

Волновой ударно-ионизационный пробой дрейфовых диодов с резким восстановлением

© В.А. Козлов[¶], 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 $\rho \approx 35 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Общая толщина p^+-n-n^+ -структур ДДРВ составляла величину ~ 250 мкм при глубинах залегания p^+-n - и n^+-n -переходов соответственно ~ 70 и 30 мкм. Приборы имели рабочую площадь p^+-n -перехода $\sim 3.3 \text{ см}^2$, время жизни дырок в n -базе при низком уровне инжекции ~ 40 нс и величину статического напряжения лавинного пробоя $p-n$ -перехода $U_{BR} \approx 1300 \text{ В}$.

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 $\tau_+ = 200 \text{ нс}$ 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

[¶] E-mail: alx@helen.ioffe.rssi.ru

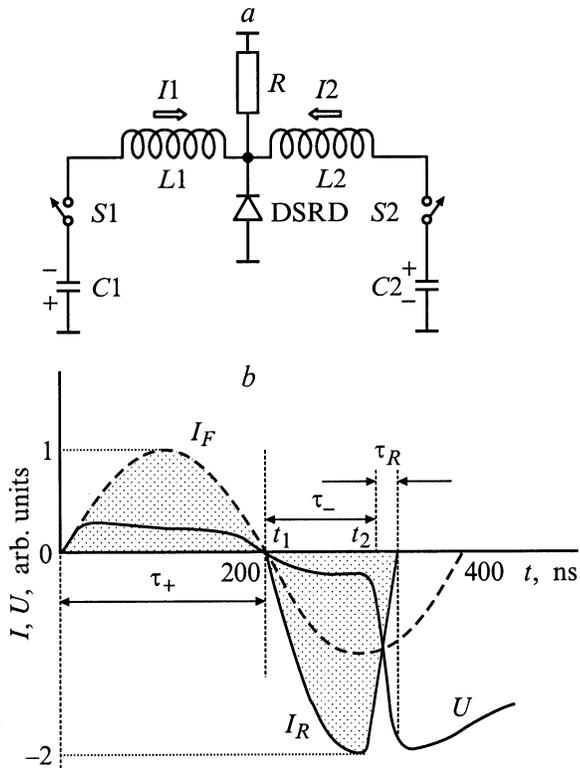


Рис. 1. *a* — упрощенная электрическая схема для исследования ДДРВ (DSRD) при работе в режиме формирования наносекундных импульсов напряжения и лавинного пробоя $p-n$ -перехода. $C1$ и $C2$ — исходные емкостные накопители энергии в контурах; $L1$ и $L2$ — промежуточные магнитные накопители энергии в 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*); τ_+ — длительность фазы "накачки" заряда; τ_- — длительность фазы рассасывания заряда; τ_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-

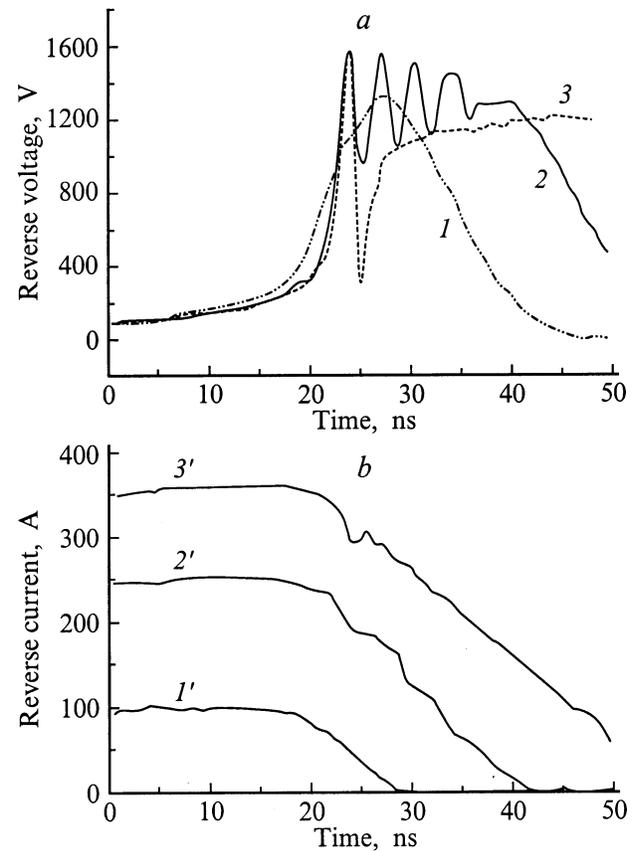


Рис. 2. Осциллограммы импульсного напряжения на ДДРВ (*a*) и тока через него (*b*) в процессе восстановления блокирующих свойств p^+-n -перехода и его лавинного пробоя при различных значениях обратного тока I_R , А: 1, 1' — 100; 2, 2' — 240; 3, 3' — 350. Напряжение статического пробоя p^+-n -перехода $U_{BR} = 1320$ 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 ~ 200 А/см² (q — заряд электрона, N_D — концентрация доноров в n -базе p^+-n-n^+ -структуры). Однако практически уже начиная с плотности тока ~ 100 А/см², величина V близка к предельному значению в кремнии. При обрыве тока амплитудой в 240 А ($j_R = 70$ А/см²) 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 ~ 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 ~ 150 А). При этом напряжение на p^+-n-n^+ -структуре и ток через нее в режиме пробоя имеют осцилляции на частоте ~ 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/см². 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 ~ 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 ~ 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⁻³ (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 ~ 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.