

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из данных таблицы следует, что при суммарном флюенсе $10^{15} \text{ H}^+/\text{см}^2$ электрические свойства облученных пленок близки к исходной пленке. С ростом суммарного флюенса от $5 \cdot 10^{15} \text{ H}^+/\text{см}^2$ до $10^{16} \text{ H}^+/\text{см}^2$ значение Холловского потенциала, постоянной Холла увеличивается более чем в 2 раза, концентрация, подвижность носителей заряда значительно уменьшаются. Отметим, что эти изменения меньше, чем увеличение постоянной Холла для монокристаллов InSb, облученных протонами с энергией 10 МэВ и подобными флюенсами [4]. Установлено, что радиационная стойкость к облучению протонами с энергией 1,5 МэВ комплекса электрических свойств, изменения структуры, механических напряжений гетероэпитаксиальной пленки антимонида индия, осажденной на пластины GaAs (100) достигает суммарного флюенса $10^{15} \text{ H}^+/\text{см}^2$.

Работа выполнена в рамках НИР БРФФИ Т23МЭ-003 «Синтез эпитаксиальных пленок антимонида индия для магниточувствительных микросенсоров, стойких к высоким дозам радиационного воздействия»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Технология СБИС: в 2-х кн. / под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – Кн. 1. – 404 с.; Кн. 2. – 453 с.
2. Е.А. Колесникова, В.В. Углов, А.К. Кулешов, Д.П. Русальский, В.А. Гуринович, Радиационная стабильность датчиков, изготовленных на основе n-InSb-i-GaAs // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 14-ой Международной конференции / БГУ. – Минск, 2021. – с. 530–533.
3. V.V. Uglov, A.P. Drapezo, A.K. Kuleshov, D.P. Rusalsky, E.A. Kolesnikova Effect of Explosive Thermal Evaporation Conditions on the Phase Composition, Crystallite Orientation, Electrical and Magnetic Properties of Heteroepitaxial InSb Films on Semi-Insulating GaAs (100) // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes), – 2021. – V. 25, – Iss. 1 – P. 1–80.
4. И.В. Каменская Электрофизические и тензoeлектрические свойства InSb и GaSb, облученных электронами, протонами и нейтронами: автореф. дис. канд. ф.-м. н. / И. В. Каменская; Сибирский физико-технический институт; Томский государственный педагогический университет – Томск, 2007. – 23 с.

ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА СКОРОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ И КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЕВЫХ СПЛАВАХ

С. Б. Ластовский¹, Л. Ф. Макаренко²

¹⁾ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь, e-mail: lastov@physics.by

²⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: makarenko@bsu.by

Методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) проведено сравнительное изучение влияния энергетического спектра пучка быстрых электронов с первоначальной энергией 6 МэВ на процессы радиационного дефектообразования в кремнии и кремний-германиевых сплавах. Показано, что при толщине экранов меньше экстраполированного пробега электронов скорость образования комплексов с участием только одного первичного радиационного дефекта остается практически

постоянной. Изменение средней энергии электронов пучка после прохождения через экран проявляется в уменьшении скорости образования комплексов, включающих в свой состав два первичных радиационных дефекта.

Предлагается использовать экраны для моделирования энергетических спектров различных природных источников быстрых электронов с помощью ускорителя частиц.

Ключевые слова: радиационные дефекты; кремний; кремний-германиевые сплавы; облучение электронами.

EFFECT OF ELECTRON BEAM SHIELDING ON THE ACCUMULATION RATE OF RADIATION DEFECTS IN SILICON AND SILICON-GERMANIUM ALLOYS

S. B. Lastovskii¹, L. F. Makarenko²

¹⁾ *Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, 19, P. Brovka Str., 220072*

²⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus,*

Corresponding author: S. B. Lastovskii (lastov@physics.by)

A comparative study of the influence of the energy spectrum of a beam of fast electrons with an initial energy of 6 MeV on the processes of radiation defect formation in silicon and silicon-germanium alloys was carried out using the method of deep-level transient spectroscopy (DLTS). It was shown that when the screen thickness is less than the extrapolated electron range, the rate of formation of complexes involving only one primary radiation defect remains almost constant. A change in the average energy of the beam electrons after passing through the screen manifests itself in a decrease in the rate of formation of complexes that include two primary radiation defects. It is proposed to use screens to model the energy spectra of various natural sources of fast electrons using a particle accelerator.

Key words: radiation defects; silicon; silicon-germanium alloys; electron 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 оказывают вредное влияние на функционирование 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. Обычно для таких испытаний используют ускорители заряженных частиц. Такие ускорители, как правило, создают пучки практически моноэнергетических частиц. В то же время 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 спектров частиц является облучение устройств через экраны различной толщины.

В данной работе рассматриваются особенности использования мониторинга дефектного состава кремниевых структур для изучения модификации пучков частиц, созданных ускорителями быстрых электронов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве экспериментальных образцов использовались диодные n^+p -структуры, изготовленные на пластинах с эпитаксиальным слоем кремния КДБ-10 и сплавах $p\text{-Si}_{0,984}\text{Ge}_{0,016}$ на УП «Завод Транзистор» НПО «Интеграл». На пластинах $p\text{-Si}_{0,986}\text{Ge}_{0,014}$ ($\rho = 11 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) p - n -переход формировался диффузией фосфора при 1000°C на глубину до 2–3 мкм. 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.

На пластинах с эпитаксиальным слоем $p\text{-Si}$ p - n -переход формировался в два этапа. На первом этапе проводилась диффузия (загонка) фосфора (PCl_3) при температуре $T = 1000^\circ\text{C}$ в течение $t = 12$ мин. На втором этапе проводилась разгонка и активация донорной примеси при температуре $T = 1150^\circ\text{C}$ в среде азота в течение $t = 210$ мин, при этом глубина p - n -перехода составила порядка 12 мкм. Охранный переход формировался ионным легированием бора через защитный окисел толщиной $d_{\text{SiO}_2} = 0,1$ мкм дозой $D = 500 \text{ мКл/см}^2$ и энергией $E = 60 \text{ кэВ}$ по периферии кристалла с последующим отжигом и активацией акцепторной примеси при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$ в течение $t = 20$ мин в среде азота. Основной (базовый) окисел толщиной $d_{\text{SiO}_2} = (0,9 \pm 0,1) \text{ мкм}$ формировался при температуре $T = 1150^\circ\text{C}$ в течение $t = 100$ мин в среде кислорода и водорода. Начальная и конечная температура окисления пластин $T = 850^\circ\text{C}$.

Омические контакты в обоих случаях изготавливались напылением алюминия с последующим вжиганием при 475°C в течение 10 мин в атмосфере азота.

Облучение структур проводилось электронами с $E = 6 \text{ МэВ}$ на ускорителе У-003 при температуре $\sim 300 \text{ К}$. 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 .

Определение характеристик радиационных дефектов в базовой области p - n -структур осуществлялось методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) [2]. Спектры РСГУ измерялись в диапазоне температур $77\text{--}400 \text{ К}$ в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда.

Спектры электронов и тормозного излучения определялись методом компьютерного моделирования с помощью программного комплекса Geant 4. При расчете на выходном окне ускорителя задавался моноэнергетический ($E = 6 \text{ МэВ}$) пучок электронов в количестве, равном 10^6 единиц. Площадь детектора электронов и тормозного излучения составляла 16 см^2 . Проходя алюминиевый распылитель толщиной 1 мм и слой воздуха толщиной 650 мм электроны попадали на защищенные и не защищенные экранами n^+p -структуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате облучения исследуемых структур при комнатной температуре высокоэнергетическими частицами образуются различные комплексы с участием различных первичных радиационных дефектов. Для оценки эффективности экранирования важным фактором является соотношение между скоростями введения комплексов с участием одного или нескольких простейших радиационных дефектов (например, вакансий и дивакансий). На это соотношение кроме энергетического спектра быстрых электронов влияет и примесный состав облучаемого материала. Для исследования этого фактора в работе были использованы структуры на основе кремния и кремний-германиевых сплавов с различным содержанием легирующих и фоновых примесей.

Типичные спектры РСГУ диодных n^+p -структур, изготовленных на p -Si, после облучения за алюминиевыми экранами различной толщины электронами при 300 К флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и отжига при температуре 100 °С в течение 30 мин приведены на рис. 1. Наблюдаются пики РСГУ, принадлежащие комплексам междоузельный углерод-междоузельный кислород (C_iO_i), дивакансия (V_2) и комплекс междоузельный бор-междоузельный кислород (B_iO_i). Эта идентификация основана на результатах, полученных нами [3] и другими авторами [4]. При этом следует отметить, что спектр радиационных дефектов в сплавах $\text{Si}_{0,986}\text{Ge}_{0,014}$ не отличается существенно от спектра дефектов в нелегированных германием кристаллах кремния (рис. 2). С ростом содержания германия наблюдается лишь уширение пиков РСГУ и сдвиг их в область более низких температур, то есть изменение электронных свойств одних и тех же типов ловушек.

Уширение DLTS пиков является хорошо известным эффектом для полупроводниковых сплавов и связано с композиционными флуктуациями в составе атомов, окружающих каждый индивидуальный дефект [5, 6]. Изменение энергии активации дырок с глубоких донорных уровней связано, главным образом, с изменением постоянной решетки или длин связей между атомами в сплавах с изменением содержания германия [7].

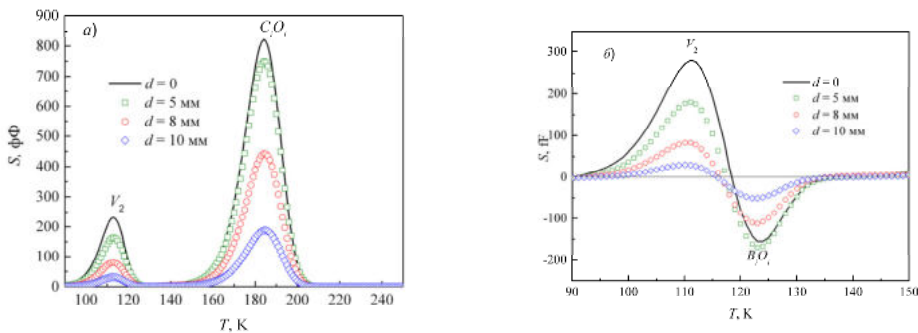


Рис. 1. Спектры РСГУ, полученные для n^+p - структур на основе p -Si, облученных электронами с начальной энергией 6 МэВ после прохождения через плоские алюминиевые экраны толщиной 5 (2), 8 (3) и 10 мм (4) и без экрана (1).

Спектры измерялись при $U_{\text{см}} = -6$ В в режимах заполнения уровней ловушек:

a – основными ($U_{\text{зап}} = -2$ В) носителями заряда; b – неосновными ($U_{\text{зап}} = +2$ В) носителями заряда.

Длительность импульса заполнения $t_{\text{зап}} = 0,01$ с, окно скоростей эмиссии $e = 19 \text{ с}^{-1}$

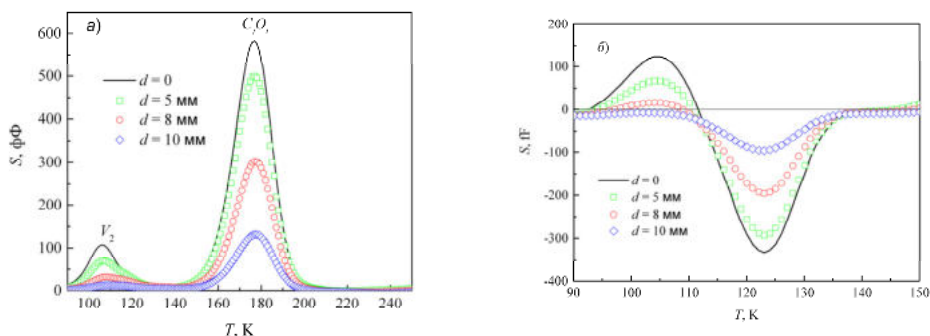


Рис. 2. Спектры РСГУ, полученные для n^+ - p -структур на основе p -Si_{0,984}Ge_{0,014}, облученных электронами с начальной энергией 6 МэВ после прохождения через плоские алюминиевые экраны толщиной 5, 8 и 10 мм и без экрана. Спектры измерялись при $U_{см} = -6$ В: *a* – в режимах заполнения уровней ловушек основными ($U_{зап} = -2$ В) носителями заряда; *б* – неосновными ($U_{зап} = +2$ В) носителями заряда. Длительность импульса заполнения $t_{зап} = 0,01$ с, окно скоростей эмиссии $e = 19$ с⁻¹

На основе данных, приведенных на рис. 1 и 2, могут быть получены зависимости скоростей образования указанных выше радиационных комплексов. Графики относительных амплитуд пиков РСГУ приведены на рис. 3. Если рассчитать скорости образования дефектов на основе экспериментальных данных работы [8] об изменении флюенса электронов после прохождения экрана, то мы получим практически постоянное значение скорости образования комплекса C_iO_i .

Обращает на себя внимание более быстрое уменьшение скорости образования дивакансии по сравнению со скоростью образования комплекса C_iO_i с ростом толщины экранов. Этот факт объясняется наличием более сильной зависимости эффективности введения дивакансии от энергии быстрых электронов.

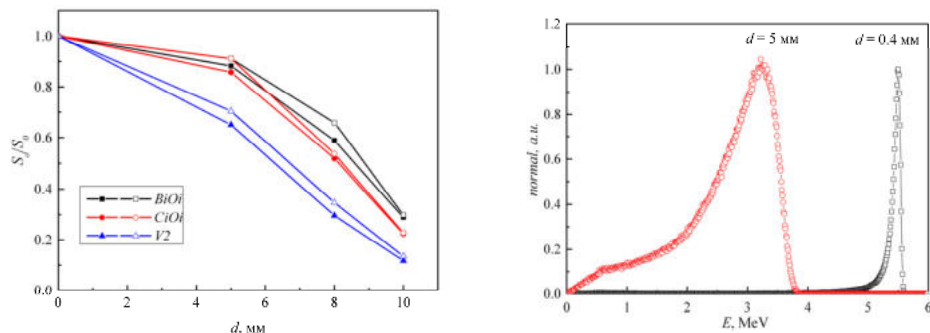


Рис. 3. Зависимость скорости образования основных РИЦ в диодах, изготовленных на p -Si (светлые значки) и p -Si_{0,984}Ge_{0,016} (темные значки), от толщины алюминиевых экранов. Сплошной линией показаны данные по коэффициенту пропускания через алюминиевые экраны электронов с энергией 6 МэВ

Рис. 4. Спектр быстрых электронов, создаваемых ускорителем до и после прохождения алюминиевого экрана толщиной 5 мм. Расчеты выполнены в программном комплексе Geant 4

На рис. 4 приведена зависимость спектрального распределения по энергиям пучка электронов с начальной энергией 6 МэВ.

Согласно эмпирическим данным [9] наиболее вероятная энергия электронов для широкого интервала энергий и толщин аппроксимируется линейной зависимостью:

$$E_p(z) = E_p(0)\left(1 - \frac{z}{R_p}\right),$$

где $E_p(0)$ – начальная энергия, R_p – пробег электронов. Таким образом, по отношению скоростей образования дивакансии и комплекса C_iO_i можно судить о средней энергии электронного излучения. И, наоборот, зная это отношение, можно судить о средней энергии пучка электронов с неизвестными характеристиками.

Как видно из рис. 4, используя теоретические расчеты, можно достаточно хорошо определить энергетический спектр электронов, прошедших сквозь экраны различной толщины. И, в принципе, проводя последовательное облучение через экраны различной толщины, с учетом изменения потока быстрых электронов можно промоделировать облучение пучками частиц с требуемым энергетическим спектром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены особенности радиационного дефектообразования в структурах на основе кремния пучками быстрых электронов, прошедших алюминиевые экраны различной толщины. Получены экспериментальные данные о скоростях введения различных дефектных комплексов: междоузельный углерод-междоузельный кислород (C_iO_i), дивакансия (V_2) и комплекс междоузельный бор-междоузельный кислород (B_iO_i). Результаты можно использовать для планирования испытаний электронных приборов на их радиационную стойкость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г.Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
2. Lang, D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors / D.V. Lang // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45, No. 7. – P. 3023-3032.
3. Makarenko, L.F. Effect of electron injection on defect reactions in irradiated silicon containing boron, carbon, and oxygen / L.F. Makarenko [et al] // J. Appl. Phys. – 2018 – Vol. 123, № 16. – 161576(1–7).
4. Kimerling, L.C. Interstitial defect reactions in silicon / L.C. Kimerling [et al] // Materials Science Forum. – 1989. – Vol. 38. – P. 141–150.
5. Omiling, P. Deep level transient spectroscopy evaluation of nonexponential transients in semiconductor alloys / P. Omiling, L. Samuelson, H.G. Grimmeiss // J. Appl. Phys. – 1983. – V. 54, N9. – P. 5117–5122.
6. Das, A. Deep-level transient spectroscopy (DLTS) analysis of defect levels in semiconductor alloys / A. Das, V.A. Singh, D.V. Lang // Semicond. Sci. Technol. – 1988. – V. 3, N12. – P. 1177-1183.
7. Balsas, A. Calculation of deep states in SiGe alloys: Interstitial carbon-oxygen complexes / A. Balsas [et al.] // Phys. Rev. B. – 2004. – V. 70, № 8. – P. 085201(1-7).
8. Ebert, P. J. Transmission and backscattering of 4.0-to 12.0-MeV electrons/ P.J. Ebert, A.F. Lauzon, E.M. Lent // Physical Review. – 1969. – T. 183. – №. 2. – P. 422–432.
9. International commission on radiation units and measurements, Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV, Rep. 35, ICRU, Bethesda, MD (1984).