

УДК 539.25, 537.533.35

Полиэнергетическая имплантация ионов гелия в кремний

© 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», г. Москва, 123182, Россия

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

³ Государственный университет управления, г. Москва, Рязанский пр-т, д. 99, 109542, Россия

В работе исследован метод полиэнергетической имплантации ионов гелия в монокристаллический кремний с целью формирования захороненных слоев высокой пористости, перспективных для создания структур типа «кремний на изоляторе». Создание захороненных пористых слоев имплантацией ионов гелия и последующего высокотемпературного отжига весьма перспективно для дальнейшего получения структур «кремний ни на чем» и «кремний на изоляторе». Однако пористость захороненных слоев ограничивают явления блистеринга и флекинга, вызывающие механические повреждения поверхностного кремния при больших дозах имплантации. Цель данной работы – увеличение дозы имплантации ионов гелия и, соответственно, повышение пористости захороненного слоя после высокотемпературного отжига без ухудшения качества поверхностного кремниевого слоя. Представлен метод, заключающийся в создании протяженного концентрационного профиля с концентрацией $4 \cdot 10^{21}$ He⁺/см³ при последовательной имплантации энергиями 70 и 35 кэВ. Высокотемпературный отжиг 150 °С/30 мин приводит к возникновению огромных пор диаметром примерно 130 нм вблизи первоначального концентрационного максимума для энергии 70 кэВ. Сделан вывод о том, что метод полиэнергетической имплантации позволяет существенно повысить дозу имплантации без возникновения поверхностных дефектов, а регулирование температуры отжига открывает возможности управления распределением и размером пор в захороненном слое.

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

Введение

Имплантация ионов гелия в кремний с целью получения захороненных пористых слоев уже длительное время привлекает внимание исследователей, причем подавляющее большинство работ посвящено облучению малыми и средними дозами [1–4], и значительно меньше исследований посвящено имплантации больших доз ($> 10^{17}$ He⁺/см²) [5–7], хотя эта область чрезвычайно перспективна для получения структур «кремний ни на чем» (silicon on nothing) и «кремний на изоляторе» (КНИ).

Постановка задачи

В предыдущих наших работах [5] отмечалось, что серьезными проблемами, которые возникают в случае имплантации больших доз, являются механические повреждения поверхностного кремниевого слоя – блистеринг (вспучивание) и флекинг (шелушение). Причем это наиболее актуально для

✉ А. В. Беклемишева: annabekl@ya.ru

Поступила в редакцию: 08.08.2025

После доработки: 22.09.2025

Принята к публикации: 23.09.2025

EDN YATPCV

энергий более 40 кэВ, когда критическая доза имплантации (доза, при которой при последующем отжиге не наблюдаются блистеринг и флекинг) немного превышает $1 \cdot 10^{17}$ $\text{He}^+/\text{см}^2$. В этом случае необходима разработка специальных методов имплантации и отжига. Одни из них – метод докритических имплантаций и отжигов. Суть метода заключается в том, что процессы облучения и отжига разбиты на циклы. Цикл состоит из имплантации дозы, меньше критической, и отжига при температуре более 800 °С для удаления гелия из газовых пузырьков и образования пор (пустот). Затем цикл повторяется. Количество циклов определяет пористость захороненного слоя.

В настоящей работе рассматривается метод высокодозной имплантации ионов гелия в кремний, разработанный авторами, – полиэнергетическая имплантация. Для энергий имплантации 50–70 кэВ критическая доза имплантаций превышает $1 \cdot 10^{17}$ $\text{He}^+/\text{см}^2$, а для энергии 33 кэВ она составляет $2 \cdot 10^{17}$ $\text{He}^+/\text{см}^2$. Для энергии 70 кэВ концентрация в максимуме распределения составляет $4 \cdot 10^{21}$ $\text{He}^+/\text{см}^3$. Поскольку возникающие при данной концентрации напряжения при перераспределении гелиевых пузырьков не приводят к блистерингу и флекингу при отжиге, авторы предположили, что создание протяженного профиля с постоянной докритической концентрацией ($< 4 \cdot 10^{21}$ $\text{He}^+/\text{см}^3$) не должно вызывать механических повреждений в поверхностном кремнии. Этот результат может быть получен при последовательной имплантации 70 кэВ ($1 \cdot 10^{17}$ $\text{He}^+/\text{см}^2$) и 35 кэВ ($0.9 \cdot 10^{17}$ $\text{He}^+/\text{см}^2$).

Результаты распределения пор в кремнии, возникающие при отжиге после имплантации, проведенной в режимах, приведены далее.

Оборудование и методика эксперимента

Кремниевые пластины (100) облучались ионами гелия на установке ИЛУ-100. Температура имплантации была около 150 °С. Внедрение ионов производилось двумя энергиями 70 и 35 кэВ дозами $1 \cdot 10^{17}$ и $0.9 \cdot 10^{17}$ $\text{He}^+/\text{см}^2$, соответственно, что приводило к созданию протяженного профиля гелия с постоянной концентрацией около $4 \cdot 10^{21}$ $\text{He}^+/\text{см}^3$. Отжиг образца осуществлялся при температуре 1150°/30 мин в воздушной среде.

Исследование поперечных срезов монокристаллического кремния после ионной имплантации и отжига проводим методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Подготовку срезов осуществляли с помощью фокусированного ионного пучка в растровом электронно-ионном микроскопе HeliosNanjLab™600i (Thermo Fisher Scientific, США). Полученные поперечные срезы были ориентированы параллельно плоскостям {110} Si. Исследование срезов осуществляли методом ПЭМ на микроскопе Osiris (Thermo Fisher Scientific, США).

Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведен поперечный срез образца, имплантированного в режиме, параметры которого приведены выше, и отожженного при температуре 1150°/30 мин в воздушной атмосфере. Огромные

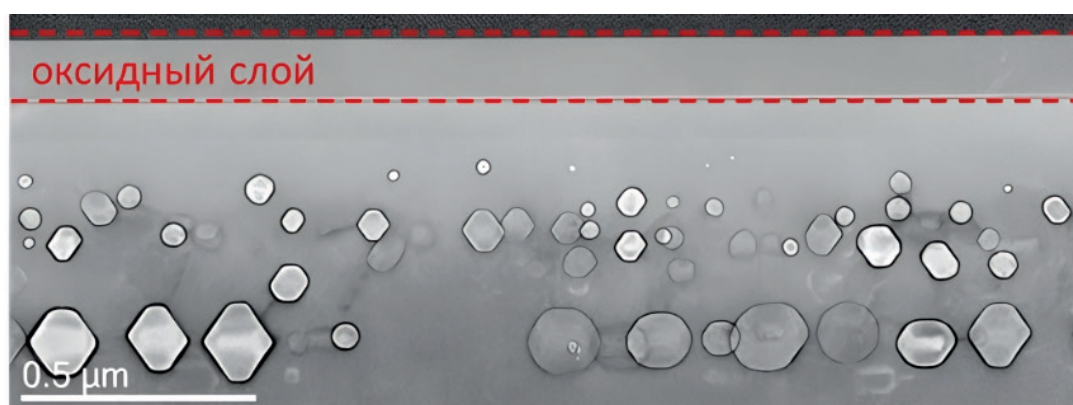


Рис. 1. ПЭМ снимки распределения пор в кремнии, возникающих при отжиге при температуре 1150 °/30 мин в воздушной атмосфере

поры размером до 130 нм расположены в зоне от 420 до 580 нм от нижней границы окисного слоя. Поры полностью отсутствуют в глубине кристалла ниже 580 нм от границы окисного слоя и в зоне 150 нм от него. Между зоной, свободной от преципитатов, и слоем, содержащим огромные преципитаты, расположена область содержащая относительно небольшое количество пор диаметром 80 нм и меньше. Чтобы объяснить наблюдаемую картину распределения, необходимо вернуться к первоначальному распределению имплантируемых ионов. В результате имплантации ионов гелия энергиями 70 и 35 кэВ формируется область постоянной концентрации He^+ от 350 до 550 нм, эти точки соответствуют максимуму концентрации ионов гелия для 35 и 70 кэВ, соответственно. От поверхности до 350 нм и от 550 до 800 нм расположены зоны, где концентрация гелия меняется от нуля до $4 \cdot 10^{21} \text{ He}^+/\text{см}^3$. Если учитывать образование поверхностного окисла, то зона крупных пор совпадает с первоначальным концентрационным максимумом для энергии 70 кэВ, а небольшие поры группируются около концентрационного максимума для энергии 30 кэВ. Отжиг имплантированного образца приводит к резкому перераспределению гелия и гелиевых пузырьков. Полностью исчезает нижняя переходная область от 550 до 800 нм. Аналогичная картина наблюдалась при имплантации ионов гелия энергией 50 кэВ дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ He}/\text{см}^2$ [5, 9]. Возможное объяснение наблюдаемого явления заключается в том, что в концентрационный максимум с напряжениями, близкими к пределу прочности, и большой концентрацией микропузырьков гелия является барьером для диффундирующих гелия и точечных дефектов, приводя к созданию в нижней переходной области сильнодефектного кремния. При температуре рекристаллизации (550–600 °С) происходит выдавливание гелия и гелиевых пузырьков из глубины кристалла к первоначальному концентрационному максимуму и образованию огромных гелиевых пузырьков. Вытеснение гелия, вакансий и гелиевых пузырьков при рекристаллизации сильно поврежденной и аморфной области отмечали многие исследователи [6, 8, 9].

В верхней переходной области близость поверхности является стоком для диффундирующего гелия и точечных дефектов и в ней, как и в области постоянной концентрации, при низких температурах отжига наблюдается небольшой рост газовых пузырьков до 10–15 нм.

При температурах свыше 800 °С начинается активный выход гелия из пузырьков и активируются процессы миграции и коалесценции. Зона огромных газовых пузырьков трансформируется в огромные поры, являющиеся эффективным местом стока для более мелких пор.

Таким образом, после отжига 1150 °С формируется зона огромных пор размером до 130 нм в зоне первоначального концентрационного максимума для энергии 70 кэВ, и лишь значительно меньшее количество мелких пор диаметром около 50 нм остается вблизи первоначального концентрационного максимума для энергии 35 кэВ.

Выводы

Метод полиэнергетической имплантации, при котором последовательной имплантацией ионов гелия двумя энергиями (70 и 35 кэВ) создается постоянный протяженный докритический концентрационный профиль гелия ($4 \cdot 10^{21} \text{ He}^+/\text{см}^3$), позволяет значительно увеличить внедренную дозу ионов без явлений блистеринга и флекинга при последующем отжиге. Концентрационный максимум большей энергии имплантации есть центр сосредоточений огромных пор размером ~ 130 нм. В области протяженного концентрационного профиля остаются еще поры меньшего размера 50–70 нм, в основном вблизи концентрационного максимума меньшей энергии (35 кэВ). Увеличение температуры отжига до 1300–1350 °С возможно приведет к сосредоточению всех пор в зоне концентрационного максимума большей энергии имплантации.

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. *Raineri V., Fallica P.G., Percolla G.* Gettering of metals by voids in silicon // *Journal of Applied Physics*, 1995. V.78. Iss.6. P. 3727–3735.
2. *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. Iss. 3. P. 360–363.
3. *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.
4. *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.
5. *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. DOI: 10.31857/S0023476124030155.
6. *Lockwood D.J., Labbé H.J., Siegele R., Haugen H.K.* Visible photoluminescence from helium-ion implanted carbon in silicon // *Applied Physics Letters*, 1995. V. 78 (10). P. 6185–6188.
7. *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.
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. Iss. 9. Art. number 094905. DOI: 10.1063/1.3009383.
9. *Vishnyakov V.M., Donnelly S.E., Carter G.* The use of cavities for gettering in silicon microelectronic devices // *Journal of Applied Physics*, 2003. V. 94. P. 422–426.

Poly-energy implantation of helium ions into silicon

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),
Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³ State University of Management, Moscow, Ryazansky Prospekt, 99, 109542, Russia

✉ annabekl@ya.ru

Received August 08, 2025; revised September 22, 2025; accepted September 23, 2025

The method of polyenergetic implantation of helium ions into single-crystal silicon was investigated in order to form buried layers of high porosity, promising for creating structures of the “silicon-on-insulator” type. The creation of buried porous layers by implantation of helium ions and subsequent high-temperature annealing is very promising for further obtaining silicon-on-nothing and silicon-on-insulator structures. However, the porosity of the buried layers is limited by the blistering and flecking phenomena, which cause mechanical damage to the surface silicon at high implantation doses. The purpose of this work is to increase the helium ion implantation dose and, accordingly, increase the porosity of the buried layer after high-temperature annealing without deteriorating the quality of the surface silicon layer. We present a method consisting in creating an extended concentration profile with a concentration of $4 \cdot 10^{21}$ He⁺/cm³ with sequential implantation with energies of 70 and 35 keV. High-temperature annealing at 150 °C/30 min leads to the formation of huge pores with a diameter of approximately 130 nm near the initial concentration maximum for the energy of 70 keV. It is concluded that the polyenergetic implantation method allows a significant increase in the implanted dose without the occurrence of surface defects, and the regulation of the annealing temperature opens up possibilities for controlling the distribution and size of pores in the buried layer.

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

References

1. Raineri V., Fallica P.G., Percolla G. Gettering of metals by voids in silicon. *Journal of Applied Physics*, 1995. Vol. 78. Iss. 6. Pp. 3727–3735.
2. 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. Iss 3. Pp. 360–363.
3. 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.
4. 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.
5. 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).
6. Lockwood D.J., Labbé H.J., Siegle R., Haugen H.K. Visible photoluminescence from helium-ion implanted carbon in silicon. *Applied Physics Letters*, 1995. Vol. 78 (10). Pp. 6185–6188A.
7. 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.
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. Iss. 9. Art. number 094905. DOI:10.1063/1.3009383.
9. Vishnyakov V.M., Donnelly S.E., Carter G. The use of cavities for gettering in silicon microelectronic devices. *Journal of Applied Physics*, 2003. Vol. 94. Pp. 422–426.