

# Устойчивость высоковольтных (1430 В) $4H$ -SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -диодов к лавинному пробую

© П.А. Иванов, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов

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

E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

(Получена 3 мая 2018 г. Принята к печати 14 мая 2018 г.)

Проведены исследования электротеплового пробоя в высоковольтных (1430 В)  $4H$ -SiC  $p^+ - n_0 - n^+$ -диодах с толщиной  $n_0$ -базы 7.5 мкм, концентрацией доноров  $8.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и площадью  $4.9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . Устойчивость диодов к лавинному пробую охарактеризована максимальной энергией одиночного импульса лавинного тока, которая может быть рассеяна диодом до того, как происходит его катастрофический отказ (деструкция). При длительности импульса  $\sim 1 \text{ мкс}$  максимальная энергия составляет 1.4 мДж ( $2.9 \text{ Дж/см}^2$ ). Показано, что деструкция диодов вызвана локальным перегревом структуры диода до температуры около 1600 К, при которой концентрация собственных носителей становится больше концентрации легирующих доноров в блокирующей  $n_0$ -базе.

DOI: 10.21883/FTR.2018.12.46769.8903

## 1. Введение

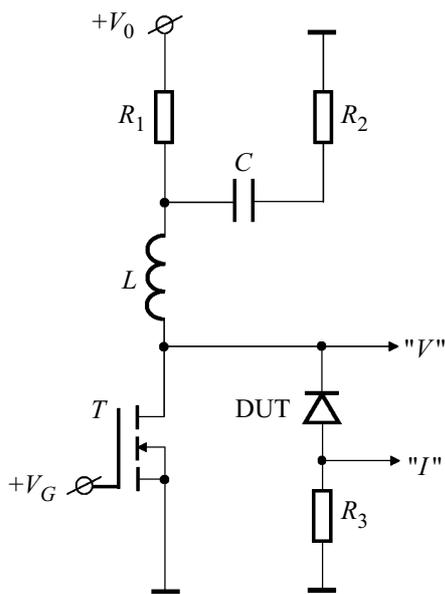
Под устойчивостью полупроводниковых диодов к лавинному пробую понимают способность диодов рассеивать большую мощность в лавинном режиме без деструкции. (Электротепловой пробой диодов в обратном направлении начинается с обратимого лавинного пробоя, развитие которого по мере увеличения напряжения и тока, в конце концов, приводит к необратимому тепловому пробую и к деструкции диода вследствие нарушения баланса выделяемой и отводимой в диоде мощности). Критическим параметром, определяющим работоспособность  $p^+ - n_0 - n^+$ -диода, является температура, при которой концентрация собственных носителей в полупроводнике становится сравнимой с концентрацией легирующих примесей в базовой  $n_0$ -области диода. В таком широкозонном полупроводнике, как  $4H$ -SiC (ширина запрещенной зоны 3.24 эВ), концентрация собственных носителей при комнатной температуре чрезвычайно мала и составляет  $10^{-8} \text{ см}^{-3}$ . В высоковольтных (свыше 1000 В) диодах  $4H$ -SiC уровень легирования блокирующей базы находится в пределах от  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и выше, концентрация собственных носителей достигает таких величин лишь при нагреве свыше 1300 К. Поскольку  $4H$ -SiC обладает высокой теплопроводностью (около  $5 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$  при комнатной температуре), можно ожидать, что  $4H$ -SiC  $p^+ - n_0 - n^+$ -диоды будут иметь высокую устойчивость к лавинному пробую. Количественно устойчивость диодов к лавинному пробую принято характеризовать так называемой максимальной лавинной энергией ( $E_{av,max}$ ), которая может быть рассеяна диодом до того, как происходит его катастрофический отказ (величину  $E_{av,max}$  определяют, как правило, при пропуске через диод одиночного импульса лавинного тока). К настоящему времени на основе  $4H$ -SiC разработаны силовые диоды Шоттки с JBS-структурой, в которых удельная величина максимальной лавинной

энергии достигает нескольких Дж/см<sup>2</sup> [1–3] (площадь силовых  $4H$ -SiC диодов Шоттки составляет  $\sim 0.1 \text{ см}^2$ ). Говоря об устойчивости  $p^+ - n_0 - n^+$ -диодов к лавинному пробую, необходимо иметь в виду, что на их токовый перегрев существенное влияние должны оказывать условия теплоотвода, включая размеры и конфигурацию блокирующей  $n_0$ -базы, где в лавинном режиме выделяется практически вся энергия. В импульсной и СВЧ-технике широко применяются диоды, имеющие малую электрическую емкость (малую площадь). Поэтому представлялось интересным исследовать устойчивость к лавинному пробую высоковольтных  $4H$ -SiC  $p^+ - n_0 - n^+$ -диодов с малыми геометрическими размерами блокирующей базы. В настоящей работе проведены исследования электротеплового пробоя в 1430 В  $4H$ -SiC  $p^+ - n_0 - n^+$ -диодах с толщиной  $n_0$ -базы 7.5 мкм и площадью  $4.9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ .

## 2. Эксперимент

### 2.1. Образцы

Мезаэпитаксиальные диоды с  $p^+ - n_0 - n^+$ -структурой изготавливались на основе коммерческой  $4H$ -SiC-пластины. Согласно спецификации пластины, концентрация доноров в  $n_0$ -слое составляет  $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; толщина  $n_0$ -слоя 7 мкм; концентрации акцепторов и доноров в  $p^+$ - и  $n^+$ -слоях  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно; толщины  $p^+$ - и  $n^+$ -слоев  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Постростовая технология изготовления диодов с „плавающими“ охранными кольцами детально описана нами ранее в работе [4]. Площадь  $p^+ - n_0$ -перехода в изготовленных диодах  $S = 4.9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ ; размер чипов  $1 \times 1 \text{ мм}$ . Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных диодных чипов измерялись с помощью прижимного зонда (без использования специального теплоотвода). На время измерений чипы погружались в диэлектрическую жидкость — силиконовое масло.



**Рис. 1.** Импульсная схема тестирования диодов на откат.  $R_1 = 12$  кОм,  $R_2 = 4.3$  Ом,  $R_3 = 50$  Ом,  $C = 2200$  мкФ,  $L = 2.2$  мГн,  $T$  —  $4H$ -SiC МОП-транзистор C2M1000170.

## 2.2. Схема импульсных испытаний

Импульсные испытания диодов в лавинном режиме проводились в электрической схеме, показанной на рис. 1. В зарубежной литературе данная схема получила название Unclamped Inductive Switching (UIS). Источником импульсного питания в схеме на рис. 1 служит электролитический конденсатор  $C$  большой емкости, заряженный до напряжения  $V_0 = 50$  В (величина  $V_0$  выбирается намного меньше, чем статическое напряжение пробоя диода  $V_b$ ). Исходно к исследуемому диоду приложено обратное напряжение  $V_0$ . Это же напряжение приложено к стоку закрытого МОП-транзистора ( $T$ ). Когда транзистор  $T$  открывается импульсом напряжения  $V_G$  на затворе, конденсатор  $C$  разряжается через открытый транзистор, индуктивность  $L = 2.2$  мГн и сопротивление  $R_2 = 4.3$  Ом. Пиковый зарядный ток в индуктивности  $L$  может варьироваться изменением длительности открытого состояния транзистора  $T$  (изменением длительности импульса  $V_G$ ). После закрывания транзистора  $T$  ток из него быстро перебрасывается в исследуемый диод (DUT) вместе с последовательно включенным измерительным резистором  $R_3 = 50$  Ом. При этом на диоде генерируется обратное напряжение, превышающее напряжение статического пробоя  $V_b$ . Далее по мере разряда индуктивности  $L$  ток падает, напряжение остается выше  $V_b$ . И наконец, когда ток уменьшается практически до нуля, напряжение также снижается до исходной величины  $V_0$ . Временные диаграммы напряжения на диоде и тока через него записываются двухканальным цифровым осциллографом. (Измеряемые импульсные напряжения передаются на входы осциллографа через широкополос-

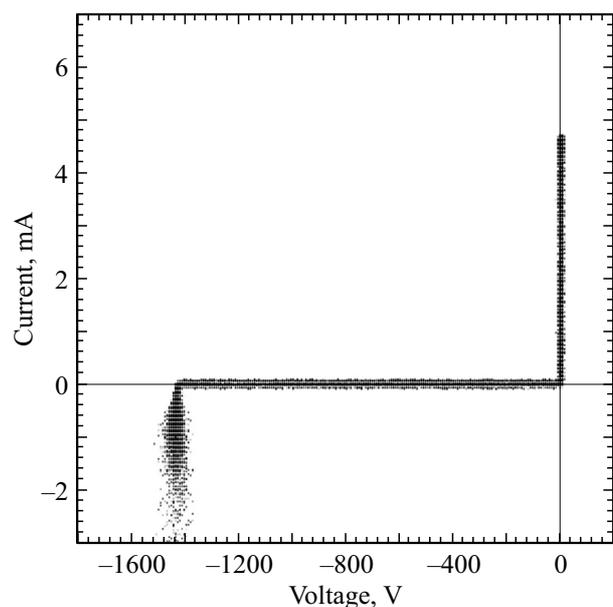
ные аттенюаторы). Мгновенная мощность  $P(t)$ , которая рассеивается во время лавинного процесса, рассчитывается путем перемножения мгновенных величин тока  $I(t)$  и напряжения  $V(t)$ . Полная энергия, рассеянная при прохождении импульса лавинного тока, определяется как интеграл от мощности по времени.

## 3. Экспериментальные результаты

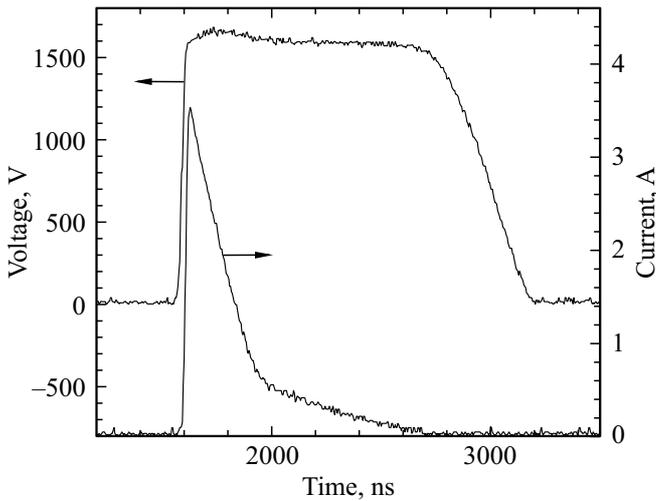
На рис. 2 показана типичная ВАХ изготовленных диодов, снятая с помощью высоковольтного характеристикографа. Как видно, в обратном направлении резкий пробой диода наступает при напряжении  $V_b = 1430$  В (при токах  $\sim 1$  мА пробой имеет микроплазменный характер, о чем свидетельствует наблюдаемый шум). Для определения концентрации доноров в блокирующей  $n_0$ -базе проводились измерения вольт-фарядных характеристик диодов на частоте 1 МГц с помощью цифрового измерителя иммитанса E7-20. Измеренная концентрация доноров в эпитаксиальном  $n_0$ -слое составляет  $N = 8.0 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ . Толщина  $n_0$ -базы ( $d$ ) может быть определена по измеренному напряжению пробоя. В случае „проколотой“ базы напряжение пробоя ( $V_b$ ) и толщина базы  $d$  связаны уравнением

$$V_b = E_b d - \frac{qNd^2}{2\epsilon}, \quad (1)$$

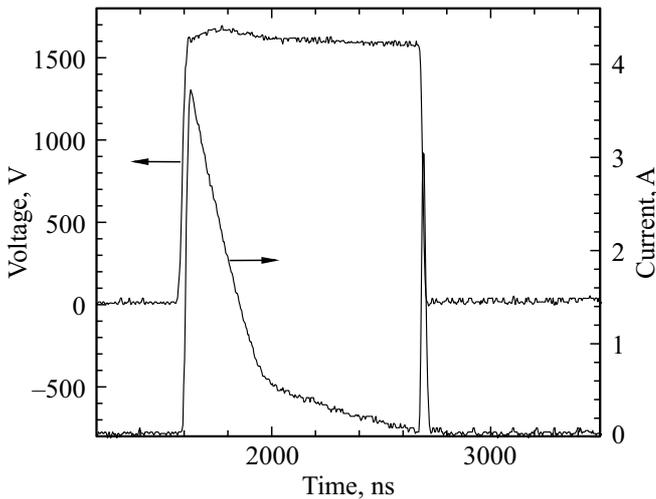
где  $q$  — элементарный заряд,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость  $4H$ -SiC,  $E_b$  — критическое поле лавинного пробоя  $4H$ -SiC  $p^+ - n_0$ -перехода. Величина  $E_b$  связана с концентрацией доноров  $N$  в блокирующей  $n_0$ -области



**Рис. 2.** Типичная ВАХ изготовленных диодов, снятая с помощью высоковольтного характеристикографа. Напряжение статического пробоя  $V_b = 1430$  В.



**Рис. 3.** Осциллограммы тока и напряжения, записанные при пиковом лавинном токе 3.5 А. Лавинный пробой диода имеет обратимый характер.



**Рис. 4.** Осциллограммы тока и напряжения, записанные при пиковом лавинном токе 3.7 А. Бросок тока при уменьшении напряжения до нуля (в момент времени, близком к окончанию лавинного импульса) свидетельствует о деструкции диода.

следующим эмпирическим соотношением [5]:

$$E_b \left( \frac{\text{В}}{\text{см}} \right) = \frac{2.49 \cdot 10^6}{1 - 0.25 \cdot \log \left( \frac{N(\text{см}^{-3})}{10^{16}} \right)} = 2.43 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}} \quad (2)$$

при  $N = 8.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Рассчитанная из уравнения (1) толщина  $n_0$ -базы  $d = 7.5 \text{ мкм}$ .

На рис. 3 и 4 для одного из диодов показаны осциллограммы тока и напряжения, измеренные в схеме UIS. На рис. 3 пиковый лавинный ток составляет 3.5 А (плотность тока  $7100 \text{ А/см}^2$ ). Далее ток падает со временем (происходит разряд накопительной индуктивности). Показанные на рис. 3 осциллограммы говорят о том, что лавинный пробой обратимый. Действительно,

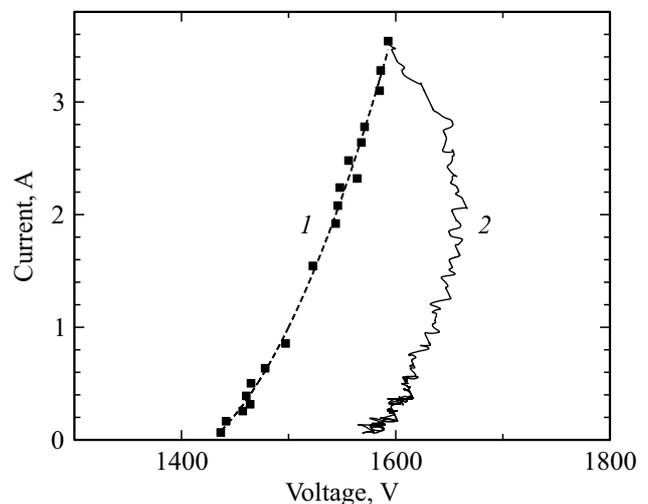
ВАХ диода, показанная на рис. 2, после пропуска лавинного импульса не деградировала. На рис. 4 пиковый лавинный ток (3.7 А) лишь чуть больше по сравнению с рис. 3. Однако в момент времени, близком к окончанию лавинного импульса, наблюдается резкий бросок тока при уменьшении напряжения до нуля. Это говорит о том, что произошел катастрофический отказ диода. Действительно, контроль ВАХ после пропуска лавинного импульса подтвердил, что произошла деструкция диода, выражающаяся в потере его блокирующей способности. Лавинная энергия, рассчитанная из зависимостей  $I(t)$  и  $V(t)$ , показанных на рис. 3, составляет  $E_{av,max} = 1.4 \text{ мДж}$ .

### 4. Обсуждение результатов

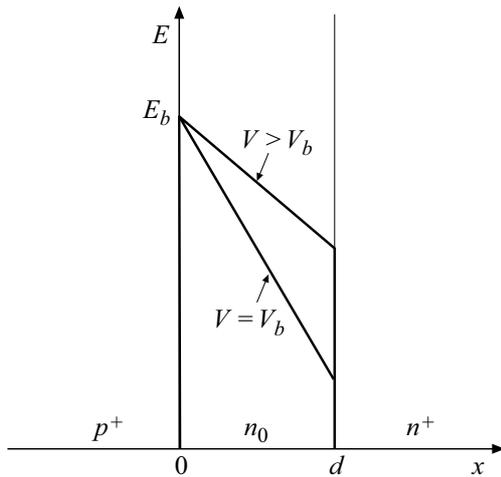
Используя измеряемые в схеме UIS осциллограммы тока и напряжения, можно построить две разных ВАХ диода в лавинном режиме (рис. 5).

#### 4.1. Изотермическая ВАХ

На рис. 5 точками показана ВАХ, построенная по пиковым значениям тока и соответствующим им значениям напряжения. Построенная таким способом ВАХ должна быть близкой к изотермической. Напряжение пробоя, полученное экстраполяцией ВАХ к  $I = 0$ , составляет 1430 В. Важнейшей характеристикой диода, работающего в лавинном режиме, является его лавинное сопротивление  $R_b$  (дифференциальное сопротивление на лавинном участке ВАХ). В нашем случае на начальном участке ВАХ (до тока 1 А)  $R_b = 80 \text{ Ом}$ . На рис. 6 показано распределение электрического поля в  $p^+ - n_0 - n^+$ -диоде с „проколотой“  $n_0$ -базой для двух случаев: 1)  $V = V_b$  и 2)  $V > V_b$ . (Лавинное умножение происходит в очень тонком слое, непосредственно примыкающем к  $p^+ - n_0$ -переходу [6]). В первом случае



**Рис. 5.** Изотермическая (1) и неизотермическая (2) ВАХ изготовленных диодов.



**Рис. 6.** Распределение электрического поля в  $p^+ - n_0 - n^+$ -диоде с „проколотой“  $n_0$ -базой в режиме лавинного пробоя.

распределение поля в  $n_0$ -базе задается концентрацией доноров  $N$ :

$$E(x) = E_b - \frac{qNx}{\epsilon}. \tag{3}$$

Во втором случае, помимо положительного объемного заряда ионизованных доноров, необходимо учитывать отрицательный объемный заряд свободных электронов, движущихся с насыщенной скоростью  $v$  в  $n_0$ -базе ( $v = 7.8 \cdot 10^6$  см/с [7]). Ток  $I$  и концентрация электронов  $n$  связаны соотношением

$$I = qnvS. \tag{4}$$

В присутствии свободных электронов градиент поля в  $n_0$ -базе уменьшается, так что

$$V = E_b d - \frac{q(N - n)d^2}{2\epsilon}. \tag{5}$$

Из формул (4)–(5) получаем следующее выражение для лавинного сопротивления диода:

$$R_b = \frac{V - V_b}{I} = \frac{d^2}{2\epsilon v S}. \tag{6}$$

Рассчитанная по формуле (6) величина лавинного сопротивления составляет 83 Ом, что почти точно совпадает с экспериментальным значением. Наблюдаемую суперлинейность ВАХ качественно можно объяснить тем, что при увеличении плотности тока область умножения носителей начинает расширяться (при  $n \rightarrow N$ ), так что на распределение электрического поля в базе начинает оказывать влияние не только объемный заряд электронов, но и объемный заряд дырок. Очевидно, что появление положительного объемного заряда дырок должно приводить к уменьшению лавинного сопротивления диода (вплоть до возникновения участка ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением).

### 4.2. Неизотермическая ВАХ

Кривая 2 на рис. 5 построена по осциллограммам тока и напряжения, показанным на рис. 3, путем исключения временного параметра из зависимостей  $I(t)$  и  $V(t)$ . Построенная таким способом ВАХ уже не будет изотермической, поскольку во время пропускания лавинного импульса происходит сильный разогрев базовой области диода. Поскольку  $4H-SiC$   $p^+ - n_0$ -переходы имеют положительный температурный коэффициент напряжения пробоя [7–9], кривая 2 на рис. 5 выглядит как S-образная. Отметим, что сдвиг напряжения в сторону больших значений достигает 150 В.

Энергия, рассеиваемая в диоде за время пропускания импульса лавинного тока до его деструкции, составляет  $E_{av,max} = 1.4$  мДж. Характерная длина тепловой диффузии  $L_T$ , на которую тепло распространяется за время прохождения лавинного импульса  $\Delta t = 1$  мкс, оценивается следующим образом:

$$L_T = \sqrt{\frac{K}{\rho C} \Delta t} = 3 \text{ мкм}, \tag{7}$$

где  $K$ ,  $C$  и  $\rho$  — средние величины теплопроводности, теплоемкости и удельного веса  $4H-SiC$  соответственно. Величина локального перегрева  $\Delta T$  в структуре диода рассчитывается следующим образом:

$$\Delta T = \frac{E_{av,max}}{C\rho(d + L_T)S} = 1300 \text{ К}. \tag{8}$$

При локальной температуре в структуре диода  $T = 1600$  К концентрация собственных носителей в  $4H-SiC$  составляет  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Таким образом, наблюдаемый электротепловой пробой обусловлен перегревом перехода до такой температуры, при которой концентрация собственных носителей становится больше концентрации легирующих доноров в блокирующей  $n_0$ -базе.

### 5. Заключение

В заключение важно подчеркнуть следующее. В исследованных  $4H-SiC$   $p^+ - n_0 - n^+$ -диодах измеренная величина максимальной лавинной энергии близка к предельной. При однородном протекании лавинного тока катастрофический отказ диодов происходил при таких условиях, когда локальный перегрев импульсным током достигает температуры 1600 К, при которой из-за высокой концентрации собственных носителей ( $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) быстро развивается необратимый тепловой пробой. В дальнейшем мы планируем исследовать электротепловой пробой в  $4H-SiC$   $p^+ - n_0 - n^+$ -диодах при пропускании импульсов с длительностью в наносекундном диапазоне. Это позволит ограничить саморазогрев током и выявить иные механизмы отказов в лавинном режиме.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00094).

## Список литературы

- [1] T. Basler, R. Rupp, R. Gerlach, B. Zippelius, M. Draghici. PCIM Europe Proceedings, 180 (2016).
- [2] A. Konstantinov, S. Jinman, S. Young, F. Allerstam, T. Neyer. PCIM Europe Proceedings, 586 (2015).
- [3] A. Konstantinov, S. Jinman, S. Young, B. Lee, F. Allerstam, T. Neyer, S. Akram. Mater. Sci. Forum., **858**, 777 (2016).
- [4] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова. ФТП, **39**(12), 1475 (2005).
- [5] A.O. Konstantinov, Q. Wahab, N. Nordell, U. Lindefelt. APL, **71** (1), 90 (1997).
- [6] А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов. *Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ* (Моск. типография № 10 Главполиграфпрома, 1968).
- [7] П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, И.В. Грехов. ФТП, **51** (3), 390 (2017).
- [8] A.O. Konstantinov, N. Nordell, Q. Wahab, U. Lindefelt. APL, **73** (13), 1850 (1998).
- [9] K.V. Vassilevski, K. Zekentes, A.V. Zorenko, L.P. Romanov. IEEE Electron Dev. Lett., **21** (10), 485 (2000).

Редактор Г.А. Оганесян

## Avalanche breakdown stability of high voltage (1430 V) 4H-SiC $p^+ - n_0 - n^+$ -diodes

P.A. Ivanov, T.P. Samsonova, A.S. Potapov

Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The electro-thermal breakdown of high-voltage (1430 V) 4H-SiC  $p^+ - n_0 - n^+$ -diodes has been investigated. The donor concentration in the  $n_0$ -base, the base thickness and the area were  $8.0 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $7.5 \mu\text{m}$  and  $4.9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ , respectively. The maximum avalanche energy of the diodes was determined by pulsed measurements with UIS (Unclumped Inductice Switching) circuit. At the pulse duration  $\sim 1 \mu\text{s}$  the maximum avalanche energy was measured to be 1.4 mJ ( $2.9 \text{ J/cm}^2$ ). It is shown that destruction of the diodes is caused by local self-heating up to the temperature of about 1600 K, when the concentration of intrinsic carriers become higher than the donor concentration in the  $n_0$ -base.