

СОЗДАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ НИТЕЙ В ОБЪЕМЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ КУЛОНОВСКИМ ВЗРЫВОМ

В.П. Ефимов

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”
Украина*

Поступила в редакцию 15.07.2010

Смещение атомов легирования в скрытых треках структуры монокристаллического кремния приводит к изгибу энергетических зон, т.е. к созданию разделительного электрического поля для носителей заряда. Образование проводящих квантовых нитей в объеме кристалла обеспечит повышение эффективности (увеличение токосъема) и радиационной устойчивости кремниевых фотоэлементов для специального применения их в условиях Земли и космического пространства [1].

Ключевые слова: кремний, радиационные процессы, носители заряда, кластер, кулоновский взрыв, осколки ядер, квантовые нити.

Зсув атомів легування у прихованих треках структури монокристалічного кремнію приводить до згину енергетичних зон, тобто до створення розділового електричного поля для носіїв заряду. Створення провідних квантових ниток в обсязі кристала забезпечить підвищення ефективності (збільшення збору носіїв заряду) та радіаційної стійкості кремнієвих фотоелементів для спеціального застосування їх в умовах Землі та космічного простору.

Ключові слова: кремній, радіаційні процеси, носії заряду, кластер, кулонівський вибух, уламки ядер, квантові нитки.

Displacement of dopants atoms in the structure of hidden track of monocrystalline silicon leads to the bending of energy bands, i.e. to the formation of the separating electric field for charge carriers. The formation of conductive quantum filaments in the crystal bulk will improve the effectiveness (increase in current collection), and radiation hardness of silicon solar cells for specific use them on Earth and in outer space.

Keywords: silicon, radiation processes, charge carriers, cluster, Coulomb explosion, fragments of nuclei, quantum filaments.

ВВЕДЕНИЕ

Предполагается, что “трековый эффект” для создания микро- и наноразмерных структур связан с интенсивной ионизацией атомов мишени при попадании в нее тяжелой заряженной частицы с большим энерговыделением. Энергия налетающей частицы расходуется на ионизацию и возбуждение атомов материала мишени. Для ионов с кинетической энергией более 1 МэВ/а.е.м. интенсивность выделения энергии в электронную подсистему в $10^3 - 10^4$ раз превышает выделение энергии в ядерную подсистему и может составлять несколько МэВ/мкм [2]. Высокая скорость выделения энергии в электронную подсистему увеличивает вклад процесса ионизации и инициирует образование кулоновского взрыва. Этот физический процесс завершается за время порядка пикосекунд. Образовавшиеся свободные электроны вызыва-

ют ионизацию или возбуждение других атомов. Такой каскадный процесс необходим для обдирки атомов и молекул кластеров. Таким образом, вдоль траектории движения частицы практически все атомы и молекулы вещества будут ионизированы. Зарядовое взаимодействие ионизированных фрагментов кластера приводит к образованию скрытого трека на глубину пробега многозарядного иона.

Взаимодействие осколков ядер урана с атомами реального кристалла можно сопоставить либо с каскадным изменением пространственных координат атомов в кристалле (прямое смещение-аморфизация) либо с изменением химических связей (возбуждение электронов) и вследствие этого происходит нарушение межатомного химического взаимодействия. Поскольку химическая связь симметрична, то разрушение связей атома приве-

дет к разрушению связей у соседних атомов и вблизи траектории осколков произойдет разрушение межатомных соединений. В результате в кристалле образуется цилиндр, в котором атомы не будут связаны между собой и с остальными атомами кристалла. Изолированные вакансии и межузельные атомы не аннигилируют и образуется макроскопическая область с повышенной концентрацией – образование кластеров. На границе такого цилиндра будут находиться атомы, у которых отсутствует часть химических связей, а далее – неповрежденные атомы. Таким образом, после указанных преобразований создается (с-Si)-кристалл с кластерными объединениями атомов. После их ионизации и при превышении определенной величины заряда кластер становится нестабильным образуется кулоновский взрыв положительно заряженных фрагментов кластера с выбросом атомов легирующей примеси на периферию скрытого трека. Необходимо выделить, что этот процесс происходит только по траектории (глубине) внедрения многозарядных тяжелых ионов (осколков ядер U-238). Образование глубины макродефекта связано с потерей энергии частицы в материале мишени, описываемой известным уравнением Блоха [2]. При облучении кремния осколками ядер U-238 (высокие значения $dE/dx \sim Z^2$) процессы трекообразования характерны каждому из них, поскольку они обладают большими эффективными зарядами (Z).

Целью данной работы является разработка метода формирования скрытых треков в легированном монокристаллическом кремнии на малую и большую глубину для создания наноразмерных проводящих нитей и разделительных полей носителей заряда в объеме кристалла, необходимых при построении структур высокоэффективных фотопреобразователей нового поколения.

МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОГО ПИКА И КУЛОНОВСКОГО ВЗРЫВА

Множество процессов взаимодействия и сама природа вносимых повреждений качественно описываются моделью термического пика и кулоновского взрыва [2, 3]. В n -структуре легированного полупроводника уровень Ферми

находится вблизи дна зоны проводимости и разогрев структуры материала вдоль траектории внедрения осколков ядер U-238 до температуры образования аморфной фазы не произойдет, т. к. выделенная энергия диссипирует в объем кристалла по электронам проводимости (модель термического пика). При разрыве атомных связей в легированном полупроводнике в процессе фрагментации структуры электронами (увеличение удельного сопротивления $\sim 10^2$ раз) уровень Ферми смещается к центру зонной диаграммы (аналог квази-аморфной структуры), поэтому заброс электронов в зону проводимости прекращается, и происходит повышение температуры с образованием макродефекта на глубину внедрения осколка.

По модели кулоновского взрыва в полупроводнике с фрагментированной структурой образуется заряд также на глубину внедрения осколка из-за сохранения положительно заряженных фрагментов кластеров. В легированном полупроводнике без фрагментации его структуры происходит быстрое рассасывание заряда с нейтрализацией фрагментов кластеров.

КРИТЕРИИ СОЗДАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ КВАНТОВЫХ НИТЕЙ

С помощью дополнительного электростатического потенциала можно управлять пространственным расположением квантовых нитей в объеме p - n -структур монокристаллического кремниевого фотопреобразователя. Область кулоновского взрыва должна быть растянута на глубину поглощения солнечного излучения в материале монокристаллического кремния.

Для формирования направленного стока заряда на большую глубину в легированном полупроводнике необходимо ввести электростатический потенциал, компенсирующий эффект фрагментации его структуры. В случае формирования проводящей квантовой нити только вблизи поверхности полупроводника канал стока заряда в легированном полупроводнике с фрагментированной структурой закрывается и кулоновский взрыв происходит только в области макродефекта. Это необхо-

димо учитывать, поскольку фронтальная область фотоэлемента (ФЭ) наиболее подвержена разрушению, то для вывода неосновных носителей заряда с малой диффузионной длиной число проводящих квантовых нитей должно быть увеличено по сравнению с другими областями структуры ФЭ. Дополнительное их формирование производится без электростатического потенциала, т.е. на глубину только макродефекта. Для увеличения длины скрытого трека необходимо вводить в полупроводник (см. рис. 2, поз. 2) электрическое поле, управляющее зарядом кластера [3]

$$Z \approx N = \frac{4\pi}{3} nR^3,$$

где R – радиус кластера, n – концентрация атомов в кластере, N – их полное число. Без электростатического потенциала глубина трека определяется величиной макродефекта, созданного тяжелым ионом. Радиус кластера зависит от дозы облучения кристалла электронами при его фрагментации, величины заряда иона и от температуры образца во время облучения. При малом радиусе кластера длина квантовой нити будет ограничена. Таким способом формируются проводящие квантовые нити в структуре легированного монокристаллического кремния для фотоэлементов на малую и большую глубину кристалла. Схемы формирования таких структур приведены на рис. 1, 2.

Технологические возможности управления процессом таковы: 1) при замыкании цепи заземления (поз. 7) электростатический потенциал на экране кристалла от пучка элек-

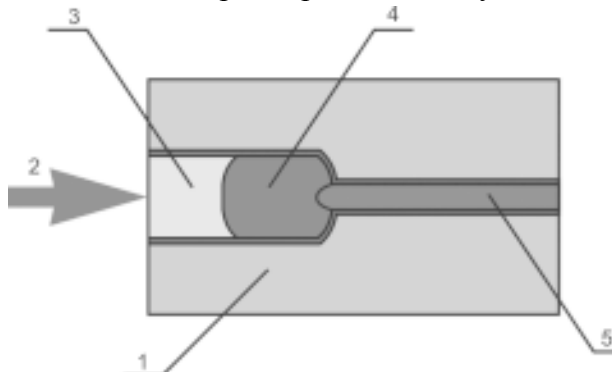


Рис. 1. Схема формирования канала стока заряда на направленном кулоновском взрыве. 1 – монокристаллический легированный c -Si(B,P)-полупроводник, 2 – поток осколков ядер U-238, 3 – макродефект, 4 – заряд кластера, 5 – канал стока заряда.

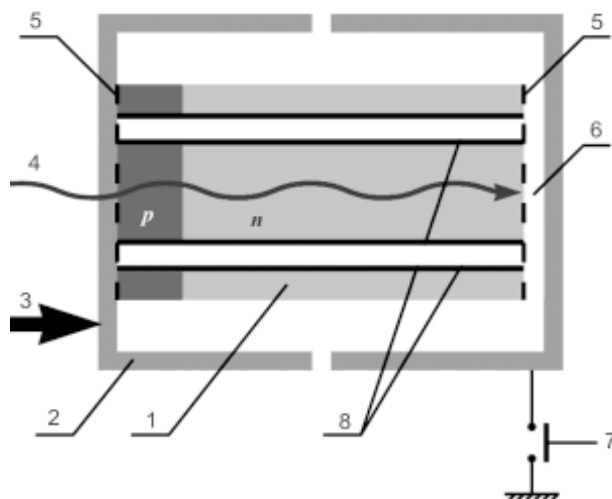


Рис. 2. Схема формирования пространственного расположения проводящих квантовых нитей в структуре монокристаллического фотопреобразователя методом направленного кулоновского взрыва. 1 – монокристаллический легированный c -Si(B,P)-полупроводник, 2 – экран кристалла с разрывом электрической цепи, 3 – поток электронов, 4 – поток гамма-квантов, 5 – контакт гребенчатый, 6 – мишень U-238, 7 – замыкатель, 8 – проводящие квантовые нити, p -структура дырочной проводимости, n -структура электронной проводимости.

тронов создает направленное электрическое поле, и квантовые нити в кристалле формируются на всю его толщину. 2) При разрыве цепи заземления кристалл находится под плавающим потенциалом (см. рис. 4). Для ввода квантовых нитей только на глубину внедрения осколков ядер U-238 экран кристалла должен быть заземлен с обеих сторон.

Поток гамма-квантов, необходимый для процесса фотоделения ядер урана, должен содержать примесь низкоэнергетичных электронов для поддержания величины электростатического потенциала. Толщина экрана определяется особенностями взаимодействия гамма-квантов и электронов с его материалом. Высокоэнергетическая часть спектра электронов (см. рис. 3) будет поддерживать состояние фрагментированной кремниевой структуры в процессе промежуточной термической ее обработки во время облучения, но уже без образования кластерных объединений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ НАПРАВЛЕННОГО КУЛОНОВСКОГО ВЗРЫВА

Пространственное расположение скрытых треков в фрагментированной электронами

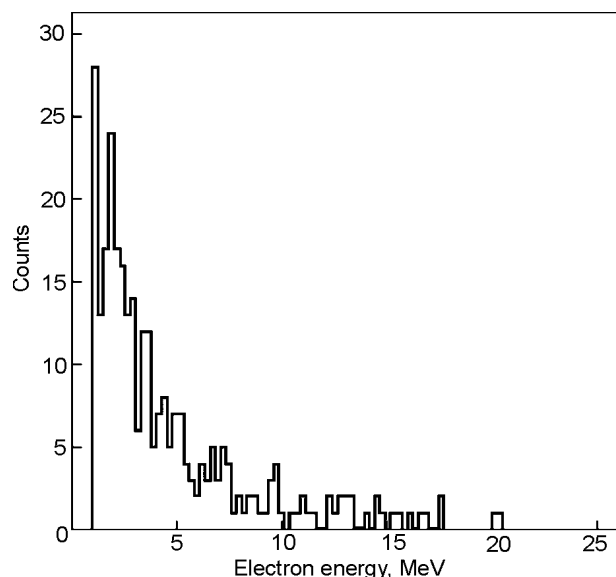


Рис. 3. Расчетный энергетический спектр вторичных электронов на ускорителе “ЭПОС” для управления кулоновским взрывом в монокристаллическом кремнии. Число запусков 10^7 .

(*c*-Si)-структуре с кулоновским взрывом кластерных объединений и с электростатическим плавающим потенциалом приведено на рис. 4 [4–6]. Скрытые треки при наличии фрагментации структуры и электростатического потенциала не образуются без внедрения осколков ядер урана.

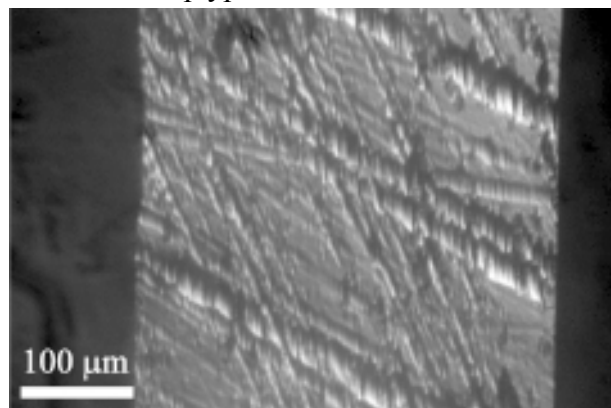


Рис. 4. Микрофотография поперечного среза образца кремния с каналами стока заряда под плавающим потенциалом после облучения кристалла осколками ядер урана и электрохимического травления.

Направление квантовых нитей и их глубина в кристалле определяются величиной электростатического потенциала и конфигурацией экрана.

Для экспериментального обнаружения геометрии образования скрытых треков облученный образец подвергается кислотному травлению, в результате чего из латентного

трека образуется видимый трек – пора. Это связано с тем, что химическая активность различных областей мишени различна. Обычно область латентного трека более интенсивно взаимодействует с травящим реагентом, чем неповрежденная часть кристалла. Для количественного описания указанного процесса традиционно используются две величины – это скорости травления по треку (V_t) и мишени (V_b). При соблюдении условия $V_t > V_b$ происходит образование и последующий рост поры. Параллельно с ростом канала поры идет еще один процесс – травление поверхности мишени. Электрохимическое травление образца кремния производилось в электролите $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1:2$ при плотности тока $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$. Все процессы определяются временем травления. Таким образом, после описанных преобразований создается (*c*-Si)-кристалл, содержащий видимые треки в сканирующем электронном микроскопе.

Электронные пучки для фрагментации структуры легированных кремниевых кристаллов, создания электростатического потенциала и генерации гамма-квантов для фотоделения ядер урана получены на ускорителе “ЭПОС” ННЦ ХФТИ, Украина. Структура в кремниевом полупроводнике, микрофотография поперечного среза которого приведена на рис. 4, сформирована при финансовой поддержке УНТЦ (Project STCU #1893).

ВЫВОДЫ

Разработанная модель направленного кулоновского взрыва в монокристалле кремния с высоким уровнем легирования атомами примеси A^3B^5 позволяет сформировать проводящие квантовые нити на малую и большую глубину в кристалле при выполнении следующих радиационных процессов:

1. образование устойчивых кластеров и кулоновского заряда осколками ядер урана;
2. формирование каналов стока заряда кластеров во фрагментированной структуре высоколегированного кремниевом полупроводника пучком электронов и при наличии в кристалле электростатического поля;

3. отжиг радиационных дефектов в структуре кремния с проводящими квантовыми нитями;
4. полный вывод носителей заряда (тока) является основным условием повышения КПД кремниевых фотопреобразователей нового поколения.
4. Ефимов В.П. Кластерные образования проводящих квантовых структур в монокристаллическом кремнии для гелиоэнергетики//Физическая инженерия поверхности. –2009. – Т. 7, № 4. – С. 401-407.
5. Довбня А.Н., Ефимов В.П., Абызов А.С., Рыбка А.В., Стрельницкий В.Е. Квантовые структуры в фотоэлектрических системах/Сб. науч. трудов Международной научной конференции “Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур” (Харьков, Украина). – 2009. – Т. 2. – С. 506-509.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В.П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения// Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т. 8, № 2. – С. 100-115.
2. Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н. Модель термического пика для описания трекообразования в кристаллах полупроводников, облучаемых тяжелыми высокоэнергетическими ионами// Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73, №. 6. – С. 56-60.
3. Зарецкий Д.Ф. Кулоновский взрыв дейтериевых кластеров в магнитной ловушке и генерация нейтронов//Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 7. – С. 663-665.
6. Dovbnya A.N., Yefimov V.P., Abyzov A.S., Rybka A.V., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G., Blinkin A.A., Romas’ko V.P. Procedure of nanodimensional amorphous-microcrystalline structure formation by radiation in single crystal silicon// Problems of Atomic Science and Technology Series: Nuclear Physics Investigation (52). – 2009. – № 5. – P. 67-74.