

# Диодные размыкатели тока с субнаносекундным быстродействием на основе 4H-SiC

© П.А. Иванов<sup>†</sup>, И.В. Грехов

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

(Получена 26 сентября 2011 г. Принята к печати 3 октября 2011 г.)

Изготовлены меза-эпитаксиальные  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диоды на основе 4H-SiC и измерены характеристики их переключения из прямого направления в обратное в режимах, характерных для быстродействующих полупроводниковых размыкателей тока — дрейфовых диодов с резким восстановлением и SOS-диодов. Обнаружено, что после короткой ( $\sim 10$  нс) импульсной накачки неравновесных носителей прямым током (плотностью 200–400 А/см<sup>2</sup>) и последующего наброса импульса обратного напряжения (с фронтом нарастания 2 нс) диоды способны обрывать обратный ток плотностью 5–40 кА/см<sup>2</sup> за время порядка или менее 0.3 нс. Обсуждается возможный механизм обнаруженного сверхбыстрого обрыва тока.

## 1. Введение

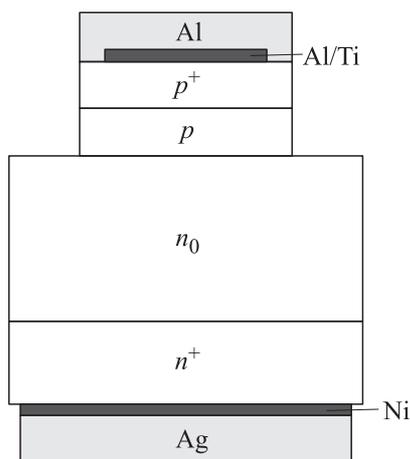
Для современной импульсной энергетики большой интерес представляют системы с индуктивным накоплением энергии с последующей передачей энергии в нагрузку с помощью быстродействующих размыкателей тока. Известны два типа быстродействующих полупроводниковых диодных размыкателей, ранее разработанные на основе кремниевых  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -структур. В 80-х годах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН были созданы так называемые дрейфовые диоды с резким восстановлением (Drift Step Recovery Diode, DSRD), принцип работы которых основан на резком восстановлении блокирующей способности  $p - n_0$ -перехода после вытягивания обратным током электронно-дырочной плазмы, предварительно накачанной коротким импульсом прямого тока [1]. В 90-х годах в ИЭФ УрО РАН было обнаружено, что при очень больших плотностях прямого и обратного тока (на 1–2 порядка больших по сравнению с DSRD-режимом) в диодах с  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -структурой также происходит резкий обрыв тока [2], причем механизм этого процесса (он был назван SOS-режимом, от Semiconductor Opening Switch) принципиально отличается от режимов DSRD. С помощью численного моделирования было показано, что в отличие от DSRD, в котором необходимым условием резкого обрыва тока является удаление *всей* избыточной плазмы из структуры [3], в SOS-диодах развитие процесса обрыва тока происходит в объеме  $p$ -области структуры, в то время как  $p - n_0$ -переход остается залитым плотной электронно-дырочной плазмой [4,5]. На основе сборок из кремниевых DSRD были построены генераторы наносекундного диапазона, имеющие импульсную мощность до 100 МВт (плотность обрываемого тока  $\sim 10^2$  А/см<sup>2</sup>), а на основе сборки из кремниевых SOS-диодов — генераторы мощностью до 10 ГВт (плотность обрываемого тока  $10^4 - 10^5$  А/см<sup>2</sup>), также работающие в наносекундном диапазоне времен обрыва тока.

Карбид кремния политипа 4H (4H-SiC) по основным электрофизическим характеристикам — ширине запрещенной зоны, предельной скорости носителей тока, напряженности поля лавинного пробоя, максимальной рабочей температуре, теплопроводности — намного превосходит кремний. Можно ожидать, что использование 4H-SiC для диодных размыкателей позволит существенно улучшить их параметры — коммутруемую мощность, быстродействие, тактовую частоту импульсов. Ранее нами уже был обнаружен эффект субнаносекундного обрыва тока в меза-эпитаксиальных 4H-SiC  $p^+ - p_0 - n^+$ -диодах после их накачки квазипостоянным током [6,7]. Моделирование показало [8], что решающим фактором, определяющим характер обрыва тока (по сути он близок к режиму DSRD), является большая величина отношения подвижностей электронов и дырок в 4H-SiC:  $\mu_n / \mu_p \approx 8$ . В данной работе впервые проведены испытания  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодов на основе 4H-SiC в импульсных режимах, характерных для DSRD- и SOS-диодов.

## 2. Тестовые образцы диодов

Диоды (рис. 1) изготавливались на основе 4H-SiC пластины  $n$ -типа с выращенной на ней эпитаксиальной  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -структурой (пластина была приобретена на коммерческой основе в компании Cree, Inc. (США)). Эмиттерный  $p^+$ -слой имеет толщину 2 мкм и концентрацию акцепторов  $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, базовый  $p$ -слой имеет толщину 5 мкм и концентрацию акцепторов  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, базовый  $n_0$ -слой имеет толщину 40 мкм и концентрацию доноров  $1.5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, эмиттерный  $n^+$ -слой имеет толщину 1 мкм и концентрацию доноров  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Технология изготовления диодных структур включала стандартные для постростовой технологии 4H-SiC приборов процессы: оптическую фотолитографию, напыление омических контактов к  $p^+$ -слою (Al/Ti) и к  $n^+$ -подложке (Ni) магнетронным распылением соответствующих мишеней, вжигание контактов в вакууме при температуре 950°C, травление мезаструктур в плазме SF<sub>6</sub> с использованием

<sup>†</sup> E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru



**Рис. 1.** Схематическое поперечное сечение меза-эпитаксиального 4H-SiC  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диода.

маски из предварительно напыленного слоя Al, резку пластины на отдельные чипы. Активная площадь диодов составляет  $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ . Диоды тестировались в бескорпусном варианте.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

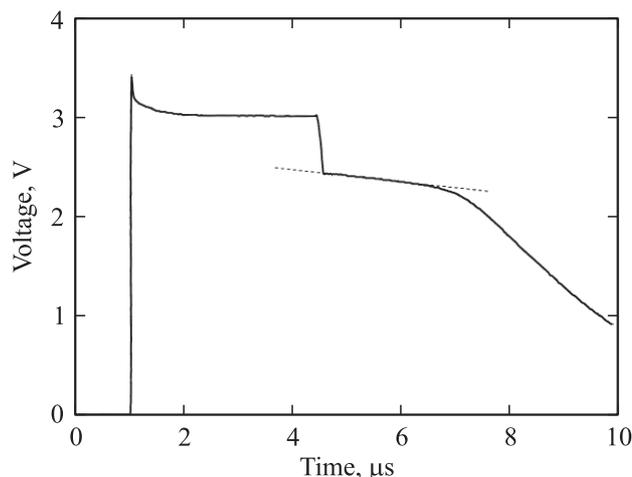
Важной характеристикой полупроводникового диода, предназначенного для работы в качестве быстродействующего размыкателя тока (DSRD- или SOS-диода), является время жизни инжектированных носителей. Оно должно быть достаточно большим для того, чтобы можно было создавать, с использованием короткой импульсной накачки, узкие (нестационарные) пространственные распределения инжектированных носителей (на коротких импульсах как DSRDs-, так и SOS-диоды обычно работают без рекомбинации инжектированных носителей как при прямом, так и при обратном включении). Поэтому перед проведением импульсных испытаний изготовленных 4H-SiC-диодов вначале в них были проведены измерения времени жизни инжектированных носителей по методу Госсика [9]. На рис. 2 показана осциллограмма напряжения на одном из диодов во время пропускания квазипостоянного прямого тока (0.5 А) и последующего его отключения. Как видно, стационарное падение напряжения на диоде при пропускании тока составляет около 3 В. Далее, сразу после отключения тока, напряжение на диоде резко падает на величину его падения на квазинейтральной части базы. Затем наблюдается линейный с течением времени спад послеинжекционной эдс (он отмечен пунктирной линией) за счет рекомбинации избыточных носителей в базе. Наконец, после исчезновения неравновесных носителей в базе происходит разряд барьерной емкости  $p-n$ -перехода. На линейном участке скорость спада эдс ( $\Delta V/\Delta t$ ) обратно пропорциональна времени жизни

инжектированных в базу носителей ( $\tau$ ):

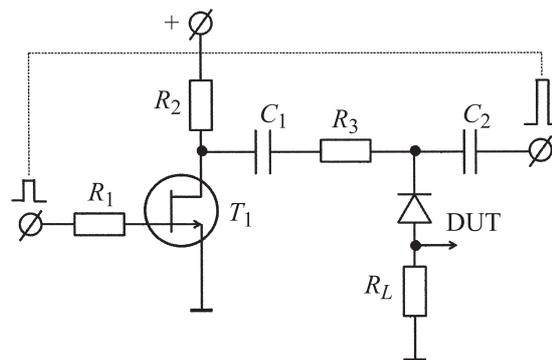
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{2kT}{q} \frac{1}{\tau}, \quad (1)$$

где  $kT$  — тепловая энергия,  $q$  — элементарный заряд. При комнатной температуре рассчитанная таким образом величина  $\tau$  составляет 0.7 мкс. Этого вполне достаточно для того, чтобы создавать, с использованием короткой импульсной накачки, требуемые нестационарные пространственные распределения инжектированных носителей.

Для импульсных испытаний диодов была изготовлена двухконтурная электрическая схема, в которой импульсы накачки и выкачки синхронизированы по времени запуска (рис. 3). Контур накачки выполнен в виде релаксационного генератора, в котором в качестве нормально закрытого ключевого элемента ( $T_1$ ) использован вертикальный 4H-SiC полевой транзистор с управляющим  $p-n$ -переходом SJEP 120R 100 (производство компании SemiSouth (США)). Импульс прямого тока длительностью  $\sim 10 \text{ нс}$  формируется разрядом конденсатора  $C_1$  через открытый ключ  $T_1$ , испытуемый



**Рис. 2.** Осциллограмма напряжения на одном из диодов во время пропускания квазипостоянного прямого тока и последующего его отключения.

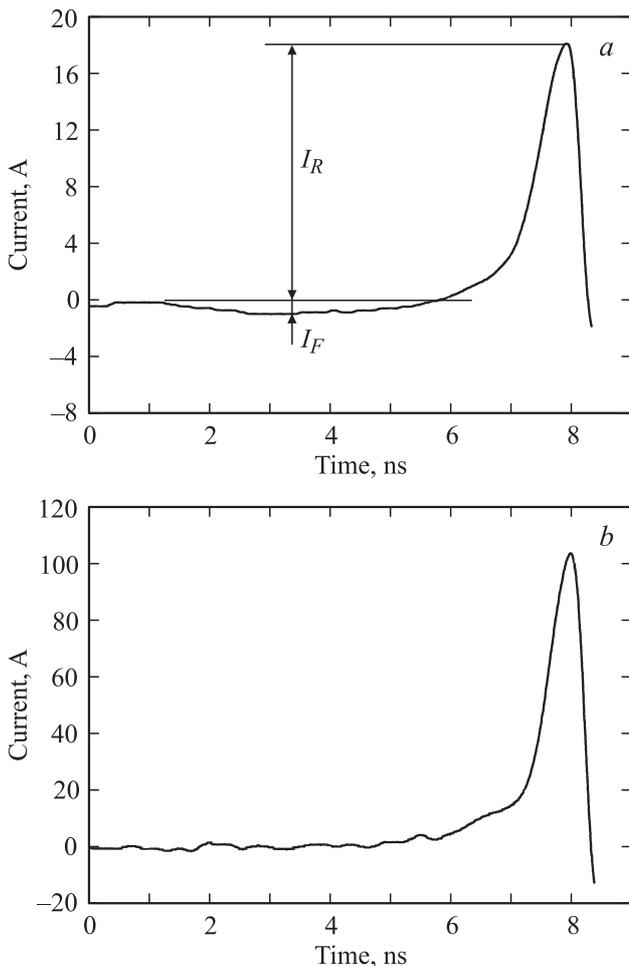


**Рис. 3.** Схема импульсных испытаний 4H-SiC диодов.

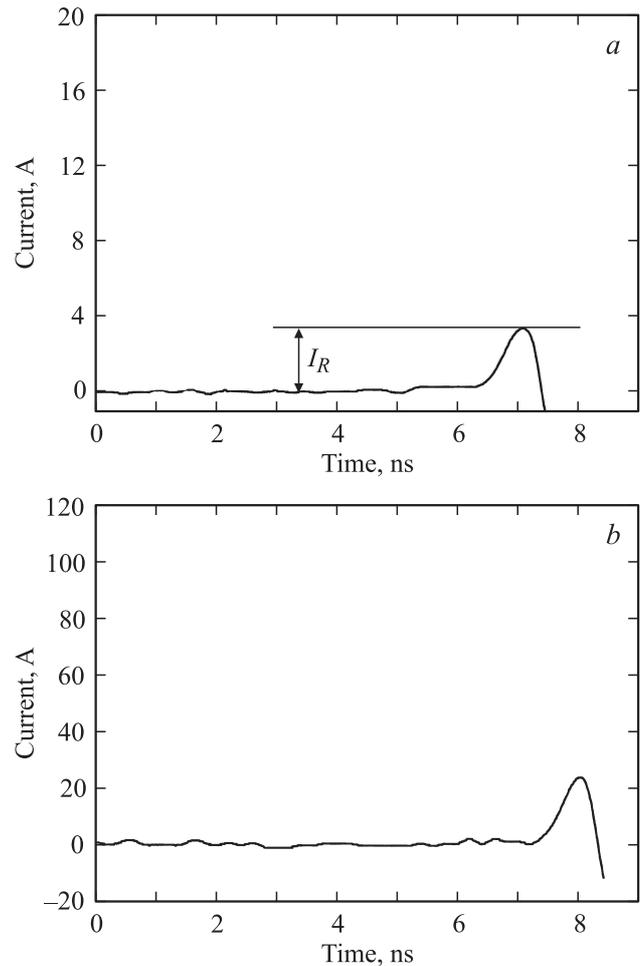
диод (DUT) и нагрузочное сопротивление  $R_L$ . Контур выкачки выполнен с использованием генератора высоковольтных импульсов (производство российской компании „ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ“). Импульсы обратного напряжения подаются на диод через разделительный конденсатор  $C_2$  с определенной задержкой относительно импульсов прямого тока. Осциллограммы напряжения на сопротивлении нагрузки (фактически тока, протекающего через диод) записывались с помощью цифрового осциллографа TEKTRONIX DPO 4104, имеющего полосу пропускания 1 ГГц.

Испытания изготовленных  $4H$ -SiC диодов проводились в разных режимах отличающихся амплитудой и длительностью импульсов прямого тока, амплитудой импульсов обратного напряжения и временной задержкой импульса выкачки относительно импульса накачки. Частота следования импульсов составляла 1 Гц.

В ходе испытаний было обнаружено, что после короткой (около 6 нс) импульсной накачки неравновесных носителей прямым током (плотностью 200–400 А/см<sup>2</sup>) и последующего наброса импульса обратного напряжения



**Рис. 4.** Осциллограммы, демонстрирующие субнаносекундный ( $\leq 3$  нс) обрыв тока  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодом на основе  $4H$ -SiC. Плотность обрываемого обратного тока, кА/см<sup>2</sup>: *a* — 4,6, *b* — 40.



**Рис. 5.** Осциллограммы, демонстрирующие емкостной всплеск тока под действием одного только импульса обратного напряжения (ср. с осциллограммами на рис. 4, *a* и *b* соответственно).

(с фронтом нарастания 2 нс) диоды способны обрывать обратный ток плотностью 5–40 кА/см<sup>2</sup> за время, равное или менее 0,3 нс (см. осциллограммы на рис. 4, *a* и *b*). Отметим, что 0,3 нс — это время нарастания переходной характеристики регистрирующего осциллографа, имеющего полосу пропускания 1 ГГц; т.е. истинное время обрыва тока может оказаться еще меньше. На рис. 5, *a* и *b* для сравнения показаны осциллограммы, измеренные при тех же условиях, что и осциллограммы на рис. 4, *a* и *b*, но без предварительной накачки плазмы прямым током. Как видно, без накачки плазмы через диод протекает намного меньший по величине обратный ток (это ток смещения, перезаряжающий барьерную емкость  $p - n_0$ -перехода), т.е. предварительная накачка электронно-дырочной плазмы является необходимым условием для поддержания фазы высокой обратной проводимости. Мы полагаем, что наблюдаемый в  $4H$ -SiC  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодах процесс сверхбыстрого обрыва тока наиболее близок к SOS-режиму. SOS-эффект связан с образованием быстро расширяющихся (с насыщенной скоростью

дрейфа носителей) участков сильного электрического поля в высоколегированных областях диода [10]. Главной особенностью этого режима, отличающей его от режима DSRD, является то, что область сильного поля формируется в процессе дрейфа плазменного фронта вдоль  $p$ -области за счет образования положительного заряда свободных дырок, поддерживающих протекание тока в освободившейся от электронно-дырочной плазмы части  $p$ -области. (В DSRDs область сильного поля формируется при восстановлении  $p$ - $n_0$ -перехода за счет положительного заряда ионизированных доноров в  $n_0$ -базе). В области сильного поля в SOS-диоде обычно развивается интенсивная ударная ионизация, способствующая увеличению концентрации носителей тока за счет их лавинного размножения. В результате плотность обратного тока до его обрыва может достигать очень высоких значений (в кремниевых SOS-диодах — до нескольких десятков  $\text{kA}/\text{cm}^2$ ). В исследованных нами 4H-SiC  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодах пиковая обрываемая плотность тока достигает  $40 \text{ kA}/\text{cm}^2$ . Еще одним характерным признаком, позволяющим считать механизм обрыва тока в 4H-SiC  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодах близким к SOS-режиму, является то, что заряд, выведенный обратным током, намного больше заряда, введенного прямым током. Такое соотношение введенного и выведенного зарядов совершенно не характерно для DSRDs, работа которых основана как раз на принципе равенства этих зарядов. Напротив, в SOS-диодах неравенство зарядов, как правило, имеет место и объясняется развитием ударной ионизации и лавинным размножением носителей в области сильного поля.

Несмотря на определенную схожесть наблюдаемого нами процесса обрыва тока в 4H-SiC  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодах с SOS-режимом, проводить полную аналогию между ними было бы не совсем правильным. SOS-режим — весьма специфический процесс, присущий именно кремниевым диодам. (Отметим, что аналитический подход к SOS-режиму пока не разработан и вряд ли возможен вообще). 4H-SiC сильно отличается от кремния по параметрам: критическое поле лавинного пробоя больше на порядок, насыщенная скорость дрейфа носителей больше в 2 раза, подвижность электронов не в 3, а в 8 раз больше подвижности дырок. Может оказаться, что наблюдаемый нами обрыв тока в диодах на основе 4H-SiC не только на количественном, но и на качественном уровне отличается от SOS-режима.

#### 4. Заключение

В работе впервые продемонстрированы диодные размыкатели тока на основе 4H-SiC, обрывающие ток плотностью  $40 \text{ kA}/\text{cm}^2$  за время менее 0.3 нс. По ряду признаков — пиковой плотности обрываемого тока, соотношению прямого и обратного тока, соотношению введенного и выведенного зарядов — механизм обрыва тока похож на SOS-режим в кремниевых  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -

диолах. В дальнейшем, для более детального понимания механизма процесса и для прогнозирования параметров генераторов импульсов на основе 4H-SiC размыкателей необходимо проведение численных модельных экспериментов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФТИ им. А.Ф. Иоффе Н.Д. Ильинской, Т.П. Самсоновой и И.В. Ильичеву за изготовление экспериментальных образцов.

Работа поддержана ОЭММПУ РАН (программа „Физико-технические проблемы в полупроводниковой электронике больших мощностей“, раздел „Исследование физических процессов генерации, рекомбинации и экстракции электронно-дырочной плазмы в полупроводниках и разработка новых приборов силовой электроники“) и ОФН РАН (программа „Проблемы радиофизики“, раздел „Освоение терагерцового диапазона“).

#### Список литературы

- [1] I.V. Grekhov, V.M. Efanov, A.F. Kardo-Sysoev, S.V. Shenderoy. Sol. St. Electron., **28**, 597 (1985).
- [2] С.Н. Рукин. ПТЭ, № 4, 5 (1999).
- [3] И.В. Грехов, Г.А. Месяц. УФН, **175**, 735 (2005).
- [4] С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов. Письма ЖТФ, **26**, 41 (2000).
- [5] С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов. Письма ЖТФ, **30**, 43 (2004).
- [6] И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.О. Константинов, Т.П. Самсонов. Письма ЖТФ, **28**, 24 (2002).
- [7] I.V. Grekhov, P.A. Ivanov, D.V. Khristyuk, A.O. Konstantinov, S.V. Korotkov, T.P. Samsonova. Sol. St. Electron., **47**, 1769 (2003).
- [8] И.В. Грехов, А.С. Кюрегян, Т.Т. Мнацаканов, С.Н. Юрков. ФТП, **37**, 1148 (2003).
- [9] Ю.Р. Носов. *Физические основы работы полупроводникового диода в импульсном режиме* (М., 1968).
- [10] С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов. ФТП, **43**, 989 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

#### Sub-nanosecond current brakers based on 4H-SiC diodes

P.A. Ivanov, I.V. Grekhov

Ioffe Physico-Technical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Meza-epitaxial 4H-SiC  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -diodes were fabricated and their reverse recovery characteristics were measured in pulse regimes to be relevant to superfast current brakers such as Drift Step Recovery Diodes and SOS-diodes. It has been found that after short forward current pumping ( $\sim 10 \text{ ns}$ ,  $200\text{--}400 \text{ A}/\text{cm}^2$ ) followed by applying of a reverse voltage pulse (rise time 2 ns) the diodes are able to break the reverse current of  $5\text{--}40 \text{ kA}/\text{cm}^2$  in a time less than 0.3 ns. Possible mechanism of observed superfast current breaking is discussed.