

## Волновой ударно-ионизационный пробой дрейфовых диодов с резким восстановлением

© В.А. Козлов<sup>¶</sup>, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.И. Брылевский

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

(Получена 8 ноября 2000 г. Принята к печати 8 ноября 2000 г.)

Впервые экспериментально обнаружено, что работа дрейфовых диодов с резким восстановлением в режиме лавинного пробоя  $p-n$ -перехода может сопровождаться возникновением осцилляций тока через  $p^+-n-n^+$ -структуру и напряжения на ней в режиме *impact avalanche transit time*, переходящих при определенных условиях к развитию обратимого волнового ударно-ионизационного пробоя  $p^+-n-n^+$ -структуры.

Явление волнового ударно-ионизационного пробоя полупроводников лежит в основе принципа работы по крайней мере двух типов полупроводниковых приборов, имеющих диодную  $p^+-n-n^+$ -структуру в качестве активного полупроводникового элемента ключевого типа. Первый тип таких приборов — лавинно-ключевые диоды [1] являются по сути дела лавинно-пролетными диодами, работающими в так называемом режиме TRAPATT (trapped plasma avalanche triggered transit). Эти диоды, предложенные еще в 1967 году [2], в настоящее время широко используются для генерации СВЧ колебаний на частотах порядка единиц ГГц и при величине выходной мощности в импульсном режиме до  $10^3$  Вт. Второй тип приборов, получивший название диодных лавинных импульсных обострителей (в англоязычной литературе SAS — silicon avalanche shapers), был предложен в 1979 году после обнаружения явления обратимого пробоя полупроводников с образованием задержанной ударно-ионизационной волны [3]. Приборы второго типа в настоящее время также широко используются для генерации сверхмощных высоковольтных электрических импульсов с амплитудой в десятки киловольт, импульсной мощностью выше  $10^7$  Вт при временах нарастания импульсного напряжения менее  $10^{-10}$  с. Как в первом, так и втором типе таких диодных структур волновой ударно-ионизационный пробой слабо легированной базовой области прибора инициируется подачей на структуру от внешнего генератора мощного короткого импульса перенапряжения на исходно смещенный в заперном направлении  $p-n$ -переход. При этом эффективность возбуждения ударно-ионизационной волны в значительной степени определяется параметрами внешнего "возбуждающего" импульса (в основном его амплитудой и формой), величиной исходного обратного смещения на  $p-n$ -переходе и другими факторами (температурой  $p-n$ -перехода, наличием освещения структуры и т.д.).

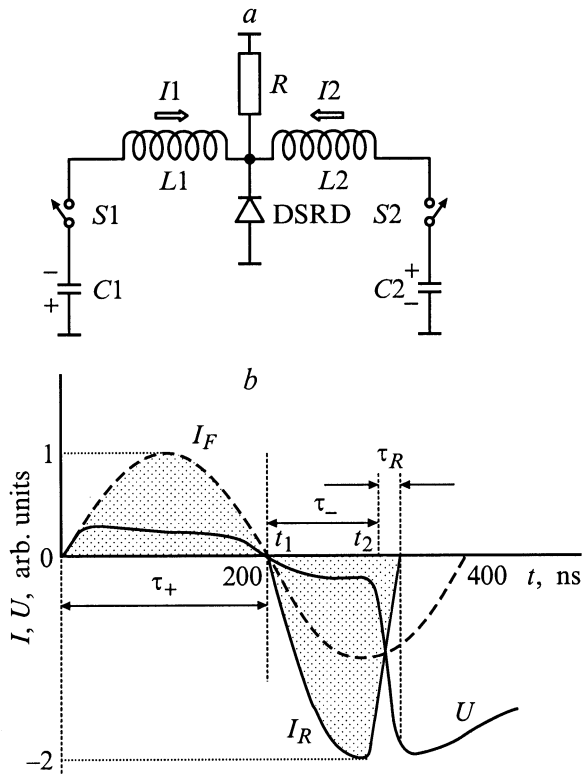
В данной работе приводятся первые экспериментальные результаты по обнаружению эффекта волнового пробоя диодных  $p^+-n-n^+$ -структур, работающих в режиме с переключением полярности приложенного к  $p-n$ -

переходу напряжения с прямого на обратное. При этом в отличие от упомянутых выше режимов импульсное "обратное" перенапряжение структуры создается не подачей на нее "возбуждающего" импульса от внешнего генератора, а формируется самой  $p^+-n-n^+$ -структурой. Импульс обратного перенапряжения  $p-n$ -перехода возникает на приборе во время резкого (за единицы наносекунд) восстановления блокирующих свойств  $p-n$ -перехода после рассасывания электронно-дырочной плазмы, накопленной в базовых слоях  $p^+-n-n^+$ -структуры за время фазы инжекции "прямосмещенных"  $p^+-n$ - и  $n^+-n$ -переходов. Этот эффект был обнаружен в так называемых дрейфовых диодах с резким восстановлением (ДДРВ) [4], для которых режим работы с резким восстановлением блокирующей способности  $p-n$ -перехода является базовым режимом при работе в схемах формирования высоковольтных наносекундных импульсов напряжения [5].

Для экспериментов были использованы ДДРВ, изготовленные по стандартной диффузионной технологии на основе исходных пластин  $n$ -Si(111) с величиной удельного сопротивления  $\rho \approx 35$  Ом · см. Общая толщина  $p^+-n-n^+$ -структур ДДРВ составляла величину  $\sim 250$  мкм при глубинах залегания  $p^+-n$ - и  $n^+-n$ -переходов соответственно  $\sim 70$  и  $30$  мкм. Приборы имели рабочую площадь  $p^+-n$ -перехода  $\sim 3.3$  см<sup>2</sup>, время жизни дырок в  $n$ -базе при низком уровне инжекции  $\sim 40$  нс и величину статического напряжения лавинного пробоя  $p-n$ -перехода  $U_{BR} \approx 1300$  В.

Исследование ДДРВ проводилось в разрядном колебательном  $L-C$ -контуре, обычно используемом для формирования наносекундных импульсов в схемах на основе ДДРВ (рис. 1, а). За время фазы "прямой" накачки длительностью  $\tau_+ = 200$  нс через  $p^+-n-n^+$ -структуру ДДРВ протекает ток инжекции, приводящий к модуляции проводимости  $n$ -базы структуры и накоплению в ней избыточного заряда инжектированных носителей (рис. 1, б). Начиная с момента времени  $t_1$ , ток через диодную структуру изменяет направление и начинается фаза рассасывания накопленного в структуре заряда. При этом диод обладает малым электрическим сопротивлением вплоть до момента времени  $t_2$ , начиная с которого

<sup>¶</sup> E-mail: alx@helen.ioffe.rssi.ru

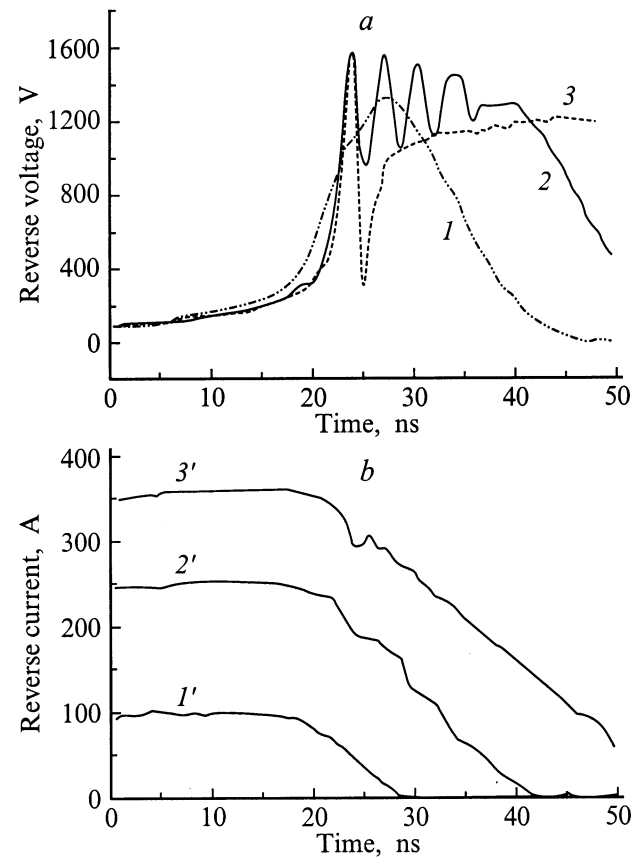


**Рис. 1.** *a* — упрощенная электрическая схема для исследования ДДРВ (DSRD) при работе в режиме формирования наносекундных импульсов напряжения и лавинного пробоя  $p-n$ -перехода.  $C1$  и  $C2$  — исходные емкостные накопители энергии в контурах;  $L1$  и  $L2$  — промежуточные магнитные накопители энергии в контурах;  $S1$  и  $S2$  — силовые ключи контуров заряда и разряда;  $R$  — сопротивление нагрузки; *b* — диаграммы тока через ДДРВ и напряжения на нем при работе в схеме с «симметричными» контурами  $L-C$ , когда  $L1 \approx L2$  и  $C1 \approx C2$  (см. рис. 1, *a*);  $\tau_+$  — длительность фазы «накачки» заряда;  $\tau_-$  — длительность фазы рассасывания заряда;  $\tau_R$  — длительность фазы обрыва тока через ДДРВ и повышения напряжения на нем;  $I_F$  — прямой ток;  $I_R$  — обратный ток.

возникающий у  $p^+-n$ -перехода слой объемного заряда обрывает протекание тока через структуру за время  $\tau_R \approx W_R/V$ , где  $W_R$  — ширина слоя объемного заряда при возникающем на структуре обратном смещении  $U_R$ ,  $V$  — скорость дрейфа носителей заряда в кремнии. Параметры  $L-C$ -контуров на рис. 1, *a* подбирались таким образом, чтобы к моменту времени  $t = t_2 = (3/2)t_1$  вся энергия контуров была сосредоточена в индуктивностях  $L1$  и  $L2$ . Тогда при обрыве тока через ДДРВ его протекание в  $L-C$ -контурах начинает осуществляться через сопротивление нагрузки  $R$ , подключенное параллельно к диоду. Переброс тока в нагрузку при восстановлении блокирующей способности  $p^+-n-n^+$ -структуры сопровождается резким повышением напряжения на ДДРВ и нагрузке до величины, значение которой  $U_{\max}$  может превышать величину  $U_{BR}$  диодной структуры. Величину перенапря-

жения на структурах ДДРВ можно было регулировать, изменяя амплитуду разрываемого в момент  $t_2$  тока  $I_R$  и величину сопротивления нагрузки  $R$ , так как предельное значение напряжения на нагрузке может достигать значения  $U_{\max} = I_R R$  (если  $U_{\max} < U_{BR}$ ). Используемая в наших экспериментах схема обеспечивала возможность плавной регулировки величины  $I_R$  в пределах от 50 до 400 А при работе с  $R = 30$  Ом, что позволяло вводить в пробы диоды с величиной  $U_{BR}$  в пределах от 1 до 6 кВ. Для регистрации и записи формы импульсов тока через ДДРВ и напряжения на  $p^+-n-n^+$ -структурах в процессе их переключения использовался цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS-380 с временным разрешением 1 нс или скоростной осциллограф типа С7-19 в случае необходимости регистрации переходных процессов с длительностью менее 1 нс.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсного напряжения на ДДРВ и тока через  $p^+-n-n^+$ -структуру на стадии восстановления блокирующих свойств  $p^+-n$ -перехода после рассасывания заряда, накопленного в базе прибора во время фазы инжекции (на рис. 2 фаза накопления не представлена). При обрыве то-



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсного напряжения на ДДРВ (*a*) и тока через него (*b*) в процессе восстановления блокирующих свойств  $p^+-n$ -перехода и его лавинного пробоя при различных значениях обратного тока  $I_R$ , А: 1, 1' — 100; 2, 2' — 240; 3, 3' — 350. Напряжение статического пробоя  $p^+-n$ -перехода  $U_{BR} = 1320$  В.

ка через ДДРВ амплитудой  $I_R = 100$  А напряжение на  $p^+-n-n^+$ -структуре еще не превышает значения напряжения лавинного пробоя  $p-n$ -перехода и импульс напряжения имеет колоколообразную форму, типичную для режима работы ДДРВ в схемах формирования наносекундных импульсов напряжения (кривая 1). Скорость повышения обратного напряжения на  $p^+-n$ -переходе при обрыве тока в 100 А составляет  $\sim 1.6 \cdot 10^{11}$  В/с и еще далека от предельно возможной величины  $(dU/dt)_{\max} = (1/2)[(E_{BR}W)/V_S] \approx 6.5 \cdot 10^{11}$  В/с, где  $E_{BR}$  — напряженность электрического поля пробоя в кремнии;  $W$  — ширина слоя объемного заряда  $p^+-n$ -перехода при максимальном импульсном обратном напряжении на  $p^+-n$ -переходе в момент обрыва тока;  $V_S$  — насыщенная скорость дрейфа носителей заряда.

Увеличение амплитуды разрываемого тока сопровождается увеличением скорости роста напряжения на диоде по мере увеличения скорости дрейфа носителей, достигающей величины  $V_S$  при плотности разрываемого тока  $j_{RS} = qN_D V_S$ , равной для исследованных ДДРВ значению  $\sim 200$  А/см<sup>2</sup> ( $q$  — заряд электрона,  $N_D$  — концентрация доноров в  $n$ -базе  $p^+-n-n^+$ -структуры). Однако практически уже начиная с плотности тока  $\sim 100$  А/см<sup>2</sup>, величина  $V$  близка к предельному значению в кремнии. При обрыве тока амплитудой в 240 А ( $j_R = 70$  А/см<sup>2</sup>) величина  $dU/dt$  на фронте импульса обратного напряжения на  $p^+-n-n^+$ -структуре составляет значение  $\sim 5 \cdot 10^{11}$  В/с (кривая 2). В этом случае максимально возможное для  $L-C$ -контуров напряжение на нагрузке  $R = 30$  Ом с учетом коммутационных потерь энергии могло бы составить величину  $\sim 3.5$  кВ, что превышает напряжение пробоя  $p^+-n-n^+$ -структуры. Поэтому стоящий параллельно с сопротивлением нагрузки прибор начинает ограничивать рост напряжения на нагрузке величиной  $\sim U_{BR} = 1.3$  кВ и входит в глубокий лавинный пробой  $p^+-n$ -перехода (ток лавинного пробоя составляет величину  $\sim 150$  А). При этом напряжение на  $p^+-n-n^+$ -структуре и ток через нее в режиме пробоя имеют осцилляции на частоте  $\sim 280$  МГц, затухающие по мере снижения среднего напряжения на  $p^+-n$ -переходе до величины  $\sim U_{BR}$  диода. Наблюдаемый характер колебаний и их частота свидетельствуют о переходе ДДРВ в режим IMPATT (impact avalanche transit time) осцилляций, аналогичных наблюдаемым при лавинном пробое силовых  $p-i-n$ -диодов, работающих с индуктивной нагрузкой [6] в режиме смены полярности тока через диод.

При дальнейшем увеличении амплитуды обратного тока через ДДРВ, а следовательно, и плотности тока лавинного пробоя  $p^+-n$ -перехода в режиме IMPATT осцилляций длительность фазы осцилляций тока и напряжения возрастает, а скорость роста напряжения на  $p^+-n-n^+$ -структуре достигает величины  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  В/с при величине  $j_R = 100$  А/см<sup>2</sup>. Начиная с этой величины  $j_R$ , составляющей  $\sim (1/2)j_{RS}$ , небольшое дальнейшее

увеличение амплитуды обратного тока приводит к резкой смене характера работы ДДРВ в режиме лавинного пробоя: после рассасывания заряда в  $n$ -базе структуры и достижения первого максимума напряжение на ДДРВ резко (за время меньше 1 нс) снижается до уровня  $\sim 300$  В, а затем плавно без IMPATT осцилляций, повышается до величины  $\sim U_{BR}$   $p^+-n$ -перехода (рис. 2, кривая 3). Из-за недостаточного временного разрешения записывающего осциллографа TDS-380 резкий спад напряжения на кривой 3 имеет длительность  $\sim 1$  нс, тогда как величина, измеренная скоростным осциллографом С7-19, составила 380 пс. Такое быстрое снижение напряжения на  $p^+-n-n^+$ -структуре ДДРВ до величины, существенно меньшей  $U_{BR}$   $p-n$ -перехода, свидетельствует о заполнении базового  $n$ -слоя структуры электронно-дырочной плазмой с концентрацией носителей  $\sim 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> (при условии их однородного распределения по объему  $n$ -базы). При этом время этого заполнения существенно меньше времени дрейфа носителей через  $n$ -базовый слой с насыщенной скоростью, составляющего для исследованных диодов величину  $\sim 1.5$  нс. Это свидетельствует о смене механизма образования и движения носителей заряда в  $p^+-n-n^+$ -структуре с лавинно-пролетного на волновой ударно-ионизационный пробой, аналогичный имеющему место в структурах диодных импульсных обострителей. Следует отметить, что для правильного определения скорости пробега ударно-ионизационной волны и более детального изучения обнаруженного эффекта необходимо проведение дополнительных исследований в специальном разрядном контуре, обеспечивающем достоверность регистрации этого процесса во времени. В нашем случае разрядный контур, ДДРВ и нагрузка были сконструированы для регистрации процессов с длительностью более 1 нс. Паразитная индуктивность схемы не позволяет проводить точные измерения процессов на временах порядка  $t = L/R \approx 300$  пс, что сравнимо с измеренным временем спада напряжения на ДДРВ во время развития и пробега ударно-ионизационной волны.

Таким образом, в данной работе впервые обнаружено, что работа дрейфовых диодов с резким восстановлением в режиме лавинного пробоя  $p-n$ -перехода может сопровождаться возникновением IMPATT осцилляций тока и напряжения в приборе, переходящих при дальнейшем увеличении плотности тока лавинного пробоя к развитию обратимого волнового ударно-ионизационного пробоя полупроводниковой  $p^+-n-n^+$ -структуры. Более детальное исследование этого эффекта с точки зрения изучения его устойчивости и однородности по площади структур, влияния на надежность работы ДДРВ при их последовательном соединении, а также возможного практического использования будет являться задачей при проведении дальнейших экспериментов.

Авторы выражают признательность И.А. Смирновой за изготовление структур ДДРВ. Работа выполнена в рамках программы по гранту РФФИ № 98-02-18217.

## Список литературы

- [1] М. Шур. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1992) кн. 2, гл. 6.
- [2] H.J. Prager, K.K.N. Chang, S. Weisbrod. *Proc. IEEE*, **55**, 586 (1967).
- [3] И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев. *Письма ЖТФ*, **5**, 950 (1979).
- [4] И.В. Грехов, В.М. Ефанов, А.Ф. Кардо-Сысоев, С.В. Шендереи. *Письма ЖТФ*, **9**, 435 (1983).
- [5] A.F. Kardo-Sysoev, V.M. Efanov, I.G. Tchashnikov. *Proc. X Pulsed Power Conference* (Albuquerque, USA, 1995) p. 342.
- [6] K. Mayaram, C. Hu, D.O. Pederson. *Sol. St. Electron.*, **43**, 677 (1999).

*Редактор Т.А. Полянская*

## Impact ionization wave breakdown of drift step recovery diodes

V.A. Kozlov, A.F. Kardo-Sysoev, V.I. Brylevsky

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

**Abstract** High frequency IMPATT oscillations followed by reversible impact ionization wave breakdown of  $p^+n-n^+$  diode structure have been experimentally observed for the first time during operation of a drift step recovery diode in avalanche breakdown mode after fast voltage restoration of  $p^+n$  junction.