

# Воздействие облучения протонами больших энергий на 4H-SiC-детекторы

© В. Кажукаускас<sup>¶</sup>, Р. Ясюленис\*, В. Календра, Ю. Вайткус

Кафедра физики полупроводников и Институт материаловедения и прикладных наук, Вильнюсский университет, LT-10222 Вильнюс, Литва

\* Институт физики,

LT-02300 Вильнюс, Литва

(Получена 21 июня 2006 г. Принята к печати 18 июля 2006 г.)

Исследовалось воздействие облучения детекторов ионизирующего излучения из 4H-SiC различными дозами (до  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>) протонов с энергией 24 ГэВ. В ядерных реакциях скальвания протонов с углеродом образовались изотопы В, Ве, Li, Не и Н. Изотопы Al, Mg, Na, Ne, F, O и N были образованы в реакциях протонов с кремнием. Полное количество образовавшихся стабильных изотопов изменялось пропорционально дозе облучения от  $1.2 \cdot 10^{11}$  до  $5.9 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Показано, что при больших дозах облучения значительно изменяются контактные характеристики детекторов. Высота потенциального барьера от изначального значения 0.7–0.75 эВ увеличилась до 0.85 эВ, значительно ухудшились выпрямляющие характеристики контактов Шоттки. Данные эффекты объясняются образованием разупорядоченной структуры материала под облучением.

PACS: 61.80.Jh, 72.80.Jc, 85.30.De

## 1. Введение

Карбид кремния является перспективным полупроводниковым материалом для производства детекторов ионизирующего излучения, используемых при высоких температурах и давлениях [1]. Соединения 6H-SiC и 4H-SiC имеют большую ширину запрещенной зоны, превышающую 3 эВ. Это дает низкую концентрацию равновесных носителей, высокое удельное сопротивление (до  $10^{11}$  Ом·см при комнатной температуре), высокое значение критического поля ( $\sim 3 \cdot 10^6$  В/см) и малые токи утечки приборов на основе SiC. Ввиду большей подвижности электронов ( $\sim 800$  см<sup>2</sup>/В·с) более предпочтительным для создания приборов является 4H-SiC. Именно высокое поле пробоя позволяет достичь больших рабочих частот. Наряду с высокой теплопроводностью это позволяет использовать детекторы на основе SiC при температурах, достигающих 700°C. Свойства SiC отлично подходят также для атомной энергетики. Сигнал датчиков на основе диодов Шоттки остается пропорциональным потоку нейтронов или рентгеновского излучения, не отклоняясь от линейности больше чем на 5% и обеспечивая точность более 0.6% даже при изменении потока на 9 порядков величины. Возможен также самоотжиг дефектов, т.е. приборы могут работать при повышенных температурах, предотвращая накопление радиационных дефектов [2,3].

С другой стороны, выход готовых приборов, а также их параметры существенно ограничены наличием большого количества дефектов в материале. Несмотря на технологические успехи в коммерческом выращивании высококачественных слитков диаметром 50 и 75 мм с плотностью микроканалов, не превышающей нескольких десятков на 1 см<sup>2</sup>, объемная плотность неконтролируе-

мых точечных дефектов и примесей все же остается на уровне  $10^{15} - 10^{17}$  см<sup>-3</sup> (см., например, [4,5]). Разными исследователями приводятся различные данные о параметрах дефектов даже в образцах, изготовленных по тому же технологическому процессу (см., например, [4]). Более того, плотность дислокаций тоже пока остается на уровне  $10^6$  см<sup>-2</sup> [6]. При этом значительная неоднородность распределения дефектов и примесей сказывается на эффектах переноса и рекомбинации носителей в пластинах большого диаметра. Неоднородность распределения дефектов доказана и при помощи неразрушающих методов — например, фотолюминесценции [7,8], оптической спектроскопии [9], емкостных методов [10], рамановской спектроскопии [11], термостимулированной люминесценции [12,8]. Наличие ловушек в запрещенной зоне обычно нежелательно, так как они приводят к уменьшению числа свободных носителей, генерированных при облучении датчика. Более того, неоднородно распределенные дефекты могут создаваться и в ходе облучения, что также может влиять на характеристики приборов. Хотя в сильно легированном материале влияние некоторых дефектов может уменьшиться ввиду экранирования их свободными носителями, но, если количество дефектов велико и они распределены неравномерно, их влияние на свойства материала и характеристики приборов на его основе может быть ощутимым [13]. Так как при облучении частицами больших энергий или имплантации могут создаваться новые или видоизменяться уже имеющиеся в материале дефекты [14–16], представляется актуальным исследование воздействия разного рода облучения с различными энергиями на свойства материала и приборов на его основе. Это будет способствовать целенаправленному прогнозированию и моделированию практически важных свойств приборов. В настоящей статье мы приводим

<sup>¶</sup> E-mail: vaidotas.kazukauskas@ff.vu.lt

результаты исследования воздействия облучения протонами на детекторы Шоттки ионизирующего излучения на основе 4H-SiC.

## 2. Образцы и эксперимент

Мы изучали детекторы ионизирующего излучения, изготовленные на основе эпитаксиальных слоев 4H-SiC *n*-типа проводимости, выращенных в IKZ (Institut für Kristallzüchtung, Berlin) на высокопроводящих *n*<sup>+</sup>-подложках фирмы CREE. Во время выращивания соотношение [C]/[Si] поддерживалось равным 1:1.5, температура была 1550°C, скорость выращивания 9 мкм/ч, давление азота  $(6.4-9.2) \cdot 10^{-4}$  мбар. Толщина слоев равнялась 30 мкм. Уровень легирования слоев, выращенных при таких условиях, составлял  $(0.5-1) \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Сверху на образцы напылялись золотые контакты Шоттки толщиной 150 нм, а снизу — омические никелевые электроды. В середине верхнего контакта было сделано полупрозрачное окно, где толщина слоя золота была ~ 5 нм. Для минимизации поверхностных токов утечки вокруг верхнего среднего контакта создавалось защитное кольцо [17], остальная поверхность SiC пассивировалась нитридом кремния. В детекторах, изготовленных таким образом, при приложенном обратном напряжении 600 В эффективность накопления заряда при облучении  $\alpha$ -частицами и рентгеновскими лучами была близкой к 100% [18]. Другие исследователи сообщают о заметных изменениях свойств материала при облучении, например,  $\pi$ -ионами [19].

Мы изучали воздействие на такие детекторы облучения протонами с энергией 24 ГэВ различными дозами ( $10^{13}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}$ ,  $3 \cdot 10^{15}$  и  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>). Облучение осуществлялось в Европейском центре ядерных исследований (CERN). Для определения количества радионуклидов и изотопов в детекторах мы применили методы измерения и расчетов, используемые в изучении космогенных радионуклидов, образующихся в атмосфере в ядерных реакциях космических лучей с ядрами азота, кислорода и аргона [20].

Свойства контактов облученных и необлученных детекторов сравнивались путем изучения их вольт-амперных характеристик. Полученные экспериментальные зависимости анализировались с использованием модели барьера Шоттки. В данной модели зависимость тока *I* через барьер от приложенного напряжения *U* описывается следующим образом:

$$I(U) = I_s \left[ \exp \frac{e(U - IR_s)}{nkT} - 1 \right], \quad (1)$$

где *I<sub>s</sub>* — ток насыщения, *R<sub>s</sub>* — объемное сопротивление образца, *n* — фактор неидеальности, который определяет отклонение от идеализированной модели термоэлектронной эмиссии, *T* — температура, *k* — постоянная Больцмана. Плотность тока насыщения *j<sub>s</sub>*

определяется как

$$j_s = A^* T^2 \exp \left( - \frac{e\Phi_B}{kT} \right). \quad (2)$$

Здесь  $\Phi_B$  — высота потенциального барьера, *A\** — константа Ричардсона,

$$A^* T^2 = CN_c, \quad (3)$$

*C* — коэффициент пропорциональности, *N<sub>c</sub>* — эффективная плотность состояний в зоне проводимости,

$$N_c = 2(2\pi m_e kT/h^2)^{3/2}, \quad (4)$$

что для 4H-SiC составляет  $N_c [\text{см}^{-3}] = 3.25 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2}$ . Значение константы Ричардсона в вакууме —  $120 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ . Эффективная масса электронов проводимости *m<sub>e</sub>* в 4H-SiC принималась равной 0.36 *m<sub>0</sub>*.

## 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1. Изменения элементного состава, вызванные облучением

Известно, что при облучении материалов заряженными частицами высоких энергий (в нашем случае протоны, 24 ГэВ) около 10% их энергии уходит на производство радионуклидов в ядерных реакциях с нуклонами мишени (в нашем случае SiC). Для определения содержания радионуклидов в детекторах был применен метод низкофоновой гамма-спектрометрии. Расчеты содержания изотопов и короткоживущих радионуклидов, образующихся в ядерных реакциях, основывались на сравнении сечений их образования с сечениями образования обнаруженных в детекторах радионуклидов.

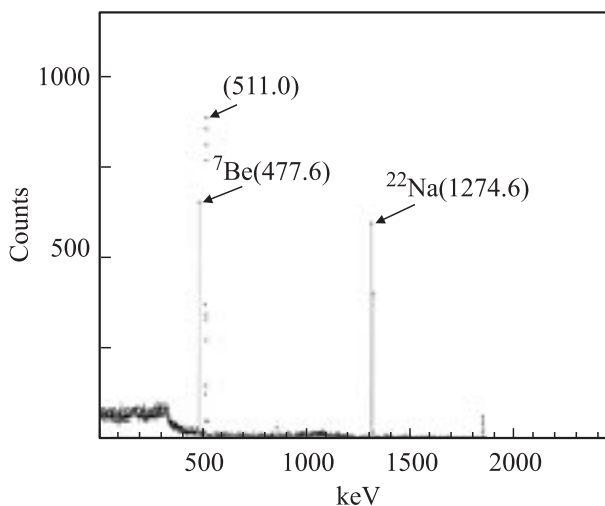
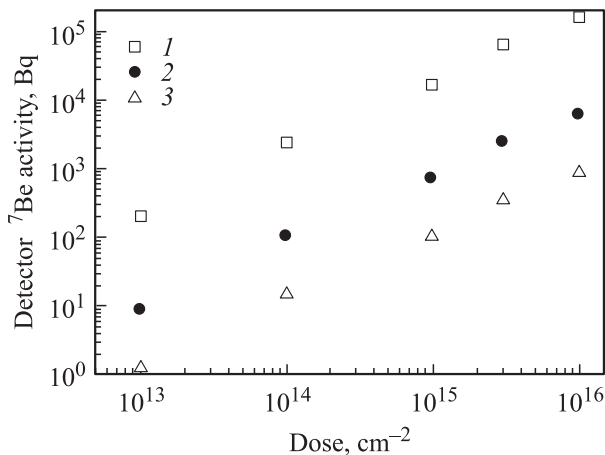


Рис. 1. Гамма-спектр образца 4H-SiC, облученного протонами с энергией 24 ГэВ. Спектр измерен германиевым спектрометром высокой чистоты через 240 дней после облучения.

**Таблица 1.** Результаты разделения гамма-спектров, расчета активности  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$  в детекторах спустя 240 дней после облучения и определения количества атомов  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$  после облучения образцов SiC различными дозами протонов

№ детектора	Доза облучения (протоны 24 ГэВ), $\text{см}^{-2}$	Активность ${}^7\text{Be}$ в образце спустя 240 дней после облучения, Бк	Активность ${}^{22}\text{Na}$ в образце спустя 240 дней после облучения, Бк	Количество атомов ${}^7\text{Be}$ после облучения	Количество атомов ${}^{22}\text{Na}$ после облучения
1	$1 \cdot 10^{13}$	9.2	2.2	$1.4 \cdot 10^9$	$3.1 \cdot 10^8$
2	$1 \cdot 10^{14}$	11	17	$1.6 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^9$
3	$1 \cdot 10^{15}$	$7.3 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{10}$
4	$3 \cdot 10^{15}$	$2.4 \cdot 10^3$	$3.8 \cdot 10^2$	$4.1 \cdot 10^{11}$	$5.3 \cdot 10^{10}$
5	$1 \cdot 10^{16}$	$5.8 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^{12}$	$1.4 \cdot 10^{11}$

В облученных детекторах низкофоновым гамма-спектрометром с детектором из чистого германия зарегистрировано гамма-излучение  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$  (рис. 1). Измерения гамма-спектров были проведены спустя 240 дней после облучения детекторов. Эксперименты по определению электрических характеристик проводились спустя еще 150 дней. Активности  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$  в облученных образцах рассчитывали, учитывая их распад, для трех характерных моментов времени: момент облучения, 240 и 390 дней после облучения. Результаты представлены на рис. 2, 3.



**Рис. 2.** Зависимость активности  ${}^7\text{Be}$  в образцах от дозы облучения в разные моменты времени: 1 — в момент облучения, 2 — 240 дней после облучения, 3 — 390 дней после облучения.

Экспериментально измеренные активности  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$ , образованных в ядерных реакциях скальвания с ядрами Si и C в детекторах, были использованы для определения числа атомов (постоянные распада известны с большой точностью). Количество атомов  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$ , образовавшихся в образцах после облучения, приведены в табл. 1.

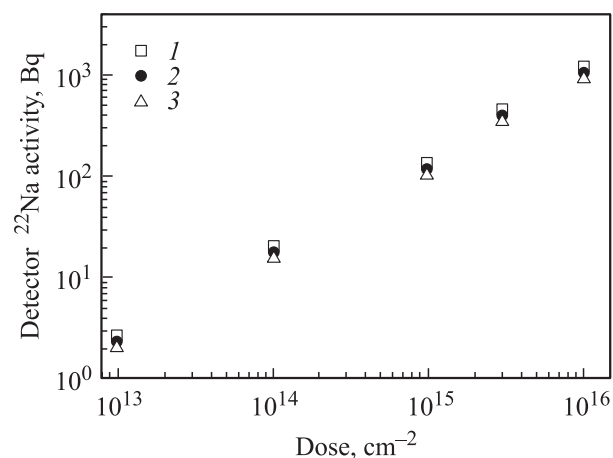
В ядерных реакциях протонов с энергией 24 ГэВ с естественным составом изотопов углерода  ${}^{12}\text{C}$  (98.9%) и  ${}^{13}\text{C}$  (1.1%) образуются изотопы и радионуклиды B, Be, Li, Ne и N, а с изотопами кремния  ${}^{28}\text{Si}$  (92.3%),

${}^{29}\text{Si}$  (4.7%) и  ${}^{30}\text{Si}$  (3.0%) — изотопы и радионуклиды Al, Mg, Na, Ne, F, O и N. Содержание продуктов реакций определялось по числу атомов  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$ , образовавшихся в образцах после облучения, при учете соответствующих сечений образования.

Сечения образования радионуклидов и изотопов в ядерных реакциях скальвания нуклонов в широком диапазоне энергий могут быть определены по эмпирической формуле, основанной на большом числе экспериментальных данных [21,22]:

$$\sigma = \sigma_0 f(A) f(E) \{ \exp[-P\Delta A - R(Z - SA + TA^2)^\gamma] \} \Omega \eta \xi, \quad (5)$$

где  $\sigma_0$  — коэффициент пропорциональности. Множители  $f(A)$  и  $f(E)$  используются для продуктов тяжелых мишеней (с атомным номером  $Z_t > 30$ ), когда разница в массовых числах ядер мишени и продукта  $\Delta A = A_t - A$  велика. Экспоненциальный множитель  $\exp(-P\Delta A)$  описывает уменьшение сечения при увеличении разности  $\Delta A$ . Второй экспоненциальный множитель  $\exp[-R(Z - SA + TA^2)^\gamma]$  с  $\gamma \approx 3/2$  определяет распределение сечения образования различных изотопов элемента с атомным номером  $Z$ . Распреде-



**Рис. 3.** Зависимость активности  ${}^{22}\text{Na}$  в образцах от дозы облучения в разные моменты времени: 1 — в момент облучения, 2 — 240 дней после облучения, 3 — 390 дней после облучения.

**Таблица 2.** Количество легких изотопов с  $A < 12$  после облучения SiC-детекторов различными дозами протонов с энергией 24 ГэВ

№ детектора	Доза облучения, см <sup>-2</sup>	<sup>11</sup> B	<sup>10</sup> B	<sup>9</sup> Be	<sup>7</sup> Li	<sup>6</sup> Li	<sup>4</sup> He	<sup>3</sup> He	<sup>2</sup> H	<sup>1</sup> H
1	1 · 10 <sup>13</sup>	1.0 · 10 <sup>8</sup>	1.5 · 10 <sup>8</sup>	1.5 · 10 <sup>8</sup>	4.9 · 10 <sup>8</sup>	7.7 · 10 <sup>8</sup>	4.9 · 10 <sup>9</sup>	9.7 · 10 <sup>8</sup>	8.9 · 10 <sup>8</sup>	6.3 · 10 <sup>8</sup>
2	1 · 10 <sup>14</sup>	1.2 · 10 <sup>9</sup>	1.8 · 10 <sup>9</sup>	1.8 · 10 <sup>9</sup>	3.5 · 10 <sup>9</sup>	9.0 · 10 <sup>9</sup>	5.8 · 10 <sup>10</sup>	1.1 · 10 <sup>10</sup>	1.1 · 10 <sup>10</sup>	7.4 · 10 <sup>9</sup>
3	1 · 10 <sup>15</sup>	8.1 · 10 <sup>9</sup>	1.2 · 10 <sup>10</sup>	1.2 · 10 <sup>10</sup>	2.3 · 10 <sup>10</sup>	6.0 · 10 <sup>10</sup>	3.8 · 10 <sup>11</sup>	7.6 · 10 <sup>10</sup>	7.0 · 10 <sup>10</sup>	5.0 · 10 <sup>10</sup>
4	3 · 10 <sup>15</sup>	3.1 · 10 <sup>10</sup>	4.5 · 10 <sup>10</sup>	4.5 · 10 <sup>10</sup>	5.1 · 10 <sup>10</sup>	2.3 · 10 <sup>11</sup>	1.5 · 10 <sup>12</sup>	2.9 · 10 <sup>11</sup>	2.7 · 10 <sup>11</sup>	1.9 · 10 <sup>11</sup>
5	1 · 10 <sup>16</sup>	7.5 · 10 <sup>10</sup>	1.1 · 10 <sup>11</sup>	1.1 · 10 <sup>11</sup>	2.3 · 10 <sup>11</sup>	5.6 · 10 <sup>11</sup>	3.6 · 10 <sup>12</sup>	7.1 · 10 <sup>11</sup>	6.5 · 10 <sup>11</sup>	4.6 · 10 <sup>11</sup>

**Таблица 3.** Количество изотопов с  $A < 32$  после облучения SiC-детекторов различными дозами протонов с энергией 24 ГэВ

№ детектора	Доза облучения, см <sup>-2</sup>	<sup>28</sup> Si	<sup>27</sup> Al	<sup>26</sup> Mg	<sup>25</sup> Mg	<sup>24</sup> Mg	<sup>23</sup> Na	<sup>22</sup> Ne	<sup>21</sup> Ne	<sup>20</sup> Ne	<sup>19</sup> F	<sup>18</sup> O	<sup>17</sup> O	<sup>16</sup> O	<sup>15</sup> N	<sup>14</sup> N
1	1 · 10 <sup>13</sup>	1.6 · 10 <sup>6</sup>	1.7 · 10 <sup>7</sup>	2.6 · 10 <sup>6</sup>	1.3 · 10 <sup>10</sup>	4.3 · 10 <sup>9</sup>	1.2 · 10 <sup>9</sup>	6.6 · 10 <sup>6</sup>	1.6 · 10 <sup>9</sup>	6.6 · 10 <sup>9</sup>	2.1 · 10 <sup>9</sup>	5.9 · 10 <sup>8</sup>	2.8 · 10 <sup>9</sup>	8.2 · 10 <sup>8</sup>	3.5 · 10 <sup>9</sup>	1.0 · 10 <sup>10</sup>
2	1 · 10 <sup>14</sup>	1.3 · 10 <sup>7</sup>	1.3 · 10 <sup>8</sup>	2.1 · 10 <sup>7</sup>	9.7 · 10 <sup>10</sup>	3.4 · 10 <sup>10</sup>	1.0 · 10 <sup>10</sup>	5.2 · 10 <sup>7</sup>	1.3 · 10 <sup>10</sup>	5.1 · 10 <sup>10</sup>	1.7 · 10 <sup>10</sup>	4.5 · 10 <sup>9</sup>	2.2 · 10 <sup>10</sup>	6.4 · 10 <sup>9</sup>	2.8 · 10 <sup>10</sup>	8.0 · 10 <sup>10</sup>
3	1 · 10 <sup>15</sup>	8.1 · 10 <sup>7</sup>	8.4 · 10 <sup>8</sup>	1.3 · 10 <sup>8</sup>	6.6 · 10 <sup>11</sup>	2.7 · 10 <sup>11</sup>	6.4 · 10 <sup>10</sup>	2.5 · 10 <sup>8</sup>	8.2 · 10 <sup>10</sup>	3.4 · 10 <sup>11</sup>	9.8 · 10 <sup>10</sup>	2.9 · 10 <sup>10</sup>	1.4 · 10 <sup>11</sup>	4.1 · 10 <sup>10</sup>	1.8 · 10 <sup>11</sup>	5.1 · 10 <sup>11</sup>
4	3 · 10 <sup>15</sup>	2.8 · 10 <sup>8</sup>	2.9 · 10 <sup>9</sup>	4.5 · 10 <sup>8</sup>	2.2 · 10 <sup>12</sup>	7.6 · 10 <sup>11</sup>	2.1 · 10 <sup>11</sup>	1.2 · 10 <sup>9</sup>	2.8 · 10 <sup>11</sup>	1.1 · 10 <sup>12</sup>	3.7 · 10 <sup>11</sup>	1.0 · 10 <sup>11</sup>	4.9 · 10 <sup>11</sup>	1.4 · 10 <sup>11</sup>	6.2 · 10 <sup>11</sup>	1.8 · 10 <sup>12</sup>
5	1 · 10 <sup>16</sup>	7.5 · 10 <sup>8</sup>	7.8 · 10 <sup>9</sup>	1.1 · 10 <sup>9</sup>	5.8 · 10 <sup>12</sup>	1.9 · 10 <sup>12</sup>	5.6 · 10 <sup>11</sup>	2.9 · 10 <sup>9</sup>	7.5 · 10 <sup>11</sup>	3.1 · 10 <sup>12</sup>	9.8 · 10 <sup>11</sup>	2.7 · 10 <sup>11</sup>	1.3 · 10 <sup>12</sup>	3.8 · 10 <sup>11</sup>	1.6 · 10 <sup>12</sup>	4.7 · 10 <sup>12</sup>

**Таблица 4.** Активности долгоживущих радионуклидов  ${}^7\text{Be}$  в детекторах спустя 390 дней после облучения

№	Доза облучения, $\text{см}^{-2}$	${}^3\text{H}$	${}^7\text{Be}$	${}^{10}\text{Be}$	${}^{14}\text{C}$	${}^{22}\text{Na}$	${}^{26}\text{Al}$
1	$1 \cdot 10^{13}$	1.8	1.3	$6.7 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{-2}$	1.9	$4.0 \cdot 10^{-6}$
2	$1 \cdot 10^{14}$	22	15	$7.9 \cdot 10^{-7}$	0.3	16	$3.2 \cdot 10^{-5}$
3	$1 \cdot 10^{15}$	$1.4 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^2$	$5.2 \cdot 10^{-6}$	1.9	10	$2.1 \cdot 10^{-4}$
4	$3 \cdot 10^{15}$	$5.5 \cdot 10^2$	$3.4 \cdot 10^2$	$1.8 \cdot 10^{-5}$	6.7	$3.5 \cdot 10^2$	$7.0 \cdot 10^{-4}$
5	$1 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^3$	$8.5 \cdot 10^2$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	18	$9.1 \cdot 10^2$	$1.8 \cdot 10^{-3}$

Примечание. Значения приведены в Бк.

ление, подобное гауссовому, соответствует статистической природе процесса ядерного испарения. Ширина распределения значений сечения для энергий  $E \geq 1250$  МэВ определяется параметром  $R = 1.6$ . Параметр  $S = 0.52 - 0.08 (A_t/Z_t - 2)$  дает положение максимума на кривой распределения.

Из уравнения (5) были получены сечения образования радионуклидов и изотопов в ядерных реакциях протонов 24 ГэВ с натуральным составом изотопов углерода. Были рассчитаны соотношения сечений образования радионуклидов и изотопов с массовым числом до 12 и  ${}^7\text{Be}$ . Результаты, полученные путем умножения числа атомов  ${}^7\text{Be}$  в детекторе после облучения (табл. 1) и соотношений сечений образования радионуклидов и изотопов, представлены в табл. 2. Принималось, что короткоживущие радионуклиды, исключая тритий, полностью распались. Число продуктов из  $\beta^-$ - и  $\beta^+$ -распада и число соответствующих изотопов суммировалось.

Аналогичным путем, на основе уравнения (5), получены сечения образования радионуклидов и изотопов с массовым числом больше 12 в ядерных реакциях протонов 24 ГэВ с натуральным составом изотопов кремния. Результаты расчетов, полученные путем умножения числа атомов  ${}^{22}\text{Na}$  в детекторе после облучения (табл. 1) и соотношений сечений образования радионуклидов и изотопов, представлены в табл. 3. Количество продукта распада  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}$  и продукта распада  ${}^{22}\text{Na} \rightarrow {}^{22}\text{Ne}$ , образовавшихся за 390 дней после облучения, были просуммированы с числом этих изотопов, образовавшихся в результате других реакций (табл. 2 и 3).

Количество долгоживущих радионуклидов  ${}^3\text{H}$  (период полураспада  $t_{1/2} = 12.36$  лет),  ${}^{10}\text{Be}$  ( $t_{1/2} = 1.6 \cdot 10^6$  лет),  ${}^{14}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 5730$  лет) и  ${}^{26}\text{Al}$  ( $t_{1/2} = 7.16 \cdot 10^5$  лет) в образцах и их активности спустя 390 дней после облучения представлены в табл. 4. Активности  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$  определены путем измерения гамма-спектров.

Распад радионуклидов сопровождается излучением электронов высоких энергий, которые влияют на электрические свойства устройств.  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{10}\text{Be}$  и  ${}^{14}\text{C}$  распадаются,

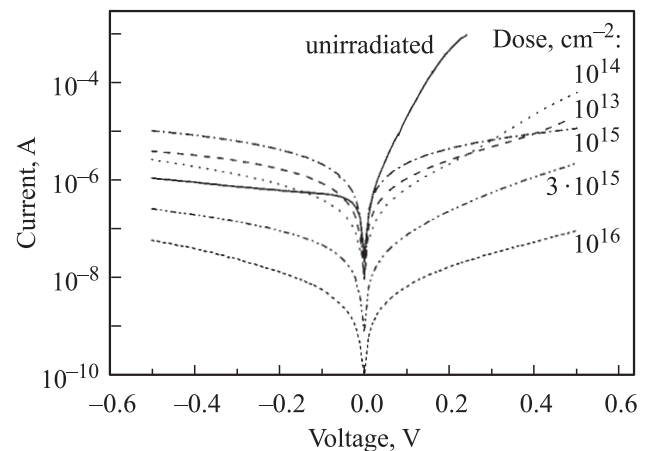
испуская  $\beta^-$ -частицы. Распад  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$  и  ${}^{26}\text{Al}$  сопровождается излучением конверсионных и оже-электронов в количествах соответственно  $3.9 \cdot 10^{-8}$ , 0.19 и 0.45 на один распад. Вследствие этого в образцах, облученных дозами протонов  $1 \cdot 10^{13}$  и  $1 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$ , спустя 390 дней после облучения число электронов различных энергий в секунду будет от 1 до 600 соответственно.

Известно, что время использования детекторов в потоке электронов достигает 3 лет. В условиях непрерывного облучения долгоживущие радионуклиды будут накапливаться экспоненциально, а количество короткоживущих будет определяться равновесием между образованием и распадом. Число электронов, образующихся в этих условиях, может быть оценено путем простых расчетов на основе представленных данных.

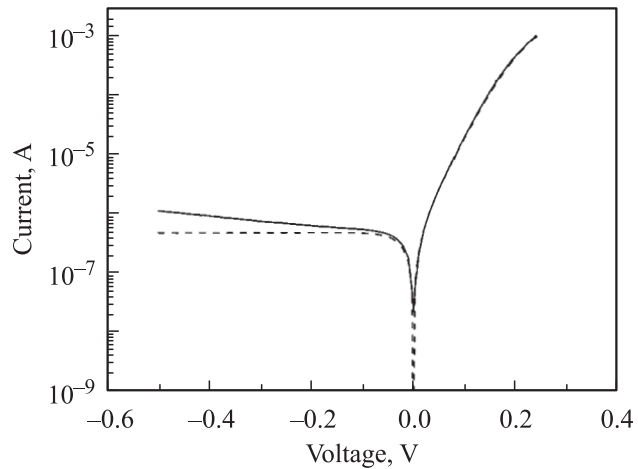
### 3.2. Влияние облучения на свойства контактов 4H-SiC-детекторов

В данном разделе приводится сравнение свойств контактов детекторов Шоттки до и после облучения различными дозами протонов. Экспериментальные вольт-амперные характеристики изученных образцов представлены на рис. 4. Видно, что характеристика необлученного образца имеет вид характеристики классического диода Шоттки. Сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования на основе выражений (1)–(4) представлено на рис. 5. При моделировании использовались следующие значения: высота потенциального барьера  $\Phi_B = 0.75$  эВ, фактор неидеальности  $n = 1.05$ , объемное сопротивление образца  $R_s = 35$  Ом. В то время как совпадение для прямого напряжения практически идеальное, ток в обратном направлении превышает расчетные величины. Скорее всего, это объясняется поверхностными токами утечки.

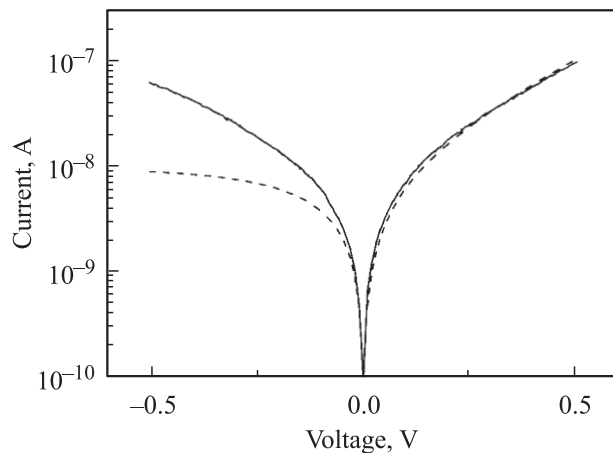
Как видно из рис. 4, при увеличении дозы облучения выпрямляющие свойства контактов становятся менее выраженными. Так, если при облучении дозами  $1 \cdot 10^{13}$  и  $1 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2}$  характеристики остаются асимметричными,



**Рис. 4.** Экспериментальные вольт-амперные характеристики образцов, облученных различными дозами.



**Рис. 5.** Экспериментальная вольт-амперная характеристика необлученного образца (сплошная линия) и расчет по формулам (1)–(4) (штриховая).

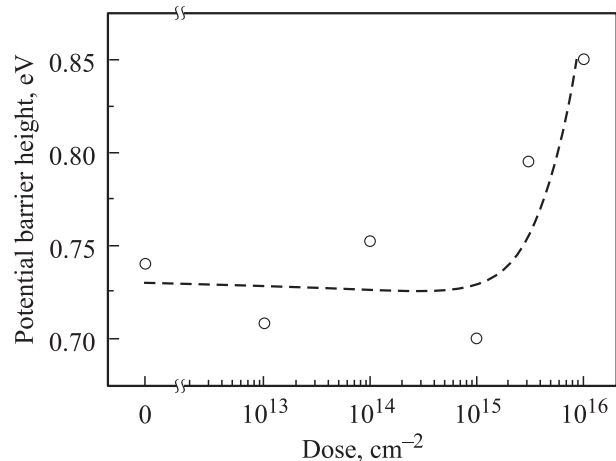


**Рис. 6.** Экспериментальная вольт-амперная характеристика образца, облученного дозой  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (сплошная линия) и модельный расчет по формулам (1)–(4) (штриховая).

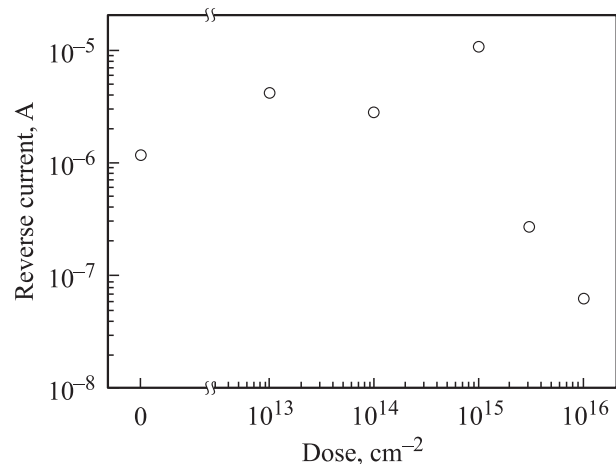
то при более высоких дозах асимметричность практически не проявляется, как показано на рис. 6 для образца, облученного дозой  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Из этого же рисунка видно, что такое поведение не может быть в деталях описано в рамках модели Шоттки. Более того, чтобы достичь согласия с экспериментальным током в прямом направлении, фактор неидеальности должен быть аномально большим,  $\sim (5-12)$ . Получается, что  $n$  представляет собой некую эффективную величину, не отражающую реальный механизм переноса через контакт в облученных структурах. Из рис. 4 также ясно видно, что облучение приводит к значительному изменению тока через приборы, что связано с изменением величины потенциального барьера (рис. 7). При малых дозах, не превышающих  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , наблюдается слабое уменьшение эффективной высоты потенциального барьера от начального значения, равного 0.75 эВ в необлученных образцах, до  $< 0.7$  эВ. Это уменьшение сопровождается

ростом обратного тока диодов примерно на порядок величины (рис. 4 и 8). При наибольших дозах облучения, превышающих  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , свойства приборов стремительно меняются в противоположном направлении. Так, в детекторах, облученных дозой протонов  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , высота потенциального барьера увеличилась до  $\sim 0.85$  эВ (рис. 7), а обратный ток уменьшился на 2 порядка (рис. 8). Эти изменения сопровождались ростом объемного сопротивления образцов до нескольких тысяч Ом. Однако такие значения недостаточны для объяснения наблюдаемого ограничения тока при небольших напряжениях. Это является свидетельством того, что необходимо учесть также другие механизмы, один из которых может быть связан с образованием потенциальных барьеров в образцах.

Из приведенных результатов следует, что даже низкие дозы облучения,  $\sim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , значительно ухудшают выпрямляющие характеристики контактов детек-



**Рис. 7.** Эффективная высота потенциального барьера в образцах в зависимости от дозы облучения. Штриховая кривая — аппроксимация экспериментальных данных полиномом третьей степени, построена для наглядности.



**Рис. 8.** Зависимость обратного тока при напряжении  $-0.5$  В от дозы облучения.

торов на основе 4H-SiC. Скорее всего, это связано с разрушением контактной области протонами высоких энергий. Облучение ведет к появлению неупорядоченной структуры, т.е. образованию и перераспределению потенциальных барьеров различной высоты в объеме образца, что в свою очередь приводит к возникновению эффектов протекания. Двоякообразное изменение свойств приборов в зависимости от дозы облучения указывает на проявление двух процессов. Скорее всего, при сравнительно малых дозах, до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , полного разрушения кристаллической структуры не происходит, а плотность и масштаб дефектных областей остаются относительно небольшими. Вследствие этого перенос электронов может происходить по более проводящим дефектным каналам, что и приводит к небольшому уменьшению эффективной величины потенциального барьера, на  $\sim 0.05 \text{ эВ}$ , и обусловленному этим росту обратного тока на порядок величины. Как говорилось, можно предполагать, что на этом этапе кристаллическая структура материала полностью не разрушается, а дефекты проявляются в виде отдельных проводящих каналов. При дозах облучения выше  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , как видно из рис. 4, 7 и 8, свойства материала стремительно меняются. Если предположить, что при таких дозах облучения каждый протон с высокой энергией создает один дефект в кристалле, то это дает эффективную величину общей концентрации дефектов  $\sim 1.6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Конечно, при такой концентрации дефектов нельзя считать, что материал остается кристаллическим. Кристаллическая структура скорее всего разрушается, а явления переноса обуславливаются сформировавшейся неупорядоченной поликристаллической структурой, в которой появляется большое количество потенциальных неоднородностей различной величины и масштабов. При этом выпрямляющие свойства контактов не могут более определяться изначально сформированным одним потенциальным барьером в приконтактной области. Однако, чтобы принять участие в транспорте, электроны должны преодолеть все потенциальные неоднородности, поэтому нелинейность вольт-амперной характеристики сохраняется.

#### 4. Заключение

Исследовано воздействие облучения различными дозами (до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) протонов с энергией 24 ГэВ на детекторы ионизирующего излучения из 4H-SiC. Детекторы создавались как диоды Шоттки на эпитаксиальных слоях 4H-SiC *n*-типа проводимости, выращенных на  $n^+$ -подложках.

По результатам непосредственных измерений и расчетов определено количество изотопов, образовавшихся при облучении образцов протонами. Показано, что в ядерных реакциях скалывания протонов с углеродом образуются изотопы В, Ве, Li, He и H. Изотопы Al, Mg, Na, Ne, F, O и N образуются в реакциях протонов

с кремнием. Полное количество стабильных изотопов, образовавшихся в образцах, облученных дозой протонов  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , составляло  $1.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а облученных дозой протонов  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  —  $5.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Активность  $^7\text{Be}$  и  $^{22}\text{Na}$ , образовавшихся в детекторах при облучении протонами, с малой статистической погрешностью измерены экспериментально. На основе этих данных определены активности и количества атомов других радионуклидов. Активности  $^7\text{Be}$  и  $^{22}\text{Na}$  были пропорциональны дозе облучения и изменялись соответственно в пределах от 1.3 до 890 Бк и от 1.9 до 950 Бк. В образцах, облученных дозами  $1 \cdot 10^{13}$  и  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , спустя 390 дней после облучения радионуклиды испускали от 1.0 до 600 электронов различных энергий в секунду.

Показано, что облучение протонами высоких энергий приводит к ухудшению выпрямляющих характеристик детекторов.

Характер изменения зависел от дозы облучения. При дозах, не превышающих  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , наблюдалось слабое уменьшение эффективной высоты потенциального барьера от начального значения 0.75 эВ в необлученных образцах до  $< 0.7 \text{ эВ}$ , сопровождавшееся ростом обратного тока диодов примерно на порядок величины. При дозах облучения, превышающих  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , свойства приборов стремительно менялись в противоположную сторону. Так, в детекторах, облученных дозой протонов  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , высота потенциального барьера повысилась до  $\sim 0.85 \text{ эВ}$ , а ток через приборы уменьшился на 2 порядка. Данные изменения объясняются образованием большого числа радиационных дефектов, возможно, вплоть до аморфизации. Образование разупорядоченной структуры вызывает эффекты протекания, подавляющие классические контактные явления переноса, чем и объясняется наблюдаемое сильное уменьшение тока.

#### Список литературы

- [1] Yu.A. Goldberg, M. Levinshtein, S.L. Rumyantsev. In: *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, (N.Y., Wiley, 2001) ch. 5 (*Silicon Carbide*), p. 93.
- [2] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava, P.G. Fuochi, P. Vanni. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **792**, 611 (2004).
- [3] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 3780 (2004).
- [4] Z.-Q. Fang, D.C. Look, A. Saxler, W.C. Mitchel. *Physica B*, **308–310**, 706 (2001).
- [5] D.V. Davydov, A.A. Lebedev, V.V. Kozlovskii, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk. *Physica B*, **308–310**, 641 (2002).
- [6] S. Maximenko, S. Soloviev, D. Cherednichenko, T. Sudarshan. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1576 (2004).
- [7] M. Tajima, M. Tanaka, N. Hoshino. *Mater. Sci. Forum*, **389–393**, 597 (2002).
- [8] N.E. Korsunskaya, I. Tarasov, V. Kushnirenko, S. Ostapenko. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, 833 (2004).

- [9] R. Weingärtner, P.J. Wellmann, M. Bickermann, D. Hofmann, T.L. Straubinger, A. Winnacker. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 70 (2002).
- [10] R. Stibal, S. Müller, W. Jantz, G. Pozina, B. Magnusson, A. Ellison. *Phys. Status Solidi C*, **0** (3), 1013 (2003).
- [11] M. Mermoux, A. Crisci, F. Baillet. *Mater. Sci. Forum.*, **433–436**, 353 (2003).
- [12] S. Ostapenko, Yu.M. Suleimanov, I. Tarasov, S. Lulu, S.E. Sadow. *J. Phys.: Condens. Matter*, **14**, 13 381 (2002).
- [13] Q. Li, A.Y. Polyakov, M. Skowronski, M.D. Roth, M.A. Fanton, D.W. Snyder. *J. Appl. Phys.*, **96**, 411 (2004).
- [14] D.M. Martin, H.K. Nielsen, P. Leveque, A. Hallen, G. Alfieri, B.G. Svensson. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1704 (2004).
- [15] Y. Negoro, K. Katsumoto, T. Kimoto, H. Matsunami. *J. Appl. Phys.*, **96**, 224 (2004).
- [16] L. Wang, J. Huang, X. Duo, Z. Song, Ch. Lin, C.-M. Zetterling, M. Östling. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 1551 (2000).
- [17] W. Cunningham, A. Gouldwell, G. Lamb, P. Roy, J. Scott, K. Mathieson, R. Bates, K.M. Smith, R. Cusco, I.M. Watson, M. Glaser, M. Rahman. *J. Phys. D*, **34**, 2748 (2001).
- [18] F. Nava, E. Vittone, P. Vanni, P.G. Fuocho, C. Lanzieri. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **514**, 126 (2003).
- [19] W. Cunningham, J. Melone, M. Horn, V. Kažukauskas, P. Roy, F. Doherty, M. Glaser, J. Vaitkus, M. Rahman. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **509**, 127 (2003).
- [20] R. Jasiulionis, H. Wershofer. *J. Environmental Radioactivity*, **79**, 157 (2005).
- [21] R. Silberger, C.H. Tsao. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **25**, 315 (1973).
- [22] L. Silver, C.H. Tsao, R. Silberger, T. Kanai, A.F. Barghouty. *Phys. Rev. C*, **47**, 1225 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

## Effects of irradiation by high-energy protons on the 4H-SiC detectors

V. Kažukauskas, R. Jasiulionis\*, V. Kalendra, J.-V. Vaitkus

Semiconductor Physics Department and Institute of Materials Science and Applied Research, Vilnius University, LT-10222 Vilnius, Lithuania  
\* Institute of Physics, LT-02300 Vilnius, Lithuania

**Abstract** Effects of irradiation by 24 GeV protons with doses of up to  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  on the 4H-SiC radiation detectors were investigated. B, Be, Li, He and H isotopes were formed in proton nuclear spallation reactions with carbon, and Al, Mg, Na, Ne, O and N isotopes were obtained in proton reactions with silicon. Activities and numbers of produced radionuclides were investigated. The total amount of formed stable isotopes was proportional to the irradiation dose and ranged from  $1.2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  up to  $5.9 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Significant changes of the contact characteristics were induced by the irradiation with the highest doses. The contact potential barrier had increased from 0.7–0.75 eV up to about 0.85 eV. Moreover, rectifying behaviour of the Schottky contacts became much less expressed. The observed effects are explained by the appearance of the irradiation-induced inhomogeneous regions of detectors.