

## **VII. Некоторые вопросы физики радиационных явлений в полупроводниках и изоляторах**



## Поверхностные и объемные дефекты в нанокристаллическом облученном CuO

Т. И. Арбузова\*, С. В. Наумов\*, Е. А. Козлов\*\*, В. Л. Арбузов\*, Б. А. Гижевский\*

\* Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (naumov@imp.uran.ru)

\*\*РФЯЦ - ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

В работе изучено влияние размера зерна, упругих напряжений и электронного облучения на магнитную восприимчивость  $\chi(T)$  плотной нанокерамики CuO, полученной методом ударно-волнового воздействия. Магнитный порядок в CuO определяется сильным антиферромагнитным сверхобменом ионов  $\text{Cu}^{2+}(S=1/2)$  через ионы кислорода. Температурная зависимость восприимчивости имеет вид, характерный для 1D или 2D антиферромагнетиков, которые при понижении  $T$  переходят в 3D состояние. Вблизи  $T_N=230\text{K}$  изменяется наклон  $\chi(T)$ , но отсутствует типичный максимум  $\chi$ . Установлено, что при уменьшении размера зерна  $5\text{ nm} \leq d \leq 70\text{ nm}$  в области  $T < 140\text{ K}$  появляется «парамагнитный» вклад  $\chi \sim 1/T$ . Аномальное поведение восприимчивости объясняется разрывом обменных связей Cu-O-Cu для поверхностных спинов, число которых при уменьшении  $d$  растет. Концентрация разупорядоченных спинов  $\text{Cu}^{2+}$  зависит не только от размера наночастиц, но и от взаимодействия между ними. Об этом свидетельствуют более высокие значения  $\chi$  в рыхлых нанопорошках CuO при тех же значениях  $d$ .

Влияние микроструктуры и состояния границ раздела отчетливо проявляется в компактированных наноматериалах. Установлено, что релаксация упругих напряжений в компактной нанокерамике при сохранении размера зерна приводит к восстановлению антиферромагнитного порядка и обычному для CuO виду  $\chi(T)$ . В нанопорошках CuO через 3 года зависимости  $\chi(T)$  не изменились, что указывает на отсутствие в них релаксационных процессов.

Не только поверхностные, но и объемные дефекты могут приводить к разрыву антиферромагнитных связей. При электронном облучении ионы кислорода и меди могут быть смещены из своих позиций, что приведет к изменению обменных параметров. Показано, что при малых дозах облучения  $\Phi \leq 2.4 \cdot 10^{18}\text{ эл/см}^2$  зависимости  $\chi(T)$  для отожженных нанокерамик практически не изменяются, однако при  $\Phi = 5 \cdot 10^{18}\text{ эл/см}^2$  появляется значительный парамагнитный вклад в  $\chi$ , который возрастает при уменьшении размера зерна. Таким образом, большое число дефектов как в поверхностных слоях наночастиц CuO, так и в их объеме приводит к фрустрации обменных связей ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и увеличению восприимчивости.

Работа выполнена в рамках программ ОФН-19 и ФЦНТП 40.012.1.1.1153.

## Fractal analysis of self-organized structures in implanted semiconductors

S. A. Aprelov<sup>1</sup>, N. N. Gerasimenko<sup>1</sup>, N. A. Medetov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Institute of Electronic Technology (Technical University), Moscow, Russia (rmta@miee.ru)

<sup>2</sup> Kostanay Technical-Social University, Kostanay, Kazakhstan

The processes of self-organization in single crystal semiconductors under ion bombardment is the item of increasing interest at the last time. These processes can lead or for recentralization after amorphization in continues process of ion bombardment or to creation of ordered three dimensional (3D) systems of clusters which can present association of structural defects and impurity atoms. In some cases such clusters can demonstrate quantum dimensional properties by electrophysical, optical, luminescent and other parameters.

The problem of analysis order degree of elements in such a system is the self consistent task. We solve this problem by means of fractal analysis in combination with other analytical methods (Fourier transform) and with using of experimental methods of investigation (AFM-microscopy, Auger-spectrometry with high space resolution, Raman scattering of light, low temperature photoluminescence) for comparison.

It was shown that fractal dimension serve as quantitative parameter characterizing the degree of order for nanodimensional elements. In some cases this parameter will discover the ordering even if when other methods can not give the possibility disclose the ordering and make a quantitative estimation of its degree.

The computer simulation of systems consisting of different structure elements with different level of ordering was carried out. This procedure gave the possibility to estimate of ordering level quantitatively. In some cases the dependence of this ordering on fractal dimension demonstrate non monotonic (in separate cases - oscillating) character. For system with the dense space structure of clusters the dependence of fractal dimension on degree of organization exist as quasilinear and its angle coefficient increase with growing of cluster density.

## Анализ результатов прецизионного измерения параметров многослойных структур

С. А. Апрелов<sup>1,2</sup>, А. Г. Турьянский<sup>1</sup>, Н. Н. Герасименко<sup>1,2</sup>, А. Н. Тарасенков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский Государственный Институт Электронной Техники (ТУ),  
Москва, Зеленоград, Россия (RMTA@miee.ru)

<sup>2</sup> Институт рентгеновской оптики, Москва

<sup>3</sup> Технологический Центр МИЭТ, Москва, Зеленоград, Россия

Большое внимание исследователей в мировой науке привлекает физико-техническое направление, связанное с анализом структуры полупроводников (главным образом полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ , кремнии и связанном с ним диэлектрике  $SiO_2$ ) рентгеновскими методами, в частности с одним из направлений рентгеновской оптики – капиллярной рентгеновской оптики. В связи с этим предлагаемая работа базируется на использовании приборов, разработанных Институтом Рентгеновской Оптике и

основанных на применении устройств, называемых в мировой литературе *линза* и *полулинза Кумахова*.

Для обеспечения процесса измерения жизненно необходим контроль параметров прибора и последующий математический анализ полученных данных, который основан на использовании аналитического программного обеспечения, эффективность которого зависит от используемых алгоритмов анализа и обработки.

В работе по определению параметров слоёв многослойной металлизации применяется метод определения толщин и структурных особенностей многослойных структур на базе рентгеновской рефлектометрии, обеспечивающий возможность экспресс анализа результатов исследования имплантированных слоёв в полупроводниках. Расшифровка полученных результатов исследования и решение обратной задачи были проведены с использованием разработанного авторами аналитического программного обеспечения построенного на принципах применения генетических алгоритмов.

Приводятся конкретные результаты, демонстрирующие возможности применяемой аппаратуры по разрешению, времени проведения измерений и другим эксплуатационным характеристикам.

### **Влияние облучения реакторными нейтронами и температуры на структуру монокристаллов InP**

В. М. Бойко, В. Т. Бублик\*, М. И. Воронова\*, Н. Г. Колин, Д. И. Меркурисов, К. Д. Щербачев\*  
Филиал ФГУП «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова»,  
г. Обнинск, Россия (ngkolin@mail333.com)

\*Московский Государственный институт стали и сплавов  
(Технологический университет), г. Москва, Россия

Представлены результаты исследования характера влияния облучения быстрыми и полным спектром реакторных нейтронов и последующих термообработок на структурные характеристики монокристаллов InP.

Прецизионные измерения периода решетки проводились методом Бонда с использованием  $\text{CuK}_{\alpha 1}$  излучения ( $\lambda=0,15405934\pm0,00000082$  нм) и асимметричного отражения (337). Точность измерений параметра решетки составляла  $\pm 1\cdot 10^{-6}$  нм. Для изучения микродефектов, образующихся при облучении, использовался метод диффузного рассеяния рентгеновских лучей (ДРРЛ), позволяющий выявлять не только микродефекты в виде выделений частиц новой фазы и дислокационных петель, но и кластеры точечных дефектов, невыявляемые методом просвечивающей электронной микроскопии, которые когерентны с матрицей и обладают размытой границей и малыми градиентами полей смещений. Такие дефекты могут возникать в процессе облучения нейтронами и при распаде разупорядоченных областей, сопровождающемся перераспределением точечных дефектов и аннигиляцией межузельных и вакансионных дефектов.

Показано, что, в отличие от других полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$ , в монокристаллах InP при облучении нейтронами период решетки уменьшается. Уменьшение периода решетки после облучения наблюдается для всех значений концентрации Te в исходном материале, а также для образца, содержащего в исходном состоянии Sn. Более резкое уменьшение периода решетки наблюдается в монокристаллах с  $n_{исх} > 8.0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Основной вклад в изменение периода решетки вносят быстрые нейтроны. Наличие составляющей тепловых нейтронов, приводящих к образованию в материале атомов Sn, не вызывает существенного изменения периода решетки.

Термообработка облученных образцов до температуры порядка 600 °С приводит к отжигу радиационных дефектов и восстановлению периода решетки, а при больших флюенсах нейтронов период решетки становится больше, чем до облучения.

Анализ полученных экспериментальных результатов позволил сделать предположение о том, что уменьшение периода решетки в InP при облучении нейтронами вызвано в основном образовавшимися антиструктурными дефектами  $P_{In}$ , вызывающими в данном случае эффект, аналогичный вакансионным дефектам.

### **Точечные дефекты в полупроводниках: электронная структура, химические тенденции**

В. Н. Брудный\*, С. Н. Гриняев\*, Н. Г. Колин\*\*

\*СФТИ им. акад. В.Д. Кузнецова при ТомГУ, Томск, Россия (brudnyi@ic.tsu.ru)

\*\*Обнинский филиал НИФХИ им. акад. Л. Я. Карпова, Обнинск, Россия

Рассматриваются простейшие точечные дефекты - вакансии анионов  $V_A$  и катионов  $V_C$ , а также антиструктурные дефекты  $A_C$ ,  $C_A$  в бинарных полупроводниках группы III-V в качестве основных дефектов, ответственных за изменение электрических параметров материала при высокоэнергетическом радиационном воздействии. Расчет состояний собственных точечных дефектов проводился методами модельного нелокального псевдопотенциала и расширенной элементарной ячейки. Глубокие уровни дефектов отождествлялись с состояниями сверхрешетки из периодических дефектов при равном нулю волновом векторе сверхрешетки. Из полученных данных следует, что для наиболее “сильных” дефектов из вакансий анионов глубокие уровни во всей группе кристаллов имеют почти одно и то же энергетическое положение 4.51 eV относительно уровня вакуума. Эти данные хорошо согласуются с соответствующими расчетами для модельного глубокого уровня  $E_V^{abs} \approx 4.63 \text{ eV}$ , который играет роль локального уровня Ферми в облученном полупроводнике [1]. Показано, что с уменьшением “мощности” дефекта среднее значение глубокого уровня все больше отличаются от результатов соответствующего модельного расчета положения уровня  $E_V^{abs}$ . Усреднение энергетических уровней по соответствующим парам дефектов  $C_A - A_C$ ,  $V_C - V_A$  и по всей совокупности рассмотренных в работе собственных точечных дефектов дает средний энергетический уровень  $E_{av} \approx 4.9 \text{ eV}$ , который исполняет роль уровня Ферми в дефектном

материале. Представленная работа проясняет роль точечных дефектов в облученных полупроводниках и показывает, что дефекты на основе анионных вакансий, наиболее “мощные” дефекты среди рассмотренных в данной работе структурных нарушений решетки, играют особую роль. Их энергетическое положение близко к положению наиболее глубокого модельного состояния дефекта  $E_B$ . Поэтому уровни  $V_A$  могут выступать в качестве универсальных энергетических уровней (“меток”), единых в группе полупроводников с родственным типом химических связей. Проведенные исследования не исчерпывают возможный набор собственных дефектов в облученных полупроводниках, поскольку характер радиационных дефектов от условий облучения материала, и в качестве таковых дефектов могут выступать как точечные дефекты при облучении полупроводника гамма - квантами или электронами, так и ассоциированные дефекты (кластеры) в материалах, облученных ионами или быстрыми нейтронами.

#### References

1. V. N. Brudnyi, S. N. Grinyaev, N. G. Kolin. *Physica B*, **348**, 213 (2004).

### **Ultrafast and fast stages of relaxation of insulating materials excited by high-current-density electron beams**

D. I. Vaisburd

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (vaisburd@tpu.ru)

High-current electron and ion accelerators whose parameters are adjusted within intervals 0.1-1.0 MeV, 10-10000 A/cm<sup>2</sup>, 0.1-100 ns were designed and built in the middle 60s. These accelerators, along with nuclear explosion and lasers, became one of the most powerful man-made sources of radiation and particle beams. Their application in the research and treatment of materials for about 40 years has brought along new experimental methods and much information on fast electronic processes and structure defects. The present work is a short review of the main results obtained in this field by means of experiment, theoretical analysis and numerical simulation of the basic processes. A high-power electron beam causes an intensive inflation process covering the time interval of 10<sup>-18</sup> to 10<sup>2</sup> s in an insulating material. This process results in increasing the number and a simultaneous lowering of the average energy of transient electronic and lattice excitations. The present work deals with the time sequence of the stages of this inflation process. 10<sup>-18</sup> – 10<sup>-17</sup> s: primary impact and Auger ionization in the material and generation of secondary electrons and holes. 10<sup>-17</sup> – 10<sup>-15</sup> s: time evolution of the excited electrons energy distribution from the primary beam to the “instantaneous” one, formed prior to electron-phonon scattering. 10<sup>-15</sup> – 10<sup>-12</sup> s: time evolution of excited non-ionizing electrons and holes, and their energy-momentum distributions from the “instantaneous” to quasi-stationary ones in the process of electron-lattice relaxation. The contribution of short-wavelength phonons is especially large in this stage. 10<sup>-12</sup> – 10<sup>-11</sup> s: thermalisation of excited electrons and holes filling the edges of the energy bands. The contributions of long-wavelength optical and acoustic phonons are decisive at this stage. 10<sup>-11</sup> - 10<sup>-7</sup> s: various trapping/detrapping processes including thermostimulated tunneling from

trap to band and back (Poole-Frenkel effect), impact and Auger ionization of traps, and electron-hole recombination.  $10^{-11} - 10^{-7}$  s: strong electric field formation due to trapping the electrons of primary beam in the insulating material, the effects of electron-hole space redistribution and heating in a high electric field.  $10^{-9} - 10^{-7}$  s: formation of strong thermoelastic and shock mechanical fields of two types: an acoustic one which propagates with sound velocities, and a quasi-static one which propagates with thermal conductivity.  $10^{-7} - 10^{-3}$  s: decay of primary acoustic fields into intrinsic modes: longitudinal, flexural, etc., generation and motion of dislocations and cracks, plastic deformation, and brittle destruction of materials.  $10^{-3} - 10^2$  s: slow thermostimulated diffusion of defects in quasi-static mechanical fields.

The complexity of the processes grows with the increase of a stage duration. The situation is far from a comprehensive description or even understanding. Nevertheless, many new effects observed were explained.

### **Термооптические эффекты, связанные с поверхностными структурными нарушениями на кремнии**

Н. Н. Герасименко (мл.)<sup>1</sup>, Н. Н. Герасименко<sup>2</sup>, Ю. Н. Пархоменко<sup>3</sup>, В. Ю. Троицкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт системных исследований РАН, Москва, Россия (nikolay\_gerasimenko@srisa.ru)

<sup>2</sup> Московский институт электронной техники (ТУ), Москва, Зеленоград, Россия

<sup>3</sup> Московский институт стали и сплавов (ТУ), Москва, Россия

В предыдущем сообщении были представлены результаты исследования с помощью термооптических методов особенностей проявления радиационных дефектов, формируемых в кремнии ионной бомбардировкой [1]. Результаты данной работы показано, что изменения во времени амплитуды термооптического отклика, связанного с присутствием структурных нарушений в приповерхностной области кремния (в т.ч. радиационных), могут определяться как перезарядкой дефектных центров, так и отжигом (перестройка структуры) при температурах вплоть до комнатной.

Радиационные дефекты, по термооптическому отклику, демонстрируют как процесс перезарядки, так и процесс отжига. В тоже время, структурные дефекты, создаваемые высокотемпературным окислением (двойники и дефекты упаковки), проявляются только по величине термооптического отклика, независимого от процесса перезарядки. Представлена возможность стабилизации поверхности с помощью высокотемпературного окисления, определены минимальные толщины окисла, приводящие к эффекту стабилизации.

Показано, что величина термооптического отклика на имплантированных образцах кремния зависит от массы имплантируемого иона: сигнал увеличивается с массой иона, что определяется степенью разрушения кристаллической решетки.

### **Литература**

1. Доклад на 5-ом уральском семинаре “Радиационная физика металлов и сплавов”, Снежинск, 2003.



# **Сравнительное исследование радиационной проводимости монокристаллов ионных диэлектриков и природного алмаза при облучении электронными и рентгеновскими пучками наносекундного сильноточного ускорителя**

Д. И. Вайсбурд, Е. В. Голов, Э. Г. Таванов  
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия (golov@mail2000.ru)

В лаборатории нелинейной физики Томского политехнического университета с 1972 г. ведутся исследования объемной радиационной проводимости диэлектриков под воздействием сильноточных пучков электронов. Результаты первых исследований приведены в монографии [1]. Среди исследуемых материалов основное место занимают щелочно-галлоидные кристаллы (ЩГК). Также изучались кварц, аморфные и поликристаллические структуры, органические диэлектрики и некоторые другие материалы. Было установлено, что при высоких мощностях дозы в объемную проводимость ЩГХ основной вклад вносят ионизационно-пассивные высокоэнергетические электроны, время жизни которых  $10^{-12} \dots 10^{-11}$  секунд. Эта проводимость, получившая название «высокоэнергетической», сильно отличается от низкоэнергетической и горячей, известных из физики полупроводников.

Высокоэнергетическую проводимость удастся выделить в чистом виде благодаря низкой подвижности низкоэнергетических носителей  $1 \dots 10 \text{ см}^2/(\text{Вс})$  в ЩГК. Её изучение дает ценную информацию об интенсивности взаимодействия электронов с коротковолновыми фонами (с большим квазиимпульсом). В связи с этим большой интерес представляет сравнение проводимости ЩГК и чистого природного алмаза, в котором низкоэнергетические носители имеют высокую подвижность до  $2000 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ .

Исследование проводимости монокристаллов природного алмаза было проведено по той же экспериментальной методике, которая применялась для исследования радиационной проводимости ЩГК. Были построены вольт-амперные характеристики (ВАХ) алмаза, по которым была установлена зависимость удельной проводимости от плотности электронного и рентгеновского пучка. Сравнение полученных результатов для алмаза с данными ЩГК показало: 1) амплитуды импульсов проводимости алмаза и ЩГК с увеличением приложенного напряжения к образцу монотонно возрастают; 2) ВАХ алмаза имеют три линейных участка; 3) удельная проводимость алмаза выше удельной проводимости ЩГК.

По разработанной теоретической модели высокоэнергетической проводимости было проведено компьютерное моделирование. Результаты моделирования сравниваются с данными, полученными в ходе эксперимента.

## **Литература**

1. Вайсбурд Д.И., Семин Б.Н., Таванов Э.Г. и др., Высокоэнергетическая электроника твердого тела, Наука, Новосибирск, 1982, 227 с.

## **Исследование свойств композитных полимерных материалов содержащих углеродные нанотрубки и нановолокна**

А. М. Грехов<sup>1</sup>, М. А. Козодаев<sup>1</sup>, А. Б. Тарасенко<sup>1</sup>, С. Н. Блинов<sup>2</sup>, И. Г. Иванов<sup>2</sup>, П. В. Гвасалия<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики  
им. А.И. Алиханова, Москва, Россия (grekhov@nm.ru)

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>3</sup>НИИ Нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева, Москва, Россия

Методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) были синтезированы углеродные наноструктуры (нанотрубки и нановолокна) с различной топологией. Полученные наноструктуры были внедрены в полимерную матрицу. Исследованы зависимости физических свойств таких композитных материалов от концентрации и топологии внедренных нанотрубок.

## **Вакансионные кластеры (поры) в полупроводниках: электронная структура, оптические свойства**

В. Н. Брудный\*, С. Н. Гриняев\*, Н. Г. Колин\*\*

\*СФТИ им. акад. В.Д. Кузнецова при ТомГУ, Томск, Россия (brudnyi@ic.tsu.ru)

\*\*Обнинский филиал ФГУП НИФХИ им. акад. Л.Я. Карпова, Россия

Вакансионные скопления (поры) могут формироваться в полупроводниках при облучении быстрыми нейтронами или тяжелыми ионами. В последнее время пористые полупроводники получают также ростовыми методами или с помощью селективного травления. Несмотря на интенсивные исследования пористых материалов природа электронных состояний вакансионных кластеров, электрических параметров такого материала, а также происхождения полос оптического поглощения и излучения до сих пор остается предметом дискуссии из-за сложности интерпретации квантово-размерных эффектов электронных состояний в кластерных полупроводниках. Между тем выяснение природы электронных состояний и полос поглощения и фотолюминесценции пористого материала необходимо для его использования в микро- и оптоэлектронике.. Для этого необходим детальный анализ оптических свойств такого полупроводника, позволяющий установить тип критических точек для оптических переходов в зависимости от степени пористости материала.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование электронных состояний и оптических свойств пористого Si и GaAs, содержащих вакансионные кластеры, расчет электронных состояний которых выполнен с применением методов модельного псевдопотенциала и расширенной элементарной ячейки. Рассмотрены тетраэдрические кластеры, в которых дефекты расположены в последовательных координационных сферах, содержащих в совокупности до 329 вакансий. Показано, что вакансионные кластеры выступают многозарядными центрами, электронные состояния которых формируются в результате “взаимодействия” состояний отдельных вакансий. С ростом

размеров кластеров увеличиваются энергетическое положение уровней кластерных состояний, растет число соответствующих глубоких уровней, выталкиваемых из валентной зоны полупроводника, и опустошается все большее число состояний объемного спектра вблизи потолка валентной зоны кристалла. Эти изменения в электронной структуре пористого полупроводника проявляются в виде спектральных сдвигов и в изменении интенсивностей пиков оптического поглощения. Установлено происхождение наиболее интенсивных пиков поглощения пористого материала. Изучена зависимость положений глубоких уровней и спектров поглощения от зарядового состояния кластеров. Показана возможность описания кластерных состояний в пористых полупроводниках в рамках метода эффективной массы с плавным потенциалом на гетерогранице.

### **Теоретический расчет, моделирование и экспериментальное исследование сверхбыстрых электронных процессов $10^{-18} \dots 10^{-12}$ с, возбуждаемых в диэлектрике электронными и лазерными пучками высокой плотности**

Д. И. Вайсбурд, К. Е. Евдокимов

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия (vaisburd@tpu.ru)

Предметом исследования данной работы являются сверхбыстрые электронные процессы  $10^{-18} \dots 10^{-14}$  с в диэлектрике, которые вызываются воздействием интенсивных электронных или лазерных пучков. Первичным эффектом такого воздействия является появление электронных возбуждений с энергией, превышающей потенциалы ионизации квазиатомных уровней и валентных зон материала. Высокоэнергетические электронные возбуждения путем ударной и оже-ионизации порождают электроны и дырки меньших энергий, которые в свою очередь продолжают процесс ионизации среды. Этот процесс прекращается, как только частицы становятся ионизационно-пассивными, то есть теряют способность ионизовать среду. Трек быстрого электрона представляется как последовательность областей вторичной ионизации, так называемых «шпор», которые размещены вдоль траектории первичной частицы на расстоянии друг от друга много больше диаметра отдельной «шпоры». Основной задачей этой работы было вычисление «мгновенного» энергетического распределения ионизационно-пассивных электронов и дырок в «шпорах», которое устанавливается до начала электрон-фононной релаксации. Такое распределение является начальным для всех кинетических уравнений, описывающих последующую релаксацию электронных возбуждений в облученном материале.

Разработана методика расчета мгновенного распределения ионизационно-пассивных электронов и дырок при облучении кристалла интенсивным электронным или лазерным пучком. Методика основана на решении системы интегро-дифференциальных кинетических уравнений на функции распределения электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне и на квазиатомных уровнях. Учитываются процессы ударной ионизации среды электронами, оже-ионизации среды дырками, а также отдача дырок

валентной зоны вследствие закона сохранения импульса. Вычислена эволюция распределения электронов и дырок в NaCl от исходного энергетического распределения (спектра) электронов пучка сильноточного электронного ускорителя типа «Джин» до «мгновенного» в диэлектрике. В расчете использовался электронный спектр NaCl, вычисленный в [1]. Сечение ионизации рассчитывалось по формуле, предложенной в работе [2].

#### **Литература**

1. N.O.Lipari, A.B.Kunz *Phys. Rev. B*, **3**, №2, P.491 (1971)
2. Д. И. Вайсбурд, К. Е. Евдокимов *Известия вузов. Физика*, №11, С. 81 (2003).

### **Влияние гамма-излучения на превращения алмаза при реакторном облучении**

В. А. Николаенко, В. Г. Гордеев, О. О. Забусов, И. В. Бачучин  
РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (zabusov@orm.irtm.kiae.ru)

Проблема влияния плотности потока быстрых нейтронов на степень радиационной повреждаемости материалов до сих пор находится в стадии обсуждения, что связано с противоречивостью экспериментальных результатов. В настоящей работе было исследовано радиационное повреждение алмаза, являющегося одним из самых удобных модельных материалов. Свойства алмаза из любого месторождения, равно как и синтетического, в исходном состоянии очень стабильны, а их изменение при облучении в идентичных условиях одинаково. Это позволяет практически исключить влияние на результаты таких обычно значимых факторов, как наличие примесей или различие в технологии приготовления.

В качестве изучаемого свойства использовалось расширение кристаллической решетки алмаза, а в ряде случаев эти данные дублировались результатами по измерению его электросопротивления.

Показано, что при высоких дозах нейтронного облучения (порядка  $10^{21}$  н/см<sup>2</sup>) происходит превращение алмаза. Причем при одинаковых температурах облучения и плотностях потоков быстрых нейтронов, флюенс, при котором происходит фазовый переход, зависит от плотности потока гамма-излучения – чем он выше, тем при более высоких флюенсах происходит переход.

### **Дефектообразование в стеклах при воздействии выделенной гамма- компоненты излучения реактора**

Э. М. Ибрагимова, М. У. Каланов, М. А. Муссаева  
Институт Ядерной Физики, Ташкент, Узбекистан (ibragimova@inp.uz)

Радиационное дефектообразование в оксидах представляет большой интерес для атомной и гелиоэнергетики, а также захоронения ядерных отходов. Комбинированное воздействие нейтронов и гамма-лучей на материалы исследовалось широко, и считалось,

что только нейтроны способны смещать атомы. Хотя оказалось, что гамма-кванты  $^{60}\text{Co}$  могут смещать легкие анионы (O, F) по неупругому механизму. На примере полированных пластин чистого плавленого кварца и бариево-силикатного стекла, содержащих включения нанокристаллитов, а также нанопористого стекла, исследовано дефектообразование при воздействии гамма-излучения остановленного реактора в интервале энергий 0.2-7 МэВ. Выбран период времени, когда устанавливается практически постоянный ток  $\sim 10\text{-}20$  нА в ионизационной камере, соответствующий средней мощности гамма-потока 15-30 Гр/с. Монокристаллы LiF были использованы для сравнительной дозиметрии гамма-потоков реактора и источника  $^{60}\text{Co}$  по хорошо известной полосе поглощения вакансий фтора, захватившей электрон.

Исследованы спектры оптического поглощения и фотолюминесценции, а также структура стекол. Оказалось, что скорость накопления заряженных вакансий кислорода с ростом дозы в бариевом стекле выше, чем в чистом  $\text{SiO}_2$ , поскольку для  $\text{SiO}_2$  с малыми  $Z$  фотоэлектрический эффект слабый и превалирует комптоновское рассеяние и фотоядерные реакции, а для Ва – наоборот. Отмечен радиационно-индуцированный рост включений кристаллических фаз в обоих стеклах, который ранее приписывался ударным смещениям атомов под действием быстрых нейтронов. Эффективность образования точечных дефектов (например,  $\text{E}'$ -центров и немостиковых атомов кислорода) в стеклах от гамма-компоненты даже остановленного реактора оказалась гораздо выше, чем при облучении эквивалентной дозой на  $^{60}\text{Co}$  гамма-источнике  $\sim 1.25$  МэВ при интенсивности  $\sim 7$  Гр/с (и ранее даже при 45 Гр/с). Обнаружено 100-кратное увеличение поверхностной протонной проводимости за счет радиолиза паров воды при гамма-облучении на поверхности пор стекла.

Работа выполнена по гранту Ф2.1.2 Центра Науки и Технологии Узбекистана.

### **Сравнительные Оптические и Электрические Исследования 4H-SiC, Облученного Нейтронами и Тяжелыми Ионами**

Е. В. Калинина\*, Г. Ф. Холуянов\*, Г. А. Онушкин\*, Д. В. Давыдов\*, А. М. Стрельчук\*,  
А. О. Константинов\*\*, В. А. Скуратов\*\*\*

\* Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, РАН, 194021 Санкт-Петербург,  
Россия (evk@pop.ioffe.rssi.ru)

\*\*AMDS AB, Österögatan 3, 164 40 Kista, Sweden

\*\*\*Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

Исследовалось влияние облучения быстрыми нейтронами и высокоэнергетическими тяжелыми ионами (Bi, Kr) как на дефектообразование в SiC, так и на некоторые электрические характеристики диодных структур, сформированных в этом материале.

4H-SiC эпитаксиальные слои толщиной 26 мкм с  $Nd\text{-}Na = (5\text{-}8) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  выращивались CVD методом на коммерческих подложках. Cr барьеры Шоттки (SBs) формировались методом термовакуумного напыления, а  $p^+ \text{-} n \text{-} n^+$  диодные структуры создавались методом имплантации ионов Al с энергией 150 кэВ, дозой  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  с

последующим высокотемпературным активационным отжигом. Исходные образцы и диодные структуры облучались быстрыми нейтронами с энергией 1 МэВ и суммарным флюенсом  $6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , а также ионами Bi с энергией 710 МэВ флюенсами  $1.4 \times 10^9 - 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и ионами Kг с энергией 245 МэВ флюенсами в диапазоне  $5 \times 10^9 - 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Структура дефектных центров в исследуемых образцах изучалась по спектрам фотолюминесценции (PL) при температуре 77 К, по вольт-фарадным (CV) и DLTS данным, полученным в температурном диапазоне 80-700 К. Измерения ВАХ диодных структур проводились на постоянном токе при температурах 293-700 К.

Согласно полученным PL, DLTS и CV данным, нейтроны и высокоэнергетические ионы вызывали образование в SiC идентичных дефектных центров, некоторые из которых отжигались при температурах до 700 К. Т.е. формирование дефектной структуры в SiC не зависит от процессов, связанных с релаксацией ионизационных потерь энергии в треках высокоэнергетических ионов вплоть до уровня 34 кэВ/нм и определяется радиационными повреждениями, созданными по каналу упругого рассеяния. Также впервые была показана возможность увеличения радиационного ресурса приборов на основе SiC при повышенных рабочих температурах. Диодные структуры, деградировавшие после облучения, восстанавливали свои выпрямляющие свойства при рабочих температурах 700 К.

#### **Литература**

1. Е. В. Калинина, Г. Ф. Холуянов, Г. А. Онушкин, Д. В. Давыдов, А. М. Стрельчук, В. А. Скуратов, А. О. Константинов, A. Hallén, A. Ю. Никифоров, K. Havancsak. ФТП **38**, 1223 (2004).
2. E. Kalinina, G. Kholujanov, G. Onushkin, D. Davydov, A. Strel'chuk, A. Zubrilov, Hallén, A. Konstantinov, V. Skuratov, J. Staňo. Materials Science Forum, **433-436**, 467 (2003).

### **Связь энергетического спектра носителей и топологии многослойных нанотрубок**

Н. Г. Кирюдчев, В. Г. Валеев, М. А. Козодаев

ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова,  
Москва, Россия (\_\_nicholas\_\_@rambler.ru)

Предмет исследования во многих теоретических работах, идеальную, тонкую однослойную нанотрубку, сложно синтезировать. Поэтому, результаты экспериментов и теоретических работ плохо согласуются. Одна из причин - топологическое различие рассчитываемых и экспериментально исследуемых углеродных нанотрубок.

В данной работе предложена модель связи энергетического спектра носителей с топологией многослойных углеродных нанотрубок. В экспериментальных исследованиях нанотрубок с определенной топологией наблюдалось хорошее совпадение наблюдаемых эффектов с результатами моделирования.

## Литература

1. M. Kociak, A. Yu. Kasumov, S. Gueron, B. Reulet, I. I. Khodos, Yu. B. Gorbatov, V. T. Volkov, L. Vaccarini, and H. Bouchiat, *Physical Review Letters*, Vol. 86 (2001), p. 2416
2. Yuanhe Huang, Mayumi Okada, Kazuyoshi Tanaka and Tokio Yamabe, *Physical Review B*, Vol. 53 (1996), p. 5129

## Модифицирование полупроводников пучками протонов

В. В. Козловский

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия  
(kozlovski@tuexp.h.stu.neva.ru)

В докладе впервые дано систематическое изложение современного состояния исследований модифицирования полупроводников пучками протонов. Выполнен анализ общих феноменологических закономерностей взаимодействия легких ионов с монокристаллическими полупроводниками. Проведено концептуальное обобщение результатов фундаментальных исследований, полученных в течение последнего времени по основным направлениям радиационного модифицирования полупроводников пучками протонов: трансмутационному ядерному легированию, легированию радиационными дефектами, формированию наноразмерных пористых слоев [1].

Общей особенностью всех анализируемых методов модифицирования является их локальность. Глубина модифицированного слоя определяется энергией протонов и их тормозными потерями в полупроводнике и реально может варьироваться от десятков нанометров до сотен микрометров. Помимо локальности, модифицирование полупроводников пучками протонов обладает следующими достоинствами, типичными для всех радиационных технологий: универсальность в отношении различных материалов; простота и сравнительно малая стоимость радиационных процессов в сочетании с высокой точностью, производительностью и воспроизводимостью.

Применение протонных пучков не ограничивается сферой микроэлектроники, – они могут быть успешно использованы в нанoeлектронике при создании квантово-размерных полупроводниковых структур. К этой сфере применений протонных пучков следует прежде всего отнести технологию «Smart Cut», применяемую для формирования SOI-материалов с нанометровыми активными рабочими слоями кремния.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 02-02-30000).

## Литература

1. Козловский В.В., *Модифицирование полупроводников пучками протонов*. Наука, Санкт-Петербург, 2003. 269 с.

## **Радиационные повреждения кремния: связь между поверхностными и объёмными дефектами**

Т. С. Балашов, А. А. Голубев, М. А. Козодаев, А. Л. Суворов  
ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова,  
Россия, Москва, (M\_Kozodaev@vitep1.itep.ru)

Образцы кремния КЭФ-4,5 были подвергнуты облучению ионами углерода, с энергией 100 МэВ/нуклон и с флюенсом  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , под различными углами к поверхности. Поверхность образцов исследована методами сканирующей зондовой микроскопии, объёмные дефекты - методами протонной аннигиляции. Изучена взаимосвязь объёмных и поверхностных дефектов.

## **Прохождение тепловых нейтронов в монокристаллах полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$**

Д. И. Меркурисов, В. М. Бойко, Н. Г. Колин, О. Л. Кухто  
Филиал ФГУП «Научно-исследовательский физико-химический институт  
им. Л. Я. Карпова», г. Обнинск, Россия (ngkolin@mail333.com)

Методом времени пролета проведено измерение полных сечений взаимодействия медленных нейтронов в монокристаллах полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$  (GaAs, InP, InAs и InSb) в диапазоне энергий от 1 мэВ до 1 эВ. Проведено сопоставление экспериментальных данных с расчетными и получено хорошее соответствие.

Проведен расчет распределения тепловых нейтронов по глубине исследуемых пластин при одностороннем и двустороннем облучении на основе приближенного решения уравнения переноса (теории возмущений первого порядка).

Рассчитаны транспортные характеристики диффузии нейтронов и проведена оценка неоднородности распределения потока нейтронов в сильно поглощающих веществах для коллимированного и изотропного облучения. Определены оптимальные геометрические размеры образцов GaAs, InP, InAs и InSb для реализации технологии ядерного легирования.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при двустороннем облучении пластин толщиной не более 2 мм неравномерность распределения тепловых нейтронов по глубине составляет порядка 10 % для InSb, 12 % для InAs и 13 % для InP. Однако если учесть, что конечная толщина пластин, используемых в производстве, составляет в среднем 600 мкм, то неравномерность распределения легирующих примесей по объему не превышает 1 % для всех исследуемых материалов.

В рамках требований однородности распределения примесей по кристаллу, предъявляемых заказчиками, и с учетом полученных нами экспериментальных зависимостей следует считать, что в реальных условиях образцы арсенида галлия с целью ядерного легирования можно облучать медленными нейтронами реактора при двустороннем облучении лишь при условии, что хотя бы один внешний размер образца не превышает 50 мм. Неравномерность распределения тепловых нейтронов по глубине в монокристаллическом слитке GaAs диаметром 50 мм не превышает 8 %.



## **Ионизационные токи в диэлектрических материалах микроэлектроники при высокоинтенсивном импульсном облучении**

В. Т. Пунин, А. В. Грунин, А. М. Молитвин, Е. И. Бурсикова, А. А. Герасименко, А. В. Гришин,  
С. А. Горностай-Польский, С. А. Лазарев, Д. В. Ткачук  
Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, г. Саров, Россия (a-molitvin@expd.vniief.ru)

Одна из причин нарушения работоспособности современных функционально сложных интегральных микросхем связана с тем, что при воздействии импульсного ионизирующего излучения происходит перераспределение потенциалов на внутренних электродах из-за протекания по цепи питания паразитных ионизационных токов. Динамика этих токов определяется напряженностью электрического поля в подложке и её электрофизическими параметрами: временем жизни и подвижностью неравновесных носителей заряда.

В докладе приведены результаты исследований кинетики радиационно-наведённой электропроводности (РНЭ) кристаллов оксида кремния при воздействии короткого ( $\sim 1$  нс) импульса электронного излучения ускорителя БЕТА [1] с мощностью поглощенной дозы в диапазоне от  $5 \cdot 10^{12}$  до  $2 \cdot 10^{14}$  рад( $\text{SiO}_2$ )/с и двух типов кристаллов сапфира производства НПО «ЭЛМА» при воздействии тормозного излучения (ТИ) ускорителя ЛИУ-30 [2] с длительностью импульсов на половине высоты  $\sim (15-20)$  нс и мощностью поглощенной дозы в диапазоне от  $10^{10}$  до  $2 \cdot 10^{13}$  рад( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/с. Зависимость максимального значения РНЭ от мощности поглощённой дозы  $P_\gamma$  для сапфира первого типа – линейная, а для сапфира второго типа и оксида кремния – степенная, с показателями степени  $\Delta = 0,46 \pm 0,07$  и  $\Delta = 0,68 \pm 0,06$  соответственно. С увеличением мощности поглощённой дозы (при  $P_\gamma > 10^{12}$  рад( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/с) в кинетике проводимости обоих типов сапфира заметно влияние процесса рекомбинации носителей заряда. При воздействии короткого ( $\sim 1$  нс) импульса ионизирующего излучения становится заметной задержанная компонента РНЭ исследованных диэлектриков.

Отмечена нестабильность радиационных характеристик образцов сапфира, изготовленных по разным технологиям. Это обстоятельство накладывает особые требования к технологии изготовления сапфировых подложек интегральных микросхем.

Приведенные в докладе электрофизические параметры подложек современных интегральных микросхем могут быть использованы для оценки перераспределения потенциалов на внутренних электродах из-за протекания паразитных ионизационных токов по цепи питания.

### **Литература.**

1. Белкин Н. В., Тараканов М. Ю., Тарасов М. Д. // *ПТЭ*, 1987, №6, с.133.
2. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Герасимов А. И. и др. // *ПТЭ*, 1998, №2, с.13.

## **О влиянии сорбированной воды на радиационные эффекты оксидированных алюминия и кремния (100)**

С. Н. Новиков, С. П. Тимошенко.

Московский институт электронной техники (Технический университет),  
Зеленоград, Россия (spt@chem.miee.ru)

Исследовано влияние различных доз  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ) на электронные свойства (работу выхода электрона-РВЭ) образцов алюминия и кремния (100), имеющих оксидную пленку различной толщины.

Оценка электронных свойств проводилась методом статического ионизированного конденсатора [1] в атмосферных условиях.

Параллельно с облучением те же образцы исследовались методом термического анализа поверхностного потенциала.

Полученные результаты позволяют объяснить значительные изменения электронных свойств облученных образцов, аналогичные приведенным в литературе [2], сорбционными процессами взаимодействия воды (и продуктов ее диссоциации) на границах раздела  $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Si-SiO}_2$ .

В частности, слабое изменение РВЭ (менее 10 %) в диапазоне доз от 10 до  $10^4$  рад, вероятно, связано с десорбцией слабо связанных молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , тогда как при дозах  $10^4$ - $10^8$  рад значительное возрастание РВЭ (более 30 %), сопровождаемое изменением знака заряда поверхности с положительного на отрицательный, по-видимому, обусловлено распадом (диссоциацией) поверхностных водных кластеров и образованием гидроксидов. Указанные изменения существенно зависят от толщины оксидной пленки (наибольшие для термических оксидов 100-200 Å). Наблюдаемые радиационные эффекты являются обратимыми с большими временами релаксации, зависящими от влажности окружающей среды (десятки суток при 60 % и ~ 2 суток при 100 %).

### **Литература**

1. Новиков С.Н., Тимошенко С.П., Изв. вузов, Электроника, 2002, №5, стр. 81
2. Nicollian, Brews, «MOS. Physics and Technology», N-Y, 1982, p.549

## **Влияние нейтронного облучения на характеристики $\text{SiC}$ p-n структур**

Н. Г. Орлов, В. Т. Громов, В. П. Шукайло

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия (dep5@vniitf.ru)

Карбид кремния ( $\text{SiC}$ ) – перспективный материал экстремальной электроники, способный сохранять работоспособность при высоких температурах и уровнях облучения. Были исследованы 6H- $\text{SiC}$  p-n структуры, полученные в ФТИ им. Иоффе методом сублимационной эпитаксии в вакууме  $p^+$  слоя на основе  $n^+$  подложки Лэли. P-n переходы были выращены на грани (0001)  $\text{SiC}$ , легирующей примесью служил Al (p-тип). Концентрация нескомпенсированной примеси в  $n^+$  подложке  $(N_d - N_a) = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Толщина эпитаксиальных слоев  $p^+$ -типа составляла 1-2 мкм, а толщина подложки  $n$ -типа - 400 мкм. Для исследований были использованы импульсные реакторы ЯГУАР и ИГРИК с  $\tau_u \sim 1$  мс,  $\bar{E}_u = 1,1$  МэВ.

Проведенные  $C-V$  измерения показали, что для представленных образцов концентрация легирующей примеси в  $p^+$  слое  $(Na-Nd)_p = 5.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Получена зависимость степени радиационной компенсации эпитаксиального слоя от флюенса нейтронов. Данные хорошо укладываются на линейную зависимость, угол наклона которой определяет скорость удаления носителей заряда в полупроводнике. Величина скорости составляет, соответственно,  $5.3 \text{ см}^{-1}$ .

Величину относительного изменения сопротивления прямой ветви диода от флюенса нейтронов, экспериментальные значения которой представлены на Рис. 1, можно оценить через концентрацию дефектов:

$$\frac{R}{R_o} = \frac{I}{I - \frac{a \cdot \Phi_n}{n_o}}$$

На Рис. 1 сплошная линия – расчет при:  $a = 5.3 \text{ см}^{-1}$ ;  $n_o = 2.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $a \cdot \Phi_n < n_o$ .

Полученная оценка показывает, что для данной партии приборов при флюенсе около  $4 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2$  практически полностью компенсируется примесная проводимость и проводимость полупроводника стремится к собственной. Таким образом, с помощью нейтронного облучения, возможно получение полуизолирующего SiC. Полученное в данной работе значение удельного сопротивления полуизолирующего слоя при флюенсе нейтронов  $5.6 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2$  составило  $2.8 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

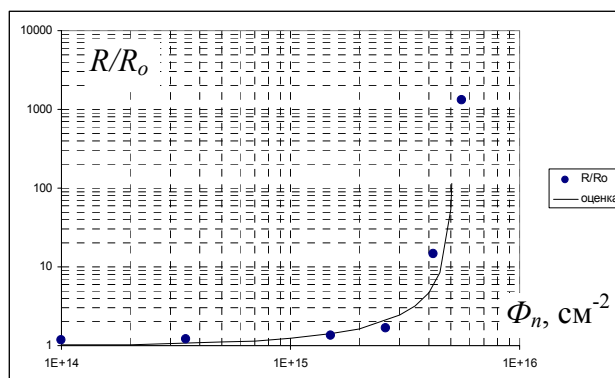


Рис. 1 Зависимость относительного изменения прямого сопротивления диода от флюенса нейтронов

## Ge-Si наноструктуры полученные осаждением из ионно-молекулярных пучков

Ж. В. Смагина, А. В. Двуреченский, В. А. Володин, В. А. Армбристер  
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
(smagina@isp.nsc.ru)

Методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение экспериментально исследована морфология, деформация и сверхструктура поверхности плёнки Ge на подложке Si(100) в процессе гетероэпитаксии из молекулярного пучка с одновременным импульсным облучением собственными низкоэнергетическими (100-200 эВ) ионами. Исследуемые структуры выращивались в установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) со встроенным ионно-молекулярным источником германия. Осаждение Ge на Si

проводилось при температуре 300-400<sup>0</sup>С двумя методами: 1) МЛЭ Ge на Si; 2) импульсное (длительностью 0.5 с) облучение ионами Ge<sup>+</sup> с энергией около 100-200 эВ в процессе МЛЭ Ge на Si. Импульсы подавались в моменты времени, соответствующие осаждению каждого атомного слоя Ge. Скорость осаждения Ge составляла ~ 0.1 МС/с (1 МС = 6.8·10<sup>14</sup> атом/см<sup>2</sup>). Обнаружено, что облучение низкоэнергетическими ионами в процессе гетероэпитаксии Ge/Si(100) стимулирует зарождение трехмерных “hut” островков и последующий переход от “hut” к “dome” островкам. Увеличение энергии ионного пучка от 100 до 200 эВ приводит к смещению перехода в область меньших интегральных потоков ионно-молекулярного пучка. Обнаружены корреляции между изменением постоянной решётки и реконструкцией поверхности Ge/Si(100). В области низких температур (~300<sup>0</sup>С) на стадии зарождения “hut”-кластеров наблюдается переход от реконструкции (2 × N) к (M × N).

Исследования механических напряжений и элементарного состава в гетероструктурах со встроенными слоями нанокластеров Ge проводились с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света. Для этого выращивали многослойные гетероструктуры, состоящие из десяти слоев Ge, сформированных осаждением 5 или 7 монослоев разделенных слоями Si толщиной 50 нм. Установлено, что ионно-стимулированное зарождение и последующий рост позволяет получать напряженные островки, состоящие преимущественно из германия (более 78 %).

### **Исследования процессов формирования и свойств наноструктур на базе кремния, полученных методом ионного облучения, в НИФТИ ННГУ**

Д. И. Тетельбаум, А. А. Ежевский, А. В. Ершов, А. Н. Михайлов, М. Ю. Лебедев,  
Ю. А. Менделева, А. И. Белов

Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия (Tetelbaum@phys.unn.ru)

Создание наноструктурированных слоев кремния – актуальная задача современной электронной техники, в частности, в связи с проблемой создания светоизлучающих приборов на базе этого основного для микроэлектроники материала. Для решения этой задачи широко применяются ионно-лучевые методы – ионная имплантация и ионное дефектообразование. В НИФТИ ННГУ на протяжении ряда последних лет проводятся исследования, вносящие вклад в разработку физических основ указанных методов.

При создании люминесцентных наноструктурированных систем путем ионной имплантации кремния в SiO<sub>2</sub> с последующим отжигом (SiO<sub>2</sub>:nc-Si) изучено влияние дозы Si<sup>+</sup> и температуры отжига на формирование светоизлучающих нанокристаллов. Разработана модель коалесценции (Оствальдовского "созревания") нанокристаллов, позволяющая объяснить немонотонную зависимость интенсивности фотolumинесценции (ФЛ) от дозы кремния и температуры отжига. Впервые показано, что усиление ФЛ может быть достигнуто путем ионного легирования фосфором.

Выполнены предварительные исследования по созданию светоизлучающих структур путем ионной имплантации Si<sup>+</sup> в сапфир и тонкие пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si. Установлено

немонотонное изменение интенсивности зеленой ФЛ с ростом температуры отжига.

Предложен, обоснован и реализован метод получения светоизлучающих наноструктурированных слоев на кремнии путем облучения его ионами. Теоретически и экспериментально показано, что максимальная интенсивность ФЛ достигается в области доз, предшествующих полной аморфизации поверхностного слоя. Это связано с формированием композитной структуры, состоящей из нанокристаллических включений Si (остаточная кристалличность) в матрице аморфного кремния. Кроме того, установлено, что при облучении  $\text{Ne}^+$  существует вторая область доз (значительно превышающих дозу аморфизации), где имеет место интенсивная ФЛ. В этой области наноструктурирование обусловлено вторичными процессами, связанными с блистерообразованием и рекристаллизацией аморфного слоя в условиях высоких механических напряжений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (грант №А03-2.9-507, НТП «Исследования высшей школы в приоритетных направлениях науки и техники»), совместной программы Минобрнауки РФ и фонда CRDF (BRHE REC-001), программы FP6 (STREP No. 505285-1), грантов INTAS (№ 00-0064) и РФФИ (№№ 00-02-17488, 04-02-16493).

### **Оценка нестационарного температурного режима кремниевых пластин при бомбардировке пучками ионов киловаттной мощности**

Е. Г. Тишковский, И. А. Шуллер

Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева 13, 630090  
Новосибирск, Россия (tish@thermo.isp.nsc.ru)

Имплантеры, созданные для внедрения вещества до доз, необходимых для проведения реакций твердофазного синтеза (порядка  $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) рассчитаны на энергии не более 200 - 300 кэВ и токи пучка в десятки и даже сотни миллиампер. Облучение пучками такой мощности в первую очередь ставит проблему механической целостности пластин, особенно в первые моменты времени после включения пучка. Кроме того, в общей направленности реакций твердофазного синтеза очень важна роль расположенных внутри кристалла плоскостей с особыми свойствами (границ раздела). При повышении мощности пучка ионов до нескольких кВт причиной возникновения такой плоскости может стать состояние плавления кристалла, или близкое к нему.

В связи с важностью этого обстоятельства был создан специальный пакет программ, позволяющий по заданным параметрам облучения (энергия ионов, ток пучка, доза) моделировать тепловую историю пластины в пространстве и во времени. В качестве функции тепловых источников в краевой задаче теплопроводности используется сумма массивов ионизационных потерь и потерь на ядерные соударения (например, для ионов кислорода с энергией 100 кэВ примерно 70 % и 30 % от полной энергии, соответственно), предварительно рассчитанные с помощью пакета SRIM-2003. Поскольку в машинном эксперименте важно было зафиксировать именно состояние плавления кристалла, или близкое к нему, краевая задача теплопроводности была аппроксимирована абсолютно

устойчивой разностной схемой с адиабатическими краевыми условиями, а влияние потерь на излучение учитывалось дополнительными итерациями, что, конечно же, не оптимально с точки зрения машинных ресурсов и времени счета.

В докладе представлены результаты расчетов нестационарного теплового режима кремниевых пластин, облучаемых пучками ионов киловаттной мощности в адиабатических условиях. Проведено сопоставление результатов, полученных при моделировании различных ситуаций, с имеющимися расчетными и экспериментальными данными по тепловому режиму пластин при имплантации пучками средней мощности.

### **Роль дефектов в процессах формирования немонотонных примесных распределений при восстановлении нарушенных ионной бомбардировкой слоев кремния**

Е. Г. Тишковский, В. И. Ободников, Л. И. Федина

Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева 13, 630090 Новосибирск, Россия (tish@thermo.isp.nsc.ru)

Исследования методом масс-спектрометрии вторичных ионов в сочетании с просвечивающей электронной микроскопией показали, что внедрение как тяжелых по отношению к кремнию ионов  $\text{Se}^+$ , так и более легких –  $\text{B}^+$  и  $\text{O}^+$  сопровождается формированием немонотонных (слоистых) распределений примеси при последующем высокотемпературном отжиге длительностью до нескольких часов [1-3]. Оказалось, что расщепление примесных распределений во всех случаях происходит по сценарию последовательного присоединения подвижного компонента примеси с образованием либо квазимолекул, наиболее топологически адаптированных к решетке кремния, либо преципитатов, выживших на стадии коалесценции пересыщенного твердого раствора и также когерентных кристаллу-матрице. При этом, независимо от степени разрушения кристаллической решетки (нарушенный слой либо аморфный, либо аморфные включения практически отсутствуют) подсистема дефектов проявляется таким образом, как если бы прямое взаимодействие вакансий и собственных междоузельных атомов с атомами примесей происходило на самой ранней стадии формирования слоистых распределений - на стадии формирования начальных и граничных условий для сравнительно медленного процесса распада пересыщенного твердого раствора примеси.

В докладе представлены результаты экспериментов, направленных на выявление роли дефектной подсистемы с помощью наблюдения за формированием расщепленных на слои примесных распределений, в том числе и на самых ранних стадиях восстановления нарушенных ионной бомбардировкой слоев. На основании анализа полученных данных сформулирована гипотеза о трактовке процесса восстановления нарушенных ионной бомбардировкой слоев как процесса распада пересыщенного твердого раствора междоузельных атомов кремния, который включает в себя зародыши двух фаз - аморфоподобные включения и микрокристаллиты, образованные в процессе потерь энергии на упругие соударения как собственно внедряемым ионом, так и атомами отдачи.

## Литература

1. A. A.Taskin, B. A.Zaitcev, V. I.Obodnikov, E. G.Tishkovsky Semiconductors. 34 (2000) 312.
2. V. I. Obodnikov, E. G. Tishkovsky Semiconductors. 32 (1998) 372.
3. E. Tishkovsky, K. Feklistov, A. Taskin, M. Zatolokin Vacuum. 70 (2003) 153.

## Влияние нейтронного облучения на гетероструктурные GaAs полевые транзисторы

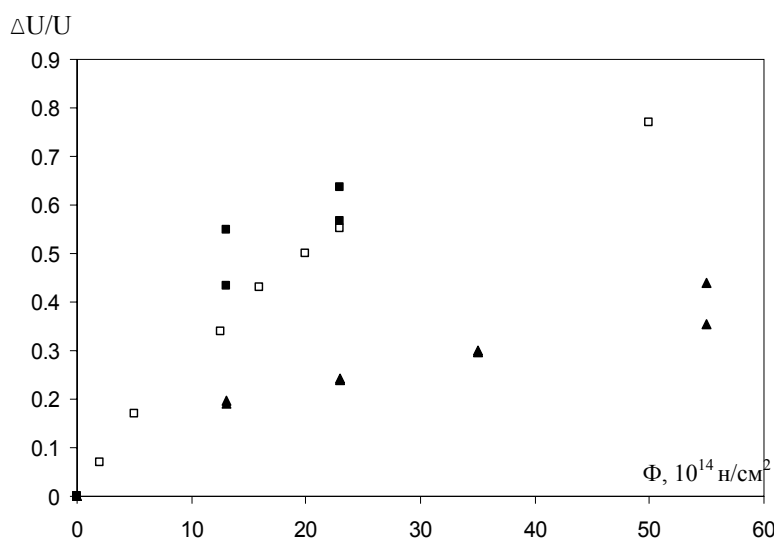
В. Т. Громов, В. П. Шукайло, О. В. Ткачев, С. В. Оболенский

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия.. НГУ, г. Нижний Новгород, Россия (факс: +7-35172-51101)

Прогресс в микроэлектронике привел к созданию приборов с наноразмерами отдельных областей, что соизмеримо с размерами радиационных кластеров, образованных при ионном или нейтронном облучении. Подобное обстоятельство может приводить к особенностям как в пространственном расположении кластера, обусловленном геометрией, материалом конструктивных элементов, а также направленностью поля облучения, так и характерной реакцией подобных приборов на облучение [1].

В настоящей работе исследовалось влияние нейтронов делительного спектра и 14-мэвных нейтронов, на эволюцию характеристик ПТШ. Измерения проводили на базе реактора ЯГУАР и нейтронного генератора НГ-12И.

Исследовались экспериментальные транзисторы, изготовленные из GaAs с затвором Шоттки, имеющие  $v$  – образный затвор.



Зависимость относительного изменения порогового напряжения  $\Delta U/U$  от флюенса нейтронов делительного спектра (реактор ИГРИК).

▲ – гетерополосные транзисторы; ■ – гомополосные транзисторы;

○ – транзистор 3P602G-2.

Исследования проводили на экспериментальных полевых транзисторах Шоттки (ПТШ) изготовленных из GaAs. Исследовались транзисторы двух видов с обычным буферным слоем и транзисторы с гетеро – буфером. Транзисторы отличались только исполнением

буферного слоя.

В ходе проведенных измерений были получены сток – затворные и вольт – амперные характеристики транзисторов в зависимости от флюенса нейтронов воздействующих на образец.

Относительное изменение порогового напряжения образцов ( $\Delta U/U$ ) в зависимости от суммарного флюенса нейтронов делительного спектра (ИГРИК), представлено на рисунке.

На основе гипотезы о том, что удаление носителей заряда связано с образованием кластеров дефектов и этот эффект превалирует, относительное изменение концентрации носителей можно оценить по выражению:

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \left( 1 - \ell^{-\frac{\bar{\Phi}}{kT}} \right) \cdot \left( 1 - \ell^{-v_k \cdot a \cdot \Phi} \right)$$

где  $v_k$  – объем области пространственного заряда (ОПЗ) кластера образованного нейтронным облучением,  $a$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – коэффициент пропорциональности характеризующий эффективность кластерообразования,  $\Phi$  – флюенс нейтронов облучения,  $\bar{\Phi}$  – среднее значение высоты потенциального барьера кластера.

Удовлетворительное описание эксперимента получено при следующих параметрах;

при воздействии нейтронов делительного спектра  $a = 0.2 \text{ см}^{-1}$ ,  $\bar{\Phi} = 0,047 \text{ эВ}$ , для 14-мэвных нейтронов  $a = 0.95 \text{ см}^{-1}$ ,  $\bar{\Phi} = 0.017 \text{ эВ}$ ; для гетеротранзисторов радиус ОПЗ 55 нм, для гомоструктур радиус 80 нм.

Таким образом, в ходе проведенных исследований было получено:

- транзисторы с гетеробуфером характеризуются меньшей чувствительностью к нейтронному облучению по сравнению с гомополевым транзистором.
- реакция мощных транзисторов с обычным затвором на нейтронное облучение близка к реакции гомополевых транзисторов с «v» образным затвором;
- ведущим фактором определяющим более низкую чувствительность является высокая концентрация основных носителей в рабочей области канала, которая достигается наличием буферного слоя.

#### Литература

1. Оболенский С. В., Китаев М. А. Самосогласование размеров кластеров радиационных дефектов при их внедрении в канал полевого транзистора. Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского.
2. Громов В. Т., Шукайло В. П., Ткачев О. В. Отчет ВНИИТФ Инв. № ПС 02.8529/2
3. Оболенский С. В. Расчет электрофизических характеристик ПТШ с v – образным затвором. Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского.

### Исследование зарядовой стойкости субмикронных интегральных КМОП КНИ-транзисторов

В. П. Шукайло, В. Т. Громов, Т. Н. Крушинская, И. В. Ворожцова  
РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия (dep5@vniitf.ru)

В настоящей работе проведены исследования влияния гамма-излучения на сток-затворные характеристики n-канальных транзисторов с различной толщиной захороненного окисла.

Выявлена зависимость величины сдвига порогового напряжения от скорости набора дозы  $\gamma$ -излучения.



Рассмотрена возможность минимизации влияния объемного заряда на сдвиг сток-затворных характеристик путем приложения электрического потенциала к подложке структуры и нейтронного воздействия.

В работах [1, 2] в предположении бимолекулярного характера рекомбинации проведено численное моделирование импульсной реакции изолирующего окисла кремния. Решалась самосогласованная задача с учетом внешних полей и поля радиационно-генерированных зарядов. Численное моделирование процессов генерации, рекомбинации, переноса, захвата и отжига заряда в слоях диэлектрической изоляции КМОП ИС показало, что, примерно, на порядок при высоких интенсивностях и слабых внешних полях уменьшается количество захваченного заряда. Эффект имеет место при  $P > 10^6 \text{ P/c}$ , см. Рис. 1 (сплошные линии). Расчетные значения сдвига порогового напряжения, нормированные на величину сдвига при  $P=100 \text{ P/c}$ , получены при дозе, переданной за импульс в 100 кРад. Результаты расчета соответствуют моменту времени окончания облучения с наименьшей мощностью дозы ( $t=1000\text{с}$ ).

На графике (Рис. 1) представлены и экспериментальные результаты настоящей работы, усредненные по пяти образцам. Они, аналогично представлению расчетных

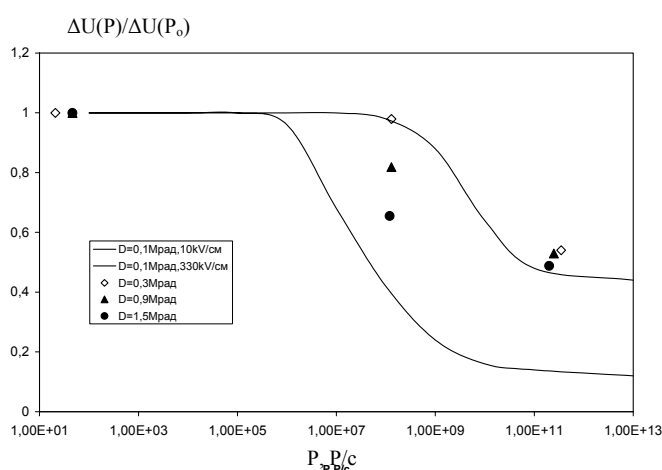


Рис. 1 Зависимости нормированного остаточного сдвига порогового напряжения от мощности дозы облучения.

порогового напряжения от мощности дозы  $\gamma$ -облучения имеет место. При дозе облучения 0.3М рад наблюдается корреляция с расчетными данными, полученными при  $E=330 \text{ кВ/см}$ .

Однако, при мощности дозы  $10^8 \text{ P/c}$  экспериментальные точки не совпадают, степень отклонения от расчета увеличивается с ростом дозы. Результаты данных измерений получены при облучении смешанным  $n/\gamma$  полем импульсного реактора. По мере набора  $\gamma$ -дозы растет и доза нейтронного облучения. Накопление ловушек электронов, по всей видимости, приводит к монотонному снижению величины положительного заряда в подзатворном диэлектрике.

данных, нормированы на величину сдвига при минимальной мощности дозы ( $P=20\text{P/c}$ ). Результаты эксперимента взяты при трех различных значениях накопленной дозы  $\gamma$ -излучения: 0.3; 0.9 и 1.5 Мрад.

Обработанный таким образом эксперимент показывает, что зависимость сдвига

В работе авторов [3] по радиационно- наведенной электропроводности (РНЭ) кристаллического кварца показано, что облучение нейтронами приводит к уменьшению РНЭ. В случае с КНИ транзисторами при смешанном гамма- нейтронном облучении можно предположить, что снижение величины накопленного положительного заряда, аналогично как и уменьшение РНЭ  $\text{SiO}_2$ , связано с образованием электронных ловушек, что, вследствие захвата электронов, с одной стороны снижает электропроводность, с другой- компенсирует положительный заряд дырок.

Можно получить эмпирическое выражение для описания сдвига порогового напряжения КНИ- транзисторов при смешанном гамма- нейтронном облучении:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{\alpha}{1 + \beta \cdot \Phi} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{D}{D_0}} \right], \quad \text{где: } \alpha, D_0 - \text{ постоянные; } \beta - \text{ параметр,}$$

полученный из исследований по радиационно-наведенной электропроводности  $\text{SiO}_2$  [3].

Как следует из выражения, предварительная нейтронная обработка без влияния на активную область прибора (отсеченный слой кремния), что принципиально позволяет КНИ – технология, может обеспечить минимизацию влияния накопленного заряда на выходные характеристики приборов.

#### Литература

1. А. Ю. Никифоров, А. В. Согоян «Моделирование особенностей радиационного поведения изолирующих структур в процессе воздействия импульсного ИИ», Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость 2002», научно-техн. сборник, выпуск 5, 2002 г.
2. А. Ю. Никифоров, А. В. Согоян «Моделирование зависимостей дозовой деградации изолирующих окислов от мощности дозы импульсного ИИ и напряженности электрического поля», Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость 2002», научно-техн. сборник, выпуск 5, 2002 г.
3. В. Т. Громов, В. П. Шукайло “Радиационно- наведенная электропроводность двуокиси кремния”, ЖТФ, т. 61, в. 6, 1991, с. 194.