

06.2;12

О возможности создания диода со сверхрезким восстановлением запирающих свойств на основе карбида кремния

© И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.О. Константинов, Т.П. Самсонова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: Pavel.Ivanov@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2002 г.

Впервые экспериментально показана возможность сверхрезкого (< 1 ns) обрыва обратного тока при восстановлении 4H-SiC-диодов со структурой $p^+p_0n^+$. Показано, что восстановление таких диодов во многом аналогично соответствующему процессу в кремниевых инверсно восстанавливающихся диодах (ИВД).

Карбид кремния (SiC) является очень перспективным материалом для силовой электроники, поскольку величина критического поля при пробое E_b у него примерно на порядок, а насыщенная скорость электронов v_s примерно в 2 раза выше, чем у кремния. Это означает, что при одинаковом рабочем напряжении SiC-приборы должны быть примерно в 20 раз более быстродействующими, чем кремниевые. Кроме того, теплопроводность SiC выше, чем даже у меди, а предельная рабочая температура примерно втрое выше, чем у кремния, что принципиально важно для силовой электроники.

В настоящее время, когда стали коммерчески доступными подложки и эпитаксиальные структуры приборного качества, разработка SiC-аналогов силовых кремниевых приборов ведется весьма интенсивно и реально продемонстрирована возможность создания SiC-диодов, транзисторов, тиристоров и GTOs [1–4 и др.]. В то же время, несмотря на очевидную перспективность SiC для силовой импульсной электроники, ни одного сообщения о SiC-аналогах кремниевых приборов в этой области техники опубликовано не было.

Наиболее простым мощным импульсным прибором является кремниевый дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ) на основе

высоковольтной (1–2 kV) $p^+p'n^+$ -структуры с глубоким диффузионным pn -переходом. При протекании импульса прямого тока $p'n$ -слои заполняются электронно-дырочной плазмой. Затем через диод пропускается быстронарастающий импульс обратного тока, протекающий за счет выведения электронов и дырок из n - и p' -слоев; в этих слоях формируются крутые плазменные фронты, движущиеся навстречу друг другу к $p'n$ -переходу. Если фронты встречаются в его плоскости, то после этого протекание тока происходит за счет движения основных носителей от $p'n$ -перехода, где быстро формируется область объемного заряда (ООЗ), возрастает напряжение и ток через диод обрывается очень быстро — за единицы и даже доли наносекунды и переходит во включенную параллельно диоду нагрузку, формируя в ней быстронарастающий импульс напряжения. Поскольку подвижность электронов в кремнии примерно втрое больше, чем дырок, то для встречи фронтов на $p'n$ -переходе общее количество электронно-дырочной плазмы после импульса прямого тока в p' -области должно быть втрое больше, чем в n -области. Это осуществляется обычно очень коротким (0.1–0.5 μ s) импульсом прямого тока (ДДРВ-режим, [4–7 и др.]) либо резким уменьшением коэффициента инжекции n^+n -перехода (инверсно-восстанавливающийся диод, ИВД [8,9]). В последнем случае длительность импульса прямого тока не ограничивается и в пределе накачка может осуществляться постоянным током.

Возможность осуществления такого сверхбыстрого процесса восстановления в SiC-диодах исследовалась нами на $p^+n_0n^+$ - и $p^+p_0n^+$ -структурах (рис. 1, *a*). Мегаизолированные 4H-SiC диодные структуры с диаметром 0.5 mm изготавливались на основе гомоэпитаксиальных $p^+/n_0/n^+$ - и $p^+/p_0/n^+$ -структур, выращенных на n -подложках (Cree, Inc) методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) в системе $\text{SiH}_4\text{-C}_3\text{H}_8\text{-H}_2$. Концентрация доноров (азот) в n_0 -слое толщиной 40 μm составляла $(3\text{--}5) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, а концентрация акцепторов (алюминий) в p_0 -слое толщиной 12 μm — около $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Концентрация алюминия и азота в эмиттерных p^+ - и n^+ -слоях составляла порядка $10^{19}\text{--}10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Электрическая схема, в которую включались исследуемые диоды, показана на рис. 1, *b*. Напряжение источника $V_1 = 200 \text{ V}$ обеспечивало квазипостоянный прямой ток накачки $I_f = 2 \text{ A}$ (плотность тока $\sim 1 \text{ kA/cm}^2$). Напряжение V_2 в цепи обратного тока варьировалось в пределах 275–500 V, передний фронт импульса тока формировался

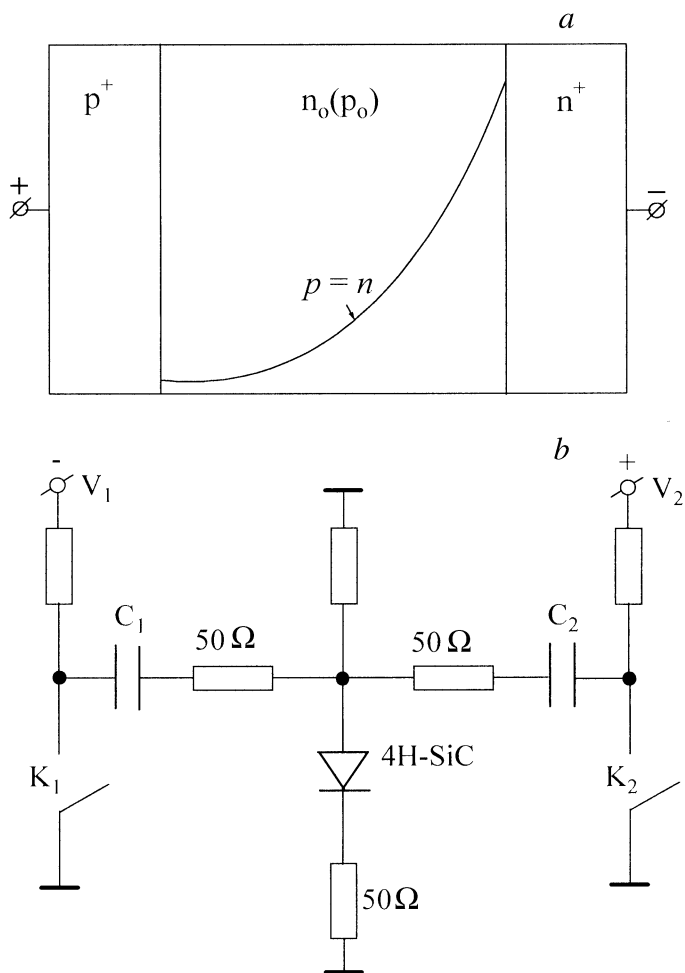


Рис. 1. *a* — структура и распределение электронно-дырочной плазмы в 4H-SiC-диодах; *b* — измерительная схема для исследования восстановления запирающих свойств диодов после переключения с прямого направления на обратное.

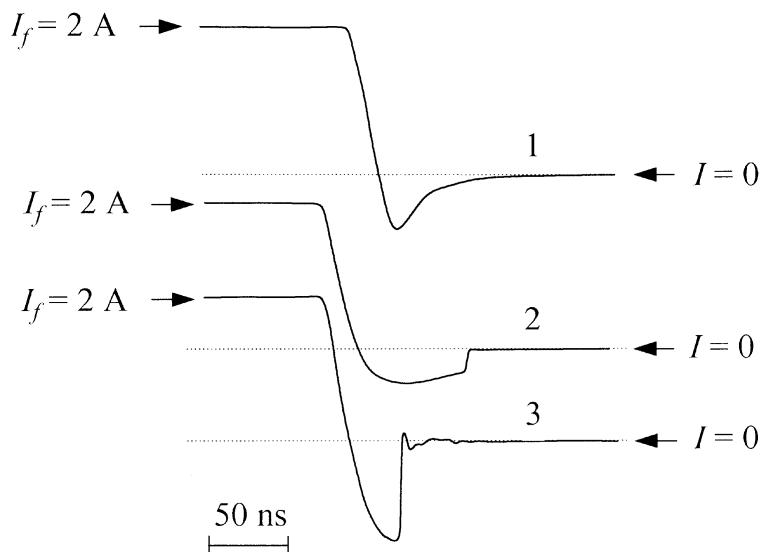


Рис. 2. Осциллограммы тока при переключении 4H-SiC $p^+n_0n^+$ -диодов (1) и $p^+p_0n^+$ -диодов (2, 3); 1 — $V_2 = 350$ В, 2 — $V_2 = 275$ В, 3 — $V_2 = 500$ В.

биполярно-полевым транзистором IGBT K_2 . Типичная осциллограмма процесса восстановления $p^+n_0n^+$ -диода ($V_2 = 350$ В), приведенная на рис. 2 (кривая 1), по сути, аналогична результатам работы [10] и определяется тем, что распределение электронно-дырочной плазмы в n -базе диода при протекании прямого тока является резко асимметричным. Как отмечалось в [10], в силу ряда технологических особенностей процесса роста p^+ -слоя, время жизни носителей в плоскости p^+n_0 -переходов всегда много меньше, чем в остальной части базы; соответствующее такой ситуации распределение плазмы показано на рис. 1, а. Поэтому уже в самом начале роста обратного тока концентрация плазмы у блокирующего p^+n_0 -перехода падает до нуля, появляется ООЗ, прекращается рост и начинается спад тока. Этот спад, однако, происходит медленно, поскольку у правой границы ООЗ остается больше запас плазмы с высокой концентрацией носителей, являющийся источником

дырочного тока через ООЗ. Такой процесс „мягкого восстановления“ (soft recovery) широко известен в кремниевой силовой электронике.

Следует ожидать, что характер процесса восстановления изменится принципиально при изменении проводимости базовой области. Поскольку характер распределения плазмы не изменится (максимум у n^+ -слоя), то блокирующий n^+p_0 -переход окажется в области максимума концентрации, а спад ее до нуля при протекании обратного тока произойдет сначала у p^+p_0 -перехода, где образуется крутой плазменный фронт, движущийся к n^+p_0 -переходу. Обрыв тока при этом не происходит, поскольку p^+p_0 -переход не является блокирующим, а омическое сопротивление освобождающейся от плазмы части базовой области сравнительно невелико. Одновременно происходит спад концентрации плазмы у n^+p_0 -перехода, однако ООЗ и плазменный фронт здесь образуются в самом конце процесса восстановления, когда левый фронт уже приближается к переходу. Эта особенность процесса, принципиально важная для сверхрезкого восстановления, определяется как высокой начальной концентрацией плазмы у перехода, так и тем, что в 4H-SiC подвижность электронов в 5–8 раз больше, чем дырок. После встречи плазменных фронтов в диоде не остается плазмы и ООЗ n^+p_0 -перехода расширяется с предельно возможной — насыщенной — скоростью v_s , приводя к сверхрезкому обрыву тока. Описанная картина процесса восстановления во многом аналогична процессу в кремниевом ИВД [9].

Оциллограммы процесса восстановления $p^+p_0n^+$ -диода при $V_2 = 275$ и $V_2 = 500$ В приведена на рис. 2 (кривые 2 и 3 соответственно). Хорошо видно, что после фазы высокой обратной проводимости, т.е. выноса плазмы из базы диода, обрыв обратного тока происходит очень резко; время обрыва тока при $V_2 = 500$ В составляет менее 1 нс.

Таким образом, в работе впервые экспериментально показана возможность сверхрезкого (< 1 нс) обрыва обратного тока при восстановлении 4H-SiC-диода, что открывает определенные перспективы создания SiC-элементной базы для нано- и субнаносекундной мощной импульсной техники.

Работа выполнялась в рамках партнерского проекта МНТЦ № 2049р (EOARD Project #007040) и программы президиума РАН „Генерирование мощных импульсов электрической энергии, корпускулярного и электромагнитного излучения“.

Список литературы

- [1] *Kordina O., Bergman J.P., Henry A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 1561–1563.
- [2] *Sugawara Y., Asano K., Singh R. et al.* // Silicon Carbide and Related Materials / Carter C.H., Devaty R.P., Rohrer G.S., ed. / 1999. TRANS TECH PUBLICATIONS LTD. Switzerland, 2000. Materials Science Forum. V. 338–342. P. 1371–1374.
- [3] *Agarwal A.K., Ryu S.H., Singh R. et al.* // Silicon Carbide and Related Materials / Carter C.H., Devaty R.P., Rohrer G.S., ed. 1999. TRANS TECH PUBLICATIONS LTD. Switzerland, 2000. Materials Science Forum. V. 338–342. P. 1387–1390.
- [4] *Ryu S.H., Agarwal A.K., Singh R. et al.* // IEEE Electron. Dev. Lett. 2001. V. 22. P. 124–126.
- [5] *Grekhov I.V., Efanov V.M., Karдо-Sysoev A.F. et al.* // Sol. St. Electr. 1985. V. 28. P. 597–599.
- [6] *Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Смирнова И.А.* // ФТП. 1986. Т. 20. С. 314–317.
- [7] *Грехов И.В.* // Изв. РАН. Сер. Энергетика. 2000. N 1. С. 53–62.
- [8] *Грехов И.В., Козлов В.А., Шендерей С.В.* Свидетельство РФ на полезную модель № 7784 от 23.04.1997. Оpubл. 16.09.98. Бюллетень X19.
- [9] *Воронков В.Б., Грехов И.В., Коротков С.В. и др.* // ПТЭ. 2002. № 2. С. 1–3.
- [10] *Levinstein M.E., Mnatsakanov T.T., Ivanov P.A. и др.* // IEEE Trans. on Electr. Dev. 2001. V. 48. P. 1703–1710.