

ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ С ДИФФУЗНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ

Е.А. Левчук, Л.Ф. Макаренко

*Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, liauchuk@bsu.by, makarenko@bsu.by*

С использованием метода Монте-Карло и модели Кинчина-Пиза рассчитаны изменения скорости образования смещений в результате электронного облучения через плоские экраны различной толщины. Проведено сравнение результатов расчета и экспериментальных данных по скоростям введения радиационных дефектов междоузельного типа и дивакансий. Обнаружено расхождение расчетных и экспериментально измеренных величин. Расхождение связывается с влиянием электронной подсистемы на скорость аннигиляции пар Френкеля.

Ключевые слова: РСГУ; кремний; электронный пучок; радиационные дефекты; облучение.

GENERATION OF RADIATION DEFECTS IN SILICON IRRADIATED WITH ELECTRON BEAMS WITH DIFFUSE ENERGY SPECTRUM

Elena Levchuk, Leonid Makarenko

*Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, liauchuk@bsu.by, makarenko@bsu.by*

Using Monte-Carlo method and Kinchin-Pease model, the changes in displacement formation rate as a result of electron irradiation through flat screens of different thicknesses have been calculated. The calculation results and experimental data on defect introduction rates for interstitial type complexes and divacancies have been compared. A discrepancy between the calculated and experimentally measured values has been found. The discrepancy is associated with the effect of electron subsystem on the rate of annihilation of Frenkel pairs.

Keywords: DLTS; silicon; divacancy; electron beam; radiation defects; irradiation.

Введение

Космические аппараты играют все возрастающую роль в жизни современного общества. Они обеспечивают функционирование беспроводной связи в труднодоступных областях Земли, мониторинг окружающей среды и прогнозирование погоды, необходимы для предупреждения неблагоприятных последствий человеческой деятельности и природных катастроф.

Радиационные воздействия в космическом пространстве приводят к повреждению электронных устройств космических аппаратов. Поэтому для обеспечения необходимой радиационной стойкости таких устройств и прогнозирования длительности их надежного функционирования требуется проведение наземных испытаний электронной компонентной базы.

В условиях космического пространства ионизирующее излучение не является моноэнергетическим, а характеризуется довольно широким спектром энергий частиц [1]. В связи с этим требуется проведение испытаний микроэлектронных приборов в условиях, более приближенных к реальным условиям околоземного космического пространства. Одним из способов модификации моноэнергетических спектров частиц, создаваемых ускорителями, является облучение устройств через экраны различной толщины и геометрии. Энергетический спектр пучков электронов, прошедших через экран, существенно уширяется, и его можно характеризовать как диффузный. При этом повышается фон тормозного гамма-излучения, что является дополнительным фактором, влияющим на радиационное повреждение приборов.

Материалы и методы

Облучение структур проводилось электронами с $E = 6$ МэВ на ускорителе У-003 при температуре ~ 300 К. Плотность потока электронов составляла $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и определялась с помощью цилиндра Фарадея. Часть образцов закрывалась экранами в виде пластин разной толщины, изготовленных из алюминия. При этом цилиндр Фарадея оставался открытым, и с его помощью регистрировался флюенс электронов на поверхности экранов. Использовались экраны с толщинами $d = 5, 8$ и 10 мм.

В качестве экспериментальных образцов использовались диодные n^+p -структуры, изготовленные на пластинах с эпитаксиальным слоем кремния КДБ-10. На пластинах диффузией фосфора при 1000°C на глубину до 2-3 мкм формировался p - n -переход. С обратной стороны пластин проводилась имплантация ионов бора для улучшения омических контактов. Пластины разрезались на кристаллы размерами $2.7 \times 2.7 \text{ мм}^2$. Толщина диодных n^+p -структур составляла порядка 350 мкм, а толщина p -базы — 300 мкм.

Определение характеристик радиационных дефектов в базовой области p - n -структур осуществлялось методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) [4]. Спектры РСГУ измерялись в диапазоне температур 77-400 К в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда.

Спектры электронов и тормозного излучения определялись методом компьютерного моделирования с помощью программного комплекса PENELOPE. При расчете на выходном окне ускорителя задавался моноэнергетический ($E = 6$ МэВ) пучок электронов.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов представлены на рисунках 1 и 2.

Данные, представленные на рисунке 1, показывают, как изменяется распределение электронов по энергиям после про-

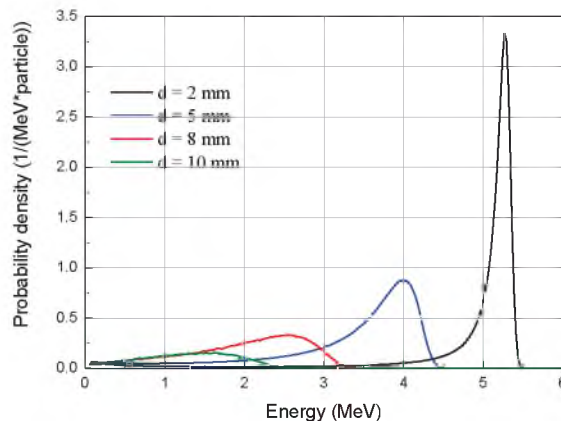


Рис. 1. Результаты моделирования методом Монте-Карло изменения энергетического спектра пучка быстрых электронов после его прохождения через плоский экран. Начальная энергия 6 МэВ

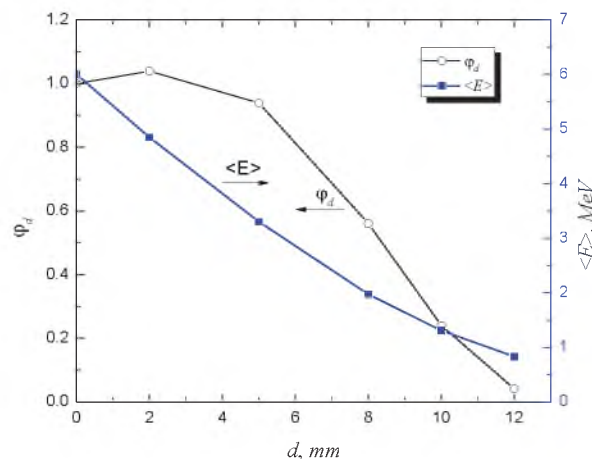


Рис. 2. Результаты моделирования методом Монте-Карло изменения параметров пучка быстрых электронов после прохождения через плоский экран. Показаны относительные изменения флюенса (ϕ_d) и среднего значения энергии ($\langle E \rangle$) пучка с начальной энергией $E_{\text{нач}} \cong 6$ МэВ, от толщины алюминиевого экрана (d)

хождения через алюминиевый экран толщиной d . Происходит как уменьшение энергии электронов, так и уширение энергетического спектра с уменьшением флюенса. Эти изменения показаны на рисунке 2. Результаты расчетов совпадают с экспериментальными данными [2-3].

Для определения концентрации радиационных дефектов использовалась емкостная спектроскопия (РСГУ) [4]. Полученные спектры РСГУ аналогичны описанным нами ранее [5-6]. Используя эти спектры, мы можем следить за следующими радиационно-индуцированными

комплексами: междоузельный бор- междоузельный кислород, междоузельный углерод- междоузельный кислород и дивакансия.

Скорости введения этих дефектов представлены на рисунке 3.

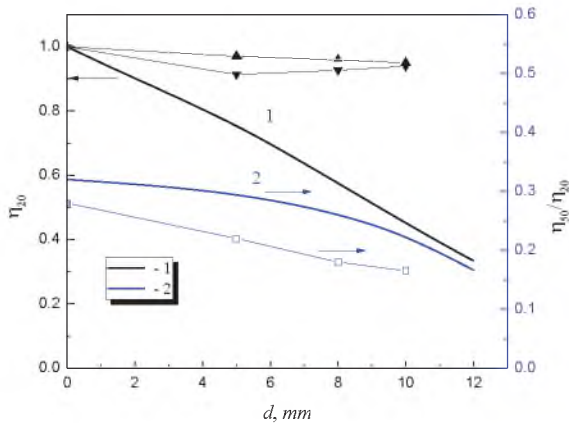


Рис. 3. Сравнение расчетных зависимостей (сплошные кривые) относительной скорости введения пар Френкеля (η) от толщины плоского экрана (d), рассчитанных на основании модели Кинчина-Пиза, и экспериментально определенных (треугольники) скоростей образования радиационных дефектов. Показано также изменение относительной доли образованных дивакансий

Как видно из рисунка, имеет место существенное расхождение между результатами расчетов и экспериментальными данными. Наибольшее расхождение наблюдается для центров, включающих в свой состав одиночный первичный радиационный дефект. Согласно расчетам, скорость образования пар Френкеля при облучении через экран должна падать. При этом чаще всего предполагается, что число аннигилирующих пар Френкеля для данного материала будет числом постоянным. Однако полученные нами данные говорят, что доля «выживших» первичных радиационных дефектов должна возрастать в наших условиях эксперимента. Та-

кое поведение может быть объяснено влиянием возбуждения электронной подсистемы кристалла на поведение собственного междоузельного атома кремния, образующегося при облучении высокоэнергетичными частицами.

Заключение

Таким образом, нами обнаружено расхождение между расчетными и экспериментальными скоростями введения радиационных дефектов междоузельного типа в кристаллах кремния, легированных бором. Высказано предположение, что на скорость образования таких дефектов может оказывать влияние возбуждение электронной системы кристалла в процессе его облучения.

Библиографические ссылки

1. Анашин В.С., Бодин В.В., Герасимов В.Ф. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. Москва: Физматлит; 2013. 256 с.
2. Ebert P.J., Lauzon A.F., Lent E.M. Transmission and backscattering of 4.0-to 12.0-MeV electrons. *Physical Review* 1969; 183(2): 422-432.
3. International commission on radiation units and measurements. Radiation dosimetry: electron beams with energies between 1 and 50 MeV. ICRU Report 35, Bethesda, MD; 1984.
4. Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of applied physics* 1974; 45(7): 3023-3032.
5. Makarenko L.F., Lastovskii S.B., Yakushevich H.S., Moll M., Pintilie I. Effect of electron injection on defect reactions in irradiated silicon containing boron, carbon, and oxygen. *Journal of applied physics* 2018; 123(16): 161576(1-7).
6. Kimerling L.C., Asom M.T., Benton J.L., Drevinsky P.J., Caefer C.E. Interstitial defect reactions in silicon. *Materials Science Forum* 1989; 38: 141-150.