

Динамические характеристики дрейфовых диодов с резким восстановлением на основе 4H-SiC

© П.А. Иванов[¶], О.И. Коньков, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов, И.В. Грехов

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

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 6 мая 2015 г.)

Экспериментально исследованы динамические характеристики 4H-SiC $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодов в импульсных режимах, характерных для работы дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ). Детально изучен эффект субнаносекундного обрыва обратного тока, поддерживаемого электронно-дырочной плазмой, предварительно накачанной импульсом прямого тока. Показано и объяснено влияние на ДДРВ-эффект амплитуды импульсов обратного напряжения, амплитуды и длительности импульсов прямого тока, временной задержки обратного импульса относительно прямого.

1. Введение

4H-SiC как полупроводник, обладающий уникальными электронными и тепловыми свойствами, является перспективным материалом для создания на его основе высоковольтных импульсных приборов с субнаносекундным быстродействием [1]. Можно ожидать, что использование 4H-SiC в импульсной электронике позволит существенно улучшить параметры импульсных приборов (по сравнению с существующими кремниевыми приборами) — удельную коммутируемую мощность, быстродействие и тактовую частоту импульсов. В последнее время в разработках импульсных 4H-SiC приборов наметился определенный прогресс. В частности, на основе 4H-SiC успешно продемонстрированы прототипные образцы дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) [2–4] — приборов, которые могут быть использованы в качестве быстродействующих размыкателей тока в генераторах с индуктивным накоплением энергии. (Принцип работы ДДРВ основан на резком восстановлении блокирующей способности $p-n$ -перехода после вытягивания обратным током электронно-дырочной плазмы, предварительно накачанной коротким импульсом прямого тока [1]).

Для создания высокоэффективных 4H-SiC ДДРВ необходимы нетрадиционные подходы к их конструированию с учетом специфики электронных свойств материала и технологии изготовления полупроводниковых структур, а также условий, необходимых для реализации эффекта сверхбыстрого обрыва тока. Удачное сочетание таких параметров 4H-SiC, как большая разница в подвижностях электронов и дырок и очень высокое критическое поле лавинного пробоя, позволило нам предложить перспективный вариант конструкции высоковольтных 4H-SiC ДДРВ — диод со структурой $p^+ - p - n_0 - n^+$ [5]. В таком диоде умеренно легированный p -слой служит „плазменным резервуаром“ (неравновесные носители в него накачиваются коротким импульсом прямого тока), а слабо легированный n_0 -слой — блокирующей обратное напряжение базой (после рассасывания плазмы в

p -области обратным током последний резко обрывается при восстановлении блокирующей способности $p-n_0$ -перехода).

В работе [6] нами была теоретически проанализирована работа 4H-SiC ДДРВ со структурой $p^+ - p - n_0 - n^+$ в составе идеализированного двухконтурного генератора с индуктивным накопителем энергии. С использованием разработанной модели были оценены предельные параметры высоковольтных (2–10 кВ) импульсных генераторов, построенных на основе одиночных диодов. Проведенный анализ показал, что оптимально сконструированные 4H-SiC ДДРВ должны обеспечивать скорость нарастания фронта импульса напряжения около 20 кВ/нс, что по меньшей мере на порядок выше по сравнению с ДДРВ на основе кремния. (То же самое относится к плотности обрываемого тока).

В данной работе проведены экспериментальные исследования динамических характеристик 4H-SiC $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодов в импульсных режимах, характерных для работы ДДРВ.

2. Образцы и методика экспериментальных исследований

Диоды (рис. 1, а) 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)). p^+ -Слой имеет толщину 2 мкм и концентрацию акцепторов $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, p -слой имеет толщину 5 мкм и концентрацию акцепторов $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, n_0 -слой имеет толщину 40 мкм и концентрацию доноров $1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, n^+ -слой имеет толщину 1 мкм и концентрацию доноров $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

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

[¶] E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

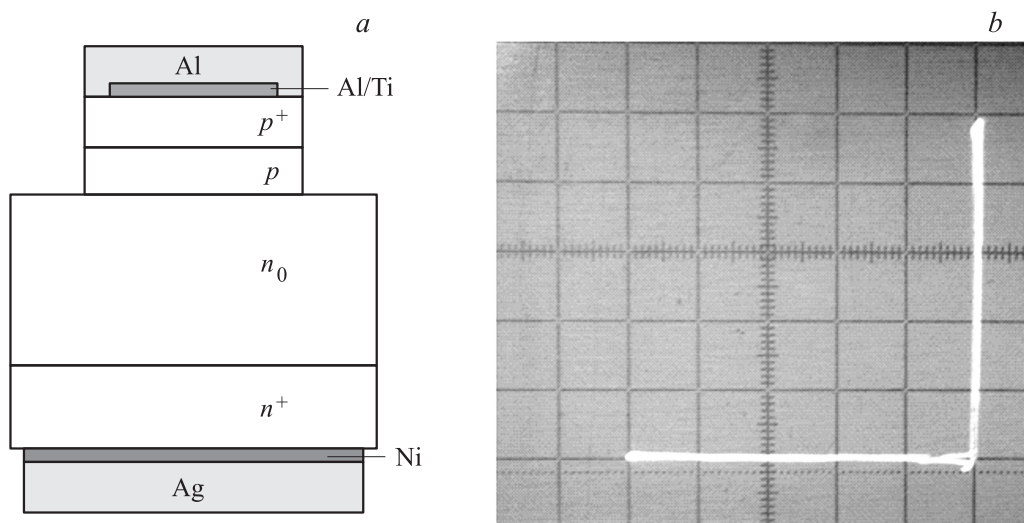


Рис. 1. *a* — поперечное сечение мезаэпитаксиального 4H-SiC $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диода; *b* — вольт-амперная характеристика диода, цена деления по вертикали — 100 мкА, по горизонтали — 200 В.

SF₆ с использованием маски из предварительно напыленного слоя Al, резку пластины на отдельные чипы. Площадь $p - n_0$ -перехода составляет 0.36 мм².

На рис. 1, *b* показана квазистатическая вольт-амперная характеристика одного из изготовленных диодов, снятая с экрана характеристикографа Л2-56. Как видно, в обратном направлении диод блокирует напряжение 1000 В.

Для экспериментального исследования динамических характеристик ДДРВ построение генератора с индуктивным накопителем энергии (по схеме с параллельной нагрузкой [1]) не является обязательным. В принципе динамику процессов в ДДРВ можно изучать путем анализа обычных характеристик обратного восстановления (в схеме с последовательной нагрузкой). Рассмотрим, например, фазу обрыва обратного тока в ДДРВ, когда последний полностью свободен от электронно-дырочной плазмы, в схемах с параллельной (I) и последовательной (II) нагрузкой (рис. 2).

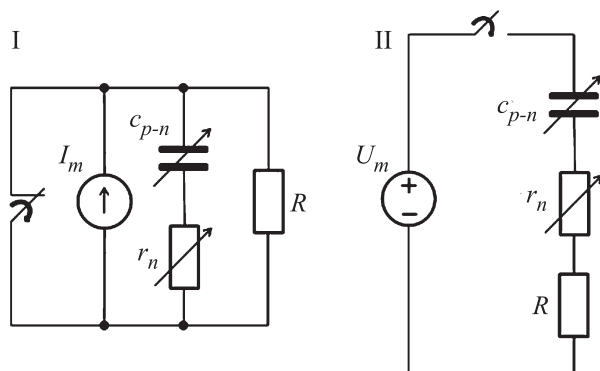


Рис. 2. Эквивалентные схемы, соответствующие стадии обрыва обратного тока, в схемах с параллельной (I) и последовательной (II) нагрузкой.

Как нетрудно убедиться, в обеих схемах временная зависимость падения напряжения $u_{p-n}(t)$ на расширяющейся в процессе обрыва тока области пространственного заряда (ОПЗ) $p - n_0$ -перехода описывается одним и тем же дифференциальным уравнением (при условии $I_m R = V_m$):

$$\frac{du_{p-n}}{dt} = \frac{V_m - u_{p-n}}{c_{p-n}(R + r_n)}, \quad (1)$$

где R — сопротивление нагрузки, c_{p-n} — нелинейная барьерная емкость $p - n_0$ -перехода, r_n — нелинейное последовательное сопротивление квазинейтральной части блокирующей n_0 -базы, V_m — источник квазипостоянного напряжения, I_m — источник квазипостоянного тока. Таким образом, теоретически процесс восстановления блокирующей способности диода в схемах (I) и (II) совпадает.

В случае 4H-SiC ДДРВ со структурой $p^+ - p - n_0 - n^+$ импульсные режимы накачки и выкачки плазмы должны быть следующими [6]: 1) накачка должна осуществляться коротким, порядка 10 нс, импульсом прямого тока, за время которого неравновесные дырки, инжектированные из p^+ -эмиттера, проходят за счет диффузии и дрейфа только на толщину p -слоя; 2) выкачка должна осуществляться еще более быстро нарастающим обратным током за время нескольких наносекунд. Для обеспечения таких режимов тестирования 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 (Т) использован быстродействующий кремниевый 600-В МОП-транзистор SPD02N60C3 со временем нарастания тока стока 3 нс. Импульсы прямого тока длительностью ~ 10 нс формируются разрядом конденсатора С через открытый транзистор Т, испытуемый

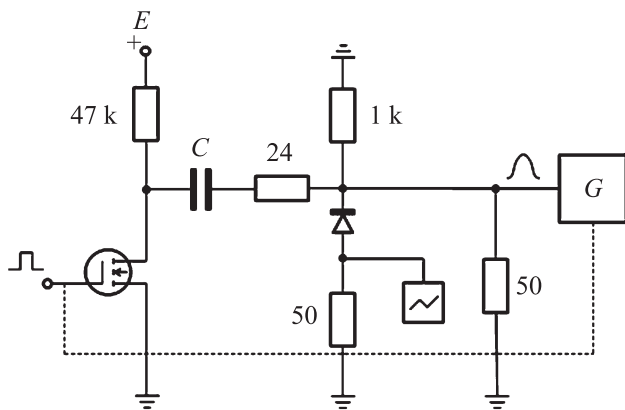


Рис. 3. Схема импульсных испытаний.

диод и нагрузочное сопротивление $R = 50$ Ом. Амплитуда, время нарастания и спада тока в контуре накачки задаются напряжением источника питания E , временем включения транзистора T и емкостью конденсатора C . Изменением этих параметров можно регулировать амплитуду I_p и длительность t_p импульса тока накачки, т.е. величину накачанного заряда неосновных носителей (Q_p). Контур выкачки выполнен с использованием генератора (G) высоковольтных импульсов, в котором выходные импульсы формируются кремниевыми ДДРВ. На нагрузке 50 Ом генератор выдает импульсы амплитудой V_G до 5 кВ и длительностью 4 нс (время нарастания и спада около 2 нс). Импульсы обратного напряжения подаются на диод с определенной (регулируемой) временной задержкой относительно импульсов прямого тока. Максимально возможная скорость нарастания обратного тока в контуре выкачки задается генератором G . Осциллограммы напряжения на сопротивлении нагрузки, включенной последовательно с диодом (фактически тока, протекающего через диод), записывались с помощью цифрового осциллографа TEKTRONIX DPO 4104 с полосой пропускания 1 ГГц. Импульсные испытания $4H$ -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 тех случаях, когда требовалось сравнить форму импульса обратного тока в разных режимах работы схемы, запись осциллограмм производилась таким образом, чтобы начальные участки роста обратного тока совпадали по времени.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

ДДРВ-эффект. Эффект субнаносекундного обрыва обратного тока, поддерживаемого предварительно инжектированными носителями, продемонстрирован осциллограммами на рис. 4. Кривая 1 показывает осциллограмму тока при работе двухконтурной схемы на

омическую нагрузку 50 Ом (без подключенного диода). Амплитуда импульса тока в контуре накачки 2 А, длительность 10 нс; амплитуда тока в контуре выкачки 15 А, длительность 4 нс. Кривые 2 и 3 показывают осциллограммы тока при подключенном диоде. Кривая 2 демонстрирует блокирующую способность диодов в импульсном режиме (при отключенном контуре накачки). Как видно, через диод проходит импульс емкостного тока, амплитуда и длительность которого (4 А и 2 нс соответственно) существенно (в разы) меньше амплитуды и длительности импульса при работе схемы на чисто омическую нагрузку. Кривая 3 демонстрирует ДДРВ-эффект — нарастание и субнаносекундный обрыв обратного тока после предварительной накачки электронно-дырочной плазмы импульсом прямого тока (задержка по времени обратного импульса относительно прямого импульса подобрана таким образом, чтобы амплитуда обратного тока I_m была максимальной по величине). Параметры процесса следующие: амплитуда импульса прямого тока

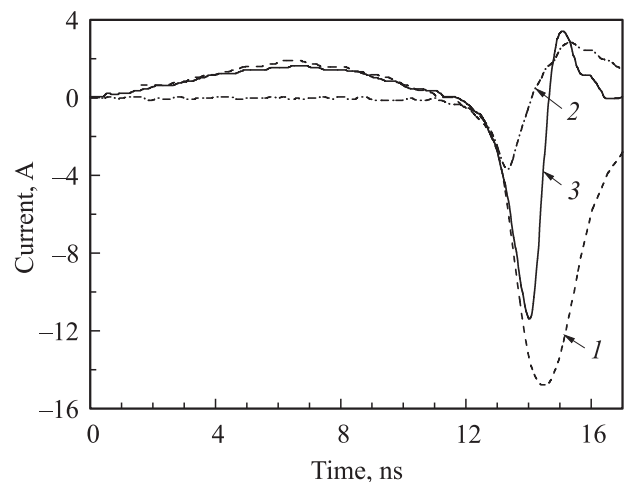


Рис. 4. Осциллограммы, демонстрирующие ДДРВ-эффект (пояснения в тексте).

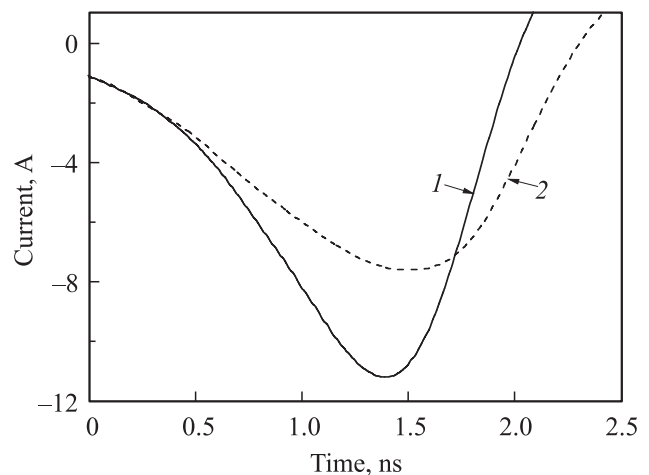


Рис. 5. Осциллограммы, демонстрирующие влияние величины V_G (пояснения в тексте).

$I_p = 2$ А, длительность $t_p = 10$ нс; величина обрываемого обратного тока $I_m = 11$ А, время обрыва $t_f = 0.4$ нс.

Влияние величины V_G . На рис. 5 продемонстрировано, как величина V_G влияет на амплитуду и скорость нарастания и спада обратного тока. Кривая 1 на рис. 5 повторяет кривую 3 на рис. 4 ($V_G = 750$ В). Кривая 2 записана при $V_G = 450$ В. Как видно, при уменьшении V_G величина обрываемого тока I_m падает при том, что время его нарастания (t_e) растет. Этот результат объясняется неизменностью выкачанного обратным током заряда инжектированных носителей ($Q_e \propto I_m t_e$). При уменьшении V_G , помимо уменьшения скорости нарастания, также уменьшается и скорость спада тока.

Влияние величины Q_p . На рис. 6 продемонстрировано, как величина накачанного заряда Q_p влияет на амплитуду I_m . Как видно, при уменьшении Q_p за счет сокращения Q_p и t_p величина обрываемого тока I_m уменьшается. Это объясняется равенством накачанного и выкачанного зарядов инжектированных носителей ($Q_p = Q_e$) при том условии, что рекомбинацией неравновесных носителей за время накачки и выкачки можно пренебречь.

Влияние длительности накачки. Для правильной работы 4H-SiC ДДРВ со структурой $p^+ - p - n_0 - n^+$ длительность накачки t_p должна быть такой, чтобы за это время инжектированные из p^+ -эмиттера дырки прошли за счет диффузионно-дрейфового переноса на расстояние, приблизительно равное толщине p -слоя. При значительном превышении этого времени неравновесные носители будут накапливаться не только в p -области, но и в блокирующей n_0 -базе. При этом можно ожидать, что процесс восстановления $p - n_0$ -перехода на стадии обрыва обратного тока замедлится, поскольку начнется в присутствии неравновесных носителей в n_0 -базе. На рис. 7 продемонстрировано, как величина t_p влияет, при прочих равных условиях, на скорость обрыва обратного тока. Кривая 1 на рис. 8 повторяет кривую 3 на рис. 5 ($t_p \sim 10$ нс). Кривая 2 записана при $t_p \propto 100$ нс. Величина I_p подобрана так, чтобы обрываемый обратный ток I_m оставался неизменным. Как видно, при увеличении t_p скорость спада тока, как и ожидалось, уменьшается.

Влияние времени задержки обратного импульса относительно прямого. Одним из условий эффективной работы ДДРВ является достаточно большое время жизни неравновесных носителей (τ), при котором их рекомбинацией за время накачки и выкачки можно пренебречь. Очевидно, что при задержке обратного импульса относительно окончания прямого ДДРВ-эффект должен постепенно ослабляться вплоть до его полного исчезновения при $t_d > 3\tau$. На рис. 8 продемонстрировано, как величина t_d влияет на амплитуду обратного тока. Действительно, при увеличении t_d величина I_m монотонно уменьшается, стремясь в конечном итоге к амплитуде емкостного тока (ср. с кривой 2 на рис. 4). Как видно, время жизни неравновесных носителей в p -слое по порядку величины оценивается как $\tau \approx 10$ нс.

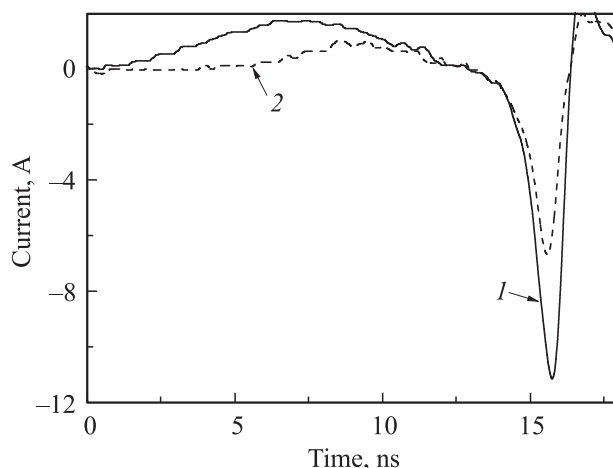


Рис. 6. Осциллограммы, демонстрирующие влияние величины Q_p (пояснения в тексте).

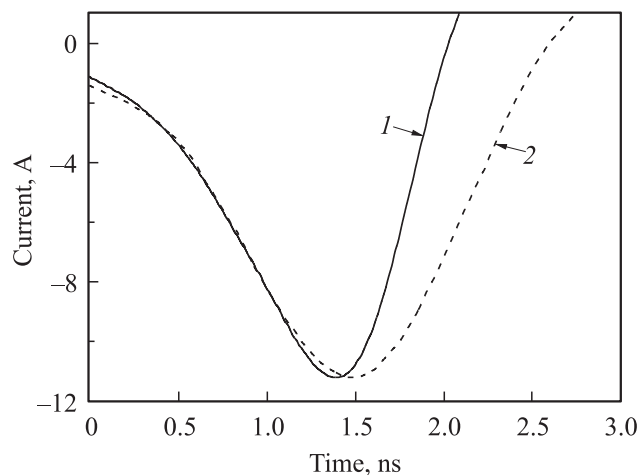


Рис. 7. Осциллограммы, демонстрирующие влияние величины t_p (пояснения в тексте).

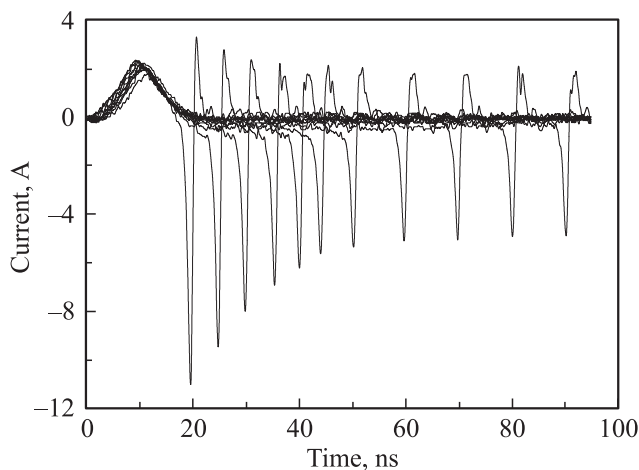


Рис. 8. Осциллограммы, демонстрирующие влияние величины t_d (пояснения в тексте).

4. Заключение

Проведенные в работе экспериментальные исследования подтверждают возможность создания высокоэффективных $4H$ -SiC ДДРВ со структурой $p^+-p-n_0-n^+$. Актуальным продолжением исследований в этом направлении является разработка технологии высоковольтных (свыше 2 кВ) $p^+-p-n_0-n^+$ -диодов (с охранной структурой для предотвращения преждевременного краевого пробоя). Помимо разработки усовершенствованной технологии диодов необходимы дальнейшие исследования электронных и тепловых процессов в диодах с целью повышения их эффективности. В частности, необходимо исследовать влияние на динамические характеристики инжекционной эффективности p^+-p -переходов, поверхностной и оже-рекомбинации инжектированных носителей, исследовать мало изученные до сих пор характеристики дрейфа электронов в направлении оси C кристаллов $4H$ -SiC (в том числе при повышенных температурах).

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

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, Г.А. Месяц. УФН, **175**, 735 (2005).
- [2] И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.О. Константинов, Т.П. Самсонова. Письма ЖТФ, **28**, 24 (2002).
- [3] I.V. Grekhov, P.A. Ivanov, D.V. Khristyuk, A.O. Konstantinov, S.V. Korotkov, T.P. Samsonova. Sol. St. Electron., **47**, 1769 (2003).
- [4] A.V. Afanasyev, B.V. Ivanov, V.A. Ilyin, A.V. Kardo-Sysoev, M.A. Kuznetsova, V.V. Luchinin. Mat. Sci. Forum., **740–742**, 1010 (2013).
- [5] П.А. Иванов, И.В. Грехов. ФТП, **46**, 544 (2012).
- [6] П.А. Иванов, И.В. Грехов. ЖТФ, **85**, 111 (2015).

Редактор Т.А. Полянская

Dynamic characteristics of drift step recovery diodes based on $4H$ -SiC

*P.A. Ivanov, O.I. Kon'kov, T.P. Samsonova,
A.S. Potapov, I.V. Grekhov*

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Dynamic characteristics of $4H$ -SiC based $p^+-p-n_0-n^+$ -diodes have been studied in the DSRD-mode (Drift Step Recovery Diode). When pumping the electron-hole plasma by forward current pulse followed by applying the reverse voltage pulse, the diodes are able to break the reverse current in a subnanosecond time. Different regimes of diode operation are investigated such as variable reverse voltage amplitude, forward current amplitude and duration, time delay between forward and reverse pulses.