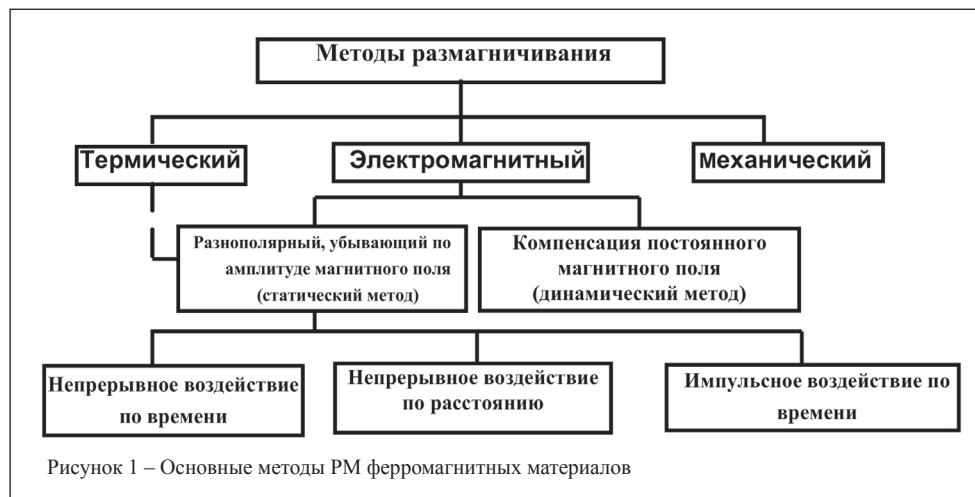


Рисунок 1 – Основные методы РМ ферромагнитных материалов

В таких областях, как аппаратостроение, приборостроение, машиностроение, судостроение и др., РМ ферромагнитных деталей осуществляется до достижения нулевого значения. Процесс РМ становится более сложным в случае применения постоянных магнитов (ПМ), так как последние отличаются большим значением коэрцитивной силы по индукции $B_c H_c$ и магнитной энергией W . Например, у ПМ марки $NdFeB$ (Неодим-Феррум-Вор) модели $38EH$ $B_c H_c = 2388$ кА/м, $W = 287...303$ кДж/м³ [2].

Эффективность РМ зависит от величины размагничивающего поля, частоты, скорости ее убывания, магнитной проницаемости материала и глубины проникновения поля.

Размагничивание непрерывным во времени магнитным полем заключается в создании разнополярного, убывающего по величине магнитного поля. Напряжение магнитного поля при первом цикле РМ превышает коэрцитивную силу размагничиваемой детали, вызванную остаточной намагниченностью в ней, и обеспечивает ее перемагничивание, а затем при каждом цикле перемагничивания магнитное поле уменьшается по амплитуде.

В качестве источника разнополярного магнитного поля обычно используют электромагнит (ЭМ), при этом уменьшение амплитуды магнитного поля, действующего на РМ деталь, обеспечивается уменьшением амплитуды тока в обмотке ЭМ.

Поскольку при нагреве ПМ (точка Кюри) магнитные свойства исчезают, то РМ деталей в производстве осуществляют с помощью температурной обработки (термический метод).

На практике иногда сочетают воздействие частичного нагрева и затухающего разнополярного магнитного поля, причем нагрев может быть произведен за счет предварительного воздействия на РМ деталь переменным магнитным полем в течение некоторого времени. Обработка магнитов при пониженной температуре исключает окисление магнитного материала и снижение магнитных свойств ферромагнетика.

Этот способ является наиболее распространенным. Преимуществами данного метода являются: уменьшение влияния на РМ неоднородностей, отсутствие необходимости точного замера остаточной намагниченности материала перед РМ, наиболее полное размагничивание материалов. Основной недостаток метода: при первом цикле РМ возможно резкое перемещение деталей в магнитном поле и получение механических ударов от воздействия электромагнитной силы.

Исходя из вышеизложенного, усовершенствование способов РМ постоянных магнитов становится актуальной и насущной задачей.

Режим работы электромагнита РМ установки

В работе предлагаются новый режим работы, структура электромагнита РМ установки, упрощенная структурная схема однофазной РМ установки, принципиальная электрическая схема и принцип работы системы управления (СУ) установки.

Согласно новому режиму работы электромагнита РМ установки, характер напряженности магнитного поля H во времени t внутри рабочего объема обмотки ЭМ изменяется соответственно графику, представленному на рисунке 2. Принцип РМ основан на воздействии нагрева и затухающего разнополярного магнитного поля на ПМ.

В интервале времени $0...t_1$ амплитуда магнитного поля плавно возрастает до максимального значения, при этом действующие на РМ деталь электромагнитные силы тоже плавно увеличиваются, исключая тем самым резкие изменения электромагнитных сил и возникновение механических ударов на РМ детали.

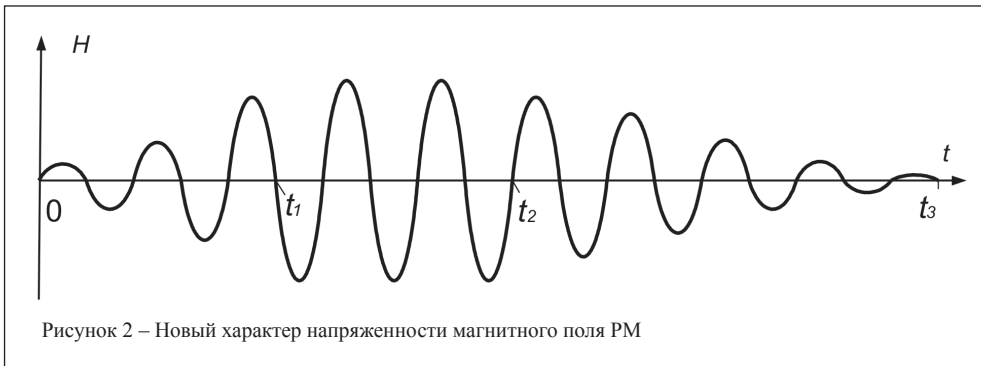


Рисунок 2 – Новый характер напряженности магнитного поля РМ

Основные технические характеристики и структурная схема РМ установки

Приведем некоторые технические данные разработанной РМ установки: напряжение питающей сети – 220 ± 10 В; частота питающей сети – 50 ± 1 Гц; потребляемая мощность – 14,5 кВА; количество витков

обмотки – 256; размер рабочей зоны электромагнита – $120 \times 90 \times 200$ мм³; длительность каждого регулируемого интервала – 100 мс...120 с; вид запуска – ручной однократный; режим работы – повторно-кратковременный; охлаждение – естественное воздушное.

На рисунке 3 приведена упрощенная структурная схема однофазной РМ установки, которая состоит из ЭМ и тиристорного преобразователя (ТП) переменного напряжения. Два тиристора V1 и V2 включены встречно-параллельно в цепи с питающим переменным напряжением U и ЭМ нагрузкой. В устройстве ТП с помощью системы управления применено фазовое регулирование с отстающим углом управления α , что создает в катушке серию разнополярных импульсов тока. Длительность интервалов $0...t_1$, $t_1...t_2$ и $t_2...t_3$ можно плавно регулировать. Обычно длительность устанавливается перед РМ.

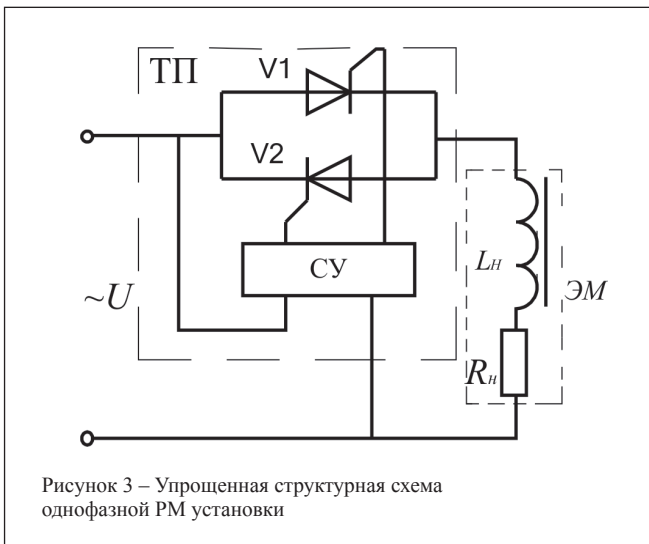


Рисунок 3 – Упрощенная структурная схема однофазной РМ установки

В интервале времени $t_1...t_2$ разнополярное магнитное поле в рабочем объеме ЭМ максимальное. В результате воздействия импульсов магнитного поля кривая из точки исходной намагниченности приводит в точку технического магнитного насыщения материала. Материал детали приобретает одинаковую намагниченность вне зависимости от исходной остаточной намагниченности. Это означает, что далее изменение намагниченности материала по всему объему детали будет происходить по одной кривой. В этом интервале времени потери в РМ деталях обычно делят на потери, обусловленные гистерезисом и вихревыми токами, и дополнительные потери. Все эти потери представляют собой энергетические потери, характерные для ферромагнитных тел, которые могут быть использованы при нагревании РМ деталей.

В интервале времени $t_2...t_3$ разнополярное магнитное поле по величине постепенно уменьшается, приводя к размагничиванию материала детали. При повторении импульсов, уменьшении их амплитуды и изменении полярности, кривая намагниченности переходит в точку ноль – РМ состояния.

На основе предлагаемого режима работы электромагнита спроектирована РМ установка для ПМ магнитоэлектрических аппаратов, которая внедрена в промышленное производство.

Конструкция ЭМ приведена на рисунке 4, где 1 – обмотка; 2 – каркас обмотки; 3 – неподвижный сердечник; 4 – подвижный сердечник; 5 – внешний экран (кожух); 6 – рабочий объем. Для снижения гистерезисных и вихревых потерь неподвижный 3 и подвижный 4 сердечники шихтованные, собраны из пластин электротехнической стали, изолированных пленкой лака. Кожух 5 ЭМ, имеющий разрез по высоте, во избежание короткозамкнутого вторичного витка, вместе с сердечниками 3 и 4 составляет магнитопровод ЭМ. В рабочем объеме 6 РМ деталь размещается таким образом, чтобы направление магнитного поля обмотки 1 совпадало с направлением намагниченности РМ детали. Размагничивающий объект становится частью магнитной цепи ЭМ.

На рисунке 5 приведены временные диаграммы напряжения u_n и тока i_n нагрузки в интервале $0...t_1$ и в начале ин-

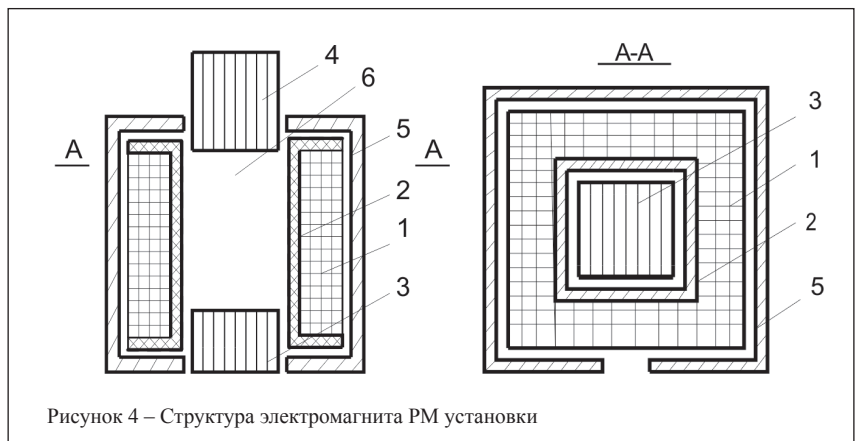


Рисунок 4 – Структура электромагнита РМ установки

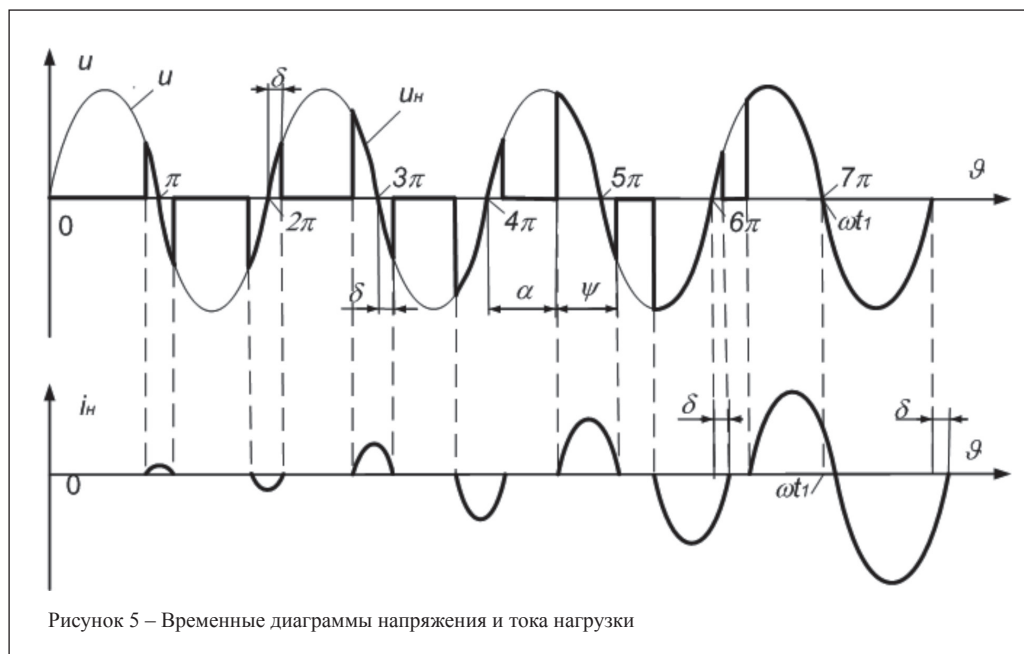


Рисунок 5 – Временные диаграммы напряжения и тока нагрузки

тервала $t_1...t_2$, иллюстрирующие работу ТП в процессе РМ деталей. Режим работы ТП в интервале $t_2...t_3$ аналогичен работе ТП в интервале $0...t_1$, но с управлением в обратной последовательности.

Действующее значение напряжения на обмотке (активно-индуктивная нагрузка) ЭМ от угла управления α может быть определено из соотношения [3]:

$$u_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U)^2 \sin^2 \vartheta d\vartheta},$$

а действующее значение тока в обмотке:

$$i_n = U [\sin(\vartheta - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-(\vartheta - \alpha)/\tau}] / (R_n^2 + \omega^2 L_n^2)^{1/2},$$

где U – действующее значение переменного напряжения на входе; $\vartheta = \omega t$, ω – угловая частота питающей сети; R_n и L_n – соответственно активное и индуктивное сопротивление нагрузки.

В интервале времени $t_1...t_2$ управление тиристорами осуществляется с критическим значением угла управления $\alpha = \alpha_{кр}$. В этом случае ток спадает до нуля в момент времени, при котором интервалы проводимости тока δ полностью занимают интервалы α . В этом случае момент запираания одного тиристора совпадает во времени с моментом отпираания другого тиристора. Паузы в кривой тока i_n и напряжения u_n отсутствуют, и длительность проводящего состояния каждого тиристора становится равной 180° , т.е. $\alpha = \alpha_{кр}$, $\delta = \arctg \omega L_n / R_n$.

В этом интервале действующее значение напряжения u_n на обмотке максимально, а кривая тока i_n становится непрерывной и синусоидальной, определяемой по формуле

$$i_n = \sqrt{2} U \sin(\vartheta - \varphi) / (R_n^2 + \omega^2 L_n^2)^{1/2}.$$

В интервале $t_2...t_3$ частота размагничивающего поля постепенно уменьшается, что увеличивает эффективность РМ, так как увеличивается глубина проникновения магнитного поля в материал.

Принципиальная электрическая схема и принцип работы ТП

На рисунке 6 представлена принципиальная электрическая схема ТП системы управления РМ установки.

Электрическая схема СУ состоит из следующих узлов (рисунок 6): задатчик интенсивности нарастания и снижения напряжения нагрузки, выполненный на операционном усилителе DA1.2 и элементах – R1...R6, C2, C3, D5; таймер режима максимального напряжения нагрузки, состоящий из операционного усилителя DA1.1 и элементов – R12...R17,

T2 и C4; генератор пилообразного сигнала, состоящий из операционного усилителя DA2.2 и элементов – R24, R25, R27, R28, R29, T4, C8, D7 и D8; компаратор DA2.1, определяющий фазу открывания тиристоров; оптопары OC1...OC4, обеспечивающие передачу открывающих импульсов на тиристоры и прием сигнала о состоянии тиристора.

При нажатии кнопки S1 переключается триггер DD1.1, включая реле K1 в цепи транзистора T3. Контакт реле K1 определяет режим работы задатчика интенсивности (нарастание или убывание сигнала задания напряжения нагрузки). Компаратор DA1.3 управляет работой таймера режима максимального напряжения нагрузки, т.е. в зависимости от уровня сигнала на выходе задатчика интенсивности запускает или сбрасывает таймер. По истечении времени таймера максимального напряжения нагрузки компаратор DA1.4 переключает триггер DD1.1 в исходное положение и, тем самым, начинается режим снижения напряжения нагрузки. Для сброса задатчика интенсивности (DA1.2) при включении питания используется реле времени на транзисторе T1 и элементах R7...R9 и C1.

Генератор пилообразного сигнала (DA2.2) работает в зависимости от состояния тиристоров, т.е. если оба тиристора закрыты, генератор наращивает уровень сигнала до уровня на выходе задатчика интенсивности. Далее компаратор DA2.1 генерирует импульс открывания тиристоров. После того, как один из тиристоров открывается, генератор переходит в режим ожидания, при котором сигнал на его выходе нулевой. На следующем полупериоде напряжения сети процесс повторяется.

Время нарастания напряжения нагрузки задается потенциометром R2, время снижения напряжения – потенциометром R1, а время режима максимального напряжения – потенциометром R16.

На рисунке 7 показаны временные диаграммы напряжений на выходе РМ установки на разных этапах процесса размагничивания (рисунок 5).

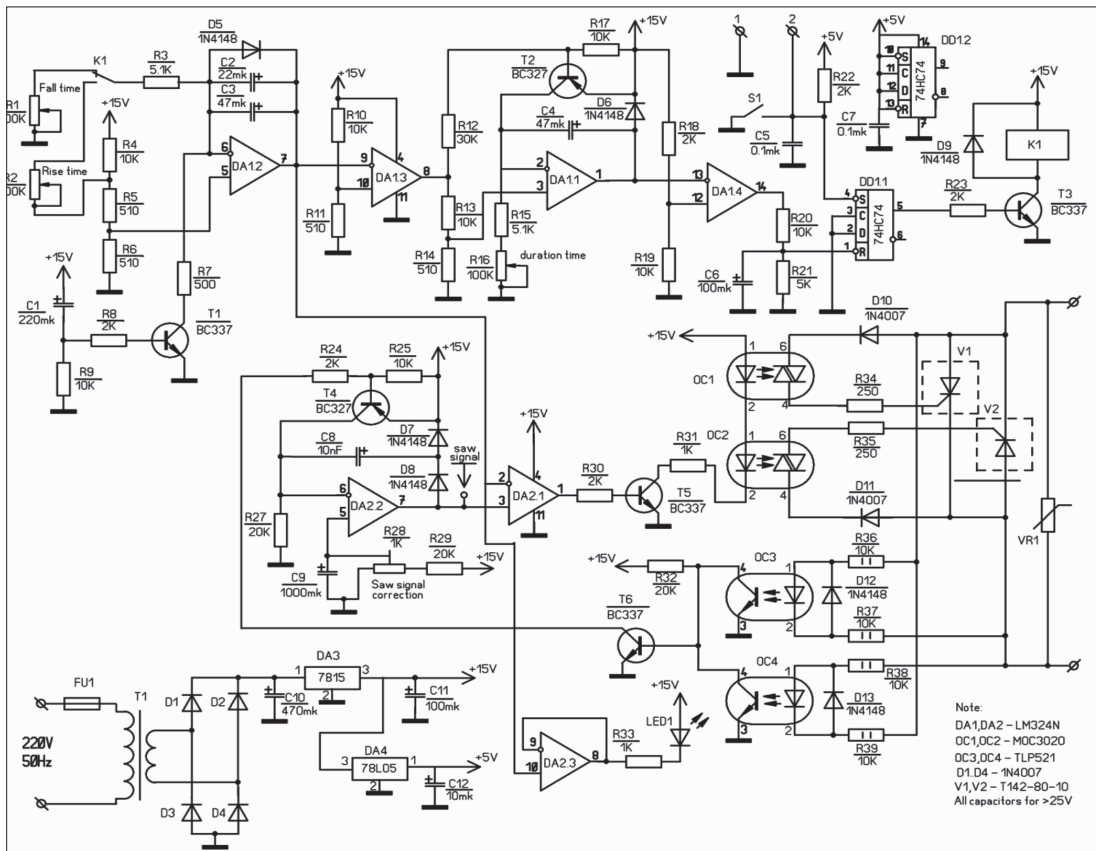


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема тиристорного преобразователя РМ установки

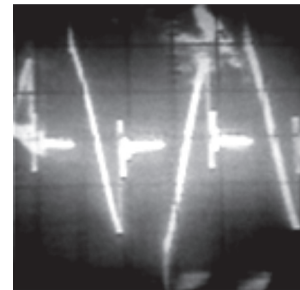
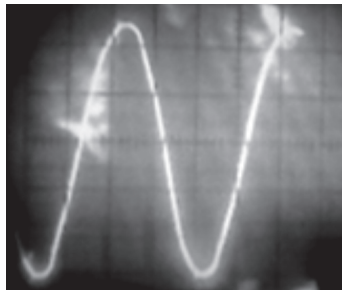
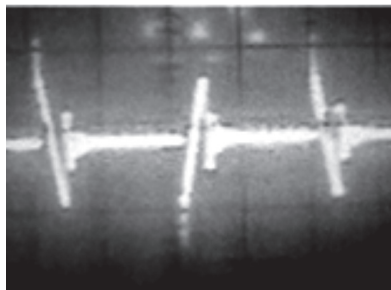


Рисунок 7 – Временные диаграммы напряжений на обмотке ЭМ на разных этапах процесса РМ (масштаб времени – 5 мс/дел, масштаб напряжений – 100 В/дел)

Выводы

Разработанная РМ установка обладает высоким коэффициентом полезного действия, универсальностью регулирования времени процесса РМ, увеличивает эффективность РМ и обеспечивает получение сильных магнитных полей РМ.

Литература:

- ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения. – М. : Изд.-во стандартов, 1974. – 32 с.
- Неодимовые магниты NdFeB (постоянные магниты). – Режим доступа : <http://www.pmspb.ru/ndfeb.html>. – Дата доступа : 02.04.2013.

- Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М. : Высшая школа, 1982. – 496 с.

Abstract

A new operation mode, the magnet's structure of the demagnetizing device, the simplified block diagram, the circuit diagram and the principle of operation of the demagnetizing device control system are proposed. The demagnetization principle is based on the mode of impact by partial heating and fading bipolar magnetic field on permanent magnets. Pic. 7, lit.3.

Поступила в редакцию 05.07.2013 г.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ И ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ В МОБИЛЬНЫХ ПРОЕКТОРАХ И СКАНЕРАХ. НОВЫЙ ЭТАП ЭВОЛЮЦИИ

Светлана Сысоева
Dr.Gold@sysoeva.com

В статье представлена информация о технологических новинках в освещении для применений в пикопроекторах, HUD (Head-up Displays), лазерных шоу и ТВ, 3D TOF-камерах и др. Полупроводниковые диоды, как источники освещения, дают массу преимуществ, которые наиболее ярко проявляются с внедрением лазерной технологии освещения. Светодиодные проекторы на данный момент обеспечивают более высокие потребительские характеристики – в первую очередь, в плане яркости, эффективности, достаточного времени непрерывной работы и, что немаловажно, с точки зрения безопасности. По мере того как развиваются технологии лазерного проецирования, они обещают превзойти своих светодиодных конкурентов по всем параметрам – мощности, яркости, разрешению/четкости, компактности, цене – и обеспечить экспансию применений лазеров, не ограниченную пределами данного сегмента.

Введение

Перспективы современного проецирования и сканирования связываются с технологиями полупроводникового освещения, которые делают возможным создание высокоразрешающих, компактных энергоэффективных и недорогих инновационных решений [1–4].

Использование полупроводниковых источников освещения для технологий проецирования дает следующие преимущества:

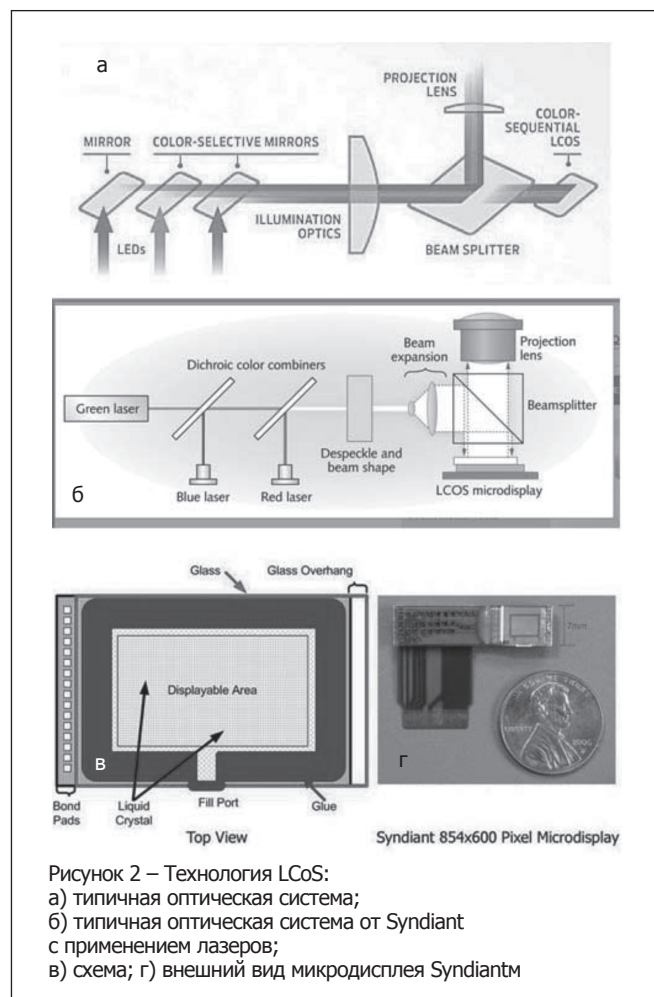
– высокие качество и характеристики изображения – живые цвета, яркость, контрастность, четкость;

– электрооптическая эффективность (Wall Plug Efficiency, WPE) и эффективность свечения (luminous efficiency или efficacy);

- малое потребление мощности;
- достаточное время непрерывной работы без подзарядки;
- компактный размер;
- более низкая цена при массовых объемах производства.

В настоящее время весь набор преимуществ в полной мере используется в модулях проекторов, ключевыми рыночными сегментами которых являются пикопроекторы и проекционные блоки HUD.

В сегменте пикопроекторов наиболее распространены технологии на основе светодиодов (LED), массивов микрозеркал (Digital Light Processing, DLP) и жидких кристаллов на кремнии (Liquid Crystal on Silicon, LCoS) (рисунок 1, 2). В сегменте HUD наибольшее развитие получила технология



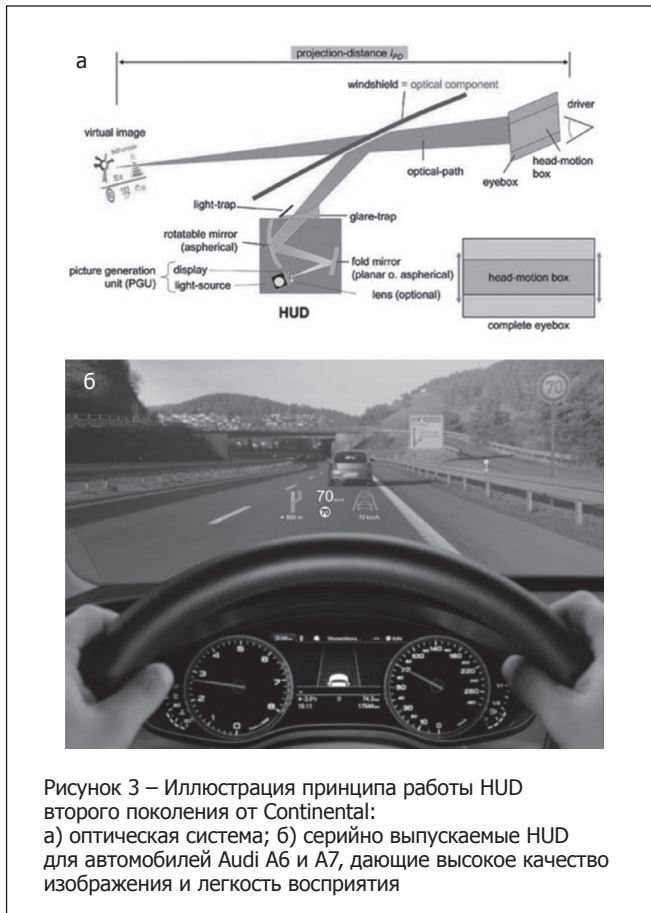


Рисунок 3 – Иллюстрация принципа работы HUD второго поколения от Continental: а) оптическая система; б) серийно выпускаемые HUD для автомобилей Audi A6 и A7, дающие высокое качество изображения и легкость восприятия

зеркального проецирования, которая использует как источники освещения светодиоды и/или дисплеи (рисунок 3) [2]. Стремительно развивается лазерная сканирующая технология, и новые разработки уже обеспечивают конкурентоспособный набор преимуществ в плане достижения лучшего соотношения характеристик проекторов, качества изображения, размеров и цены (рисунок 4) [1, 2]. Лазерные блоки обладают дополнительным преимуществом работы без ручной фокусировки.

Этим летом коммерциализирован первый лазерный проекционный блок HUD – в навигационной системе Cyber Navi Pioneer с дополненной реальностью (рисунок 4). Лазерные проекторы уже давно представлены в нише мобильных устройств, пользователям которых доступно теперь следующее поколение технологий, которое в состоянии обеспечить весь набор преимуществ, включая высокую яркость спроецированного изображения и достаточную по времени непрерывную работу без подзарядки по цене, приемлемой для массовых рынков. Распространение лазерной технологии в сегменте мобильных пикопроекторов ожидается уже в 2013 году.

Это также стимулирует расширение сферы применений лазерной сканирующей технологии – для лазерных проекторов и сканеров, 3D TOF-камер, сканеров штрих-кодов и других применений в различных рыночных сегментах, в том числе и промышленных, high-end, медицинских, например, лазерные сканирующие микроскопы.

Новый виток эволюции технологий инициирован коммерциализацией непосредственно излучающих зеленый свет лазеров (Direct Green Lasers, DGL) – ключевых освети-

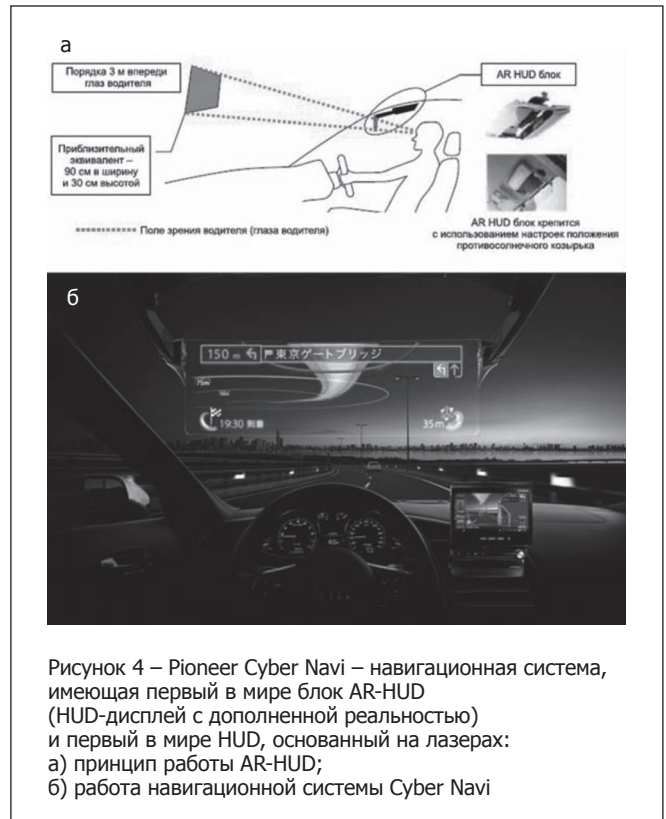


Рисунок 4 – Pioneer Cyber Navi – навигационная система, имеющая первый в мире блок AR-HUD (HUD-дисплей с дополненной реальностью) и первый в мире HUD, основанный на лазерах: а) принцип работы AR-HUD; б) работа навигационной системы Cyber Navi

тельных компонентов для лазерного МЭМС-сканирования. Красные и синие лазеры, непосредственно излучающие свет соответствующей длины, уже были коммерчески доступны достаточно длительное время. Для формирования полного RGB-набора первичных цветов лазерных источников недоставало только лазерных компонентов зеленого цвета. Вместо них широко использовались синтетические методы удвоения частоты источников излучения, близкого к инфракрасному (в так называемых синтетических зеленых лазерах – Synthetic Green Lasers, SGL). Эти методы не обеспечивали достаточной яркости лазерных проекторов помимо того, что делали получение зеленого света сложным, громоздким, недостаточно эффективным и сравнительно дорогим и затормаживали движение лазерной сканирующей технологии на массовые рынки.

Недавние достижения в разработках галлий-нитридных лазерных диодов позволили повысить характеристики DGL-диодов до уровня, достаточного для их практического использования при существующей конкуренции с СИД, причем за приемлемую цену. Последние разработки демонстрируют оптический выход мощностью около 100 мВт на длине волны порядка 530 нм. И уже известно о достижении оптической мощности выхода свыше 1 Вт на длине волны порядка 525 нм. Эффективность WPE первых DGL превышает 8 %, а качество изображения, достижимое с DGL, и теоретически, и практически уже более высокое, чем это было возможно с применением SGL. Все это достигнуто благодаря совершенствованию технологии производства непосредственно излучающих зеленых лазеров, что стало толчком для последовавшего прорыва в лазерной сканирующей технологии, получившей импульс к своему дальнейшему развитию и широкому распространению.

Данная статья сфокусирована на решениях, ознаменовавших новый этап в дальнейшей эволюции технологий сканирования и проецирования. Значимую долю среди них составляют успешные разработки новых зеленых осветительных компонентов с более высокими характеристиками, инициировавшие волну других разработок технологий лазерного сканирования и проецирования, а также ответный всплеск со стороны конкурирующих технологий.

Миграция технологий проекторов к полупроводниковому освещению

Возможность просмотра в большом или даже 3D-формате контента, который можно извлечь из устройства малых размеров, привлекает мобильных пользователей, для которых существует потребность обмениваться информацией в целях бизнеса, учебы или развлечений.

Аналитики оценивают, что рынок карманных и встроенных мобильных проекторов имеет довольно яркие перспективы [1]. Как аксессуары, проекторы давно уже сопровождают ноутбуки и смартфоны. В последние годы наметилась тенденция непосредственного встраивания их в виде модулей в цифровые камеры и смартфоны.

И лазерные диоды, и светодиоды (LED) имеют перспективы использования в малых проекционных блоках как источники света для проецирования дисплейного контента на подходящую или даже не очень подходящую поверхность. Потребитель оценивает проекторы по качеству изображения, характеристикам, удобству использования, которые в состоянии обеспечить обе технологии.

В основе работы всех проекторов лежат схожие принципы. Проекционное изображение формируется при помощи первичного набора базовых цветов (RGB) от источника света.

Некоторые проекторы используют перед световым источником цветное колесо, служащее фильтром для производства RGB-лучей, которые затем перенаправляются посредством одного микродисплея на экран для создания одного RGB-изображения (рисунок 1 а). Другие версии проекторов используют освещение каждого первичного цвета для индивидуальных микродисплеев, перенаправляющих монохроматические изображения для их смешивания на проекционном экране (рисунок 1 б).

В офисных проекторах и домашних кинотеатрах для освещения широко используются галогеновые лампы. LED или лазеры, в сравнении с лампами, позволяют создавать более компактные и эффективные с точки зрения потребления мощности батарейные модули, не требующие охлаждения, и позволяют формировать RGB-лучи непосредственно, не применяя цветных фильтров.

Дисплейная машина – ядро проектора на основе полупроводникового источника освещения – состоит только из источника света в виде трех RGB LED или трех RGB лазеров, драйверной схемы, оптических компонентов для освещения и проекционной линзы, микродисплея, причем некоторые (лазерные) версии проекторов позволяют обходиться даже без микродисплея.

Светодиодные проекторы получили значительно большее распространение на ключевых рынках сбыта – пикопроекторах и HUD. В большинстве головных дисплеев в автомобилях для проецирования используется

светодиодное освещение. Малые проекторы на приборной панели проецируют актуальную информацию, например, скорость или навигационные данные на ветровое стекло (рисунок 3).

Светодиодные проекторы

Светодиодные LED-проекторы создают изображения от первичных источников RGB LED, перенаправляя лучи посредством микродисплея на экран. Микродисплеи играют важную роль не только как зеркало, но и для формирования пиксельного цвета. Известно два ключевых типа микродисплеев:

– массивы микрозеркал (технология Texas Instruments, известная под названиями DLP или DMD (Digital Micromirror Devices), представляющие собой ИС с индивидуальной компоновкой каждого пикселя МЭМС (МОЭМС) зеркалами (рисунок 1);

– ЖК-дисплеи на кремнии (LCoS), имеющие отражательную и подключенную к электронике заднюю сторону, каждый кристалл которых соответствует пикселю и индивидуально адресуется (рисунок 2).

Архитектура оптической системы главным образом зависит от размера и типа микродисплея. Расхождение лучей отдельных светодиодов устраняется с использованием коллимирующих линз. С использованием специального дихроичного фильтра лучи различных длин волн могут только отражаться или передаваться, а специальные гомогенизирующие линзы рассеивают цвета и их интенсивность по всему поперечному сечению луча. Другие линзы переводят свет к микродисплею, перенаправляющему свет через проекционную оптику на экран. Поскольку угол наклона микрозеркала ограничен ($\pm 12^\circ$), падающий и отраженный лучи должны достаточно разделяться, чтобы избежать интерференции при функционировании освещающей и проекционной линз, что достигается за счет специальной призмы. Лучи, приходящие на призму с полным внутренним отражением (Total Internal Reflection, TIR), полностью отражаются.

Фундаментальное различие между DMD- и LCoS-решениями состоит в том, что жидкие кристаллы могут обрабатывать только линейно поляризованный свет – в отличие от DMD. Вместо призмы TIR для них требуется разделитель поляризованного луча (PBS). LED излучают неполяризованный свет, поэтому системы LCoS требуют поляризационной оптики. В дизайн оптической системы LCoS хорошо вписываются лазеры, лучи которых являются поляризованными.

Современные светодиоды характеризуются высокой интенсивностью света, которая позволяет создавать пикопроекторы с оптическим выходом более 1 Вт и выходом светового потока свыше 20 лм (достигающим порядка нескольких сотен лм). Светодиоды характеризуются высокой эффективностью и воспроизводят, в зависимости от условий освещения, изображения на расстоянии свыше 1,5 м. Но первые разработки, пикопроекторы и HUD, обладая низкой системной яркостью (примерно 5–15 лм для пикопроекторов) имели довольно высокую себестоимость. Разработки эффективных диодов и новых типов корпусов повышают характеристики проекторов и усиливают к ним пользовательский интерес. Помимо индивидуальных RGB LED различной мощности разрабатываются компоненты

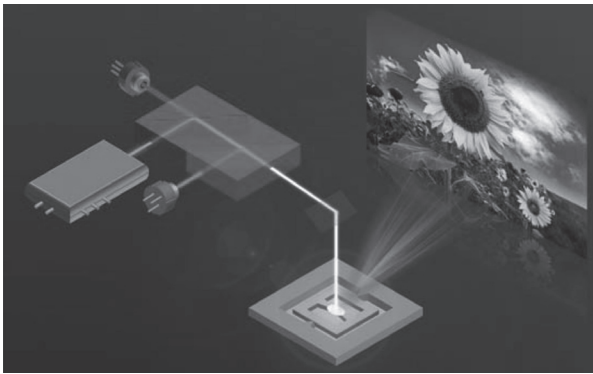


Рисунок 5 – Дисплейная технология PicoP от MicroVision: МЭМС сканер+RGB-лазеры

специально для проецирования, комбинирующие два и более цветов для достижения соответствующей яркости и эффективности.

Лазерные проекторы

Лазерные диоды, как и светодиоды, могут быть яркими и компактными источниками трех первичных цветов.

Лазеры в проекторах могут использоваться для:

- лазерного сканирования (Laser Beam Steering, LBS);
- лазерного освещения микродисплея с использованием пространственных световых модуляторов (Spatial Light Modulators, SLM).

Сканирующий лазерный принцип основан на оптическом объединении RGB-лучей и производстве одного лазерного луча размерами в один пиксель, посредством которого сканирующее одно- или двунаправленное МЭМС-зеркало выполняет пиксельное сканирование изображения на экран (рисунок 5). Частота переключения является высокой, и изображение воспринимается как целостная картина. Цветовая смесь в пикселе является результатом рабочего цикла соответствующего лазерного диода.

Лазерная сканирующая технология позволяет обходиться без многих компонентов, требуемых для светодиодного проецирования – микродисплея и оптики. Вместо микродисплея на основе микрзеркал или LCoS с большим числом пикселей достаточно только одного МЭМС-зеркала, хотя может использоваться даже массив LBS MEMS-зеркал.

Сканирующий принцип отличает LBS от микродисплейного освещения, при котором 2D-массив пиксельных зеркал модулирует лазерный свет в каждом пикселе. Лазерные проекторы могут обеспечивать разрешение и четкость до HD без увеличения размера, а в LBS-версии – вообще без микродисплея проекционной машины, что снижает цену лазерной технологии при крупносерийном производстве.

Красные лазеры, как источники освещения, широко используются в DVD-плеерах, а синие и зеленые лазерные диоды относятся к числу самых последних разработок, например, для Blu-ray DVD. В 2009 году OSRAM достигла прорыва в разработке своего первого непосредственно излучающего зеленого лазера. До того времени зеленые лазеры могли производиться только с использованием специальных кристаллов, которые преобразовывали ИК-излучение в специальный свет (SGL).

При запуске непосредственно излучающих диодов в 2012 году лазерные проекционные модули будут становиться меньше по размеру и более конкурентоспособными со светодиодами в плане соотношения характеристик и цены.

Помимо возможности дизайна экстремально малых проекционных блоков, светодиодные и лазерные проекторы обладают способностью воспроизводить яркие цвета в широкой цветовой гамме с высокой контрастностью. Обе технологии обеспечивают низкое энергопотребление и срок службы порядка 20 000 ч. Ожидается рост рынка пикопрокторов, работающих от аккумуляторных батарей, что требует высокой эффективности дисплейного устройства и источника света.

Границы применимости лазерной технологии в сравнении с методами, основанными на светодиодном освещении, шире – от пикопрокторов до домашних кинотеатров, от лазерных проекторов HUD до высокоразрешающих сканеров, мобильных и промышленных роботов.

Даже в тех применениях, которые выше именуется светодиодными, светодиоды могут быть вытеснены лазерами, то есть, лазеры могут применяться для освещения зеркальных массивов DLP и LCoS. И Syndiant, и TI разработали лазерные версии своих проекторов. Syndiant уже выпускает лазерные модули LCOS, в дизайн которых лазеры органично вписались ввиду того, что генерируют поляризованный свет и показали высокую эффективность в сравнении с LED.

Отличительная особенность лазерной технологии – отсутствие необходимости в фокусирующей и другой оптике для получения резкого, четкого изображения на любых поверхностях. Высокое f-число лазерного света соответствует высокому проценту передачи света и низкому проценту потерь в оптических системах. Вследствие этого лазерное освещение исключает необходимость в фокусировке при применении как LBS, так и микродисплейной технологии.

Разрешение микродисплеев с фиксированной решеткой определяется числом и размером пикселей, но растровая технология LBS с тем же самым числом пикселей будет иметь более низкое разрешение вследствие отклонений в процессе развертки.

Выход для обеих технологий состоит в снижении размера пикселя, повышении фактора заполнения микродисплеев, точности переключения и яркости лазерного света.

Важнейшей проблемой, ассоциируемой с использованием лазерных проекторов, является зернистость (или пятнистость, speckle), вызванная узким спектром когерентного излучения лазера. Известны два наиболее общих метода снижения зернистости (despeckling): спектральное уширение и варьирование эффективного расстояния.

Для диодных лазеров зернистость снижают, применяя ВЧ-модуляцию в схеме управления лазера, что расширяет набор длин волн на выходе. Но эта техника применима к цветным RGB непосредственно излучающим DGL и не подходит для частотно удваиваемых лазеров. Поэтому наиболее распространенным до появления DGL был метод временного или пространственного варьирования длины пути посредством вращающихся, вибрационных или электронно-модулируемых элементов.

Еще один аспект применения лазеров связан с безопасностью. Лазеры мощных сканирующих проекторов являются довольно опасными. Например, лазерные компоненты Nichia

характеризуются согласно Class 3B и 4 IEC60825-1 и 21 CFR Part 1040.10 Safety Standards. На лазерные лучи проектора нельзя смотреть непосредственно без использования защитных очков, отражения лазерного луча также опасны. В наибольшей степени опасны лазеры при их применении в сканирующих лазерных проекторах, так как в оптических системах микро-дисплейных проекторов прежде достижения микро-дисплея и в проекционной линзе происходит уширение и рассеивание лазерного света.

Полупроводниковые RGB-источники для проекционного освещения. Уровень развития технологий и проблема «зеленого зазора»

Обычные и лазерные диоды имеют много общего. Кроме того, что это излучающие свет полупроводниковые диоды на основе кристаллов, что находит отражение в устройстве и конструкции, полупроводниковые осветительные диоды также сближает проблема, известная как green gap или так называемый «зеленый зазор» (это название ассоциировано также с шириной запрещенной зоны лазеров для получения соответствующей длины волны).

Светодиоды

Светодиод или светоизлучающий диод (СД, СИД, LED) – это оптоэлектронный полупроводниковый диод, способный генерировать свет в результате электролюминесценции, то есть излучать при пропускании через p-n-переход электрического тока так называемое спонтанное оптическое излучение в узком (хотя и более широком, чем у лазеров) диапазоне спектра.

LED, в отличие от лазеров, генерируют сильно расходящийся свет, что требует собирающей оптики, а также многоканального модулятора и проекционной оптики. Светодиодные проекторы не обладают такой же монохроматичностью и качеством луча, как лазеры, и нуждаются в ручной фокусировке, но не имеют проблем зернистости и более безопасны.

Кристалл светодиода излучает конкретный цвет. Белый свет достигается посредством смешения отдельных цветов излучения скомбинированных вместе светодиодов, либо посредством преобразования длины волны. Таким же способом могут быть получены другие цвета.

Люминофоры – спутник СИД-технологии, обеспечивающий преобразование монохроматического синего или близкого к УФ излучения СИД-кристаллов в спектр цветов в широкой спектральной полосе.

В настоящее время доступны СИД практически всех цветов, включая требуемые для проецирования красный, зеленый и синий. Полупроводник GaP, например, излучает свет в красном спектре. Для глубоко красного излучения может использоваться AlGaAs – распространенный материал светодиодов, излучающих в ближнем ИК. Более короткие длины волн в красном диапазоне достигаются с использованием GaAsP и AlInGaP. Внутренняя квантовая эффективность (извлеченные из LED фотоны) близка к 100 % для волн длиной порядка 650 нм, но высокие эффективности сложно достижимы на длинах волн 620 нм, к которым человеческий глаз более чувствителен [7]. Полупроводниковый материал InGaN – нитрид галлия, модифицированный индием – один из самых распространенных материалов светодиодов, ко-

торые излучают свет в синей, фиолетовой и зеленой части спектра. Возможно использование и других нитридных материалов (AlN).

По данным IMS Research, галлий-нитридные светодиоды с 2012 года ожидает новый этап роста и, как видно из диаграммы (рисунок 6), с этого времени применение данной технологии для проекторов становится более активным.

Яркость, или световой поток в лм, – наиболее важный параметр светодиодов. Причем для проецирования наиболее важен полезный световой поток LED, используемый в оптической системе. Доступная мощность мобильных пикопрокторов ограничена, чтобы гарантировать определенное время батарейной работы. Для мобильных устройств приобретает актуальность другой важный параметр – эффективность свечения, измеряемая в лм/Вт. Светодиодный источник должен соответствовать требованиям эффективности на уровне кристалла, корпуса, оптической системы проектора.

OSRAM Opto Semiconductors ввела LED тонкопленочные кристаллы на основе технологий ThinFilm и ThinGaN с высокой эффективностью свечения [8]. Доминирующие длины волн – 617, 525 и 460 нм. Красные ThinFilm, зеленые и синие ThinGaN кристаллы используют AlInGaP и InGaN соответственно. Эффективность свечения падает с током неодинаково для различных размеров кристаллов, она является максимальной для максимального размера LED-кристалла.

Одной из крупнейших проблем нитридных СД является так называемый green gap – резкое снижение эффективности излучателей на более длинных волнах. Хотя для светодиодов проблема green gap начала решаться раньше, чем для лазеров, полностью проблема не была решена. Технологически наиболее сложной является спектральная область зеленого-желтого-оранжевого цвета. Данный недостаток ограничивает эффективность излучения белого и других цветов на основе зеленого и, следовательно, системную яркость проектора. Для генерации белого света необходим вклад зеленого компонента потока свыше 65 %.

Для перекрытия низкой эффективности зеленого излучения OSRAM разработала LED-продукты RGGB типа для одноканального освещения, в которых два зеленых кристалла компенсируют низкую эффективность зеленого свечения. Хотя одноканальный подход исключает необходимость в оптическом объединении, для достижения однородности по-

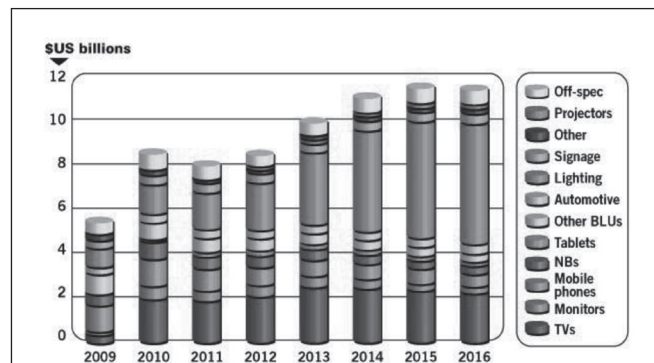


Рисунок 6 – Динамика роста рынка закорпусированных GaN LED для различных применений в 2009–2016 годах. Источник: IMS Research

прежнему требуются оптические элементы (массивы линз), а яркость ограничена вследствие того, что максимальная излучающая область содержит три цвета. Поэтому OSRAM рекомендует свое решение для недорогих проекторов, не требующих высокой яркости.

Трехканальный метод – это способ использовать максимальную излучающую поверхность для каждого цвета, но его стоимость выше. Двухканальный метод основан на оптическом объединении в одном корпусе синего и красного кристаллов, а для зеленого света используется максимальная площадь излучающей поверхности в отдельном корпусе. При этом важно, что каждая проекционная оптическая система имеет максимально полезную светоизлучающую область LED, за пределами которой излучение не может быть использовано [8]. Цена светодиодов пропорциональна площади кристалла, поэтому цель состоит в увеличении площади для эффективности свечения кристалла, но без превышения системного предела параметра *tendue* оптической системы – характеристики распространения света в среде по площади излучения и углу.

Вследствие необходимости в более чем 65 %-ном вкладе зеленого компонента для получения белого света OSRAM разработала метод преобразования свечения синего LED посредством люминофора, что дает 90 % светового потока в лм с широким спектром. Выход белого светового потока в лм двух- и трехканальной архитектуре повышается на 40 %. Мобильный проектор Dell M110 с использованием трехканальной архитектуры и данного метода преобразования для зеленого света дает выход в 300 лм.

Другой метод состоит в получении истинно зеленого света, что достигается совершенствованием технологии производства кристаллов на основе GaN – InGaN и AlGaIn. Для GaN-материалов характерна высокая плотность дефектов, но, несмотря на это, достигается внутренняя квантовая эффективность 70–90 % и выше. Длинные волны излучения (зеленого и желтого цвета) достигаются при увеличении содержания индия, но эффективность резко падает при увеличении длины волны.

Для перекрытия проблемы «зеленого зазора» инженеры компании Toshiba помещали тонкие слои AlGaIn в активную область обычного устройства. Проблемы, ассоциируемые с движением светодиодов к более длинным волнам, состоят

в старении кристаллической структуры и фазовом разделении, что было исправлено улучшением процесса наращивания. Переключение к полуполярной или неполярной плоскости наращивания позволило смягчить увеличение разделения электронов и дырок.

Специалисты Toshiba добились улучшения, используя сапфировые с-плоскости, и показали, что увеличение содержания Al позволяет уменьшить эффекты снижения эффективности на более длинных волнах. LED, излучающий на 532 нм, включает слой AlGaIn с содержанием алюминия порядка 0,3 и обеспечивает выход с квантовой эффективностью в 25,9 %.

Новый OSRAM Ostar Projection Cube (рисунок 7) в настоящее время уменьшает «зеленый зазор» за счет специальной технологии корпусирования. Эффективность представленного зеленого светодиода составляет 110 лм/Вт, что намного выше, чем у прежде доступных зеленых светодиодов в секторе встроенного проецирования. В первую очередь, OSRAM Ostar Projection Cube допускает достижение высокого выхода встроенных проекторов: становятся возможными встроенные проекторы с системной яркостью до 25 лм, изображение которых будет ясно различимо даже в условиях окружающего освещения при ограниченной батарейной емкости. Отличающиеся размером кристалла, две версии светодиода производят 260 лм на 700 мА и 2,3 Вт или 130 лм на 350 мА и 1,2 Вт. Высокая яркость от малой поверхностной области размерами 3,8×4,1 мм при высоте в 0,6 мм достигнута благодаря специальному корпусированию, резко определяющем световую поверхность так, что свет излучается без отражений в пределах корпуса. Срок службы светодиода — свыше 20 000 ч, что также ярко показывает преимущества полупроводникового светодиодного освещения.

Таким образом, LED, как источники освещения, весьма перспективны в секторе мобильного проецирования вследствие своего компактного размера и высокого выхода светового потока. Выбор оптимального светодиода для проектора зависит от требуемых системных характеристик, размера, мощности, цены и может варьироваться с использованием доступных опций кристаллов, корпусов, архитектур освещения. Трехканальные архитектуры допускают оптическую эффективность до 90 %, а двухканальные – до 80 %.

Лазерные диоды

Лазерный диод представляет собой полупроводниковый лазер, в котором оптическое усиление генерируется при пропускании электрического тока через p-n-переход или p-i-n-структуру. В гетероструктуре электроны и дырки рекомбинируют, высвобождая энергию в виде фотонов. Данный процесс может быть спонтанным, а также может стимулироваться падающими фотонами, что приводит к так называемому вынужденному или индуцированному излучению или оптическому усилению с обратной связью в лазерном резонаторе и лазерному излучению.

Известны различные типы лазерных диодов, различающихся режимом работы, выходной мощностью, длиной волны, частотной полосой, другими свойствами. Характеристики зависят от типа диодов и используемых материалов [7].

Конструкция лазерного диода, которая считается классической, включает тонкий прямоугольный полупроводниковый кристалл, служащий оптическим волноводом



Рисунок 7 – Новый OSRAM Ostar Projection Cube LED для встроенного проецирования ярких цветов от смартфона

и ограничивающий излучение. Верхний и нижний слои кристаллического волновода легируются для создания р-п-перехода большой площади. Лазерный диод генерирует лазерное излучение при смещении р-п-перехода. Торцы кристалла полируются для формирования оптического резонатора Фабри-Перо. Механизм вынужденного излучения лазера работает следующим образом. Фотон спонтанного излучения соответствующей резонансной частоты, движущийся перпендикулярно этим плоскостям, проходит через волновод с многократным отражением от торцов, каждый раз вызывая вынужденную рекомбинацию электронов и дырок и создавая новые фотоны той же частоты, вследствие чего излучение будет усиливаться, вызывая лазерную генерацию.

Квантовая яма (quantum well) – это тонкий слой, который ограничивает движение электронов и дырок перпендикулярно поверхности слоя, движение в других направлениях при этом не ограничивается. Квантовая яма создается посредством размещения тонкого слоя между другими слоями с широкой запрещенной зоной (например, GaAs квантовая яма встраивается в AlGaAs, или InGaAs в GaAs). Большинство лазеров отражают свет от торцов, но бывают также и поверхностно излучающие лазеры (VCSEL и VECSEL).

Лазерные диоды могут быть одно- и многомодовыми. Одномодовый лазер имеет ширину волновода, сравнимую с длиной волны излучения, и генерирует излучение только в одном направлении, параллельном тонким слоям структуры. Ширина луча будет определяться только пределами дифракции. Многомодовый (multi-mode) лазерный диод генерирует излучение в нескольких поперечных режимах, что возможно, если волновод достаточно широкий в сравнении с длиной волны. Мультимодовые лазеры применяются, когда необходима высокая мощность излучения без условия хорошей сходимости луча. Если требуется хорошая фокусировка луча, применяются однорежимные лазеры, которые не могут генерировать излучение на разных длинах волн одновременно.

Перечислим ключевые характеристики полупроводниковых диодов, необходимые для понимания их преимуществ.

Электрооптическая эффективность wall-plug efficiency – общая эффективность преобразования энергии лазерной системы, которая должна измеряться при питании от стационарного источника (wall plug – «настенная розетка»), вследствие чего происходят потери в мощности питания и возникают затраты на охлаждение. Но WPE часто вычисляется на основе мощности, подаваемой на лазерный диод, то есть как электрооптическая эффективность лазерного диода при питании от мобильного источника.

Качество луча (beam quality) лазера – характеристика фокусировки луча в связи с его незначительной дивергенцией. Методы количественного определения изложены в [7]. Многие маломощные лазеры характеризуются высоким качеством луча, тогда как высокомоощные в большинстве своем имеют плохое качество, вследствие чего для них применяется коллимационная оптика (Beam Shaping).

Beam Splitter – это оптическое устройство, способное делить лазерный луч на два или более лучей. Так как свет, излучаемый лазерным диодом, линейно поляризован, то возможно комбинировать выходы двух диодов посредством поляризирующего сплиттера, при этом создается неполяризованный луч удвоенной мощности с тем же качеством луча,

что и от одного диода. Возможно комбинирование лучей лазерных диодов различных длин волн с использованием дихроичных зеркал.

Лазерные диоды применяются как управляемые источники света в волоконно-оптических линиях связи, считывателях штрих-кодов, лазерных указках, компьютерных мышках, лазерных шоу и дальномерах. Инфракрасные и красные лазеры применяются в проигрывателях CD- и DVD-дисков, лазерных указках, фиолетовые – в устройствах HD DVD и Blu-Ray. Синие лазеры нашли применение в проекторах нового поколения в качестве источника синего и зеленого света (при воздействии синего света на люминофор). Новыми применениями для лазеров являются проекторы, спектроскопия, 3D ToF-камеры.

Лазерные сканирующие проекторы, принцип действия которых был рассмотрен выше, требуют RGB световых источников. Посредством аддитивного смешения красного, зеленого и синего получают другие цвета. Лазерные источники дают более широкое цветовое пространство, чем светодиоды и лампы благодаря намного лучшей пространственной когерентности (качества луча) и высокой эффективности.

Воспринимаемые человеком цвета локализованы в 2D-диаграмме цветности CIE 1931 (рисунок 8). Монохроматический свет соответствует краям цветной области. Лазерный свет близок к монохроматическому, что означает, что вся область цветов доступна для воспроизведения.

Для ламп и светодиодов края доступной цветовой области лежат внутри диаграммы.

Выбор трех длин волн RGB определяет индекс цветового рендеринга (Color Rendering Index, CRI), который количественно измеряет, как хорошо передается цвет при освещении белым светом, состоящим из трех спектральных компонентов. Ввиду того, что лазерный свет имеет узкую спектральную полосу, лазерный рендеринг точно передает цвета. Выбор длин волн также влияет на эффективность свечения источника.

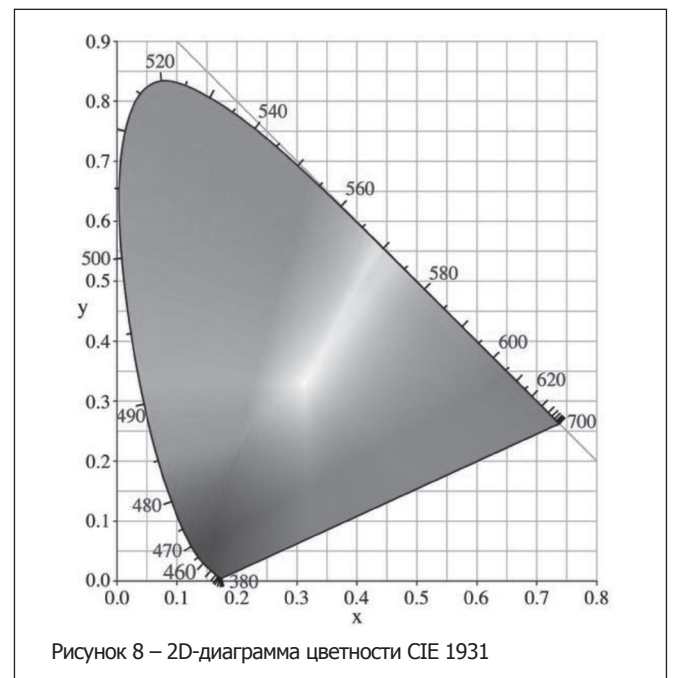


Рисунок 8 – 2D-диаграмма цветности CIE 1931

Для проекторов, работающих в помещениях, достаточно мощности до 1 Вт для каждого цвета. Для карманных устройств достаточно даже нескольких десятков мВт, хотя желательны более высокие уровни мощности, особенно в условиях окружающего освещения. Проекторы кинотеатров потребляют порядка 10 Вт для каждого цвета. Но на данный момент RGB-лазеры достигли мощности, подходящей только для мобильных проекторов.

Для достижения малого пиксельного размера и высокого разрешения с использованием лазерной сканирующей технологии требуется высокое качество луча и одномодовые лазеры. Для других типов проекторов (микродисплейных) качество луча может быть ниже, и могут применяться многомодовые лазеры.

В наборе RGB источников освещения красные и синие лазерные диоды являются зрелой технологией. Красные лазерные диоды для пикопроекторов, выпускает, например, компания Mitsubishi (рисунок 9).



Рисунок 9 – Красные лазерные диоды для пикопроекторов ML501P73 Mitsubishi Electric с выходной мощностью 1 Вт

На длине волны 638 нм диоды ML501P73 генерируют выход мощностью в 1 Вт (в импульсном мультимодовом режиме) и достигают WPE в 28 %. Красный лазер HL63133DG на основе материала AlGaInP разработан для пикопроекторов фирмой Orpnext, его выход составляет 170 мВт (CW) на длине волны 638 нм (рисунок 10). Фирма Sony долгое время находилась на передовом фронте со своими красными и близкими к ИК GaAs лазерными излучателями, а позднее со своими разработками синих GaN лазерных диодов для Blu-ray дисков и игровой консоли PlayStation.



Рисунок 10 – Красный лазер Orpnext HL63133DG для пикопроекторов

Синие лазерные диоды обычно производятся на основе нитрида галлия (GaN) или подобных материалах (InGaN), их излучение ранжировано в диапазоне длин волн 400–480 нм. В сравнении с предыдущим поколением лазерных диодов синие излучатели были более проблематичны с точки зрения высокого выхода мощности, срока службы и производства материалов, излучающих синий свет. Если близкие к ИК и красные лазеры для CD- и DVD-приводов объединяют активные слои GaAs, нанесенные на подложку из того же материала, то синие вначале были основаны на комбинации GaN активных слоев, наращенных на сапфировой подложке, поскольку GaN-подложки были недоступны. Ввиду несогласований кристаллических решеток GaN и сапфира синие диоды раннего поколения имели ограниченную выработку, были дорогими и имели ограниченный выход мощности.

Впоследствии Sony решила проблему производства и начала поставки дешевых и более мощных InGaN лазерных диодов, что позволило снизить цену Blu-ray плееров. Синие лазеры Sony для Blu-ray DVD не используются для проецирования. Но на основе данной технологии Sony совместно с Sumimoto разработала первый в мире зеленый лазерный диод на основе материала GaN.

OSRAM Opto Semiconductors сконцентрировала свои усилия на производстве синих и зеленых лазеров специально для мобильного проецирования, и в настоящем имеет в своем портфолио и тот, и другой. Синий лазерный диод от OSRAM на длине волны 450 нм, представленный в 2012 году для профессиональных проекторов яркостью порядка – 100 лм, имеет оптическую мощность 1,4 Вт, эффективность 27 % (рисунок 11). Для генерации зеленого излучения рекомендуется применять данный лазерный диод синего цвета в комбинации с люминофором. Таким же способом возможно получение красного цвета.

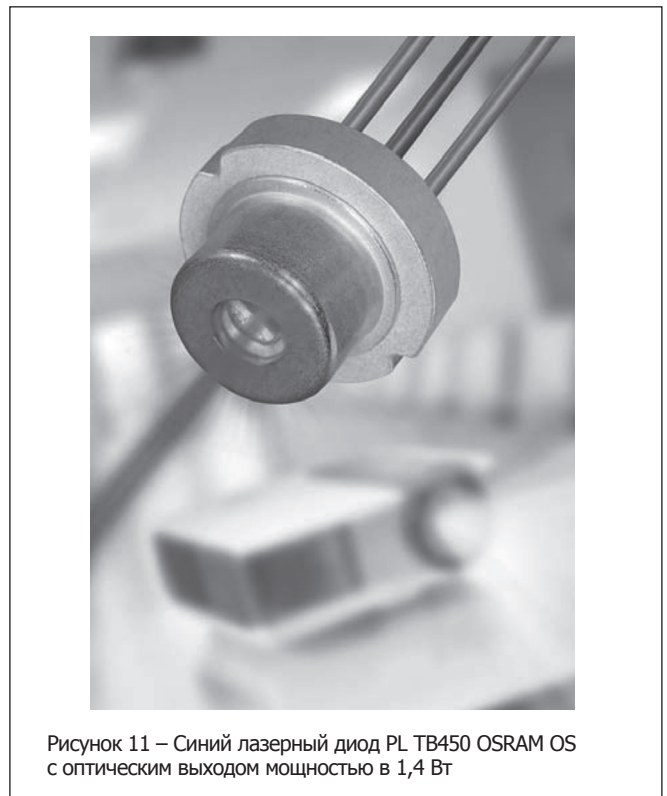


Рисунок 11 – Синий лазерный диод PL TB450 OSRAM OS с оптическим выходом мощностью в 1,4 Вт

Японская компания Nichia разработала синие лазерные диоды на основе InGaN полупроводниковых материалов, например, одномодовый диодный лазер NDB4216E с оптическим выходом 100 мВт в режиме непрерывной работы (CW) на длине волны 450–460 нм. Nichia достигла успеха в разработке зеленого GaN-LD еще в 2010 году, тогда же стартовали продажи образцов. В настоящее время компания продает также зеленый лазер, характеризующийся длиной волны 515 нм с максимальным выходом в 100 мВт.

На фоне того, что красные и синие лазерные диоды достигли высоких показателей в плане мощности и эффективности при компактном размере и низкой цене, зеленых лазерных диодов с аналогичными характеристиками долгое время не было. Зеленый свет обычно генерировался частотным удвоением выхода Nd:YAG или Nd:YVO₄ лазера, излучающего на 1064 нм. До недавнего времени большинство зеленых лазеров проекторов представляли собой ИК-устройства, дополненные для удвоения частоты кристаллической оптикой (кристаллы LiNbO₃, LiTaO₃ и др.). В результате так называемые синтетические зеленые лазеры были намного более громоздкими и дорогими, чем красные и синие источники непосредственного излучения. Их использование снижало системную эффективность и повышало сложность применения в мобильных устройствах. По яркости и качеству изображения, потреблению мощности и цене лазерная технология уступала светодиодной, результатом чего стало превазирование LED над лазерами в возникающем рынке пикопроекторов и практически полное отсутствие до 2012 года лазеров в HUD.

Лидирующие производители активно работали над проблемой закрытия «зеленого зазора», и на данный момент это им, можно сказать, что удалось.

В октябре 2012 года OSRAM OS объявила о коммерческой доступности непосредственно излучающих лазерных диодов (рисунок 12). Два первых компактных лазерных диода характеризуются оптическим выходом мощностью в 30 и 50 мВт в волновом диапазоне в 510–530 нм и отличаются высоким качеством луча.

Еще раньше, в июне 2012 года, Sony, известная своими разработками InGaN синих лазерных диодов для Blu-ray дисков и игровой консоли PlayStation, за счет введения новой полуполярной структуры смогла представить новое истинно зеленое



Рисунок 12 – Непосредственно излучающий зеленый свет лазерный диод PL 520 от OSRAM OS, обеспечивающий высокое качество луча для лазерного проецирования

лазерное устройство с выходом 100 мВт на длине волны 530 нм [1] (рисунок 13). Цветовая гамма расширена на 182 % согласно стандарту NTSC (CIE 1976). Помимо своих достоинств на уровне характеристик, это был первый коммерчески доступный для OEM истинно зеленый полупроводниковый лазерный диод. Истинно зеленый полупроводниковый лазер является высоконадежным и характеризуется эффективностью работы (WPE) свыше 8 %. Компания использовала GaN-подложку, технологии наращивания кристаллов и обработки пластин от Sumitomo Electric, объединяя их с лазерной технологией Sony для GaN, усовершенствованной при разработке Blu-ray.

Успех, состоящий в разработке первого в мире истинно зеленого полупроводникового лазерного диода, который имеет оптический выход свыше 100 мВт на 530 нм, был достигнут при использовании полуполярной GaN-подложки и за счет улучшения методов производства гомогенных активных слоев на индиевой основе, что приводит к успешному наращиванию высококачественного светоизлучающего слоя.

Soraa и Nichia — другие потенциальные поставщики зеленых лазеров. Большинство фирм, использующих GaN для производства осветительных диодов (и обычных, и лазерных), рассматривает его именно как излучающий материал. В отличие от них Soraa разрабатывает технологию GaN-on-GaN и связывает с ней большие перспективы для LED, лазерных диодов, силовой электроники.

Nichia разработала и продает зеленый лазер с длиной волны 515 нм с максимальным выходом в 100 мВт. А уже в ноябре 2012 года Nichia объявила о своей новой разработке истинно зеленых лазерных диодов для дисплейных применений с выходом мощностью в 10 раз более высокой – свыше 1 Вт на длине волны 525 нм, и в 1,5 раза более высокой электрооптической эффективностью WPE, чем у предложений от конкурентов на основе GaN.

DGL по сравнению с синтетическими лазерами характеризуются стандартным меньшим размером, низкими ценами и высокими объемами выработки. При запуске непосредственно излучающих диодов в 2012 году лазерные проекционные модули будут становиться меньшими и более конкурентноспособными в сравнении со светодиодными проекторами. Выход на рынок новых поставщиков DGL-лазеров облегчает OEM выбор компонента с подходящими характеристиками и стимулирует ценовую конкуренцию.



Рисунок 13 – Первый в мире «истинно зеленый» полупроводниковый лазерный диод с выходом 100 мВт, разработанный Sumitomo Electric и Sony

Рост рынка лазерных проекторов и сканеров

Ключевыми применениями для технологий проецирования с использованием полупроводникового освещения являются пикопроекторы и HUD. Как предсказывают аналитики Pacific Media Associates, рынок пикопроекторов обещает стремительно расти – от 3 млн единиц в 2011 году до 58 млн в 2015 году. Яркие перспективы ожидаются и для рынка HUD. В 2012 году объем рынка HUD близок к 1 млрд долл. США. В исследовании MarketsandMarkets, посвященном анализу состояния и перспектив глобального рынка HUD в 2012–2017 годах, текущий объем оценивается в 991,86 млн долл. США и дается прогноз, что данный рыночный сегмент достигнет 2,91 млрд долл. США в 2017 году с CAGR в 24 %.

Ключевыми применениями лазерной сканирующей технологии остаются пикопроекторы и HUD, но набор функций и опций в рамках данных применений пополняется, а спектр применений расширяется. Весьма интересными являются разработки виртуальных touch- и 3D-дисплеев, например, от Microvision и LightBlueOptics. Все разработки, многие из которых представляют собой различные способы МЭМС-сканирования и проецирования или различные опции мобильного проецирования, рассмотреть нет возможности. Акцентируем внимание только на одной из тех, которые открывают новые перспективы применения именно в связи с усовершенствованиями полупроводниковых источников света, а именно – в связи с коммерциализацией эффективных непосредственно излучающих лазеров.

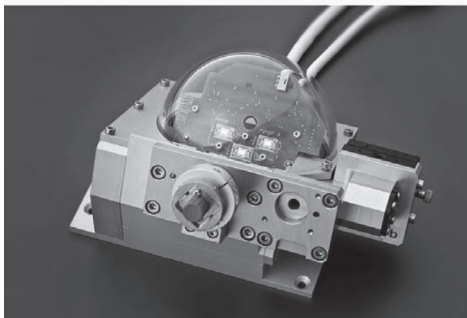
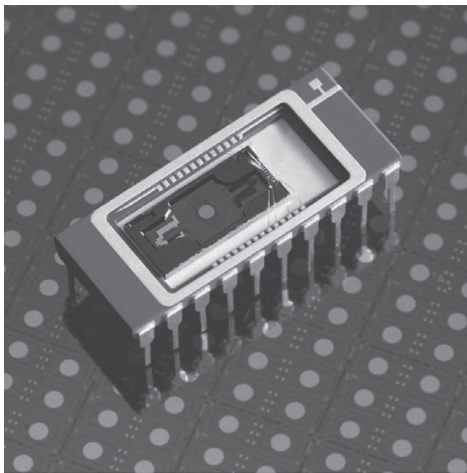


Рисунок 14 – Лазерная сканирующая технология LinScan Fraunhofer IPMS, сущность и применение:
а) квазистатический/резонансный LINSKAN MEMS-сканер;
б) оптическая сканирующая головка 3D TOF камеры с интегрированным MEMS сканирующим зеркальным массивом

Институт Fraunhofer IPMS объявил о новых усовершенствованиях квазистатической технологии LinScan с динамическим переключением луча (рисунок 14). Перечень усовершенствований включает разработку новой схемы для более быстрого переключения целевых позиций лазерного луча, динамической регулировки скорости сканирования, достижение более высокого разрешения и четкости при применениях в 3D-камере или миниатюрных лазерных проекторах.

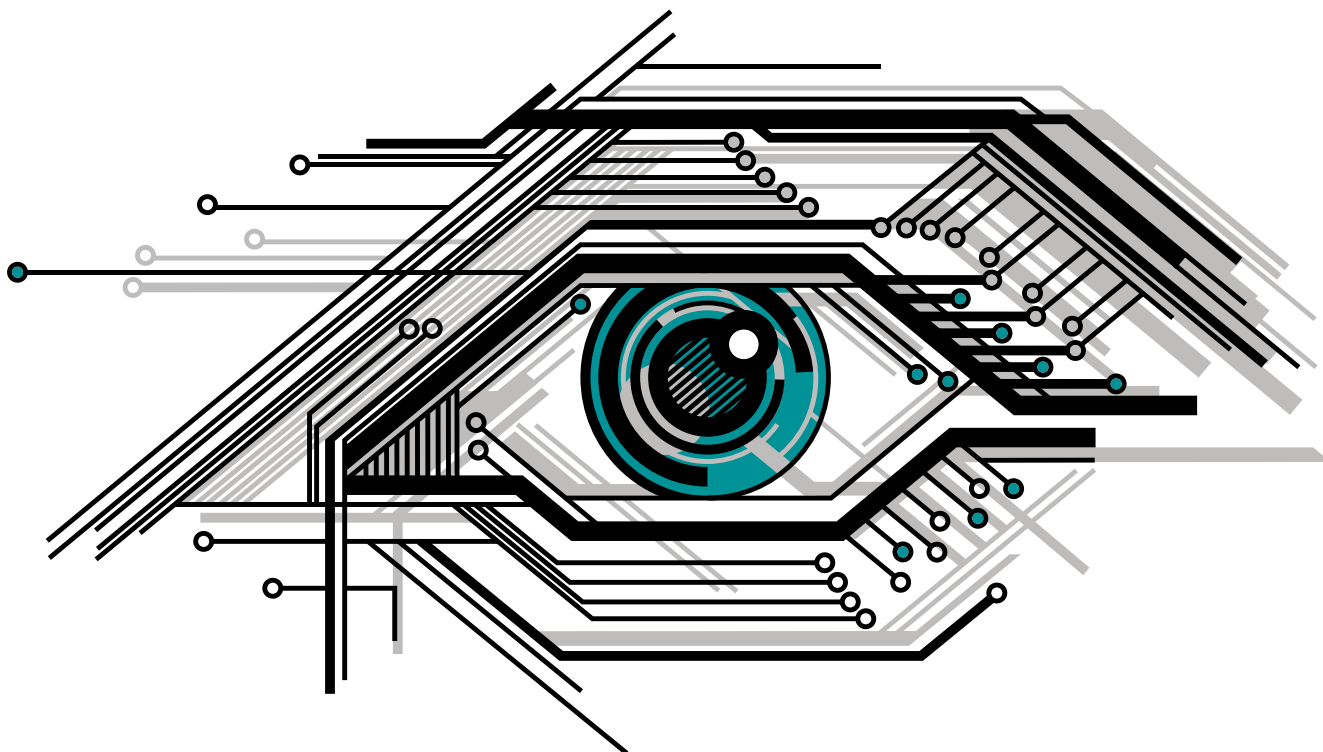
Заключение

Повышение характеристик и коммерциализация DLG-лазеров стали сильнейшим стимулом, во-первых, к дальнейшему совершенствованию технологий лазерного МЭМС-сканирования и проецирования во всех аспектах, а во-вторых – к конкуренции технологий. Конкурирующие с лазерной, технологии на основе светодиодных источников освещения и микродисплеев LCoS, DLP обладают преимуществами высоких характеристик и качества изображения, зрелости, безопасности и цены, и именно они заложили область применений. Только в случае, если весь набор в сумме преимуществ лазерной технологии – в плане характеристик, цены и безопасности – качественно превысит показатели светодиодной и других технологий, клиенты и производители будут готовы перейти на лазерные проекторы/сканеры. Так как весь набор преимуществ лазерной технологии является нативным, то ее коммерческий успех будет во многом зависеть от следующих технологических открытий со стороны позиционированных в данной нише ведущих игроков – Microvision, OSRAM, Sumimoto и Sony, института IPMS им. Фраунгофера, bTendo и ST, а также ряда других. Конкуренция между технологиями полупроводникового освещения предстает серьезная, вследствие чего потребителям можно будет надеяться на появление новых коммерческих предложений, технологических усовершенствований и расширение сферы применений с использованием методов проецирования или сканирования.

Литература:

1. Сысоева, С. Зеленый свет в дорожной карте лазерных сканирующих дисплейных технологий / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2012. – № 11.
2. Сысоева, С. HUD: проекция будущего / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2012. – № 10.
3. Сысоева, С. МОЭМС – доступные технологии генерации и сканирования оптической информации / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2010. – № 9.
4. Сысоева, С. МОЭМС – доступные технологии генерации и сканирования оптической информации / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8.
5. Lincoln, J. March of the Pico Projectors. / J. Lincoln. – <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/audiovideo/march-of-the-pico-projectors/0>.
6. Guttag? K. PICOPROJECTION DISPLAYS: Laser-LCOS microdisplays make for tiny, low-costpicoprojectors. / K. Guttag. – <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-46/issue-1/features/picoprojection-displays.html>.
7. <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>.
8. Nguyen, F. OSRAM Opto Semiconductors GMBH. Pico-projector design uses color LEDs. / F. Nguyen, S. Morgott. – <http://www.edn.com/design/consumer/4371210/Pico-projector-design-uses-color-LEDs>.

НАИМЕНОВАНИЕ ТОВАРА	ЦЕНА	НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ	АДРЕС, ТЕЛЕФОН
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОДУКЦИЯ			
Индукционные лампы Saturn 40, 80, 120, 150, 290, 300W. В комплекте электронный балласт	80-380 у.е.	ООО «ФЭК»	г. Минск. Тел./ф.: 200-34-23, тел.: 200-04-96. E-mail: lighting@fek.by
Индукционные лампы Smart Dragon 40, 80, 120, 150, 200, 300W.	80-380 у.е.		
Дроссели, ЭПРА, ИЗУ, пусковые конденсаторы, патроны и ламподержатели для люминесцентных ламп	Договор	ООО «АльфаЛидер групп»	г. Минск. Тел./ф.: 391-02-22, тел.: 391-03-33. www.alider.by
Мощные светодиоды (EMITTER, STAR), сборки и модули мощных светодиодов, линзы ARLIGHT	Договор	ООО «СветЛед решения»	г. Минск. Тел./ф.: 214-73-27, 214-73-55. E-mail: info@belaist.by www.belaist.by
Управление светом: RGB-контроллеры, усилители, диммеры и декодеры			
Источники тока AC/DC для мощных светодиодов (350/700/100-1400 mA) мощностью от 1W до 100W ARLIGHT			
Источники тока DC/DC для мощных светодиодов (вход 12-24V) ARLIGHT			
Источники напряжения AC/DC (5-12-24-48V/ от 5 до 300W) в металлическом кожухе, пластиковом, герметичном корпусе ARLIGHT, HAITAIK			
Светодиодные ленты, линейки открытые и герметичные, ленты бокового свечения, светодиоды выводные ARLIGHT			
Светодиодные лампы E27, E14, GU 5.3, GU 10 и др.			
Светодиодные светильники, прожектора, алюминиевый профиль для светодиодных изделий			
КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ, ГЕНЕРАТОРЫ, ФИЛЬТРЫ, ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ			
Любые кварцевые резонаторы, генераторы, фильтры (отечественные и импортные)	от 0,10 у.е.	УП «Алнар»	г. Минск. Тел./ф.: 209-69-97, тел. (029) 644-44-09. E-mail: alnar@alnar.net www.alnar.net
Кварцевые резонаторы Jauch под установку в отверстия и SMD-монтаж	от 0,10 у.е.		
Кварцевые генераторы Jauch под установку в отверстия и SMD-монтаж	от 0,50 у.е.		
Термокомпенсированные кварцевые генераторы	от 2,20 у.е.		
Резонаторы и фильтры на ПАВ			
Пьезокерамические резонаторы, фильтры, звонки, сирены	от 0,04 у.е.		
СПЕЦПРЕДЛОЖЕНИЕ			
Большой выбор электронных компонентов со склада и под заказ	Договор	ЧТУП «Чип электроникс»	г. Минск. Тел./ф.: 269-92-36. E-mail: chipelectronics@mail.ru www.chipelectronics.by
Широчайший выбор электронных компонентов (микросхемы, диоды, тиристоры, конденсаторы, резисторы, разъемы в ассортименте и др.)	Договор	ООО «АльфаЛидер групп»	г. Минск. Тел./ф.: 391-02-22, тел.: 391-03-33. www.alider.by
Мультиметры, осциллографы, вольтметры, клещи, частотомеры, генераторы отечественные и АКИП, APPA, GW, LeCroy, Tektronix, Agilent	1-й поставщик	ООО «Приборостроительная компания»	г. Минск. Тел./ф.: 284-11-18, тел.: 284-11-16. E-mail: 4805@tut.by



- Светодиоды Cree и Philips Lumileds для систем освещения
- Сертифицированные GSM модули и модемы
- Электронные компоненты мировых производителей
- Помощь в проектировании систем освещения и передачи данных
- Производство электронных плат на современном оборудовании

г. Минск, ул. Плеханова, 72, офис 22
тел. +375 (17) 220 76 92
факс +375 (17) 248 88 12
chip@rainbow.by

www.rainbow.by
www.rtcs.ru
www.ibutton.ru
www.light.rtcs.ru
www.rnbo.ru



ЭЛЕКТРОКОНТИНЕНТ
КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
ЭЛЕКТРОНИКИ

СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
БОЛЬШОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ОПЫТ
ОПТИМАЛЬНЫЕ СРОКИ
ПРИЕМЛЕМЫЕ ЦЕНЫ

Контрактное производство электроники
Автоматический и ручной монтаж печатных плат
Поставка печатных плат
Поставка электронных компонентов
Поставка трафаретов из нержавеющей стали
Разработка электроники на заказ
Светодиодная продукция:
светодиодные экраны
светодиодные табло
светодиодные вывески
табло «бегущие строки»
информационные табло
светодиодная продукция для освещения

Республика Беларусь, 220026
Минск, пер. Бехтерева, 8, офис 35
тел.: (+375 17) 205 06 94, 296 31 61
ELCOM (+375 29) 115 35 75
e-mail: info@elcontinent.com
WWW. ELCONTINENT.BY



**Дорогие друзья!
Поздравляем Вас
С Новым годом
и Рождеством!**

Примите искренние пожелания крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, семейного благополучия и ярких впечатлений! Пусть 2014 год станет для вас годом новых побед и достижений, интересных открытий и реализации самых смелых замыслов.



ВСЁ НЕОБХОДИМОЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Группа компаний **ЭЛТИКОН**

промышленные компьютеры, серверы, центры обработки информации, системы хранения данных;
встраиваемые и бортовые вычислительные системы, в т.ч. для жестких условий эксплуатации;
ПК и микроконтроллеры, распределенные системы управления и сбора данных;
оборудование операторского интерфейса: мониторы, панели оператора, консоли управления, клавиатуры, трекболы, периферийные устройства, информационные табло и мониторы различных применений;
системы локального и удаленного ввода-вывода сигналов, ПЛК, ЦАП, решения для управления движением, нормализаторы сигналов;
телекоммуникационное оборудование для различных сетей, коммутаторы Ethernet, медиа-конвертеры, сетевые контроллеры, модемы, удлинители сетей, образователи интерфейсов, протоколов и т.п.;
датчики для различных применений;
источники вторичного электропитания для промышленных, медицинских, бортовых и специальных применений, инверторы электропитания, программируемые источники питания;
решения на основе полупроводниковых источников света для промышленного освещения и архитектурной подсветки;
специализированные датчики, контроллеры и устройства для умного дома»
корпуса, конструктивы, субблоки в стандарте евромеханика, шкафы, стойки, компьютерные корпуса;
вспомогательные элементы, клеммы, монтажный инструмент, провода и кабели, кабельные вводы, соединители;
программное обеспечение всех уровней АСУТП, SCADA-системы, MES, OPC-серверы и средства их разработки



более 50 вендоров в программе поставок
широкий диапазон продукции "из одних рук"
сервисный центр и послегарантийное обслуживание продукции

✓ Компетентный анализ технических решений с гарантией совместимости и работоспособности конфигурации
✓ Наличие сертификатов и ГТД

✓ Развитая система логистики, нестандартные схемы поставок, склады в Минске, Москве и Гамбурге
✓ Производство промышленных компьютеров, шкафов автоматизации, сборка телекоммуникационных шкафов