

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХРАНЕНИЯ АНАЛОГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ЗАПОМИНАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

The mathematical model of fibre-optic recirculation memory device, which includes overheating of the injection laser was developed. By the method of numerical simulation the distortion of the analog information stored in the device has been investigated.

В целом ряде практических применений (например, анализ быстропротекающих процессов, мониторинг окружающей среды) существует необходимость хранить небольшие массивы информации, заключенные в последовательности близко расположенных импульсов. Для этих целей могут применяться волоконно-оптические запоминающие устройства (ВОЗУ), состоящие из замкнутого в кольцо инжекционного лазера (ИЛ), волоконного световода (ВС), лавинного фотодиода (ЛФД) и устройства регенерации, информация в которых представляется как последовательность оптических импульсов. Подобные системы используются для хранения не только цифровой, но и аналоговой информации (digital bit-serial memory [1], analog fibre-optic memory [2]). При необходимости записи в ВОЗУ аналоговой информации, например в виде фиксированного интервала времени между оптическими импульсами, в контуре памяти формируются временные шкалы, размерность которых соответствует информационным признакам аналогового сигнала. Принципиальным недостатком подобных устройств является разрушение информации, обусловленное временной деформацией импульсной последовательности в процессе хранения.

До настоящего времени в литературе отсутствуют математические модели и экспериментальные данные по исследованию динамики деформации временных интервалов импульсной последовательности в ВОЗУ в процессе циркуляции. Анализ показывает, что одной из основных причин деформации интервала между циркулирующими импульсами, приводящей к потере информации, является изменение параметров ИЛ (мощности излучения, задержки между импульсом тока накачки и импульсом стимулированного излучения и т.д.) вследствие перегрева активной области лазера. Поскольку лазерный кристалл остывает сравнительно медленно, то к приходу каждого последующего информационного импульса условия генерации будут различными.

Интервал между  $j$  и  $j+1$  импульсами на каждом цикле рециркуляции определяется следующим образом (рис. 1):

$$T_{j,j+1}^N = T_{j,j+1}^{N-1} - \tau_j^N + \tau_{j+1}^N, j=1..k-1, \quad (1)$$

где  $N$  – число циклов рециркуляции,  $k$  – число записанных импульсов,  $\tau$  – задержка, зависящая от условий генерации ИЛ.

В результате получаем рекуррентное уравнение, решение которого поможет проанализировать динамику изменения временного интервала в процессе хранения. Будем полагать, что в начальный момент времени все  $T_{j,j+1}$  равны некоторой исходной величине  $T_n$ .

Явный вид зависимости  $\tau$  от времени получаем из [3]:

$$\tau = \tau_{cn}(t) \ln \frac{I - I_{\sigma}}{I - I_n(t)} + \frac{U_n \tau_{\phi}}{[I - I_n(t)] \eta_n \eta_{\phi n} R_n KM}, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{сп}}$  – спонтанное время жизни носителей заряда;  $I$  – ток накачки ИЛ;  $I_0$  – величина постоянного смещения;  $I_n$  – пороговый ток ИЛ;  $U_n$  – порог срабатывания устройства регенерации;  $\tau_{\text{ф}}$  – длительность фронта импульса на выходе фотоприемника;  $\eta_{\text{л}}$ ,  $\eta_{\text{фп}}$  – квантовая эффективность ИЛ и фотоприемника;  $R_n$  – величина нагрузочного сопротивления ЛФД;  $M$  – коэффициент лавинного умножения ЛФД (для германиевых ЛФД-2А типичное значение  $M=10$ );  $K$  – коэффициент передачи излучения от ИЛ к приемной площадке ЛФД, учитывающий потери на стыковку и при распространении его по ВС:  $K = 10^{-\tau_{\text{л}}(k_1 + k_2 + k_3)}$  (здесь  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты ослабления лазерного излучения при вводе-выводе и в самом ВС,  $L$  – длина волоконного световода).

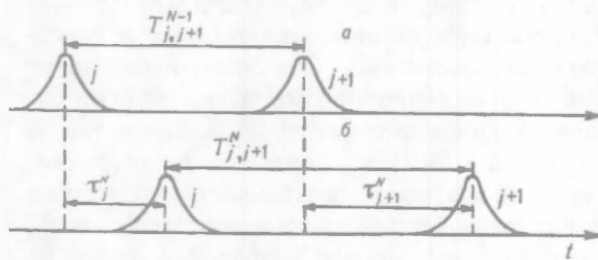


Рис. 1 Временная диаграмма изменения временного интервала между информационными импульсами в процессе хранения

В формуле (2) первое слагаемое описывает задержку стимулированного излучения ИЛ, а второе – задержку срабатывания порогового формирователя устройства регенерации. Период одного цикла рециркуляции  $T_R$  для каждого импульса определяется длиной волоконного световода  $L$ , задержкой

в электронных регенеративных и формирующих элементах  $T_0$  и величиной  $\tau$ .

В диапазоне температур 240–340К зависимости порога генерации и спонтанного времени жизни неравновесных носителей заряда в ИЛ от времени представим согласно [3]:

$$I_n(t) = I_{n0} \exp[\theta(t)/\theta_0], \quad (3)$$

$$\tau_{\text{сп}}(t) = \tau_n - k_n [\theta(t) - \theta_n], \quad (4)$$

где  $I_{n0}$ ,  $\theta_0$ ,  $k_n$  – параметры аппроксимации зависимостей  $I_n(\theta)$  и  $\tau_{\text{сп}}(\theta)$ ;  $\theta(t)$  – температура активной области ИЛ;  $\tau_n$  – спонтанное время жизни неравновесных носителей заряда при  $\theta = \theta_n$  (здесь  $\theta_n$  – значение температуры активной области в начальный момент времени). Из экспериментальных данных получаем:  $I_{n0} = 2,8$  мА,  $\theta_0 = 120$  К,  $\tau_n = 4$  нс,  $k_n = 3,6 \cdot 10^{-11}$  с/К,  $\theta_n = 293$  К.

Для решения задачи (1–4) необходимо найти зависимость изменения температуры активной области от времени путем решения уравнения теплопроводности. Расчеты проводились на основе одномерной нестационарной тепловой модели инжекционного лазера, которая не учитывает неоднородности накачки в плоскости  $p$ - $n$ -перехода. Тем не менее она позволяет достаточно точно рассчитать температурные профили в лазерном кристалле и теплоотводе при граничных условиях, близких к экспериментальным.

Нами рассматривалась двойная гетероструктура аналогичная [4] с боковым оптическим ограничением на основе GaAs/AlGaAs, с длиной волны излучения 825 им, смонтированная на теплоотводе методом пайки. В работе [4] показано, что влияние материала припоя и его толщина (1–10 мкм) на температуру активной области незначительно, поэтому данный слой в структуре ИЛ не рассматривается.

Поскольку плотность источников тепла в активной области как минимум на полтора-два порядка превышает плотность тепловых источников в

других слоях [5], распределение температуры в слоях можно описать нестационарными уравнениями теплопроводности следующего вида:

$$C_i \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} + P \quad \text{— для активной области,} \quad (5)$$

$$C_i \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} \quad \text{— для остальных слоев,}$$

где  $C_i$  — теплоемкость,  $\rho_i$  — плотность,  $k_i$  — теплопроводность слоя,  $P$  — плотность источников тепла; координата  $x$  направлена перпендикулярно слоям гетероструктуры и изменяется от нуля до  $l$ . При решении данного уравнения предполагалось, что в плоскости  $p$ - $n$ -перехода структура неограничена, параметры  $C_i$ ,  $\rho_i$  и  $k_i$  — стационарные и не зависят от координаты и температуры, а  $P$  не зависит от координат  $y$  и  $z$ . Предполагается, что источники тепла равномерно распределены в активной области кристалла. В уравнениях (5) индексы  $i$  обозначают следующие слои лазерного кристалла: 1 и 7 — теплоотводы, 2 — контактный слой, 3 и 5 — ограничивающие слои, 4 — активная область, 6 — подложка.

Уравнения (5) решались при следующих условиях:

1. Начальное условие:  $\theta_i(x, 0) = \theta_n = 293$  К.
2. Граничные условия — температура наружных поверхностей теплоотводов должна быть постоянной:  $\theta_1(0, t) = \theta_7(l, t) = \theta_n = 293$  К.

Из условия непрерывности функций  $\theta(x, t)$  и  $\frac{\partial \theta}{\partial x}(x, t)$  вытекают следующие условия сопряжения на границах слоев:

$$\theta_i(x, t) \Big|_{x=x_i-0} = \theta_{i+1}(x, t) \Big|_{x=x_i+0},$$

$$k_i \frac{\partial \theta_i}{\partial x}(x, t) \Big|_{x=x_i-0} = k_{i+1} \frac{\partial \theta_{i+1}}{\partial x}(x, t) \Big|_{x=x_i+0}.$$

Основные источники тепла в активной области лазера связаны с безызлучательной рекомбинацией и поглощением излучения. Их плотность записывается как [5]:

$$P = \frac{U}{V_L} \left\{ I_n (1 - f_s \eta_{sp}) + (I - I_n) [1 - \eta_n - (1 - \eta_i) \eta_{sp} f_s] \right\} \quad (6)$$

где  $V_L$  — объем активной области,  $U$  — падение напряжения на  $p$ - $n$ -переходе,  $\eta_{sp}$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta_i$  — внутренняя квантовая эффективность спонтанной эмиссии, внешняя дифференциальная квантовая эффективность излучения и внутренняя квантовая эффективность излучения соответственно. Коэффициент  $f_s$  описывает ту часть спонтанного излучения, которая попадает в пассивные слои лазера. Его можно оценить по формуле:

$$f_s \approx 2 \sin^2 \left[ \frac{1}{2} \arcsin \left( 1 - 0,62 \frac{\Delta x_{Al}}{n_n} \right) \right],$$

где  $n_n$  — коэффициент преломления материала активной области,  $\Delta x_{Al}$  — разница содержания Al в ограничивающем слое и активной области. Расчеты проводились при следующих значениях:  $U = 1,7$  В;  $V_L = 7,5 \cdot 10^{-16}$  м<sup>3</sup>;  $\eta_{sp} = 0,5$ ;  $\eta_n = 0,25$ ;  $\eta_i = 1$ . Коэффициент преломления материала активной области вычислялся по формуле  $n_n = 3,59 - 0,62 x_{Al}$ , где  $x_{Al}$  — доля Al в активной области.

Параметры слоев, использованные при расчетах, получены по данным работы [4] и приведены в таблице. Система уравнений (5) решалась численно с использованием стандартной процедуры метода сеток.

Параметры материалов, использованные при расчете теплового режима ИЛ

Элемент лазерной структуры	Материал	Толщина, мкм	Теплопроводность, $k$ (Вт/(мК))	Теплоемкость, $C$ (Дж/(г К))	Плотность, $\rho$ (г/см <sup>3</sup> )
Подложка	GaAs	40,0	44	0,32	5,32
Ограничивающий слой	Al <sub>0,4</sub> Ga <sub>0,6</sub> As	1,5	11	0,37	4,68
Активная область	Al <sub>0,1</sub> Ga <sub>0,9</sub> As	0,3	20	0,33	5,16
Контактный слой	Al <sub>0,6</sub> Ga <sub>0,4</sub> As	10,0	12	0,40	4,36
Теплоотвод	Cu	100,0	401	0,38	8,96

При расчетах использовались следующие параметры ВОЗУ:  $I_n=31$  мА при  $\theta_n=293$  К:  $I=1,5I_n$ ;  $I_0=0,9I_n$ ;  $\eta_{фп}=0,4$ ;  $R_H=50$  Ом;  $U_n=8$  мВ; потери в ВС на длине волны 0,82 мкм – 4,5 дБ/км, потери при стыковке с помощью соединительных муфт – 6 дБ на соединение.

Сначала рассчитывалось распределение температуры в слоях лазерного кристалла при включении постоянного смещения  $I_0$ . После этого моделировалось хранение трех временных интервалов по 40 нс каждый между импульсами длительностью 3 нс на полувысоте и фронтом 2 нс. для чего требуется ВС длиной 25 м.

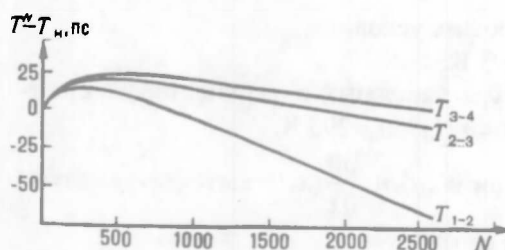


Рис.2 Зависимость изменения информационных временных интервалов от числа циркуляции

для маркировки начала информационной последовательности, а информацию записывать, начиная со второго импульса, то за время хранения 0,4 мс ( $T_R=160$  нс) величина погрешности хранения временного интервала не превысит  $3,8 \cdot 10^{-4}$ .

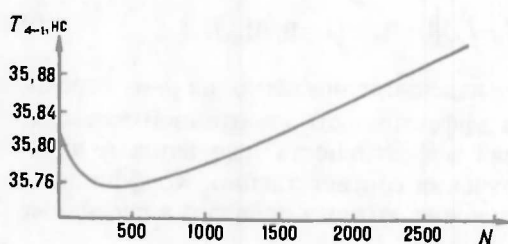


Рис.3 Зависимость величины остаточного временного интервала между последним и первым информационными импульсами от числа циркуляций

$T_{4-1} > T_n$ , то все информационные интервалы монотонно возрастают, причем по-прежнему наибольшей деформации подвергается интервал  $T_{1-2}$ . Эту особенность следует учитывать при проектировании ВОЗУ, если имеется некоторая априорная информация о параметрах, предназначенных для хранения аналоговых сигналов.

Проведенный анализ показал, что вследствие перегрева активной области ИЛ хранимые в ВОЗУ временные интервалы существенно изменяются в

На рис. 2 представлено изменение информационных временных интервалов относительно исходного периода  $T_n$  в зависимости от количества циклов рециркуляции. Из рисунка следует, что наибольшей деформации подвергается первый интервал  $T_{1-2}$  (~65 пс), в то время как последующий  $T_{2-3}$  изменяется всего на 15 пс. Если первый импульс использовать в качестве репера

Динамика изменения неинформационного остаточного интервала между последним и первым информационными импульсами  $T_{4-1}$  представлена на рис.3. Величина  $T_{4-1}$  оказывает существенное влияние на характер изменения информационных временных интервалов. Анализ показывает, что если  $T_{4-1} < T_n$ , то характер изменения информационных интервалов соответствует представленным на рис.2. Если

процессе циркуляции. Равные в начальный момент времени интервалы между импульсами в процессе хранения подвергаются различной степени деформации в зависимости от порядкового номера. Характер этих изменений определяется соотношением величин информационных и неинформационных временных интервалов, что указывает на возможность существования оптимального режима кодирования аналоговой информации. Разработанная математическая модель может использоваться при проектировании ВОЗУ для хранения аналоговой и цифровой информации.

<sup>1</sup> Whitaker N.A., Avramopoulos Jr.H., French P.M. // Opt. Lett. 1991. Vol.16. №23. P.1838.

<sup>2</sup> Heuring V.P., Jordan H.F., Pratt J.P. // Appl. Opt. 1992. Vol.31. №17. P.3213.

<sup>3</sup> Коростик К.Н., Кузьмин К.Г., Поляков А.В. // Инженерно-физический журнал. 1998. Т.71. №4. С.680.

<sup>4</sup> Безотосный В.В., Кумыков Х.Х., Марков Н.В. // Квантовая электроника. 1996. Т.23. №9. С.775.

<sup>5</sup> Nakwaski W. // Opt. and Quantum Electr. 1983. Vol.15. №4. P.313.

Поступила в редакцию 02.06.99.

УДК 621.315.592.2:546.28

*Я.И. ТОЧИЦКИЙ, В.Е. МАТЮШКОВ, А.М. РУСЕЦКИЙ, В.А. ПИЛИПЕНКО,  
В.М. ПОНОМАРЬ, О.Р. ЛЮДЧИК*

### **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ (БТО) В ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СБИС**

A modern RTP system is an automated device with a cassette-assisted loading and unloading, design modifications of which are adapted for the specific thermal processing (annealing, oxidizing, etc).

При создании интегральных микросхем с субмикронными топологическими нормами все большее значение приобретает снижение тепловой нагрузки, оказываемой в этом случае на полупроводниковую пластину. Это приводит к необходимости разработки новых технологических процессов, использующих либо более низкие температуры, либо сокращение времени проведения диффузионных процессов, имеющих место при высокотемпературных обработках. Решение данного вопроса позволяет уменьшить перераспределение введенной при ионном легировании примеси, величину переходного слоя эпитаксиальная пленка – скрытый  $n^+$ -слой, глубину проникновения алюминия в кремний и практически исключить загрязнение полупроводникового материала неконтролируемыми примесями [1]. На основании приведенной классификации видов термообработки и областей ее применения показано, что одним из возможных путей реализации такого подхода является использование для нагрева световых импульсов различной длительности. При этом наиболее широкое применение при создании СБИС нашли методы обработки, использующие некогерентное световое излучение секундной длительности с использованием галогенных ламп [2, 3]. Возрастание применения процессов БТО в технологии изготовления ИС обусловило появление множества конструкций установок БТО, разработанных различными фирмами США, Японии и других стран.

Большинство установок представляют собой автономные устройства, предназначенные для выполнения конкретной технологической термической операции, связанные с другим технологическим оборудованием транспортными кассетами, например установки Heatpulse фирмы AG Associates (USA) (рис.1 [4]) и Omega 308 фирмы Moore Technologies (USA) (рис.2 [5]).

