

УДК 621.315.592

ОБРАЗОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ ВОДОРОДА

Ю. М. ПОКОТИЛО¹⁾, А. Н. ПЕТУХ¹⁾, А. В. ГИРО¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Энергетический спектр уровней радиационных дефектов в эпитаксиальном кремнии *n*-типа, облученном ионами водорода с энергией 300 кэВ, исследовался при помощи метода DLTS (deep level transient spectroscopy). Обнаружено увеличение амплитуды пика DLTS с ростом температуры его регистрации, что свидетельствует об образовании областей скопления дефектов с невысокой плотностью смещения, меньшей исходного уровня легирования. После выдержки облученных образцов при комнатной температуре в течение нескольких месяцев данные области распадаются с образованием точечных изолированных *A*-, *E*-центров и водородосодержащих дефектов с уровнем $E_c - 0,31$ эВ. Установлено, что комплексы с таким уровнем образуются путем присоединения к *A*-центру атомов водорода. При температуре $T > 150$ °С этот дефект начинает отжигаться, и одновременно увеличивается концентрация *A*-центра.

Ключевые слова: кремний; ионная имплантация; радиационные дефекты; водород; отжиг; DLTS.

FORMATION AND ANNEALING OF RADIATION DEFECTS IN SILICON, IMPLANTED WITH HYDROGEN IONS

Yu. M. POKOTILO^a, A. N. PETUKH^a, A. V. GIRO^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. V. Giro (giro@bsu.by)

Energy spectrum of radiation defect levels in *n*-type epitaxial silicon irradiated with 300 keV hydrogen ions was studied by DLTS (deep level transient spectroscopy) method. The increase in the amplitude of DLTS peak with the increase in the temperature of its registration was found. This indicates the formation of areas of defects accumulation with displacement density lower initial level of doping. After exposure of irradiated samples at room temperature for several months, these areas decay with isolated point *A*-, *E*-centers and hydrogen defects with an $E_c - 0.31$ eV level formation. It is shown that complexes with an $E_c - 0.31$ eV level are formed by attaching hydrogen atoms to *A*-center. At $T > 150$ °C, this defect begins to anneal, and at the same time *A*-center concentration is increased.

Keywords: silicon; ion implantation; radiation defects; hydrogen; annealing; DLTS.

Образец цитирования:

Покотило ЮМ, Петух АН, Гиро АВ. Образование и отжиг радиационных дефектов в кремнии, имплантированном ионами водорода. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;3:68–72.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-68-72>

For citation:

Pokotilo YuM, Petukh AN, Giro AV. Formation and annealing of radiation defects in silicon, implanted with hydrogen ions. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2019;3:68–72. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-68-72>

Авторы:

Юрий Мефодьевич Покотило – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры энергофизики физического факультета.
Алла Николаевна Петух – кандидат физико-математических наук; заведующий учебной лабораторией кафедры энергофизики физического факультета.
Алексей Владимирович Гиро – старший преподаватель кафедры энергофизики физического факультета.

Authors:

Yuri M. Pokotilo, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of energy physics, faculty of physics.
pokotilo@bsu.by
Alla N. Petukh, PhD (physics and mathematics); head of the educational laboratory, department of energy physics, faculty of physics.
petukh@bsu.by
Alexei V. Giro, senior lecturer at the department of energy physics, faculty of physics.
giro@bsu.by

Введение

При облучении кремния *n*-типа частицами, такими как протоны, электроны, γ -кванты, образуются пары Френкеля (междоузельный атом – вакансии), часть из которых затем рекомбинирует, а остальные участвуют в формировании устойчивых дефектов: дивакансии *A*-центра (комплекс кислород – вакансии) и *E*-центра (легирующая примесь – вакансии) [1]. Однако облучение ионами H^+ в связи с высокой реакционной способностью атомарного водорода приводит к следующим особенностям. С одной стороны, водород сам выступает в качестве эффективной ловушки для вакансий и междоузельных атомов, что существенно понижает скорость введения радиационных дефектов (РД). С другой стороны, при взаимодействии с РД водород может полностью пассивировать либо частично изменить их электрические свойства [2]. Цель данной работы – сравнительное исследование при помощи метода DLTS процессов образования РД в кремнии, облученном ионами H^+ и γ -квантами ^{60}Co .

Методика эксперимента

Для исследования использовались диоды Шоттки (Mo – Si), у которых активным базовым слоем служил эпитаксиальный кремний, легированный фосфором, с удельным сопротивлением $\rho = 1,2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной $x = 5 \text{ мкм}$. Облучение ионами H^+ с энергией 300 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ проводилось с планарной стороны через многослойный (Ag – Ni – Mo) контакт. Расчет пробега ионов H^+ в данной многослойной структуре с помощью программы TRIM показал, что максимум распределения внедренных ионов и РД локализован в базе на расстоянии $x \approx 1,55 \text{ мкм}$ от плоскости перехода. Параметры РД определялись при помощи метода DLTS [3]. В нашем случае отношение времен выборки составляло $t_2/t_1 = 5$, частота измерительного моста – 1 МГц, напряжение смещения переключалось от 0 до –5 В, что соответствует глубине сканирования базового слоя 1,2–2,1 мкм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены спектры DLTS облученного ионами H^+ образца. Видно, что непосредственно после облучения (кривая I) в спектре наблюдается лишь один пик с энергией активации $\Delta E = 0,4 \text{ эВ}$ и сечением захвата электронов $\sigma = 8,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, найденными из температурного смещения максимума пика при измерении серии спектров с различными окнами регистрации. В этих измерениях обнаружено возрастание амплитуды пика при увеличении температуры регистрации (рис. 2).

Согласно [4] данный эффект обусловлен изменением концентрации заряженных глубоких уровней в скоплениях дефектов при изменении температуры. Известно, что для скопления дефектов, образованных быстрыми нейтронами реактора, амплитуда пика падает с ростом температуры регистрации [5]. В нашем же случае наблюдается противоположный эффект, который можно объяснить в соответствии с моделью [4] и данными работы [6] образованием при протонном облучении областей с невысокой

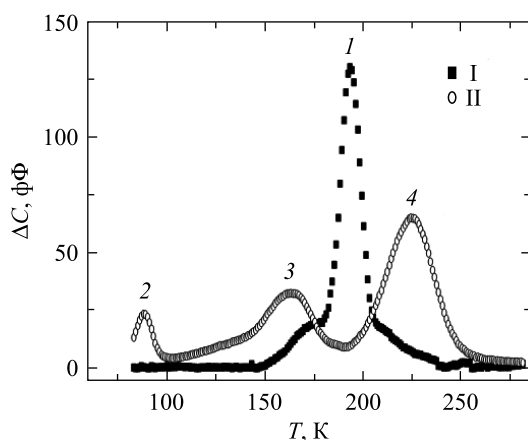


Рис. 1. Спектры DLTS ($\tau = 10,4 \text{ мс}$) диода Шоттки, облученного ионами водорода, непосредственно после облучения (I) и через 5 мес. выдержки при комнатной температуре (II).

Цифрами 1–4 обозначены пики DLTS

Fig. 1. DLTS spectra ($\tau = 10.4 \text{ ms}$) of Schottky diode irradiated with hydrogen ions immediately after irradiation (I) and after 5 months exposure at room temperature (II).

Numbers 1–4 marks DLTS peaks

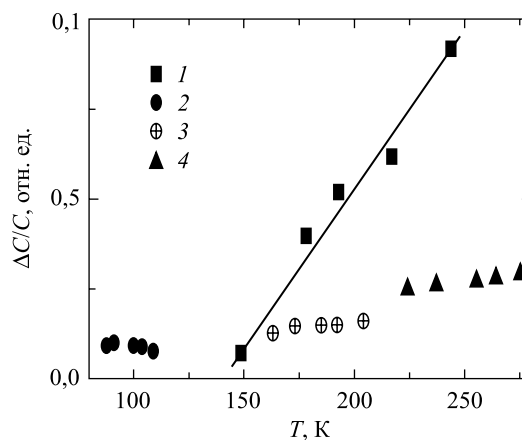


Рис. 2. Зависимости амплитуд пиков DLTS на рис. 1 (1–4) от температуры регистрации

Fig. 2. Dependences of DLTS peaks amplitudes in fig. 1 (1–4) from registration temperature

плотностью смещения, которая меньше исходного уровня легирования. Такие области скопления дефектов неустойчивы [6], поэтому выдержка облученных образцов при комнатной температуре приводит сначала к их развалу, а затем к появлению изолированных точечных дефектов (см. рис. 1, кривая II), амплитуды пиков которых очень слабо зависят от температуры регистрации.

На рис. 3 приведены спектры DLTS для диодов Шоттки, облученных γ -квантами ^{60}Co и ионами H^+ , пронормированные по амплитуде наиболее высокотемпературного пика. Диоды Шоттки, облученные ионами H^+ , перед измерениями выдерживались в течение 5 мес. при комнатной температуре. Построенные для соответствующих пиков DLTS зависимости Аррениуса представлены на рис. 4, а найденные значения параметров дефектов и их идентификация (согласно [7]) приведены в таблице.

**Основные параметры уровней радиационных дефектов в кремнии,
облученном ионами H^+ и γ -квантами**

**The main parameters of radiation defects levels in silicon
irradiated with H^+ ions and γ -quanta**

Номер пика	Энергия уровня, эВ	Сечение захвата, 10^{-15} см^2	Температура отжига, $^{\circ}\text{C}$	Идентификация
1	$E_c - (0,165 \pm 0,05)$	5 ± 2	350	$(V - \text{O})^{0/-}$, A-центр
2	$E_c - 0,21$	0,1	—	$W^{=/-}$, дивакансия
3	$E_c - 0,31$	1,6	250	H-центр
4	$E_c - (0,42 \pm 0,01)$	$1,0 \pm 0,3$	150	$(P - V)^{-0}$, E-центр

На рис. 5 представлены данные изохронного отжига исследуемых дефектов. Из анализа полученных результатов следует, что для обоих видов облучения вводятся A-центры (1), E-центры (4) и незначительное количество дивакансий $W^{=/-}$ (2). Более глубокое состояние дивакансии W^{-0} маскируется, по нашему мнению, мощным пиком (4), который, исходя главным образом из температуры его отжига $\sim 150^{\circ}\text{C}$, можно идентифицировать как E-центр.

К особенностям протонного облучения (как видно из рис. 3) можно отнести появление нового дефекта с уровнем $E_c - 0,31$ эВ, а также более низкий относительный вклад A-центра, который при γ -облучении (см. рис. 3, кривая I) и электронном облучении [8] доминирует в спектре DLTS. С учетом вышесказанного можно предположить, что образование водородосодержащего дефекта с уровнем $E_c - 0,31$ эВ происходит за счет A-центра. Как показано в работах [8; 9], низкотемпературное введение водорода в процессе химической полировки кремния, предварительно облученного электронами, приводит к сокращению A-центров за счет присоединения к ним атома водорода и образования нового дефекта с уровнем $E_c - 0,31$ эВ, который можно идентифицировать как VOH -комплекс. Кроме того,

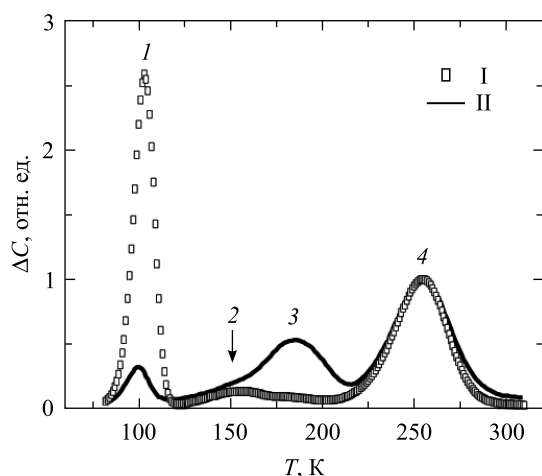


Рис. 3. Нормированные спектры DLTS ($\tau = 0,52$ мс) для диодов Шоттки, облученных γ -квантами (I) и ионами H^+ (II). Цифрами 1–4 обозначены DLTS

Fig. 3. Normalized DLTS spectra ($\tau = 0.52$ ms) for Schottky diodes irradiated with γ -quanta (I) and H^+ ions (II). Numbers 1–4 marks DLTS peaks

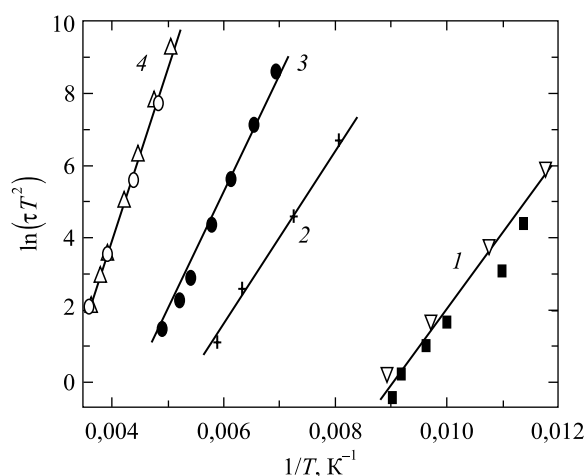


Рис. 4. Зависимости Аррениуса для соответствующих пиков DLTS на рис. 3 (1–4)

Fig. 4. Arrhenius plots for the corresponding DLTS peaks from fig. 3 (1–4)

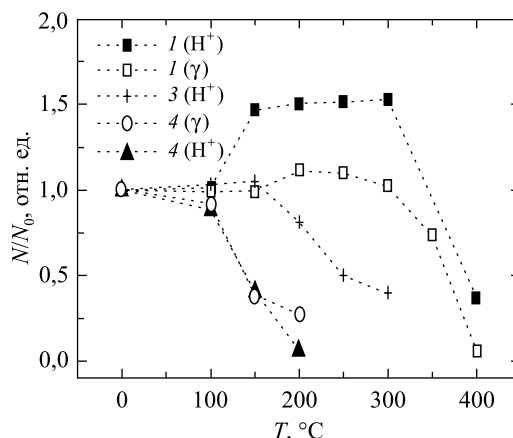


Рис. 5. Зависимость концентрации радиационных дефектов, соответствующих пикам DLTS на рис. 3, от температуры изохронного (20 мин) отжига. Вид облучения указан в скобках

Fig. 5. The dependence of radiation defects concentration, corresponding to DLTS peaks in fig. 3, from the temperature of isochronous (20 min) annealing. The type of exposure is indicated in brackets

в пользу механизма пассивации *A*-центра свидетельствуют также и наши данные по изохронному отжигу, которые приведены на рис. 5. Видно, что отжиг *VOH*-комплекса сопровождается увеличением концентрации *A*-центра, в то время как отжиг *A*-центра в облученном γ -квантами образце протекает без роста его концентрации.

Заключение

Полученные в работе результаты показали, что при облучении кремния ионами водорода образуются области скопления дефектов с невысокой плотностью смещения, меньшей исходного уровня легирования. Данные области термически неустойчивы и распадаются после длительной (~5 мес.) выдержки образцов при комнатной температуре с образованием *A*-, *E*-центров и водородосодержащего дефекта с уровнем $E_c - 0,31$ эВ. Установлено, что данный дефект образуется путем присоединения атома водорода к *A*-центру, так как при его отжиге происходит увеличение концентрации последнего.

Библиографические ссылки

1. Watkins GD, Corbett JW. Defects in irradiated silicon: electron paramagnetic resonance of the divacancy. *Physical Review*. 1965;138(2A):A543–A555. DOI: 10.1103/PhysRev.138.A543.
2. Pearton SJ, Corbett JW, Stavola M. *Hydrogen in Crystalline Semiconductors*. Berlin: Springer; 1992. DOI: 10.1007/978-3-642-84778-3.
3. Bourgoin J, Lannoo M. *Point Defects in Semiconductors. II. Experimental Aspects*. Berlin: Springer-Verlag; 1983. DOI: 10.1007/978-3-642-81832-5.
4. Антонова ИВ, Васильев АВ, Панов ВИ, Шаймеев ССю. Применение емкостной методики DLTS к исследованию полупроводников с неоднородным распределением примесей (дефектов). *Физика и техника полупроводников*. 1988;22(6):998–1003.
5. Камышан АС, Литвинов ВВ, Парахневич ЕВ, Петух АН, Покотило ЮМ, Шварков ДС. Радиационное дефектообразование в детекторном кремнии, облученном быстрыми нейтронами. В: *Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы III Международной научной конференции; 6–8 октября 1999 г.; Минск, Беларусь. Часть I*. Минск: БГУ; 1999. с. 17–19.
6. Коноплева РФ, Остроумов ВН. *Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием*. Москва: Атомиздат; 1975.
7. Козлов ВА, Козловский ВВ. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами. *Физика и техника полупроводников*. 2001;35(7):769–795.
8. Tokuda Y, Seki T. Interaction of hydrogen with the vacancy-oxygen pair produced in *n*-type silicon by electron irradiation. *Semiconductor Science and Technology*. 2000;15(2):126–129. DOI: 10.1088/0268-1242/15/2/308.
9. Ohmura Y, Takahashi K, Saitoh H, Kon T, Enosawa A. Hydrogenation and passivation of electron-beam-induced defects in *N*-type Si. *Physica B: Condensed Matter*. 1999;273–274:228–230. DOI: 10.1016/S0921-4526(99)00459-7.

References

1. Watkins GD, Corbett JW. Defects in irradiated silicon: electron paramagnetic resonance of the divacancy. *Physical Review*. 1965;138(2A):A543–A555. DOI: 10.1103/PhysRev.138.A543.
2. Pearton SJ, Corbett JW, Stavola M. *Hydrogen in Crystalline Semiconductors*. Berlin: Springer; 1992. DOI: 10.1007/978-3-642-84778-3.

3. Bourgoin J, Lannoo M. *Point Defects in Semiconductors. II. Experimental Aspects*. Berlin: Springer-Verlag; 1983. DOI: 10.1007/978-3-642-81832-5.
4. Antonova IV, Vasiliev AV, Panov VI, Shaimeev SSyu. [Using of capacitance method DLTS for investigation of semiconductors with inhomogeneous distribution of impurities (defects)]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 1988;22(6):998–1003. Russian.
5. Kamishan AS, Litvinov VV, Parahnevich EV, Petukh AN, Pokotilo YuM, Shvarkov DS. [Radiative defects in detector silicon irradiated by fast neutrons]. In: *Vzaimodeistvie izlucheni s tverdym telom. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii; 6–8 oktyabrya 1999 g.; Minsk, Belarus'. Chast' I* [Interaction of radiation with solid. Proceeding of the III International Scientific Conference; 1999 October 6–8; Minsk, Belarus. Part I]. Minsk: Belarusian State University; 1999. p. 17–19. Russian.
6. Konopleva RPh, Ostroumov VN. *Vzaimodeistvie zaryazhennykh chastits vysokikh energii s germaniem i kremniem* [The interaction of high-energy charged particles with germanium and silicon]. Moscow: Atomizdat; 1975. Russian.
7. Kozlov VA, Kozlovski VV. [The semiconductor doping with radiation induced defects via proton and α -particle irradiation]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2001;35(7):769–795. Russian.
8. Tokuda Y, Seki T. Interaction of hydrogen with the vacancy-oxygen pair produced in *n*-type silicon by electron irradiation. *Semiconductor Science and Technology*. 2000;15(2):126–129. DOI: 10.1088/0268-1242/15/2/308.
9. Ohmura Y, Takahashi K, Saitoh H, Kon T, Enosawa A. Hydrogenation and passivation of electron-beam-induced defects in *N*-type Si. *Physica B: Condensed Matter*. 1999;273–274:228–230. DOI: 10.1016/S0921-4526(99)00459-7.

Статья поступила в редакцию 19.07.2019.
Received by editorial board 19.07.2019.