

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

УДК 621.315.592

СПЕКТРЫ DLTS КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ С $p^+ - n$ -ПЕРЕХОДОМ, ОБЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА

© 2013 г. Н. А. Поклонский¹, Н. И. Горбачук¹, С. В. Шпаковский²,
В. А. Филипеня², А. С. Турцевич², С. В. Шведов², Во Куанг Нья,
Нгуен Тхи Тхань Бинь¹, В. А. Скуратов³, А. Wieck⁴
¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
²ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь,
³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия,
⁴Ruhr-Universitaet Bochum, Bochum, Germany

Исследованы $p^+ - n$ -диоды. Диоды изготовлены на пластинах однородно легированного фосфором монокристаллического кремния (толщина 460 мкм, плоскость (111)), выращенного методом бестигельной зонной плавки. Удельное сопротивление кремния — 90 Ом·см, концентрация фосфора — $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Диоды подвергнуты облучению ионами криптона с энергией 250 МэВ. Флюенс облучения — 10^8 см^{-2} . Радиационные дефекты, вводимые высокоэнергетической имплантацией ионов криптона, исследованы с помощью нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS — Deep-level transient spectroscopy). Спектры DLTS регистрировали на частоте 1 МГц в интервале температур 78—290 К. Вольт-фарадные характеристики измерены при напряжении обратного смещения от 0 до -19 В на частоте 1 МГц. Показано, что основными радиационными дефектами являются А-центры и дивакансии. Установлено, что вид спектров DLTS в интервале температур 150—260 К существенно зависит от напряжения эмиссии U_e . Варьирование U_e в ходе эксперимента позволило разделить вклады от различных дефектов в спектр DLTS в интервале температур 150—260 К. Показано, что, помимо А-центров и дивакансий, при облучении формируются многовакансионные комплексы с энергетическим уровнем $E_t = E_c - (0,50 \pm 0,02) \text{ эВ}$ и сечением захвата электронов $\sim 4 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$.

Ключевые слова: нестационарная спектроскопия глубоких уровней, радиационные дефекты, кремний, диод, высокоэнергетическая ионная имплантация.

Введение

Облучение высокоэнергетическими тяжелыми ионами можно использовать для оптимизации параметров быстродействующих силовых диодов. Оно позволяет добиться такого же быстродействия диодов, как и облучение электронами, но при меньшем увеличении сопротивления базы, а значит, и прямого падения напряжения [1—4]. В некоторых случаях это может оправдывать существенно большие финансовые затраты на высокоэнергетическую имплантацию. В отличие от облучения легкими ионами, облучение высокоэнергетическими тяжелыми ионами приводит к образованию

скоплений радиационных дефектов (многовакансионных и межузельных комплексов) [5, 6]. Для отработки технологических режимов создания быстродействующих диодов необходима информация о составе радиационных дефектов и их распределении по глубине. Методики емкостной спектроскопии достаточно широко используются для анализа дефектно-примесного состава барьерных структур. Наиболее информативным методом является нестационарная спектроскопия глубоких уровней (DLTS — Deep-level transient spectroscopy). При облучении высокоэнергетическими ионами радиационные дефекты неравномерно распределены по глубине. Максимум их

Поклонский Николай Александрович¹ — доктор физ.-мат. наук, профессор; **Горбачук Николай Иванович**¹ — кандидат физ.-мат. наук, доцент; **Шпаковский Сергей Васильевич**² — кандидат физ.-мат. наук, ведущий инженер-конструктор; **Филипеня Виктор Анатольевич**² — ведущий инженер; **Турцевич Аркадий Степанович**² — доктор тех. наук; **Шведов Сергей Васильевич**² — заместитель главного инженера; **Во Куанг Нья**¹ — аспирант; **Нгуен Тхи Тхань Бинь**¹ — магистрант; **Скуратов Владимир Алексеевич**³ — доктор физ.-мат. наук; **Andreas D. Wieck**⁴ — Prof. Dr.

¹Белорусский государственный университет, 220030, Беларусь, Минск, пр. Независимости, д. 4, ²ОАО «ИНТЕГРАЛ», 220108, Беларусь, Минск, ул. Казинца И.П., 121А, ³Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Россия, Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, ⁴Ruhr-Universitaet Bochum, D-44780, Universitaetsstrasse 150, Bochum, Germany

концентрации расположен на расстоянии, немного меньшем среднего проективного пробега ионов. Это приводит к неравномерному распределению концентрации свободных носителей заряда, что создает определенные трудности в интерпретации результатов, полученных методами емкостной спектроскопии [7—9].

Цель работы — установление особенностей спектров DLTS диодов на базе кремния, содержащих сильнодефектный слой, сформированный облучением ионами криптона с энергией 250 МэВ.

Образцы и методы исследования

Диоды изготавливали на пластинах (толщина 460 мкм, плоскость (111)) однородно легированного фосфором монокристаллического кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки. Удельное сопротивление составляло 90 Ом · см (КОФ-90), концентрация фосфора — $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Область p^+ -типа создавали ионной имплантацией бора с энергией 60 кэВ и дозой 20 мкКл/см² ($1,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) на установке «Везувий-3М», с последующим отжигом дефектов и разгонкой примеси в окислительной атмосфере при температуре 1200 °С в течение 9 ч. Активная площадь p^+ - n -перехода составляла 9,43 мм². Глубина залегания p^+ - n -перехода, контролируруемая по результатам химического травления шарового шлифа, составляла $x_j \approx 12$ мкм. Это значение удовлетворительно согласуется с результатами моделирования диффузии бора, выполненного с помощью программы Process Wizard 1D, согласно моделям, представленным в работе [10]. На рис. 1, кривая 1 показан построенный по результатам моделирования технологического процесса изготовления диодов профиль распределения разности концентраций акцепторов и доноров $|N_A - N_D|$. Оцененная из измерений вольт-фарадных характеристик толщина двойного электрического слоя p^+ - n -перехода в исходных диодах при на-

пряжении $U = 0$ составляла $\approx 4,5$ мкм. Для создания омического контакта к базе в непланарную сторону пластины кремния проводили имплантацию ионов фосфора (энергия — 75 кэВ, доза — 500 мкКл/см² ($3,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$)). Контакты формировали напылением Al с последующим взжиганием при температуре 475 °С в атмосфере азота (толщина слоя Al на контакте к p^+ -области составляла 4,5 мкм).

Готовые диоды облучали ионами криптона (Kr на циклотроне U-400 (ОИЯИ, Дубна). Энергия облучения — 250 МэВ, флюенс — 10^8 см^{-2} . Имплантацию проводили со стороны p^+ -области. Средний проективный пробег ионов криптона в двухслойной структуре Al/Si по результатам моделирования в программе TRIM [11] составил $R_p \approx 31$ мкм. На рис. 1, кривая 2 показаны расчетные профили распределения первичных радиационных вакансий. Расстояние между металлургической границей p^+ - n -перехода ($N_A = N_D$ без учета компенсации легирующей примеси радиационными дефектами) и максимумом распределения первичных вакансий составляло $\approx 14,5$ мкм.

Спектры DLTS регистрировали на частоте 1 МГц с помощью спектрометра CE-6 (НПООО «ОМНИТЕЛ», г. Минск, РБ). Длительность импульса заполнения ловушек электронами составляла не менее 5 мс, длительность импульса, во время которого происходила эмиссия электронов, захваченных на ловушки, — не менее 10 мс. Значение напряжения при импульсах заполнения ловушек электронами (далее U_p — напряжение заполнения) составляло 0 В. Значение напряжения при импульсах, во время которых исследовали релаксацию емкости, происходящую за счет эмиссии захваченных на ловушки электронов (далее U_e — напряжение эмиссии), варьировали от -1 до -16 В. Вольт-фарадные характеристики регистрировали при напряжениях обратного смещения от 0 до -19 В с шагом 0,1 В. На основании вольт-фарадных характеристик по стандартной методике [12] рассчитывали профили распределения разности концентраций свободных электронов и дырок по глубине базы диода.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 представлен спектр DLTS диодов, облученных ионами криптона с энергией 250 МэВ и флюенсом 10^8 см^{-2} . Спектр получен при $U_p = 0$ и $U_e = -6$ В. Значения времен выборки t_1 и t_2 , формирующих так называемое окно скоростей эмиссии, составляли 5 и 10 мс соответственно. На спектре присутствуют три пика. Рассчитанные из зависимостей Аррениуса значения энергетических уровней ловушек в запрещенной зоне для пика E1 составили $E_t = E_c - (0,20 \pm 0,02) \text{ эВ}$; для пика E2 — $E_t = E_c - (0,25 \pm 0,02) \text{ эВ}$. Сопоставление с известными литературными данными [13—15] позволило предположить, что пику E1 соответствует

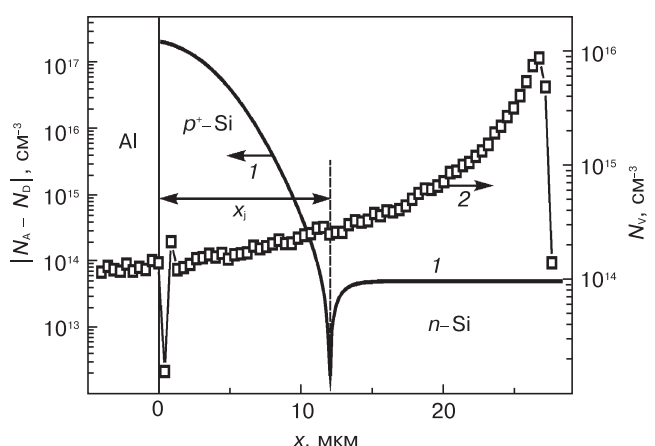


Рис. 1. Расчетные профили: распределения модуля разности концентраций акцепторов и доноров $|N_A - N_D|$ в исходном диоде (1) и распределения первичных вакансий, образованных при облучении диодов ионами криптона с энергией 250 МэВ (2). Флюенс облучения $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$

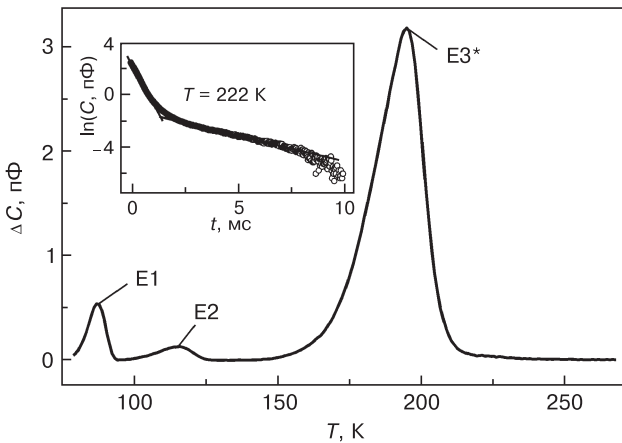


Рис. 2. Спектр DLTS диодов, облученных ионами криптона с энергией 250 МэВ. Флюенс облучения $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$. Длительность импульса заполнения ловушек $t_p = 5 \text{ мс}$, длительность импульса регистрации релаксации емкости (импульса эмиссии) $t_e = 10 \text{ мс}$. Вставка — зависимость нестационарной емкости C облученного диода от времени t

А-центр (т. е. комплекс атома кислорода и вакансии $V-O^{(-/0)}$), пику E2 — дивакансия в зарядовом состоянии $-2 (V_2^{(-/-)})$. На вставке рис. 2 в полулогарифмических координатах показана зависимость нестационарной емкости C диода от времени t (отсчет времени вели с момента подачи импульса эмиссии). На зависимости $C(t)$ можно выделить, как минимум, два линейных участка. Мультиэкспоненциальная релаксация емкости может указывать на то, что пик $E3^*$ является суперпозицией сигналов нескольких центров.

Для проверки высказанной выше гипотезы в интервале температур 150—260 К была зарегистрирована серия спектров DLTS диодов при одинаковом для всех экспериментов $U_p = 0$ и U_e , варьировавшемся в диапазоне от -1 до -16 В . Полученные спектры представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что при значениях напряжения $U_e = -1 \text{ В}$ и $U_e = -2 \text{ В}$ на спектрах наблюдаются два пика — E3 и E4. Рассчитанные значения энергетических уровней для пика E3 составили $E_t = E_c - (0,40 \pm 0,02) \text{ эВ}$; для пика E4 — $E_t = E_c - (0,50 \pm 0,02) \text{ эВ}$. При напряжениях эмиссии $|U_e| \geq 3 \text{ В}$ на спектрах присутствует только один пик $E3^*$. При варьировании U_e рассчитанные значения энергетического уровня для пика $E3^*$ изменялись в интервале от $E_t = E_c - (0,39 \pm 0,02) \text{ эВ}$ до $E_t = E_c - (0,46 \pm 0,02) \text{ эВ}$. Согласно работам [13–15], в формировании пиков DLTS E3 и $E3^*$ принимают участие комплексы атомов фосфора и вакансии ($V-P^{(-/0)}$ — E-центр), а также дивакансии в зарядовом состоянии $-1 (V_2^{(-/0)})$.

Присутствие двух пиков на спектрах DLTS, зарегистрированных при $|U_e| \leq 3 \text{ В}$, помимо собственно радиационных дефектов, может быть вызвано рядом других причин. Например, в работе [16] показано, что ложные пики DLTS могут наблюдаться на структурах p^+-n-n^+ , изготовленных на базе высокоомного (концентрация свободных носителей

заряда $\approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) кремния. Так как металлический контакт к p^+ -области закрывал часть поверхности кремния, покрытой оксидом, авторы работы [16] связывали присутствие ложных пиков DLTS с особенностями релаксации емкости структуры металл—диэлектрик—полупроводник. В нашем случае это привело бы к наблюдению пиков DLTS не только на облученных, но и на исходных диодах, чего отмечено не было.

Известно, что неоднородное по глубине распределение концентрации свободных носителей заряда также может приводить к искажению [7] спектров DLTS и появлению дополнительных пиков [8]. В случае имплантации высокоэнергетических тяжелых ионов распределение концентрации носителей заряда по глубине неоднородно из-за неоднородности распределения радиационных дефектов, компен-

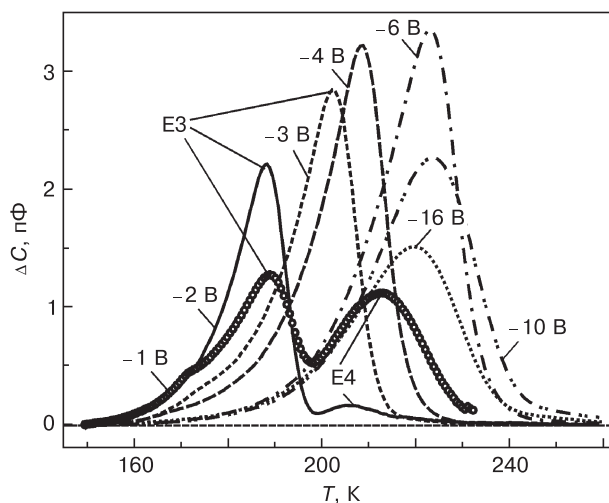


Рис. 3. Спектры DLTS диодов, облученных ионами криптона с энергией 250 МэВ. Флюенс облучения $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$. Длительность импульса заполнения ловушек $t_p = 10 \text{ мс}$, длительность импульса регистрации релаксации емкости (импульса эмиссии) $t_e = 15 \text{ мс}$. Напряжение заполнения ловушек $U_p = 0$. Значения U_e указаны на рисунке

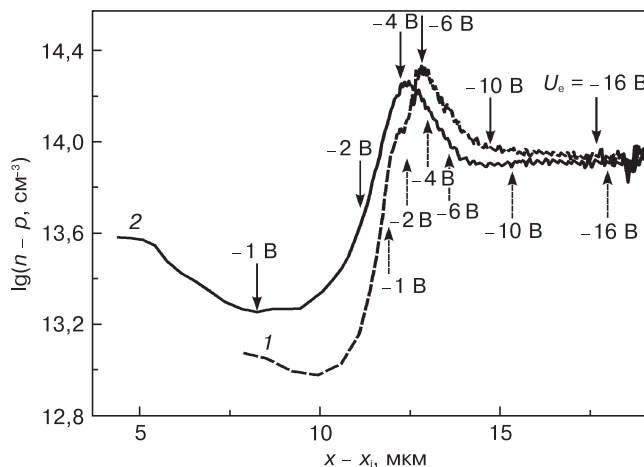


Рис. 4. Профили распределения разности концентраций свободных электронов и дырок, построенные на основе вольт-фарадных характеристик, измеренных при 160 К (1) и 250 К (2). Стрелками указаны границы распространения области пространственного заряда при напряжениях U_e

сирующих легирующую примесь в базе диода. На рис. 4 в полулогарифмических координатах показано распределение разности концентраций свободных электронов и дырок ($n - p$), полученное на основании вольт-фарадных характеристик, зарегистрированных при температуре 160 и 250 К. Для каждой из температур на рис. 4 стрелками условно отмечены границы распространения области пространственно-го заряда, соответствующие значениям напряжения U_e , используемым при эксперименте. Из рис. 4 видно, что при увеличении температуры в процессе регистрации спектра DLTS граница области пространственного заряда сдвигается в сторону p^+ -кремния, что может приводить к искажению спектров.

Подобный случай неоднородного распределения по глубине концентрации носителей заряда исследован авторами работ [7, 8]. В работе [7] представлены результаты расчетов спектров DLTS GaAs, содержащего центры с уровнем $E_t = E_c - 0,35$ эВ, в котором распределение концентрации свободных носителей заряда описывается функциями Гаусса или Лорентца. Показано, что возможно немонотонное изменение амплитуды, полуширины и положения пика на спектре DLTS. В работе [8] рассмотрен случай линейного изменения концентрации носителей заряда от 10^{16} до 10^{15} см^{-3} в GaAs, содержащем центры с уровнем $E_t = E_c - 0,4$ эВ. Показано, что подобное изменение концентрации может приводить к появлению дополнительного пика DLTS. Оценка «сечения захвата» σ_n и «глубины залегания уровня», выполненная на основании анализа зависимостей Аррениуса, для ложного пика приводила [8] к неправдоподобным результатам: $E_t = E_c - 2,7$ эВ и $\sigma_n = 4,6 \cdot 10^{41}$ см^2 . Проведенная нами оценка параметров пика E4 дала следующие результаты: $E_t = E_c - (0,50 \pm 0,02)$ эВ и $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-13}$ см^2 . Значение сечения захвата представляется излишне большим, но вполне вероятным, если предположить, что дефект — многовакансионный комплекс. В работе [17] установлено присутствие в кремнии, облученном ионами бора с энергией 14 МэВ и флюенсом 10^{11} см^{-2} , дефектов с уровнем $E_t = E_c - 0,57$ эВ и сечением захвата электронов $\sigma_n = 10^{-12}$ см^2 . Авторы работы [17] предполагали, что указанные дефекты имеют вакансионную природу и основная их масса сконцентрирована в слое толщиной порядка 5 мкм на глубине среднего проективно-го пробега. В работе [18] показано, что тривакансия $V_3^{(-/0)}$ имеет энергетический уровень $E_t = E_c - 0,46$ эВ, а комплекс «тривакансия — кислород» $V_3 - O^{(-/0)}$ — $E_t = E_c - 0,455$ эВ, что достаточно близко к полученным нами значениям. Таким образом, на настоящий момент наиболее вероятным представляется то, что наблюдаемый на спектрах DLTS пик E4 обусловлен именно радиационными дефектами, возможно, многовакансионными комплексами, вероятность образования которых в конце пробега высокоэнергетических ионов достаточно велика [5, 6]. Качественно полученные результаты согласуются с выводами

работы [9], в которой были рассмотрены особенно-сти спектров DLTS, обусловленные неоднородным распределением дефектов в GaAs, облученном нейтронами.

Заключение

Установлено, что при температурах < 150 К на спектрах DLTS наблюдаются пики, соответствующие комплексам кислород — вакансия и дивакансиям в зарядовом состоянии -2 . Показано, что вид спектров DLTS в интервале температур 150—260 К существенно зависит от напряжения эмиссии. Варьирование напряжения эмиссии в ходе эксперимента позволяет разделить вклады от различных дефектов в спектр DLTS в интервале температур 150—260 К. Показано, что, помимо А-центров и дивакансий, при облучении формируются многовакансионные комплексы с энергетическим уровнем $E_t = E_c - (0,50 \pm 0,02)$ эВ и сечением захвата электронов $\sim 4 \cdot 10^{-13}$ см^2 .

Библиографический список

1. **Poklonski, N. A.** Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical p^+n -junction — defect layer formed by 250 MeV krypton implantation / N. A. Poklonski, N. I. Gorbachuk, S. V. Shpakovski, V. A. Filipenia, V. A. Skuratov, A. Wieck // *Physica B.* — 2009. — V. 404, N 23–24. — P. 4667—4670.
2. **Poklonski, N. A.** Electrical properties of silicon diodes with p^+n junctions irradiated with $^{197}\text{Au}^{+26}$ swift heavy ions / N. A. Poklonski, N. I. Gorbachuk, S. V. Shpakovski, A. V. Petrov, S. B. Lastovskii, D. Fink, A. Wieck // *Nucl. Instrum. Meth. B.* — 2008. — V. 266, N 23. — P. 5007—5012.
3. **Sathyavathi, P.** Irradiation effects of 35 MeV lithium and 70 MeV oxygen ions on the hole lifetime and the forward current of silicon diodes / P. Sathyavathi, P. S. Bhav, V. N. Bhoraskar // *Solid State Commun.* — 1998. — V. 106, N 11. — P. 755—758.
4. **Bhave, P. S.** Irradiation effects of high energy heavy ions on the switching characteristics of p-n junction diodes / P. S. Bhav, V. N. Bhoraskar // *Nucl. Instrum. Meth. B.* — 1997. — V. 127/128. — P. 383—387.
5. **Nastasi, M.** Ion implantation and synthesis of materials / M. Nastasi, J. W. Mayer. — Berlin: Springer, 2006. — 263 p.
6. **Chelyadinskii, A. R.** Defect-impurity engineering in implanted silicon / A. R. Chelyadinskii, F. F. Komarov // *Phys. Usp.* — 2003. — V. 46, N 8. — P. 789—820.
7. **Ito, A.** Deformation of a deep-level transient spectroscopy spectrum by an inhomogeneous carrier concentration depth profile / A. Ito, Y. Tokuda // *Solid-State Electron.* — 2002. — V. 46, N 9. — P. 1307—1313.
8. **Ito, A.** Effects of inhomogeneous carrier concentration depth profile on deep-level transient spectroscopy measurements / A. Ito, Y. Tokuda // *J. Cryst. Growth.* — 2000. — V. 210, N 1–3. — P. 384—387.
9. **Novikov, V. A.** Effect of nonuniform distribution of radiation defects in GaAs on the DLTS spectra / V. A. Novikov, V. V. Peshev // *Semiconductors.* — 1998. — V. 32, N 4. — P. 366—371.
10. *ULSI technology* / Ed. by C. Y. Chang, S. M. Sze. — N. Y.: McGraw-Hill, 1996. — 726 p.
11. **Ziegler, J. F.** SRIM-2003 / J. F. Ziegler // *Nucl. Instrum. Meth. B.* — 2004. — V. 219–220. — P. 1027—1036
12. **Sze, S. M.** *Semiconductor devices: Physics and technology* / S. M. Sze. — N. Y.: Wiley, 2001. — 568 p.
13. **Eremin, V.** Effect of radiation induced deep level traps on Si detector performance / V. Eremin, E. Verbitskaya, Z. Li // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2002. — V. 476, N 3. — P. 537—549.
14. **Moll, M.** Relation between microscopic defects and macroscopic changes in silicon detector properties after hadron irradiation / M. Moll, E. Fretwurst, M. Kuhnke, G. Lindstroem // *Nucl. Instrum. Meth. B.* — 2002. — V. 186, N 1–4. — P. 100—110.

15. **Hazdra, P.** Lifetime control in silicon power $p-i-n$ diode by ion irradiation: Suppression of undesired leakage / P. Hazdra, V. Komarnitskiy // *Microelectron. J.* – 2006. – V. 37, N 3. – P. 197–203.
16. **Eremin, V. K.** False peaks in DLTS spectra of planar diode structures / V. K. Eremin, A. M. Ivanov, A. M. Strokan // *Sov. Phys. Semiconductors.* – 1992. – V. 26, N 3. – P. 269–271.
17. **Antonova, I. V.** Transformation of electrically active defects as a result of annealing of silicon implanted with high-energy ions /

- I. V. Antonova, S. S. Shaimeev, S. A. Smagulova // *Semiconductors.* – 2006. – V. 40, N 5. – P. 543–548.
18. **Markevich, V. P.** Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancy–oxygen complex in silicon / V. P. Markevich, A. R. Peaker, B. Hamilton, S. B. Lastovskii, L. I. Murin, J. Coutinho, V. J. B. Torres, L. Dobaczewski, B. G. Svensson // *Phys. Status Solidi A.* – 2011. – V. 208, N 3. – P. 568–571.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (договор Ф12Д–003) и ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.04).

Статья поступила в редакцию 25 июля 2012 г.

ISSN 1609–3597 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics.* 2014, vol. 17, no. 1, pp. 42–46.

DLTS spectra of silicon diodes with $p^+ - n$ -junction irradiated with high energy krypton ions

Poklonski Nikolai Aleksandrovich¹ — Doctor of Physics and Mathematics, Professor; **Gorbachuk Nikolai Ivanovich**¹ — Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor; **Shpakovski Sergei Vasil'evich**² — Candidate of Physics and Mathematics, Leading Design Engineer; **Philippenya Viktor Anatol'evich**² — Leading Engineer; **Turtsevich Arkadii Stepanovich**² — Doctor of Technical Sciences; **Shvedov Sergei Vasil'evich**² — Deputy Chief Engineer; **Vo Quang Nha**¹ — PhD Student; **Nguyen Thi Thanh Binh**¹ — Master Student; **Skuratov Vladimir Alekseevich**³ — Doctor of Physics and Mathematics; **Andreas D. Wieck**⁴ — Prof. Dr.

¹Belarusian State University, 220030, Belarus, Minsk, Nezavisimosti ave., 4, ²JSC «INTEGRAL» – Holding Management Company, 220108, Belarus, Minsk, Kazintsa I. P. Str., 121A, ³Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Russia, Dubna, Joliot-Curie, 6, ⁴Ruhr-Universitaet Bochum, D-44780, Universitaetsstrasse, 150, Bochum, Germany

Abstract. $p^+ - n$ -Diodes have been studied. The diodes were manufactured on wafers (thickness 460 μm , (111) plane) of uniformly phosphorus doped float–zone–grown single–crystal silicon. The resistivity of silicon was 90 $\Omega \cdot \text{cm}$ and the phosphorus concentration was $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. The diodes were irradiated with 250 MeV krypton ions. The irradiation fluence was 10^9 cm^{-2} . Deep–level transient spectroscopy (DLTS) was used to examine the defects induced by high energy krypton ion implantation. The DLTS spectra were recorded at a frequency of 1 MHz in the 78–290 K temperature range. The capacity–voltage characteristics have been measured at a reverse bias voltage from 0 to –19 V at a frequency of 1 MHz. We show that the main irradiation–induced defects are A–centers and divacancies. The behavior of DLTS spectra in the 150–260 K temperature range depends essentially on the emission voltage U_e . The variation of U_e allows us to separate the contributions of different defects into the DLTS spectrum in the 150–260 K temperature range. We show that, in addition to A–centers and divacancies, irradiation produces multivacancy complexes with the energy level $E_t = E_c - (0.5 \pm 0.02) \text{ eV}$ and an electron capture cross section of $\sim 4 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^2$.

Keywords: Deep–level transient spectroscopy, irradiation–induced defects, silicon, diode, high energy ion implantation.

References

- Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Filippenya V. A., Skuratov V. A., Wieck A. Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical $p^+ - n$ -junction — defect layer formed by 250 MeV krypton implantation. *Physica B.* 2009, vol. 404, no. 23–24, pp. 4667–4670. DOI: 10.1016/j.physb.2009.08.129
- Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Petrov A. V., Lastovskii S. B., Fink D., Wieck A. Electrical properties of silicon diodes with $p^+ - n$ junctions irradiated with $^{197}\text{Au}^{+26}$ swift heavy ions. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 2008, vol. 266, no. 23, pp. 5007–5012. DOI: 10.1016/j.nimb.2008.09.001
- Sathyavathi P., Bhavne P. S., Bhoraskar V. N. Irradiation effects of 35 MeV lithium and 70 MeV oxygen ions on the hole lifetime

and the forward current of silicon diodes. *Solid State Commun.* 1998, vol. 106, no. 11, pp. 755–758. DOI: 10.1016/S0038-1098(98)00116-1

4. Bhavne P. S., Bhoraskar V. N. Irradiation effects of high energy heavy ions on the switching characteristics of $p - n$ junction diodes. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 1997, vol. 127/128, pp. 383–387. DOI: 10.1016/S0168-583X(96)00962-7

5. Nastasi, M., Mayer J. W. Ion implantation and synthesis of materials. Berlin: Springer, 2006. 263 p.

6. Chelyadinskiy A. R., Komarov F. F. Defect–impurity engineering in implanted silicon. *Phys. Usp.* 2003, vol. 46, no. 8, pp. 789–820. DOI: 10.1070/PU2003v046n08ABEH001371

7. Ito A., Tokuda Y. Deformation of a deep–level transient spectroscopy spectrum by an inhomogeneous carrier concentration depth profile. *Solid–State Electron.* 2002, vol. 46, no. 9, pp. 1307–1313. DOI: 10.1016/S0038-1101(02)00077-1

8. Ito A., Tokuda Y. Effects of inhomogeneous carrier concentration depth profile on deep–level transient spectroscopy measurements. *J. Cryst. Growth.* 2000, vol. 210, no. 1–3, pp. 384–387. DOI: 10.1016/S0022-0248(99)00716-2

9. Novikov V. A., Peshev V. V. Effect of nonuniform distribution of radiation defects in GaAs on the DLTS spectra. *Semiconductors.* 1998, vol. 32, no. 4, pp. 366–371. DOI: 10.1134/1.1187397

10. ULSI technology / Ed. by C. Y. Chang, S. M. Sze. N. Y.: McGraw–Hill, 1996. 726 p.

11. Ziegler J. F. SRIM–2003. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 2004, vol. 219–220, pp. 1027–1036. DOI: 10.1016/j.nimb.2004.01.208

12. Sze S. M. Semiconductor devices: Physics and technology. N. Y.: Wiley, 2001. 568 p.

13. Eremin V., Verbitskaya E., Li Z. Effect of radiation induced deep level traps on Si detector performance. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2002, vol. 476, no. 3, pp. 537–549. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01640-0

14. Moll M., Fretwurst E., Kuhnke M., Lindstroem G. Relation between microscopic defects and macroscopic changes in silicon detector properties after hadron irradiation. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 2002, vol. 186, no. 1–4, pp. 100–110. DOI: 10.1016/S0168-583X(01)00866-7

15. Hazdra P., Komarnitskiy V. Lifetime control in silicon power $p - i - n$ diode by ion irradiation: Suppression of undesired leakage. *Microelectron. J.* 2006, vol. 37, no. 3, pp. 197–203. DOI: 10.1016/j.mejo.2005.09.010

16. Eremin V. K., Ivanov A. M., Strokan A. M. False peaks in DLTS spectra of planar diode structures. *Sov. Phys. Semiconductors.* 1992, vol. 26, no. 3, pp. 269–271.

17. Antonova I. V., Shaimeev S. S., Smagulova S. A. Transformation of electrically active defects as a result of annealing of silicon implanted with high–energy ion. *Semiconductors.* 2006, vol. 40, no. 5, pp. 543–548. DOI: 10.1134/S106378260605006X

18. Markevich V. P., Peaker A. R., Hamilton B., Lastovskii S. B., Murin L. I., Coutinho J., Torres V. J. B., Dobaczewski L., Svensson B. G. Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancy–oxygen complex in silicon. *Phys. Status Solidi A.* 2011, vol. 208, no. 3, pp. 568–571. DOI: 10.1002/pssa.201000265

Acknowledgements: This work was supported BRFFR (contract F12D–003) and GPNI “Electronics and Photonics” (reference 1.1.04).

Received July 25, 2012