

TCAD-моделирование высоковольтных $4H$ -SiC диодов с охранной полуизолирующей областью

© П.А. Иванов, Н.М. Лебедева[†]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] E-mail: Natali_lebedeva@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 16 октября 2020 г.

В окончательной редакции 29 октября 2020 г.

Принята к публикации 29 октября 2020 г.

Проведено TCAD-моделирование высоковольтных $4H$ -SiC $p^+ - n - n^+$ -диодов с охранной полуизолирующей i -областью, образованной за счет полной компенсации легирующих доноров в n -области глубокими ловушками захвата носителей заряда (энергетическое положение ловушек в запрещенной зоне $4H$ -SiC — 1.2 эВ ниже дна зоны проводимости). Показано, что при комнатной температуре эффективность работы полуизолирующей охранной i -области близка к 100%: напряжение лавинного пробоя $p^+ - n - n^+$ -диода с охранной i -областью составляет 1100 В и равно напряжению пробоя идеализированного диода с одномерной $p^+ - n - n^+$ -структурой. При повышении температуры выше 600 К i -область постепенно теряет свою функциональность в качестве охранной вследствие теплового выброса захваченных ловушками электронов. Полученные результаты кратко обсуждаются в плане практического использования радиационной технологии формирования полуизолирующей охранной i -области в $4H$ -SiC-приборах.

Ключевые слова: карбид кремния, диод, полуизолирующая охранная область, TCAD-моделирование.

DOI: 10.21883/FTP.2021.02.50509.9537

1. Введение

К настоящему времени для высоковольтных $4H$ -SiC-приборов разработаны разнообразные методы подавления преждевременного краевого пробоя [1]. В приборах с блокирующей n -базой часто применяют формирование на периферии базовой n -области локальных имплантированных областей p -типа. Во всех конструктивных вариантах исполнения подобных охранных систем мелкие имплантированные p - n -переходы позволяют расширить обедненную область основного перехода за его пределы (в латеральном направлении) на расстояние, превышающее толщину блокирующей n -базы. Это уменьшает кривизну силовых линий электрического поля на крае прибора и дает возможность поднять напряжение пробоя вплоть до его теоретически предельной величины. Существенным недостатком таких систем является то, что создание p -областей сопряжено с проведением прецизионных (а в некоторых вариантах многоступенчатых) процессов ионного легирования, предусматривающих высокотемпературные (1500–2000 °С) отжиги для активации внедренных примесей. Кроме этого, для формирования элементов некоторых охранных систем необходима прецизионная литография с разрешением менее 1 мкм, что заметно усложняет технологический процесс в целом. Поэтому поиск новых эффективных методов подавления краевого пробоя остается актуальным.

Одним из первых методов снижения краевого поля в эпитаксиальных SiC диодах было травление мезаструктур с вертикальными стенками. В мезаструктурных диодах с вертикальными стенками электрическое

поле на поверхности мезы удается понизить до величины поля в объеме, однако поверхностный пробой остается, как правило, доминирующим из-за наличия на поверхности различного рода структурных несовершенств, поверхностного заряда, загрязнений и т.п. Отчасти эту проблему можно решить, если вместо травления сформировать на периферии диода глубокую полуизолирующую i -область, как показано на рис. 1. Очевидное достоинство такого подхода состоит в том, что „вертикальная стенка“ формируется в объеме полупроводника, так что поверхностных эффектов просто нет. Если толщина полуизолятора будет сравнима с толщиной блокирующей n -базы, то напряжение пробоя диода может быть приближено в принципе к теоретическому пределу для одномерной барьерной структуры. В $4H$ -SiC диодах с напряжением пробоя 1000–3000 В толщина блокирующей n -базы составляет от 5 до 15 мкм (рис. 2), т.е. толщина i -области должна быть ~ 10 мкм.

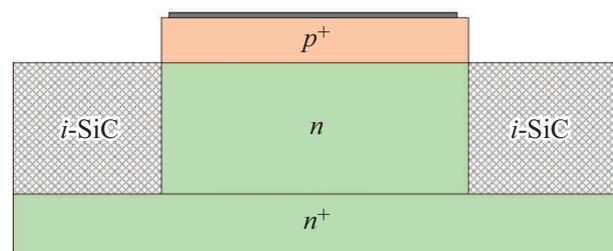


Рис. 1. Схематическая структура квазиодномерного $4H$ -SiC $p^+ - n - n^+$ -диода с охранной полуизолирующей i -областью.

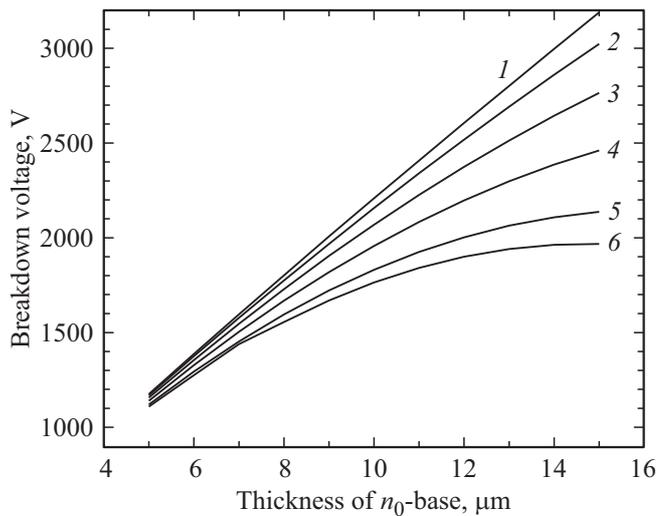


Рис. 2. Расчетные аналитические зависимости напряжения пробоя одномерного $4H$ -SiC p^+n-n^+ -диода от толщины блокирующей n -базы при различных концентрациях доноров, см^{-3} : 1 — 10^{15} , 2 — $3 \cdot 10^{15}$, 3 — $5 \cdot 10^{15}$, 4 — $7 \cdot 10^{15}$, 5 — $9 \cdot 10^{15}$, 6 — 10^{16} .

Ранее нами была показана возможность создания в n - $4H$ -SiC полуизолирующих слоев i - $4H$ -SiC толщиной ~ 10 мкм с помощью облучения высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона (компенсация донорной проводимости достигается за счет генерации глубоких термостабильных акцепторных дефектов с глубиной залегания в запрещенной зоне $4H$ -SiC ~ 1.2 В ниже дна зоны проводимости) [2,3].

В настоящей работе проведено TCAD-моделирование высоковольтных (1100 В) $4H$ -SiC p^+n-n^+ -диодов с охранной полуизолирующей областью, образованной за счет компенсации доноров в n -области глубокими акцепторными ловушками. Рассчитаны обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов в режиме лавинного пробоя. Получены двумерные распределения электрического поля и темпа генерации носителей при пробое. Определена температура, при которой i -область теряет свою функциональность. Полученные результаты кратко обсуждаются в плане практического использования радиационной технологии формирования полуизолирующей охранной i -области в $4H$ -SiC-приборах.

2. Объект и детали моделирования

В качестве объекта моделирования выбирался такой $4H$ -SiC p^+n-n^+ -диод, в котором толщина блокирующей n -базы (d) составляет ~ 10 мкм, и при этом $d > w_b$, где w_b — толщина области пространственного заряда (ОПЗ) p^+n -перехода при пробое. Критическая напряженность поля лавинного пробоя (E_b) идеализированного одномерного $4H$ -SiC p^+n-n^+ -диода с „полубесконечной“ n -базой предварительно рассчитывалась

по следующей эмпирической формуле [4]:

$$E_b \left(\frac{\text{В}}{\text{см}} \right) = \frac{2.49 \cdot 10^6}{1 - 0.25 \cdot \log \left(\frac{N(\text{см}^{-3})}{10^{16}} \right)}. \quad (1)$$

Напряжение лавинного пробоя (V_b) и толщина w_b рассчитывались по формулам

$$V_b = \frac{\varepsilon E_b^2}{2qN}, \quad (2)$$

$$w_b = \frac{2V_b}{E_b}. \quad (3)$$

При $N = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ рассчитанные параметры следующие: $E_b = 2.7$ В/см, $V_b = 1040$ В и $w_b = 7.7$ мкм. В итоге для моделирования был выбран $4H$ -SiC-диод со следующими параметрами эпитаксиальной p^+n-n^+ -структуры: концентрации акцепторов в p^+ -области и доноров в n^+ -области — $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно; концентрация доноров в n -области $N = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщины p^+ -, n - и n^+ -областей — 1, 8 и 1 мкм соответственно (рис. 3). Заштрихованная область II шириной 50 мкм и толщиной 10 мкм содержит глубокие моноэнергетические ловушки акцепторного типа. Параметры ловушек следующие: глубина залегания в запрещенной зоне $4H$ -SiC $E_C - E_t = 1.2$ эВ, концентрация $N_t = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (несколько больше концентрации доноров в блокирующей n -базе); фактор вырождения $g = 2$, сечение захвата электрона $\sigma_n = 10^{-14} \text{ см}^2$, сечение захвата дырки $\sigma_p = 10^{-16} \text{ см}^2$. Свободная от ловушек область I (объем диода) шириной 50 мкм при $x < 40$ мкм может рассматриваться как идеализированная одномерная p^+n-n^+ -структура.

Для двумерного численного моделирования использовался программный пакет SILVACO TCAD [5]. При моделировании были приняты следующие упрощающие допущения: 1) легирующие примеси в p^+ -, n - и n^+ -областях полностью ионизированы; 2) подложка и омические контакты к сильно легированным p^+ - и n^+ -областям имеют пренебрежимо малое электрическое сопротивление (подложка на рис. 3 не показана). Моделировался переходной процесс в простейшей цепи, включающей

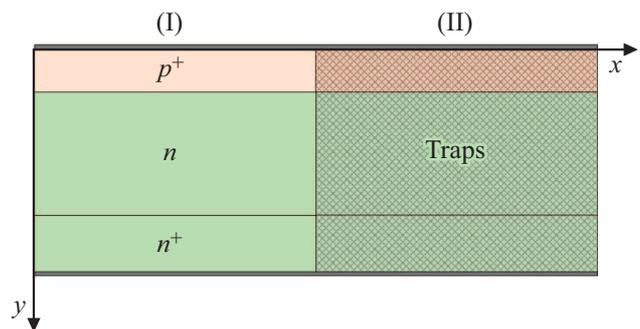


Рис. 3. Поперечное сечение моделируемого $4H$ -SiC p^+n-n^+ -диода. Размеры диода $50 \times 10 \times 1000$ мкм.

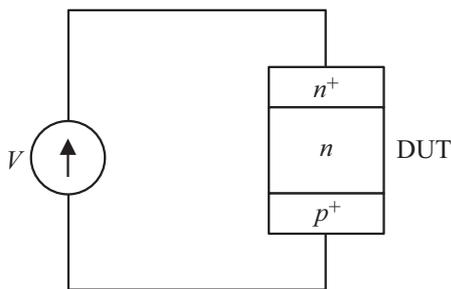


Рис. 4. Электрическая цепь для моделирования обратносмещенного 4H-SiC $p^+ - n - n^+$ -диода.

источник медленно изменяющегося со временем напряжения $V(t)$ и подключенный к источнику напряжения моделируемый 4H-SiC-диод (DUT на рис. 4). Модельный эксперимент имитирует измерение обратной вольт-амперной характеристики (ВАХ) на характеристикографе и состоит в следующем. Начиная с момента времени $t = 0$, напряжение медленно разворачивается со скоростью $dV/dt = 1$ В/с. Во время развертки напряжения записывается файл *pn_tr.log*, содержащий временную зависимость тока в цепи. Очевидно, что в любой момент времени t мгновенное значение тока $I(t)$ совпадает с его квазистационарным значением. Искомая зависимость $I(V)$ получается путем исключения параметра t из ВАХ, заданной параметрически: $I(t)$ и $V(t)$. По сути ось времени на зависимости $I(t)$ просто калибруется в значения напряжения V . Кроме временной зависимости тока, во время переходного процесса записывается файл *data.str*, содержащий пространственные распределения в $p^+ - n - n^+$ -структуре таких физических величин, как электрическое поле, темп лавинной генерации носителей, плотность тока и др. Это позволяет, в частности, выявить место локализации лавинного пробоя в полупроводниковой структуре. Из физических моделей, которые заложены в модуле ATLAS, использовались следующие: 1) модель низкополевой подвижности носителей тока [6] с параметрами для 4H-SiC из работы [7]; 2) модель насыщения дрейфовой скорости носителей тока [6] с параметрами для 4H-SiC из работы [8]; 3) модель ударной ионизации [9] с параметрами для 4H-SiC из работы [10]; 4) модель генерации-рекомбинации Шокли-Рида-Холла [11] с параметрами для 4H-SiC, принятыми в ATLAS по умолчанию. Известная для широкозонного 4H-SiC проблема запуска ударной ионизации при комнатной температуре была решена способом, который предлагается в описании ATLAS, а именно путем ограничения снизу плотности дырочного тока. В нашем случае плотность дырочного тока ограничивалась на уровне 10^{-6} А/см² (абсолютный ток 1 нА). Задача моделирования состояла в том, чтобы оценить эффективность работы i -области в качестве охранного контура, в том числе при повышенных температурах. Исходя из этого при моделировании температурно-зави-

симыми принимались только тепловые генерационно-рекомбинационные процессы (игнорировались, в частности, температурные зависимости ширины запрещенной зоны, дрейфовой скорости носителей тока, коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок и др.).

3. Результаты моделирования

На рис. 5 показано двумерное распределение концентрации свободных электронов в $p^+ - n - n^+$ -структуре в равновесных условиях при комнатной температуре. Как видно, в той части n -базы, которая находится в области II, свободных электронов практически нет ($n \sim 1$ см⁻³). Таким образом, объемный заряд в этой области близок к нулю (концентрация положительно заряженных ионизованных доноров равна концентрации отрицательно заряженных ионизованных акцепторных ловушек). Так как объемного заряда нет, приложенное внешнее электрическое поле в этой области должно быть почти однородным.

На рис. 6 показано двумерное распределение электрического поля в $p^+ - n - n^+$ -структуре при обратном напряжении $V = 1130$ В ($T = 300$ К). В той части n -базы, которая находится в области I, при $x < 40$ мкм электрическое поле имеет одномерный характер распределения. Максимальная величина поля (в плоскости $p^+ - n$ -перехода) составляет $2.8 \cdot 10^6$ В/см, а толщина ОПЗ $w_b = 7.8$ мкм. В той части n -базы, которая находится в области II, электрическое поле распределено почти однородно, а его величина вдвое меньше максимального поля в области I. Показанная картина распределения поля говорит о том, что лавинный пробой диода с

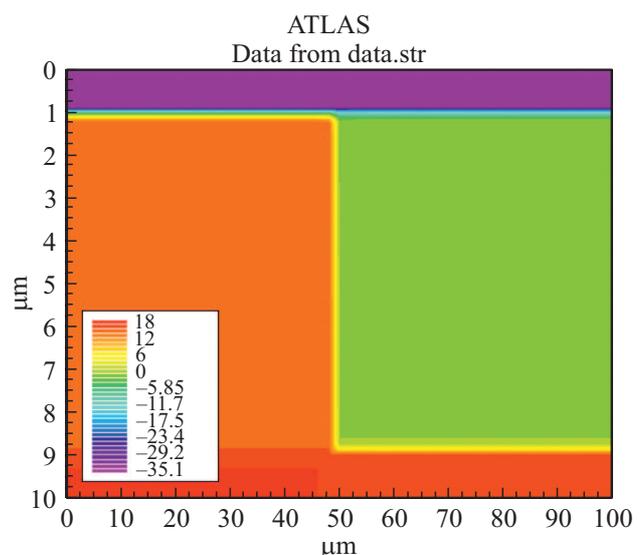


Рис. 5. Двумерное распределение концентрации свободных электронов (выраженной как $\log n$) в $p^+ - n - n^+$ -структуре в равновесных условиях ($T = 300$ К). Концентрация представлена как $\log n$ [см⁻³].

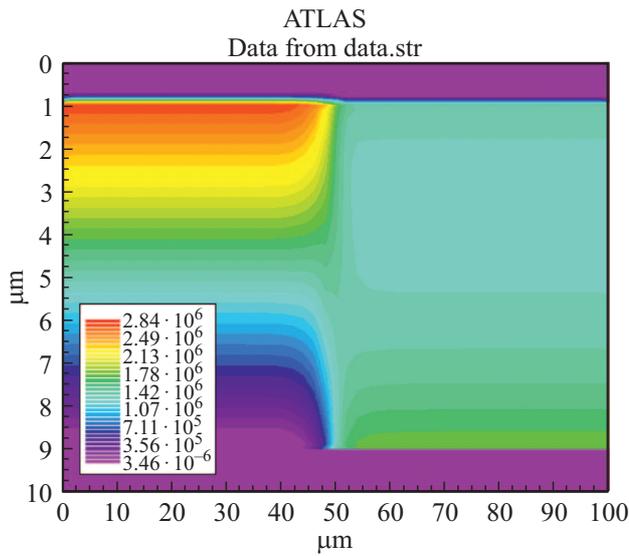


Рис. 6. Двумерное распределение электрического поля E [В/см] в p^+-n-n^+ -структуре при обратном напряжении 1130 В (температура $T = 300$ К).

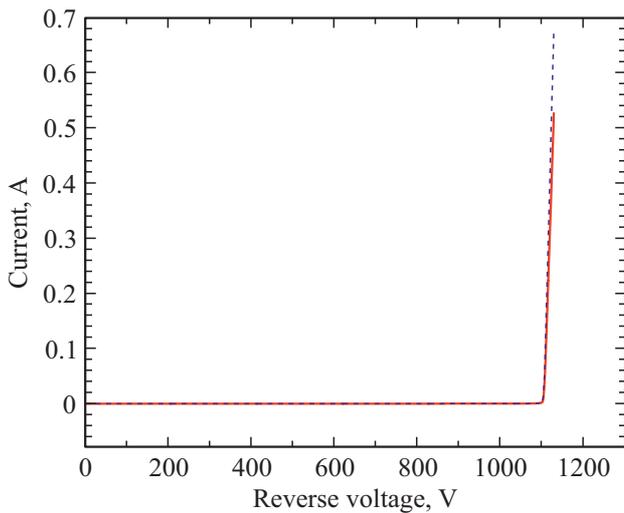


Рис. 7. Обратные ВАХ диодов без i -области (пунктирная линия) и для диода с i -областью (сплошная линия) при развертке напряжения от 0 до 1130 В ($T = 300$ К).

i -областью не должен отличаться от пробоя идеализированного одномерного диода.

На рис. 7 показаны две ВАХ, рассчитанные для идеализированного одномерного диода без i -области и для диода с i -областью; напряжение развертывалось от нуля до 1130 В ($T = 300$ К). Показанные ВАХ практически совпадают. Напряжение лавинного пробоя составляет ~ 1100 В.

На рис. 8 показано двумерное распределение скорости лавинной генерации носителей в диоде с i -областью ($V = 1130$ В). Как видно, область лавинной генерации полностью локализована в одномерной части области I. Таким образом, при комнатной температуре эффектив-

ность работы охранной i -области, образованной за счет компенсации легирующих доноров в n -области глубокими ловушками захвата носителей заряда, близка к 100%.

При повышении температуры эффективность охранной области должна постепенно деградировать вследствие теплового выброса захваченных электронов в зону проводимости.

Во-первых, в условиях равновесия с ростом температуры степень заполнения ловушек электронами должна уменьшаться, а концентрация свободных электронов в n -базе должна, напротив, увеличиваться. На рис. 9 показаны продольные распределения равновесной концентрации свободных электронов в n -базе ($y = 5$ мкм)

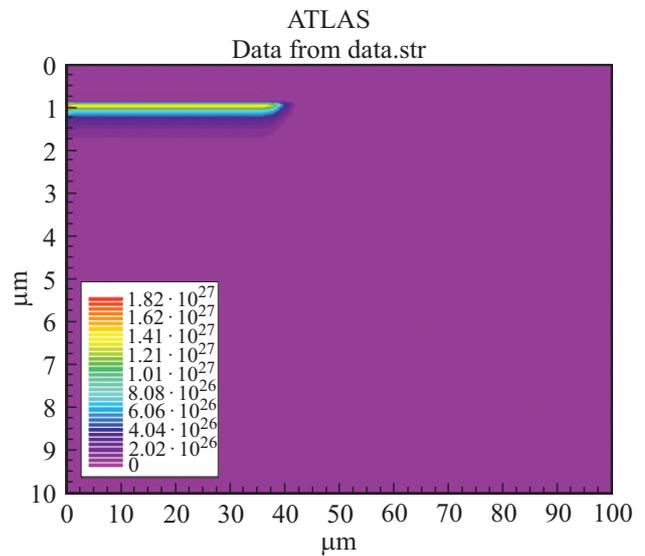


Рис. 8. Двумерное распределение скорости лавинной генерации носителей G [$\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$] в диоде с i -областью при $V = 1130$ В ($T = 300$ К).

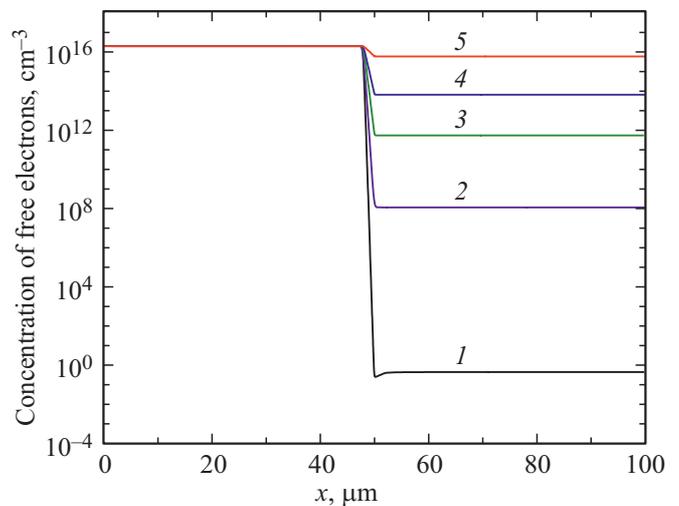


Рис. 9. Продольные распределения концентрации свободных электронов в n -базе ($y = 5$ мкм). Температура, К: 1 — 300, 2 — 500, 3 — 700, 4 — 900, 5 — 1300.

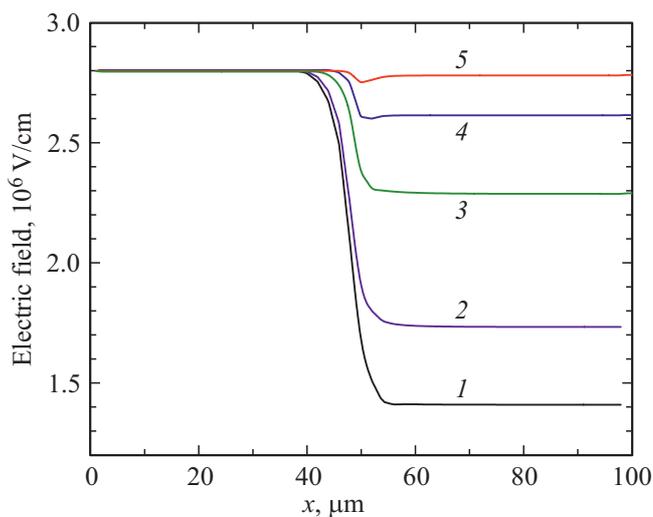


Рис. 10. Продольные распределения электрического поля в n -базе ($y = 1$ мкм). Температура, К: 1 — 300, 2 — 500, 3 — 600, 4 — 700, 5 — 900.

при нескольких температурах в диапазоне от 300 до 1300 К. Действительно, с ростом температуры концентрация свободных электронов растет, однако степень компенсации донорной проводимости в n -области остается близкой к 100% вплоть до температуры 900 К (при $T = 900$ К отношение концентраций свободных электронов и легирующих доноров составляет $n/N = 0.003$). И лишь при температуре > 1300 К концентрация свободных электронов в n -базе сравнивается с концентрацией доноров в ней.

Во-вторых, при наличии внешнего поля степень заполнения ловушек электронами должна уменьшаться с ростом температуры еще быстрее, так как свободных электронов в обедненной n -базе нет, а заполнение ловушек регулируется исключительно протекающим генерационным током. При этом следует ожидать, что при повышении температуры пространственное распределение поля будет видоизменяться, стремясь в конечном итоге к распределению поля в объеме диода. На рис. 10 показаны продольные распределения поля в n -базе ($y = 1$ мкм) при нескольких температурах в диапазоне от 300 до 900 К. Действительно, уже при $T = 600$ К поле в области II достигает 80% от величины поля в области I, а при $T = 900$ К поля практически выравниваются, так что охранная i -область уже полностью теряет свою функциональность.

4. Заключение

Проведенное моделирование показало, что краевой полуизолирующий контур может служить эффективной охранной системой в высоковольтных диодах на основе 4H-SiC, в том числе при повышенных температурах (приблизительно до 600 К).

В заключение важно отметить несколько моментов, которые касаются реальной структуры диодных чипов, возможностей радиационной технологии формирования i -слоев в 4H-SiC и свойств этих слоев.

В настоящей работе для простоты и наглядности промоделирована структура, половина которой по сути представляет собой плоский $p^+ - i - n^+$ -конденсатор с i -областью в качестве диэлектрика. При $x > 55$ мкм распределение поля в этом конденсаторе квазиодномерное (см. рис. 6 и 10). Реальная же структура диодного чипа ближе к показанной на рис. 1. Очевидно, что картина распределения поля в i -области реальной структуры будет принципиально двумерной. При этом электрическое поле не будет проникать в i -область на расстояние больше толщины n -базы (по порядку величины). Поэтому по сравнению с промоделированным диодом охранный i -контур реальных диодов может быть более эффективным (в том числе при повышенных температурах).

При изготовлении приборов по групповой технологии при формировании локальных i -областей необходимо надежно маскировать активную область дискретных приборов от потока ионов (см. рис. 1). Маскирующие элементы должны иметь вертикальные стенки и быть достаточно толстыми для полного поглощения высокоэнергетичных частиц (например, в металлах глубина проникновения ионов аргона с энергией 53 МэВ составляет 5–7 мкм). Кроме своего основного предназначения, маскирующие элементы должны иметь хорошие адгезионные характеристики и высокую электропроводность. Наконец, они должны допускать проведение постимплантационного отжига при температурах до 600°C. Наиболее технологичным вариантом формирования маскирующих элементов является, по нашему мнению, локальное гальваническое осаждение металлических столбиков с вертикальными стенками (высотой ~ 10 мкм) через маску из фоторезиста.

В цитированных во Введении работах [2,3] описана радиационная технология формирования i -слоев в умеренно легированном 4H-SiC n -типа с концентрацией доноров $\sim 10^{16}$ см $^{-3}$. Вообще говоря, не менее интересно формирование i -слоев в умеренно легированном 4H-SiC p -типа, так как структура многих приборов на основе 4H-SiC включает p -слой: $p^+ - p - n - n^+$ -структуру имеют дрейфовые диоды с резким восстановлением [12] и встроенные диоды МОП-транзисторов с инверсным n -каналом, $n^+ - p - n - n^+$ -структуру имеют p -базовые биполярные транзисторы.

Наконец, что касается электрических параметров компенсирующих радиационных дефектов, вводимых облучением, то пока открытым остается вопрос о надежных измеренных величинах сечений захвата электронов и дырок этими дефектами. (В настоящей работе мы приняли их равными 10^{-14} и 10^{-16} см 2 , соответственно, ориентируясь на исследования других структурных дефектов в карбиде кремния). Вообще говоря, это момент весьма важен, так как сечения захвата влияют как на степень заполнения уровней дефектов основными

носителями, так и на величину генерационных токов утечки, протекающих через i -область.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Kimoto, J.A. Cooper. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications* (Wiley-IEEE Press, 2014).
- [2] П.А. Иванов, М.Ф. Кудояров, М.А. Козловский, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **50**, 937 (2016).
- [3] П.А. Иванов, А.С. Потапов, М.Ф. Кудояров, М.А. Козловский, Т.П. Самсонова. Письма ЖТФ, **44**, 11 (2018).
- [4] A.O. Konstantinov, Q. Wahab, N. Nordell, U. Lindefelt. Appl. Phys. Lett., **71**, 90 (1997).
- [5] <http://www.silvaco.com>
- [6] D.M. Caughey, R.E. Thomas. Proc. IEEE, **55**, 2192 (1967).
- [7] Т.Т. Мнацаканов, М.Е. Левинштейн, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков. ФТП, **38**, 56 (2004).
- [8] P.A. Ivanov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova, I.V. Grekhov. Solid-State Electron., **123**, 15 (2016).
- [9] S. Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* (Springer-Verlag, 1984).
- [10] T. Hatakeyama, T. Watanabe, T. Shinohe, K. Kojima, K. Arai, N. Sano. Appl. Phys. Lett., **85**, 1380 (2004).
- [11] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. Т. 1 (М., Мир, 1984).
- [12] П.А. Иванов, О.И. Коньков, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов. Письма ЖТФ, **44**, 3 (2018).

Редактор А.Н. Смирнов

TCAD-simulation of high-voltage 4H-SiC diodes with the edge semi-insulating region

P.A. Ivanov, N.M. Lebedeva

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract High-voltage 4H-SiC based $p^+ - n - n^+$ -diodes have been simulated by using a TCAD software. A semi-insulating i -region formed at the diode edge is investigated as a promising edge termination technique. In simulations, the i -region is created by introducing the deep level traps (1.2 eV below the conduction band) which can capture all free electrons in the n -base. It is shown that the efficiency of the edge i -region is close to 100%: the avalanche breakdown voltage of the $p^+ - n - n^+$ -diode is calculated to be 1100 V that is equal to the breakdown voltage of an idealised diode with one-dimensional $p^+ - n - n^+$ -structure. At temperatures above 600 K the i -region in question loses its functionality due to the thermal emission of electrons captured by the traps. The results obtained are discussed in terms of practical use of radiation technology for the formation of the semi-insulating regions in the 4H-SiC devices.