

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Белорусского государственного университета



А.Д. Толстик

(подпись)

27.06.2017

(дата утверждения)

Регистрационный № УД- 4146 /уч.

**БЫСТРЫЕ ТЕРМООБРАБОТКИ В ТЕХНОЛОГИИ
СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Учебная программа учреждения высшего образования

по учебной дисциплине для специальности

1-31 04 01 Физика (по направлениям)

направления специальности

1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность)

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 01-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88; учебных планов №G31-163/уч. и № G31и-174/уч.

СОСТАВИТЕЛЬ:

В.А. Пилипенко — профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники
физического факультета Белорусского государственного университета
(протокол № 12 от 24 мая 2017);

Советом физического факультета БГУ
(протокол № 9 от 25 мая 2017 г.).

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа «Быстрые термообработки в технологии субмикронных интегральных микросхем» разработана для специализации 1-31 04 01-01 06 Физика полупроводников и диэлектриков.

Цель учебной дисциплины – дать количественные и качественные оценки процессов в современной технологии при создании субмикронных изделий микроэлектроники, в которой основным инструментом нагрева полупроводниковых структур являются быстрые термообработки (БТО).

Основные задачи учебной дисциплины – дать представление о физических процессах, протекающих в полупроводниковом материале и обеспечивающих его нагрев до требуемых температур при использовании лазерного и некогерентного светового излучения секундной длительности.

При создании СБИС с субмикронными топологическими нормами все большее значение приобретает снижение тепловой нагрузки оказываемой на полупроводниковую пластину в процессе формирования на ней интегральных микросхем. Это приводит к необходимости разработки новых технологических процессов, использующих либо более низкие температуры, либо более короткие времена их проведения. Такая тенденция обусловлена необходимостью значительного уменьшения 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. Одним из возможных путей реализации такого подхода является использование для целей нагрева световых импульсов различной длительности. При этом наиболее широкое применение при создании СБИС нашли методы обработки, использующие применение лазерного и некогерентного светового излучения секундной длительности. Использование такого подхода требует знания физических процессов протекающих в полупроводниковом материале и обеспечивающих его нагрев до требуемых температур. Для широкого применения таких подходов в реальном секторе экономики, а именно, в микроэлектронике, требуется подготовка специалистов с учетом современных достижений в данной области.

В первых трех лекциях рассматриваются вопросы, связанные с нагревом полупроводниковых структур при БТО, а именно, расчет температурных полей как по толщине, так и по площади пластины, а также определение критериев выбора режима обработки, обеспечивающих отсутствие высоких термических напряжений в полупроводниковом материале подложки. Это обусловлено необходимостью понимания использования тех или иных режимов обработки, которые и будут использованы при дальнейшем рассмотрении технологических процессов основанных на применении БТО

В следующих лекциях детально рассмотрено применение БТО в технологии СБИС, а именно, для формирования активных и пассивных

элементов СБИС, а также создания многоуровневой металлизации. Показана возможность применения такой обработки для геттерирования, отжига ионнолегированных слоев в монокристаллическом кремнии, формирования омических контактов металл–полупроводник, термостабилизации пленок алюминия, планаризации поверхности легкоплавких стекол перед напылением металла, формирования дисилицида титана.

Учебная программа «Быстрые термообработки в технологии субмикронных интегральных микросхем» относится к циклу специальных дисциплин (государственный компонент) и взаимодействует с дисциплиной «Физика и технология полупроводниковых приборов», «Генерационно-рекомбинационные процессы в полупроводниках».

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

– физико-химические процессы, протекающие в полупроводниковом материале при использовании лазерного и некогерентного светового излучения секундной длительности.

– принципы современных технологий при создании субмикронных изделий микроэлектроники;

уметь:

– анализировать и определять критерии выбора режима обработки, обеспечивающих отсутствие высоких термических напряжений в полупроводниковом материале подложки при создании субмикронных изделий микроэлектроники;

владеть:

– навыками использования тех или иных режимов обработки, которые будут использованы в технологических процессах, основанных на применении БТО.

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Академические компетенции:

1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

2. Владеть системным и сравнительным анализом.

3. Владеть исследовательскими навыками.

4. Уметь работать самостоятельно.

5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью).

6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.

9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

Социально-личностные компетенции:

1. Быть способным к социальному взаимодействию.

2. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.
3. Быть способным к критике и самокритике.
4. Уметь работать в команде.

Профессиональные компетенции:

1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики, современных технологий и материалов, методы исследования физических объектов, методы измерения физических величин, методы автоматизации эксперимента.

2. Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов, научное оборудование и аппаратуру.

3. Проводить планирование и реализацию физического эксперимента, оценивать функциональные возможности сложного физического оборудования.

4. Пользоваться глобальными информационными ресурсами, компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.

5. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

6. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-исследовательской, научно-производственной и научно-педагогической работы.

7. Применять знания физических основ современных технологий, средств автоматизации, методов планирования и организации производства, правового обеспечения хозяйственной деятельности и налоговой системы, современного предпринимательства, государственного регулирования экономики и экономической политики.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины — 54 (1,5 зачетные единицы), из них количество аудиторных часов — 32.

Форма получения высшего образования — очная, дневная.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и управляемой самостоятельной работы. На проведение лекционных занятий отводится 30 часов, на аудиторный контроль управляемой самостоятельной работы — 2 часа.

Занятия проводятся на 4-м курсе в 8-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — зачет.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. Высокотемпературные обработки в технологии интегральных микросхем

Рассмотрены основные длительные высокотемпературные процессы, создания интегральных микросхем, а именно, создание маскирующих слоев, выращивание эпитаксиальных пленок, отжиг ионнолегированных слоев, формирование силицидов тугоплавких металлов, омических контактов алюминий-кремний, алюминий-алюминий. Приведены примеры отрицательных явлений сопровождающих данные процессы и пути уменьшения отрицательного воздействия длительных высокотемпературных воздействий на поверхностные слои и пленки полупроводников, диэлектриков и металлизацию. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 6-10, 106-119, 182-185, 240-252, 290-296, 342-358).

2. Нагрев кремниевых пластин импульсами света различной длительности

На основе анализа возможных путей нагрева кремниевых структур показывается, что наиболее перспективным является нагрев в импульсных режимах, сокращающих время термообработки. Рассмотрены различные режимы быстрой термообработки (БТО) и показано, что наиболее перспективным является адиабатический режим и режим теплового потока. Представлены механизмы нагрева кремниевых структур в указанных выше режимах обработки. Приведены основные ограничения по применению лазерного излучения для обработки кремниевых структур в технологии СБИС. Рассматривается нагрев кремниевых пластин импульсами миллисекундной и секундной длительностей импульсов. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 10-38).

3. Влияние быстрой термообработки на поверхностные и объемные свойства кремния

Рассмотрены основные явления, связанные с БТО кремниевых структур, а именно, деформационные явления в кремнии, изменения его кристаллической структуры и окисления поверхности кремния. Показаны механизмы возникновения термических напряжений в кремнии при БТО и пути их минимизации. Рассмотрено изменение кристаллической структуры кремниевых пластин после БТО и представлены механизмы таких изменений при обработке импульсами различной длительности, особое внимание уделено лазерной обработке импульсами наносекундной длительности. Описано ускоренное окисления кремния при БТО и даны механизмы его протекания. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 38-65).

4. Влияние лазерного геттерирования на структурные и электрические параметры эпитаксиальных слоев кремния

Рассмотрено влияние лазерного геттерирования на захват быстродиффундирующей примеси на примере Си. Приведены особенности формирования геттерирующего слоя с применением непрерывного лазерного излучения. Рассмотрена эффективность применения этого метода на примере изменения дефектности эпитаксиальных пленок, а именно, плотности дефектов упаковки и дислокаций, а также времени жизни неосновных носителей заряда и рекомбинационное время. Показано, влияние такого геттерирования на плотность поверхностных состояний на границе раздела кремний-термическая двуокись кремния. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 90-97).

5. Модель лазерного геттерирования быстродиффундирующих примесей

Представлен механизм геттерирования слоем, сформированным с применением непрерывного лазерного излучения. На основе диффузионных уравнений Фика описано изменение концентрации быстродиффундирующих примесей в объеме пластины за счет их стока в геттерирующий слой. Определен «критерий геттерирования» от времени и обратной температуры высокотемпературной обработки. Приведен расчет предельной концентрации таких примесей, которые могут быть захвачены этим слоем. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 97-103).

6. Электронный и лазерный отжиг ионнолегированных слоев кремния

Рассмотрен отжиг ионнолегированных слоев с применением электронного и лазерного излучений с применением излучения наносекундных длительностей импульсов, а также непрерывного лазерного излучения. Показаны преимущества и недостатки данных видов обработки ионнолегированных слоев в процессе создания СБИС и определена область применения лазерного отжига наносекундными длительностями импульса в технологическом процессе создания интегральных микросхем. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 112-119).

7. Отжиг ионнолегированных слоев в режиме теплового баланса некогерентным излучением

Рассмотрены вопросы рекристаллизации и структурного совершенства ионнолегированных слоев после их нагрева фотонным потоком в режиме теплового баланса. Приведены распределения концентрации различных примесей по глубине ионнолегированного слоя с рассмотрением особенностей ее перераспределения в процессе нагрева. Дано сопоставление профилей легирования примесей, полученных экспериментальным и расчетным путями, а

также степени ее электрической активации и подвижности носителей заряда по глубине ионнолегированного слоя от режима БТО, которые показали высокую эффективность такого вида отжига. Важным моментом такого отжига является возможность формирования р-n переходов с малыми токами утечки и требуемой глубины залегания. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 130-146, 152-165).

8. Влияние БТО на структуру и электрические свойства диэлектрических пленок и границу раздела диэлектрик-полупроводник

Показано влияние БТО на структуру диэлектрических слоев, полученных при низких температурах, обусловленное уплотнением объема двуоксида кремния, снижения его пористости, уменьшения напряжений и заполнения связи Si-O. Это означает, что такая обработка является эффективным средством отжига радиационных центров и объемных зарядов в диэлектрических слоях. Такая обработка также приводит к значительному уменьшению токов утечки, плотности зарядов на границе раздела диэлектрик-кремний, плотности быстрых поверхностных состояний и порогового напряжения. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 217-235).

9. Методы планаризации полупроводниковых структур

Дана классификация существующих методов планаризации рельефа поверхности полупроводниковых структур в технологии СБИС. Приведены преимущества и недостатки данных методов. Показано, что наиболее распространенным методом частичной планаризации рельефа поверхности перед напылением первого уровня металла является оплавления легкоплавких стекол. Рассмотрен механизм оплавления и его аналитическое описание при использовании длительной термической обработки. Приведены недостатки присущие традиционному методу оплавления, что привело к применению альтернативных методов оплавления, а именно, применению для этих целей БТО. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 240-252).

10. Оплавление легкоплавких стекол с применением БТО

Приведено описание процесса оплавления легкоплавких стекол фосфоросиликатного (ФСС) и борофосфоросиликатного (БФСС) с применением фотонной обработки импульсами секундных длительностей импульса. Показана зависимость угла планаризации ступеньки ФСС и БФСС от температуры БТО при различных скоростях ее набора и установлено ускоренное протекание данного процесса по сравнению с традиционной длительной термической обработкой. Дано объяснение данных явлений основанное на отклонении системы от равновесного состояния при высоких скоростях нагрева, а следовательно на преобладании разрыва связей над их

восстановлением. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 263-267).

11. Модель процесса оплавления легкоплавких стекол

Описан механизм оплавления ФСС и БФСС при длительной и быстрой термической обработках и дано их математическое описание, основанное на аналитическом решении задачи о вязком течении стекла при нагреве. Приведено выражение, описывающее зависимость угла оплавления от режимов отжига и учитывающее зависимость температуры размягчения стекла от концентрации легирующих примесей и энергии активации от температуры, позволивших адекватно описать влияние температурно-временных режимов на конечный угол оплавления ФСС и БФСС. Показано хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными зависимости угла планаризации ступеньки БФСС и ФСС от температуры и времени его проведения при различных концентрациях бора и фосфора. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 252-263).

12. Применение силицидов в технологии субмикронных СБИС

Даны основные области применения силицидов тугоплавких металлов в технологии СБИС. Показаны их преимущества и недостатки, связанные с образованием неомических контактов, возникновением высоких термических напряжений, усложнением технологии, снижением выхода годных ИС из-за увеличения числа технологических процессов. Применение силицидов тугоплавких металлов в качестве самосовмещенных контактов и для силидизации затворов и межсоединений на основе поликристаллического кремния позволяет значительно уменьшить недостатки многоуровневой алюминиевой металлизации и открывает возможность применения сплавов алюминия для субмикронной технологии создания СБИС. Наиболее приемлемым силицидом для этих целей является дисилицид титана. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 290-265).

13. Методы получения силицидов

На основании приведенной классификации методов получения силицидов показано, что наиболее приемлемым является метод диффузионного синтеза слоев силицидов, происходящий за счет диффузионного перемешивания кремниевой подложки с пленкой металла при их двухстадийной термообработке. Применение длительной термообработки для формирования силицидов тугоплавких металлов сопровождается нежелательными диффузионными процессами в уже сформированных слоях, образованием и ростом структурных нарушений, термических напряжений, загрязнением быстродиффундирующей примесью, имеющейся в наносимом слое металла формируемого силицида. Показано, что применение для этих целей БТО в режиме теплового баланса значительно уменьшает данные недостатки.

Обосновывается режим БТО для получения дисилицида титана. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 296-305).

14. Свойства дисилицида титана, сформированного методом быстрой термообработки

Приведены особенности формирования дисилицида титана при БТО, заключающиеся в том, что при температурах БТО ниже 720 °С, когда в основном образуется фаза силицида титана, обогащенная металлом, и основную роль в удельном сопротивлении играют d-электроны металла, формируемый силицид имеет более высокое удельное сопротивление. При температуре 720 °С и выше происходит формирование силицида титана, обогащенного кремнием, у которого основную роль в удельном сопротивлении играют s- и p-электроны кремния, что обуславливает минимальное значение его удельного сопротивления. При этом микротвердость силицида титана, формируемого с применением БТО, уменьшается с увеличением температуры обработки (до 720 °С) из-за протекания в нем фазовых переходов и остается постоянной при дальнейшем увеличении температуры из-за завершения формирования конечной фазы дисилицида титана с гранецентрированной структурой. Меньшее значение его микротвердости обусловлено более совершенной структурой и низкой дефектностью данных пленок по сравнению с пленками, полученными с применением длительной термообработки. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 306-327).

15. Методы улучшения свойств алюминиевой металлизации

Рассмотрены различные методы, уменьшающие такие недостатки алюминиевой металлизации как образование аномально высоких бугров на поверхности пленки за счет термических напряжений и высокое растворение кремния в алюминии. Показано, что одним из возможных путей является применение БТО, что позволяет формировать равновесную структуру в пленках алюминия, значительно снижая рост бугров на ее поверхности и уменьшая взаимодействие кремния с алюминием. Приведены структурные и электрические особенности алюминиевой металлизации, а также процессов диффузии на границе раздела алюминий-кремний при формировании алюминиевой металлизации с применением БТО. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 345-358).

16. Повышение термостабильности пленок алюминия с применением БТО

Показано, что БТО пленок алюминия, легированного кремнием, после их напыления со стороны противоположной расположению пленки, вызывает в ней процесс уравнивания сил поверхностного натяжения, обеспечивающий равномерный рост зерен, спрямление межзеренных границ,

повышенную устойчивость структуры к последующим термическим воздействиям. Такая обработка не вызывает перераспределения кремния в пленке алюминия и значительно уменьшает процесс образования островков эпитаксиально рекристаллизованного кремния на границе раздела алюминий–кремний, а в случае контакта алюминия с двуокисью кремния не приводит к выделению кремния на поверхности диэлектрической пленки в отличие от обработки после формирования рисунка межсоединений. Это позволяет минимизировать поверхностное сопротивление пленки алюминия за счет исключения выделения кремния на границах зерен, уменьшить контактные сопротивления алюминия к активным и пассивным элементам ИМС из-за значительного снижения выделения кремния, легированного алюминием, на границе раздела алюминий-кремний. (В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 358-370).

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Введение. Цели и задачи учебной дисциплины «Быстрые термообработки в технологии субмикронных интегральных микросхем» и связь ее с другими специальными дисциплинами. Высокотемпературные обработки в технологии интегральных микросхем. Рассмотрены основные длительные высокотемпературные процессы, создания интегральных микросхем, а именно, создание маскирующих слоев, выращивание эпитаксиальных пленок, отжиг ионнолегированных слоев, формирование силицидов тугоплавких металлов, омических контактов алюминий-кремний, алюминий-алюминий	2						[1], С. 6-10, 106-119, 182-185, 240-252, 290-296, 342-358.	Устный опрос
2	Нагрев кремниевых пластин импульсами света различной длительности. Различные режимы быстрой термообработки (БТО): адиабатический режим и режим теплового потока. Механизмы нагрева кремниевых структур в указанных выше режимах обработки. Основные ограничения по применению лазерного излучения для обработки кремниевых структур в технологии	2						[1], С. 10-38 [1-4],	Устный опрос

	СБИС. Нагрев кремниевых пластин импульсами миллисекундной и секундной длительностей импульсов.								
3	Влияние быстрой термообработки на поверхностные и объемные свойства кремния. Основные явления, связанные с БТО кремниевых структур, а именно, деформационные явления в кремнии, изменения его кристаллической структуры и окисления поверхности кремния. Механизмы возникновения термических напряжений в кремнии при БТО и пути их минимизации. Изменение кристаллической структуры кремниевых пластин после БТО и механизмы таких изменений при обработке импульсами различной длительности, особое внимание уделено лазерной обработке импульсами наносекундной длительности. Ускоренное окисления кремния при БТО и механизмы его протекания	2						[1], . С. 38-65 [1-4],	Устный опрос
4	Влияние лазерного геттерирования на захват быстродиффундирующей примеси на примере Си. Особенности формирования геттерирующего слоя с применением непрерывного лазерного излучения. Эффективность применения этого метода на примере изменения дефектности эпитаксиальных пленок, а именно, плотности дефектов упаковки и дислокаций, а также времени жизни неосновных носителей заряда и рекомбинационное время. Влияние геттерирования на плотность поверхностных состояний на границе раздела кремний-термическая двуокись кремния.	2						[1], . С. 90-97 [1-4],	Устный опрос
5	Модель лазерного геттерирования быстродиффундирующих примесей. Механизм геттерирования слоев, сформированным с применением непрерывного лазерного излучения. Диффузионные уравнения Фика, описывающие изменение концентрации быстродиффундирующих примесей в объеме пластины за счет их стока в геттерирующий слой. «Критерий	2						[1], С. 97-103	Устный опрос

	геттерирования» от времени и обратной температуры высокотемпературной обработки. Расчет предельной концентрации таких примесей, которые могут быть захвачены этим слоем.								
6	Электронный и лазерный отжиг ионнолегированных слоев кремния. Отжиг ионнолегированных слоев с применением электронного и лазерного излучений с применением излучения наносекундных длительностей импульсов, а также непрерывного лазерного излучения. Преимущества и недостатки данных видов обработки ионнолегированных слоев в процессе создания СБИС и область применения лазерного отжига наносекундными длительностями импульса в технологическом процессе создания интегральных микросхем.	2						[1] С. 112-119 [1-4],	Устный опрос
7	Отжиг ионнолегированных слоев в режиме теплового баланса некогерентным излучением. Вопросы рекристаллизации и структурного совершенства ионнолегированных слоев после их нагрева фотонным потоком в режиме теплового баланса. Приведены распределения концентрации различных примесей по глубине ионнолегированного слоя с рассмотрением особенностей ее перераспределения в процессе нагрева. Сопоставление профилей легирования примесей, полученных экспериментальным и расчетным путями, а также степени ее электрической активации и подвижности носителей заряда по глубине ионнолегированного слоя от режима БТО, которые показали высокую эффективность такого вида отжига. Возможность формирования р-п переходов с малыми токами утечки и требуемой глубины залегания.	2						[1], С. 130-146, 152-165	Устный опрос
8	Влияние БТО на структуру и электрические свойства диэлектрических пленок и границу раздела диэлектрик-полупроводник. Влияние БТО на структуру диэлектрических слоев, полученных при низких температурах, обусловленное уплотнением объема двуокиси кремния, снижения его	2						[1], С. 217-235	Устный опрос

	пористости, уменьшения напряжений и заполнения связи Si-O. Эффективное средство отжига радиационных центров и объемных зарядов в диэлектрических слоях. Уменьшение токов утечки, плотности зарядов на границе раздела диэлектрик-кремний, плотности быстрых поверхностных состояний и порогового напряжения.								
9	Методы планаризации полупроводниковых структур. Классификация существующих методов планаризации рельефа поверхности полупроводниковых структур в технологии СБИС. Преимущества и недостатка данных методов. Показано, что наиболее распространенным методом частичной планаризации рельефа поверхности перед напылением первого уровня металла является оплавления легкоплавких стекол. Механизм оплавления и его аналитическое описание при использовании длительной термической обработки. Недостатки присущие традиционному методу оплавления, что привело к применению альтернативных методов оплавления, а именно, применению для этих целей БТО.						2	[], С. 240-252 [1-4],	Защита реферативны х работ
10	Оплавление легкоплавких стекол с применением БТО. Описание процесса оплавления легкоплавких стекол фосфоросиликатного (ФСС) и борофосфоросиликатного стекол (БФСС) с применением фотонной обработки импульсами секундных длительностей импульса. Показана зависимость угла планаризации ступеньки ФСС и БФСС от температуры БТО при различных скоростях ее набора и установлено ускоренное протекание данного процесса по сравнению с традиционной длительной термической обработкой. Объяснение данных явлений, основанное на отклонении системы от равновесного состояния при высоких скоростях нагрева, а следовательно на преобладании разрыва связей над их восстановлением.	2						[], С. 263-267 [1-4],	Устный опрос
11	Модель процесса оплавления легкоплавких стекол. Механизм	2						[1],	Устный

	оплавления ФСС и БФСС при длительной и быстрой термической обработке. Математическое описание, основанное на аналитическом решении задачи о вязком течении стекла при нагреве. Выражение, описывающее зависимость угла оплавления от режимов отжига и учитывающее зависимость температуры размягчения стекла от концентрации легирующих примесей и энергии активации от температуры, позволивших адекватно описать влияние температурно-временных режимов на конечный угол оплавления ФСС и БФСС. Соответствие между расчетными и экспериментальными зависимостями угла планаризации ступеньки БФСС и ФСС от температуры и времени его проведения при различных концентрациях бора и фосфора.							С. 252-263 [1-4],	опрос
12	Области применения силицидов тугоплавких металлов в технологии СБИС. Преимущества и недостатки, связанные с образованием неомических контактов, возникновением высоких термических напряжений, усложнением технологии, снижением выхода годных ИС из-за увеличения числа технологических процессов. Применение силицидов тугоплавких металлов в качестве самосовмещенных контактов и для силидизации затворов и межсоединений на основе поликристаллического кремния. Недостатки многоуровневой алюминиевой металлизации и возможности применения сплавов алюминия для субмикронной технологии создания СБИС. Наиболее приемлемым силицидом для этих целей является дисилицид титана.	2						[1], С. 290-265 [1-4],	Устный опрос
13	Методы получения силицидов. Классификации методов получения силицидов показано, что наиболее приемлемым является метод диффузионного синтеза слоев силицидов, происходящий за счет диффузионного перемешивания кремниевой подложки с пленкой металла при их двухстадийной термообработке. Применение длительной	2						[1], С. 296-305 [1-4],	Устный опрос

	термообработки для формирования силицидов тугоплавких металлов сопровождается нежелательными диффузионными процессами в уже сформированных слоях, образованием и ростом структурных нарушений, термических напряжений, загрязнением быстродиффундирующей примесью, имеющейся в наносимом слое металла формируемого силицида. Показано, что применение для этих целей БТО в режиме теплового баланса значительно уменьшает данные недостатки. Обосновывается режим БТО для получения дисилицида титана.							
14	Особенности формирования дисилицида титана при БТО, образование фазы силицида титана, обогащенной металлом. Роль в удельном сопротивлении формируемого силицида титана d-электронов металла. Формирование силицида титана, обогащенного кремнием, у которого основную роль в удельном сопротивлении играют s- и p-электроны кремния. Микротвердость силицида титана, формируемого с применением БТО. Завершение формирования конечной фазы дисилицида титана с гранецентрированной структурой. Более совершенная структура и низкая дефектность данных пленок по сравнению с пленками, полученными с применением длительной термообработки.	2						[1], С. 306-327 [1-4], Устный опрос
15	Методы улучшения свойств алюминиевой металлизации. Различные методы, уменьшающие такие недостатки алюминиевой металлизации как образование аномально высоких бугров на поверхности пленки за счет термических напряжений и высокое растворение кремния в алюминии. Применение БТО для формирования равновесной структуры в пленках алюминия. Значительное снижение роста бугров на ее поверхности и уменьшение взаимодействия кремния с алюминием. Структурные и электрические особенности алюминиевой металлизации, а также процессов диффузии на	2						[1], С. 345-358 [1-4], Устный опрос

	границе раздела алюминий-кремний при формировании алюминиевой металлизации с применением БТО.								
16	Повышение термостабильности пленок алюминия с применением БТО. Процесс уравнивания сил поверхностного натяжения, обеспечивающий равномерный рост зерен, спрямление межзеренных границ, повышенная устойчивость структуры к последующим термическим воздействиям. Уменьшение процесса образования островков эпитаксиально рекристаллизованного кремния на границе раздела алюминий–кремний, а в случае контакта алюминия с двуокисью кремния отсутствие выделения кремния на поверхности диэлектрической пленки в отличие от обработки после формирования рисунка межсоединений. Минимизирование поверхностного сопротивления пленки алюминия за счет исключения выделения кремния на границах зерен. Уменьшение контактного сопротивления алюминия к активным и пассивным элементам ИМС из-за значительного снижения выделения кремния, легированного алюминием, на границе раздела алюминий-кремний.	2						[1], С. 358-370 [1-4],	Устный опрос
ОБЩЕЕ ЧИСЛО ЧАСОВ		30					2		
Текущая аттестация									Зачет

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной и дополнительной литературы

Основная

1. В.А.Пилипенко. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск. Издательский центр БГУ, 2004. С. 380

Дополнительная

1. Пилипенко В.А., Наливайко О.Ю., Солодуха В.А. и др. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. Минск, «Интегралполиграф», т. 1, 2013, 704 с.
2. Пилипенко В.А., Наливайко О.Ю., Солодуха В.А. и др. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. Минск, «Интегралполиграф», т. 2, 2013, 736 с.
3. Пилипенко В.А., Наливайко О.Ю., Солодуха В.А. и др. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. Минск, «Интегралполиграф», т. 3, 2013, 784 с.
4. У.Тилл, Дж.Лаксон. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление. — М.:Мир, 1985.

Примерные перечни заданий управляемой самостоятельной работы

Примерная тематика реферативных работ

1. Внутреннее геттерирование быстро difundирующих примесей в технологии СБИС
2. Установки быстрой термической обработки
3. Параметры элементной базы биполярных СБИС, полученных с применением быстрой термообработки
4. Формирование подзатворных диэлектриков субмикронных МОПТ
5. Физические ограничения вертикального масштабирования биполярных микросхем

Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности

1. Защита реферативных работ.
2. Устные опросы.

Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать защиту реферативных работ, устные опросы. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с

преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждое из устных опросов и оценки за написание реферата.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме зачета.

Оценка текущей успеваемости служит для определения допуска студентов к зачету. В случае получения неудовлетворительной (ниже 4 баллов) оценки при текущем контроле качества усвоения знаний по дисциплине обучающийся не допускается к зачету.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Физика и технология полупроводниковых приборов	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № <u>12</u> от <u>24.05.2017</u> г.
Генерационно-рекомбинационные процессы в полупроводниках	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № <u>12</u> от <u>24.05.2017</u> г.

[illegible]

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и наноэлектроники
д.ф.-м.н., профессор

В.Б. Оджаев

Декан физического факультета
д.ф.-м.н., профессор

В.М. АНИЩИК