

06

Эффект дальнего действия в 6H-SiC при облучении ионами Хе

© Е.В. Калинина¹, Н.А. Чучвага¹, Е.В. Богданова¹, В.А. Скуратов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

E-mail: evk@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2014 г.

Впервые представлены результаты исследования электрическими методиками „эффекта дальнего действия“ в кристаллах 6H-SiC при облучении тяжелыми ионами Хе с энергией 167 MeV флюенсами $4 \cdot 10^9 - 7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Исследовались структуры с барьерами Шоттки, сформированными на С-границе кристаллов. Облучение структур проводилось в одинаковых режимах со стороны барьеров и со стороны базы (грань Si). Впервые для SiC электрическими методиками был выявлен эффект глубокого проникновения радиационных дефектов на глубину, превышающую в несколько десятков раз пробег ионов Хе. Было выявлено, что в начале пробега ионов Хе образуются радиационные дефекты акцепторного типа, однако в конце пробега ионов Хе образуются радиационные дефекты донорного типа.

Современное развитие ядерной энергетики, атомной промышленности, военных и космических технологий нуждается в электронике нового поколения, способной стабильно работать в условиях повышенных уровней радиации. Поэтому радиационное воздействие на полупроводники исследуется весьма интенсивно, поскольку оно представляет не только теоретический, но и практический интерес. Прежде всего, изучение радиационного дефектообразования при облучении как исходного полупроводника, так и приборов на его основе дает информацию о радиационной стойкости материала. Кроме того, „радиационная технология“ — облучение полупроводников нейтральными и заряженными частицами, используется для контролируемого изменения их электрофизических свойств, таких как аморфизация кристаллов для перевода в новое состояние, создание скрытых слоев, перевод полупроводников в другой тип проводимости, подлегирования под контакты, изменение времени жизни носителей заряда и т.д. [1–5]. Об-

лучение сопровождается многообразием эффектов в полупроводниках, к которым относится и эффект дальнего действия радиационных дефектов, т. е. их глубокое проникновение на расстояния, превышающие во много раз пробег частиц. Глубокое проникновение радиационных дефектов в полупроводниках при облучении ускоренными ионами объясняется суммарным действием нескольких факторов: примесно-дефектным составом материала, напряжением на границе имплантированного слоя и объема за счет рассогласования решеток и эффектом дальнего действия за счет генерации упругих волн в зоне торможения ионов [6–8]. Этот эффект наиболее изучен в традиционных полупроводниках (Si, Ge, GaAs), однако они не могут быть использованы для экстремальной электроники ввиду их низкой температурной и радиационной стойкости. Особенно низкая радиационная стойкость у традиционных полупроводников к облучению тяжелыми ионами высоких энергий, которые моделируют структурные нарушения, создаваемые осколками деления ядер. Одним из перспективных материалов для создания приборов экстремальной электроники является SiC благодаря своим уникальным электрофизическим свойствам — высокотемпературностью, высокой электрической и механической прочностью, высокой радиационной стойкостью. Эффекты дальнего действия были обнаружены оптическими методами в 4H-SiC именно при облучении тяжелыми высокоэнергетичными ионами Bi и Xe [9,10].

Цель данной работы — исследование влияния облучения ионами Хе с энергией 167 MeV в широком диапазоне флюенсов на электрические характеристики структур с барьерами Шоттки, сформированными на базе кристаллов 6H-SiC, а также подтверждение электрическими методами эффекта дальнего действия при облучении структур 6H-SiC высокоэнергетичными ионами.

В работе исследовались кристаллы SiC политипа 6H *n*-типа проводимости толщиной 400 μm с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (2-4) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Перед проведением работ с поверхности кристаллов снимался дефектный слой толщиной около 30 μm травлением в расплаве щелочи (KOH). Исходные образцы делились пополам, рабочей гранью была выбрана грань C, на ней методом термовакuumного напыления формировались Cr-барьеры Шоттки диаметром 1.2 mm. На грани Si методом термовакuumного напыления на краю образцов формировались точечные Cr/Al омические контакты. Образцы облучались ионами Хе с энергией 167 MeV флюенсами

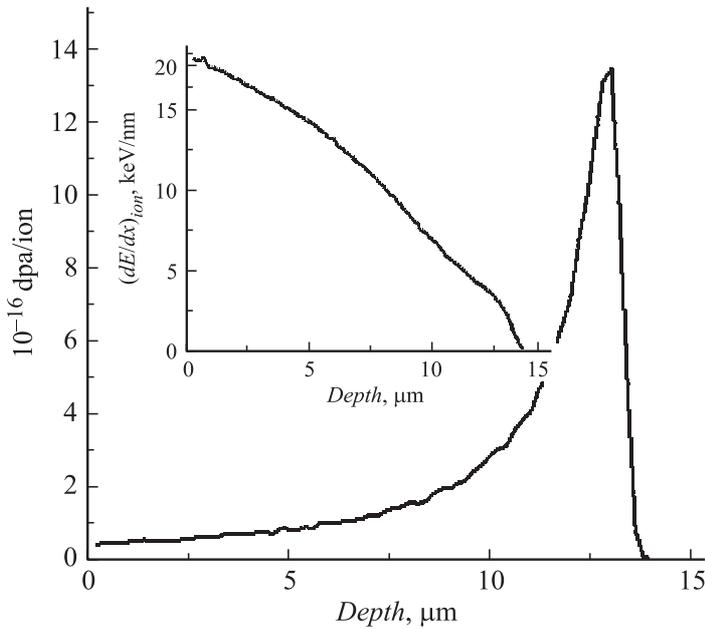


Рис. 1. Профили распределения первичных радиационных дефектов и ионизационных потерь (вставка) при облучении SiC ионами Хе с энергией 167 MeV.

$4 \cdot 10^9 - 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ при температуре 300 К. Облучение материала проводилось в одну половину со стороны грани Si, а в другую половину — со стороны грани С в одинаковых режимах. Профиль распределения электрически активных примесей в области объемного заряда барьеров Шоттки исследовался по вольт-фарадным характеристикам (CV), измеренным на частотах 1 и 10 kHz. Измерения вольт-амперных характеристик (IV) барьеров Шоттки проводились на постоянном токе. Электрические характеристики снимались при температуре 293 К.

При облучении структур ионами Хе с энергией 167 MeV распределение первичных радиационных дефектов неоднородно по толщине образцов. Профили ионизационных потерь $(dE/dx)_{ion}$ и числа первичных радиационных дефектов в единицах dpa (displacement per atom) вдоль пробега ионов Хе, полученные с помощью программы SRIM2006,

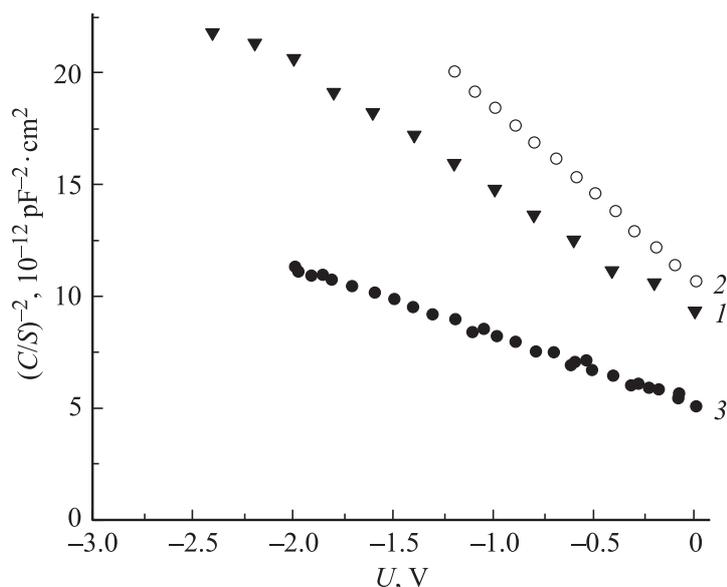


Рис. 2. Профили распределения электрически активных примесей в области объемного заряда барьеров Шоттки, сформированных на кристаллах $6H\text{-SiC}$, измеренные на частотах 1 и 10 kHz при 293 К: 1 — исходный образец; 2, 3 — после облучения ионами Хе флюенсом $7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ граней С и Si соответственно.

представлены на рис. 1. Согласно расчетам, пробег ионов Хе с энергией 167 MeV составляет $13 \mu\text{m}$.

Согласно CV-измерениям, высота барьеров Шоттки составляла 1 V, что говорит о хорошем качестве изготавливаемых Сг-барьеров. Согласно вольт-фарадным измерениям, при облучении со стороны барьеров Шоттки (грань С) наблюдалось уменьшение концентрации нескомпенсированных доноров в области объемного заряда (рис. 2, кривая 2), т.е. в начале пробега ионов Хе формировались радиационные дефекты компенсирующего типа. В случае облучения со стороны базы (грань Si) наблюдалось увеличение концентрации нескомпенсированных доноров в области объемного заряда барьеров Шоттки, сформированных на грани С (рис. 2, кривая 3), т.е. наблюдалось появление радиационных дефектов донорного типа на расстояниях, превышающих в несколько

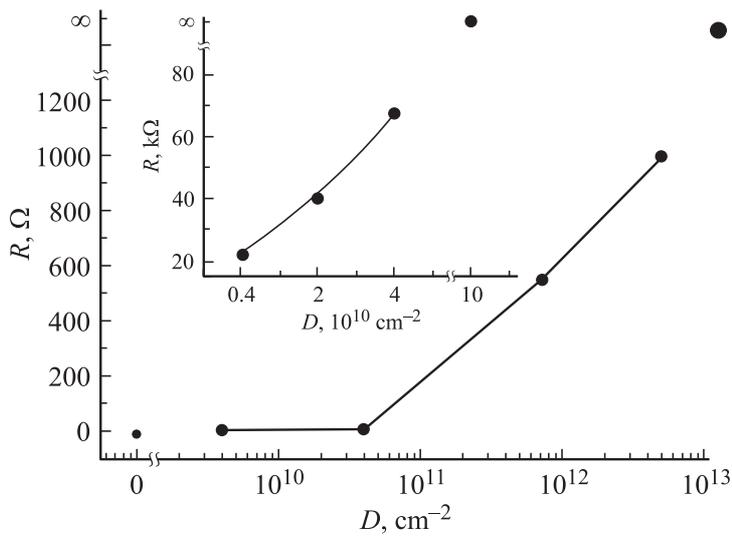


Рис. 3. Зависимость сопротивления образцов 6H- и 4H-SiC (вставка) от величины флюенсов при облучении ионами Хе с энергией 167 MeV.

десятков раз величину пробега ионов Хе. Однако суммарная величина компенсирующих радиационных дефектов в объеме кристаллов 6H-SiC превалировала над количеством дефектов донорного типа, что отразилось на сопротивлении структур (рис. 3). По сравнению с сопротивлением исходных структур 8Ω облучение наименьшим флюенсом $4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ приводило к увеличению сопротивления до 20Ω . Для сравнения на рис. 3 (вставка) представлена зависимость сопротивления от флюенсов ионов Хе для структур с барьерами Шоттки, сформированными на CVD эпитаксиальных слоях политипа 4H-SiC с концентрацией носителей заряда $N_d - N_a = (2-4) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Сопротивления обоих образцов растут с увеличением флюенсов облучения за счет дополнительного введения радиационных дефектов, особенно эта тенденция усиливалась при больших флюенсах ионов Хе. Разница в сопротивлении образцов 4H и 6H при облучении одним и тем же флюенсом может объясняться разницей в концентрации свободных носителей заряда в исходных образцах, в 6H-SiC концентрация

выше на 3 порядка. Именно от концентрации свободных носителей в образцах SiC зависит значение флюенса ионов Хе, приводящее к деградации материала. Для концентрации $N_d - N_a = (2-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ критичная величина флюенса составляет $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, для концентрации $N_d - N_a = (2-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} - 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, т.е. чем выше концентрация свободных носителей образца, тем выше порог деградации материала, а следовательно, и радиационная стойкость материала.

Таким образом, впервые при облучении кристаллов 6H-SiC тяжелыми высокоэнергетичными ионами Хе электрическими методами было подтверждено наблюдаемое ранее оптическими методиками проникновение радиационных дефектов в объеме образцов на расстояния, превышающие в десятки раз пробег ионов. Согласно электрическим измерениям, в начале пробега ионов Хе при облучении SiC образуются радиационные дефекты компенсирующего типа. На расстояниях, превышающих в десятки раз пробег ионов Хе, образуются дефекты донорного типа. Увеличение флюенсов ионов Хе при облучении приводит к увеличению сопротивления образцов за счет превалирующего увеличения концентрации радиационных дефектов компенсирующего типа. Эта тенденция возрастает с увеличением флюенсов облучения. В работе подтверждена радиационная стойкость SiC к облучению тяжелыми высокоэнергетичными ионами.

Список литературы

- [1] Cleland J.W., Crawford J.H., Lark-Horovitz K., Pigg J.C., Young F.W. // Phys. Rev. 1951. V. 83. P. 312.
- [2] Зорин Е.И., Тетельбаум Д.Е., Попов Ю.С., Границына З.К. // ФТТ. 1964. Т. 6. С. 2018.
- [3] Смирнов Л.С. Вопросы радиационной технологии полупроводников. Новосибирск: Наука, 1980. 292 с.
- [4] Вавилов В.С., Горин Б.М., Динилин Н.С., Кив А.Е., Нуров Ю.Л., Шаховцов В.И. Радиационные методы в твердотельной электронике. М.: Наука, 1990. 184 с.
- [5] Васильева И.В., Ефремов Г.А., Козловский В.В., Ломасов В.Н., Иванов В.С. Радиационные процессы в технологии материалов и изделий электронной техники. М.: Энергоатомиздат, 1997. 84 с.
- [6] Морозов Н.И., Тетельбаум Д.И. // ФТП. 1983. Т. 17. С. 838.
- [7] Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д. // ФТП. 1986. Т. 20. С. 503.

- [8] *Первоицков В.А., Скупов В.Д.* Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках. Н. Новгород, Нижегородский университет, 2002. Ч. 1. Гл. 3. С. 158–162.
- [9] *Калинина Е.В., Скуратов В.А., Ситникова А.А., Колесникова Е.И., Трегубова А.С., Щеглов М.П.* // ФТП. 2007. Т. 41. С. 392.
- [10] *Калинина Е.В., Чучвага Н.А., Богданова Е.В., Стрельчук А.М., Шустов Д.Б., Заморянская М.В., Скуратов В.А.* // ФТП. 2014. Т. 48. С. 167.