

На правах рукописи

Салтымаков Максим Сергеевич

**Импульсное осаждение полупроводниковых плёнок GaAs и InP из аб-  
ляционной плазмы, формируемой мощным ионным пучком**

01.04.07 - «Физика конденсированного состояния»

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

Томск – 2010

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Ремнев Геннадий Ефимович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор,  
**КОХАНЕНКО Андрей Павлович**

доктор технических наук,  
**ГРАДОБОЕВ Александр Васильевич**

Ведущая организация: **ГОУ ВПО Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск**

Защита состоится 24 марта 2010 в 16:00 часов  
на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г.Томск, пр.Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан «    » февраля 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций  
доктор физико-математических наук

Коровкин М.В.

### **Актуальность работы:**

Разработка научных и технических основ практического использования мощных импульсных пучков заряженных частиц ведется на протяжении последних трех десятилетий. При переходе от непрерывного к высокоинтенсивному импульсному режиму облучения происходит качественное изменение процессов происходящих в облучаемых материалах. Исследования, связанные с разработкой ионно-пучковых технологий, ведутся в нескольких направлениях: осаждение плёнок на подложку путём распыления мишеней определенного состава; предварительная обработка подложки перед осаждением покрытий для улучшения их адгезионной прочности; направленное изменение величины шероховатости поверхности обрабатываемых изделий при варьировании параметров пучка; модифицирование кристаллической структуры поверхностного слоя; изменение элементного состава поверхностного слоя путём имплантации в самоотжиговом режиме или ионного перемешивания атомов мишени и плёнки, предварительно нанесённой на мишень.

Перспективным направлением исследований, имеющих потенциально высокую практическую значимость, является использование импульсной абляционной плазмы для формирования тонких металлических и полупроводниковых пленок. Данные работы развиваются в нескольких лабораториях России, США, Японии, Китая. Особенности такого метода осаждения, заключающиеся в низких удельных энергозатратах пучка на формирование абляционной плазмы, узкой направленности распространения абляционного материала, возможности осаждения пленок сложных химических соединений с высокой степенью стехиометрии по отношению к мишени, являются определяющими для практического использования данного метода в такой области, например, как формирование пленочных структур для солнечной энергетики.

Вместе с этим, такие данные как: закономерность коэффициента импульсной эрозии мишени при многократном (частотно-импульсном) воздействии мощных ионных пучков, возможность формирования тонких многослойных полупроводниковых пленок, определение электрофизических свойств таких пленок, важные для практического применения в литературе отсутствуют. В связи с этим данная работа посвященная исследованию осаждения полупроводниковых пленок на примере GaAs, InP при частотно-импульсном воздействии МИП видится актуальной.

Работа выполнена в НИИ высоких напряжений ТПУ при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 06-08-00768-а «Импульсное осаждение пленок GaAs из абляционной плазмы, формируемой мощным ионным пучком»).

**Цель работы:** экспериментальное исследование импульсной абляции при частотно импульсном воздействии мощного ионного пучка на полупроводниковую мишень и формирования тонких полупроводниковых пленок GaAs и InP.

**Основными задачами данной работы являются:**

1. Научно-техническое обоснование и оптимизация устройства для формирования полупроводниковых пленок из абляционной плазмы, формируемой мощным ионным пучком.
2. Исследование закономерностей импульсной абляции полупроводниковых материалов на примере GaAs.
3. Исследование элементного и фазового состава осаждённых плёнок GaAs, InP, а также морфологии их поверхности.
4. Исследование электрофизических свойств полупроводниковых плёнок GaAs.

**Научная новизна работы заключается в том,** что установлены новые закономерности импульсной эрозии полупроводниковой мишени GaAs, впервые показана возможность осаждения пленок InP из абляционной плазмы.

1. Показано, что коэффициент импульсной эрозии мишени из GaAs уменьшается при увеличении числа импульсов воздействия, вследствие изменения морфологии поверхности мишени и модифицирования поверхностного слоя предыдущими импульсами тока ионного пучка.
2. Установлено, что рельеф поверхности плёнки GaAs, осаждённой из абляционной плазмы сглаживается, при осаждении пленки на нагретую выше 200°C кремниевую подложку.
3. Определено, что половинный угол распространения абляционного материала GaAs ниже, чем при распылении металлических материалов и составляет величину  $12^\circ \pm 2^\circ$ .
4. Впервые показано, что плёнки InP, осаждённые из абляционной плазмы, формируемой импульсным ионным пучком, сохраняют стехиометрию объёмной мишени и являются поликристаллическими.

**Практическая ценность работы.** Количественные данные результатов экспериментальных исследований по коэффициенту импульсной эрозии, половинному углу распространения абляционного материала GaAs, линейных размерах диод – мишень – подложка, толщине осаждаемой пленки за один импульс составляет научно-техническую основу разработки опытного процесса синтеза полупроводниковых пленочных структур для солнечных фотоэлектрических приборов.

Результаты экспериментальных исследований использованы в курсе лекций «Получение и применение пучков заряженных частиц» для магистрантов и студентов ТПУ.

**Реализация работы.** Результаты диссертационной работы использованы в ГОУ ВПО НИИ Высоких Напряжений при ТПУ (г. Томск).

**Достоверность и обоснованность результатов работы** подтверждается использованием независимых экспериментальных методов анализа, сопоставлением результатов экспериментов и численных расчетов. Полученные результаты не противоречат существующим представлениям о механизме осаждения тонких пленок методом импульсной абляции.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Коэффициент импульсной эрозии материала GaAs и его разброс снижаются с увеличением числа импульсов тока ионного пучка на мишень, половинный угол распространения абляционного материала GaAs ниже, чем при распылении металлических материалов и составляет величину менее  $12^\circ \pm 2^\circ$ .
2. Плёнки InP, GaAs, осаждённые на кремниевую подложку при комнатной температуре, сохраняют стехиометрический состав объёмной мишени и являются поликристаллическими.
3. Рельеф поверхности плёнки GaAs, осаждённой из абляционной плазмы сглаживается при осаждении пленки на нагретую выше  $200^\circ\text{C}$  кремниевую подложку.
4. Многослойные пленки GaAs с толщиной каждого слоя 1-5нм, осажденные из абляционной плазмы, достигают максимальной фоточувствительности при вакуумном отжиге до температуры 600-700К и имеют спектральную фоточувствительность:  $h\nu=1.2 - 4.0$  эВ.

**Апробация результатов работы.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на «International Conference «Korus 2005», девятой конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V», 2006 г., конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики», 2006 г., «International Conference Interaction of Radiation with Solids», 2005, 2007 г., V международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», 2006 г., международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах 2007», 15<sup>th</sup>, 16<sup>th</sup> International Conferences on Surface Modification of Materials by Ion Beam», 2007, 2009 г., «17<sup>th</sup> International Conference on High-Power Particle Beams», 2008 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 14 работ, 5 из которых в научных журналах рекомендованных ВАК, 9 в трудах международных научных конференций.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 102 страницах машинописного текста, иллюстрируется 39 рисунками и 3 таблицами, состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 97 наименований.

### **Содержание работы:**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, представлена цель исследования, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, апробация результатов работы, структура и объём диссертации.

**В первой главе** приведён литературный обзор областей применения тонких плёнок в современной технике, описаны существующие методы их получения, особое внимание уделено импульсным методам осаждения тонких пленок, приведен сопоставительный анализ особенностей импульсного и непрерывного методов осаждения.

Важной областью применения тонких плёнок является солнечная энергетика. Метод преобразования солнечной энергии в электрическую, с помощью полупроводниковых солнечных элементов является наиболее разработанным в научном и практическом плане. Стоимость получаемой таким образом электроэнергии значительно превосходит стоимость электроэнергии вырабатываемой традиционными методами. Именно это является основной причиной, сдерживающей развитие крупномасштабной солнечной электроэнергетики. Один из путей решения данной проблемы – снижение стоимости изготовления пленочных полупроводниковых структур.

В полупроводниках с прямыми оптическими переходами коэффициент поглощения фотоактивной части солнечного спектра происходит в слое толщиной не более нескольких микрометров. В тоже время большинство выпускаемых солнечных элементов изготавливается из монокристаллических полупроводниковых пластин. Они имеют толщину около двухсот – трёхсот микрометров, поскольку применять в массовом производстве более тонкие пластины не удаётся из-за их повышенной хрупкости. В этом разрыве между теоретическими и практическими возможностями заключен резерв дальнейшего удешевления солнечных элементов.

На основе проведенного литературного обзора сформулировано обоснование актуальности проводимых исследований по использованию

метода осаждения полупроводниковых пленок GaAs и InP из абляционной плазмы, формируемой на мишени мощным ионным пучком.

**Вторая глава** посвящена методике проведения исследований, приведено описание импульсного ионного ускорителя «ТЕМП» с двумя диодными системами, первая основана на диоде с магнитной самоизоляцией, вторая на диоде с внешней магнитной изоляцией. Приведены параметры ионного пучка, обеспечиваемые обоими типами диодных систем. Представлена методика осаждения тонких плёнок из абляционной плазмы. Описано диагностическое оборудование, привлекаемое для контроля параметров ускорителя, а также методы исследования осаждённых плёнок используемые в работе.

Непосредственно импульсный ускоритель заряженных частиц состоит из высоковольтного источника зарядного напряжения, высоковольтного генератора Аркадьева-Маркса, модифицированной двойной формирующей линии (ДФЛ) на основе деионизованной воды, вакуумной рабочей камеры, включающей магнитоизолированный диод (МИД), импульсного источника напряжения для формирования магнитного поля в диоде, вакуумной системы ускорителя, системы подготовки воды для ДФЛ.

В таблице 1 приведены основные параметры ускорителя с различными диодными системами.

Таблица 1 – Основные параметры ускорителя

Параметры ускорителя	МИД с само- изоляцией	МИД с внеш- ней изоляцией
Ускоряющее напряжение, кВ	250 – 300	350 – 500
Длительность импульса напряжения, нс	80	80
Состав ионного пучка	C <sup>+</sup> , H <sup>+</sup>	C <sup>+</sup> , H <sup>+</sup>
Плотность ионного тока на мишени, А/см <sup>2</sup>	100 – 250	100 – 350
Плотность энергии на мишени, Дж/см <sup>2</sup>	1,2 – 3,8	3,2 – 8,5
Частота следования импульсов, мин <sup>-1</sup>	15 – 20	3 – 5

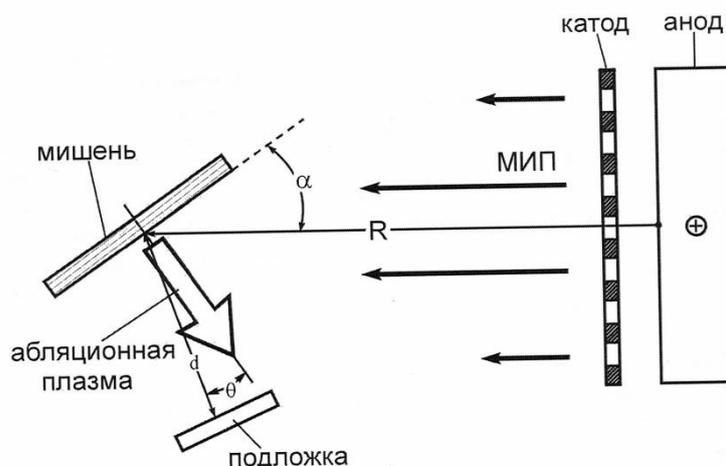
На рисунке 1 представлена схема расположения мишени, подложки и ионного диода. Мишень устанавливалась на расстоянии R от анода диода, под углом  $\varphi=30 - 60^\circ$  к оси распространения ионного пучка. В направлении нормали к поверхности мишени на расстоянии  $d=50 - 160$  мм от мишени устанавливается подложка, параллельно или под небольшим углом к поверхности мишени ( $\Theta < 30^\circ$ ).

Откачка рабочей камеры ускорителя производится до остаточного давления  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  Па с помощью диффузионного насоса.

Осаждение плёнки осуществляется серией из  $N$  импульсов.

В настоящей работе расстояние между вакуумным диодом и мишенью -  $R$  составляло 120 - 180 мм, в зависимости от типа диодной системы. Эта величина выбрана на основе экспериментальных зависимостей, связывающих плотность тока МИП и материал мишени. Плотность тока в диапазоне  $100 - 250 \text{ А/см}^2$ , число импульсов -  $N$  от 2 до 200.

Осаждение плёнок производилось как на нагретые подложки (до  $250^\circ\text{C}$ ) так и при комнатной температуре. Нагрев производился с помощью вольфрамового нагревателя.



$R$  – расстояние от анода до центра мишени;  $\alpha$  – угол падения пучка на поверхность мишени;  $d$  – расстояние между мишенью и подложкой;  $\theta$  – угол между поверхностью подложки и нормалью к мишени.

Рисунок 1 – Принципиальная схема процесса осаждения тонких плёнок из абляционной плазмы.

В таблице 2 приведены методы анализа используемые в данной работе.

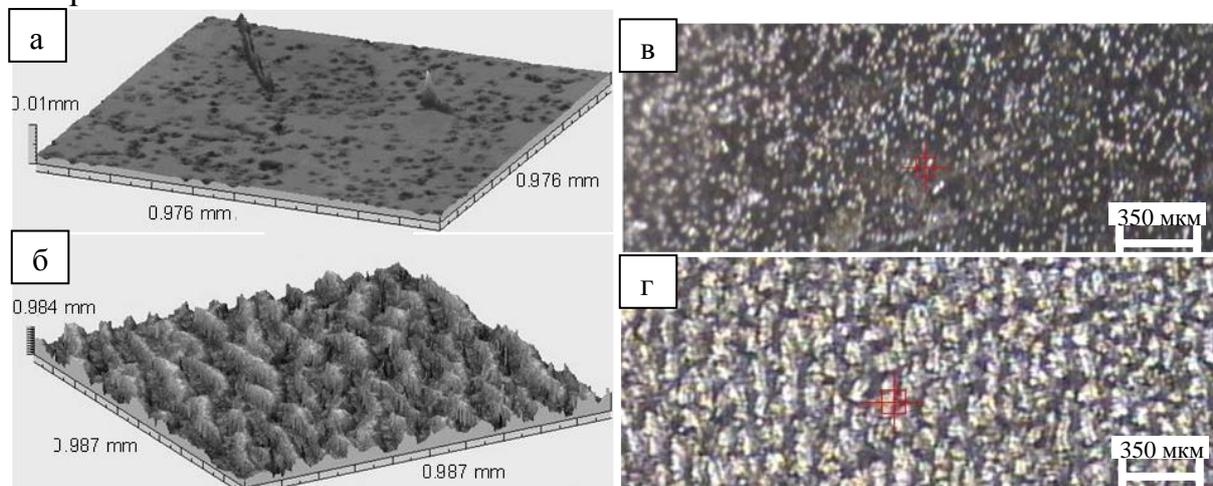
Таблица 2 – Методы анализа применяемые в настоящей работе

Метод анализа	Результат
Рентгенофазовый анализ	Кристаллическая структура, размер кристаллитов
Просвечивающая электронная микроскопия	Кристаллическая структура, размер кристаллитов
Атомно-силовая микроскопия	Микрорельеф поверхности, шероховатость
Оже-спектроскопия	Элементный состав плёнок, профиль распределения элементов
Обратное Резерфордское рассеяние	Элементный состав плёнок, профиль распределения элементов

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента импульсной эрозии, морфологии поверхности и

кристаллической структуры поверхностного слоя мишени из GaAs после воздействия различного числа импульсов тока пучка.

На рисунке 2 приведены фотографии морфологии поверхности мишени, полученные методом бесконтактной профилометрии и оптического микроскопа.



а) - исходная мишень, бесконтактная профилометрия; б) – после 200 импульсов, бесконтактная профилометрия; в) – исходная мишень, оптическая микроскопия; г) – после 200 импульсов, оптическая микроскопия.

Рисунок 2 – Морфология поверхности мишени из GaAs.

Показано, что на мишени из GaAs формируется явно выраженная регулярная волнообразная структура поверхности, характер профиля которой сохраняется при последующем увеличении числа импульсов.

Поверхность мишеней GaAs имеет волнообразную структуру, схожую со структурой рельефа поверхности металлических мишеней. Таким образом, поверхностный рельеф имеет схожий характер для металлических мишеней и полупроводникового материала GaAs.

На полупроводниковой мишени из GaAs образование такой структуры при воздействии МИП обнаружено впервые. Характерный период рельефа - приблизительно 100 мкм. Формирование такого рельефа может быть связано с крупномасштабными неустойчивостями, которые возникают при взаимодействии пучка с мишенью.

Результаты исследования зависимости толщины распыленного слоя образцов, за один импульс, от числа последовательных импульсов тока пучка на мишень ( $N_i$ ) приведены на рисунке 3. Исходная шероховатость всех образцов была идентичной.

Толщина распыленного слоя GaAs рассчитывалась из массы унесенного материала. Масса образцов определялась методом взвешивания мишеней до, и после воздействия пучка. Разница в этих значениях и составляла величину импульсной эрозии.

Характерным является более высокий разброс и более высокое значение  $h$  при начальных значениях  $N_i$ . После воздействия 40 – 60 импульсов пучка на мишень значение  $h$  снижается и стабилизируется от выстрела к выстрелу. Толщина расплывённого слоя, исходя из значений, приведенных на рисунке 3, снижается до 140 - 100 нм за один импульс, при числе импульсов от 100 до 200.

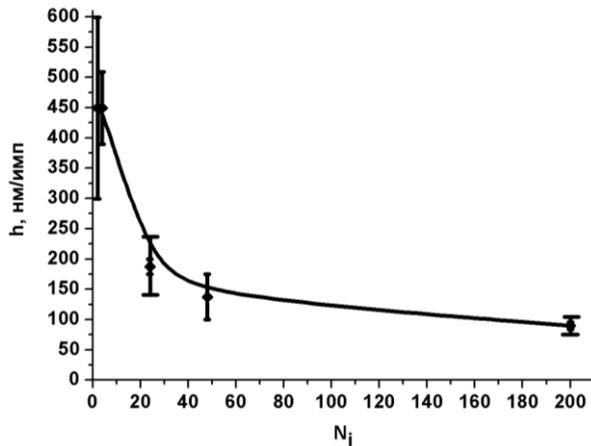


Рисунок 3 – Толщина слоя мишени ( $h$ ) расплывённого за один импульс, от числа последовательных импульсов тока ( $N_i$ ).

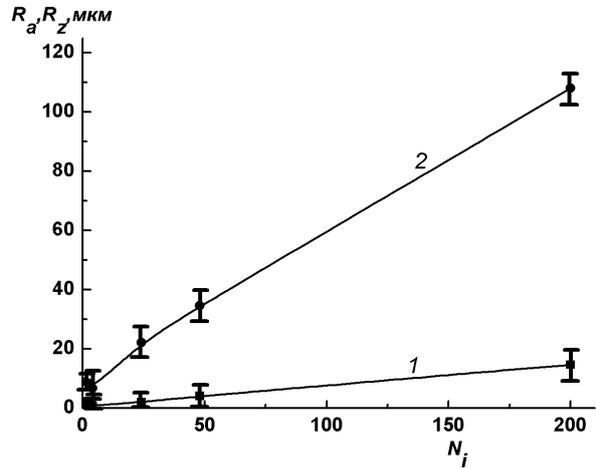


Рисунок 4 – Зависимость параметров шероховатости мишени из GaAs (1 –  $R_a$ , 2 –  $R_z$ ) от числа последовательных импульсов тока МИП на мишень.

Зависимость коэффициента средней  $R_a^1$  и максимальной  $R_z^2$  шероховатостей мишени из GaAs в зависимости от числа последовательных импульсов на мишень приведена на рисунке 4.

Из рисунка видно, что шероховатость поверхности ( $R_a, R_z$ ) плавно увеличивается с возрастанием числа последовательных импульсов тока пучка на мишень, рисунок 3. Более высокая скорость роста параметра  $R_z$  по сравнению с  $R_a$  связана с формированием волнообразной регулярной структуры поверхности мишени с высокими выступами, рисунок 2.

Из литературы известно, что величина импульсной эрозии медных образцов при воздействии импульсного мощного ионного пучка зависит от размера зерна медных образцов, который в свою очередь формируется при воздействии предыдущих импульсов тока пучка. Можно предположить, что для полупроводниковых мишеней, в частности GaAs, существует такая же зависимость. Для определения изменения кристаллической структуры ми-

<sup>1</sup>  $R_a$  – представляет собой среднее значение в пределах базовой длины расстояний точек выступов и впадин от средней линии профиля

<sup>2</sup>  $R_z$  – среднее расстояние между находящимися в пределах базовой длины пятью высшими точками выступов и низшими точками впадин, измеренное от произвольной линии АВ, параллельной средней линии профиля

шени из GaAs при последовательном воздействии МИП на мишень, использовался рентгенографический анализ.

Рентгенографические исследования используемых мишеней GaAs проводились на дифрактометре фирмы Shimadzu XRD – 600 на  $\text{CuK}(\alpha)$  излучении. После воздействия импульсов тока  $N_i$  более 100 интенсивность дифракционных линий уменьшается. Интегральные интенсивности дифракционных отражений слоевой линии (hhh) также уменьшаются (для 200 импульсов в 10 раз), кроме того, наблюдаются слабые отражения, не принадлежащие указанной слоевой линии. С учётом того, что глубина анализа составляет 5 - 6 мкм, указанные факты, свидетельствуют о появлении поликристаллической структуры в поверхностном слое GaAs. При этом размеры области когерентного рассеяния монокристаллического GaAs уменьшаются до  $20 \pm 10$  нм.

Экспериментальные данные о снижении коэффициента импульсной эрозии и зависимости шероховатости поверхности мишени при возрастании числа импульсов тока на мишень для GaAs получены впервые.

По всей видимости, величина импульсной эрозии зависит как от размера кристаллитов, которые измельчаются после воздействия пучка, так и от рельефа поверхности мишени, который также зависит от числа предшествующих импульсов тока на мишень.

Помимо этого, важной характеристикой для практического использования метода импульсного ионного осаждения, является угловая расходимость распространения абляционного материала, поскольку она определяет коэффициент использования рабочего вещества мишени.

Для определения половинного угла распространения абляционного материала использовалась мишень АГЧТ 363-3, представляющая собой круглую подложку диаметром 30 мм и толщиной 2 мм, кристаллографическое направление 111. Мишень устанавливалась на расстоянии 120 мм от диода (фокусное расстояние) под углом  $20^\circ$  относительно нормали плоскости диода, параллельно плоскости полочки. Расстояние мишень – подложка варьировалось от 50 до 160 мм. Напыление производилось на лавсановую подложку серией импульсов, число импульсов в серии менялось от 10 до 50 в зависимости от расстояния мишень – подложка. В дальнейшем, пленки денситометрировались и строились профили толщины осажденной пленки. На рисунке 5 приведены полученные профили распределения толщины пленки по подложке.

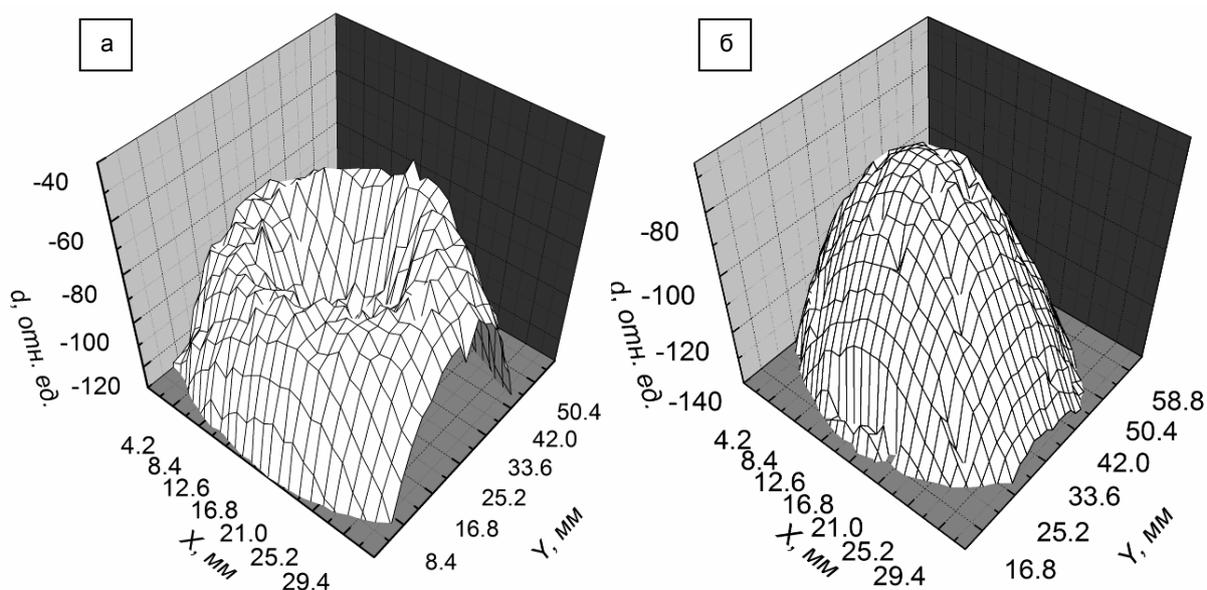


Рисунок 5 – Профиль распределения толщины плёнки ( $d$ ) по подложке: а) расстояние мишень подложка 7 см; б) расстояние мишень подложка 10 см.

Из рисунка видно, что пленка, осажденная на расстоянии 7 см, имеет меньшую толщину в центральной части, рисунок 5а. Это связано с эрозией (распылением) осаждаемой пленки абляционной плазмой, движущейся в составе абляционного материала, которая имеет на близких расстояниях от мишени плотность переносимой энергии достаточную для эрозии уже осажденной пленки в предыдущих импульсах. На больших расстояниях плотность абляционной плазмы снижается, так же как и плотность переносимой энергии и заметной эрозии не наблюдается. Оптимальное расстояние, которое было определено из экспериментальных зависимостей для GaAs, составляет 9 – 12 см, когда не происходит заметной эрозии пленки абляционной плазмой (рисунок 5б).

**В четвертой главе** представлены результаты исследования плёнок GaAs и InP осажденных из абляционной плазмы на кремниевую подложку, данные об элементном и фазовом составе, морфологии поверхности осажденных плёнок, результаты исследования зависимости шероховатости плёнок GaAs от температуры подложки. Заключительная часть главы посвящена результатам исследований электрофизических свойств плёнок GaAs осажденных на поликор.

При использовании абляционного метода осаждения важной характеристикой является стехиометричность пленки, по отношению к составу мишени. Анализ химического состава пленки GaAs осажденной из абляционной плазмы, был проведен методом резерфордовского обратного рассеяния. На рисунке 6 приведено распределение элементов по глубине, плёнки GaAs осажденной на кремниевую подложку пятьюдесятью после-

довательными импульсами. Из рисунка видно, что элементы As и Ga сравнительно равномерно распределены по толщине пленки. Толщина пленки осажденной за один импульс в данном случае составляет приблизительно 10 нм.

На рисунке 7 приведено распределение элементов по глубине, плёнки InP осаждённой на кремниевую подложку пятьюдесятью последовательными импульсами. Исследование этих пленок методом Оже-спектроскопии показало, что стехиометрический состав объёмной мишени сохраняется и для плёнок InP.

Фазовый состав плёнок InP исследовался методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Показано, что осаждённая плёнка является поликристаллической и состоит из двух фаз: первая InP-Cub (225) её содержание 36.65%, средний размер области когерентного рассеяния равен 9 нм; вторая InP-Cub (216) 63.35%, средний размер области когерентного рассеяния также равен 9 нм.

Морфология поверхности пленок GaAs при изменении температуры подложки в диапазоне от 20 до 250 °С анализировалась методом атомно-силовой микроскопии. В качестве нагревателя использовалась вольфрамовая фольга. Полученные изображения представлены на рисунках 8а (150°С) и 8б (200°С).

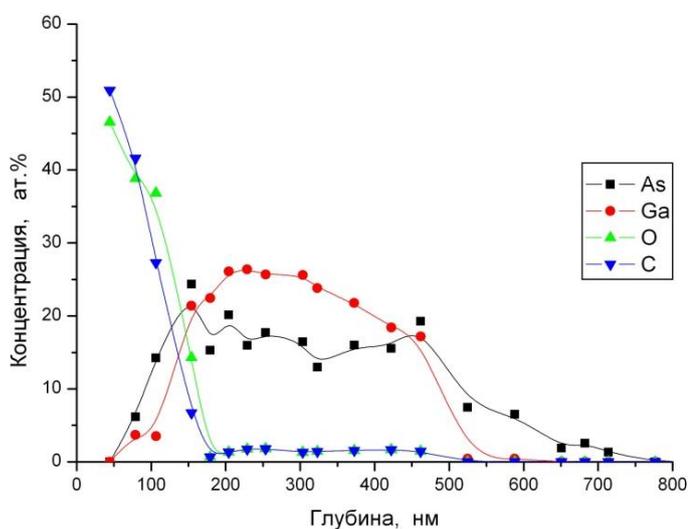


Рисунок 6 – Элементный состав плёнки GaAs, полученный методом POP.

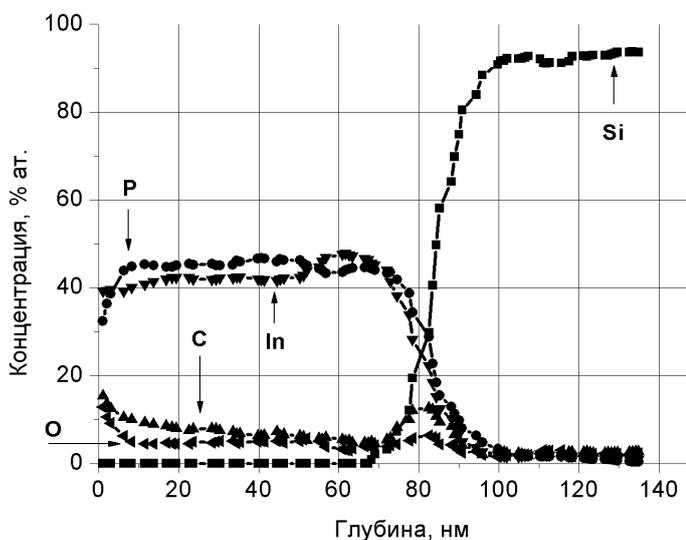


Рисунок 7 – Элементный состав плёнки InP, полученный методом Оже-спектроскопии.

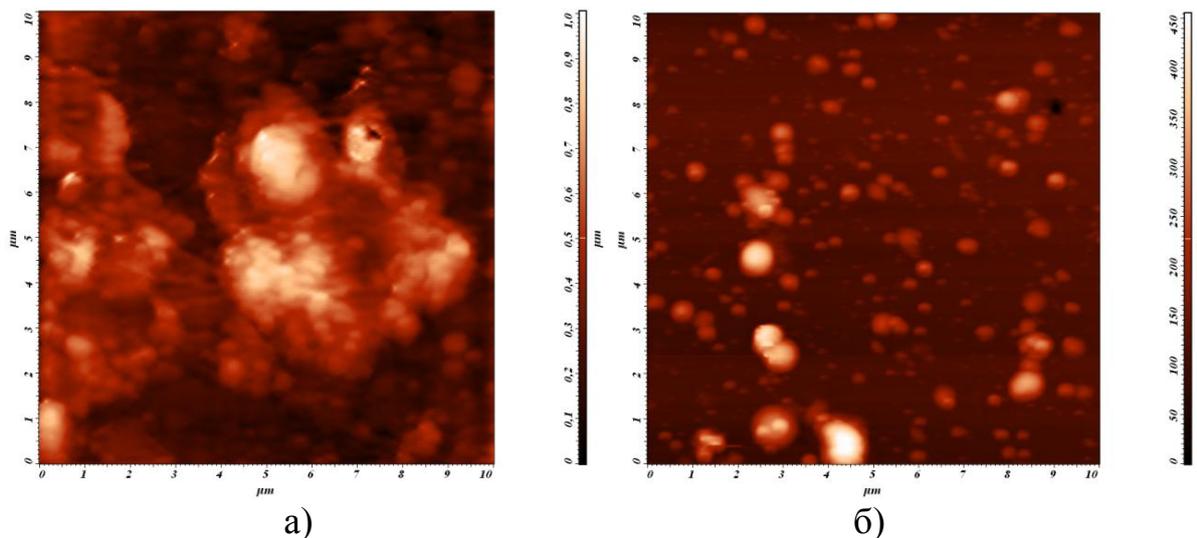


Рисунок 8 – Изображение плёнок GaAs осаждённых на нагретые кремниевые подложки: а) 100°C, б) 200°C.

Из представленных рисунков видно, что максимальная шероховатость осаждённых плёнок снижается при увеличении температуры подложки. Так, например, шероховатость пленок уменьшается в два раза при увеличении температуры подложки от 100 °С до 200 °С.

Для повышения эффективности солнечных элементов (СЭ) и других приборов электроники, использующих фотовольтаические свойства полупроводниковых материалов, наряду с усовершенствованием технологии производства конечных изделий требует исследования электронных процессов, происходящих в пленках. Установление связи параметров электронных устройств со структурными, электрофизическими и оптическими характеристиками полупроводниковых пленок, анализ причин их изменения необходимы для целенаправленного управления свойствами конечных приборов. В связи с этим были проведены исследования фотоэлектрических свойств пленок GaAs осажденных из абляционной плазмы.

Коэффициент поглощения  $\alpha(h\nu)$  в интервале  $h\nu=1.4-3.2$  эВ, рассчитанный из спектров отражения  $\beta(h\nu)$ , для пленок в 5 - 10 раз выше, чем для мишени GaAs (рисунок 9). Цветовые характеристики пленок при указанных условиях осаждения соответствуют исходному ахроматическому GaAs по виду спектра  $\beta(h\nu)$ , по координатам цвета и цветности. Некоторые из пленок обладают значительно большей насыщенностью, условной чистотой цвета, определенным цветовым тоном и повышенной долей красной и желто-зеленой составляющих отраженного света (рисунок 9, кривая 3). Различия в характеристиках плёнок, возможно, обусловлены тем, что в периферийных областях меньше капельной фракции и имеет место нарушение стехиометрического состава.

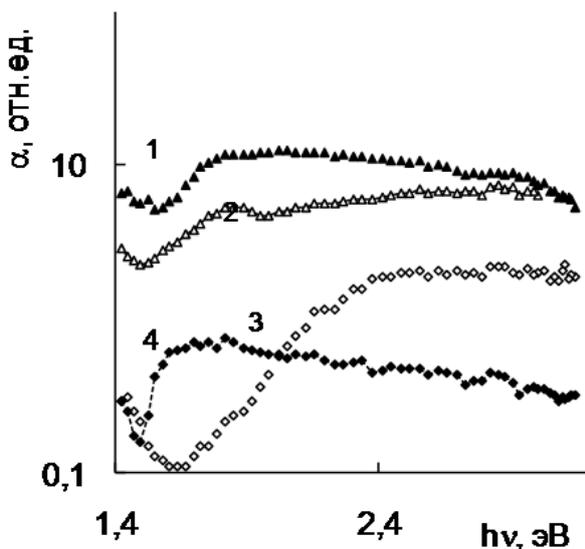


Рисунок 9 – Спектры поглощения  $\alpha(h\nu)$  пленок GaAs на поликоре (1-3) и мишени низкоомного GaAs ( $\approx 10^{-3}$  Ом см) (4)

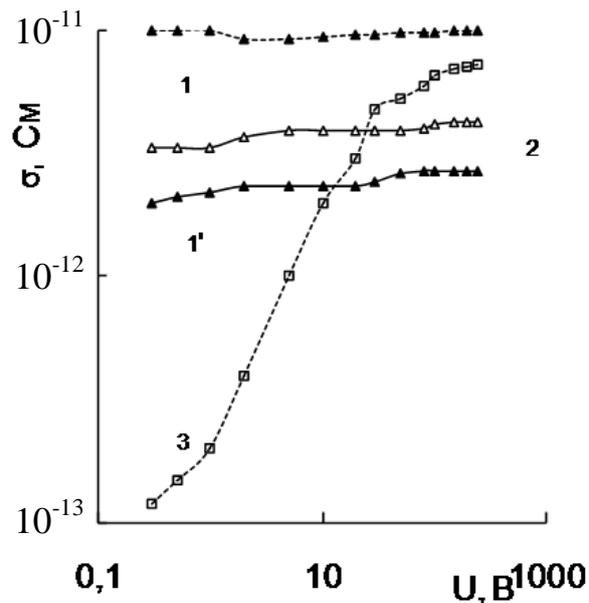


Рисунок 10 – Темновая вольт-амперная характеристика пленок GaAs до отжига (1, 2, 3) и после отжига при  $T_{отж}=620$  К(1')

Различие в оптических характеристиках отражается на электрофизических и фотоэлектрических свойствах пленок, рисунок 10. Электропроводность исходных пленок изменяется от  $\sigma=10^{-13}$  См до  $10^{-11}$  См. Пленки, имеющие спектры поглощения типичные для полупроводниковых материалов, обладают более высокой электропроводностью, а их характеристики  $\sigma(U)$  отклоняются от закона Ома незначительно (рисунок 9, кривые 1, 2; рисунок 10, кривые 1, 2). Для пленок, спектры поглощения которых, подобны спектрам аморфных сильно дефектных материалов, характерна более низкая  $\sigma$  (рисунки 9, 10, кривые 3). Кроме того, в этих пленках наблюдается нелинейная зависимость  $\sigma(U)$ , свидетельствующая о сильном влиянии на электропроводность объемного приповерхностного заряда (рисунок 10, кривая 3). Отжиг в интервале 300 - 650 К практически не влияет на ход  $\sigma(U)$ , т.е. факторами, определяющими свойства пленок, являются условия их осаждения (рисунок 10, кривые 1, 1').

Отжиг в вакууме более значительно влияет на изменение фоточувствительности, чем на электропроводность. После отжига при 300 - 750 К проявляется часто встречающееся для фотопроводящих материалов поведение – увеличение  $K$  с ростом проводимости. Максимальная фоточувствительность достигается после отжига при 600 - 750 К и проводимости  $\sigma=10^{-10}$  -  $10^{-8}$  См. Подобное увеличение фоточувствительности с отжигом проявляется в большинстве материалов и может быть связано с изменением распределения центров поверхностной рекомбинации или с увеличением содержания кристаллической фазы в материале.

На рисунке 11 приведена спектральная зависимость fotocувствительности пленки  $K_i(h\nu)$ .

Спектральное распределение fotocувствительности  $K_i(h\nu)$  представляет широкую полосу в интервале энергий  $h\nu=1.2 - 4.0$  эВ и стабильно к отжигу. Вклад в возбуждение  $\sigma_{h\nu}$  при  $h\nu=1.2 - 1.8$  эВ вносят электронные переходы вблизи края поглощения GaAs, а при  $h\nu>2.0$  эВ – межзонные переходы. По ширине спектральной области полученная пленка не уступает интервалу fotocувствительности пленок GaAs, полученных традиционными методами.

Таким образом, показано, что фотоэлектрические свойства пленок GaAs, полученных осаждением на поликор с помощью ионного пучка зависят от условий их синтеза. Отжиг частично устраняет различия в численных значениях и качественном поведении отмеченных характеристик. Максимальной fotocувствительностью обладают пленки с темновой проводимостью  $10^{-10}-10^{-8}$  См, которая достигается отжигом в вакууме при 600-700 К.

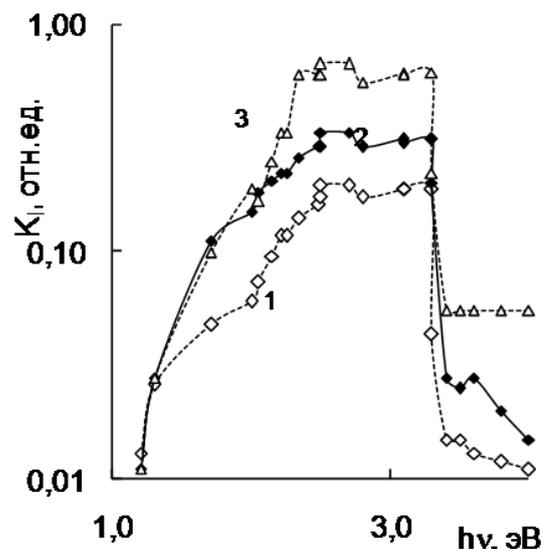


Рисунок 11 - Спектральная зависимость fotocувствительности пленки  $K_i(h\nu)$  при 300 К до отжига (1) и после отжига при  $T_{отж}=620$  (2) и 720 К

**В заключении** приведены основные результаты работы.

### Основные результаты работы:

1. На основе экспериментальных исследований обосновано оптимальное значение расстояния мишень – подложка для фокусирующего магнитоизолированного диода и соотношение поперечных размеров мишени и подложки.
2. Коэффициент импульсной эрозии мишени из GaAs и его разброс уменьшаются при увеличении числа импульсов воздействия ионного пучка, вследствие изменения морфологии поверхности мишени и модифицирования поверхностного слоя предыдущими импульсами тока.
3. Плёнки InP, осаждённые из абляционной плазмы, формируемой импульсным ионным пучком, сохраняют стехиометрию объёмной мишени и являются поликристаллическими со средним размером области когерентного рассеяния 8-9 нм.

4. Рельеф поверхности плёнки GaAs, осаждённой из абляционной плазмы, сглаживается при нагреве подложки выше 200°C.
5. Обнаружено формирование регулярной структуры на поверхности мишени из GaAs при воздействии более 20 - 40 импульсов тока пучка. Размер формируемых кристаллитов в поверхностном слое мишени толщиной до 6 мкм составляет величину  $20 \pm 10$  нм.
6. Половинный угол разлета абляционного материала GaAs на полувысоте максимальной толщины пленки составляет величину  $\theta/2 = 12^0 \pm 2^0$  при расстоянии от мишени 10 см. Эта величина значительно меньше, чем для металлических мишеней.
7. Многослойные пленки GaAs с толщиной каждого слоя 1-5 нм, осажденные из абляционной плазмы, достигают максимальной фоточувствительности при вакуумном отжиге до температуры 600-700К и имеют спектральную фоточувствительность:  $h\nu = 1.2 - 4.0$  эВ.

#### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Ли Цзень Фень, Ремнев Г.Е., Гусельников В.И., Макеев В.А., Салтымаков М.С. Осаждение тонких плёнок GaAs из абляционной плазмы формируемой импульсным мощным ионным пучком // Материалы шестой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск: изд-во БГУ, 2005. – С. 313 – 315.
2. Li Jian Feng, Makeev V.A., Saltemakov M.C., Remnev G. E. Forming of GaAs thin films by ablation plasma produced high impulse phase ion beam // Proceedings of International Conference «Korus 2005». Novosibirsk, 2005. - Pp. 234 – 235.
3. Ли Цзень Фень, Ремнёв Г.Е., Салтымаков М.С., Гусельников В.И., Ивонин И.В., Найден Е.П., Юрченко А.В., Юрченко В.И. Эрозия мишени из GaAs при воздействии импульсного ионного пучка // Материалы девятой конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». – Томск: изд-во ТГУ, 2006. – С. 277 – 280.
4. Ремнев Г.Е., Салтымаков М.С., Ли Цзень Фень, Ивонин И.В., Найден Е.П., Юрченко В.И. Импульсная эрозия мишени из GaAs при воздействии мощного ионного пучка // Материалы V международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». Томск: изд-во ТПУ, 2006. – С. 426 – 429.
5. Салтымаков М.С., Ли Цзень Фень Исследование коэффициента эрозии мишени из GaAs // Материалы конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики». Москва: изд-во ФИАН, 2006. – С. 222 – 223.
6. Saltymakov M. S., Lie Zeng Feng, Remnev G. E., Gusel'nikov V. I., Makeev V. A., Ivonin I. V., Naydyon E. P., Yurchenko V. I. Coefficient of

- target erosion made of GaAs at the influence of high-power pulsed ion beam // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. - №8. Приложение. - С. 371 – 373.
7. Saltymakov M.S., Lie Zeng Feng, Remnev G. E., Gusel'nikov V. I., Makeev V. A., Ivonin I. V., Naydyon E. P., Yurchenko V. I. Coefficient of target erosion made of GaAs at the influence of high-power pulsed ion beam // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. – №1. С. 66 – 70.
  8. Салтымаков М.С., Ремнёв Г.Е., Ивонин И.В., Найден Е.П., Юрченко В.И. Полупроводниковые плёнки InP полученные методом импульсного ионного осаждения // Материалы шестой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск: изд-во БГУ, 2007. – С. 398 – 400.
  9. Салтымаков М.С., Ремнёв Г.Е., Ивонин И.В., Найден Е.П., Юрченко В.И. Полупроводниковые плёнки InP полученные методом импульсного ионного осаждения // Материалы международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах». – Кемерово: Кузбассиздат, 2007. Т. 2. – С. 351 – 354.
  10. Remnev G. E., Saltymakov M. S., Lie Zeng Feng, Guselnikov V. I., Ivonin I. V., Naiden E. P., Yurchenko V. I. Change of Surface Morphology and Pulsed Erosion Coefficient of Target Made of GaAs under Periodic Action of High-Power Ion Beam // Abstracts of 15th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beam. Mumbai, India, 2007. – P. 233.
  11. Кабышев А.В., Конусов Ф.В., Ложников С.Н., Ремнев Г.Е., Салтымаков М.С. Фотоэлектрические свойства плёнок высокоомного арсенида галлия, осаждённых из абляционной плазмы, формируемой мощным импульсным ионным пучком // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – Т.51. - №11/2. - С. 15 – 20.
  12. Remnev G.E., Ivanov Yu.F., Naiden E.P., Saltymakov M.S., Stepanov A.V., Shtanko V. F. Formation of Nanosized Particles of Silicon Carbide and Diamonds in Surface Layer of Silicon Target during Short-Pulsed Implantation of Carbon Ions // Materials of 17<sup>th</sup> International Conference on High-Power Particle Beams. Xi'an, China, 2008. - P. 676 – 678.
  13. Ремнев Г.Е., Иванов Ю.Ф., Найден Е.П., Салтымаков М.С., Степанов А.В., Штанько В.Ф. Формирование наноразмерных частиц карбида кремния и алмазов в поверхностном слое кремниевой мишени при короткоимпульсной имплантации ионов углерода // ЖТФ. – 2009. – Т.9. №4. - С.156 – 158.
  14. Pushkarev A.I., Isakova J.I., Saltimakov M.S. and Sazonov R.V. Investigation of magnetically self-insulated effect in an ion diode with an explosive emission potential electrode // Phys. of Plasmas. – 2010. Vol. 17. 013104.