

Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники

УДК 621.315.592:539.213:681.586

Грунский Дмитрий Игоревич

***Формирование слоев аморфного  
гидрогенизированного кремния в силансодержащей  
плазме комбинированного разряда***

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для  
производства полупроводников, материалов и приборов  
электронной техники

**Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук**

Минск 2001

Работа выполнена в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники

**Научные руководители:**

акад. НАНБ, д.т.н., проф. Достанко А.П.  
к. ф.-м. н. Босяков М.Н.

**Официальные оппоненты:**

д.ф.-м.н., проф. Федотов А.К.  
к.т.н., доц. Василевич В.П.

**Оппонирующая организация:** НПО «Интеграл»

Защита состоится «19» апреля 2001 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники (220027, Минск, П.Бровки, 6, БГУИР, ауд. 232, 1 уч. корп., тел. 239 – 89 – 89).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Автореферат разослан «16» марта 2001 г.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертации.** Нарастающие экологические проблемы, удорожание до уровня мировых цен энергоносителей в Республике Беларусь, с одной стороны, и проблемы современной энергетики — с другой, являются предпосылками интенсивных исследований нетрадиционных источников энергии. Одним из перспективных направлений в данной области является гелиоэнергетика. За последнее время в качестве материала для фотовольтаических элементов всё чаще применяется аморфный гидрогенизированный кремний ( $a\text{-Si:H}$ ). Благодаря оптимизации существующих методов получения, разработке новых технологий и усовершенствованию электрических схем солнечных элементов за последние годы во всём мире наблюдается экспоненциальный рост производства фотовольтаических элементов как большой, так и малой площади. В настоящее время  $a\text{-Si:H}$  всё более широко применяется в транзисторных структурах, недорогих программируемых элементах памяти, ЖКИ дисплеях и дозиметрах. Современные успехи в этой области были получены благодаря труду ученых разных стран: России, Германии, Японии, США, Италии, Франции и др.

Наиболее распространенным методом получения  $a\text{-Si:H}$  является плазмохимическое осаждение в высокочастотном разряде (ВЧ, 13.56 МГц). Однако при использовании данной технологии производителям зачастую приходится выбирать между качеством пленки и скоростью ее роста. Обычно высокая скорость осаждения, а следовательно, низкая себестоимость обеспечивается либо, значительным усложнением оборудования, либо увеличением мощности разряда с сопутствующим снижением качества получаемых пленок  $a\text{-Si:H}$ . Поэтому исследования, целью которых является определение закономерностей процесса формирования слоев  $a\text{-Si:H}$ , построение моделей, описывающих механизм осаждения аморфного гидрогенизированного кремния и, наконец, разработка новых технологий получения  $a\text{-Si:H}$ , являются актуальными.

В настоящее время в Республике Беларусь не организовано изготовление полупроводниковых приборов на базе  $a\text{-Si:H}$ . Поэтому полученные в ходе выполнения работы данные могут послужить базой для развертывания производства  $a\text{-Si:H}$ . Применение полученных результатов при производстве солнечных элементов на базе аморфного гидрогенизированного кремния в Республике Беларусь в конечном итоге позволит снизить потребление топливно-энергетических ресурсов, увеличить объемы выпускаемых солнечных элементов и повысить конкурентоспособность и качество белорусской продукции.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Диссертационная работа выполнялась в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в рамках научно-исследовательских проектов: INTAS-94-4352, ФФИ Ф97М-129 "Исследовать влияние возмущающих электромагнитных полей на физико-химические

свойства силансодержащей плазмы ВЧ-разряда», договор №1543 - «Исследование оптических и электрофизических характеристик высокостабильных пленок аморфного гидрогенизированного кремния, формируемых в неравновесной плазме» и договор № 1314 – «Разработать принципы независимого управления параметрами неравновесной химически активной плазмы».

Целью настоящей работы являлось установление закономерностей формирования слоев a-Si:H в силансодержащей плазме комбинированного разряда для повышения эффективности плазмохимического получения аморфного гидрогенизированного кремния пригодного к изготовлению фотовольтаических элементов.

**Задачи исследований.** Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать и создать экспериментальный комплекс, позволяющий формировать слои аморфного гидрогенизированного кремния (ширина запрещенной зоны —  $(E_g)=1.7$  эВ, микроструктурный параметр —  $(R^*) < 0.4$ , разница между темновой проводимостью и фотопроводимостью —  $(\sigma_{\text{foto}} - \sigma_{\text{dark}}) > 10^5$ ) в силансодержащей плазме комбинированного разряда (КР, 13.56 МГц + 55 кГц), оснащенный диагностическим комплексом и сканирующим устройством для исследования оптической эмиссии плазмы.
2. Предложить модель формирования пленки a-Si:H в силансодержащей плазме комбинированного разряда, учитывающую изменение режима горения разряда и ионный поток к поверхности роста аморфного гидрогенизированного кремния. При ее помощи определить основные закономерности процесса формирования a-Si:H в комбинированном разряде.
3. Разработать методику определения концентрации компонентов силансодержащей плазмы при помощи оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС), установить взаимосвязь между изменениями спектра и процессами, происходящими в разряде.
4. Исследовать влияние основных технологических параметров процесса – давления в камере (P), расхода плазмообразующего газа (Q), температуры подложки (T), напряжения подаваемого на электрод (U) и типа разряда (высокочастотный, низкочастотный (НЧ, 55 кГц)), на скорость ( $V_{\text{ос}}$ ) и качество получаемых слоев a-Si:H. Определить эффективное соотношение ВЧ и НЧ мощностей при формировании слоев a-Si:H в комбинированном разряде.

#### **Объект и предмет исследования.**

Объектом исследования является процесс формирования пленок a-Si:H при комбинированном воздействии ВЧ и НЧ полей, предметом исследования – силансодержащая плазма, образующаяся под воздействием НЧ и ВЧ электромагнитных полей.

**Методология и методы проведенного исследования.** При выполнении работы использовались различные методы как формирования плазмы в реакторе (ВЧ, НЧ и комбинированный разряды), так и анализа процессов, происходящих в силансодержащей плазме, а также качества полученных

пленок a-Si:H. Это – определение ширины запрещенной зоны пленок с помощью метода Тауца, их качественный и количественный анализ путем сравнения ИК – спектров поглощения в диапазоне  $500 \dots 2500 \text{ см}^{-1}$ , определение фотопроводимости при облучении когерентным источником света и определение скорости деградации полученного материала при стабилизации фототока во времени. Сравнение оптических эмиссионных спектров силансодержащей плазмы, полученных при различных режимах осаждения, позволяет связать процессы, происходящие при формировании пленки, с ее качеством и судить о физико-химических особенностях комбинированного разряда. Разработанный актинометрический метод определения концентрации атомарного водорода в плазме позволяет оценивать качество осаждаемого аморфного гидрогенизированного кремния во время его получения.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые для получения слоев аморфного гидрогенизированного кремния применялась силансодержащая плазма, формируемая одновременным воздействием электромагнитных полей с частотами – 13.56 МГц и 55 кГц (комбинированный разряд). Установлено, что такой способ, в отличие от широко используемого при осаждении a-Si:H высокочастотного разряда, позволяет увеличить скорость осаждения слоев a-Si:H на 50–75%. Выявлены основные закономерности процесса, определяющие его большую эффективность по сравнению с другими методами формирования аморфного гидрогенизированного кремния.

2. Разработана модель формирования слоев a-Si:H в плазме комбинированного разряда, которая, в отличие от известных, учитывает наличие ионного потока к поверхности роста, режим горения разряда и геометрию плазмохимического реактора при определении скорости осаждения в используемом диапазоне технологических параметров ( $P \sim 60 \text{ Па}$ ,  $T \sim 500 \text{ К}$ ,  $Q \sim 3 \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $U_{вч} < 100 \text{ В}$ ,  $U_{нч} < 300 \text{ В}$ ). С ее помощью расширено представление о процессах, происходящих при плазмохимическом формировании a-Si:H, определены основные механизмы осаждения аморфного гидрогенизированного кремния в силансодержащей плазме комбинированного разряда.

3. Установлено, что применение плазмы, формируемой одновременным воздействием электромагнитных полей с различными частотами, позволяет гибко управлять плотностью смешанного ионного потока к поверхности роста пленки путем изменения низкочастотной составляющей разряда, а варьирование высокочастотной составляющей позволяет управлять химической активностью плазмы. Установлено, что в комбинированном разряде обеспечиваются условия близкие по своим свойствам к режиму  $\alpha - \gamma$  перехода в высокочастотном разряде.

4. Разработана методика определения концентрации атомарного водорода ( $C_H$ ) в плазме ( $\text{SiH}_4 + \text{Ar}$ ). При её помощи установлена корреляция между концентрацией водорода в плазме и электронно–оптическими свойствами пленок a-Si:H. Разработанная методика, в отличие от других методов, позволяет осуществлять оценивать качество пленки в процессе ее осаждения.

**Практическая значимость полученных результатов** заключается в следующем:

- Разработан и реализован способ получения в комбинированном разряде слоев  $a\text{-Si:H}$  со скоростью осаждения на 50 - 75 % выше, чем в ВЧ разряде. Полученные экспериментальные зависимости, разработанные методы и предложенные рекомендации могут быть использованы при оптимизации плазмохимического формирования  $a\text{-Si:H}$  и разработке нового оборудования. Так, дооснащение установок, использующих ВЧ разряд, низкочастотным генератором и разработанным согласующим устройством позволит значительно сократить время осаждения  $a\text{-Si:H}$ , а, следовательно, увеличить производительность оборудования и сократить себестоимость изделий на основе аморфного гидрогенизированного кремния.
- Разработанная модель процесса осаждения пленок в силансодержащей плазме комбинированного разряда позволяет прогнозировать скорость осаждения пленок  $a\text{-Si:H}$  при задании геометрии плазмохимического реактора и технологических параметров процесса.
- Разработанный прибор спектрального контроля концентрации атомарного водорода в силансодержащей плазме позволяет оценить качество и скорость роста пленки аморфного гидрогенизированного кремния при ее осаждении.
- Предложены технические решения отдельных узлов оборудования, рекомендации по совершенствованию и принципы организации технологического процесса осаждения пленок  $a\text{-Si:H}$  в плазме комбинированного разряда. Результаты работы планируется использовать при создании линии непрерывного действия для формирования солнечных элементов на базе постов ВУБСп.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в БГУИР по дисциплине "Физические основы эллионных технологий".

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Способ формирования слоев  $a\text{-Si:H}$  в силансодержащей плазме комбинированного разряда, реализованный в модернизированной установке промышленного типа (УВН2М-1) и позволяющий осаждать аморфный гидрогенизированный кремний со скоростью выше на 50 – 75 %, чем в ВЧ разряде. Принципы организации процесса и технические решения отдельных узлов оборудования предназначенного для плазмохимического получения аморфного гидрогенизированного кремния.
2. Основные закономерности формирования  $a\text{-Si:H}$  в плазме комбинированного разряда, определяющие его большую эффективность по сравнению с одночастотными разрядами. Независимое управление ионным потоком к поверхности роста и химической активностью плазмы, осуществляемое в двухчастотном разряде, обеспечивает технологический режим, при котором увеличение скорости осаждения не сопровождается снижением качества получаемого материала.
3. Модель процесса формирования  $a\text{-Si:H}$  в плазме комбинированного разряда, позволяющая оценить скорость осаждения в зависимости от геометрии плазмохимического реактора, давления и расхода плазмообразующего газа,

температуры подложки, типа разряда и уровня мощности, подаваемой на потенциальный электрод.

4. Актинометрическая методика контроля компонентного состава силансодержащей плазмы, позволяющая в ходе процесса оценить скорость осаждения и электронно-оптические свойства получаемого аморфного гидрогенизированного кремния;

**Личный вклад соискателя.** Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в его непосредственном участии в создании экспериментального комплекса, проведении исследований, в разработке представленной в диссертации модели, в анализе и обобщении полученных результатов, в разработке актинометрической методики контроля компонентного состава плазмы и методики проведения экспериментов. В совместно опубликованных работах автор осуществлял постановку задачи, предлагал и обосновывал направления решения научных проблем.

**Апробация результатов работы.** Основное содержание работы доложено и обсуждено на 6 конференциях: II и III международных конференциях «Физика плазмы и плазменные технологии» (Минск 1997, 2000 г.), республиканской конференции «Новые материалы и технологии» (Минск 1998 г.), на X научно - технической конференции профессорско - преподавательского состава, аспирантов и студентов (Брест 1998 г.), на V и VI республиканских научных конференциях «Физика конденсированных сред» (Гродно 1997, 1998 г.).

**Опубликованность результатов.**

По материалам диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, в том числе 11 статей в научно-технических журналах и материалах конференций и 5 тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 158 страниц в том числе:

67 рисунков на 30 страницах, 11 таблиц на 9 страницах, 3 приложений на 9 страницах. Библиографический список содержит 144 наименования литературных источников на 9 страницах.

## Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, формулируется цель, научная новизна и практическая значимость работы. Дана оценка состояния сферы применения и производства a-Si:H, очерчен круг связанных с этим проблем.

В первой главе рассмотрены существующие методы изготовления и современные проблемы, связанные с формированием слоев a-Si:H.

Проведенный в разделе 1.1. анализ функционального назначения слоев a-Si:H, их электронно-оптических свойств показал, что аморфный гидрогенизированный кремний является перспективным материалом в области оптоэлектроники благодаря своей невысокой себестоимости и уникальным электронно-оптическим характеристикам, позволяющим с наибольшей эффективностью поглощать свет в области видимого излучения.

Изучение свойств аморфного гидрогенизированного кремния показало, что они зависят от метода получения и технологических параметров процесса. Это подтверждает анализ способов формирования пленок a-Si:H (раздел 1.2.). В разделе указано, что на сегодняшний день, получение данного материала в силановой плазме ВЧ разряда, является наиболее распространенным и обеспечивает формирование слоев аморфного гидрогенизированного кремния, требуемого качества для создания высокоэффективных фотовольтаических элементов ( $E_g = 1.7 \pm 0.02$  эВ, разница между темновой проводимостью и фото проводимостью  $> 10^5$ ,  $R^* < 0.4$ ). Однако данный метод имеет недостатки: низкие скорость осаждения и воспроизводимость результатов.

В разделе 1.3 рассмотрены основные физико-химические процессы, протекающие при формировании слоев a-Si:H в тлеющем разряде, а также представлены технологические особенности процесса. Показано, что согласно литературным данным, неустойчивый режим  $\alpha - \gamma$  перехода в ВЧ разряде является оптимальным для осаждения аморфного гидрогенизированного кремния. Дальнейшее увеличение мощности разряда и переход в  $\gamma$  режим вызывает деградацию электронно-оптических свойств получаемых слоев a-Si:H.

Анализ литературы, посвященной формированию a-Si:H, показал, что увеличение скорости осаждения обычно достигается за счет снижения качества получаемого материала, а интенсивное порошкообразование, возникающее при увеличении мощности разряда, является сдерживающим фактором, не позволяющим повысить производительность установок плазмохимического осаждения a-Si:H.

Показано, что одним из возможных путей увеличения скорости осаждения в ВЧ разряде является управление ионным потоком к поверхности роста с целью обеспечения оптимального режима формирования аморфного гидрогенизированного кремния. В связи с этим перспективным представляется осуществление процесса получения a-Si:H в силаносодержащей плазме,



формируемой комбинированным воздействием ВЧ и НЧ электромагнитных полей. В этом случае можно заметно увеличить скорость осаждения благодаря тому, что эффузия водорода из полигидридных групп внутри пленки, вызванная ионной бомбардировкой, позволит сместить границу снижения качества слоев  $\alpha\text{-Si:H}$  в область более высоких мощностей разряда.

**Вторая глава** посвящена методике и экспериментальному оборудованию, предназначенному для формирования  $\alpha\text{-Si:H}$  в силансодержащей плазме комбинированного разряда.

Для формирования  $\alpha\text{-Si:H}$  был создан экспериментальный комплекс на базе установки промышленного типа УВН2М 1, позволяющий обрабатывать подложки площадью до  $300 \text{ см}^2$ . Осаждение слоев аморфного гидрогенизированного кремния проводилось в несимметричном, плоско-параллельном плазмохимическом реакторе, находящемся в плазмобоксе. В отличие от установок, предназначенных для осаждения  $\alpha\text{-Si:H}$  в плазме ВЧ разряда, созданный экспериментальный комплекс оснащен НЧ генератором и специальным согласующим устройством, позволяющим формировать комбинированный разряд. Разработанная конструкция плазмохимического реактора, применение плазмобокса и двух вакуумных магистралей позволяет снизить вероятность попадания продуктов обезгаживания в структуру пленки. Использовалась плазмообразующая смесь —  $(\text{SiH}_4[5\%]+\text{Ar})$ .

В состав установки входит контрольно-диагностический комплекс, позволяющий регистрировать эмиссионный спектр разряда и его пространственное распределение. Излучение плазмы через кварцевый световод подавалась на входную щель монохроматора ММ-101, снабженного фотоэлектронным умножителем ФЭУ-106. Для исследования пространственного распределения эмиссии плазмы применялось специально разработанное и установленное внутри камеры сканирующее устройство.

В созданной разрядной системе объем плазмы составлял  $1485 \text{ см}^3$ , максимальная удельная ВЧ-мощность —  $0,75 \text{ Вт/см}^2$ , НЧ-мощность —  $0,9 \text{ Вт/см}^2$ .

В разделе 2.2. представлено описание методик контроля параметров плазмы и характеристик получаемых слоев  $\alpha\text{-Si:H}$ .

Оптическая эмиссионная спектроскопия позволяет контролировать изменения в плазме, связанные с нейтральными частицами. Поэтому данный метод часто применяется для исследования процесса плазмохимического осаждения пленок  $\alpha\text{-Si:H}$ . Он позволяет установить качественный состав плазмы и его связь с параметрами разряда, определить наиболее вероятные зоны максимальной генерации радикалов и ионов. Наиболее информативным является участок эмиссионного спектра силансодержащей плазмы в диапазоне  $200 \dots 900 \text{ нм.}$ , содержащий линии и полосы Si, H, OH,  $\text{N}_2$ , Ar(I, II) и SiH.

В разделе представлена разработанная актинометрическая методика, которая позволяет определить концентрацию атомарного водорода в плазме по формуле:

$$N_H = k[N_{Ar}] \frac{I_{H_{\alpha,\beta}}}{I_{Ar}}, \quad (1)$$

где,  $N_H$  и  $N_{Ar}$  концентрации атомарного водорода и аргона соответственно,  $I_{\alpha,\beta}$ ,  $I_{Ar}$  – интенсивности линий атомарного водорода и аргона соответственно. Коэффициент  $k$ , зависящий от свойств конкретных атомов (величины сечения возбуждения, вероятности спонтанного излучения, частоты излучения и радиационного времени жизни излучающих состояний) имеет следующие значения в зависимости от используемых пар линий:

Таблица 1.

Коэффициент «k» для различных пар линий.

№ п/п.	линии	k
1	H $\alpha$ /Ar(696.5nm)	0.089
2	H $\beta$ /Ar(451.1nm)	0.028
3	H $\delta$ /Ar(430.0nm)	0.019

В разделе приводится описание комплекса методик, использованных для контроля качества полученных слоев a-Si:H.

Ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ) полученных пленок определялась с помощью метода Тауца. Суть данного метода заключается в том, что при предположении о параболичности закона дисперсии электронов вблизи краев запрещенной зоны экстраполяция протяженного края поглощения спектра в координатах  $\sqrt{\alpha h\nu} \sim h\nu$  ( $\alpha$  – коэффициент пропускания) позволяет найти величину  $E_g$  в точке  $\sqrt{\alpha h\nu} = 0$ . При этом, угол наклона спектра поглощения в координатах Тауца позволяет судить о концентрации водорода и количестве локализованных состояний в запрещенной зоне получаемых слоев a-Si:H.

Фотопроводимость и ее изменение с течением времени при облучении гелий – неоновым лазером, а также темновая проводимость пленки измерялась при помощи созданной исследовательской ячейки.

Кроме измерения электронно–оптических свойств регистрировались ИК – спектры поглощения пленок a-Si:H в диапазоне 500 – 2500  $\text{cm}^{-1}$ . Анализ полученных спектров позволяет судить о конфигурациях и количестве связей SiH, SiH $_2$ , а также о концентрации водорода в пленке ( $C_H$ (всс)).

В разделе 2.3. описана методика проведения экспериментов и контроля качества полученных образцов a-Si:H.

Третья глава посвящена исследованиям процесса получения слоев аморфного гидрогенизированного кремния в одночастотных разрядах.

Эксперименты проводились в следующей последовательности. В ВЧ и НЧ разрядах ( $F=13.56$  МГц и 55 кГц) были проведены исследования влияния технологических параметров на скорость роста, электронно–оптические свойства слоев a-Si:H с целью определения оптимальных режимов осаждения в созданной геометрии плазмохимического реактора. Кроме того, необходимо

было оценить характер зависимости выходных параметров процесса (скорости осаждения и качества пленок) от технологических параметров, схожесть и отличие от известных ранее зависимостей.

Затем проводились исследования в комбинированном разряде. КР – это двухчастотный разряд, создаваемый одновременным приложением к электродам напряжений высокой и низкой частоты. В первой серии экспериментов при неизменном ВЧ напряжении изменялось низкочастотное напряжение, а во второй, при неизменном НЧ напряжении к электродам прикладывалось различное ВЧ напряжение.

**Раздел 3.1.** посвящен исследованию зависимости скорости осаждения и качества слоев a-Si:H в плазме ВЧ разряда от технологических параметров (давление в камере, расход плазмообразующего газа, температура подложки и мощность разряда). Критерием оптимизации процесса получения a-Si:H являлась максимальная скорость осаждения качественных слоев a-Si:H.

Установлено, что зависимости скорости осаждения и качества пленок от технологических параметров при использовании высокочастотного разряда в созданном плазмохимическом реакторе совпадают с известными ранее. В свою очередь, анализ эмиссионных спектров показал, что известная корреляция интенсивности полосы SiH и скорости осаждения не всегда наблюдается на практике, в частности, при изменении давления в камере и расхода плазмообразующей смеси. Это связано, очевидно, с изменением условий транспортировки пленкообразующих частиц к растущей пленке. Отмечено, что интенсивность линий атомарного водорода и ионов аргона низка в ВЧ разряде и сравнима с уровнем фона.

**В разделе 3.2.** представлены результаты осаждения a-Si:H, полученные в низкочастотном разряде. В этом случае скорость осаждения слоев a-Si:H выше, чем в ВЧ разряде, при этом зависимость качества слоев a-Si:H от уровня мощности иная.

Установлено, что, в отличие от ВЧ разряда, в НЧ разряде существует технологический режим, в котором увеличение скорости осаждения a-Si:H не сопровождается ухудшением электронно-оптических характеристик получаемого материала. При этом уменьшается количество связей SiH<sub>2,3</sub>, что ведет к снижению величины ширины запрещенной зоны и микроструктурного параметра у получаемых пленок. Это обусловлено в первую очередь тем, что параметры плазмы (ионный поток, структура разряда, функция распределения электронов по энергиям) в НЧ разряде иные, чем в ВЧ, и подчиняются закономерностям  $\gamma$  разряда. Анализ полученных данных показал, что, с одной стороны,  $\gamma$  – режим горения разряда обеспечивает близость к растущей пленке области максимальной генерации пленкообразующих элементов (см. раздел 4.3.), с другой стороны – в НЧ разряде доля пленкообразующих ионов, достигающих поверхности пленки, и ионная бомбардировка пленки выше, чем в ВЧ разряде. На большую концентрацию ионов в плазме указывают, как данные, полученные при помощи ОЭС (интенсивность линии AgII в несколько раз выше, чем в ВЧ разряде и сравнима с интенсивностью линий AgI), так и результаты, полученные при помощи разработанной модели (см. раздел 4.1.).

Применение ОЭС при формировании a-Si:H в низкочастотной плазме позволило установить, что интенсивности полосы SiH, линий Si, H $\beta$  и их актинометрические отношения к интенсивностям линий ArI позволяют определить концентрацию радикалов и атомарного водорода в разряде. Найдено, что концентрация водорода в плазме и получаемых слоях a-Si:H коррелируют между собой. Таким образом, при помощи ОЭС контролируется скорость осаждения a-Si:H и качество получаемого материала.

**Четвертая глава** посвящена моделированию и исследованию процесса формирования a-Si:H в комбинированном разряде.

Проанализировать процесс осаждения a-Si:H в комбинированном разряде позволила разработанная физико-математическая модель (раздел 4.1.1.), в которой скорость осаждения определяется при задании общих внешних условий, характеризующих процесс. При помощи модели исследуются процессы транспорта к растущей пленке частиц, вероятность участия которых в формировании структуры a-Si:H наиболее велика: диффузия радикалов SiH $_2$ 3 и поток ионов к поверхности роста.

При разработке модели предполагалось, что основная масса радикалов формируется в области границы положительного столба плазмы и катодного слоя, а расчет величины ионного тока определялся при предположении, что ВАХ НЧ разряда подчиняется законам тлеющего разряда в аномальном режиме.

На основании сделанных предположений скорость осаждения a-Si:H в комбинированном разряде равна:

$$V_{oc} = J \frac{M_m \cdot b}{\rho_{a-Si:H} \times N_A}, \quad (2)$$

где  $M_m$  – масса моля радикалов SiH $_2$ 3,  $\rho_{a-Si:H}$  – плотность a-Si:H,  $b$  – вероятность прилипания пленкообразующих частиц,  $J$  – поток частиц участвующих в росте пленки:

$$J = J_{rad-\alpha} + J_{rad-\gamma} + J_{ion-Si} - \langle k_s \rangle J_{Ar}, \quad (3)$$

здесь  $J_{rad-\alpha}$  и  $J_{rad-\gamma}$  – потоки радикалов в  $\alpha$  – режиме (ВЧ) и  $\gamma$  – режиме (НЧ) соответственно,  $J_{ion-Si}$  – поток кремнийсодержащих ионов,  $k_s$  – усредненный коэффициент распыления и  $J_{Ar}$  – поток ионов аргона.

Ввиду того, что толщина катодного слоя в  $\gamma$  – режиме подчиняется иным законам, нежели в  $\alpha$  – режиме, поток радикалов для  $\alpha$  – и  $\gamma$  – режимов определялся при различном значении толщины катодного слоя. Расчет концентрации радикалов SiH $_2$ 3 в плазме проводился на основе законов химической кинетики и материального баланса реагентов, при условии стационарности процесса.

Анализ полученных при помощи модели данных для ВЧ разряда ( $\alpha$  – режим) показал, что характер зависимости скорости формирования a-Si:H от основных технологических параметров и геометрии плазмохимического реактора, определенный при помощи модели, совпадает с экспериментальными данными. Так, определено, что ионный поток в ВЧ разряде мал и составляет несколько процентов от потока радикалов, а скорость осаждения a-Si:H увеличивается при росте мощности разряда, давления и расхода плазмообразующей смеси.

Адекватность физико-математической модели экспериментальным результатам в случае ВЧ разряда указывает на то, что предположение о генерации радикалов в плазме на границе между плазмой и катодным слоем является верным.

Полученные при помощи модели зависимости скорости осаждения ( $V_{OC}$ ) от уровней ВЧ и НЧ мощности в комбинированном разряде (раздел 4.1.2.) представлены ниже (Рис. 1.). Согласно проведенным расчетам, угол наклона  $V_{OC}=f(U_{ВЧ})$  зависит от мощности базового НЧ разряда, расхода плазмообразующего газа и концентрации силана в смеси (см. Рис. 1., (а)). В случае, когда базовым является ВЧ разряд (см. Рис. 1., (б)), зависимость иная и в основном определяется ионным током, усредненным коэффициентом распыления  $k$ .

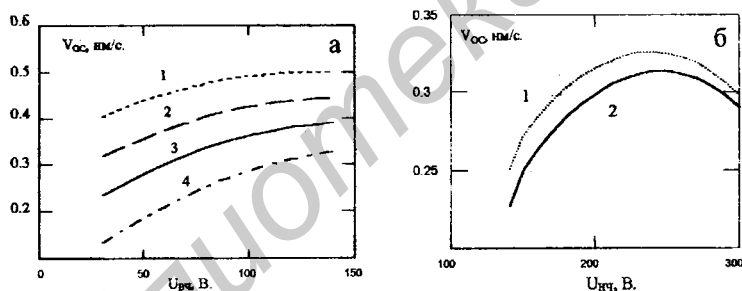


Рис. 1. Зависимости скорости осаждения ( $V_{OC}$ ) от высокочастотного и низкочастотного напряжения на электродах в комбинированном разряде, полученные при помощи модели:

а – (1 –  $U_{НЧ}=300$  В, 2 –  $U_{НЧ}=250$  В, 3 –  $U_{НЧ}=200$  В, 4 –  $U_{НЧ}=140$  В);

б – (1 –  $U_{ВЧ}=45$  В, 2 –  $U_{ВЧ}=55$  В)

Очевидно, что физико – химические процессы, происходящие в комбинированном разряде, не являются простой суммой процессов ВЧ и НЧ разрядов. Анализ полученных при помощи модели зависимостей скорости осаждения от технологических параметров в комбинированном разряде позволил заключить, что применение двухчастотного разряда дает возможность

увеличить скорость осаждения за счет роста диссоциации силана и более интенсивного участия пленкообразующих ионов в формировании a-Si:H.

Согласно разработанной модели различный вид зависимостей  $V_{OC}=f(U_{BЧ})$  и  $V_{OC}=f(U_{HЧ})$  (см. Рис. 1. (а) и (б)) связан с изменениями условий формирования пленки. Как показал расчет, рост HЧ мощности в разряде ведет к увеличению потока радикалов к подложке, но темпы роста ионного тока при этом значительно выше. Это и является причиной экстремума в зависимости  $V_{OC}=f(U_{HЧ})$ .

В разделе 4.2. рассматриваются данные, полученные при формировании a-Si:H в комбинированном разряде. Определены уровни ВЧ и HЧ напряжения на потенциальном электроде, обеспечивающие максимальную скорость осаждения a-Si:H ( $E_g=1.7$  эВ,  $R^*<0.4$ ). Ниже представлены зависимости скорости осаждения и ширины запрещенной зоны от ВЧ напряжения в комбинированном разряде (Рис. 2.).

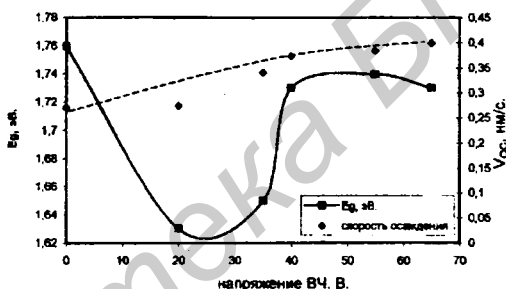


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения ( $V_{OC}$ ) и ширины запрещенной зоны ( $E_g$ ) от  $U_{BЧ}$  в комбинированном разряде при  $U_{HЧ} = 230$  В (штриховая линия – зависимость, полученная в ходе расчетов  $U_{HЧ}=250$  В (см. Рис. 1.))

Экспериментально установлено, что в комбинированном разряде, при увеличении ВЧ мощности, скорость осаждения аморфного гидрогенизированного кремния растет. Качество слоев a-Si:H (фотопроводимость, микроструктурный параметр) при ВЧ напряжениях  $U_{BЧ} < 40$  В на электроде улучшается, затем, при  $U_{BЧ} > 50$  В, качество пленок падает (рост  $E_g$ ,  $R^*$ ). Таким образом, изменением ВЧ напряжения на электродах в плазме комбинированного разряда, можно управлять свойствами получаемого материала ( $E_g$ ,  $C_H$ ).

Данные, полученные при варьировании HЧ мощностью, представлены ниже (Рис. 3.). Зависимость  $V_{OC}$  от низкочастотной составляющей в комбинированном разряде иная и имеет экстремум. При этом, как и в HЧ разряде, индикатором улучшения качества получаемых слоев является напряжение самосмещения ( $U_{CC}$ ) на потенциальном электроде. Так, при  $U_{CC} \sim 50$  В наблюдалось увеличение угла наклона спектров поглощения

полученных пленок в координатах Гауца, уменьшение микроструктурного параметра и ширины запрещенной зоны.

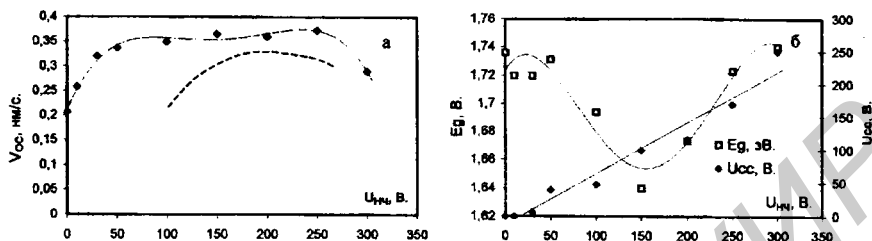


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения ( $V_{oc}$ ) (а), ширины запрещенной зоны ( $Eg$ ) и напряжения самосмещения ( $U_{cc}$ ) (б) от  $U_{НЧ}$  в комбинированном разряде при  $U_{ВЧ}=37$  В (штриховая линия – данные полученные при помощи модели)

Как показали проведенные эксперименты, применение комбинированного разряда позволяет увеличить скорость осаждения слоев  $a$ -Si:H по сравнению с одночастотными разрядами (Рис. 4).

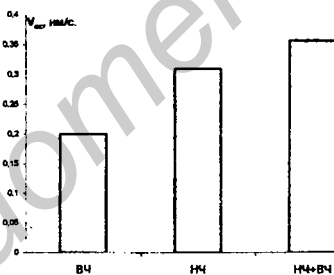


Рис. 4. Сравнение максимальных скоростей осаждения слоев  $a$ -Si:H ( $Eg=1.7$  эВ), полученных в различных разрядах

При этом в комбинированном разряде, в отличие от ВЧ разряда, существует технологический режим, в котором качество пленок не снижается при увеличении скорости осаждения  $a$ -Si:H. Исследования показали, что, используя различные комбинации уровней ВЧ и НЧ мощностей, можно варьировать долевым вкладом нейтральных и заряженных частиц, независимо управлять химической активностью плазмы и ионным потоком к поверхности роста. Благодаря этому обеспечиваются различные режимы осаждения  $a$ -Si:H, не реализуемые в базовых ВЧ и НЧ разрядах.

Данные, полученные при помощи оптической эмиссионной спектроскопии, указывают на то, что как в НЧ, так и в комбинированном разряде, концентрация атомарного водорода в силансодержащей плазме, определяемая при помощи разработанной актинометрической методики, коррелирует с концентрацией водорода в слоях a-Si:H и шириной запрещенной зоны полученных пленок (Рис. 5.). Таким образом, регистрация интенсивностей линий  $H_{\alpha, \beta}$  позволяет контролировать качество получаемого аморфного гидрогенизированного кремния. Исследование межэлектродного распределения эмиссии плазмы, проведенное в разделе 4.3., указывает на то, что наиболее активно плазмохимические процессы в ВЧ, НЧ и комбинированном разрядах происходят на границе катодного слоя. Установлено, что КР позволяет синтезировать условия, схожие с  $\alpha$ - $\gamma$  переходом ВЧ разряда. Причем, соотношением  $\alpha$  - и  $\gamma$  - составляющих, в этом случае, можно управлять изменением ВЧ и НЧ напряжений. По сравнению с  $\alpha$  -  $\gamma$  переходом в высокочастотном разряде такой режим не носит бифуркационного характера.

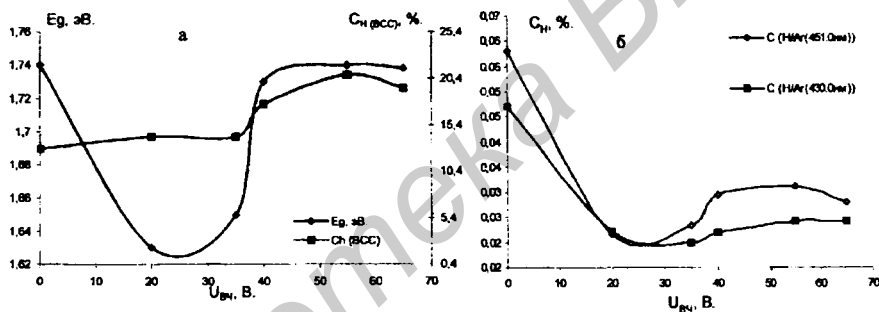


Рис. 5. Параметры полученных слоев a-Si:H в КР (а) и найденная при помощи актинометрической методики концентрация водорода в плазме (б) ( $U_{НЧ} = 230$  В)

В пятой главе даны практические рекомендации по усовершенствованию метода и оборудования предназначенного для плазмохимического формирования a-Si:H.

Рекомендации по конструированию разрядного устройства для получения a-Si:H представлены в разделе 5.1. Рассматриваются вопросы организации геометрии плазмохимического реактора и основные принципы его проектирования.

На основании проведенных исследований предлагается формировать слои аморфного кремния в силансодержащей плазме комбинированного разряда, что позволяет увеличить скорость осаждения a-Si:H. В ходе проведенных исследований установлены оптимальные параметры



технологического процесса:  $P \sim 60$  Па,  $Q \sim 2.83$  см<sup>3</sup>/с,  $T \sim 525$  К,  $U_{ВЧ} \sim 45$  В,  $U_{НЧ} \sim 230$  В.

Там же даны рекомендации по дооснащению ВЧ установок плазмохимического осаждения a-Si:H НЧ генератором и разработанным согласующим устройством, что позволит организовать комбинированный разряд. Для обеспечения высокого качества получаемого материала предлагается оснастить плазмохимический реактор плазмобоксом с нагревателем подложки за пределами разрядного устройства и дополнительным форвакуумным насосом, производящими откачку из плазмобокса.

В разделе представлены варианты плазмохимических установок (установка с использованием центральной камеры транспортировки и линия непрерывного действия в закрытом вакуумном цикле), технологический процесс формирования фотовольтаических элементов на базе a-Si:H в комбинированном разряде. Для создания линии непрерывного действия закрытого вакуумного цикла получения p-i-n элементов на подложках шириной до 25 см предлагается использовать посты ВУ1БСп.

Раздел 5.2. содержит рекомендации по проектированию согласующих устройств, предназначенных для формирования комбинированного разряда. Разработанное согласующее устройство позволяет суммировать ВЧ и НЧ мощности и обеспечивает плавную регулировку ВЧ напряжения на электроде.

На основании полученного экспериментального опыта для создания линии непрерывного действия закрытого вакуумного цикла получения p-i-n элементов (суммарная площадь одновременно обрабатываемых подложек  $\sim 0.36$  м<sup>2</sup>) предлагается использовать генераторы мощностью: ВЧ  $\sim 2.5$  кВт и НЧ  $\sim 3.5$  кВт.

В разделе 5.3. даны рекомендации по использованию прибора спектрального контроля предназначенного для определения скорости осаждения и качества получаемой пленки a-Si:H в ходе плазмохимического осаждения. Выработаны рекомендации по структурной схеме прибора и способу вывода излучения плазмы к блоку фотозлектронных умножителей.

## ВЫВОДЫ

1. Создан экспериментальный технологический комплекс предназначенный для формирования слоев a-Si:H в комбинированном разряде силансодержащей плазмы, формируемом одновременным воздействием электромагнитных полей с частотами 13.56 МГц и 55 кГц, обеспечивающий осаждение аморфного гидрогенизированного кремния (с характеристиками –  $E_g = 1.7$  эВ,  $R^* < 0.4$ ,  $(\sigma_{\text{foto}} - \sigma_{\text{dark}}) > 10^5$ ) в силансодержащей плазме на подложках площадью до 300 см<sup>2</sup>, со скоростью 0.37 нм/с. В его состав входит диагностический комплекс и сканирующее устройство для исследования эмиссии плазмы и ее пространственного распределения /4, 8/.
2. Разработана актинометрическая методика предназначенная для определения концентрации атомарного водорода в силансодержащей плазме

комбинированного разряда, с ее помощью установлена корреляция между концентрацией атомарного водорода в разряде и содержанием водорода в структуре получаемого a-Si:H. Найдено, что регистрация отношения интенсивностей эмиссионных линий атомарного водорода и Ag(I), при осаждении a-Si:H, позволяет оценивать качество получаемой структуры (ширина запрещенной зоны пленок и концентрация в них водорода). При помощи оптической эмиссионной спектроскопии установлен качественный состав силансодержащей плазмы комбинированного разряда и его связь с параметрами разряда /2, 7, 11, 12/.

3. Разработана модель процесса формирования слоев a-Si:H в комбинированном разряде, позволяющая оценить скорость осаждения аморфного гидрогенизированного кремния, учитывая ионную составляющую в потоке пленкообразующих частиц, геометрию реактора, местоположение области наиболее вероятной генерации пленкообразующих радикалов и распыление пленки ионами аргона. Адекватность предложенного механизма осаждения и проведенного моделирования подтверждается совпадением результатов расчета с экспериментальными данными полученными в одночастотных и комбинированном разрядах /10/.
4. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения плазмы комбинированного разряда, формируемой одновременным воздействием ВЧ (13.56 МГц) и НЧ (55 кГц) электромагнитных полей, для осаждения качественных слоев a-Si:H. На основании проведенных исследований, определен оптимальный режим получения аморфного гидрогенизированного кремния в силансодержащей плазме комбинированного разряда ( $P \sim 60$  Па,  $Q \sim 2.83$  см<sup>3</sup>/с,  $T \sim 525$  К,  $U_{ВЧ} \sim 45$  В,  $U_{НЧ} \sim 230$  В). Установлено, что в этом случае, увеличение  $V_{OC}$  на 50–75 % по сравнению с высокочастотным разрядом происходит благодаря одновременному управлению химической активностью плазмы и плотностью ионного потока к поверхности роста /5, 15/. Показано, что в комбинированном разряде существует технологический режим, в котором рост скорости осаждения не сопровождается снижением качества получаемого аморфного гидрогенизированного кремния /1, 13, 14, 16/.
5. На основании проведенных экспериментов и расчетов разработаны практические рекомендации по совершенствованию способа формирования a-Si:H в плазме переменных электромагнитных полей, касающиеся выбора организации геометрии и конструкции разрядной камеры, схемотехнического решения согласующего устройства, средств контроля и диагностики процесса формирования a-Si:H, а также предложены варианты конструкций автоматизированных линий по производству фотовольтаических элементов на базе аморфного гидрогенизированного кремния /3, 6, 9/.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

## Статьи и материалы конференций

1. Осаждение пленок аморфного гидрогенизированного кремния в низкочастотной плазме / М.Н.Босяков, Д.И.Грунский, А.П.Достанко, Д.В.Жук, Г.Н.Вауер, М.Рösch -ФПТТ2: Материалы конф. Минск. Беларусь. 15-19 сентября 1997 г./ Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси. – Минск. 1997.-С. 764-767.
2. Спектральное исследование осаждения пленок a-Si:H в плазме НЧ разряда/ М.Н.Босяков, Д.И.Грунский, А.П.Достанко, Д.В.Жук, Б.Г.Будагян, А.Ю.Сазонов, А.А.Попов. - ФПТТ2: Материалы конф. Минск. Беларусь. 15-19 сентября 1997 г./ Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси. – Минск. 1997.-С. 495-498.
3. Осаждение пленок a-Si:H в тлеющем разряде/ М.Н.Босяков, Д.И.Грунский, А.П.Достанко, Д.В. Жук – ВАНТ: Материалы конф. Харьков 1998/ ННЦ ХФТИ. –1998.-С.215-216.
4. The application of low frequency glow discharge to high-rate deposition of a-Si:H/ В.Г.Budaguan, А.А.Popov, А.Yu.Sazonov, М.N.Bosyakov, D.I.Grunsky, D.W.Zhuk.// J. of Non-Cryst. Solids. -1998. - Vol.227-230. -P 39-42.
5. Осаждение пленок a-Si:H в комбинированном разряде/ М.Н.Босяков, Д.И.Грунский, А.П.Достанко, Д.В. Жук // Новые материалы и технологии: Материалы научно - технической конференции, Минск, 21-22 мая 1998 г./ ИММС НАНБ.- Минск, 1998. – С.60.
6. Босяков М.Н., Грунский Д.И., Жук Д.В. Получение пленок аморфного гидрогенизированного кремния в комбинированном разряде// Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике: Материалы конф. Брест 98/БПИ. – 1998.- Ч.2.- С.253- 256.
7. Босяков М.Н., Грунский Д.И., Жук Д.В. Контроль процесса осаждения пленок a-Si:H в силансодержащей плазме// Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике: Материалы конф. Брест 98/БПИ. – 1998.- Ч.2.- С.257- 262.
8. Босяков М.Н., Грунский Д.И., Достанко А.П. Плазма - химическое осаждение пленок аморфного гидрогенизированного кремния// Электронная обработка материалов. –1999.- №3, Кишинев. - С.52-60.
9. Установка для азотирования в плазме пульсирующего тока/ М.Н.Босяков, Д.И.Грунский, А.П.Достанко, С.В.Бондаренко, С.А.Кухарев, П.А.Матусевич, А.В.Савилов // Электронная обработка материалов. –1999.- №3, Кишинев. - С.66-69.
10. The model of growing films a-Si:H in the two-frequency discharge / М.N.Bosyakov, D.I.Grunsky, А.P.Dostanko, D.V. Zhuk // Plasma Physics and technology: Proceed. III int. Conf 18-22 sept. Minsk/ Institute of Molecular and Atomic Physics, National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk. 2000.- P.479-482.

11. Грунский Д.И. Исследование процесса получения пленок a-Si:H в комбинированном силансодержащем разряде, с помощью оптической эмиссионной спектроскопии// ЖПС. – 2000. – т. 67, №4. – С.423-426.

#### Тезисы докладов

12. Грунский Д.И. Оптическая эмиссионная спектроскопия (OES) силановой плазмы // Физика Конденсированных Сред: Тез. док. Гродно, 21-25 апреля 1997 г./ЛГУ. –Гродно, 1997. – С.35.
13. Грунский Д.И. Особенности осаждения аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) в низкочастотной плазме// Физика Конденсированных Сред: Тез. док. Гродно, 21-25 апреля 1997 г./ЛГУ. –Гродно, 1997. – С.34.
14. Deposition films a-Si:H in combined (LF+HF) discharge /D.I.Grunsky, M.N.Bosyakov, A.P.Dostanko, D.V. Juk // E-MRS: Abstracts– June 16-19. – 98//Strasbourg – Symposium E. – E-8.
15. Грунский Д.И. Скорости осаждения аморфного гидрогенизированного кремния в ВЧ, НЧ и комбинированном типах разряда// Физика Конденсированных Сред: Тез. док. Гродно, 22-24 апреля 1998 г./ЛГУ. – Гродно, 1998. – С.48.
16. Грунский Д.И. Исследование пространственного разрешения спектральных линий в НЧ разряде (55кГц, SiH<sub>4</sub> (5%)+Ar)// Физика Конденсированных Сред: Тез. док. Гродно, 22-24 апреля 1998 г./ЛГУ. – Гродно, 1998. – С.49.



## РЭЗЮМЕ

Грунскі Дзмітрый Ігаравіч, "Фарміраванне слаёў аморфнага гідрагенізаванага крэмнія ў сіланзмяшчаючай плазме камбінаванага разрада".

**Ключавыя словы:** плазмахімічнае асаджэнне, a-Si:H, камбінаваны разрад, аптычная эмісійная спектраскапія, актынаметрычная методыка, таўшчыня кагоднага слою.

Праведзена даследаванне працэса фарміравання слаёў аморфнага гідрагенізаванага крэмнія (a-Si:H) ў камбінаваным разрадзе пры адначасовым уздзеянні ВЧ і НЧ палеў. Распрацаван і створан эксперыментальны комплекс для асаджэння a-Si:H на падложках плошчай да 300 см<sup>2</sup>. Ён ўтрымлівае разрадную сістэму ў плазмабоксе, згаджаюшчае ўстройства, ВЧ і НЧ генератары, дыягнастычны комплекс і сканіруюшчае ўстройства для даследавання эмісіі сіланзмяшчаючай плазмы.

Прапанавана фізічная мадэль працэса асаджэння a-Si:H якая ўзгаджаецца з атрыманымі ў камбінаваным разрадзе эксперыментальнымі вынікамі. Мадэль улічвае іонны паток да паверхні росту плёнкі і  $\alpha$  -  $\gamma$  пераход рэжыма гарэння разрада.

Распрацавана актынаметрычная методыка для кантролю канцэнтрацыі атамарнага вадароду ў сіланзмяшчаючай плазме камбінаванага разрада. З дапамогай распрацаванай методыкі ўстаноўлена, што кантроль канцэнтрацыі атамарнага вадароду у сіланзмяшчаючай плазме, дазваляе слядзіць за якасцю атрымліваемых слаёў a-Si:H у працэсе асаджэння.

Тэарэтычна абгрунтавана і эксперыментальна пацвержана эфектыўнасть прыменення плазмы камбінаванага разраду дзеля павілічэння хуткасі асаджэння якасных слаёў a-Si:H. Вызначан аптымальны рэжым атрымання аморфнага гідрагенізаванага крэмнія ў сіланзмяшчаючай плазме камбінаванага разрада ( $P \sim 60$  Па,  $Q \sim 2.83$  см<sup>3</sup>/с,  $T \sim 525$  К,  $U_{ВЧ} \sim 45$  В,  $U_{НЧ} \sim 230$  В) У такім разрадзе, у адрозненні ад ВЧ разрада, існуе тэхналагічны рэжым, у якім павялічэнне хуткасі асаджэння не прыводзіць да зніжэння якасці атрымліваемага аморфнага гідрагенізаванага крэмнія.

Распрацаваны практычныя рэкамендацыі па удасканалванню спосаба плазмахімічнага фарміравання a-Si:H. Яны дотычацца арганізацыі геаметрыі і канструкцыі разраднай камеры, схематэхнічнага рашэння згаджаюшчага ўстройства, сродкаў кантролю і дыягностыкі працэса фарміравання a-Si:H.

## РЕЗЮМЕ

Грунский Дмитрий Игоревич, «Формирование слоев аморфного гидрогенизированного кремния в силансодержащей плазме комбинированного разряда».

**Ключевые слова:** плазмохимическое осаждение, a-Si:H, комбинированный разряд, оптическая эмиссионная спектроскопия, актинометрическая методика, толщина катодного слоя.

Проведено исследование процесса формирования слоев аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) в комбинированном разряде при одновременном воздействии ВЧ и НЧ полей. Разработан и создан экспериментальный комплекс для осаждения a-Si:H на подложках площадью до 300 см<sup>2</sup>. Он содержит разрядную систему в плазмобоксе, согласующее устройство, ВЧ и НЧ генераторы, диагностический комплекс и сканирующее устройство для исследования эмиссии силансодержащей плазмы.

Предложена физическая модель процесса осаждения a-Si:H, которая согласуется с полученными в комбинированном разряде экспериментальными результатами. Модель учитывает ионный поток к поверхности роста пленки и  $\alpha$ - $\gamma$  переход режима горения разряда.

Разработана актинометрическая методика для определения концентрации атомарного водорода в силансодержащей плазме комбинированного разряда. При помощи разработанной методики найдено, что контроль концентрации атомарного водорода, в силансодержащей плазме, позволяет следить за качеством получаемых слоев a-Si:H в процессе осаждения.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения плазмы комбинированного разряда для увеличения скорости осаждения качественных слоев a-Si:H. Определен оптимальный режим получения аморфного гидрогенизированного кремния в силансодержащей плазме комбинированного разряда ( $P \sim 60$  Па,  $Q \sim 2.83$  см<sup>3</sup>/с,  $T \sim 525$  К,  $U_{ВЧ} \sim 45$  В,  $U_{НЧ} \sim 230$  В). В таком разряде, в отличие от ВЧ разряда, существует технологический режим, в котором увеличение скорости осаждения не сопровождается снижением качества получаемого аморфного гидрогенизированного кремния.

Разработаны практические рекомендации по совершенствованию способа плазмохимического формирования a-Si:H. Они касаются организации геометрии и конструкции разрядной камеры, схемотехнического решения согласующего устройства, средств контроля и диагностики процесса формирования a-Si:H.

## SUMMARY

Grunsky Dmitry Igorevich, "Deposition of a-Si:H in silanconsider plasma of twofrequency discharge".

**Keywords:** plasma enhanced deposition, a-Si:H, combined discharge, optical emission spectroscopy, actinometrical method, thickness of a sheath.

The research of deposition process of layers amorphous hydrogenated silicon (a-Si:H) in twofrequency discharge (is conducted at simultaneous influence of a RF and LF of electromagnetic fields) is carry out. Is designed and the experimental installation for a deposition a-Si:H on substrates by the area up to  $300 \text{ cm}^2$  is created. It contains a digit system in plasma-box, matching box, RF and LF generators, diagnostic complex and scanner for research of emission of silanconsider plasma.

The physical model of process deposition a-Si:H has been proposed, which is in agreement with obtained experimental data, received in combined discharge. The model takes into account an ionic flow to a surface a-Si:H and  $\alpha - \gamma$  transition of regime discharge.

The actinometrical method for the control of concentration atomic hydrogen in silanconsider plasma of combined discharge is designed. Through a designed method is retrieved, that the control of concentration of an atomic hydrogen, in silanconsider plasma, allows to keep track of by quality of received layers a-Si:H at the deposition process.

The efficiency plasma of twofrequency discharge is theoretically and experimentally confirmation for increase of deposition rate of quality lays a-Si:H The optimum regime to plasma of combined discharge is determined ( $P \sim 60 \text{ Pa}$ ,  $Q \sim 2.83 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $T \sim 525 \text{ K}$ ,  $U_{\text{RF}} \sim 45 \text{ V}$ ,  $U_{\text{LF}} \sim 230 \text{ V}$ ). In such discharge, as against a RF of discharge, there is a technological mode, in which one the increase deposition rate is not accompanied by a decrease of quality of received amorphous hydrogenated silicon.

The practical recommendations on perfecting a way of formation a-Si:H at plasma chemical vapour deposition are designed. They concern organisation of geometry and design of the digit chamber, of the solution of matching box, means of the in-situ control and diagnostic of deposition process a-Si:H.

Грунский Дмитрий Игоревич

**Формирование слоев аморфного  
гидрогенизированного кремния в силансодержащей  
плазме комбинированного разряда**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать	12.03.2001	Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная.	Печать ризографическая	Усл.печ.л. 1,63.
Уч.-изд.л. 1,0.	Тираж 90 экз.	Заказ 142.

---

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП №156  
220013 Минск, П.Бровки, 6