

## Исследование соотношения активных и реактивных потерь в дрейфовых диодах с резким восстановлением в зависимости от их режима работы

© М.Н. Черенёв<sup>1,2</sup>, А.Ф. Кардо-Сысоев<sup>2</sup>, А.Г. Люблинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: max50055@icloud.com

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 14 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Проведено экспериментальное исследование и выполнено численное моделирование зависимости потерь энергии от плотности обратного тока при переключении кремниевой  $p^+ - p - n - n^+$ -структуры (дрейфового диода с резким восстановлением) из проводящего состояния в блокирующее. Отдельно рассчитаны активная и реактивная составляющие потерь энергии, их соотношение в зависимости от параметров режима переключения. Показано, что при малых плотностях обратного тока структура возвращает в систему до 90% затраченной на восстановление напряжения на диоде энергии. С увеличением плотности обратного тока доля активной составляющей потерь энергии увеличивается.

**Ключевые слова:** дрейфовый диод с резким восстановлением, наносекундные импульсы напряжения, силовые диоды, потери энергии.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56861.140A

Импульсы высокого напряжения наносекундной и субнаносекундной длительности применяются в сверхширокополосных системах радиолокации и связи [1]. Основными требованиями, предъявляемыми к генераторам для сверхширокополосных систем, являются амплитуда импульсов от нескольких десятков вольт до десятков киловольт, частота повторения до единиц мегагерц и выше, высокий КПД, а также низкий джиттер. Эти требования в совокупности с компактными размерами и длительным сроком эксплуатации могут быть удовлетворены только путем применения полупроводниковых приборов. В работе рассматриваются приборы размыкающего типа, представленные дрейфовыми диодами с резким восстановлением (ДДРВ) [2,3].

К настоящему моменту уже разработаны физические принципы работы ДДРВ [1,4], проведено компьютерное моделирование процессов резкого обрыва тока [5], опубликовано множество практических схем генераторов импульсов на их основе [6,7], однако вопрос потерь энергии в ДДРВ при переключении освещен явно недостаточно. В работе [8] дана количественная оценка активных потерь энергии на этапе рассасывания тока в зависимости от параметров рабочего цикла. В настоящей работе впервые рассмотрены соотношения активной и реактивной составляющих энергии, затрачиваемой в процессе обрыва тока в диоде. Активная составляющая приводит к разогреву диода, а реактивная накапливается в емкости  $p - n$ -перехода и может возвращаться во внешнюю цепь при формировании спада импульса, в том числе и в нагрузку. Информация о зависимости реактивных потерь от режима работы ДДРВ, их величине и соотношении с активной составляющей важна как для отработки схе-

технических решений при построении генераторов, так и для оптимизации структуры ДДРВ под заданный режим работы.

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема стенда для исследования параметров импульса напряжения, сформированного ДДРВ. В качестве первичного ключа  $M_1$  выбран высоковольтный быстродействующий  $n$ -канальный полевой транзистор с изолированным затвором DE475-102N21A под управлением драйвера IXYS IXRFD631. Регистрация импульсов напряжения производится цифровым осциллографом Tektronix MS064 с полосой пропускания 4 GHz. В качестве эквивалента нагрузки 50  $\Omega$ , а также для ослабления сигнала, приходящего на вход осциллографа, используются СВЧ-аттенюаторы Aeroflex 18N10W с полосой пропускания 18 GHz. Для регистрации тока, проходящего через ДДРВ, применяется малоиндуктивный шунт  $R_{sh}$  с номинальным сопротивлением 1  $\Omega$ . Напряжение на ДДРВ равно разнице напряжений  $U_{CH1}$  и  $U_{CH2}$  (таким образом исключается падение напряжения на шунте).

В первоначальный момент времени конденсатор  $C_2$  заряжен до напряжения источника  $V_2$ . При подаче импульса напряжения заданной длительности от внешнего генератора  $V_1$  на затвор транзистора  $M_1$  происходит его „открытие“, конденсатор  $C_2$  разряжается по цепи индуктивность  $L_2$ –ДДРВ (DSRD)—шунт и за счет прямого тока возникает инжекция неосновных носителей заряда в базу ДДРВ (накачка диода). Величина тока определяется напряжением источника  $V_2$ , индуктивностью  $L_1$ , емкостью  $C_2$  и продолжительностью задающего импульса. В момент окончания задающего импульса транзисторный ключ  $M_1$  „закрывается“, через ДДРВ протекает

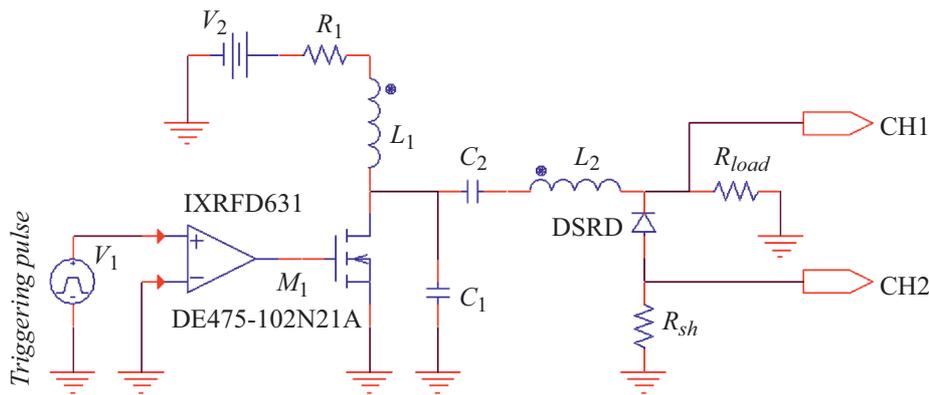


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема измерительного стенда.

Характеристики процесса переключения ДДРВ при различной плотности обратного тока

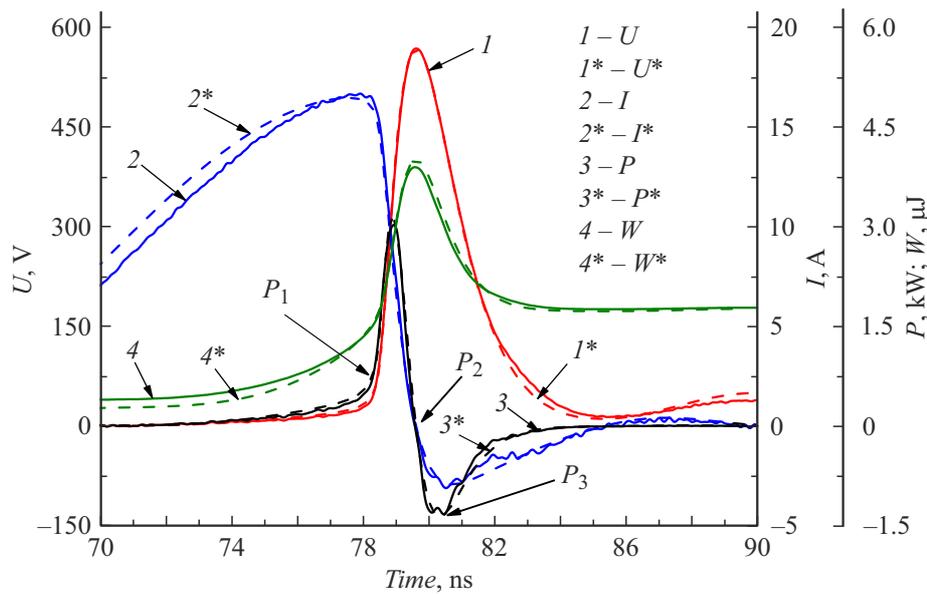
№ п/п	$S$ , $\text{mm}^2$	$U$ , V	$j$ , $\text{A/cm}^2$	$dU/dt$ , V/ns	$W_{\Sigma}$ , $\mu\text{J/cm}^2$	$W_r$ , $\mu\text{J/cm}^2$	$W_a$ , $\mu\text{J/cm}^2$	$W_r/W_{\Sigma}$
1	4.5	570	372	671	86.9	47.6	39.3	0.55
1*	4.5	569	367	699	89.1	50.4	38.7	0.57
2	18	400	101	208	31	27.8	3.2	0.90
2*	18	420	101	192	33.9	28.8	5.1	0.85
3	18	559	140	292	55.3	44.5	10.8	0.80
3*	18	591	137	303	58.7	51.2	7.5	0.87

обратный ток, обеспечивающий вынос неосновных носителей заряда из базы диода. Обратный ток определяется индуктивностью  $L_2$ , выходной емкостью транзистора  $M_1$ , которая составляет сотни пикофард, и емкостью  $C_1$ . В момент обрыва тока через ДДРВ энергия, накопленная магнитным полем индуктивности  $L_2$ , перебрасывается в нагрузку  $R_{load}$ , формируя на ней импульс напряжения.

В ходе исследования была проведена серия экспериментов по определению напряжения на структуре ( $U$ ), максимальной скорости переключения ( $dU/dt$ ), потерь энергии ( $W_{\Sigma}$ ), а также отдельно активной ( $W_a$ ), реактивной ( $W_r$ ) составляющих и отношения реактивной составляющей к общим потерям энергии ( $W_r/W_{\Sigma}$ ). В качестве ДДРВ использовались эпитаксиальные кремниевые  $p^+ - p - n - n^+$ -структуры различной площади ( $S$ ), рассчитанные на обратное напряжение 500 V. Эксперименты проводились при различных плотностях обратного тока ( $j$ ) (см. таблицу). Каждому эксперименту сопоставляется компьютерное моделирование (номера в таблице помечены звездочкой), проведенное в программном пакете TCAD Silvaco путем совместного решения уравнений Кирхгофа для внешней эквивалентной электрической схемы и одномерной диффузионно-дрейфовой физической модели динамики электронно-дырочной плазмы в ДДРВ-структуре. Для расчета процессов динамики плазмы использовалась фундаментальная система уравнений, состоящая из уравнений непрерывности, диффузионно-дрейфовых транспортных уравнений и уравнения Пуассона. При расчете подвижности

электронов и дырок учитывались ее зависимость от электрического поля, рассеяние на колебаниях кристаллической решетки, электронно-дырочное рассеяние и рассеяние на ионизованных примесях. Для учета эффекта насыщения скорости носителей в сильных полях и соответственно уменьшения подвижности электронов и дырок была использована стандартная модель, предложенная в [9]. Эта модель обеспечивает плавный переход от слабых полей к сильным. Подвижность в слабых полях рассчитывалась по модели [10], которая является предпочтительной при высокой концентрации инжектированных носителей, типичной для силовых полупроводниковых приборов. Для расчета рекомбинации электронов и дырок была взята упрощенная модель Шокли–Рида–Холла, применение которой допустимо при высоких уровнях инжекции, характерных для силовых полупроводниковых приборов. В модели также была учтена зависимость времени жизни носителей от концентрации примесей [11–13]. Различие между экспериментом и моделированием составило менее 10%, что подтверждает достоверность используемой модели.

Из результатов эксперимента видно, что при малых плотностях обратного тока структура возвращает в систему до 90% потерянной при коммутации энергии, доля активной составляющей мала (эксперимент № 2). При максимальном рабочем напряжении на структуре и повышении плотности обратного тока (эксперименты № 1 и 3) удельная величина реактивных потерь остается неизменной, в то время как значение активных потерь



**Рис. 2.** Осциллограммы тока, напряжения, мощность и потери энергии для эксперимента № 1. Экспериментальные данные представлены сплошными линиями, а результаты моделирования — штриховыми.

увеличивается. В то же время высокая скорость переключения  $dU/dt$  достигается при большей плотности обратного тока.

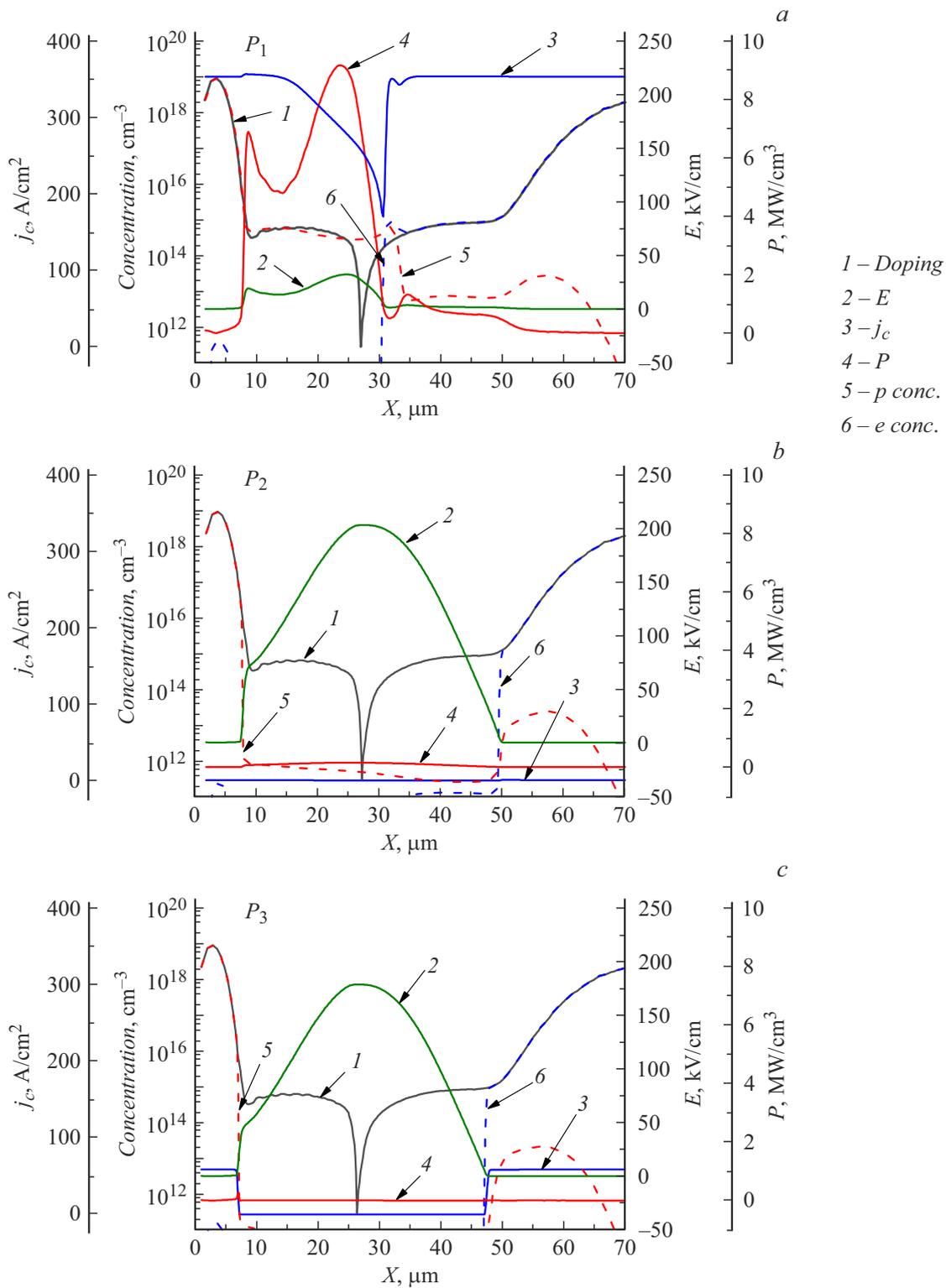
На рис. 2 приведены осциллограммы тока, напряжения, мощность и потери энергии для эксперимента № 1 (экспериментальные данные представлены сплошными линиями, а результаты моделирования — штриховыми). Как видно из рисунка, на этапе прохождения прямого тока на структуре рассеивается незначительная часть энергии, напряжение на структуре мало. При смене полярности некоторое время сохраняется режим проводимости диода, величина обратного тока возрастает, также возрастает напряжение на структуре (медленный участок роста напряжения до момента, отмеченного точкой  $P_1$  на рис. 2).

До момента  $P_1$  неосновные носители заряда выносятся из базы ДДРВ, формируются фронты электронно-дырочной плазмы, которые под действием электрического поля движутся навстречу друг другу (рис. 3, а). Потери энергии на этом этапе являются активными и приводят к разогреву структуры. Далее следует этап быстрого обрыва тока. В момент времени  $P_1$  плазменные фронты встречаются вблизи  $p-n$ -перехода, далее протекание обратного тока возможно только за счет тока равновесных носителей, что приводит к образованию области объемного заряда около  $p-n$ -перехода (рис. 3, а). Из рисунка видно, что в исследуемой структуре окончание процесса рассасывания неравновесной плазмы происходит не в плоскости  $p-n$ -перехода, что замедляет процесс переключения структуры, поскольку вывод дырок из  $p$ -области начинается раньше, чем заканчивается рассасывание неосновных носителей в  $n$ -базе. Кроме того, в  $n^+$ -подложке наблюдается накопление

неосновных дырок вследствие двух факторов: слабого ее легирования ( $N_D = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) и размытой границы между  $n$ -базой и  $n^+$ -подложкой. Накопление дырок в  $n^+$ -области в свою очередь приводит к снижению эффективности инжекции. Оптимизировать структуру для получения наилучших переходных характеристик возможно посредством изменения толщин низколегированных областей и переноса  $p-n$ -перехода в точку, где должно произойти смыкание модуляционных волн истощения при выводе неравновесной плазмы из базы структуры. Толщины низколегированных областей должны примерно соответствовать условию  $w_n/w_p \sim \mu_p/\mu_n$ , где  $w_n$  и  $w_p$  — толщины низколегированных  $n$ - и  $p$ -областей,  $\mu_p$  и  $\mu_n$  — подвижности дырок и электронов соответственно.

Напряженность электрического поля достигает максимума и распространяется к границам  $p^+$ - и  $n^+$ -областей (рис. 3, б) к моменту времени, отмеченному точкой  $P_2$  на рис. 2. Потери на этом этапе являются реактивными и будут возвращены в систему. С момента времени  $P_2$  происходит возврат запасенной энергии вследствие разряда барьерной емкости  $p-n$ -перехода (рис. 3, в).

В работе исследованы зависимости потерь энергии от плотности обратного тока при переключении  $p^+-p-n-n^+$ -структуры из проводящего состояния в блокирующее. Рассмотрена реактивная составляющая потерь энергии — энергия, накапливаемая в виде заряда барьерной емкости  $p-n$ -перехода, а затем возвращаемая обратно в систему. Показано, что с увеличением плотности обратного тока увеличивается доля активной составляющей потерь энергии, которая приводит к разогреву структуры, что накладывает ограничение на максимальную частоту следования, вызывает нестабильность амплитуды и формы импульсов, а также тепловой



**Рис. 3.** Распределение концентрации легирующей примеси (*Doping*), электронов (*e conc.*), дырок (*p conc.*), напряженности электрического поля ( $E$ ), тока проводимости ( $j_c$ ) и выделяемой мощности ( $P$ ) для моментов времени, отмеченных точками  $P_1$  (a),  $P_2$  (b) и  $P_3$  (c).

дрейф задержки формирования выходного импульса относительно импульса запуска. В то же время высокая плотность обратного тока необходима для обеспече-

ния максимальной скорости переключения структуры  $dU/dt$ . Таким образом, не существует универсального режима работы ДДРВ, при котором обеспечиваются

наилучшие характеристики переключения в совокупности с наименьшими энергетическими потерями. Режим работы должен выбираться исходя из поставленных задач: наибольшей эффективности работы системы или наибольшего быстродействия.

### Финансирование работы

Работа поддержана Министерством науки и образования РФ (проект № 075-15-2020-790).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A.F. Kardo-Sysoev, in *Ultra-wideband radar technology*, ed. by J.D. Taylor (CRC Press, Boca Raton–London–N.Y.–Washington, 2001), p. 214–299.
- [2] I.V. Grekhov, V.M. Efanov, A.F. Kardo-Sysoev, S.V. Shenderoy, *Solid-State Electron.*, **28** (6), 597 (1985). DOI: 10.1016/0038-1101(85)90130-3
- [3] V.A. Ilyin, A.V. Afanasyev, Yu.S. Demin, B.V. Ivanov, A.F. Kardo-Sysoev, V.V. Luchinin, S.A. Reshanov, A. Schöner, K.A. Sergushichev, A.A. Smirnov, *Mater. Sci. Forum*, **924**, 841 (2018). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.924.841
- [4] И.В. Грехов, Г.А. Месяц, *УФН*, **175** (7), 735 (2005). DOI: 10.3367/UFN.0175.200507c.0735 [I.V. Grekhov, G.A. Mesyats, *Phys. Usp.*, **48** (7), 703 (2005). DOI: 10.1070/pu2005v048n07abeh002471].
- [5] X. Yang, Y. Li, H. Wang, Z. Li, Z. Ding, *J. Appl. Phys.*, **109** (1), 014917 (2011). DOI: 10.1063/1.3531624
- [6] A.G. Lyublinsky, S.V. Korotkov, Y.V. Aristov, D.A. Korotkov, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **41** (10), 2625 (2013). DOI: 10.1109/TPS.2013.2264328
- [7] Y. Sharabani, I. Shafir, S. Zoran, A. Raizman, A. Sher, Y. Rosenwaks, D. Eger, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **37** (8), 1041 (2016). DOI: 10.1109/LED.2016.2584541
- [8] A.G. Lyublinsky, A.F. Kardo-Sysoev, M.N. Cherenev, M.I. Vexler, *IEEE Trans. Power Electron.*, **37** (6), 6271 (2022). DOI: 10.1109/TPEL.2021.3139536
- [9] D.M. Caughey, R.E. Thomas, *Proc. IEEE*, **55** (12), 2192 (1967). DOI: 10.1109/PROC.1967.6123
- [10] J. Dorkel, Ph. Leturcq, *Solid-State Electron.*, **24** (9), 821 (1981). DOI: 10.1016/0038-1101(81)90097-6
- [11] D.J. Roulston, N.D. Arora, S.G. Chamberlain, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **29** (2), 284 (1982). DOI: 10.1109/T-ED.1982.20697
- [12] M.E. Law, E. Solley, M. Liang, D.E. Burk, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **12** (8), 401 (1991). DOI: 10.1109/55.119145
- [13] J.G. Fossum, D.S. Lee, *Solid-State Electron.*, **25** (8), 741 (1982). DOI: 10.1016/0038-1101(82)90203-9