

Д. ф.-м. н. А. Н. ГОРБАНЬ, к. т. н. В. В. КРАВЧИНА,
Д. М. ГОМОЛЬСКИЙ, А. И. СОЛОДОВНИК

Украина, Классический приватный университет,
ОАО "Элемент-Преобразователь"
E-mail: gorban@education.zp.ua

Дата поступления в редакцию
04.10 2007 г. — 05.03 2008 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. А. ЕВТУХ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ БЫСТРОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ

Установлено, что диодные структуры с минимальным временем восстановления и максимальным коэффициентом формы тока восстановления могут быть сформированы после облучения электронами с энергией 4 МэВ и флюэнсом $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

При разработке и изготовлении выпрямительных диодов, работающих на повышенных частотах, приходится удовлетворять противоречивые требования по обеспечению и малых потерь мощности во включенном состоянии, и малого времени восстановления обратного напряжения при переключении. Кроме того, необходимо учитывать возможность повышения обратных токов частотных диодов при высоких температурах. Обычно улучшения частотных параметров добиваются введением в объем полупроводника радиационных дефектов с глубокими уровнями в запрещенной зоне. Для этой цели используется радиационная обработка электронами высокой энергии (1—10 МэВ).

Как показано в работах [1—5], радиационная обработка и последующий термический отжиг полупроводниковых элементов позволяют в широких пределах регулировать время восстановления обратного тока t_{rr} кремниевых диодов. Скорость изменения времени восстановления зависит от его исходного значения, поэтому отжиг перед радиационной обработкой позволяет значительно уменьшить изначальный разброс по t_{rr} . При этом прямое падение напряжения диодов изменяется весьма незначительно. (Прямое падение напряжения диодов увеличивается при уменьшении диффузионной длины неосновных носителей в базе и при увеличении ширины базовой области.)

Отжиг радиационных дефектов в рассматриваемых структурах происходит в интервале температуры 300—450°C. Наблюдающийся в некоторых случаях эффект «отрицательного отжига» не является процессом, лимитирующим стабильность параметров, однако вызывает необходимость соответствующего подбора параметров отжига для разных структур.

В процессе облучения кремния электронами высокой энергии в его запрещенной зоне появляется несколько энергетических уровней, связанных с образующимися дефектами — вакансиями и собственными междоузельными атомами. При этом междоузельные

атомы вступают в реакции замещения с некоторыми примесями [2—6], вытесняя их в междоузельное положение (C_i и B_i). Вторичные дефекты, мигрируя в кремнии, в свою очередь, вступают в различные реакции, образуя устойчивые при комнатной температуре дефекты. К ним относятся комплексы углерод–кислород C_iO_i (К-центры) с $H(0,36)$, пары бор–кислород B_iO_i с $E(0,25)$, пары бор–бор B_iB_s с $H(0,30)$ и метастабильные комплексы углерод–углерод C_sC_i с $E(0,1/0,17)$ и $H(0,05/0,09)$ [3]. Вакансии трансформируются в комплексы вакансии–кислород $V-O$ (А-центры) с $E(0,17)$ и дивакансии V^{2-} с $E(0,23)$, V^- с $E(0,4)$ и V^+ с $H(0,21)$ [3, 4]. При этом на соотношение стабильных радиационных дефектов в кремнии сильно влияет примесный состав исходного кристалла. (Здесь и далее энергия E определяется положением энергетического уровня дефекта относительно дна зоны проводимости E_c , а H — энергия относительно потолка валентной зоны E_v . Энергия выражена в эВ.)

Нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней (НЕСГУ) позволяет проводить количественную оценку сечения захвата уровня σ_n , энергии активации уровня E_t (положение уровня в запрещенной зоне), концентрации ловушек N_t . Для определения этих параметров использовали соотношения, приведенные в [2].

Целью настоящей работы является определение технологических особенностей изготовления силовых приборов, позволяющих улучшить их частотные характеристики, а именно исследование возможности оптимизации времени восстановления диодных структур при изменении энергии электронов для облучения структур и условий отжига радиационных дефектов.

Методика эксперимента

В работе проводилось исследование различных серийных диодных структур ООО «Элемент-Преобразователь», которые формировались на пластинах толщиной 270—350 мкм, выполненных из кремния n -типа с удельным сопротивлением 10—60 Ом·см. Использовались пластины из кремния Чохральского $n\text{Cz-Si}$ (A15, A20, B45, KEФ45-60), из кремния безтигельной зонной плавки $n\text{FZ}$, из кремния, легированного при помощи трансмутационных ядерных реакций (КОФ-30, 45, 60). С одной стороны пластин

проводилась диффузия бора с алюминием на глубину 60—110 мкм и формировался p^+ -слой Si-области анода, а с другой стороны — диффузия фосфора на глубину 50—70 мкм и формировался n^+ -слой Si-катодной области. Одновременная диффузия акцепторной и донорной примесей проводилась при температуре 1250°C с помощью легированных окисных пленок.

После диффузии в пластины кремния определялось распределение легирующей примеси по глубине при помощи послойного шлифования диффузионной области и замера изменения удельного сопротивления. Омические контакты анода и катода получали путем формирования пленок никеля или алюминия.

Далее с целью модификации времени жизни носителей заряда готовые структуры облучали по стандартной технологии [4] моноэнергетическими электронами с энергией 4 и 10 МэВ и флюэнсами электронной обработки соответственно $F=6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $F=(6-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Структуры подвергались термическому отжигу при температурах 300—450°C. Время и температура отжига выбирались из необходимости задания оптимальных значений времени восстановления t_{rr} и напряжения при прямом включении $U_{пр}$. Одновременно проводился контроль времени жизни неосновных носителей заряда τ_p .

После изготовления диодных структур проводился контроль их основных параметров. Температурные изменения напряжения $V_{несгу}$, соответствующие изменению емкости исследуемой структуры, и температурные изменения тока проводимости I исследовали на измерительном комплексе DLS-82Е. При отрицательных значениях напряжения смещения $U_r=-4,0 \text{ В}$ и значениях импульса $U_1 \leq 0,1 \text{ В}$ обеспечивался режим обеднения, и наблюдаемые ловушки определялись как ловушки основных носителей заряда (о. н. з.) — электронов в кремнии n -типа. При положительных значениях импульса $U_1 \geq 1,0 \text{ В}$ обеспечивался режим обогащения, который позволяет определять ловушки неосновных носителей заряда (н. н. з.) — дырок в Si n -типа.

Длительность заполняющего импульса U_1 составляла 50 мкс. В ходе работы проводилась количественная оценка сечения захвата σ_n и концентрации ловушек N_t исследуемого уровня. Концентрация ловушек пропорциональна изменению емкости ΔC при воздействии заполняющего импульса. Величина измеряемого напряжения $V_{несгу}$ также пропорциональна ΔC . Скорость электронной эмиссии e_n при достижении пика НЕСГУ определялась при помощи аппроксимационной формулы

$$e_n(T_{\max}) = 2,17/t_0, \quad (1)$$

где t_0 — период повторения импульсов U_1 ;

$T_{\max}$ — температура, соответствующая максимуму пика сигнала НЕСГУ.

Результаты эксперимента

В кремнии КЕФ и БЗП после облучения и отжига определяются следующие доминирующие ловушки: E -центры, дивакансии, A - и K -центры. Пос-

ле получения серии спектров, соответствующих различным скоростям термической эмиссии, и построения графиков в координатах Аррениуса производилась идентификация глубоких уровней. Рекомбинационные центры (РЦ), наблюдаемые в режиме о. н. з. в диодных структурах после их облучения, были идентифицированы как ловушки со следующими уровнями: $E_1(0,17)$, $\sigma_{1n}=3,1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$; $E_2(0,26)$, $\sigma_{2n}=6,6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$; $E_3(0,37)$, $\sigma_{3n}=1,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$; $E_4(0,42)$, $\sigma_{4n}=1,0 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ [1]. В случае перезарядки уровней в режиме инжекции в базу неосновных носителей заряда для исследуемых структур наблюдаются следующие основные ловушки н. н. з.: $H_2(0,20)$, $\sigma_{2p}=2,1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$; $H_3(0,35)$, $\sigma_{3p}=3,1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$.

Модификация рекомбинационных центров, полученных в кремнии КЕФ и БЗП при их облучении e^- с энергией 10 МэВ и $F=(6-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, подробно описывается в работе [4]. При отжиге структур происходит увеличение концентрации до максимума, а затем ее уменьшение, и отжиг ловушек A -центров $E_1(0,17)$. Наряду с изменением концентрации A -центров происходит одновременное уменьшение концентрации ловушек $E_4(0,43)$, соответствующих E -центрам, и увеличение концентрации дефектов с уровнем $E_3(0,37)$. В условиях отжига структур после облучения e^- с энергией 10 МэВ и $F=8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит отжиг A -центров $V-O$ и формирование уровней $E_3(0,37)$ и $H_4(0,3)$. Образование уровня $E_3(0,37)$ наблюдается после облучения $Cz-Si$ и $FZ-Si$, где $p-n$ -переход сформирован с помощью примеси Al [7, 8]. На исходных травленных структурах из того же кремния, но где $p-n$ -переход формировался с помощью примеси бора без участия алюминия [4], уровень $E_3(0,37)$ отсутствует. При формировании $p-n$ -перехода с помощью процессов термомиграции образование уровня $E_3(0,37)$ наблюдается в исходных диодных структурах, на которых процессы радиационной обработки не проводились [9, 10]. Поэтому можно предположить участие Al в образовании РЦ E_3 и H_4 . Концентрация этих уровней возрастает при отжиге A -, E -центров и дивакансий V_2^{2-} с $E_2(0,23)$ и V_2^- с $E_3(0,41)$. Можно предположить, что кроме влияния на дефектообразование механических напряжений, создаваемых атомами Al, происходят также реакции образования центров Al_iVO^- [11].

При исследовании НЕСГУ-спектров диодных структур, база которых сформирована из кремния $nCz-Si$ A15, A20, установлено, что после облучения e^- с энергией 4 МэВ и $F=(3-6) \cdot 10^{15}$ максимальные изменения емкости $p-n$ -перехода и термостимулированного тока проводимости структур происходят в диапазоне температуры 230—315 К, а после облучения e^- с энергией 10 МэВ и $F=8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ — в диапазоне 90—140 К (рис. 1).

Как видно из рис. 1, при облучении диодных структур электронами с энергией 4 МэВ, в основном, формируются высокоэнергетичные дефекты, которые меняют зарядовое состояние в диапазоне температуры 230—315 К. При температуре 262 К в режимах для основных и неосновных носителей заряда

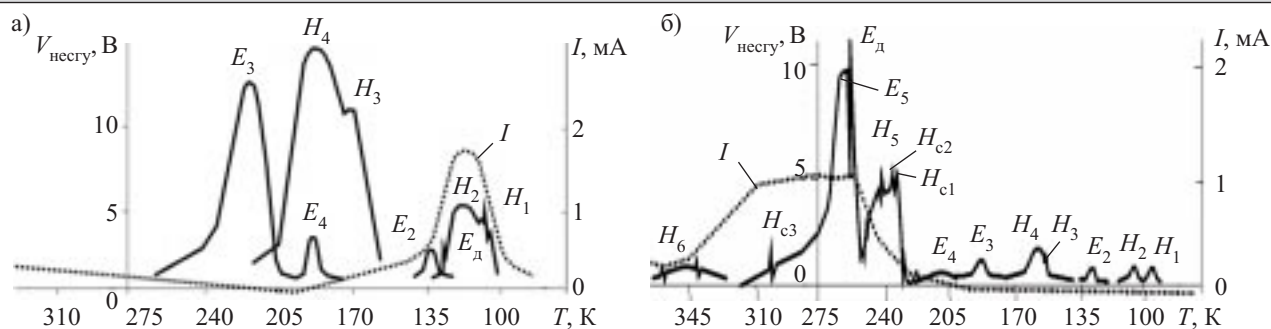


Рис. 1. Особенности формирования дефектов в кремнии А15 в процессе облучения электронами e^- при $e_n = 280 \text{ с}^{-1}$: а — 10 МэВ, $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; б — 4 МэВ, $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

наблюдается резкий двойной пик E_d , температурное положение экстремума которого не меняется при изменении скорости эмиссии носителей заряда. В работе [7] рассматриваются подобные пики, которые соответствуют перезарядке структурных дефектов (в частности, дислокаций несоответствия). На исследуемых образцах n -Si А15, А20 подобную электрическую активность проявляют структурные дефекты, которые в зависимости от энергии электронов облучения фиксируются в различных температурных диапазонах. В этих диапазонах фиксируются и рекомбинационные центры, которые изначально имеют максимальную концентрацию.

Таким образом, обработка электронами различных энергий приводит к формированию как отличающихся глубоких уровней, так и отличающихся структурных дефектов. Температурные диапазоны электрической активности структурных дефектов несоответствия отличаются увеличением тока проводимости I . Природу увеличения этого тока можно объяснить протеканием эмиссионных процессов зарядки структурных дефектов несоответствия, которые расположены у p - n -перехода. Необходимо также отметить, что после облучения диодных структур электронами с энергией 4 МэВ и $F = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдаются отдельные характерные группы РЦ H_{c1} , H_{c2} , H_{c3} , которые состоят из серии пиков (рис. 1).

При отжиге на начальном промежутке времени происходит образование ловушек, проявляющих электрическую активность при более низких температурах, в том числе и увеличение концентрации $E_3(0,37)$. Поскольку рекомбинационный центр дивакансии $E_3(0,37)$ имеет сравнительно высокую температуру отжига ($\geq 350^\circ\text{C}$), это позволяет во время формирования дивакансии $E_3(0,37)$ отжечь дефекты для неосновных носителей заряда типа K -центров с меньшей температурой отжига. При таких термических перестройках дефектов образуются центры $H_2(0,2)$, но их концентрация при оптимальном времени жизни n . н. з. при облучении 4 МэВ значительно меньше, чем при облучении 10 МэВ, когда изначально после облучения концентрация этих центров высокая.

Для образцов со значительной концентрацией РЦ H_2 , например после радиационной обработки электронами с энергией 10 МэВ, при минимальном времени оптимального отжига наблюдается образование двух пиков тока восстановления [4]. Данный эф-

фект можно объяснить различием скоростей захвата и освобождения носителей заряда рекомбинационными центрами H_1 , H_2 и E_3 , E_4 , E_5 . Поскольку скорость эмиссии РЦ H_1 , H_2 на порядок ниже скорости эмиссии E_3 , E_4 , E_5 , длительность процессов восстановления с участием РЦ H_1 , H_2 возрастает, что и приводит к появлению отдельного второго пика с большим временем восстановления. Таким образом, второй пик принадлежит к процессам восстановления с участием РЦ H_1 , H_2 . При температуре испытаний 125 — 150°C эти два отдельных пика сближаются. Для образцов с незначительной концентрацией РЦ H_1 , H_2 , например после радиационной обработки электронами с энергией 4 МэВ, при минимальном времени оптимального отжига наблюдается образование одного пика тока восстановления и, соответственно, задача уменьшения времени восстановления упрощается.

Для обработки электронами 4 МэВ оптимальный режим отжига определяется оптимальным сочетанием значений прямого падения напряжения и концентрации дефектов с преобладанием содержания РЦ $E_3(0,37)$. Такая однородность дефектов позволяет уменьшить время восстановления структур после обработки электронами с энергией 4 МэВ по сравнению с облучением 10 МэВ. Поэтому оптимизация дефектного состава и времени восстановления диодных структур заключается в формировании максимального отношения концентрации РЦ $E_3(0,37)$ и концентрации остальных дефектов. Максимальный коэффициент формы тока обратного восстановления S , определяемый скоростями изменения анодного тока на фазах нарастания и спада [4], наблюдается для структур после облучения электронами с энергией 4 МэВ и $F = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Оптимальные значения времени и температуры процесса отжига рекомбинационных центров в кремниевых структурах полупроводниковых элементов диодных структур зависят от типа кремния базы. На рис. 2 показаны зависимости времени восстановления t_{rr} и времени жизни неосновных носителей заряда τ_p от напряжения $U_{пр}$ на полупроводниковом элементе ДЧ261. Из рисунка видно что, для получения приборов с $t_{rr} \leq 2 \text{ мкс}$ необходимо при толщине базы $w = 140$ — 160 мкм формировать элементы с $U_{пр} = 1,7$ — $2,2 \text{ В}$.

Оптимальные режимы отжига диодных структур, сформированных на пластинах кремния КЕФ и КОФ,

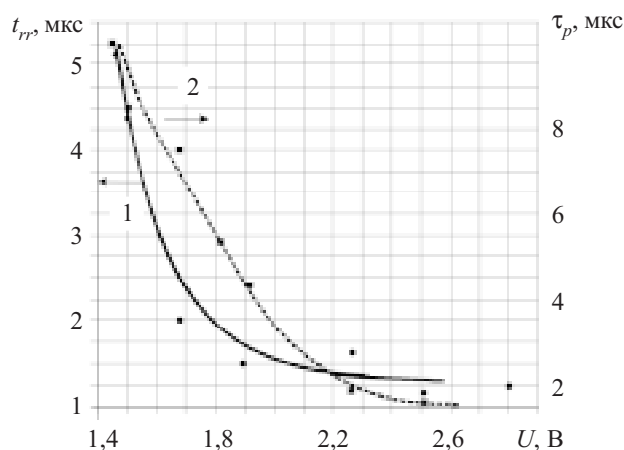


Рис. 2. Зависимость времени восстановления (1) и времени жизни (2) н. н. з. в зависимости от прямого напряжения $U_{пр}$ для диодов ДЧ261 ($w=150$ мкм)

отличаются необходимостью увеличения температуры отжига для КОФ-структур. Так, для КЕФ-45 оптимальным является отжиг при температуре 390—400°C, для КОФ-45 — при 420—450°C в течение 50—80 мин. На рис. 3 показаны зависимости прямого напряжения от времени отжига при различных температурах для структур ДЧ261 на основе исходного КОФ-45. Более удобным является режим отжига, имеющий линейную зависимость, с технологически приемлемой скоростью изменения прямого напряжения в области минимального времени восстановления обратного тока. При 390°C происходит значительное увеличение времени отжига, что приводит к увеличению времени t_{rr} . Диоды с минимальным t_{rr} , максимальным S и высоким пробивным напряжением ($U \geq 2000$ В) получены на диодных структурах, изготовленных на пластинах КОФ-45 при отжиге (420—430°C) в конвейерных водородных печах.

При исследовании особенностей отжига диодных структур, изготовленных из различных типов пластин кремния, с помощью НЕСГУ изучалось влия-

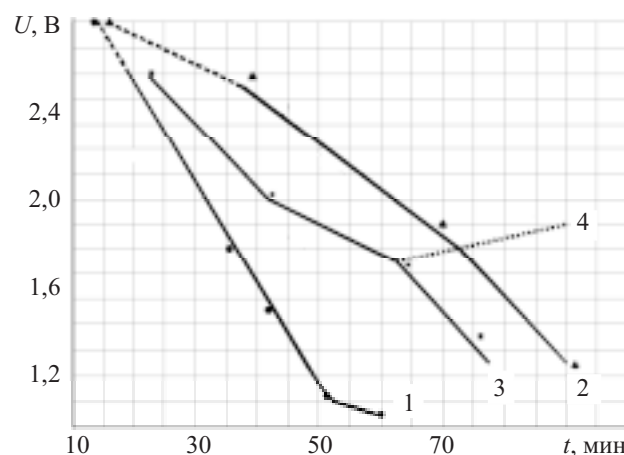


Рис. 3. Зависимость прямого напряжения от времени отжига при различных температурах для диодных структур КОФ-45:

1, 3, 4 — 420°C; 2 — 390°C (3, 4 — зависимости для структур с повышенной концентрацией неконтролируемых примесей)

ние быстро диффундирующих примесей на формирование и отжиг РЦ. Одновременное с диффузией легирующих примесей попадание в область пространственных зарядов базовой области быстро диффундирующих неконтролируемых примесей приводит к уменьшению времени жизни н. н. з. на диодных структурах перед облучением, а также к увеличению времени и температуры последующего отжига РЦ этих структур. К загрязняющим комплексам можно отнести углеродные соединения, а также РЦ с участием металлов, пики которых наблюдаются на спектрах НЕСГУ. Углеродные комплексы составляют РЦ, которые обладают низкими скоростями эмиссии носителей заряда, поэтому время восстановления таких структур увеличивается.

В ряде случаев при низком времени жизни н. н. з. диодных структур до облучения, например, из-за наличия загрязняющих примесей, время отжига возрастает, как показано на рис. 3 (кривая 3). Там же видно, что если в процессе отжига увеличивается концентрация неконтролируемых РЦ, соответствующих некоторым загрязняющим примесям (металлов), то наблюдается увеличение падения прямого напряжения (кривая 4). Концентрация РЦ H_1 , H_2 после радиационной обработки в диодных структурах, сформированных с помощью газовой диффузии, на два-три порядка меньше, чем в диодных структурах, сформированных с помощью рассматриваемой диффузии из окисных пленок. Составной частью окисных пленок является углерод, который при газовой диффузии является загрязняющей фоновой примесью. Кроме того, для эпитаксиальных структур характерны значительно меньшие, чем для кремния Чохральского, концентрации фоновой примеси углерода и кислорода. Поэтому наблюдаемые концентрации углеродсодержащих РЦ значительно меньше при газовой диффузии формирования диодных структур. Можно предположить, что образование РЦ H_1 , H_2 происходит с участием атомов углерода (кислорода).

Для технологического контроля качества и соответствия диффузионных структур годным полупроводниковым приборам можно использовать температурные спектры изменения емкости и тока проводимости I [10]. Уменьшению времени жизни н. н. з. τ_p и ухудшению ВАХ из-за увеличения токов утечек диодов при температуре 150°C соответствует увеличение I и увеличение концентрации загрязняющих примесей глубоких уровней. Температурный отжиг приводит к уменьшению концентрации РЦ и тока проводимости I . Если же их значения остаются большими, наблюдаются низкие исходные значения τ_p , температурная нестабильность и увеличение токов утечек диодных структур, что приводит к уменьшению выхода годных приборов.

При проведении отжига структур, облученных электронами с энергией 4 и 10 МэВ, установлено, что диодные структуры с минимальным временем восстановления и максимальным коэффициентом формы тока восстановления могут быть сформированы

после облучения электронами с энергией 4 МэВ и потоком $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Улучшение времени восстановления на диодных структурах получено за счет формирования максимальной относительной концентрации дефектов с максимальными скоростями захвата и освобождения носителей заряда, таких как РЦ $E_3(0,37)$.

Оптимальные режимы отжига диодных структур, сформированных на пластинах кремния КЕФ и КОФ, отличаются необходимостью увеличения температуры отжига для КОФ-структур.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров.— Л.: Наука.— 1981.
2. Dmowsky K., Lepley B., Losson E., Bouabdellati M. A method to correct for leakage current effects in deep level transient spectroscopy measurements on Schottky diodes // Applied Physics.— 1993.— Vol. 74, N 6.— P. 3936—3941.
3. Феклисова О. В., Ярыкин Н. А. Взаимодействие водорода с радиационными дефектами в кремнии p -типа проводимости // Физика и техника полупроводников.— 2001.— Т. 35, вып. 12.— С. 1417—1422.
4. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Коляда А. И. и др. Влияние обработок поверхности пластин Si на характеристики силовых

диодных структур, облученных электронами // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління.— Вип. 1.— 2006.— С. 23—29.

5. Неймаш В. Б., Войнович В. В., Красько М. М. та ін. Радіаційне дефектоутворення в n -Si з домішками свинцю і вуглецю // Український фізичний журнал.— 2005.— Е50.— № 11.— С. 1273—1277.

6. Wosinski T. Electrical activity of misfit dislocations in GaAs-based heterostructures // Semiconductor Physics. Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2003.— Vol. 6, N 1.— P. 58—61.

7. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Коляда А. И. и др. Формирование радиационных дефектов в кремниевых диодах с разным распределением легирующих примесей // Труды МНПК «Современные информационные и электронные технологии».— Украина, Одесса.— 2006.— Т. 2.— С. 118.

8. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Коляда А. И. и др. Формирование быстросовосстанавливающихся диодов // Там же.— Украина, Одесса.— 2007.— С. 323.

9. Жавжаров Е. Л., Кравчина В. В. Влияние атомарного водорода на отжиг радиационных дефектов // Там же.— Украина, Одесса.— 2006.— Т. 2.— С. 118.

10. Кравчина В. В., Гомольский Д. М. Контроль диффузионных структур // Там же.— Украина, Одесса.— 2007.— С. 354.

11. Комаров Б. А. Особенности отжига радиационных дефектов в кремниевых p - n -структурах: роль примесных атомов железа // ФТП.— 2004.— Т. 38, вып. 9.— С. 1079—1083.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

XIV Международная научно-техническая конференция ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)

XXI Международный симпозиум ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Основные направления:

- ✦ *Материалы, оборудование и технологии функциональной электроники и микрофотоники.*
- ✦ *Нанотехнологии в функциональной электронике и микрофотонике.*
- ✦ *Технологии производства, обработки и исследования наноструктурированных материалов.*
- ✦ *Системы и устройства радиотехники и средств связи.*
- ✦ *Метаматериалы и фотонные кристаллы в оптоэлектронике и оптическом приборостроении.*
- ✦ *Технологии, материалы и оборудование для производства СВЧ электронной техники и радиоэлектронных устройств.*
- ✦ *Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности.*
- ✦ *Получение, свойства и применение тонких пленок в электронике.*
- ✦ *Слоистые структуры на основе тонких пленок.*
- ✦ *Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы.*
- ✦ *Моделирование и информационное обеспечение исследований.*

Посвящается 45-летию
ЦНИТИ «Техномаш»



Москва, 11—13 сентября 2008 г.

ЦНИТИ «Техномаш»

Московский государственный технический
университет им. Н.Э.Баумана

Реквизиты для связи:

121108, Россия, г. Москва, ул. Ивана Франко, 4

E-mail: samoylovich@technomash.ru

belyanin@technomash.ru

Тел. +7(495) 146-10-95,

Тел./факс +7 (495)146-19-42