

О быстром восстановлении блокирующей способности карбид-кремниевых диодов

© И.В. Грехов, А.С. Кюрегян*[¶], Т.Т. Мнацаканов*, С.Н. Юрков*

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

* Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина,
Москва, Россия

(Получена 10 февраля 2003 г. Принята к печати 17 февраля 2003 г.)

Проведен сравнительный анализ влияния различных факторов, определяющих характер восстановления блокирующей способности карбид-кремниевых диодов. Показано, что доминирующим является механизм, обусловленный большой величиной отношения подвижностей электронов и дырок в SiC. Именно этот механизм приводит к тому, что, независимо от асимметрии эффективности эмиттеров и вызванной ею начальной неоднородности плазмы в высокоомной базе, эффект сверхбыстрого (субнаносекундного) обрыва тока может наблюдаться при восстановлении карбид-кремниевых диодов с базой p -типа, а „мягкое“ восстановление присуще только диодам с базой n -типа.

Карбид кремния является одним из наиболее перспективных материалов для создания элементной базы мощной электроники. За последние 10 лет на основе SiC были изготовлены образцы выпрямительных диодов с p - n -переходами [1], барьеры Шоттки [2], биполярных [3] и МОП транзисторов [4] и тиристоров [5], во многих отношениях превосходящие кремниевые аналоги. Недавно в работе [6] была экспериментально продемонстрирована возможность применения SiC-диодов в совершенно новом для этого материала качестве быстрых размыкателей тока, которые могут быть использованы в генераторах высоковольтных нано- и субнаносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии [7]. Необходимый для такого применения эффект сверхбыстрого восстановления блокирующей способности (так называемое „жесткое“ восстановление) наблюдался только в диодах с высокоомной базой p -типа, тогда как диоды с базой n -типа восстанавливались „мягко“. Авторы работы [6] предположили, что главной причиной этих особенностей восстановления SiC-диодов является резкое (в десятки раз) уменьшение времени жизни неравновесных носителей заряда в тонком (порядка 0.1 мкм) слое на границе между высокоомной базой и p^+ -эмиттером.¹ Согласно [6], такой рекомбинационный слой приводит к начальной асимметрии распределения биполярной плазмы в базе диода, которая может быть вызвана и сильным снижением коэффициента инжекции p^+ -эмиттера. Поэтому было высказано предположение, что механизм „жесткого“ восстановления SiC-диодов с базой p -типа такой же, как и у инверсно восстанавливающихся кремниевых диодов (ИВД) с базой n -типа и низкоэффективным n^+ -эмиттером [7]. Однако помимо этого механизма на характер восстановления SiC-диодов могут влиять еще по крайней мере три фактора.

Один из них — большая (0.24 эВ) энергия ионизации акцепторных уровней Al в SiC [9]. Вследствие этого концентрация заряженных акцепторов (N_a^-) и дырок (p) в p^+ -эмиттере при комнатной температуре в десятки и сотни раз меньше, чем полная концентрация алюминия N_{Al} . Например, при $N_{Al} = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ получается $N_a^- = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При высоких плотностях тока (равных 1 кА/см^2 в экспериментах работы [6]) столь слабое легирование тоже приводит к снижению коэффициента инжекции p^+ -эмиттера и „жесткому“ восстановлению, как в ИВД. Еще один фактор — высокое отношение b подвижностей электронов μ_n и дырок μ_p (в $4H$ -SiC $b = 7.5$ [9]) — был отмечен в качестве причины „жесткого“ восстановления кремниевых диодов с базой p -типа еще в работе [10] и упомянут также в [6]. Наконец, важную роль может играть соотношение между максимальным обратным напряжением U_m и „напряжением смыкания“ $U_d = qNd^2/2\epsilon$, при котором область пространственного заряда (ОПЗ) заполняет всю высокоомную базу толщиной d (здесь q — заряд электрона, N — концентрация заряженных примесей в базе, ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника). Именно, если $U_m > U_d$, то вся неравновесная плазма будет удалена из базы при напряжении на диоде $U \leq U_d < U_m$, после чего неизбежно наступает резкий обрыв тока [10,11].

Очевидно, что для эффективного проектирования карбид-кремниевых диодов различного назначения необходимо отсутствующее до настоящего времени ясное понимание относительной роли всех 4 механизмов, определяющих характер восстановления блокирующей способности. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Анализ процессов восстановления мы проводили путем численного моделирования динамики неравновесной электронно-дырочной плазмы в диодных структурах с базами n - и p -типа проводимости, подобных описанным в [6]. Для сравнительной оценки роли различных

[¶] E-mail: kyureg@vei.ru

¹ Основанием для такого предположения явились результаты изменения времени жизни в SiC-диодах различными методами, которые удалось согласовать и объяснить только допуская существование подобного рекомбинационного слоя [8].

Номер структуры	d , мкм	$N_{a,d}$, см ⁻³	N_d^+ , см ⁻³	N_a^+ , см ⁻³	Рекомбинационный слой	
					около p^+ -слоя	около n^+ -слоя
p-1	12	$8 \cdot 10^{14}$	10^{19}	$2 \cdot 10^{17}$	Есть	Нет
p-2	—	—	—	10^{19}	—	—
p-3	—	—	—	$2 \cdot 10^{17}$	Нет	—
p-4	—	—	—	10^{19}	—	—
p-5	—	—	10^{17}	—	—	Есть
p-6	37.0	—	10^{19}	$2 \cdot 10^{17}$	Есть	Нет
n-1	—	$5 \cdot 10^{14}$	—	—	—	—
n-2	—	—	—	10^{19}	—	—
n-3	37.0	—	—	$2 \cdot 10^{17}$	Нет	—
n-4	—	—	—	10^{19}	—	—
n-5	—	—	10^{17}	—	—	Есть
n-6	12.0	—	10^{19}	$2 \cdot 10^{17}$	Есть	Нет

факторов было рассмотрено по 6 типов структур каждого типа проводимости, отличающихся концентрацией ионизованных доноров N_d^+ или акцепторов N_a^+ в эмиттерах, наличием или отсутствием рекомбинационного слоя на границах раздела эмиттер–база, а также толщиной базы. Параметры рекомбинационного слоя (толщина 0.1 мкм, время жизни 0.3 нс) соответствовали данным работы [8]. Профили легирования изображены на рис. 1, а значения основных электрофизических параметров приведены в таблице. Режимы, задаваемые внешней цепью, также максимально точно соответствовали условиям экспериментов [6]: амплитуда и длительность прямоугольного импульса прямого тока были равны 2 А и 500 нс соответственно, что при площади структуры $S = 2 \cdot 10^{-3}$ см² обеспечивает величину амплитуды плотности тока 1 кА/см². Обратный ток на стадии высокой обратной проводимости определялся напряжением на источнике питания $U^- = -(50-300)$ В, а также последовательным и нагрузочным сопротивлениями. Величины времени переключения с прямого тока на обратный (60 нс), времени жизни в базе (100 нс) и паразитной последовательной индуктивности (20 нГн) подбирались так, чтобы результаты расчетов и экспериментов совпадали наилучшим образом для структур n-1 и p-1 (см. таблицу), для которых учтено влияние на характер восстановления всех упомянутых выше факторов. Расчеты выполнялись с помощью программы „Исследование“ [12], адаптированной для моделирования приборов на основе 4H-SiC [13].

Результаты расчетов представлены на рис. 1, 2, анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

1. Теоретические характеристики кинетики процессов восстановления диодов типа p-1 и n-1 хорошо согласуются с результатами экспериментов работы [6].

2. В режимах, соответствующих условиям экспериментов работы [6], все типы диодов с базой p-типа восстанавливаются „жестко“, а типы диодов с базой n-типа (кроме диода типа n-6, см. далее) — „мягко“. Это утверждение относится и к диодам типов p-4 и n-4, в которых отсутствовал рекомбинационный слой, а кон-

центрация дырок в p^+ -эмиттере была принята равной 10^{19} см⁻³.

3. Введение рекомбинационного слоя около p^+ -эмиттера (диоды типа p-2 и n-2) и снижение концентрации дырок в нем до $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (диоды типа p-3 и n-3) уменьшают извлеченный заряд примерно в 3 раза. Одна-

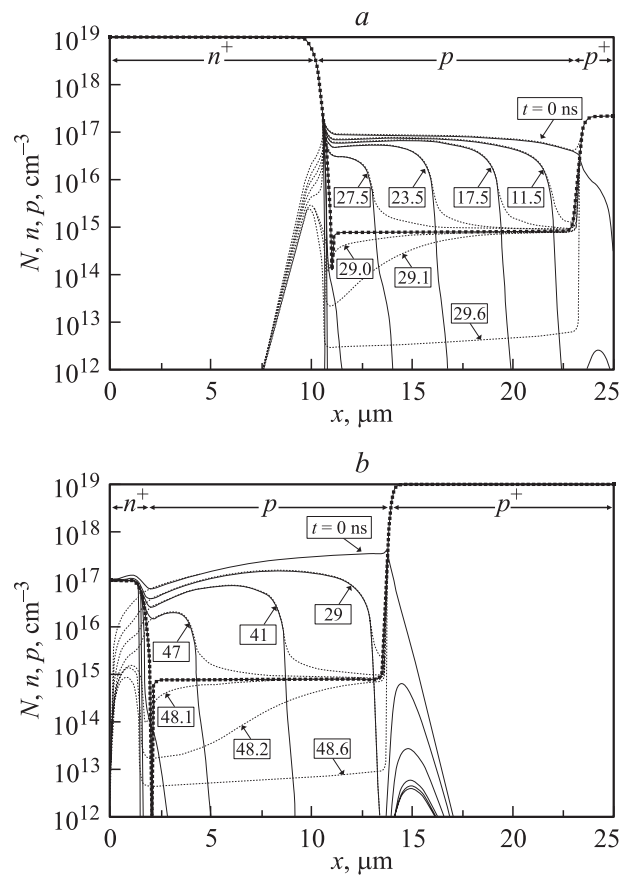


Рис. 1. Распределения ионизованных примесей (точки), электронов (сплошные линии) и дырок (пунктирные линии) в диодах типа p-1 (a) и p-5 (b). Цифры у кривых указывают моменты времени (в единицах наносекунд) после смены знака тока через диоды.

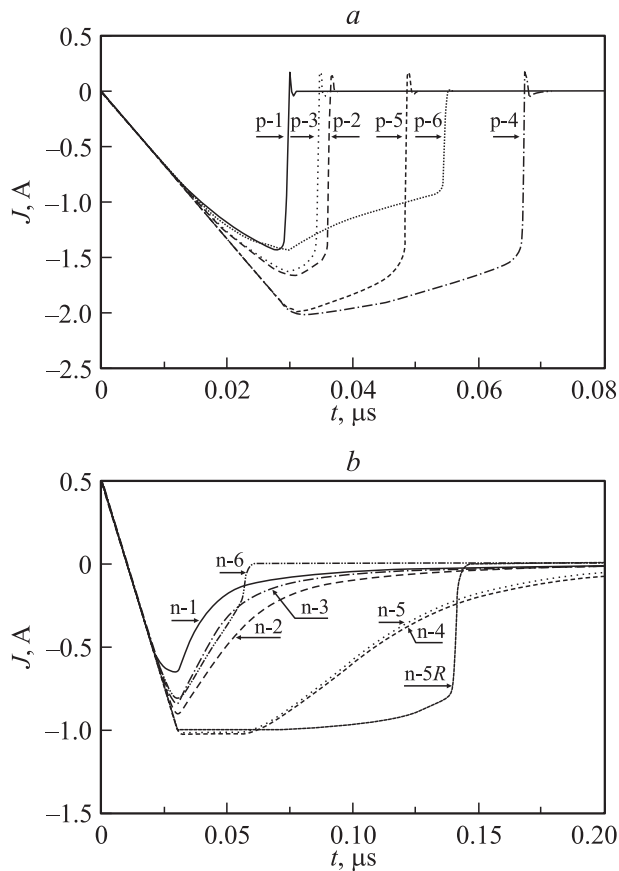


Рис. 2. Характеристики кинетики процессов восстановления карбид-кремниевых диодов с базами p -типа (а) и n -типа (б), параметры которых приведены в таблице.

ко оба этих способа снижения эффективности p^+ -эмиттера не изменяют характер процесса восстановления по сравнению со случаем высокоэффективного p^+ -эмиттера (диоды типа p-4 и n-4).

4. Даже практически трудно реализуемая „инверсия“ асимметрии эффективности инжекции из эмиттерных переходов (диоды типа p-5 и n-5) не изменяет характера восстановления, хотя в этих случаях плотность неравновесной плазмы у границы с p^+ -эмиттером в 5–10 раз больше, чем вблизи n^+ -эмиттера (см. рис. 1).

5. Увеличение толщины базы p -типа до 37 мкм (диод типа p-6, для которого напряжение смыкания U_d было в несколько раз больше максимального обратного напряжения U_m) не изменяет характер восстановления, но приводит к снижению тока, при котором наступает этап „жесткого“ восстановления. К совершенно другому результату приводит изменение соотношения между U_m и U_d в диодах с базой n -типа: уменьшение d до 12 мкм (диод n-6) и увеличение U_m до значений, при которых $U_d < U_m$ (кривая n-5R на рис. 2, б; в этом варианте расчета для сохранения прежней величины тока одновременно были увеличены в 30 раз и U_m , и последовательное сопротивление R), вызывает появление стадии „жесткого“ восстановления.

6. Расчетное „время обрыва“ всех типов диодов с базой p -типа оказалось равным 0.5 ± 0.05 нс в согласии с экспериментом [6], тогда как в диодах с базой n -типа время обрыва составляло около 3 нс либо из-за низкой плотности тока на стадии обрыва (диод типа n-6), либо из-за большой постоянной времени перезарядки барьерной емкости диода (кривая n-5R на рис. 2, б).

Главным фактором, определяющим характер процесса восстановления, является большая величина отношения b подвижностей электронов μ_n и дырок μ_p . Причина этого состоит в том, что скорость „вытягивания“ плазмы обратным током значительно (в b^3 раз до и в b раз после восстановления эмиттерных переходов) выше из прианодной области, чем из прикатодной [10]. Это явление давно известно и в кремниевых диодах с $b = 3$ [10], но в карбиде кремния, где $b = 7.5$, оно проявляется гораздо более ярко и доминирует во всех типах диодов независимо от асимметрии эффективности эмиттеров и вызванной ею начальной неоднородности распределения плазмы в высокоомной базе. По этой причине во всех рассмотренных случаях картина эволюции плазмы в качественном отношении была одинаковой. Это хорошо видно на рис. 1, где в качестве иллюстрации изображены распределения плотностей электронов и дырок в диодах типа p-1 (а) и p-5 (б) в различные моменты времени после смены знака тока. Как видно, область базы, свободная от плазмы, в обоих случаях возникает на аноде и, расширяясь со временем, достигает катода раньше, чем успевает восстановиться переход катодного эмиттера. В этом отношении исследованные нами и в работе [6] карбид-кремниевые диоды качественно отличаются от высоковольтных кремниевых диодов [7,10].

В заключение отметим два практически важных вывода, следующих из полученных результатов. Именно, выпрямительные диоды, которые должны обладать возможно более „мягким“ восстановлением для предотвращения опасных перенапряжений в цепях с индуктивностями, следует изготавливать на основе SiC с высокоомной базой n -типа. Напротив, для быстрых прерывателей тока пригодны диоды с высокоомной базой p -типа, причем нет нужды создавать специальные профили легирования или скорости рекомбинации или использовать короткую прямую накачку. Необходимый для эффективной работы прерывателей тока характер эволюции неравновесной плазмы [7] реализуется в p -базе практически всегда из-за большой величины b .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-16496).

Список литературы

- [1] Y. Sugawara, K. Asano, R. Singh et al. *Proc. ICSCRM'99*, Switzerland. Mater Sci. Forum, **338–342**, p. 1371.
- [2] P. Alexandrov, J.H. Zhao, W. Wring et al. *Electron. Lett.*, **37**, 1139 (2001).

- [3] P.A. Ivanov, M.E. Levinshtein, A.K. Agarwal et al. *Semicond. Sci. Technol.*, **16**, 521 (2001).
- [4] S.-J. Run, A.K. Agarwal, J. Richmond et al. *Proc. ICSCRM* (Japan, 2001) p. 1265.
- [5] A.K. Agarwal, P.A. Ivanov, M.E. Levinshtein et al. *Sci. Technol.*, **16**, 260 (2001).
- [6] И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.О. Константинов и др. *Письма ЖТФ*, **28**, 24 (2002).
- [7] И.В. Грехов. *Изв. РАН. Сер. Энергетика*, № 1, 53 (2000).
- [8] M.E. Levinstein, T.T. Mnatsakanov, P.A. Ivanov et al. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **48**, 1703 (2001).
- [9] M.E. Levinstein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur (ed.) *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (N.Y., Wiley, 2001).
- [10] H. Benda, E. Shpenke. *Proc. IEEE*, **55**, 1331 (1967).
- [11] M.T. Rahimo, N.Y.A. Shammas. *Microelectronics J.*, **30**, 499 (1999).
- [12] T.T. Mnatsakanov, I.L. Rostovtsev, N.I. Philatov. *Sol. St. Electron.*, **30**, 579 (1987).
- [13] M.E. Levinstein, T.T. Mnatsakanov, P.A. Ivanov et al. *Electron. Lett.*, **36**, 1241 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

On fast recovery of the blocking ability of silicon-carbide diodes

I.V. Grekhov, A.S. K'uregyan, T.T. Mnatsakanov*, S.N. Yurkov**

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* All-Russia Lenin's Electrotechnical Institute,
Moscow, Russia