

РАДИАЦИОННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

А.Н. Довбня, В.П. Ефимов, А.С. Абызов, И.И. Шаповал, А.В. Рыбка, Е.П. Березняк, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

E-mail: yefimov@kipt.kharkov.ua

Исследуются радиационные процессы формирования аморфно-микроструктурных гетероструктур с квантовыми нитями, обеспечивающие вывод носителей заряда из объема полупроводника в кремниевых фотопреобразователях нового поколения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Многочастичные тяжелые ионы (осколки ядер тяжелых элементов), двигаясь в кристалле, в результате столкновений создают большое количество вакансий и межузельных атомов [1]. Плотность создаваемых ими дефектов становится настолько большой, а взаимодействие между ними настолько сильным, что кристаллы приобретают некоторые новые качества. В результате совокупности дефектов в малом локальном объеме образуется единый протяженный дефект со специфическими свойствами. По аналогии с пороговой энергией образования пар Френкеля в кремнии (12,9 эВ) пороговая энергия образования таких разупорядоченных областей (РО) по оценкам разных авторов сильно различается по величине и составляет 5, 10, 20...40 кэВ [2,3]. Радиационное дефектообразование сопровождается появлением локальных энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника. Облучение кремния осколками ядер урана при их фотоделинии изменяет в широких пределах электрофизические характеристики полупроводника, такие как электропроводность, тип проводимости, концентрация, подвижность и время жизни носителей заряда [4].

2. ФОРМИРОВАНИЕ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Модель РО представляется в виде квантовой нити радиуса r_1 , окруженной слоем объемного заряда радиуса r_2 . В центральной области радиуса r_0 ($r_0 < r_1 < r_2$) уровень Ферми в запрещенной зоне занимает предельное положение, в результате чего электрические и рекомбинационные параметры этой области отличаются от соответствующих свойств «ненарушенной» части кристалла. Модель формирования аморфно-кристаллической структуры представлена на Рис.1, микрофотографии поперечного среза такой структуры со следами треков – на Рис.2.

Электропроводность структуры зависит от присутствия легированных примесей и представляет собой более сложное образование, чем простая совокупность точечных дефектов. В с-Si:(B)-полупроводнике создаются р-р⁺-р₁-р⁺-р-структуры. Аналогичные структуры с заменой р на n-тип про-

водимости создаются и в с-Si:(P)-полупроводниках. Поэтому РО представляет собой потенциальную яму для неосновных и барьер для основных носителей заряда (см. Рис.1) [4].

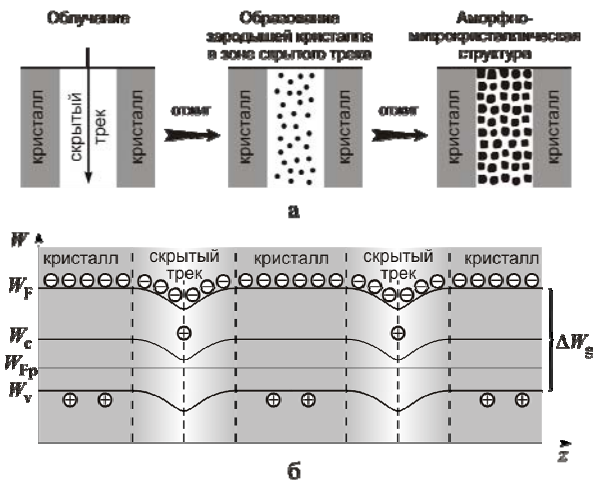


Рис.1. Модель формирования аморфно-кристаллической структуры (а), энергетические зоны в монокристаллическом кремнии с р-структурой и образование барьера для основных и стока для неосновных носителей заряда (б)

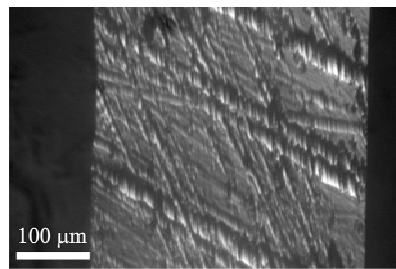


Рис.2. Микрофотографии поперечного среза образцов кремния после облучения дозой 1800 Мрад на ускорителе «ЭПОС» и гидрирования H_2

Образование аморфной фазы внутри РО определяется наличием больших концентраций дефектов и зависит от концентрации производимых ионом смещений и температуры образца. Для перехода области кристалла в аморфное состояние необходима некоторая критическая концентрация дефектов, составляющая по дивакансиям $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и по тетра-

вакансиям $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [5]. Необходимое условие аморфизации выбранной области кристалла заключается в пространственном разделении в ней вакансий и межузельных атомов. Именно это обеспечивает накопление дефектов одного знака (вакансий или межузельных атомов) до концентраций, необходимых для перевода монокристалла в аморфное состояние, иначе аннигиляция приводит к насыщению процесса накопления дефектов на уровне низких концентраций.

3. ФОРМИРОВАНИЕ СТОКОВ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ИЗ ОБЪЕМА C-SI- КРИСТАЛЛА

При облучении монокристаллического кремния легкими ионами положение аморфной структуры определяется областью максимальных потерь энергии внедряемых ионов на атомные столкновения (область Брэгга).

Доза, при которой происходит аморфизация облучаемого полупроводника, определяется свойствами облучения (энергией, массой бомбардирующей частицы и ее заряда и величиной ионизационных потерь) и сильно зависит от температуры образца во время бомбардировки кристалла. Влияние температуры кристалла при облучении на процессы радиационного дефектообразования обусловлено следующими факторами:

1. С увеличением температуры уменьшается пороговая энергия образования пар Френкеля, что приводит к росту скорости введения свободных вакансий и межузельных атомов. Повышая температуру облучения, можно ввести заданное количество пар Френкеля при меньшей энергии бомбардирующих частиц на большую глубину кристалла.

2. Температурная зависимость сечений образования и распада дефектов приводит к преимущественному введению более стабильных дефектов с ростом температуры облучения.

3. С температурой меняется вероятность процессов аннигиляции на центрах и смещение компонентов пар Френкеля на стоки и, как следствие, изменяется число свободных вакансий и межузельных атомов, способных принимать участие в реакциях.

4. При повышенных температурах происходит отжиг радиационных дефектов вне скрытых треков, созданных электронами, а также и изменение примесно-дефектной структуры кристалла (появление термодоноров). Облучение кристалла ускоряет этот процесс.

5. С увеличением плотности потока пучка бомбардирующих частиц возрастает скорость генерации пар Френкеля, вакансии и межузельные атомы начинают эффективнее взаимодействовать друг с другом, образуя скопления и частично аннигилируя.

В скрытом треке иона формируется вакансионное ядро РО и происходит взаимодействие вытесненных межузельных атомов с точечными дефектами, образовавшимися вне трека, а также с исходными легированными примесями. Часть примесных атомов может оказаться вытесненной из замещающего положения в межузельное, что приведет к рез-

кому возрастанию их диффузионной способности и миграции к периферической части РО, в которой примесь опять переводится в неподвижное состояние. В этой части РО образуется сложная оболочечная структура, состоящая из атомов легированных примесей и их комплексов как друг с другом, так и при участии вакансий с образованием стоков носителей заряда. В ядре РО происходит объединение вакансий друг с другом, приводящее к его стабилизации. По мере набора дозы облучения непрерывно изменяются свойства кристаллической матрицы, что обусловлено введением радиационных дефектов и взаимодействием их с примесями в пределах пробега внедренных многозарядных ионов от самой поверхности кристалла. При этом образуются комплексы дефектов, часть из которых проявляет электрическую активность, увеличивая концентрацию основных $p_1(n_i) \ll p(n) < p^+(n^+)$ носителей заряда в канале стока (Рис.3).

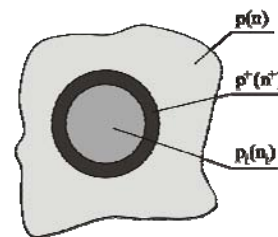


Рис. 3. Образование барьера в канале стока для основных носителей заряда

На Рис.4 представлены схемы измерения удельного сопротивления c-Si-кристалла после частичного разрыва атомных связей электронным пучком (а), и после разупорядочения его структуры тяжелыми ионами (б). Разность удельных сопротивлений по схемам (а-б) определяет величину удельного сопротивления квантовых структур, d, f – направление электрического поля для p-, n-структур.

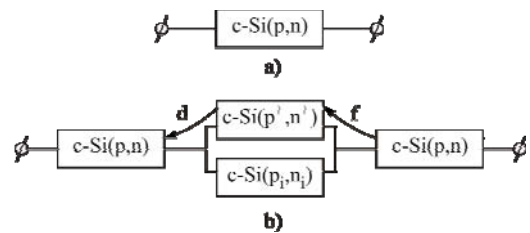


Рис.4. Схема формирования направления электрического поля градиентом концентрации атомов легирования и измерение величины квантовой структуры в каналах стока

Образованные в результате облучения пары Френкеля являются метастабильными радиационными дефектами и исчезают при температуре облучения в результате взаимной аннигиляции, а разделившиеся компоненты пар в процессе их миграции взаимодействуют друг с другом и с примесными атомами в кристалле, создавая более сложные и стабильные вторичные радиационные дефекты. В случае большой плотности смещений атомов эффективность введения дивакансий должна быть высокой, что характерно для ионов с большой величиной ионизационных потерь. С отжигом вакансий кристаллическая матрица становится более совершен-

ной и имеет место проявление дивакансий. В бестигельном кремнии n-типа проводимости, легированном фосфором, свободные вакансии эффективно захватываются атомами фосфора, образуя E-центры.

Варьируя интенсивность пучка и температуру при облучении, можно управлять свойствами кристаллов в широких пределах.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ ОБЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ НА УСКОРИТЕЛЕ “ЭПОС”

Для детального анализа геометрии зоны облучения на линейном электронном ускорителе “ЭПОС” на энергию 26 МэВ проведен расчет влияния конвертора и поглотителя электронов, установленных перед сборкой Si-кристаллов (Рис.5,6). Рассчитаны энергетические спектры электронов и γ -квантов за конвертором и за поглотителем электронов (Рис.7-10).

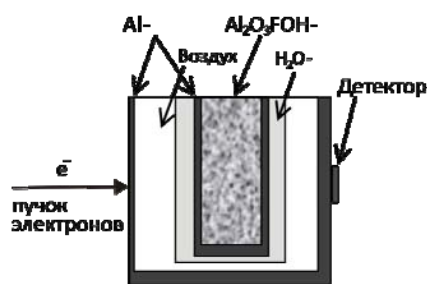


Рис.5. Геометрия зоны облучения кристаллов без поглотителя электронов

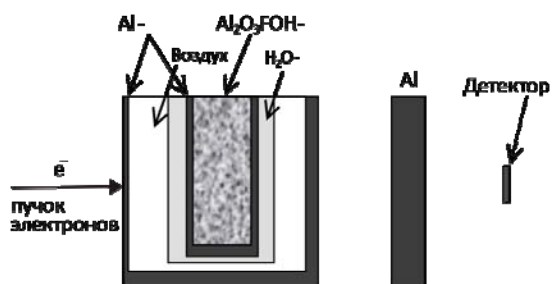


Рис.6. Геометрия зоны облучения кристаллов с поглотителем электронов

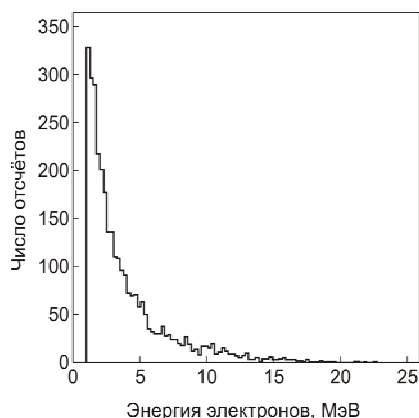


Рис.7. Энергетический спектр электронов за конвертором без поглотителя электронов. Число запусков 10^7

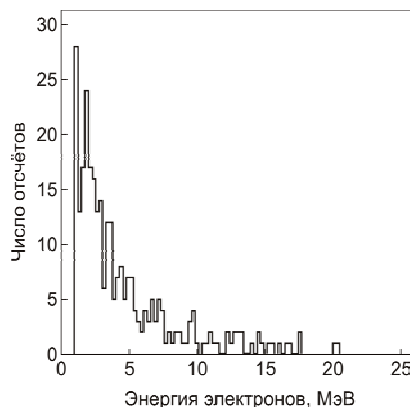


Рис.8. Энергетический спектр электронов за конвертором с поглотителем электронов. Число запусков 10^7

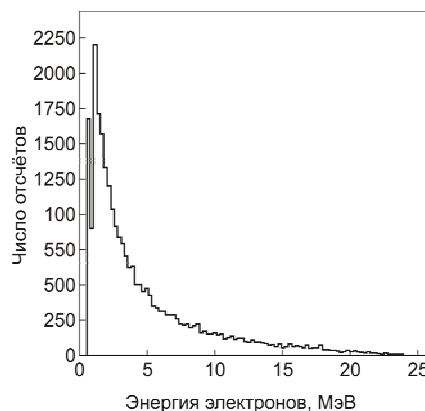


Рис.9. Энергетический спектр фотонов за конвертором без поглотителя электронов. Число запусков 10^7

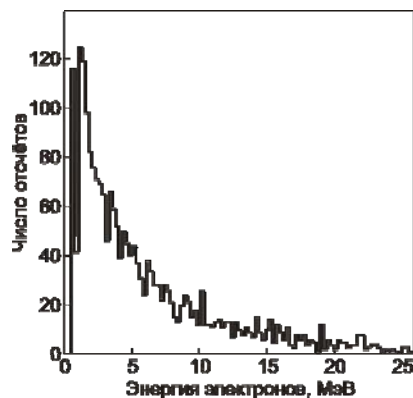


Рис.10. Энергетический спектр фотонов за конвертором с поглотителем электронов. Число запусков 10^7

Электрические характеристики c-Si-кристаллов при формировании в них квантовых структур излучением (электронами и осколками ядер урана) на ускорителе “ЭПОС” приведены на Рис.11. Факт образования квантовой структуры определяется разностью удельных сопротивлений c-Si-структуры при ее облучении электронами + γ -квантами + осколками ядер ^{238}U и только электронами + γ -квантами (см. Рис.4).

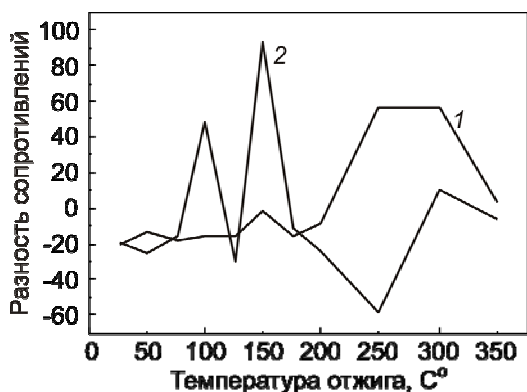


Рис.11. Температурный режим квантовой структуры c-Si-кристалла, облученного электронами и осколками ядер урана на ускорителе "ЭПОС" дозой 3600 Мрад (200 ч). 1 – сторона входа в кристалл осколков ядер урана и электронов; 2 – сторона выхода электронов из кристалла

Как следует из Рис.11, граница температурного интервала сохранения квантовых структур, созданных осколками ядер урана в монокристаллическом кремнии, достигает 180°C. Вблизи поверхности кристалла при температуре отжига $T \sim 250^\circ\text{C}$ (кривая 2) возникает аморфный слой, появление которого связано с диффузией дефектов из объема кристалла к поверхности и с накоплением их до концентраций, необходимых для аморфизации структуры. Механизм аморфизации связан непосредственно с накоплением парамагнитных вакансионных центров (VV-центры). В разупорядоченных областях (кривая 1) выделенные дефекты из объема кристалла приводят к маскировке дивакансий (см. раздел 3). При температуре $T \geq 350^\circ\text{C}$ VV-центры и разупорядоченные области в скрытых треках осколков ядер урана отжигаются.

ВЫВОДЫ

Многоядерные тяжелые ионы из осколков ядер урана позволяют сформировать наноразмерные квантовые структуры с повышенной электропроводностью для стока носителей заряда из объема кремниевого полупроводника. Такие структуры могут быть использованы для увеличения диффузионной длины носителей фототока в кремниевых фотопреобразователях, что является основным фактором повышения их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.N. Dovbnya, V.P. Yefimov. Radiation Technologies in Formation of the Condensed State of Atomic Structure in Crystal Materials (Physical Methodology for Radiation Process Development) // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2008, v.67, p.1805-1826.
2. Г.М. Иванов, Н.Н. Сирота. К вопросу об относительной роли разупорядоченных областей и повреждений кремния при электронном облучении // *Радиационные дефекты в полупроводниках*. Минск: Издательство БГУ, 1972, с.56-57.
3. С.М. Городецкий, Л.Б. Крейнин. Влияние областей разупорядочения на рекомбинацию в облученном p-кремнии // *ФТП*. 1974, т.8, в.4, с.667-671.
4. A.N. Dovbnya, V.P. Yefimov, A.S. Abyzov, A.V. Rybka. Stabilization of Nano-Dimensional Structures in the Single-Crystal Silicon // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2009, v.68, №7, p.627-648.
5. Н.Н. Герасименко, А.В. Двуреченский, Г.П. Лебедев. Взаимодействие дефектов, введенных ионной бомбардировкой // *ФТП*. 1973, т.7, №12, с.2297-2300.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

RADIATION-INDUCED DEFECT FORMATION FOR CHANGE OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS IN SILICON PHOTOCONVERTERS

A.N. Dovbnya, V.P. Yefimov, A.S. Abyzov, I.I. Shapoval, A.V. Rybka, Ye.P. Bereznyak, V.V. Zakutin, N.G. Reshetnyak, V.P. Romas'ko

Radiation processes of formation of amorphous-microcrystalline heterostructures with the quantum threads, providing charge carriers collection from semiconductor bulk in the silicon photoconverters of new generation are investigated.

РАДІАЦІЙНЕ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ ДЛЯ ЗМІНИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК У КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ

А.М. Довбня, В.П. Єфімов, О.С. Абызов, І.І. Шаповал, О.В. Рибка, О.П. Березняк, В.В. Закутін, М.Г. Решетняк, В.П. Ромасько

Досліджено радіаційні процеси формування аморфно-мікрокристалічних гетероструктур з квантовими нитями, які забезпечують відведення носіїв заряду з об'єму напівпровідника у кремнієвих фотоперетворювачах нового покоління.