Пористые слои в кремнии, полученные высокодозной имплантацией ионов гелия

© П.А. Александров, С.Г. Шемардов, А.Л. Васильев, В.Н. Беклемишев, А.В. Беклемишева ¶

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

¶ E-mail: Annabekl@ya.ru

Поступила в Редакцию 10 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 18 февраля 2026 г.
Принята к публикации 12 марта 2026 г.

Рассмотрены вопросы возникновения радиационного блистеринга при высокодозной имплантации ионов гелия в кремниевую подложку. Предложен метод получения „захороненного“ пористого слоя без механического разрушения поверхностного кремния.

Ключевые слова: имплантации ионов гелия, монокристаллические пластины кремния, докритическая доза имплантации, кремний-на-изоляторе, захороненные слои высокой пористости.

DOI: 10.61011/FTP.2026.01.62903.9086

1. Введение

Имплантация ионов гелия в кремний с целью получения пор (пустот) в объеме материала хорошо изучена для случая облучения малыми дозами (как правило, до $5 \cdot 10^{16}$ $He^+/см^2$). Понятны процессы возникновения гелий-вакансионных комплексов и роста гелиевых микропузырьков, аутдиффузия гелия, возникновение пор и механизмы их диффузии [1–12]. Совсем другая ситуация складывается при имплантации больших доз ($> 3 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$), когда возникают явления аморфизации, радиационного блистеринга, наличие критической дозы имплантации и т. д. [7,8,13]. В настоящее время возникает необходимость более тщательного изучения этих процессов, поскольку имплантация ионов гелия очень привлекательна для получения структур кремний-на-изоляторе при использовании геттерирующих свойств пор в процессе высокотемпературного внутреннего окисления пористой структуры и ее трансформации в захороненный диэлектрический слой [4,10].

2. Постановка задачи

В процессе имплантации ионов гелия упругие соударения с атомами подложки генерируют большое количество вакансий и межузельных атомов в концентрациях, на несколько порядков превышающих равновесные значения. Эти точечные дефекты подвижны в кремнии даже при комнатной температуре и могут либо рекомбинировать друг с другом, либо образовывать вакансионные кластеры. Считается, что взаимодействие гелия с дивакансиями и небольшими вакансионными кластерами стабилизирует их от рекомбинации с кремниевыми междоузлиями и приводит к образованию гелий-вакансионных комплексов, эволюционирующих затем в микропузыри [5,6].

Исследование поверхности образцов проводилось с использованием растрового электронно-ионного микроскопа Scios (ThermoFisher Scientific, США).

При дозах имплантации $> 1 \cdot 10^{16}$ $He^+/см^2$ для энергий 40–50 кэВ газовые пузырьки образуются непосредственно во время имплантации. Увеличение дозы имплантации приводит к укрупнению газовых пузырьков и увеличению их плотности.

Дальнейшая трансформация имплантационного слоя наблюдается при последующем отжиге. Проимплантированный гелий покидает кремний в широком спектре температур в зависимости от сложности дефекта, захватившего его. При температурах 200–300 °C освобождается гелий из небольших вакансионных комплексов и из междоузлий, и он может либо покинуть кремний, либо захватиться более крупными дефектами. При увеличении температуры отжига до 800 °C гелий начинает покидать газовые пузырьки, оставляя после себя пустоты (поры). При дальнейшем увеличении температуры наблюдается укрупнение пор по механизму миграции/коалесценции и (или) по механизму Оствальда [7].

Пористость захороненного синтезированного слоя (суммарный относительный объем пор в единице объема) определяется первоначальным объемом газовых пузырьков и количеством гелия в вакансионных комплексах и междоузлиях. Поэтому увеличение дозы имплантации является прямым решением увеличения пористости захороненного слоя и, следовательно, его сопротивления.

Однако давление в газовых пузырьках приводит к возникновению напряжений в кремнии и при превышении прочностных параметров материала наблюдаются механические повреждения поверхности: блистеринг (вспучивание поверхностного слоя) и флекинг (шелушение огромных участков поверхности). Таким образом, возникают ограничения на максимальную дозу имплантации и, как следствие, на максимальную пористость синтезированного захороненного слоя.

Для решения проблемы имплантации больших доз ионов гелия в кремний авторы предлагают метод докритических имплантаций и последующих отжигов. Докритической является любая доза, которая при последующем отжиге не вызывает механических повреждений поверхности. Отжиг проводится при температуре $> 800\,^{\circ}$C для полного удаления внедренного гелия из материала подложки. Затем цикл (имплантация + отжиг) повторяется необходимое количество раз.

3. Оборудование и методика эксперимента

Монокристаллические пластины кремния (100) были облучены ионами гелия на установке ИЛУ-100 (Россия), энергия имплантации — 50 кэВ. Для предотвращения механических повреждений поверхностного кремния был применен метод последовательных докритических имплантаций и отжигов. Докритическая доза имплантации — $1 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$. Температура отжига — 1000 °C. Цикл (имплантация + отжиг) повторялся несколько раз для набора необходимой дозы.

Подготовку срезов для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) осуществляли с помощью ионного пучка в растровом электронно-ионном микроскопе HelisosNanoLab^{tm}600i (США). Исследования поперечных срезов осуществляли методов ПЭМ на микроскопе Osiris (США).

4. Экспериментальные результаты

Предыдущие наши исследования показали, что блистеринг и флекинг наблюдаются непосредственно после имплантации дозы $3 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ и после отжига для дозы $2 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ [8], причем последние результаты свидетельствуют о том, что температура отжига может быть чрезвычайно низкой (550 °C).

Необходимо отметить, что приведенные результаты справедливы для параметров имплантации и отжига приведенных выше. Изменения условий имплантации и отжига могут изменить значения критической дозы имплантации и процесс синтеза захороненного пористого слоя. Последней дозой, при которой гарантированно не наблюдались механические нарушения поверхности, являлась доза $1 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$. Именно она была выбрана в качестве докритической дозы в методе последовательных имплантаций и последующих отжигов.

Вычисления с использованием программного пакета SRIM-2013 показывают, что максимальная концентрация внедренных ионов гелия достигается на глубине ~ 460 нм, при этом для дозы $1 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ она соответствует 8.7 ат.% (рис. 1).

Растровая электронная микроскопия использовалась для оценки качества поверхностных образцов, полученных методом докритических имплантаций и последующих отжигов. Она показала, что поверхность всех образцов гладкая, следов блистеринга и (или) флекинга не наблюдается даже для суммарной дозы имплантации $3 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ (три цикла имплантации дозы $1 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ и отжига 1000 °C) (рис. 2).

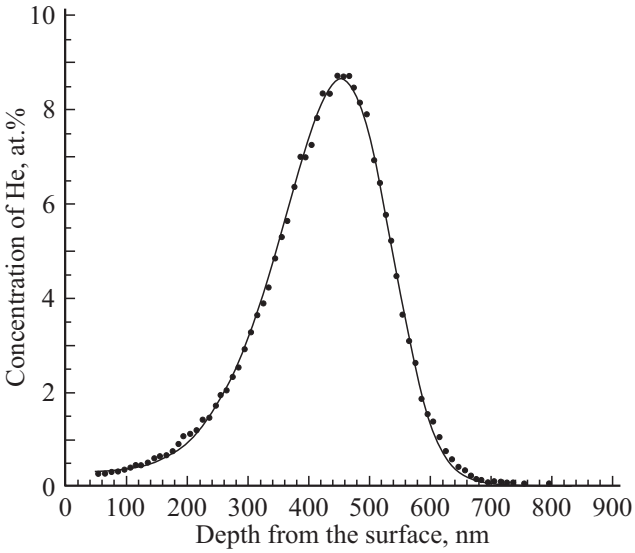


Рис. 1. Профили распределения концентрации ионов гелия от глубины залегания внутри кремниевого образца.

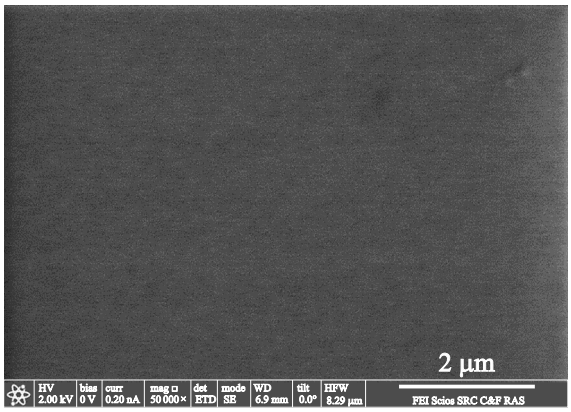


Рис. 2. Растровая электронная микроскопия поверхности образца, имплантированного методом докритических доз и последующих отжигов. Третий цикл (доза $3 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ и отжиг 1000 °C).

Поперечные срезы образцов для суммарных доз имплантаций $1 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ (рис. 3, *a*), $2 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ (рис. 3, *b*), $3 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ (рис. 3, *c*), полученные методом докритических доз имплантаций и последующих отжигов, имеют схожее распределение по глубине.

Представленные рисунки имеют схожее распределение пор по глубине. Увеличение дозы имплантации приводит к укрупнению пор по всей глубине кристалла и увеличению пористости, особенно в слое, отстающем от поверхности на величину 360–480 нм, где концентрируются поры особо крупного размера и средний диаметр для дозы $3 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ составляет 90 нм для

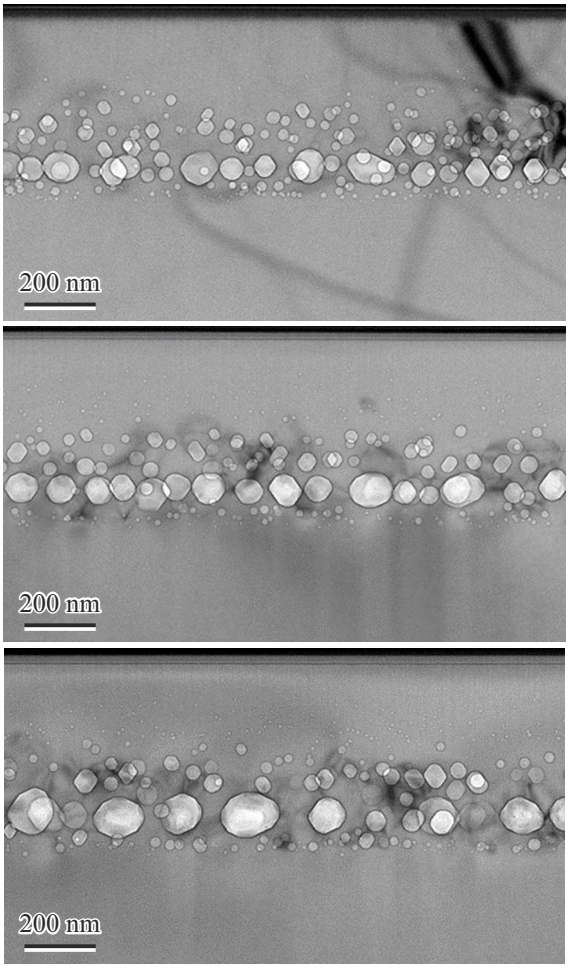


Рис. 3. Просвечивающая электронная микроскопия поперечных срезов образцов, имплантированных методом докритических доз и последующих имплантаций: *a* — первый цикл (доза $1 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ и отжиг 1000 °C), *b* — второй цикл (доза $2 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ и отжиг 1000 °C), *c* — третий цикл (доза $3 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$ и отжиг 1000 °C).

этой области. Нижняя граница этой зоны совпадает с концентрационным максимумом первоначально имплантированных ионов гелия. Таким образом, наблюдаются разные механизмы формирования пор в глубине материала.

В верхней части первоначального концентрационного профиля ионов гелия наблюдается умеренный рост пор до диаметра 10–20 нм, в то время как в нижней части профиля поры исчезают практически совсем, приводя к формированию огромных пор в области первоначального концентрационного максимума.

В работе [9] показано, что рекристаллизация аморфной области, полученной в результате имплантации большой дозы ($2.5 \cdot 10^{17}$ $He^+/см^2$), приводит к возникновению больших газовых пузырьков (~ 100 нм).

Авторы не проводили специальных исследований существования аморфных зон в кристалле после имплантации дозы $1 \cdot 10^{17}$$He^+/см^2$, хотя вблизи максимума распределения в этом случае следует ожидать чрезвычайно высоких напряжений, близких к максимально возможным, и возможное начало пластической деформации, что должно привести к наличию зоны сильно дефектного кремния. При низких температурах отжига (до 500 °C) возможно расширение этой дозы вглубь кристалла, поскольку дефектный кремний препятствует диффузии точечных дефектов и гелия, межузельного и появившегося при развале небольших гелий-вакансионных комплексов. Если учитывать больший концентрационный градиент внутренней ветви кривой распределения, то возможно распространение сильно дефектной области на ее бóльшую часть. При температурах 550–600 °C активируются процессы рекристаллизации и фронт рекристаллизации выталкивает гелий и газовые пузырьки из глубины кристалла на верхнюю границу дефектной области, приводя к образованию огромных газовых пузырьков. В это же время в области, прилегающей к поверхности, происходят обычные процессы, связанные с аутдиффузией гелия и его захватом гелиевыми пузырьками, что мы наблюдаем в случае имплантации малых доз. Диффузия гелия из газовых пузырьков и процессы коалесценции пор (пустот) при температурах 800–1000 °C приводят к наблюдаемой нами картине на рис. 3.

5. Заключение

Представленный метод докритических имплантаций и отжигов позволяет формировать захороненные слои высокой пористости без механических разрушений поверхностного кремния.

Финансирование работы

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“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C.C. Griffioen, J.H. Evans, P.C. de Jong, A. van Veen. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **27** (3), 417 (1987). DOI: 10.1016/0168-583X (87)90522-2
[2] C.C. Griffioen, J.H. Evans, P.C. De Jong, A. Van Veen. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **28** (3), 360 (1987). DOI: 10.1016/0168-583X (87)90176-5
[3] V. Raineri, P.G. Fallica, G. Percolla, A. Battaglia, M. Barbagallo, S.U. Campisano. J. Appl. Phys., **78**, 3727 (1995). DOI: 10.1063/1.522860

[4] A. Ogura. Appl. Phys. Lett., **82** (25), 4480 (2003). DOI: 10.1063/1.1586783
[5] M. Hasanuzzaman, Y.M. Haddara, A.P. Knights. J. Appl. Phys., **112**, 064302 (2012). DOI: 10.1063/1.4751267
[6] K. Haynes, X. Hu, B.D. Wirth, C. Hatem, K.S. Jones. J. Appl. Phys., **124**, 165708 (2018). DOI: 10.1063/1.5053660
[7] J. H. Evans. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **196**, 125 (2002).
[8] П.А. Александров, О.В. Емельянова, С.Г. Шемардов, Д.Н. Хмеленин, А.Л. Васильев. Кристаллография, **69** (3), 494 (2024). DOI: 10.31857/S0023476124030123
[9] R. Siegele, G.C. Weatherly, H.K. Haugen. Appl. Phys. Lett., **66** (11), 1319 (1995). DOI: 10.1063/1.113228
[10] P. Ericsson, S. Bengtsson. Appl. Phys. Lett., **71** (16), 2310 (1997). DOI: 10.1063/1.120058
[11] B.S. Li, C.H. Zhang, H.H. Zhang, Y. Li, G. Yin, J. Liu, Z. Liu, H.R. Liu, Z.X. Zhao, Y.Q. Han, Z.L. Yu, X.Q. Feng. Nucl. Instrum. Meth. B, **269**, 739 (2011). https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.11.079
[12] K. Ono, M. Mjamoto, H. Kurata, S. Takahashi, S. Maekawa. J. Appl. Phys., **126**, 135104 (2019). DOI: 10.1063/1.5118994
[13] X. Huang, Y. Xie, M. Balooch, S. Lubner, P. Hosemann. J. Appl. Phys., **132**, 025106 (2022). https://doi.org/10.1063/5.0096802

Редактор Г.А. Оганесян

Porous layers in silicon produced by high-dose helium ion implantation

P.A. Alexandrov, S.G. Shemardov, A.L. Vasiliev, V.N. Beklemishev, A.V. Beklemisheva

National Research Center „Kurchatov Institute“, 123182 Moscow, Russia

Abstract The issues of radiation blistering occurrence during high-dose implantation of helium ions into a silicon substrate are considered. A method for obtaining a „buried“ porous layer without mechanical destruction of surface silicon is proposing.