

*На правах рукописи*

Курочка Александр Сергеевич

**Особенности электронной эмиссии для контроля процесса реактивного  
ионно-лучевого травления пленочных гетерокомпозиций**

Специальность 05.27.06

«Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и  
приборов электронной техники»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2013

Работа выполнена на кафедре «Технологии материалов электроники»  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Кузнецов Геннадий Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Киреев Валерий Юрьевич

кандидат технических наук  
Митрофанов Евгений Аркадьевич

Ведущая организация: Филиал ФЗМТ (Фрязинский завод мощных  
транзисторов) ОАО ЦНИИ «Дельфин»

Защита диссертации состоится «16» мая 2013 г. в 16 час. 30 мин.  
на заседании диссертационного совета Д 212.132.06 в ФГОУ ВПО  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по  
адресу: 119049, Москва, Крымский вал, д., 3, ауд. К-212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС»

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, доцент

Костишин В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы**

Развитие микроэлектроники и переход к нанoeлектронике связаны с разработкой процессов изготовления наноразмерных слоистых материалов и структур на их основе.

К таким процессам относятся методы ионно-плазменной обработки, в частности, реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ), применяемое для получения требуемой топологии при изготовлении изделий электронной техники.

К преимуществам РИЛТ относится высокая селективность и анизотропия травления. Использование реактивного газа и потока его ионов уменьшает вероятность образования дефектов, вносимых в обрабатываемый материал ионами инертного газа. Эти процессы позволяют достичь разрешения до 10 нм.

В процессе ионно-плазменной обработки необходимо иметь информацию о состоянии поверхности различных материалов, о переходе процесса травления от одного слоя к другому и об окончании процесса травления.

Анализ физических эффектов, возникающих в твердом теле при ионном воздействии на поверхность позволяет заключить, что наиболее эффективным для контроля и управления процессом травления является использование вторичных явлений, свойственных процессам РИЛТ.

Одним из вторичных эффектов, сопровождающих ионную бомбардировку твердого тела, является ионно-электронная эмиссия (ИЭЭ), т. е. выбивание электронов налетающими ионами.

Эффективным решением проблемы контроля и управления процессами ионно-плазменной обработки возможно применение интегрального сигнала ИЭЭ, обладающего достаточной чувствительностью к состоянию облучаемой поверхности.

Актуальность работы заключается в необходимости разработки оперативного метода контроля и управления процессом РИЛТ, позволяющего осуществлять контроль процесса травления тонкопленочных материалов и многослойных гетероструктур, применяемых в электронике, непосредственно в

технологическом процессе с регистрацией всех его стадий. Исследуемый в работе метод основан на использовании интегрального сигнала ИЭЭ, отличающегося простотой регистрации и высокой чувствительностью к изменению состояния обрабатываемой поверхности.

### **Цель диссертационной работы**

Целью настоящей работы является установление особенностей и возможности использования ИЭЭ для неразрушающего контроля процесса РИЛТ тонкопленочных гетерокомпозиций металл / диэлектрик / полупроводник.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- разработка элементов экспериментального оборудования для исследования ИЭЭ в процессе РИЛТ гетерокомпозиций;

- обоснование выбора реактивной среды и материалов тонкопленочных композиций на основе обобщающего анализа физико-химических процессов их взаимодействия;

- установление экспериментальных закономерностей изменения интегрального сигнала ИЭЭ в зависимости от материала подложки, сорта и состава бомбардирующих ионов, их энергии и плотности тока;

- уточнение физико-математической модели ИЭЭ с учетом физико-химического взаимодействия реактивного потока с материалом подложки;

- установление практической возможности использования ИЭЭ для контроля процесса РИЛТ наноразмерных гетероструктур различного назначения.

### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Выявлены закономерности изменения тока вторичных электронов в условиях РИЛТ материалов в зависимости от состава реактивной смеси, исходного состояния материалов, энергии и плотности ионного потока.

2. Уточнена математическая модель выхода вторичных электронов (ВЭ) при низкоэнергетическом (до 5 кэВ) реактивном ионном воздействии на поверхность подложки, учитывающая влияние химического распыления

поверхности материала и плотности тока первичных ионов (до  $2,5 \text{ мА/см}^2$ ), которая удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами.

3. Разработана методика измерения интегрального сигнала ИЭЭ, позволяющая с достаточной вероятностью определять величину тока ВЭ с последующим расчетом коэффициента ИЭЭ в условиях РИЛТ. Методика учитывает влияние физического и химического распыления на величину тока ВЭ.

4. Установлены и теоретически обоснованы закономерности изменения интегрального сигнала ИЭЭ в условиях РИЛТ многослойных структур. Представлено теоретическое обоснование увеличения тока ВЭ в условиях РИЛТ полупроводников и диэлектриков.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработано устройство контроля процесса РИЛТ многослойных гетероструктур с использованием ИЭЭ (Патент на полезную модель № 84366. Зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей РФ 10 июля 2009 г.).

2. Разработан и предложен для практического применения метод контроля состояния поверхности тонкопленочных гетероструктур, связанный с непосредственной регистрацией тока ВЭ в условиях РИЛТ, позволяющий фиксировать все стадии процесса травления (удаление адсорбционного слоя, травление гетерокомпозиции с фиксацией момента перехода травления от одного слоя к другому).

3. Показана практическая возможность применения контроля всех стадий процесса РИЛТ металлов, полупроводников, диэлектриков и тонкопленочных гетерокомпозиций на их основе в технологическом цикле изготовления мощных и СВЧ полевых транзисторов, в методике создания квантово-размерных наноструктур на основе гетерокомпозиций Au/Ti/AlGaAs/GaAs. Экспериментально установлено, что ток ВЭ является параметром, определяющим тип пленочной структуры и носителем информации о состоянии обрабатываемой поверхности.

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

1. Разработанное устройство и методика контроля процессом РИЛТ металлических, полупроводниковых и диэлектрических тонкопленочных гетерокомпозиций, позволяющая фиксировать стадии процесса РИЛТ с помощью регистрации тока ВЭ.

2. Математическая модель ИЭЭ с поверхности подложки, учитывающая особенности выхода электронов в условиях РИЛТ и методика расчета коэффициента ИЭЭ с учетом химической составляющей процесса травления, позволяющая рассчитать ток ВЭ в зависимости от состава реактивной смеси газов, материала обрабатываемой поверхности и плотности тока ионов.

3. Представленные в работе закономерности изменения интегрального сигнала ИЭЭ в зависимости от параметров низкоэнергетического химически активного ионного воздействия и материала обрабатываемой поверхности, позволяющие обеспечить неразрушающий контроль всех стадий процесса РИЛТ тонкопленочных гетерокомпозиций и создать основу для разработки системы управления процессами РИЛТ.

**Личный вклад** Курочки А.С. состоял в разработке конструкции узла регистрации и методики оперативного контроля тока ВЭ в условиях РИЛТ; проведении серии экспериментальных работ по определению состава рабочей реактивной среды; проведении технологических процессов формирования тонкопленочных материалов и гетероструктур, применяемых в качестве объектов исследования; анализе и определении экспериментальных зависимостей уровня тока ВЭ от параметров процесса травления и типа тонкопленочных структур; построении физической и уточнении математической модели ИЭЭ; проведении экспериментальной проверки предложенной модели и метода контроля; анализе полученных результатов; подготовке научных публикаций и патента Российской Федерации.

### **Апробация работы:**

Основные теоретические и экспериментальные результаты диссертации отражены в работах, опубликованных в ведущих отечественных изданиях, в

материалах докладов международных и всероссийских конференций и семинаров и докладывались на I Международной Казахстанско-Российско-Японской конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Усть-Каменогорск, 2008г.), на Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Приэльбрусье, Нальчик, 2009г.), на Юбилейной международной научной конференции «Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии» (Ставрополь, 2010г.), на III Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2010г.), на IV Международной конференции «Кристаллофизика XXI века», посвященная памяти М. П. Шаскольской (Москва, 2010г.), на IX Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Астрахань, 2012г.).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в т. ч. 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК по специальности. Получен 1 патент РФ на полезную модель № 84366 от 10.07.2009 г.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общего заключения, общих выводов и списка литературы. Объем диссертации составляет 149 страниц машинописного текста, включая 36 рисунков и 7 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 120 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы их цель и задачи. Отражены научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** изложены представления об основных эффектах, возникающих при бомбардировке ионами поверхности твердого тела, таких как: физическое распыление, ионная имплантация, химическое распыление, ИЭЭ.

С точки зрения современных теорий объяснены основные закономерности ионного распыления и внедрения. Проведен анализ параметров процесса РИЛТ (скорость распыления, коэффициент распыления) от таких параметров, как: энергия ионов, плотность ионного тока, давление и расход реактивного газа, давление остаточных газов. Отмечено, что в условиях РИЛТ изменение параметров процесса обусловлено образованием измененного поверхностного слоя. Проанализированы феноменологические и математические модели РИЛТ.

Процесс РИЛТ характеризуется высокими селективностью, анизотропией и равномерностью травления.

Рассмотрены основные причины возникновения ИЭЭ. Проанализированы основные зависимости коэффициента ИЭЭ для металлов, полупроводников и диэлектриков. Проведен теоретический анализ существующих математических моделей ИЭЭ.

Определены целесообразные области применения процесса РИЛТ в современной электронике: формирование омических контактов на базе прецизионных гребенчатых структур для мощных ВЧ транзисторов; формирование меза-структур на основе гетерокомпозиции AlGaAs/GaAs; формирование топологии логических устройств, использующих баллистический транспорт электронов.

Рассмотрены два метода контроля и управления РИЛТ, позволяющие получать информацию о всех стадиях травления: метод регистрации ионно-электронной эмиссии и метод регистрации ионно-индуцированного тока (ИИТ).

Основным достоинством такого контроля является то, что ионный пучок, используемый при проведении процесса РИЛТ, является одновременно и средством, обеспечивающим реализацию контроля поверхности обрабатываемого объекта, поскольку ИЭЭ и ИИТ являются вторичными эффектами, возникающими в процессе ионной обработки.

Процесс РИЛТ сопровождается образованием химических соединений (летучих и нелетучих) оказывающих значительное влияние на величину электропроводимости пленок и искажающих объективность регистрируемого

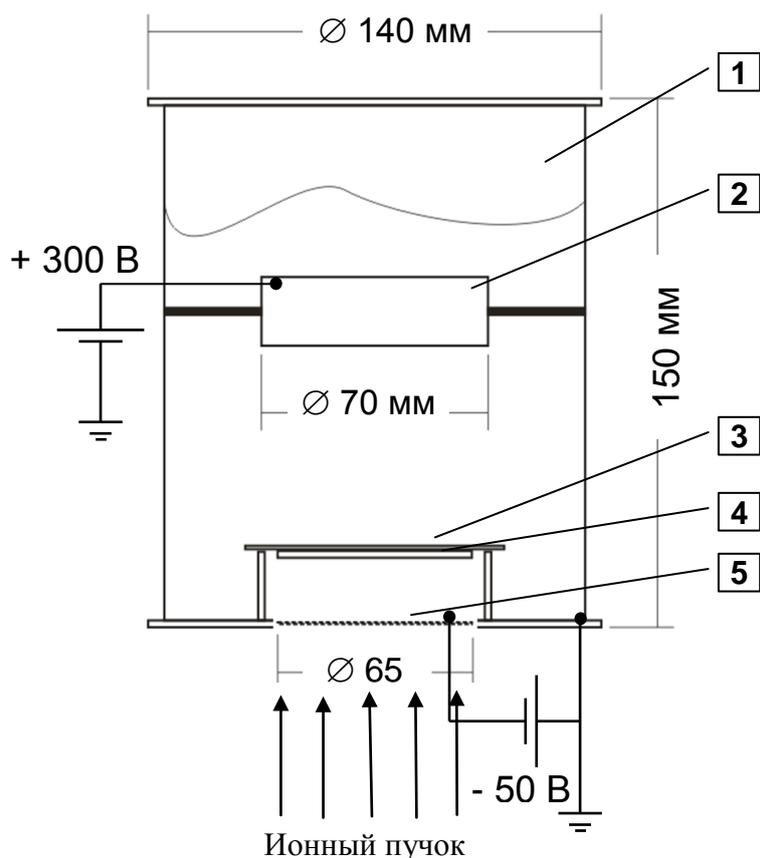
сигнала ИИТ. Контроль и управление процессом РИЛТ посредством регистрации тока ИЭЭ представляется наиболее перспективным.

**Во второй главе** рассматриваются требования, предъявляемые к экспериментальному оборудованию для использования ИЭЭ в качестве метода контроля травления в условиях РИЛТ. Описываются элементы экспериментального устройства для регистрации тока ИЭЭ.

Приводится обоснование выбора рабочей реактивной среды для РИЛТ и объектов исследования.

При разработке системы контроля выполнено следующее:

а) определена конструкция регистрирующего устройства, позволяющего выделить сигнал ВЭ из общего сигнала вторичных частиц, возникающих при ионной обработке (рис.1);



1 – цилиндрический контейнер; 2 – приемник электронов;  
3 – подложкодержатель; 4 – образец; 5 – экранирующая сетка.

Рис. 1– Устройство контроля сигнала ИЭЭ

б) результатом измерения является зависимость эмиссионного сигнала от времени проведения процесса травления.

Устройство контроля включает в себя приемник электронов, держатель с образцом и металлический контейнер с диафрагмой. Первичные ионы не попадают на приемник. В основном регистрируемый ток составляют электроны с энергией  $\approx 5$  эВ. Таким образом, захватываются электроны с определенной энергией и регистрируемый сигнал представляет собой ток ВЭ, эмитируемых с обрабатываемой поверхности.

К преимущественным особенностям метода можно отнести:

– возможность безконтактного контроля травление гетерокомпозиций на основе металлов, полупроводников и диэлектриков;

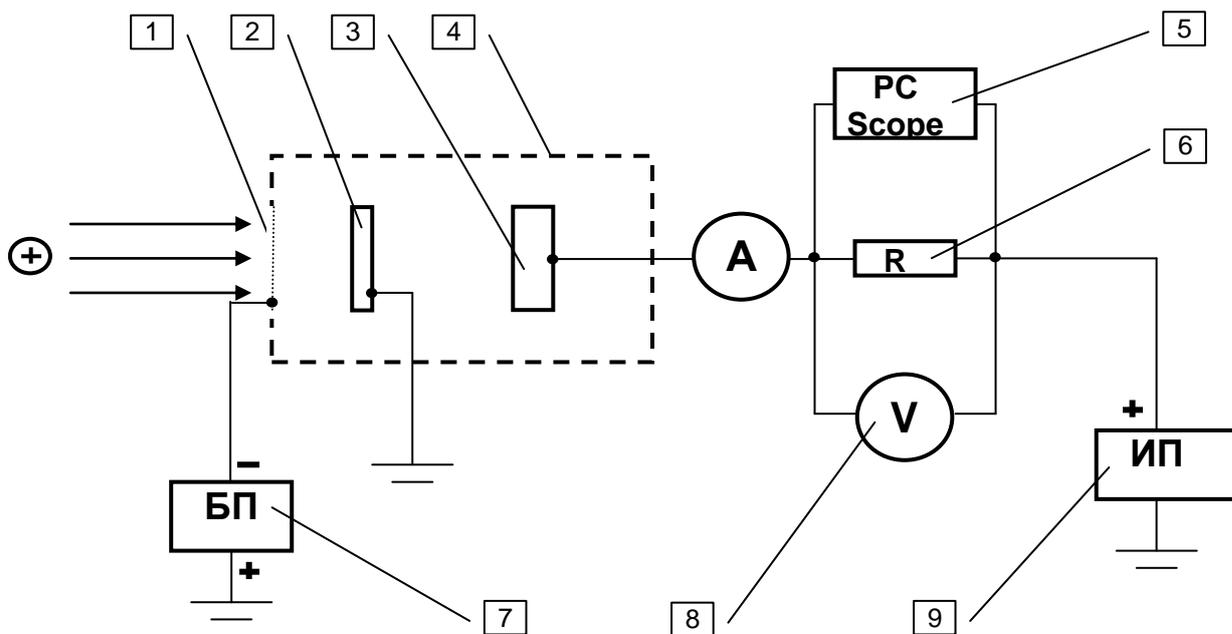
– совмещение способов зарядовой и токовой нейтрализации ионного пучка.

При измерении величины тока ВЭ вносится суммарная ошибка  $\pm (4 - 5) \%$ .

Анализом возможных реакций на поверхности исследуемых объектов в процессе РИЛТ в качестве рабочей реактивной среды определена газовая смесь: Ar (80 %) + CF<sub>4</sub> (20 %). Применение указанной реактивной смеси в процессе РИЛТ при ионно-ускоряемых или ионно-возбуждаемых реакций термодинамически и кинетически обеспечивается образованием летучих и квазилетучих соединений с материалами, применяемыми в электронной промышленности.

Принципиальная электрическая схема измерения тока ВЭ представлена на рис. 2.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих основные теоретические аспекты ИЭЭ в условиях РИЛТ и уточняющих возможность практической реализации метода оперативного контроля РИЛТ различных материалов электронной техники.



1 – экранирующая сетка; 2 – подложкодержатель; 3 – приемник электронов; 4 – металлический контейнер с диафрагмой; 5 – цифровой осциллограф PC Scope; 6 – резистор; 7 – блок питания экранирующей сетки; 8 – вольтметр В7-40/4; 9 – источник питания Б5-50

Рис. 2 – Принципиальная электрическая схема измерения тока ВЭ

Экспериментально установлена прямопропорциональная зависимость величины тока ВЭ от плотности тока ионов реактивной смеси рабочих газов (рис. 3).

Такой тип зависимости позволяет утверждать, что соотношение физической и химической составляющих процесса взаимодействия ионов с поверхностью остается постоянным при различных плотностях ионного тока при постоянных значениях парциальных давлений инертного и реактивного газов в их смеси. При увеличении процентного содержания реактивного газа величина тока ВЭ убывает. При изменении плотности тока ионов в интервале от  $0,5 \text{ mA/cm}^2$  до  $2,5 \text{ mA/cm}^2$  значение коэффициента ИЭЭ сохраняется постоянным.

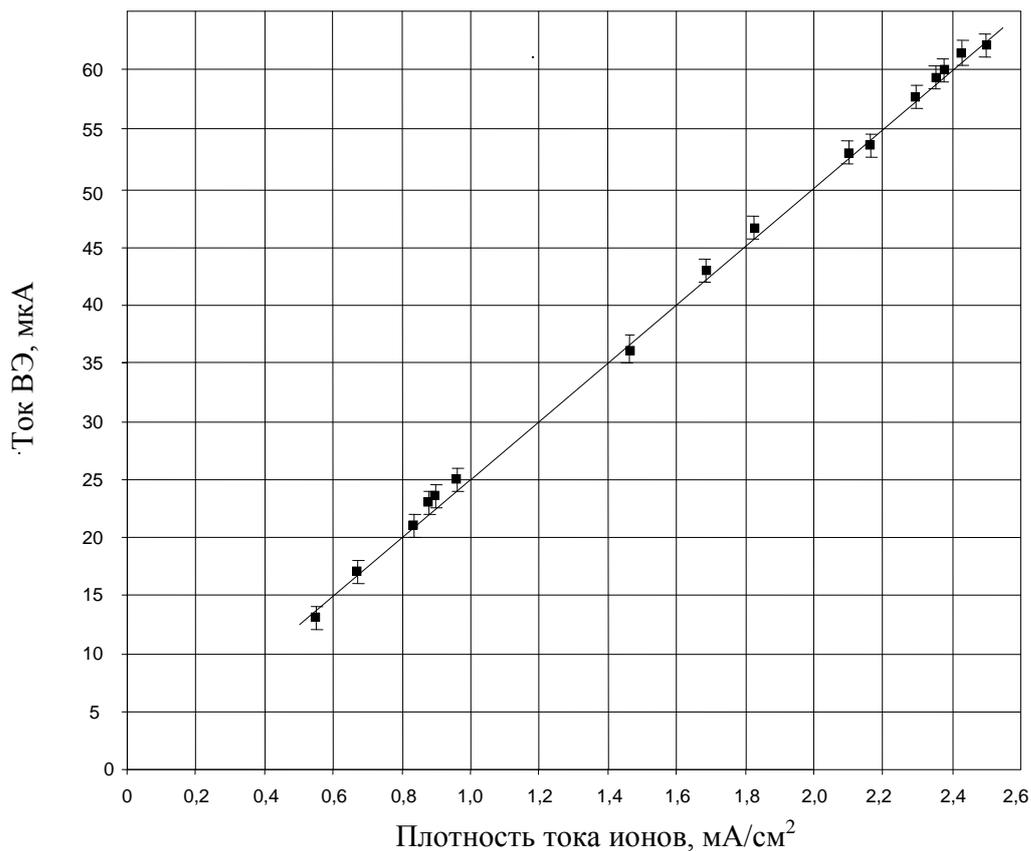


Рис. 3 – Зависимость тока ВЭ от плотности тока ионов для молибденовой подложки

При экспериментальном исследовании зависимости тока ВЭ от атомного номера материала подложки установлены две области снижения уровня сигнала ИЭЭ: первая область номеров с 13 по 40; вторая область – с 41 по 74.

Определенной зависимости тока ВЭ от работы выхода материала подложки не установлено.

Анализом обрабатываемых поверхностей методом ВИМС и Оже-спектроскопии установлено изменение состава приповерхностного слоя.

Концентрация внедренного углерода превышает концентрацию внедренного фтора, т. е. можно предположить, что фтор покидает поверхность в виде химического соединения ( $\text{TiF}_4$ ,  $\text{AlF}$ ), углерод распыляется ионами  $\text{Ar}^+$ . Химическое взаимодействие материала подложки с ионами реактивного газа снижает уровень тока ВЭ.

При РИЛТ массивных и тонкопленочных металлических образцов установлено повышенное значение тока ВЭ с поверхности тонкопленочных образцов над аналогичным сигналом с поверхности массивных образцов. Подобную закономерность можно объяснить увеличением реальной эмиссионной поверхности тонкопленочных образцов за счет большей шероховатости и пористости структуры пленки.

При проведении экспериментальных исследований полупроводниковых материалов определенной закономерной зависимости тока ВЭ от ширины запрещенной зоны и высоты потенциального барьера не установлено.

Анализом результатов РИЛТ Si-подложек *n*- и *p*-типов установлено влияние эффекта поля на величину тока ВЭ.

В условиях РИЛТ полупроводниковых материалов предполагается наличие трех составляющих тока ВЭ:

- ИЭЭ с участием электронов зоны проводимости;
- ИЭЭ за счет прямого перехода в вакуум электронов системы ион-атом подложки;
- автоэлектронной эмиссии под влиянием поверхностного потенциала.

Экспериментальные исследования тонкопленочных диэлектрических структур, позволили определить влияние наведенного поверхностного положительного потенциала на величину тока ВЭ. Проведена теоретическая оценка наведенного потенциала, величина которого составила для пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 20,8 В, для пленки  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  – 24,3 В, для пленки  $\text{TiO}_2$  – 21,3 В.

Напряженность электрического поля, возникающая в диэлектрической пленке под влиянием наведенного потенциала, создает предпосылки для возникновения «малтеровской» эмиссии, определяемой свойствами собственно диэлектрика и свойствами подложки.

Результаты экспериментальных исследований позволяют заключить, что разработанный метод контроля поверхности в условиях РИЛТ в достаточной мере соответствует требованиям метода контроля технологической и

экспериментальной диагностики тонкопленочных гетероструктур посредством регистрации изменения тока ВЭ.

**В четвертой главе** приводится модель ИЭЭ в условиях РИЛТ и анализируются результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными.

Установлено, что ток ВЭ при РИЛТ материалов в среде:  $\text{Ar} + \text{CF}_4$  меньше аналогичного параметра при ИЛТ в среде аргона.

Можно предположить, что это связано с изменением химического состава приповерхностного слоя материала подложки.

При построении физической модели учитывается, что:

- концентрация ионов  $\text{Ar}^+$  пропорциональна концентрации этого газа в смеси;
- концентрация ионов в реактивной составляющей: 78 %  $\text{CF}_3^+$ ; 7,8 %  $\text{CF}_2^+$ ; 4,4 %  $\text{F}^+$ ; 3,7 %  $\text{CF}^+$ ; 3,1 %  $\text{C}^+$ ; 1,9 %  $\text{CF}_2^{++}$ ; 0,7 %  $\text{CF}_3^{++}$ ;
- распад многокомпонентных ионов на пути движения от источника к подложке отсутствует;
- многокомпонентные ионы фрагментируются при столкновении с поверхностью, передав свою энергию как атомам, так и электронной подсистеме решетки;
- основной вклад в электронную эмиссию вносят ионы  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{CF}_3^+$ ;
- возбуждение электронной подсистемы происходит на глубине  $h$  (нм) по соотношению  $h \approx (0,01 - 0,05) \cdot E_u$  [кэВ]; выход электронов в вакуум может происходить с глубины  $\approx 50$  % от зоны возбуждения с учетом угловой зависимости;
- ионы  $\text{CF}_3^+$  могут фрагментироваться и внедряться в поверхностный слой как элементарные ионы на глубину  $h$  (нм)  $\approx (0,01 - 0,05) \cdot E_u$ ;
- возможные адсорбционные слои  $\text{CF}_4$  и  $\text{CH}_x$  (масло) удаляются в начальный период (0,5 – 1,0) мин ионной бомбардировки поверхности.

При уточнении математической модели ИЭЭ при РИЛТ для учета влияния измененного поверхностного слоя на величину тока ВЭ вводится коэффициент  $\theta$ , отражающий степень покрытия поверхности подложки химическим соединением:

$$\theta = \frac{\sigma \frac{P}{P + P_{Ar}}}{\sigma \frac{P}{P + P_{Ar}} + mS_c},$$

где:

$\sigma$  - коэффициент прилипания ионизированных частиц реактивного газа;

$P$  - давление рабочей смеси;

$P_{Ar}$  - парциальное давление Ar;

$S_c$  - коэффициент распыления соединения;

$m$  - количество атомов газа в молекуле соединения стехиометрического состава.

Таким образом, ток ВЭ определяется выражением:

$$I_{эз} = q\mu\zeta n^{2/3}W(E_i)A(1-\theta),$$

где  $\mu$  - коэффициент, определяемый геометрическими размерами приемника электронов;

$\zeta$  - коэффициент соответствия, равный отношению количества падающих ионов к плотности атомов подложки на поверхности;

$n$  - концентрация электронов в единице объема материала подложки;

$W(E_i)$  - вероятность выхода электронов с поверхности подложки;

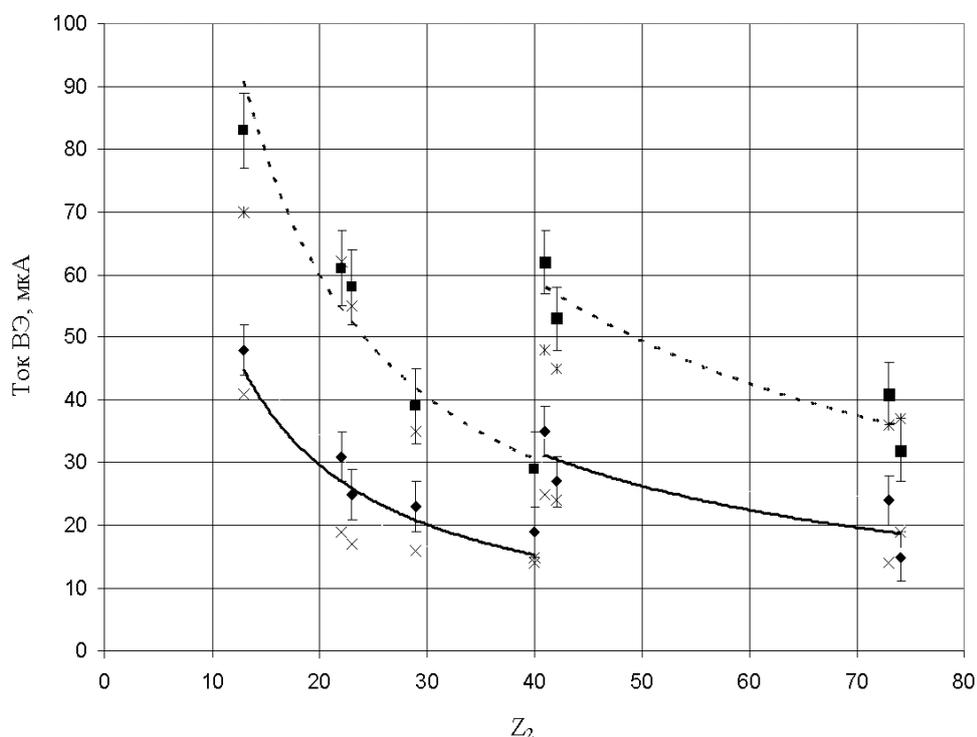
$A$  - площадь поверхности подложки;

$\theta$  - степень покрытия.

Результаты теоретических расчетов удовлетворительно коррелируют с результатами проведенных экспериментов (Рис. 4).

**Пятая глава** содержит результаты практического применения ИЭЭ для контроля и управления процесса РИЛТ тонкопленочных гетерокомпозиций на основе металлов, полупроводников и диэлектриков.

Результаты исследований апробированы в технологии мощных кремниевых транзисторов. При напылении Al в качестве металлизации контактных площадок необходимо предварительно полностью удалить SiO<sub>2</sub>, не допуская бокового подтравливания и межполосковых закороток. Эти требования выполняются при замене жидкого травления SiO<sub>2</sub> процессом РИЛТ с контролем момента окончания травления SiO<sub>2</sub> по изменению тока вторичных электронов с последующим напылением Al без разрыва вакуума, для предотвращения появления технологических дефектов при межоперационном хранении. Скорость травления SiO<sub>2</sub> составила 0,2 мкм/мин.



■, ◆ – расчетные данные для Ar и смеси газов Ar и CF<sub>4</sub> соответственно;  
 \*, x – экспериментальные данные для Ar и смеси газов Ar и CF<sub>4</sub>

Рис. 4 – Зависимость тока ВЭ от атомного номера материала мишени при травлении в Ar (штриховая линия) и в смеси: Ar (80 %) + CF<sub>4</sub> (20 %) (сплошная)

Эффективность использования подтверждается повышением процента выхода годных на 15 %. Схема процесса представлена на рис. 5.

Метод контроля и регистрации апробирован в технологии СВЧ НЕМТ транзисторов. Предварительная металлизация омических контактов СВЧ НЕМТ

транзисторов осуществляется напылением трехслойной пленки Ti/Au/Ti. Для последующего электролитического осаждения Au, с помощью которого создается толсто пленочная мостиковая металлизация, необходимо локально удалить верхнюю пленку Ti толщиной 50 нм.

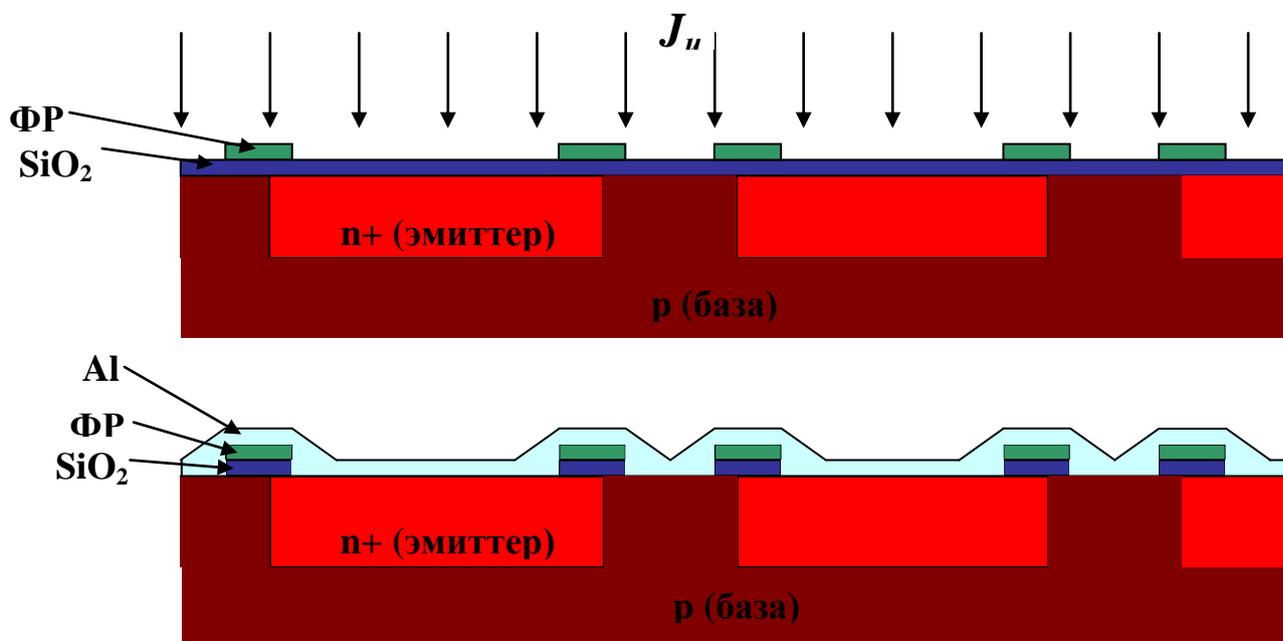


Рис. 5 – Схема процесса металлизации

Временная зависимость тока ВЭ изображена на рис. 6.

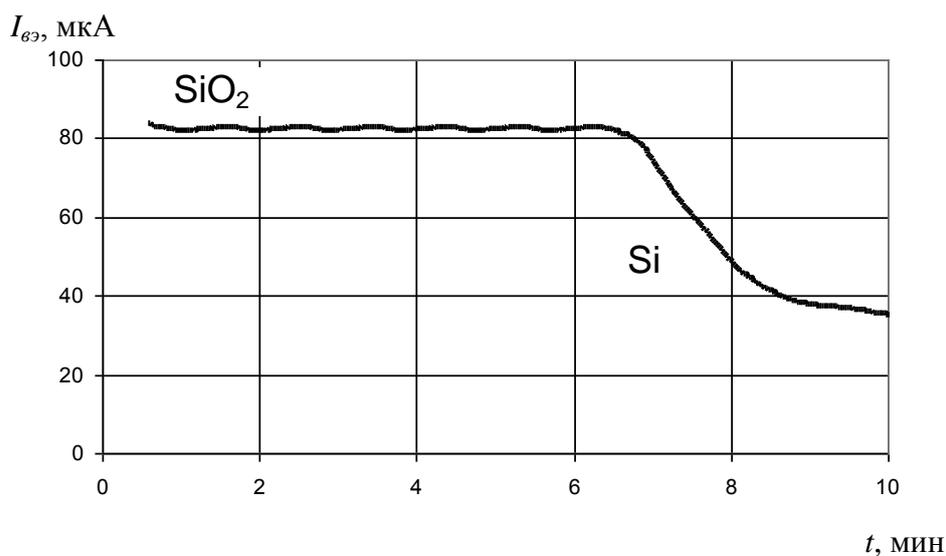


Рис. 6 – Зависимость тока ВЭ ( $I_{вэ}$ ) от времени травления ( $t$ ) структуры  $\text{SiO}_2/\text{Si}$

Площадь травления составляла  $\approx 50\%$  от общей площади пластины. В качестве маски используется фоторезист. Эффективность процесса травления пленки Ti была повышена регистрацией момента окончания травления пленки Ti по изменению тока вторичных электронов, которое составило 30% от начального значения при скорости травления Ti 20 нм/мин. Схема процесса РИЛТ представлена на рис. 7.

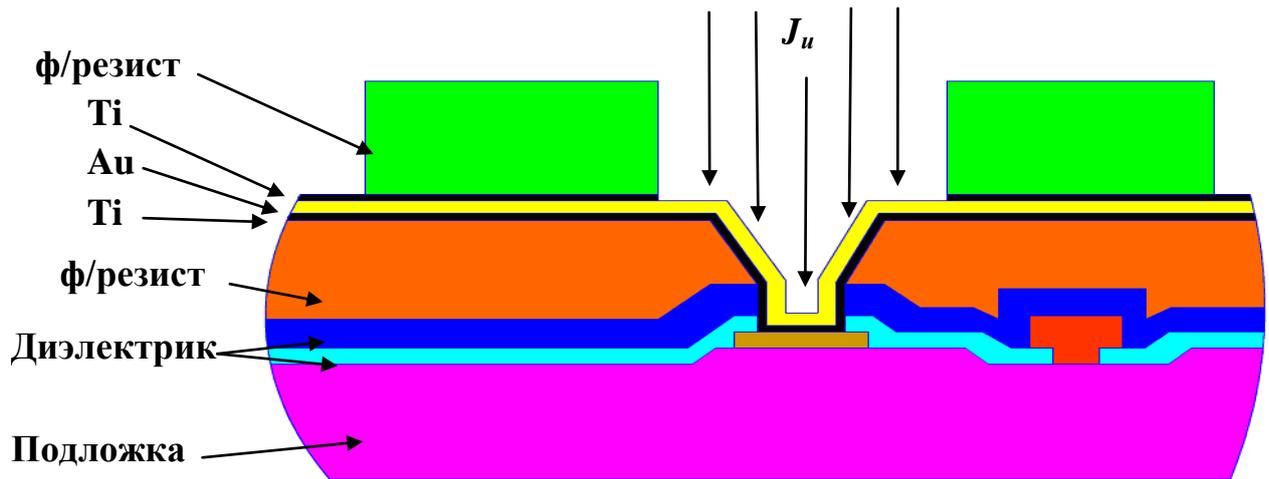


Рис. 7 – Схема процесса РИЛТ пленки Ti

Изменение тока ВЭ от времени травления, регистрируемого непосредственно при проведении процесса РИЛТ, представлено на рис. 8.

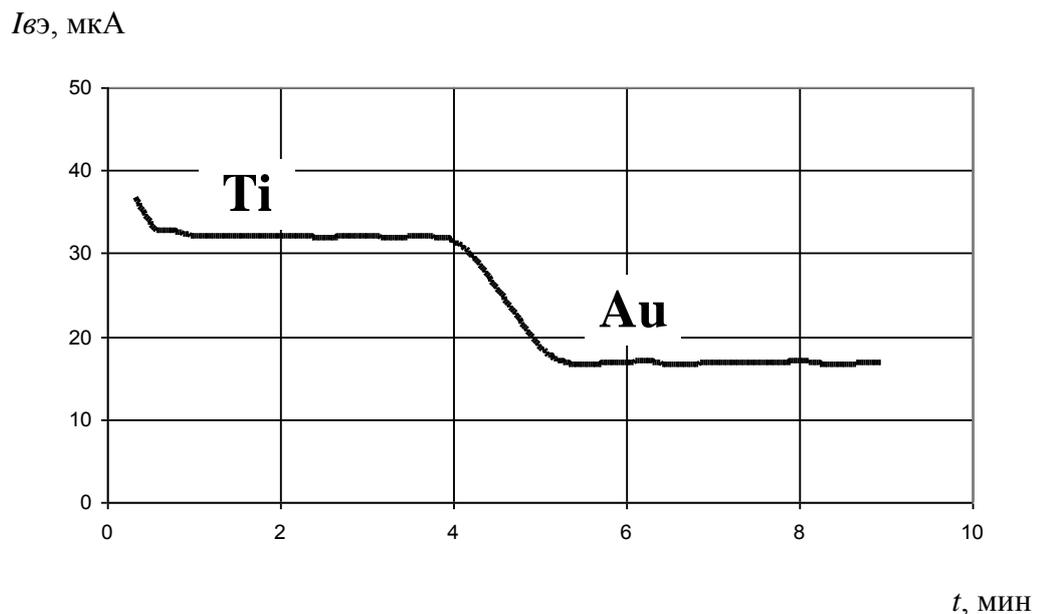


Рис. 8 – Зависимость тока ВЭ ( $I_{вэ}$ ) от времени травления ( $t$ ) Ti-Au в смеси газов: Ar (80 %) + CF<sub>4</sub> (20 %)

Предложена возможность технологического контроля процесса РИЛТ в методике создания квантово-размерных наноструктур на основе гетерокомпозиций Au/Ti/AlGaAs/GaAs. Для воспроизведения подобных наноструктур необходимо обеспечить создание прямоугольного линейного профиля травления структуры Au/Ti и отсутствие поверхностных дефектов на активной структуре GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As. Момент окончания травления верхней пленки Au регистрировался по изменению тока вторичных электронов. Относительное изменение сигнала составляло 30 %. Показан положительный эффект применения РИЛТ по сравнению с жидкостным травлением. Формирование системы потенциальных электродов показано на рис 9.

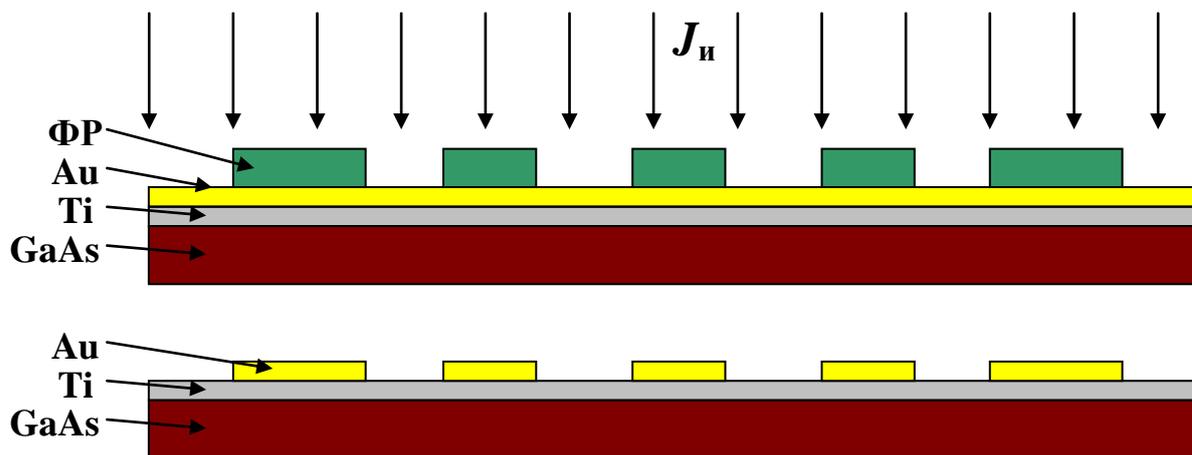


Рис. 9 – Схема двухслойной структуры и формирование металлизации с помощью РИЛТ

При достижении границы раздела металлов происходит изменения уровня тока вторичных электронов и процесс травления останавливается (рис. 10).

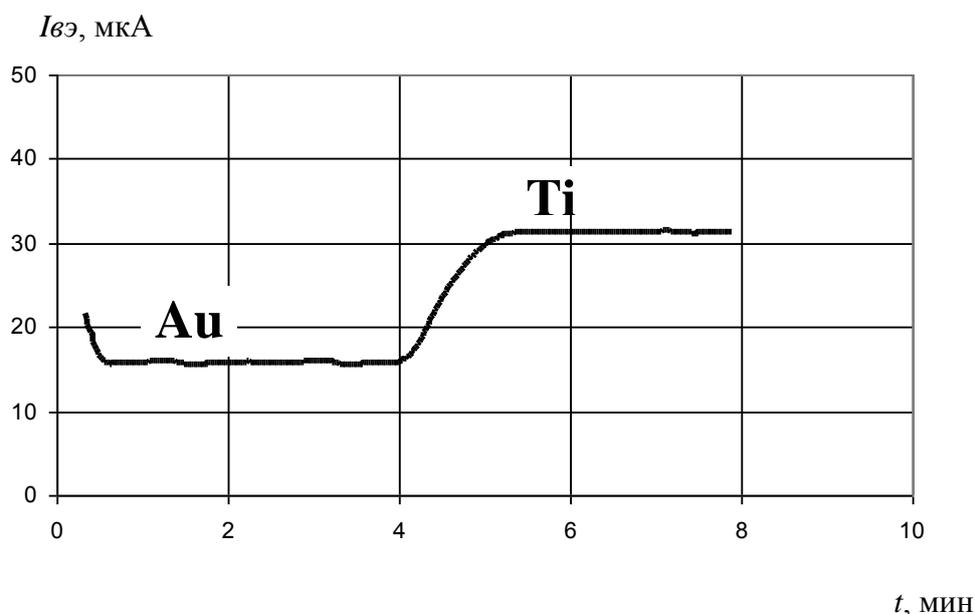


Рис. 10 – Зависимость тока ВЭ ( $I_{сэ}$ ) от времени травления ( $t$ ) Au-Ti в смеси газов: Ar (80 %) + CF<sub>4</sub> (20 %)

### Основные результаты и выводы:

1. Разработан способ неразрушающего контроля состояния поверхности наноразмерных тонкопленочных гетероструктур типа: диэлектрик / металл / полупроводник и металл / диэлектрик / полупроводник, непосредственной регистрацией тока ВЭ в условиях РИЛТ при средней энергии ионов (0,5 – 5,0) кэВ и плотности тока (0,5 – 2,5) мА/см<sup>2</sup>, позволяющий фиксировать все стадии процесса травления – удаление адсорбционного слоя, травление гетерокомпозиции с фиксацией момента перехода травления от одного слоя к другому.

В результате представлена практическая возможность применения технологического контроля всех стадий процесса РИЛТ в среде: Ar (80 %) + CF<sub>4</sub> (20 %) металлов, полупроводников, диэлектриков и тонкопленочных гетерокомпозиций на их основе в технологическом цикле изготовления мощных и СВЧ полевых транзисторов. Экспериментально установлено, что ток ВЭ является параметром, определяющим состояние поверхности материала и контролирующим все стадии травления многослойной пленочной структуры.

2. Разработана конструкция устройства непрерывного контроля процесса РИЛТ многослойных гетероструктур с использованием ИЭЭ, включающая металлический цилиндрический контейнер с размещенным в нем подложкодержателем и образцом, сеткой и приемником электронов под положительным потенциалом в пределах (0 – 600) В.

3. Выявлены закономерности изменения интегрального сигнала ИЭЭ (в пределах от 0 мкА до 200 мкА) в условиях РИЛТ материалов в зависимости от состава реактивной смеси (от 100 %  $\text{CF}_4$  до 20 %  $\text{CF}_4$  в смеси с аргоном), исходного состояния подложки (пленки и объемные материалы), энергии (от 0,5 кэВ до 5,0 кэВ) и плотности ионного тока (от 0,5  $\text{mA}/\text{cm}^2$  до 2,5  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ).

Отмечено, что с возрастанием энергии ионов и плотности ионного тока значение тока ВЭ увеличивается.

Установлено, что с увеличением содержания  $\text{CF}_4$  от 20 % до 100 % в газовой рабочей смеси при постоянной плотности тока ионов величина тока ВЭ снижается. Это снижение является следствием усиления химической составляющей процесса ионного воздействия на поверхность и образования измененного по составу поверхностного слоя, обуславливающего ИЭЭ. Для количественной оценки влияния измененного поверхностного слоя на ИЭЭ в выражение для определения тока ВЭ введен коэффициент  $\theta$ , отражающий степень покрытия поверхности подложки образовавшимся химическим соединением в зависимости от парциального давления реактивного газа.

4. Уточнена математическая модель выхода ВЭ при низкоэнергетическом (до 5 кэВ) ионном воздействии на поверхность подложки в условиях РИЛТ, учитывающая влияние химического распыления поверхности материала при плотности тока первичных ионов до 2,5  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , которая удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами.

Сравнительным анализом экспериментальных результатов РИЛТ тонкопленочных и массивных материалов выявлено увеличение (в 1,5 - 2 раза) тока ВЭ с поверхности тонких пленок над аналогичным параметром для массивных материалов. В соответствии с уточненной моделью ИЭЭ подобное

увеличение возникает в результате возрастания площади реальной поверхности из-за пористости и усиления шероховатости, и в случае тонких пленок может быть учтено введением коэффициента  $\Pi = \rho_m/\rho_n$ , где  $\rho_m$  - плотность массивного материала,  $\rho_n$  - плотность материала пленки.

Разработанная методика измерения интегрального сигнала ИЭЭ позволяет с достаточной вероятностью и погрешностью в (4 – 5) % определять величину тока ВЭ с последующим расчетом коэффициента ИЭЭ в условиях РИЛТ. Методика учитывает влияние физического и химического распыления на величину тока ВЭ.

5 Результаты исследований апробированы в технологии изготовления полупроводниковых приборов:

- в технологии мощных кремниевых транзисторов.
- в технологии СВЧ НЕМТ транзисторов.
- в методике создания квантово-размерных наноструктур на основе гетерокомпозиций Au/Ti/AlGaAs/GaAs.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

1. Симакин С.Б., Сергиенко А.А., Кузнецов Г.Д., Курочка А.С., Курочка С.П., Ходос Ю.А., Харламов Н.А., Пушкарев М.А. Неразрушающий контроль процесса ионно-лучевого травления наноразмерных гетероструктур. //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. –М.: Т. 77, №3, 2011 г., с.28-34.
2. Кузнецов Г.Д., Курочка А.С., Сергиенко А.А., Курочка С.П. Электронная эмиссия в процессе реактивного ионно-лучевого травления материалов электронной техники. //Материалы электронной техники. –М.: МИСиС, № 3, 2011 г., с. 62 - 67.
3. Билалов Б.А., Сафаралиев Г.К., Курочка С.П., Курочка А.С., Кузнецов Г.Д., Сергиенко А.А., Симакин С.Б. Устройство контроля процесса ионно-лучевого травления многослойных гетероструктур с использованием ионно-электронной эмиссии. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. // Патент № 84366, 2009 г.

4. Кузнецов Г.Д., Симакин С.Б., Курочка А.С. Электронная эмиссия в процессе ионно-лучевого травления наноразмерных гетерокомпозиций. //Тезисы доклада VII международной конференции «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии». –Кисловодск, 2007 г.
5. Курочка А.С., Сергиенко А.А., Кузнецов Г.Д. Метод контроля ионно-лучевого травления с использованием сигнала ионно-электронной эмиссией. // Труды I Международной казахстанско-российско-японской конференции и VI российско-японского семинара «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов». –Усть-Каменогорск, 2008 г., с. 507-511.
6. Курочка А.С., Сергиенко А.А., Кузнецов Г.Д., Симакин С.Б. Электронная эмиссия в процессе реактивного ионного травления. // Материалы Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». –Нальчик, 2009 г.
7. Курочка А.С., Сергиенко А.А., Кузнецов Г.Д. Электронная эмиссия в процессе реактивного ионно-лучевого травления материалов. //Труды VII Международной российско-казахстано-японской научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» –М.: МГИУ, 2009 г., с.610-611.
8. Кузнецов Г.Д., Курочка А.С., Сергиенко А.А., Харламов Н.А. Электронная эмиссия в процессе реактивного ионного травления. //Материалы Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». –Нальчик, 2009 г., с. 187.
9. Гармаш В.М., Кузнецов Г.Д., Курочка А.С., Сергиенко А.А. Ионная полировка поверхности поликристалла ниобата лития. // Материалы Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». –Нальчик, 2009 г., с. 55.
10. Курочка А.С., Сергиенко А.А., Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д. Ионно-электронная эмиссия в процессе ионно-лучевого травления поверхности материалов. // Тезисы докладов НКРК-2010 XIV Национальной конференции

по росту кристаллов IV Международной конференции «Кристаллофизика XXI века». –М.: ИК РАН, Т.1, 2010 г., с. 334-335.

11. Сергиенко А.А., Курочка А.С., Кузнецов Г.Д., Тешев Р.Ш., Симакин С.Б., Харламов Н.А. Ионно-электронная эмиссия в процессе реактивного ионно-лучевого травления наноразмерных гетероструктур. // Материалы III международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». –Нальчик, -2010 г., -с. 110-114.
12. Сергиенко А.А., Курочка А.С., Кузнецов Г.Д. Модель ионно-электронной эмиссии в процессе реактивного ионно-лучевого травления наноразмерных структур. // Материалы X Юбилейной Международной научной конференции «Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии». –Ставрополь: Сев. Кав. ГТУ, -2010 г., -с. 236-237.
13. Сергиенко А.А., Курочка А.С., Гармаш В.М., Кузнецов Г.Д. Особенности ионной полировки монокристаллической поверхности ниобата лития. //Тезисы докладов НКРК-2010 XIV Национальной конференции по росту кристаллов «Кристаллофизика XXI века», посвященной памяти М.П. Шаскольской. –М.: ИК РАН, Т.II, 2010 г., с. 322-323.
14. Кузнецов Г.Д., Сергиенко А.А., Симакин С.Б., Курочка С.П., Курочка А.С. Элионная технология в микро- и nanoиндустрии. Неразрушающие методы контроля процессов осаждения и травления наноразмерных пленочных гетерокомпозиций. Учеб. пособие. // –М.: Изд. Дом МИСиС, 2012 г., -122 с.
15. Курочка А.С., Кузнецов Г.Д., Сергиенко А.А., Курочка С.П. Физико-технологические особенности изменения тока вторичных электронов в процессе реактивного ионно-лучевого травления. // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов. Труды IX Международной конференции. –Астрахань: Изд. дом «Астраханский университет», 2012 г.
16. Курочка А.С., Кузнецов Г.Д., Сергиенко А.А., Каргин Н.И., Цибульник А.В. Модель кинетической электронной эмиссии в условиях реактивного ионно-лучевого травления. // Перспективные технологии, оборудование и

аналитические системы для материаловедения и наноматериалов. Труды IX Международной конференции. –Астрахань: Изд. дом «Астраханский университет», 2012 г.