

УДК 539.25, 537.533.35

Высокодозная имплантация ионов гелия малой энергией

© 2025 г. С. Г. Шемардов¹, А. В. Беклемишева¹, П. А. Александров¹, А. Л. Васильев^{1,2},
В. Н. Беклемишев^{1,3}

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, 123182, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет), Московская область, г. Долгопрудный, 141701, Россия

³ Государственный университет управления, Москва, 109542, Россия

Рассматривается вопрос высокодозной имплантации ионов гелия малой энергии (24 кэВ). В этом случае средний проецируемый пробег находится на глубине 20–30 нм от поверхности образца. Имплантация ионов гелия в кремний весьма привлекательна для создания захороненных пористых слоев в кремнии при последующем высокотемпературном отжиге. Естественным способом увеличения пористости захороненного слоя является увеличение дозы имплантации. Однако этому препятствуют радиационные повреждения поверхностного кремния (блистеринг и флехинг), приводящие к невозможности создания в последнем электронных приборов. Поскольку при уменьшении энергии имплантации имплантационный профиль внедренных ионов гелия приближается к поверхности подложки, то возрастает доля вакансий и слабосвязанных приповерхностных атомов, влияющих на протекание диффузионных процессов и значительно изменяются прочностные характеристики поверхностного слоя, включающего в себя пористый слой. Появляется возможность имплантировать значительно большие дозы ионов гелия без механических нарушений поверхностного кремния. В работе представлены результаты исследования захороненного пористого слоя после имплантации дозы $1.75 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$ при энергии 24 кэВ и последующего высокотемпературного отжига при температуре 1150 °С в течение 30 мин. Огромные поры диаметром 120–170 нм возникают в области первоначального концентрационного максимума. Пористость этого слоя достигает 50 %.

Ключевые слова: имплантации ионов гелия, монокристаллические пластины кремния, докритическая доза имплантации, КНИ, захороненные слои высокой пористости.

Введение

Использование имплантации ионов гелия и последующего высокотемпературного отжига является очень привлекательным методом создания пористых слоев в монокристаллическом кремнии. Однако имплантации больших доз ионов гелия препятствуют радиационные повреждения поверхностного кремния – блистеринг (вспучивание) и флехинг (отшелушивание) [1].

Следует предположить, что максимальная доза имплантации, при которой не наблюдаются механические повреждения поверхностного кремния (критическая доза имплантации) зависит от многих факторов, включающих условия имплантации (температура имплантации, плотность ионного тока и т.д.). Однако, по-видимому, основным фактором, влияющим на величину критической дозы имплантации, является энергия ионов. Именно она определяет удаление концентрационного профиля внедренных ионов гелия от поверхности. При приближении к поверхности значительно возрастает

✉ А. В. Беклемишева: annabekl@ya.ru

Поступила в редакцию: 02.09.2025

После доработки: 22.09.2025

Принята к публикации: 07.10.2025

EDN RXPWRH

доля вакансий и приповерхностных слабосвязанных атомов, изменяется протекание диффузионных процессов, значительно изменяются прочностные характеристики материала. Вследствие этого при малых энергиях появляется возможность имплантировать значительно большие дозы ионов гелия и тем самым синтезировать захороненные слои высокой пористости. По данным работы [2] для энергии 20 кэВ критическая доза имплантации приближается к величине $4 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$. В противовес этому при имплантации энергией 33 кэВ авторы наблюдали блистеринг для значительно меньшей дозы – $2 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$. [3] Поэтому для увеличения внедренной дозы ионов гелия для энергий имплантации 40–50 кэВ и выше необходима разработка специальных методов [4]. Данная статья посвящена возможности формирования пористого слоя в кремнии в процессе высокотемпературного отжига, имплантированного большой дозой ионов гелия монокристаллического кремния при относительно малой энергии, когда внедренные ионы располагаются в непосредственной близости от поверхности кремниевой пластины.

Оборудование и методика эксперимента

Облучение кремниевой пластины (100) ионами гелия было проведено на установке ИЛУ-100. Вследствие нагрева пучком температура имплантации была около 150 °С. Энергия имплантации 24 кэВ, внедренная доза $1.75 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$. Образец отжигался при температуре 1150 °С в воздушной среде в течение 30 мин. Подготовка поперечных срезов для исследований методом просвечивающей микроскопии (ПЭМ) осуществлялась с помощью фокусированного ионного пучка в растровом электронно-ионном микроскопе HeliosNanoLab™600i. Полученные поперечные срезы были ориентированы параллельно плоскостям {110} Si. Исследование поперечных срезов было проведено на микроскопе Osiris.

Экспериментальные результаты

Механизмы формирования в кремнии газовых пузырьков при имплантации ионов гелия и их трансформации в поры (пустоты) при последующем отжиге подробно изложены в предыдущих наших работах [1, 4, 5]. Однако увеличение пористости захороненного слоя упирается, как уже упоминалось ранее, в проблему механических повреждений поверхностного кремниевого слоя при превышении определенной величины внедренной дозы. Как один из способов решения этой проблемы нами был предложен метод исследовательских докритических имплантаций и отжигов. Для энергии 50 кэВ величина критической дозы имплантации по нашим результатам находится около $1.2 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$. Уменьшение энергии имплантации значительно увеличивают это значение. На рис. 1 представлен поперечный срез образца, имплантированного энергией 24 кэВ, с внедренной дозой $1.75 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$ после отжига 1150 °С/30 мин на воздухе. В образце наблюдаются крупные поры, имеющие практически сферическую форму диаметром ~ 120–170 нм от границы окисного слоя. Если принять во внимание толщину окисного слоя, то расположение пор совпадает с первоначальным концентрационным максимумом внедренных ионов гелия. Пористость этого слоя достигает 50 %. Следует отметить полное отсутствие пор ниже 170 нм от границы окисного слоя. В области между крупными порами и окисным слоем сохраняется небольшое количество мелких пор диаметром ~ 25 нм. В работе [2] при имплантации ионов гелия энергией 20 кэВ дозой $2.5 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$ было выявлено наличие аморфной области и было предложено, что образование больших газовых пузырьков связано с процессом рекристаллизации аморфной области – в то время в менее поврежденных областях происходит миграция и коалесценция газовых пузырьков.

Поскольку авторы использовали низкотемпературный отжиг 650 °С, то они говорят о перераспределении газовых пузырьков. Выход гелия из газовых пузырьков наблюдается при температурах выше 800 °С [6]. В работе [7] авторы наблюдали смещение гелиевых пузырьков при прохождении фронта рекристаллизации аморфной области. В [8] показано, что при рекристаллизации сильно поврежденного кремния движущаяся граница раздела между поврежденным и неповрежденным кремнием «выталкивает» гелий, вакансии и гелиевые пузырьки.

Возвращаясь к нашим результатам, можно утверждать, что при дозе имплантации $1.75 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$ также возникает сильно дефектная и аморфная область, расположенная ниже среднего проецируемого пробега ионов. Во время отжига при температурах 550–650 °С происходит рекристаллизация поврежденной и аморфной области, и фронт рекристаллизации выталкивает гелий, вакансии и гелиевые

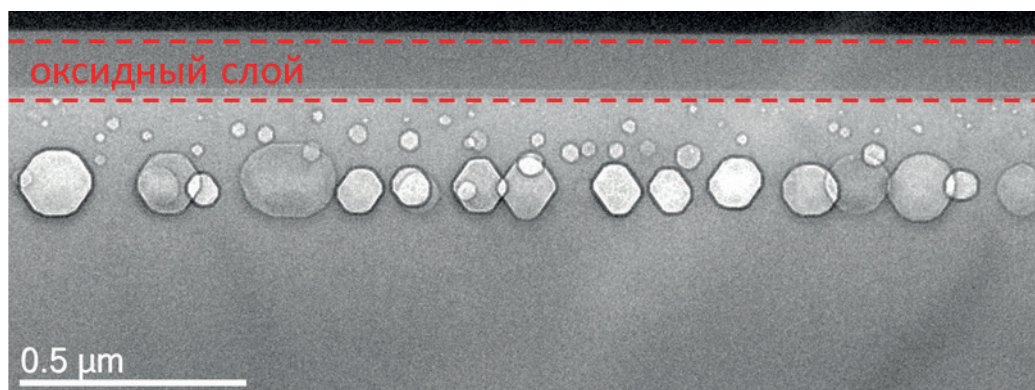


Рис. 1. Поперечный срез образца, исследованного методом ПЭМ, после высокотемпературного отжига 1150 °С за 30 мин, энергия имплантации 24 кэВ, внедренная доза $1.75 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$

пузырьки из глубины кристалла в зону первоначального концентрационного максимума, при более высоких температурах процессы миграции и коалесценции, а также выход гелия из газовых пузырьков приводят к наблюдаемой нами картине распределения пор (пустот) в кремнии.

Выводы

Таким образом, имплантация ионов гелия при малых энергиях позволяет значительно увеличить внедренную дозу ионов, и тем самым после высокотемпературного отжига получить захоронения пористых слоев чрезвычайно высокой пористости (50 % и выше). Подавляющее большинство пустот располагается на одной глубине вблизи среднего проецируемого пробега. Для дозы $1.75 \cdot 10^{17} \text{ He}^+/\text{см}^2$ и температуре отжига 1150 °С средний диаметр пор составляет 120 нм. Увеличение дозы имплантации приведет к еще большему диаметру пор и их частичной коалесценции. Однако даже при такой относительно высокой температуре отжига 1150 °С сохраняется значительное количество пор диаметром около 25 нм, расположенных в приповерхностном слое. Их исчезновение следует ожидать при более высоких температурах отжига. Если рассматривать трансформации пористого слоя в захороненный окисный слой, используя «внутреннее окисление» при высоких температурах [9], малые энергии имплантации не позволяют получить рабочий поверхностный кремниевый слой толщиной 100 нм и выше.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» НИОКР Центра «Разработка новых имплантационных методов получения диэлектрических промежуточных слоев в полупроводниковых подложках для систем управления термоядерных установок» (приказ № 25 от 9 января 2025 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов

С.Г. Шемардов – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования, разработка концепции исследования, разработка методик измерения, участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

А.В. Беклемишева – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования, разработка концепции исследования, разработка методик измерения, анализ нормативной базы.

П.А. Александров – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования, разработка концепции исследования, разработка методик измерения, участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

А.Л. Васильев – микроскопия образцов, разработка концепции исследования, разработка методик измерения, анализ нормативной базы.

В.Н. Беклемишев – анализ нормативной базы, постановка эксперимента, выполнение экспериментальных работ, обработка результатов, проведение численных расчетов.

Список литературы

1. Александров П.А., Емельяненко О.Е., Шемардов С.Г., Хмеленин Д.Н., Васильев А.Л. Проблемы высокодозной ионной имплантации ионов гелия в кремний // Кристаллография, 2024. Т. 69. № 3. С. 494–504.
2. Siegele R., Weatherly G.C., Haugen H.K. Visible photoluminescence from helium-ion implanted carbon in silicon // Applied Physics Letters, 1995. V. 78 (10). С. 6185–6188. DOI: 10.1063/1.115275.
3. Чесноков Ю.М., Александров П.А., Белова Н.Е. Исследование микроструктуры слоев кремния-на-сапфире после имплантации He^+ и последующей термообработки // Кристаллография, 2017. Т. 62. № 4. С. 613–617.
4. Александров П.А., Демаков К.Д., Шемардов С.Г., Белова Н.Е. Применение ионной имплантации для модификации эпитаксиальных систем кремний-на-сапфире, их структура и свойства // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017. Т. 8. С. 5–16.
5. С.Г. Шемардов, В.Н. Беклемишев, П.А. Александров и др. Полиэнергетическая имплантация ионов гелия в кремний // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2025. Т. 14. № 5. С. 452–456.
6. Rudenko T.E., Nazarov A.N., Lysenko V.S. The advancement of silicon-on-insulator (SOI) devices and their basic properties // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2020. V. 23. № 3. P. 227–252.
7. Griffioen C.C., Evans J.H., de Jong P.C. The annealing of helium-induced cavities in silicon and the inhibiting role of oxygen // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1987. V. 27(3). P. 360–363.
8. Beaufort M.F., Pizzagalli L., Gandy A.S. Solid-phase epitaxial regrowth of amorphous silicon containing helium bubbles // Journal of Applied Physics, 2008. V. 104. Art. number 094905. DOI: 10.1063/1.3009383.
9. Donnelly S.E., Vishnyakov V.M., Carter G. et al. The use of cavities for gettering in silicon microelectronic devices // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003. V. 206(7). P. 422–426.
10. Ogura A. Formation of patterned buried insulating layer in Si substrates by He^+ implantation and annealing in oxidation atmosphere // Applied Physics Letters, 2003. V. 82(25). P. 4480–4482. DOI: 10.1063/1.1586783.
11. Evans J.H. Mechanisms of void coarsening in helium implanted silicon // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002. V. 196(1–2). P. 125–134.
12. Hasanuzzaman M., Haddara Y.M., Knights A.P. A mathematical model for void evolution in silicon by helium implantation and subsequent annealing process // Journal of Applied Physics, 2012. V. 112. № 6. P. 064302–064312. DOI: 10.1063/1.4751437.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 6, pp. 553–557

High-dose implantation of low-energy helium ions

S. G. Shemardov¹, A. V. Beklemisheva^{1,✉}, P. A. Alexandrov¹, A. L. Vasiliev^{1,2}, V. N. Beklemishev^{1,3}

¹ National Research Center «Kurchatov Institute», sq. Academician Kurchatova, 1, Moscow, 123182, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³ State University of Management, Moscow, 109542, Russia

✉ annabekl@ya.ru

Received September 02, 2025; revised September 22, 2025; accepted October 07, 2025

The issue of high-dose implantation of low-energy helium ions (24 keV) is being considered. In this case, the average projected range is at a depth of 20–30 nm from the sample surface. Implantation of helium ions into silicon is very attractive for creating buried porous layers in silicon during subsequent high-temperature annealing. A natural way to increase the porosity of the buried layer is to increase

the implantation dose. However, this is hindered by radiation damage to the surface silicon (blistering and flecking), which makes it impossible to create electronic devices in the latter. As the implantation energy decreases, the implantation profile of embedded helium ions approaches the surface of the substrate, the proportion of vacancies and loosely bound near-surface atoms increases, affecting the course of diffusion processes, and the strength characteristics of the surface layer, including the porous layer, significantly change. It becomes possible to implant significantly higher doses of helium ions without mechanical damage to the surface silicon. The paper presents the results of a study of a buried porous layer after implantation of a dose of $1.75 \cdot 10^{17}$ He⁺/cm² at an energy of 24 keV and subsequent high-temperature annealing at a temperature of 1150 °C for 30 minutes. Huge pores with a diameter of 120–170 nm appear in the area of the initial concentration maximum. The porosity of this layer reaches 50 %.

Keywords: helium ion implantation, single-crystal silicon wafers, subcritical implantation dose, buried high-porosity layers.

References

1. Alexandrov P.A., Emelianenko O.E., Shemardov S.G., Khmelenin D.N., Vasilyev A.L. Problemy vysokodoznoj ionnoj implantacii ionov geliya v kremnij [Problems of High-Dose Ion Implantation of Helium Ions into Silicon]. *Kristallografiya*, 2024. Vol. 69. No. 3. Pp. 494–504. DOI: 10.31857/S0023476124030155 (in Russian).
2. Siegele R., Weatherly G.C., Haugen H.K. Visible photoluminescence from helium-ion implanted carbon in silicon. *Applied Physics Letters*, 1995. Vol. 78(10). Pp. 6185–6188. DOI: 10.1063/1.115275.
3. Chesnokov Yu.M., Aleksandrov P.A., Belova N.E. Issledovanie mikrostruktury sloev kremniya-na-sapfire posle implantacii He⁺ i posleduyushchej termooobrabotki [Study of the microstructure of silicon-on-sapphire layers after He⁺ implantation and subsequent heat treatment]. *Crystallography*, 2017, Vol. 62 (4). Pp. 613–617 (in Russian).
4. Aleksandrov P.A., Demakov K.D., Shemarov S.G., Belova N.E. Primenenie ionnoj implantacii dlya modifikacii epitaksial'nyh sistem kremnij-na-sapfire, ih struktura i svoystva [Application of ion implantation for modification of epitaxial silicon-on-sapphire systems, their structure and properties]. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya*, 2017. Vol. 8. Pp. 5–16 (in Russian).
5. Shemardov S.G., Beklemishev V.N., Aleksandrov P.A., et al. [Polyenergetic implantation of helium ions into silicon]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2025. Vol. 14. No. 5. Pp. 452–456 (in Russian).
6. Rudenko T.E., Nazarov A.N., Lysenko V.S. The advancement of silicon-on-insulator (SOI) devices and their basic properties. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2020. Vol. 23. № 3. Pp. 227–252.
7. Griffioen C.C., Evans J.H., de Jong P.C. The annealing of helium-induced cavities in silicon and the inhibiting role of oxygen. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1987. Vol. 27(3). Pp. 360–363.
8. Beaufort M.F., Pizzagalli L., Gandy A.S. Solid-phase epitaxial regrowth of amorphous silicon containing helium bubbles. *Journal of Applied Physics*, 2008, Vol. 104. Art. number 094905. DOI: 10.1063/1.3009383.
9. Donnelly S.E., Vishnyakov V.M., Carter G. et al. The use of cavities for gettering in silicon microelectronic devices. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003. Vol. 206(7). Pp. 422–426.
10. Ogura A. Formation of patterned buried insulating layer in Si substrates by He⁺ implantation and annealing in oxidation atmosphere. *Applied Physics Letters*, 2003. Vol. 82(25). Pp. 4480–4482. DOI: 10.1063/1.1586783.
11. Evans J.H. Mechanisms of void coarsening in helium implanted silicon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002. Vol. 196(1–2). Pp. 125–134.
12. Hasanuzzaman M., Haddara Y. M., Knights A.P. A mathematical model for void evolution in silicon by helium implantation and subsequent annealing process. *Journal of Applied Physics*, 2012. Vol. 112. No. 6. Pp. 064302–064312. DOI: 10.1063/1.4751437.