

Комплексы собственных точечных дефектов в кремнии, сформированные в результате ионной имплантации ксенона высоких энергий и постимплантационных отжига

© Н.А. Маслова¹, Д.В. Данилов^{1,2}, О.Ф. Вывенко¹, В.А. Скуратов^{3,6,7},
В.А. Володин^{4,5}, А.Е. Калядин², Н.А. Соболев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская область, Россия

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

⁵ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

⁶ Государственный университет „Дубна“,
141982 Дубна, Московская область, Россия

⁷ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия

E-mail: st068118@student.spbu.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 25 июля 2025 г.

Принята к публикации 25 июля 2025 г.

Исследовано пространственное распределение комплексов точечных дефектов по глубине в монокристаллическом кремнии, облученном ионами ксенона с энергией 167 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и отожженном в интервале температур 400–600 °С. Установлено, что по всей глубине области имплантации образуется большое число различных вакансионных комплексов, а на проекционной глубине имплантированных ионов возникает потенциальный барьер для протекания тока. Обнаружено, что высокая интенсивность спектральной линии люминесценции W/W' , соответствующей межузельным комплексам, сохраняется и на глубинах, намного превосходящих проекционную длину, что может быть объяснено участием механизмов ускоренной диффузии собственных дефектов.

Ключевые слова: кремний, ионная имплантация, катодолюминесценция, электронная микроскопия.

DOI: 10.61011/FTP.2025.05.61477.8047

1. Введение

Ионная имплантация активно используется в современной микроэлектронике для модификации электрических и люминесцентных свойств кремния, в том числе благодаря внедрению большого числа радиационных дефектов. В случае высокоэнергетической имплантации тяжелых ионов в пластину кремния удается увеличить область облучения [1,2], что дает возможность применить набор методов электронной микроскопии для исследований глубины залегания, а также распределения сформированных комплексов точечных дефектов. Подобные исследования для МэВ имплантации тяжелых ионов практически отсутствуют. Между тем интерес к процессам генерации собственных точечных дефектов при данных условиях только растет. В недавних работах было показано, что МэВ имплантация ксенона в пластину кремния с последующими отжигами в интервале 400–600 °С ведет к образованию собственных межузельных кластеров — W центров [3]. Данные центры,

обладающие узкой бесфонной линией люминесценции [4], являются одним из основных кандидатов на роль источника кремниевого светодиода в ИК диапазоне. На основе именно этих центров группа американских исследователей из Национального института стандартов и технологий США недавно сделала кремниевый источник ИК излучения и показала его работу в схеме, включающей волновод и однофотонный приемник [5].

2. Методы и материалы

В работе исследовалась пластина кремния n -типа с концентрацией фосфора 10^{15} см^{-3} , которая была облучена ионами Хе с энергией 167 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и после этого подвергнута серии последовательных термических отжигов в вакууме при температурах 400, 500 и 600 °С по одному часу. Согласно TRIM моделированию [6], имплантированные в кремний ионы ксенона с такой энергией сосредоточены в слое толщиной $\sim 3 \text{ мкм}$ на глубине $\sim 20 \text{ мкм}$. Столь большая

глубина проникновения импланта позволила получить новые данные о глубинном распределении возникающих дефектов с помощью исследований набором методов со стандартным пространственным разрешением на косошлифованной и поперечной поверхностях имплантированной пластины.

Для проведения электрофизических измерений на косой шлиф термическим напылением золота были изготовлены диоды Шоттки с диаметром контактного пятна 800 мкм, что при использованном угле косого шлифа 0.5° соответствует разрешению по глубине ~ 7 мкм. Для измерения токов, наведенных электронным пучком (EBIC), на лицевую и тыльную стороны пластины наносились омические контакты путем втирания AlGa эвтектического сплава. Для удаления поврежденного механической обработкой слоя (~ 5 мкм) образцы дополнительно были протравлены в полирующем растворе HF:HNO₃ (1:10).

Электрофизические измерения (вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики — ВФХ, ВАХ) проводились с использованием оборудования Agilent, мультиметра Keithley и спектрометра DLTS SULA Technologies. Измерения катодолуминесценции (КЛ) и EBIC выполнялись на сканирующем электронном микроскопе Zeiss Supra 40 VP и системой Gatan MonoCL 3+, оснащенной InGaAs ПЗС-камерой и охлаждаемым криостолом. Пространственное разрешение этих методов в общем случае определяется размером области генерации электронно-дырочных пар электронным лучом с учетом их диффузионного растекания, которое при использованных ускоряющих напряжениях не превышало нескольких микрон, что вполне достаточно для нашего случая.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1, *a* представлена карта, полученная методом EBIC, при температуре жидкого азота. Измерения проводились в поперечной геометрии с использованием омических контактов, расположенных по отношению к приведенной карте слева на имплантированной (лицевой) и справа — на тыльной поверхности пластины. В приповерхностном слое глубиной до 20 мкм, соответствующей области проникновения импланта, на карте EBIC выделяется темная полоса, отражающая уменьшение протекающего через контакты тока. На глубине ~ 20 мкм происходит резкое изменение контраста на светлый, который, как это видно из профиля абсолютных значений измеряемого тока, приведенного на том же рисунке, соответствует различным его направлениям вблизи поверхности (0–20 мкм) и в объеме (20–40 мкм): направление тока при генерации электронно-дырочных пар между поверхностью и проекционной длиной имплантации (R_p) соответствует движению электронов к лицевой поверхности, при генерации в объеме — в сторону тыльной стороны. Подобное свойство аналогично ранее известному для границ зерен [7], которое

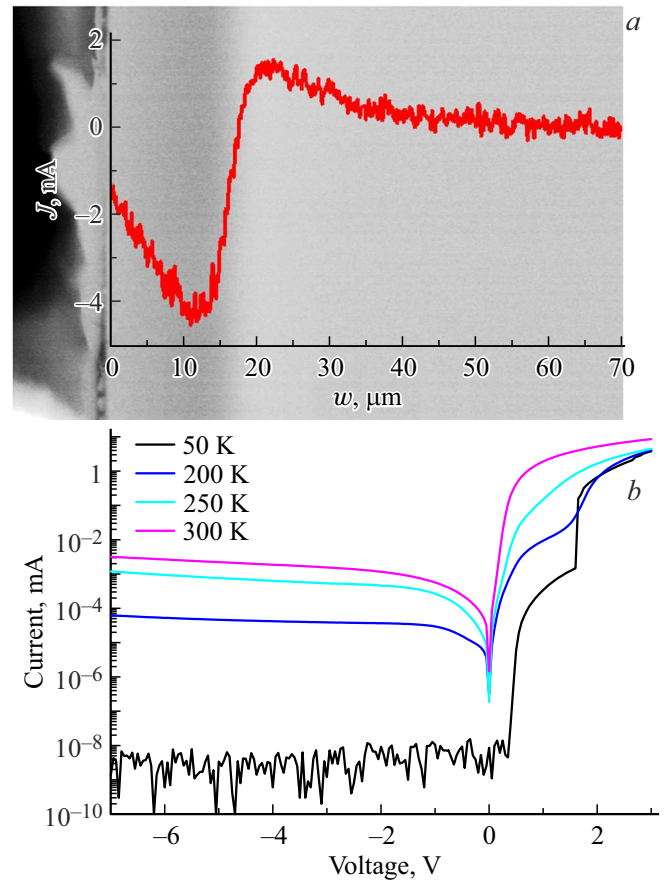


Рис. 1. *a* — EBIC карта приповерхностной области поперечного среза образца с наложенным профилем величины измеряемого тока. *b* — ВАХ образца при температурах 50–300 К.

обусловлено в нашем образце наличием потенциального барьера на глубине 20 мкм. Поскольку примесь ксенона в кремнии электрически неактивна, барьер может быть вызван повреждениями кремниевой решетки в присутствии атомов ксенона.

Наличие указанного барьера также подтверждается результатами исследования вольт-амперных характеристик (рис. 1, *b*) золотого шоттки-контакта, нанесенного на лицевую поверхность пластины. Обратные ветви ВАХ характеризуются насыщением и показывают монотонное увеличение тока с ростом температуры, что объясняется термоэлектронной эмиссией (ТЭЭ) основных носителей через барьер Шоттки.

Наличие указанного барьера также подтверждается результатами исследования вольт-амперных характеристик носителей через барьер основных Шоттки. ВАХ при прямых смещениях и комнатной температуре также близка к ожидаемой из ТЭЭ. Однако при понижении температуры на них проявляется относительно протяженный участок насыщения тока в интервале напряжений ~ 0.5 – 1.5 В, которые указывают на присутствие дополнительного барьера, высота которого стабилизируется заполнением глубоких уровней вблизи уровня

Ферми и который последовательно соединен с барьером Шоттки. В этом случае напряжение начала участка насыщения должно соответствовать условию равенства обоих барьеров, т.е. примерно быть равно удвоенной высоте барьера. Эти предположения хорошо согласуются с оценкой величины барьера из температурной зависимости величины тока на участке насыщения, которая составила ~ 0.3 эВ, а также данными DLTS измерений в условиях заполнения состояний барьера, которые показали интенсивный пик ($E_c - E_t = 0.3$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см²). Дефектами с наиболее близкими эмиссионными параметрами являются дивакансии V_2 (---) [8], скопление которых на глубине R_p ответственно за формирование барьера в области слоя, где расположено большинство атомов импланта. Обнаруженные закономерности указывают на качественное различие механизмов генерации точечных дефектов при МЭВ имплантации в сравнении со стандартными энергиями импланта в сотни кэВ, при которых проекционная глубина имплантации является местом скопления собственных межузельных атомов [2], а не вакансий.

На рис. 2 изображены спектры катодолуминесценции, измеренные при $T = 68$ К на поперечном срезе пластины в точках, отдаленных от поверхности на указанное в легенде расстояние. При облучении кремния электронами с энергией 30 кэВ 90% сигнала КЛ генерируется в пятне диаметром 5 мкм, что было выбрано в качестве минимального шага для профилирования в приповерхностной области. На спектрах КЛ наблюдается пик межзонных переходов кремния Si-TO ~ 1130 нм, а также низкоэнергетичная полоса в интервале от 1200 до 1600 нм, на которой выделяются несколько узких линий. Линия КЛ при 1250 нм по положению близка излучательному переходу с состояний межузельных комплексов W/W' [3]. Профиль распределения ее интенсивности немонотонен по глубине образца, чем отличается от характерного для линии Si-TO, как это видно из рис. 2, b. В области 0–20 мкм интенсивность Si-TO и W/W' линий быстро растет с глубиной. На глубинах 20–40 мкм обе линии показывают более медленный рост, который для линии Si-TO продолжается и на больших глубинах, в то время как интенсивность линии W/W' начинает монотонно падать вглубь образца.

Низкая интенсивность исследуемых линий люминесценции является следствием большого количества вакансионных глубоких уровней (ГУ), обнаруженных DLTS измерениями (A-center [9], V_2 (---) [8], V_2 (-/0) [10]). Данные комплексы являются по большей части центрами безызлучательной рекомбинации. Вне области имплантации на глубине ~ 40 мкм данных ГУ обнаружено не было, однако присутствовал пик (0.1 эВ/ $1 \cdot 10^{-16}$ см²), соответствующий SiCs-комплексам, которые являются характерным признаком формирования комплексов собственных междоузлий [9]. Это согласуется с результатами КЛ, показавшими превышение интенсивности линии W/W' на глубине 40 мкм на 20% по сравнению с ее интенсивностью на глубине R_p . Объяснить наблюдаемое

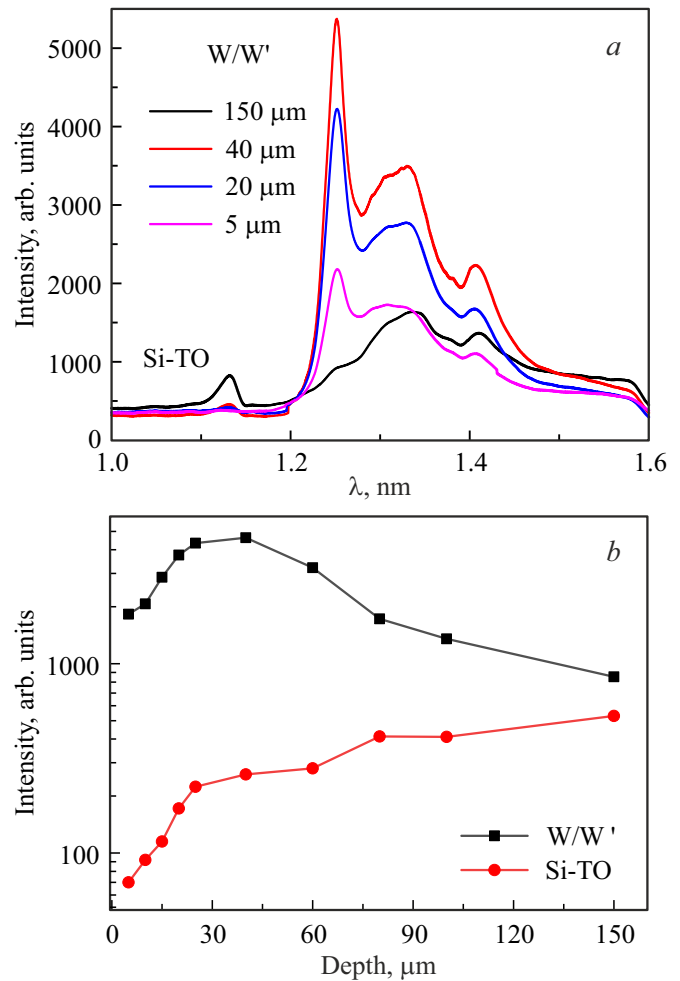


Рис. 2. *a* — спектры КЛ, измеренные при 68 К в поперечной геометрии в выбранных точках на расстоянии (5–150 мкм) от поверхности имплантации. *b* — профиль распределения интенсивности выбранных линий КЛ в зависимости от расстояния до поверхности имплантации.

смещение максимума люминесценции данной линии на удвоенную глубину имплантации можно уменьшением числа безызлучательных центров рекомбинации в этой области, о чем свидетельствует одинаковый рост интенсивности линий W/W' и Si-TO на глубинах от 20 до 40 мкм. Это коррелирует с более ранними результатами EBIC и DLTS, показавшими, что причиной барьера на глубине 20 мкм являются акцепторные состояния дивакансий, которые являются центрами безызлучательной рекомбинации.

Уникальным результатом данной работы является тот экспериментальный факт, что ненулевая интенсивность линии W/W' наблюдается даже на глубине 150 мкм (рис. 2, a), что почти на порядок превышает проекционную глубину имплантации. Настолько большая глубина залегания не может быть объяснена только особенностями процесса МЭВ имплантации, а значит, неотъемлемо связана с последующими условиями термообработки.

Многоступенчатые условия термообработки, а также используемые температуры указывают на то, что аномально глубокое залегание данных центров может быть следствием участия механизмов ускоренной диффузии, предполагающих движение не отдельных межузельных атомов, а целых комплексов с участием данных атомов [11,12].

4. Заключение

В работе проведено комплексное исследование распределения радиационных дефектов в кремнии, облученном ионами ксенона с энергией 167 МэВ и последующим термическим отжигом. Исследованиями электрофизических характеристик, а также ЕВІС измерениями установлено наличие комплексов вакансионной природы внутри области имплантации, а также потенциального барьера 0.3 эВ на глубине ~ 20 мкм, соответствующей глубине залегания имплантированных ионов ксенона. Измерения катодолюминесценции (КЛ) на поперечном срезе показали помимо падения интенсивности люминесценции в области имплантации, вызванного большим числом ГУ вакансионных комплексов, аномально большую глубину залегания комплексов междоузлий, ответственных за W/W' линию КЛ. На основании полученных результатов сделано предположение о возможном участии механизмов ускоренной диффузии в распределении данных центров по глубине.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР: 125021702335-5.

Благодарности

Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования Междисциплинарного ресурсного центра по направлению „Нанотехнологии“ Научного парка СПбГУ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ф.Ф. Комаров. Успехи физ. наук, **173** (12), 1287 (2003). DOI: 10.3367/UFNr.0173.200312b.1287
- [2] I. Danilov, H. Boudinov, J.P. de Souza, Yu.N. Drozdov. J. Appl. Phys., **97** (7), 076106 (2005). DOI: 10.1063/1.1886269
- [3] С.Г. Черкова, В.А. Скуратов, В.А. Володин. ФТП, **53** (11), 1467 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.11.48441.9142
- [4] J. Bao, M. Tabbal, T. Kim, S. Chamvanichborikam, A. Kohno, M.J. Aziz. Opt. Express, **15** (11), 6727 (2007). DOI: 10.1364/OE.15.006727

- [5] S. Buckley, J. Chiles, A.N. McCaughan, G. Moody, K.L. Silverman, M.J. Stevens, R.P. Mirin, S.W. Nam, J.M. Shainline. Appl. Phys. Lett., **111** (14), 141101 (2017). DOI: 10.1063/1.4994692
- [6] <http://www.srim.org>
- [7] D.B. Holt, B. Raza, A. Wojcik. Mater. Sci. Eng. B, **42** (1–3), 14 (1996). DOI: 10.1016/S0921-5107(96)01678-9
- [8] B.G. Svensson, C. Jagodish, A. Hallen, J. Lalita. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **106** (1–4), 183 (1995). DOI: 10.1016/J.NIMA.2008.05.046
- [9] S. Libertino, A. La Magna. *Materials science with ion beams* (Berlin–Heidelberg, Springer Berlin–Heidelberg, 2009) p. 147.
- [10] A.V. Vasilev, S.A. Smagulova, S.S. Shaymeev. Sov. Phys. Semicond., **16**, 1229 (1982).
- [11] N. Cowern, C. Rafferty. MRS Bulletin, **25** (6), 39 (2000). DOI: 10.1557/mrs2000.97
- [12] R.C. Newman. J. Phys.: Condens. Matter, **12** (25), R335 (2000). DOI: 10.1088/0953-8984/12/25/201

Редактор Г.А. Оганесян

Complexes of intrinsic point defects in silicon formed as a result of high-energy xenon ion implantation and post-implantation annealing

N.A. Maslova¹, D.V. Danilov^{1,2}, O.F. Vyvenko¹, V.A. Skuratov^{3,6,7}, V.A. Volodin^{4,5}, A.E. Kalyadin², N.A. Sobolev²

¹ St. Petersburg State University, 199034 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

³ The Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow region, Russia

⁴ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

⁵ Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

⁶ Dubna State University, 141982 Dubna, Moscow region, Russia

⁷ National Research Nuclear University „MEPhI“, 115409 Moscow, Russia

Abstract Investigated the depth distribution of point defect complexes in single-crystal silicon irradiated with 167 MeV xenon ions at a dose of $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and annealed in the temperature range of 400–600 °C. We show the formation of a large number of vacancy complexes throughout the implantation region, as well as the presence of a potential barrier at the projection implantation depth. Profiling of the luminescent signal across the wafer depth showed an anomalously large depth of the W/W' line corresponding to interstitial complexes, which is explained by the participation of accelerated diffusion mechanisms in the formation of the distribution of this type of defects.