

2. Богатиков О. А., Гурбанов А. Г., Кошуг Д. Г., Газеев В. М., Шабалин Р. В. ЭПР датирование по породообразующему кварцу извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия) // ДАН.– 2002.– Т. 385.–№1.–С. 92–96.
3. Лосев, Б. И. Парамагнитный резонанс в ископаемых углях / Б.И. Лосев, Э.А. Былина // Докл. АН СССР. 1959. Т. 125, № 4. С. 814–816.
4. Stelmakh, V. Oxygen influence on EPR spectra of carbon materials / V. Stelmakh [et. all] // Polish Journal of applied chemistry. 2000. XLIV, N 4. P. 227–234.
5. Adashkevich, S. Role of coal structure in gas-dynamic phenomena / S. Adashkevich [et. all] // Polish Journal of applied chemistry. 2000. XLIV, N 2–3. P. 139–144.
6. Кучеренко, В. А. О некоторых особенностях изменения содержания карбонильных групп в процессе метаморфизма / В.А. Кучеренко [и др.] // Химия твердого топлива. 1983. № 1. С. 9–12.
7. <http://www.medinnovation.de>
8. Международный патент № PCT/EP2001/002248.

## ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В СПЕЦПРАКТИКУМЕ ПО ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

**О. Р. Людчик, В. А. Зайков, В. Н. Михей, Е. В. Вишневская**

*Белорусский государственный университет, [lyudchik@bsu.by](mailto:lyudchik@bsu.by); [lyudchik@tut.by](mailto:lyudchik@tut.by)*

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерные методы обработки материалов активно используются в электронике, нанотехнологиях, диагностике материалов. Лазерный отжиг, нанесение покрытий с уникальными свойствами, лазерная маркировка, формирование объемных изображений внутри прозрачных материалов – вот далеко не полный перечень задач, успешно решаемых сегодня с помощью автоматизированного лазерно-технологического оборудования [1–3].

У всех полупроводников существует широкая спектральная область интенсивного поглощения, ограниченная со стороны длинных волн резким краем. Для полупроводников основными видами поглощения лазерного излучения являются [4]:

- фундаментальное поглощение света, которое приводит к переходу электрона из валентной зоны в зону проводимости, когда  $h\nu \geq E_g$ , где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника, а  $\nu$  – частота лазерного излучения;
- примесное поглощение, вызванное переходом электронов от атома примеси в зону проводимости, или из валентной зоны на уровни примеси;
- поглощение свободными носителями заряда, обусловленное движением под действием электрических полей световой волны;
- поглощение фононами, когда волна вступает во взаимодействие с колебаниями решетки, изменяя при этом число фотонов;
- экситонное поглощение, которое происходит с образованием связанной пары электрон-дырка.

Сложность применения лазерного излучения в технологии связана с его прецизионностью. Для достижения максимально положительного результата необходимо

учитывать нелинейные параметры коэффициентов поглощения, отражения и пропускания излучения веществом, которые нелинейно изменяются с ростом температуры лазерной обработки [5]. От температуры нелинейно изменяются также теплофизические характеристики обрабатываемого материала.

В настоящее время на кафедре физической электроники и нанотехнологий БГУ в специальном практикуме по лазерной обработке материалов апробируется лабораторный лазерный комплекс на основе импульсно-периодического твердотельного АИГ Nd<sup>3+</sup> лазера с диодной накачкой, разработанный белорусской фирмой «LOTIS-ТII». В данной работе представлены учебные материалы по теме: «Изучение взаимодействия импульсного лазерного излучения с полупроводниковыми материалами и структурами», разработанные для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ. В учебных заданиях рассмотрены технологические процессы лазерной обработки полупроводниковых подложек, включая операции лазерного отжига легированных Si подложек, процессы рекристаллизации аморфных и поликристаллических кремниевых слоев, нанесенных на Si подложку, а также лазерную обработку окисленных кремниевых структур (SiO<sub>2</sub>/Si).

### **ОБЗОР УЧЕБНЫХ ЗАДАНИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Научно-учебный лазерный комплекс включает в себя лазер с диодной накачкой, систему фокусировки и сканирования лазерного излучения, систему перемещения образцов, компьютер управления с установленным специальным программным обеспечением, а также современные системы регистрации характеристик генерации.

Лазерный комплекс имеет следующие основные характеристики: длина волны генерируемого лазерного излучения: 1,064 мкм, 0,532 мкм, 0,355 мкм, 0,266 мкм; частота повторения импульсов до 200 Гц; длительность импульса до 20 нс; энергия импульса излучения до 25 мДж; минимальный диаметр области фокусировки 50 мкм; размер области обработки: 150x150x100 мм. Основные характеристики лазера и оптической части комплекса: расходимость лазерного пучка менее 1 мрад; генерация в режимах моноимпульса и свободной генерации; фокусирующая линза не более 90 мм; автоматизированная система перемещения лазерного луча в плоскости XY. Механическая часть содержит следующие узлы: автоматизированная и ручная система перемещения образцов в плоскости XY; автоматизированная установка фокусирующей линзы по координате Z; оснастка для крепления образца; закрытая стойка, исключаяющая выход лазерного излучения наружу.

С помощью программного модуля осуществляются следующие операции: установка режимов работы лазера и механики, таких как энергия генерации лазера, частота импульсов, установка скорости перемещения координатного стола; загрузка изображения площадки облучения поверхности подложки; задание режима сканирования лазерного пучка; отображения на экране текущего цикла обработки.

В процессе отработки базовых режимов облучения нами был выбран метод облучения в сходящихся лучах (дефокусировка). При этом обеспечивались и более равномерное распределение и более плавная регулировка плотности энергии в зоне облучения. При выполнении учебных задач используются пластины *n*-типа КЭФ 4.5, ориентацией (100), пластины *p*-типа КДБ-10 ориентацией (111), а также эти же пла-

стины с термически выращенным окислом толщиной 150 нм. Для исследования результатов облучения образцов применяются следующие приборы: оптический микроскоп, четырехзондовая установка измерения удельных сопротивлений ИУС-3 и система спектрофотометрического контроля, с помощью которой получают спектры отражения до и после лазерной обработки.

Задания, предлагаемые по теме «Взаимодействие лазерного излучения с полупроводниковыми материалами» для студентов и магистрантов, выполняющих учебную программу спецпрактикума по лазерной обработке материалов:

1. Изучение работы лазерного комплекса и определение пороговой энергии начала плавления кремния для длин волн 1,064 мкм и 0,532 мкм.

2. Изучение технологического процесса отжига легированных полупроводниковых структур на кремнии с ориентацией (100) и (111).

3. Изучение процесса рекристаллизации поликристаллических (ПКК) или аморфных слоев кремния на пластинах кремния с ориентацией (100) при энергиях лазерных импульсов выше пороговых.

4. Изучение технологического процесса отжига окисленных кремниевых структур ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) в режимах без разрушения окисленного слоя.

5. Изучение влияния режимов отжига и режимов лазерной рекристаллизации на электрофизические свойства кремниевых структур.

6. Изучение с помощью оптического микроскопа микрорельефа поверхности облученных образцов.

Лазер относится к 4 классу опасности в соответствии с ГОСТ Р 50723-94, СанПиН 5804-91, поэтому основные операции на установке выполняются преподавателем или инженером, прошедшим спецподготовку и допущенным к работе с лазерным оборудованием 4 класса опасности. Среди требований, предъявляемых к учебной группе, можно отметить наличие специальной одежды, а также специальных очков, не пропускающих лазерное излучение.

Плотность энергии при лазерной обработке легированных полупроводниковых структур на кремнии, слоев ПКК и аморфного кремния, а также  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  структур находилась в диапазоне от 0,3 до 2,2 Дж/см<sup>2</sup>. Диаметр дефокусированного лазерного пучка варьировался от 0,8 до 2,0 мм.

Лазерная обработка на длине волны 1,064 мкм с плотностью энергии до 0,5 Дж/см<sup>2</sup> не приводит к видимому разрушению кремния, слоев ПКК и аморфного кремния. При плотности энергии 1,0 Дж/см<sup>2</sup> для аморфного кремния в оптическом микроскопе наблюдаются следы оплавления, для ПКК и кремния при 1,2 Дж/см<sup>2</sup>.

Электрофизические измерения легированных полупроводниковых структур до и после лазерного отжига показывают, что отжиг приводит к резкому уменьшению слоевого сопротивления вследствие упорядочения структуры и перераспределение легирующей примеси.

Лазерная обработка структуры ПКК толщиной 350 нм, нанесенной на  $\text{SiO}_2$  и легированной фосфором, приводит к уменьшению слоевого сопротивления с 40 Ом/□ до 20 Ом/□, т.е. 50% от первоначальной величины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование научно-учебного лазерного комплекса на основе импульсного лазера с диодной накачкой в лабораторном практикуме на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ позволяет готовить научные и инже-

нерные кадры для отечественной науки и промышленности по новому направлению импульсного лазерного отжига. Это направление включает исследования структурных быстропротекающих превращений в физике конденсированного состояния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц, А.Г. Технологические режимы лазерной обработки Учеб. Пособие для вузов / И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
2. Альтудов, Ю.К. Лазерные микротехнологии и их применение в электронике / Ю.К. Альтудов, А.Г. Гарицын – М.: Радио и связь, 2001. – 632 с.
3. Двуреченский, А.В. Импульсная ориентированная кристаллизация твердых тел (лазерный отжиг) / Соросовский образовательный журнал.: 2004. –т. 8, № 1, 108 с.
4. Шалимова, К.В. Физика полупроводников. – СПб.: Лань, 2010. – 400 с.
5. Борисенко, В.Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве / Под ред. В.А. Лабунова. – Мн.: Навука і тэхніка, 1992. – 248 с.

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ «УМНЫЙ ДОМ» С ПОМОЩЬЮ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА AVR

**И. А. Карпович, А. С. Соколов**

---

*Белорусский государственный университет, Karpovich@bsu.by*

#### ВВЕДЕНИЕ

Под влиянием постоянно развивающихся технологий идёт стремительное развитие электрического оснащения жилья. Возможности микроконтроллерных систем позволяют автоматизировать работу всего электрооборудования. Это приводит к экономии энергии, безопасности и комфорту. Такие средства передачи данных как Wi-Fi, Bluetooth и интернет дают возможности удалённого доступа и мониторинга за блоками, подключёнными к системе.

Идея сделать микросхему, которая будет сочетать на одном кристалле процессор, память, а также устройства ввода и вывода была запатентована инженерами из американской компании Texas Instrument М. Кочреном и Г. Буну в 1971 году. Первый микроконтроллер был сделан через пять лет компанией Intel. На данный момент выпускаются микроконтроллеры в большом разнообразии, с различными характеристиками, возможностями, размерами и разным количеством портов ввода и вывода. Самые известные компании, выпускающие микроконтроллеры, – Intel, Texas Instrument, ARM Limited, Atmel, Microchip, STMicroelectronics.

В данной работе используются 8-ми разрядные микроконтроллеры семейства AVR фирмы Atmel. Они отличаются от других распространённых в настоящее время микроконтроллеров большей скоростью работы, универсальностью, доступностью и относительно невысокой ценой. Кроме того, AVR достаточно легко программируются.

#### ОПИСАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «УМНЫЙ ДОМ»

Для работы с микроконтроллерами AVR была написана специальная среда разработки Arduino, а также совместные платы, которые оснащены всем необходимым для