

05,08,09

# Природа дефектов, ответственных за красный сдвиг края фундаментального поглощения и увеличение показателя преломления облученного $\text{Si}_3\text{N}_4$

© В.А. Гриценко<sup>1,2</sup>, Ю.Н. Новиков<sup>1,¶</sup>, А.А. Гисматулин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия

¶ E-mail: nov@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 17 октября 2025 г.

В окончательной редакции 5 ноября 2025 г.

Принята к публикации 5 ноября 2025 г.

Методом фотоэлектронной спектроскопии и инфракрасного поглощения изучаются атомное строение облученного ионами бора ( $\text{B}^+$ ) аморфного нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Облучение ионами  $\text{B}^+$  сопровождается красным смещением края фундаментального поглощения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Облучение ионами  $\text{B}^+$  приводит к уширению атомного  $\text{Si}$  2s-уровня в направлении меньших энергий, что указывает на образование кремний–кремниевых ( $\text{Si}-\text{Si}$ ) связей. Образование  $\text{Si}-\text{Si}$  связей за счет расщепления уровней связующих и анти-связующих орбиталей приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны и увеличению показателя преломления.

**Ключевые слова:**  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облучение, ионы бора, дефекты,  $\text{Si}-\text{Si}$  связи.

DOI: 10.61011/FTT.2025.11.62137.281-25

## 1. Введение

Аморфный оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и аморфный нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) являются двумя ключевыми диэлектриками в микроэлектроники [1]. Термический  $\text{SiO}_2$  на кремнии имеет низкую плотность ловушек на поверхности и в объеме и поэтому используется в качестве подзатворного диэлектрика в МДП-транзисторах [1]. В то же время,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  обладает высокой концентрацией ( $10^{18}\text{--}10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ) глубоких ( $\approx 1.5 \text{ eV}$ ) электронных и дырочных ловушек [1–3], на которые может захватываться заряд и хранится десять лет при  $85^\circ\text{C}$ . Этот эффект используется в современной флэш-памяти на основе TANOS-структур ( $\text{TaN}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{SiO}_2-\text{Si}$ ) [4,5]. В качестве электронных и дырочных ловушек в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  рассматриваются различные дефекты: оборванные связи кремния и азота [6,7], кремний–кремниевая связь ( $\text{Si}-\text{Si}$  связь) [8–11] и др. Для понимания и оптимизации работы флэш-памяти важно знать природу ловушек в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

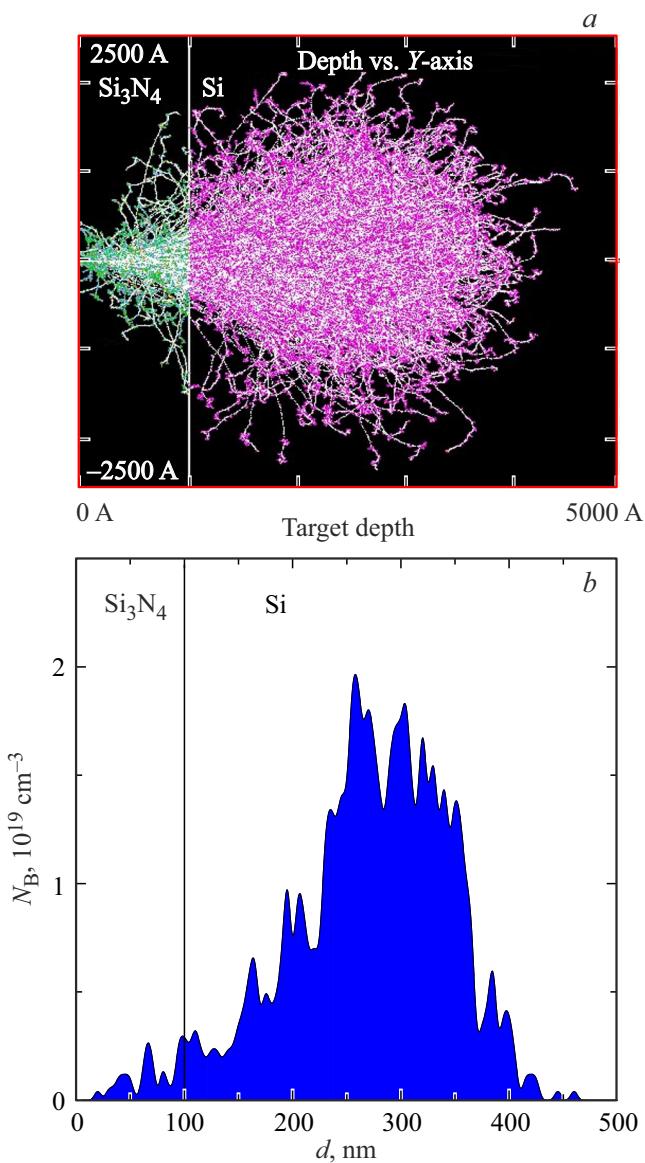
В работе [12] установлено, что край фундаментального поглощения в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученного ионами неона смещается в направлении низких энергий на  $0.5\text{--}1.0 \text{ eV}$  в зависимости от технологии синтеза. Отжиг  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при  $700^\circ\text{C}$  приводит к обратному смещению края поглощения в направлении высоких энергий. В статье [12] указывается, что смещение края поглощения при облучении обусловлено разупорядочением структуры нитрида кремния. В работе [13] исследованы процессы накопления/стекания разряда в нитриде кремния,

облученном ионами бора и фосфора. Природа дефектов, возникающих при облучении в работах [12,13], не изучалась.

Цель работы настоящей работы — установление природы дефектов в облученном  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ионами  $\text{B}^+$ , влияющих на оптические свойства  $\text{Si}_3\text{N}_4$  — край фундаментального поглощения и показатель преломления.

## 2. Методика эксперимента

Аморфные пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  синтезированы из смеси силана  $\text{SiH}_4$  и аммиака  $\text{NH}_3$  при температуре  $850^\circ\text{C}$  в соотношении  $\text{SiH}_4/\text{NH}_3 = 1/100$ .  $\text{Si}_3\text{N}_4$  облучался ионами  $\text{B}^+$  с энергией  $100 \text{ keV}$  и с дозой  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . Отжиг облученного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  осуществлялся в атмосфере азота при температуре  $700^\circ\text{C}$  в течение  $30 \text{ min}$ . Для исследования фотоэлектронных спектров пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной  $100 \text{ nm}$  были осаждены на кремний *n*-типа с ориентацией (100). Рентгеновские фотоэлектронные спектры были измерены на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре (XPS) SPECS с монохроматическим излучением  $\text{Al K}_\alpha$  ( $E = 1486.74 \text{ eV}$ ). Для оптических измерений  $\text{Si}_3\text{N}_4$  осаждался на сапфировые подложки. Толщина и показатель преломления пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  измерялась с помощью эллипсометра на длине волны  $632.8 \text{ nm}$ . Оптические спектры отражения и пропускания измерялись на спектрометре СФ-56 (ЛОМО-Спектр, Санкт-Петербург, Россия). Инфракрасные спектры пропускания были измерены на Фурье-спектрометре ФТ-801 (SIMEX, Россия).



**Рис. 1.** *a* — рассчитанные треки 1000 ионов  $\text{B}^+$  в структуре  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  (белый цвет). Столкновение  $\text{B}^+$  с азотом в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (зеленый цвет). Столкновение ионов  $\text{B}^+$  с Si в подложке (розовый цвет); *b* — пространственное распределение ионов  $\text{B}^+$  в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  после ионной имплантации. Энергия имплантации составляет 100 keV, доза имплантации  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

### 3. Распределение бора и дефектов в облученном $\text{Si}_3\text{N}_4$

Расчет распределения имплантированного  $\text{B}^+$  в системе  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ -подложка проводился с помощью программы STRIM-2013. При расчете были использованы следующие параметры: толщина  $\text{Si}_3\text{N}_4$  100 nm с плотностью 3.44 g/cm<sup>3</sup>, толщина Si-подложки 400 nm. Была рассчитана имплантация 1000 ионов  $\text{B}^+$  с энергией 100 keV. Угол имплантации составлял 0 градусов. Результаты расчетов представлены на рис. 1. Рассчитанные треки ионов бора после имплантации представлены на рис. 1, *a*.

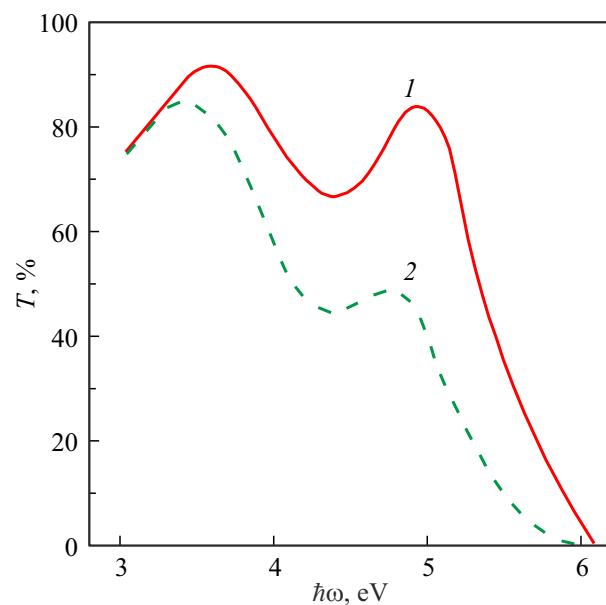
На рис. 1, *b* показано пространственное распределение ионов  $\text{B}^+$  в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  после ионной имплантации с энергией 100 keV при дозе имплантации  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . Из распределения ионов  $\text{B}^+$  в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  после ионной имплантации (рис. 1, *b*) видно, что основная часть ионов  $\text{B}^+$  уходит в кремниевую подложку.

### 4. Оптические свойства облученного $\text{Si}_3\text{N}_4$

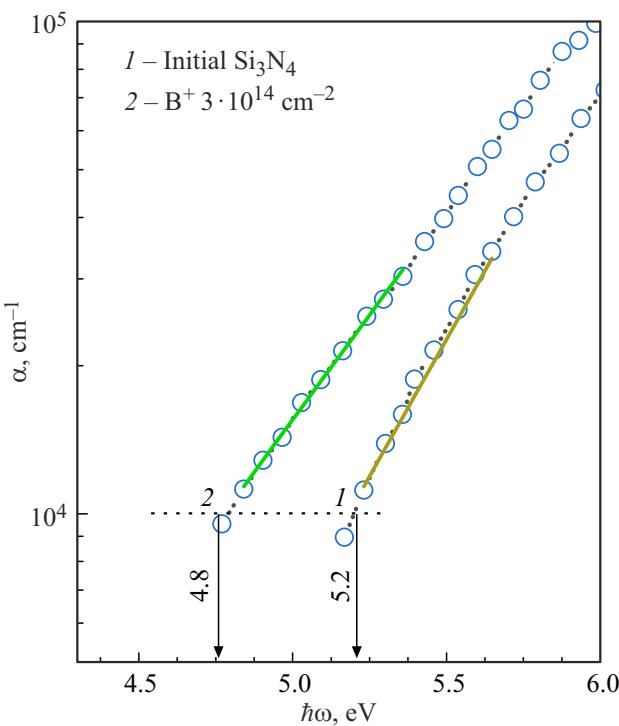
Спектры пропускания  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на сапфировой подложке, до и после облучения ионами  $\text{B}^+$ , представлены на рис. 2.

Облучение ионами  $\text{B}^+$  сопровождается уменьшением пропускания облученного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в диапазоне энергий 3.5–6.0 eV. Спектральная зависимость края фундаментального поглощения исходной и облученной пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  представлена на рис. 3. Спектры дисперсии оптического поглощения  $\alpha$  позволяют оценить величину запрещенной зоны как энергию фотона, при которой  $\alpha$  составляет  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  (так называемую оптическую щель  $E_{04}$ ) (рис. 3). Видно, что для исходных и облученных пленок дозами  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , значения  $E_{04}$  составляют 5.2 и 4.8 eV соответственно.

Аналогичный низкоэнергетический сдвиг края фундаментального поглощения наблюдается при обогащении нестехиометрического  $\text{SiN}_x$  кремнием [14,15]. Также нами были рассчитаны спектры оптического поглощения (сплошные линии на рис. 3) с использованием правила Урбаха [16]:  $\alpha = \alpha_0 \exp((\hbar\omega - E_{04})/E_U)$ , где  $\alpha_0$  и  $E_U$  (энергия Урбаха) параметры модели. Согласие с экспериментом было получено при следующих парамет-



**Рис. 2.** Спектры пропускания  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на сапфировой подложке: 1 — исходный  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 2 — после облучения ионами  $\text{B}^+$  дозой  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .



**Рис. 3.** Спектральная зависимость коэффициента поглощения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 1 — исходного и 2 — после облучения ионами  $\text{B}^+$  (кружки). Сплошные линии — спектральная зависимость коэффициента поглощения  $\text{Si}-\text{N}_4$  рассчитанная по правилу Урбаха.

рах:  $\alpha_0 = 9.7 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ,  $E_U = 0.39 \text{ eV}$  при  $E_{04} = 5.2 \text{ eV}$ ;  $E_U = 0.55 \text{ eV}$  при  $E_{04} = 4.8 \text{ eV}$ . Расчеты показывают, что с увеличением дозы облучения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ионами  $\text{B}^+$  значение  $E_U$  увеличивается. Увеличение  $E_U$  свидетельствует об увеличении разупорядочности в облученном ионами  $\text{B}^+$   $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Таким образом, с ростом дозы облучения пленки нитрида кремния ионами  $\text{B}^+$  наблюдается смещение края оптического поглощения в длинноволновую область спектра. Ранее низкоэнергетический сдвиг края фундаментального поглощения наблюдался при облучении нитрида кремния ионами неона и протонами [12].

Спектры отражения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученного ионами  $\text{B}^+$ , на кремнии представлены на рис. 4.

Показатель преломления кремниевой подложки больше, чем у пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . В этом случае минимум отражения (от просветляющего покрытия) соответствует минимальной толщине, кратной четверти длины волны:

$$n(\lambda)d = \frac{m + 1/2}{2}\lambda, \quad (1)$$

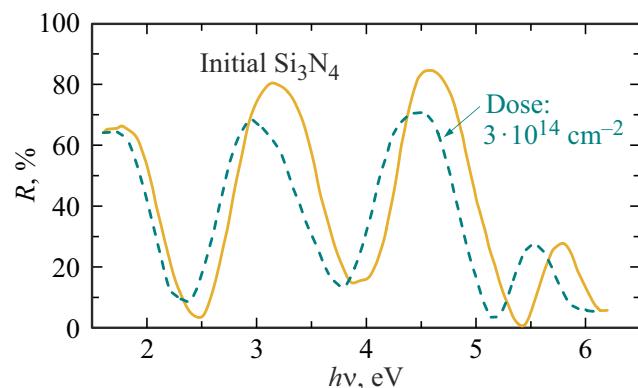
максимум в отражении (минимум в пропускании):

$$n(\lambda)d = \frac{m}{2}\lambda, \quad (2)$$

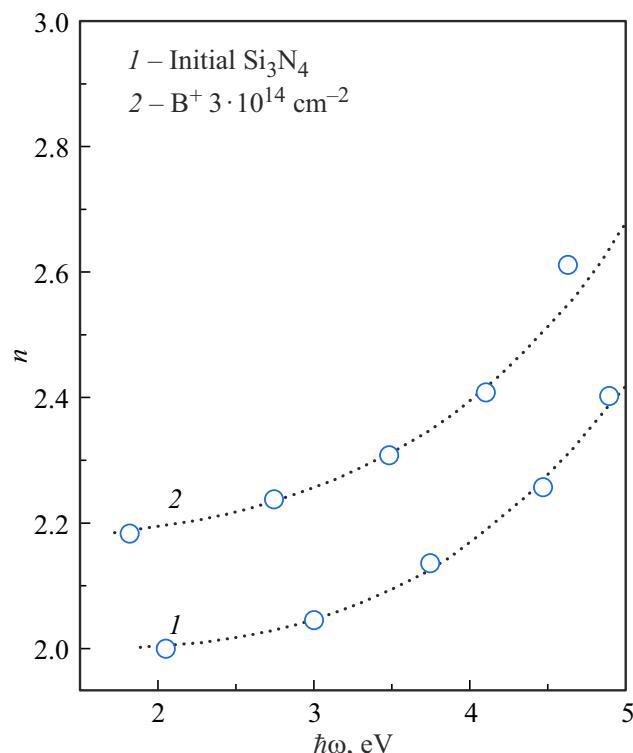
где  $\lambda$  — длина волны,  $m$  — порядок интерференции,  $d$  — толщина  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , определенная нами с помощью

эллипсометрии. Осцилляции коэффициента отражения обусловлены интерференцией.

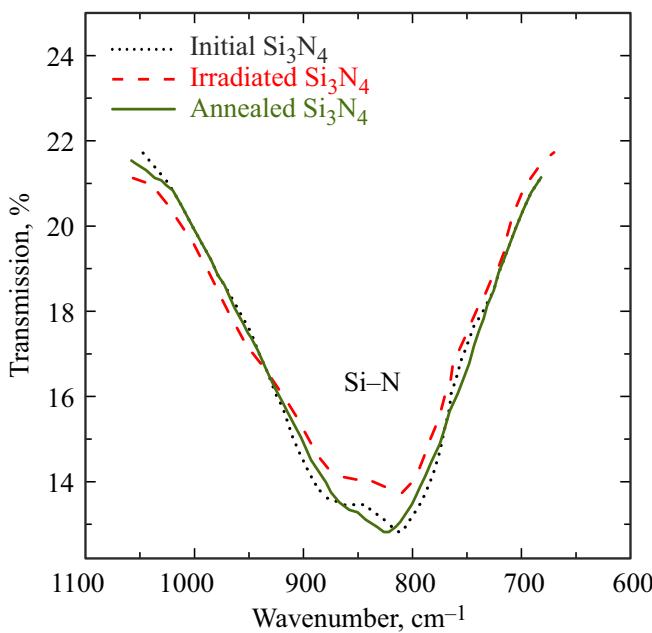
Спектральная зависимость показателя преломления  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученного ионами  $\text{B}^+$ , представлена на рис. 5. Облучение  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ионами  $\text{B}^+$  приводит к вертикальному смещению спектра  $n(\hbar\omega)$  в область больших значений. Увеличение дозы облучения сопровождается увеличением показателя преломления аналогично тому, что наблюдается при обогащении нестехиометрического



**Рис. 4.** Спектры отражения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученного ионами  $\text{B}^+$  на кремниевой подложке: сплошная линия — исходный  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , пунктирная линия —  $\text{Si}_3\text{N}_4$  после имплантации ионов  $\text{B}^+$  с энергией 100 keV при дозе  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .



**Рис. 5.** Спектральная зависимость показателя преломления  $n$   $\text{Si}_3\text{N}_4$ : 1 — до облучения, 2 — после облучения ионами  $\text{B}^+$  с дозой  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

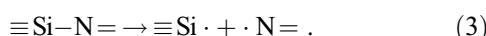


**Рис. 6.** Спектр инфракрасного пропускания исходных пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученных ионами  $\text{B}^+$  (доза  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) до и после последующего отжига.

$\text{SiN}_x$  избыточным кремнием [17]. Увеличение показателя преломления пленки в результате облучения, обусловлено появлением высокой концентрации  $\text{Si}-\text{Si}$  связей в пленке  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , что эквивалентно образованию нестехиометрического нитрида кремния  $\text{SiN}_x$ , обогащенного кремнием.

Спектры инфракрасного пропускания облученного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на кремниевой подложке до и после отжига показаны на рис. 6. Валентные колебания  $\text{Si}-\text{N}$  связи имеют минимум пропускания вблизи  $850 \text{ cm}^{-1}$  ( $\approx 12 \mu\text{m}$ ). При облучении  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ионами  $\text{B}^+$  показатель пропускания увеличивается при  $850 \text{ cm}^{-1}$ .

Увеличение интенсивности инфракрасного поглощения валентных колебаний  $\text{Si}-\text{N}$  связей в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , имплантированном ионами  $\text{B}^+$  (см. рис. 6) указывает на разрыв  $\text{Si}-\text{N}$  связей по реакции:

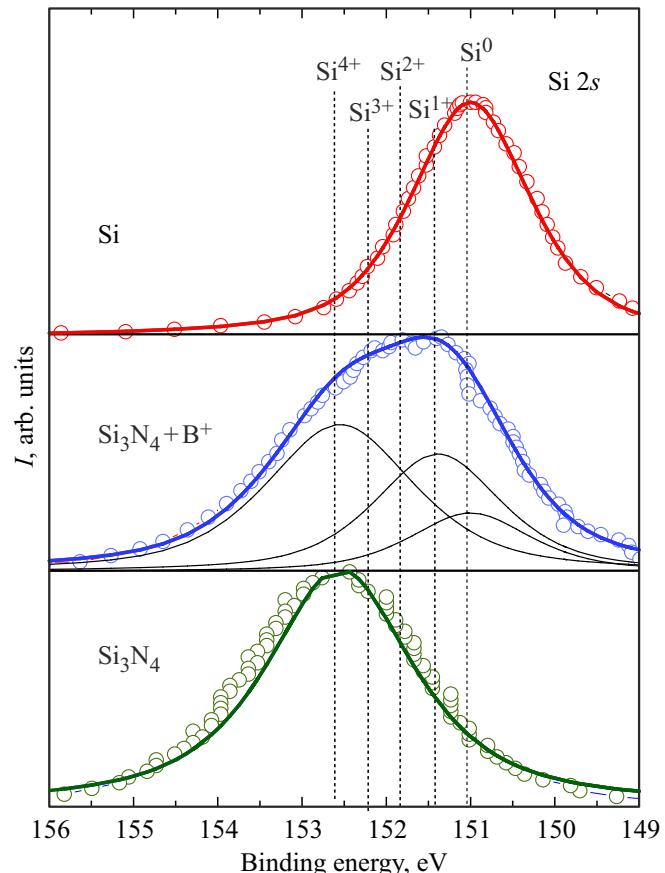


В результате разрыва  $\equiv\text{Si}-\text{N}=$  связи образуется парамагнитный трижды координированный атом кремния с неспаренным электроном  $\equiv\text{Si}\cdot$  и парамагнитный дважды координированный атом азота с неспаренным электроном  $\cdot\text{N}\cdot$ . Из рис. 6 следует, что при облучении  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ионами  $\text{B}^+$ , около одного процента  $\text{Si}-\text{N}$  связей разрывается по реакции (3). Отжиг сопровождается возвращением спектров к исходному состоянию (рис. 6). Такое поведение инфракрасных спектров пропускания можно объяснить разрывом  $\text{Si}-\text{N}$  связей при облучении  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и последующим восстановлением  $\text{Si}-\text{N}$  связей при отжиге.

## 5. Фотоэлектронная спектроскопия облученного $\text{Si}_3\text{N}_4$

На рис. 7 представлены экспериментальные фотоэлектронные спектры  $\text{Si} 2s$  состояний для  $\text{Si}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , имплантированного ионами  $\text{B}^+$  и исходного  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Облучение ионами  $\text{B}^+$   $\text{Si}_3\text{N}_4$  сопровождается уширением и сдвигом спектра  $\text{Si} 2s$  в сторону меньших энергий (рис. 7). Для разложения  $\text{Si} 2s$  спектров предполагалось, что пять тетраэдров  $\text{SiN}_v\text{Si}_{4-v}$  (где  $v = 0, 1, 2, 3, 4$ ) вносят вклад в спектр  $\text{Si} 2s$  состояния, и эти вклады представлены в виде суммы функций Гаусса и Лоренца (GL) [18].

Сначала были определены энергетическое положение ( $E_\nu$ ) и ширина ( $\sigma_\nu$ ) состояния  $\text{Si} 2s$  для  $\text{Si}$  (тетраэдр  $\text{SiSi}_4$ ) —  $E_0 = 151 \text{ eV}$  и  $\sigma_0 = 2 \text{ eV}$  [19] и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (тетраэдр  $\text{SiN}_4$ ) —  $E_4 = 152.6 \text{ eV}$  и  $\sigma_4 = 2.8 \text{ eV}$  [20]. Положения и ширины промежуточных трех функций GL состояний  $\text{Si} 2s$  ( $E_\nu$  и  $\sigma_\nu$ , где  $\nu = 1, 2, 3$ ) для тетраэдров  $\text{SiNSi}_3$ ,  $\text{SiN}_2\text{Si}_2$  и  $\text{SiNSi}_3$  были определены линейной интерполяцией значений  $E_0(\sigma_0)$ ,  $E_4(\sigma_4)$  с использованием числа атомов кремния в качестве параметра. Разложение спектров  $\text{Si} 2s$  на рис. 7, которые показаны сплошными



**Рис. 7.** Экспериментальные РФЭС-спектры уровня (кружки) ионно-имплантированного  $\text{Si}$ , исходной пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и результат их разложения (сплошные линии). Обозначения  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Si}^{3+}$ ,  $\text{Si}^{2+}$ ,  $\text{Si}^{1+}$  и  $\text{Si}^0$  указывают на вклады в спектр  $\text{Si} 2s$  от пяти тетраэдров  $\text{SiN}_v\text{Si}_{4-v}$ , где  $v = 0, 1, 2, 3, 4$ .

линиями, осуществлялось по формуле [18]:

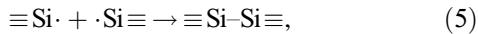
$$I(E) = \sum_{\nu=4}^4 W_\nu \left[ (1 - \chi) \exp\left(\frac{-4 \ln(2)(E - E_\nu)^2}{\sigma_\nu^2}\right) + \frac{\chi}{1 + 4 \frac{(E - E_\nu)^2}{\sigma_\nu^2}} \right], \quad (4)$$

где  $I(E)$  — расчетный спектр,  $E$  — энергия,  $\chi$  — параметр смешивания функции GL,  $W_\nu$  — вклад в спектр Si 2s тетраэдров  $\text{SiN}_\nu\text{Si}_{4-\nu}$  ( $\nu = 0, 1, 2, 3, 4$ ). Значения  $W_\nu$  были выбраны из наилучшего согласия экспериментального и расчетного спектров. Величина  $\chi = 0.6$  для облученных  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и Si, и  $\chi = 0.75$  для исходного  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Разложение спектра Si 2s  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученного ионами  $\text{B}^+$ , показало, что основной вклад в спектр Si 2s вносят тетраэдры  $\text{SiSi}_4$ ,  $\text{SiSi}_3\text{N}$  и  $\text{SiN}_4$  (рис. 7). Расчет показывает, что уширение уровня Si 2s при облучении ионами  $\text{B}^+$  связано с образованием Si—Si связей в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

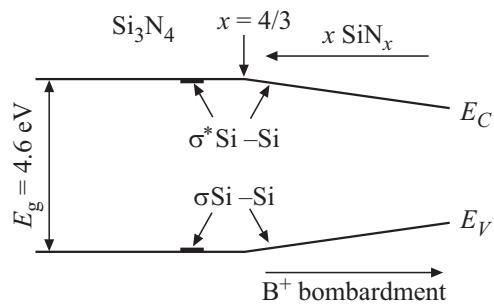
## 6. Обсуждение результатов

Облучение  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ионами  $\text{B}^+$  сопровождается низкоэнергетическим сдвигом края фундаментального поглощения и увеличением показателя преломления. В результате разрыва связи  $\equiv\text{Si}-\text{N}=$  при облучении, согласно реакции (2), образуются два собственных парамагнитных комплементарных дефекта: трехкоординированный атом кремния с неспаренным электроном  $\equiv\text{Si}$  и двухкоординированный атом азота с неспаренным электроном  $=\text{N}$ . Об этом свидетельствует уменьшение коэффициента поглощения колебательных спектров в инфракрасной области спектра. В работе [21] показано, что обогащение нитрида кремния избыточным кремнием приводит к увеличению коэффициента поглощения и уменьшению величины запрещенной зоны. Увеличение показателя преломления и низкоэнергетический сдвиг края фундаментального поглощения облученного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  обусловлены образованием Si—Si связей. На образование Si—Si связей в облученном  $\text{Si}_3\text{N}_4$  непосредственно указывает уширение атомного уровня Si 2s и смещение спектра в область низких энергий, т. е. в сторону состояний кремния.

После облучения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  парамагнитные дефекты  $\equiv\text{Si}$  и  $=\text{N}$  рекомбинируют попарно согласно реакциям:



В результате рекомбинации парамагнитных дефектов  $\equiv\text{Si}\cdot$  и  $=\text{N}\cdot$  в облученном  $\text{Si}_3\text{N}_4$  образуются диамагнитные связи Si—Si и N—N. Образование связей Si—Si приводит к сужению ширины запрещенной зоны (рис. 8). Уменьшение ширины запрещенной зоны с увеличением обогащения  $\text{SiN}_x$  кремнием наблюдалось в работах [22,23]. Верх валентной зоны  $\text{SiN}_x$  образован в основном атомными Si 3p-орбиталами, соответствующими

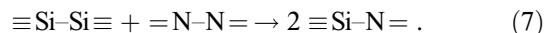


**Рис. 8.** Схематичное изображение уменьшения ширины запрещенной зоны  $\text{SiN}_x$  и облученного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  благодаря образованию в процессе облучения Si—Si связей.

связывающим  $\sigma$ -орбиталям Si—Si связей, а смещение  $E_V$  в сторону больших энергий объясняется увеличением энергии этих орбиталей с ростом концентрации вакансий азота (рис. 8).

Как показывают квантово-химические расчеты электронной структуры, сдвиг края поглощения  $\text{SiN}_x$  вызван смещением края зоны проводимости  $E_C$  и потолка валентной зоны  $E_V$  в запрещенную зону [8,10,11]. Связывающие и разрыхляющие орбитали Si—Si связи расположены вблизи потолка валентной зоны и дна зоны проводимости  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Смещение  $E_C$  и  $E_V$  в направлении запрещенной зоны приводит к низкоэнергетическому сдвигу края фундаментального поглощения. Другими словами, увеличение концентрации Si—Si связей в процессе облучения, вследствие снятия вырождения, приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны нитрида кремния (рис. 8).

Показатель преломления Si в ИК-области спектра составляет  $\approx 3.9$  [24], а показатель преломления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  составляет  $\approx 2$  [25]. Следовательно, увеличение числа связей Si—Si в  $\text{SiN}_x$  приводит к увеличению показателя преломления (рис. 5). При отжиге облученного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  взаимодействие связей Si—Si и N—N происходит согласно реакции:



Об этом свидетельствует уменьшение коэффициента пропускания облученного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в инфракрасной области спектра на длине волны  $850 \text{ cm}^{-1}$  в процессе отжига (рис. 6).

## 7. Заключение

Исследовано влияние облучения ионами  $\text{B}^+$  на структуру и оптические свойства аморфного  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Облучение ионами  $\text{B}^+$  приводит к смещению края фундаментального поглощения в красную область спектра и увеличению показателя преломления  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Последующий отжиг приводит к исчезновению радиационных дефектов в облученном  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

## Финансирование работы

Работа поддержана гос. заданием Института Физики Полупроводников СО РАН № FWGW-2025-0010.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.А. Гриценко. Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах. Наука, М. (1993). 278 с.
- [2] L. Hückmann, J. Cottom, J. Meyer. Adv. Phys. Res. **3**, 2300109 (2024).
- [3] C. Wilhelmer, D. Waldhör, L. Cvitkovich, D. Milardovich, M. Waltl, T. Grasse. Phys. Rev. B **110**, 045201 (2024).
- [4] A. Goda. Electronics **10**, 3156 (2021).
- [5] A. Padovani, A. Arreggini, L. Vandelli, L. Larcher, G. Van den bosch, P. Pavan, J. Van Houdt. IEEE Trans. Electron Devices **58**, 3147 (2011).
- [6] W.L. Warren, P.M. Lenahan. Phys. Rev. B **42**, 1773 (1990).
- [7] W.L. Warren, P.M. Lenahan, S.E. Curry. Phys. Rev. Lett. **65**, 207 (1990).
- [8] A.A. Karpushin, A.N. Sorokin, V.A. Gritsenko. JETP Letters **103**, 3, 171 (2016).
- [9] V.A. Gritsenko, N.V. Perevalov, O.M. Orlov, G.Ya. Krasnikov. Appl. Phys. Lett. **109**, 06294 (2016).
- [10] L. Martín-Moreno, E. Martínez, J.A. Vergés, F. Yndurain. Phys. Rev. B **35**, 9683 (1987).
- [11] J.F. Justo, F. de Brito Mota, A. Fazzio. Phys. Rev. B **65**, 073202 (2002).
- [12] H.J. Stein. J. Appl. Phys. **47**, 8, 3421 (1976).
- [13] G. Li, H. San, X.-Y. Chen. J. Appl. Phys. **105**, 124503 (2009).
- [14] O. Debieu, R.P. Nalini, J. Cardin, X. Portier, J. Perrière, F. Gourbilleau. Nanoscale Res. Lett. **8**, 31 (2013).
- [15] R. Karcher, L. Ley, R.L. Johnson. Phys. Rev. **8**, 30, 1896 (1984).
- [16] O.V. Rambadey, A. Kumar, A. Sati, P.R. Sagdeo. ACSOmega **6**, 32231 (2021).
- [17] F. Tiour, B. Benyahia, N. Brihi, A. Sari, Br. Mahmoudi, A. Manseri, A. Guenda. Appl. Phys. A **126**, (2020) 59.
- [18] V. Jaina, M.C. Biesingerb, M.R. Linford. Appl. Surf. Sci. **447**, 548 (2018).
- [19] <http://xpsdatabased/silicon-si-z14>
- [20] I. Hoflijk, A. Vanleehove, I. Vaesen, C. Zborowski, K. Artyushkova, T. Conard. Surf. Sci. Spectra **29**, 014013 (2022).
- [21] G. Heinricha, I. Höger, M. Bähr, K. Stolberg, T. Wütherich, M. Leonhardt, A. Lawerenz, G. Gobsch. Energy Procedia **27**, 491 (2012).
- [22] H.H. Nguyen, R. Jayapal, N.S. Dang, V.D. Nguyen, T.T. Trinh, K. Jang, J. Yi. Microelectron. Eng. **98**, 34 (2012).
- [23] I. Guler. ECS J. Solid State Sci. Technol. **12**, 046002 (2023).
- [24] <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Si&page=Schinke>.
- [25] [https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\\_nitride](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_nitride).

Редактор А.Н. Смирнов