

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

114-1

20-22 октября 2022 года

УДК 621.9

Д.С. БЕРДНИК, студент гр. 62-ЭЛЭТ41 (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
В.В. ПЕРИНСКИЙ, д.т.н., профессор (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
И.В. ПЕРИНСКАЯ, к.т.н., доцент (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
г. Саратов

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО
ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

В настоящей работе для определения окрестностей дозы и энергии ионов гелия проводилось компьютерное моделирование в программном пакете *TRIM/SRIM* (*Transport of Ions in Matter – The stopping and range of ions in matter*).

Исходными объектами для экспериментов по получению композиционного слоя поликристаллического кремния, служили механически обработанные, полированные по традиционной технологии кремниевых интегральных схем поверхности монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 толщиной 0,5 мм.

Ионная имплантация механически обработанной и химически полированной поверхности образцов проводилась ионами He^+ , получаемыми в модернизированном источнике ионов установки «Везувий-5» из газообразного гелия [1].

Диапазон технологических параметров установки «Везувий-5» включает: ускоряющее напряжение ($U_{уск}$) 40-200 кВ и доза (Φ) ионов до 10^{17} ион/см² (максимальное ускоряющее напряжение внедряемых ионов $U_{уск}=200$ кВ при малых токах ионного пучка (плотность тока до 0,2 мкА/см²), с высоким разрешением по массам ионов.

Контролируемая экстракция ионов гелия из газообразного гелия осуществлялась в модернизированном источнике ионов отечественной ионно-лучевой установки типа «Везувий».

Компьютерное моделирование пробегов, электронных и ядерных потерь ионов гелия проводили в программном пакете *TRIM/SRIM* в диапазоне энергий 40-200 кэВ [2].

Для проведения моделирования процесса имплантации ионов гелия в образцы кремния были заданы следующие значения: масса ионов гелия 4,003 а.е.м., масса ионов кремния 2,3212 а.е.м., плотность кремния монокристаллического 2,33 г/см³ и данные, представленные в таблице 1.

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

114-2

20-22 октября 2022 года

Таблица 1.

Исходные данные для моделирования процесса ионной имплантации

Наименование	Единица измерения	Величина
Начальная энергия иона	кэВ	40,75,200
Число ионов каждой энергии	шт.	10^6
Угол наклона мишени	град.	0
Толщина мишени	мм	0,5

Моделирование внедрения высокоэнергетических ионов проводили в подложку кремния марки КЭФ-4,5 толщиной 0,5 мм с энергией (E)=40,75,200 кэВ и дозой облучения (Φ) порядка $(2,5-3,5) \times 10^{16}$ и $(1,25-3,1) \times 10^{17}$ ион/см². Подложки монокристаллического кремния, в настоящей работе, были перпендикулярны пучку ионов, специально не ориентировались, поэтому эффектом канализации ионов гелия можно пренебречь.

Результаты проведенного моделирования процесса имплантации ионов гелия в образцы кремния представлены в таблице 2.

Таблица 2.

**Результаты моделирования процесса имплантации ионов гелия в
образцы кремния**

Энергия иона, E , кэВ	Энергия электронного торможения, dE/dx , эВ	Энергия ядерного торможения, dE/dx , эВ	Средний проецируемый пробег (Projected Range), Å	Продольное смещение (Longitudinal Straggling), Å	Боковое смещение (Lateral Straggling), Å
40	1,201+02	4,803+00	3545	1182	1148
45	1,293+02	4,452+00	3878	1227	1210
50	1,380+02	4,155+00	4194	1266	1265
55	1,463+02	3,900+00	4497	1300	1314
60	1,541+02	3,678+00	4788	1330	1359
65	1,617+02	3,483+00	5067	1357	1400
70	1,689+02	3,310+00	5336	1382	1438
80	1,823+02	3,017+00	5850	1424	1505
90	1,947+02	2,776+00	6335	1459	1564
100	2,062+02	2,575+00	6795	1490	1616
110	2,168+02	2,404+00	7236	1516	1662
120	2,265+02	2,256+00	7658	1539	1704

V Всероссийская (с международным участием) молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

114-3

20-22 октября 2022 года

130	2,356+02	2,128+00	8066	1560	1742
140	2,440+02	2,015+00	8462	1578	1777
150	2,518+02	1,914+00	8845	1595	1809
160	2,590+02	1,824+00	9219	1611	1839
170	2,657+02	1,743+00	9584	1625	1867
180	2,719+02	1,669+00	9942	1638	1894
200	2,830+02	1,541+00	10600	1663	1942

Моделирование в программном пакете *TRIM/SRIM* дает представление о процессе имплантации и о дефектообразовании, сопровождающем ионную имплантацию ионов гелия. По завершению симуляции получены результаты (рис. 1).

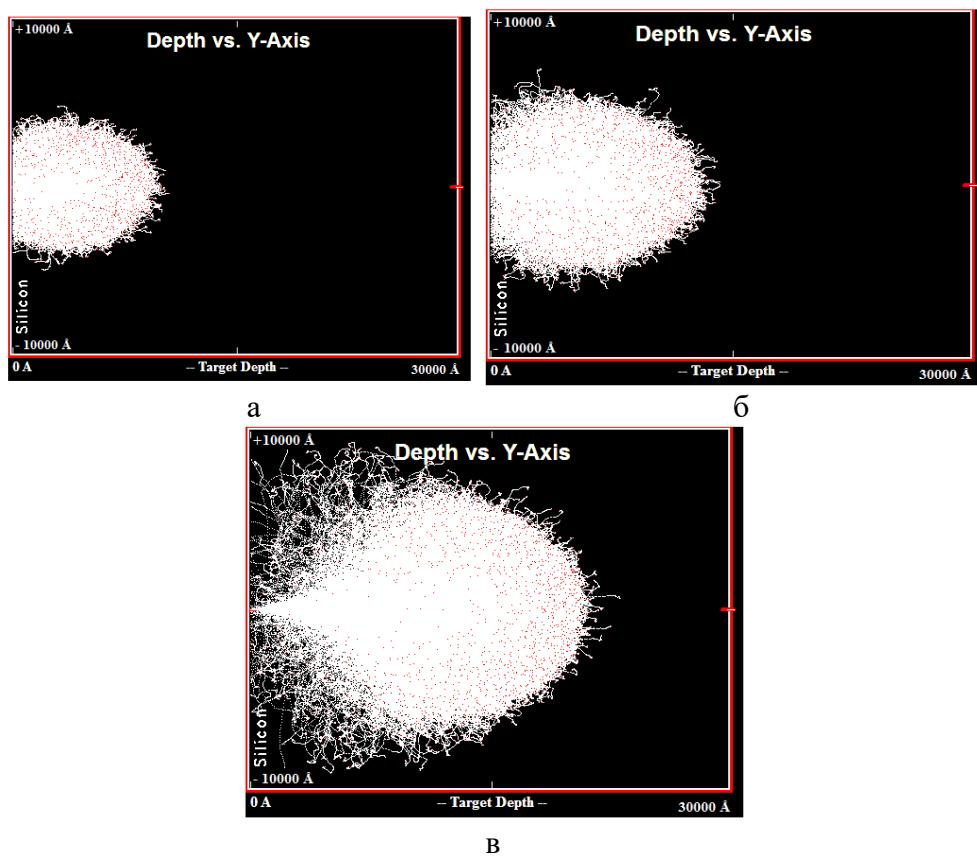


Рис. 1. Распределение ионов гелия в мишени из монокристаллического кремния с энергиями: *а*- 40 кэВ; *б*- 75кэВ; *в*- 200кэВ
(в программе было задано 10^6 внедряемых ионов гелия)

По рис. 1 определяется форма и профиль распределения ионов, т.к. результат зависит от материала мишени и вида ионов. Именно выбор этих составляющих определяет форму и геометрические размеры следа

V Всероссийская (с международным участием) молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

114-4

20-22 октября 2022 года

распределения внедренных ионов. По результатам моделирования видно, что форма распределения ионов гелия в кремний имеет форму эллипса с проецируемым пробегом (R_p) профиля распределения ионов гелия при энергии 200 кэВ 10600 Å.

Облучения ионами гелия позволяет формировать в облучаемом объеме материала наноразмерные кластеры в виде газовых нанопор.

Известно, что растворимость инертных газов в твердых телах мала и обычно не превышает уровня 10^{16} см⁻³. Поэтому, начиная с некоторых пороговых доз имплантации, в облученном материале возможно образование наноразмерных пустот и пор, заполненных атомами имплантируемого газа [3].

Как следствие процесса ионной имплантации, распределение имплантированных ионов является неоднородным по глубине от облучаемой поверхности. Поэтому формирование пор происходит также неоднородно. Глубина, на которой наблюдается образование пор, зависит от энергии ионов и совпадает с R_p .

Толщина квазипористого слоя определяется страгглингом (разбросом глубин пробега) ионов и увеличивается с увеличением энергии имплантации. Размеры нанопор и плотность их распределения в материале определяются энергией и дозой имплантации и могут существенно меняться в зависимости от условий постимплантационного отжига [4,5].

Таким образом, ионно-лучевая технология обеспечивает возможность с высокой точностью, а компьютерное моделирование с высокой воспроизводимостью управлять процессом формирования на поверхности и в приповерхностном слое кристаллов кремния пористых слоев с заданными параметрами нанопор путем соответствующего выбора условий имплантации и постимплантационного отжига.

Список литературы:

1. Перинский В.В. Аддитивная имплантация ионов в переходные металлы, полупроводники, диэлектрики тонкопленочных структур : монография / Перинский В.В., Перинская И.В..- Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2022. - 159 с.
2. Ziegler I. E. SRIM — the stopping and range of ions in matter / I. E. Ziegler // Nucl. Instr. Meth. Phys Res. B., 2010.-V.268. -P.1818-1823.
3. Комаров, Ф.Ф. Формирование изолирующих и геттерирующих слоев в полупроводниках с использованием имплантации ионов средних

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

114-5

20-22 октября 2022 года

энергий / Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, А.М. Миронов, А.И. Купчишин //ФИП, 2008. -Т. 6.- № 3-4.- С.142-150.

4. Ahmed, S. The effect of substrate temperature on the isolation of layers using MeV boron implantation / S. Ahmed, A.P. Knights, R. Gwilliam, B.J. Sealy // Semicond. Sci. Technol., 2001. - № 16(3). -P. 17-19.

5. Pearton, S.J. Ion implantation for isolation of III-V semiconductors technology/ S.J. Pearton // Mater. Sci. Rep., 1990.- №. 4 - P. 313-367.

Информация об авторах:

Бердник Дмитрий Сергеевич, студент гр. 62-ЭЛЭТ41 Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.), 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77, berdan2012_12@mail.ru

Перинский Владимир Владимирович, д.т.н., профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.), 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77, pvv175@rambler.ru

Перинская Ирина Владимировна, к.т.н., доцент профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.), 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77, perinskayaiv@mail.ru