

07.2

## Волновые эффекты в коаксиальном тракте при субнаносекундном переключении высоковольтного диода в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя

© М.С. Иванов, В.И. Брылевский, П.Б. Родин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: m.ivanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2021 г.

В окончательной редакции 31 марта 2021 г.

Принято к публикации 2 апреля 2021 г.

Дан теоретический анализ волновых процессов в коаксиальном тракте при субнаносекундном переключении высоковольтного диодного обострителя импульсов. Установлены соотношения между амплитудами падающей, отраженной и прошедшей волн и измеряемыми в эксперименте напряжениями, а также между измеряемыми напряжениями и формой импульса генератора. Рассчитан эффект удвоения напряжения на диоде перед переключением. На основе полученных аналитических формул и экспериментальных данных определена временная зависимость коэффициента отражения обострителя и реконструированы волновые процессы в тракте при его переключении.

**Ключевые слова:** полупроводниковые приборы, ударная ионизация, субнаносекундные переключатели, коаксиальные тракты.

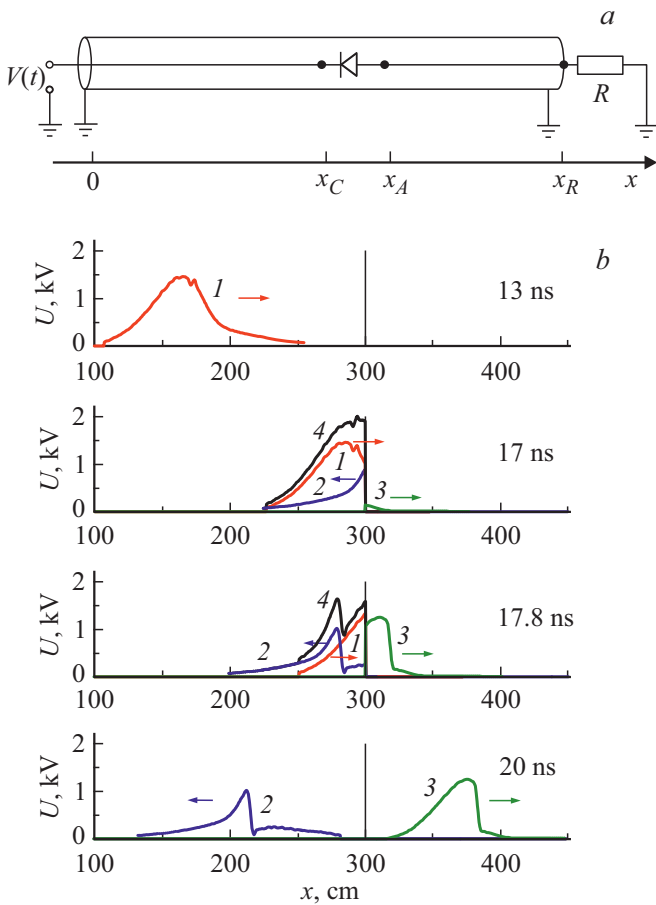
DOI: 10.21883/PJTF.2021.13.51119.18794

Явление задержанного ударно-ионизационного пробоя высоковольтных диодных  $p^+ - n - n^+$ -структур состоит в субнаносекундном переключении диода из блокирующего в проводящее состояние [1,2]. Переключение происходит при быстром ( $> 1 \text{ kV/ns}$ ) увеличении обратного напряжения  $V(t)$ . В результате в последовательной нагрузке  $R$  создается импульс тока с коротким (около 100 ps) передним фронтом. Явление лежит в основе работы диодного обострителя (ДО) импульсов — уникального прибора мощной импульсной электроники субнаносекундного диапазона [2–5]. Продолжаются фундаментальные исследования и поиск путей улучшения параметров ДО [6–10].

Субнаносекундные времена переключения в сочетании с киловольтными напряжениями требуют применения волновых трактов [2,7], причем точные измерения могут быть осуществлены только в высококачественном коаксиальном тракте [7]. Во время переключения нестационарная проводимость ДО, представляющего собой сложную неоднородность коаксиального тракта, и амплитуда отраженной от этой неоднородности волны взаимно влияют друг на друга. Поэтому волновые свойства тракта оказывают определяющее влияние на процесс субнаносекундного переключения. Несмотря на очевидную важность проблемы, взаимодействие ДО с трактом до сих пор не было исследовано. Так, численное моделирование диодных обострителей (за исключением моделирования последовательного переключения приборов в сборке ДО [5]) проводилось для упрощенной цепи с сосредоточенными элементами. В настоящей работе рассмотрена простейшая модель, описывающая волно-

вые процессы в коаксиальном тракте при субнаносекундном лавинном переключении диодного обострителя.

В эксперименте и практических приложениях [2,5,7] ДО (или последовательная сборка из нескольких ДО) помещается в держатель, включенный в коаксиальный тракт. Такая схема эквивалентна подключению ДО в разрыв центральной жилы коаксиального тракта (рис. 1, а). Волновое сопротивление тракта равно сопротивлению нагрузки  $R = 50 \Omega$ . На катод подается колоколообразный импульс обратного напряжения  $V(t)$ , амплитуда которого задается запускающим генератором. В эксперименте могут быть непосредственно измерены напряжение на нагрузке  $U_R(t)$  и напряжение между катодом ДО и экраном кабеля  $U_C(t)$ , которое представляет собой суммарное напряжение на нагрузке и ДО [5,7]. Разность этих величин равна напряжению на ДО  $U_d(t)$ . Напряжение на катоде  $U_C(t)$  измерялось в работах [5,7]. В работе [7] для этого применялся высококачественный резистивный ответвитель, который играл также роль держателя структуры (не показан на упрощенной схеме на рис. 1, а). Наличие дополнительной цепи для измерения напряжения на катоде  $U_C(t)$  приводит к возмущению волновых процессов в содержащем ДО тракте, которое может быть минимизировано [7], но не исключено полностью. Далее мы пренебрегаем этим возмущением, когда используем данные эксперимента для иллюстрации полученных аналитических результатов. В то же время эти результаты без данной оговорки применимы к наиболее важной на практике схеме (рис. 1, а), в которой измерение  $U_C(t)$  не производится. В дальнейшем анализе волновой тракт рассматривается как идеальная длинная линия. Учитывается только главная поперечная ТЕМ-мода. Ге-



**Рис. 1.** Схема включения диодного обострителя в коаксиальный тракт (а) и распределения напряжения в тракте (b). Диод помещен в разрыв центральной жилы нагруженного на согласованное сопротивление  $50 \Omega$  кабеля между точками с координатами  $x_C$  и  $x_A$ . Падающая  $U_i(t, x)$  (1), отраженная  $U_r(t, x)$  (2) и прошедшая  $U_t(t, x)$  (3) волны, а также мгновенная сумма  $U(t, x)$  падающей и отраженной волн (4) реконструированы по данным эксперимента [7] в последовательные моменты времени  $t = 13.0, 17.0, 17.8, 20.0$  ns. Стрелки указывают направление движения волны.

нерацией других пространственно-временных мод при отражении от диода пренебрегаем.

Рассмотрим связь между амплитудой электромагнитных импульсов в коаксиальном тракте и измеряемыми в эксперименте напряжениями  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$ . Распределение напряжения вдоль коаксиального тракта обозначим как  $U(t, x)$ , амплитуды падающей, отраженной и прошедшей волн — как  $U_i(t, x)$ ,  $U_r(t, x)$ ,  $U_t(t, x)$  соответственно. Таким образом,  $U(t, x) = U_i(t, x) + U_r(t, x)$  при  $0 < x < x_C$ ,  $U(t, x) = U_t(t, x)$  при  $x_C < x < x_R$ ,  $U_C(t) = U(t, x_C)$ ,  $U_R(t) = U(t, x_R)$  (рис. 1, b). Падающая волна полностью задана импульсом генератора:  $U_i(t, x) = V(t - x/c)$ , где  $c$  — скорость волны в тракте. Включенный в разрыв центральной жилы ДО представляет собой сложную неоднородность коаксиального тракта, в результате взаимодействия с которой па-

дающая волна разделяется на отраженную и прошедшую [11]. Амплитуды этих волн слева и справа от неоднородности, т.е. в точках  $x = x_C$  и  $x = x_A$ , связаны соотношением

$$U_i(t, x_C) = U_t(t, x_A) + U_r(t, x_C), \quad (1)$$

которое отвечает условию равенства единице суммы коэффициентов прохождения  $T$  и отражения  $R$ . Уравнение (1) следует из условия сохранения электрического заряда на центральном электроде и выполняется в меру точности линейного соотношения между плотностью заряда и амплитудой волны. Необходимо также выполнение соотношения  $W = x_A - x_C \ll c\delta$  (где  $\delta$  — полуширина импульса [11]), которое позволяет отождествить точки  $x_A$  и  $x_C$  в правой части уравнения (1). При типичных значениях  $\delta \sim 1$  ns,  $W \sim 100 \mu\text{m}$  это условие заведомо выполнено. Заметим, что следствием (1) является сохранение потока энергии с учетом мощности, рассеиваемой на диоде, но без учета потерь на высокочастотное излучение, связанное с трансформацией мод при отражении от диода.

Измеряемое в эксперименте напряжение между катодом ДО и экраном кабеля  $U_C(t)$  представляет собой сумму напряжений на ДО и нагрузке и равно сумме амплитуд падающей и отраженной волн на катоде в точке  $x = x_C$ :

$$U_C(t) \equiv U(t, x_C) = U_i(t, x_C) + U_r(t, x_C). \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) следует соотношение

$$U(t, x_C) + U_t(t, x_A) = 2U_i(t, x_C). \quad (3)$$

С помощью уравнений (1) и (3) находим напряжение на ДО  $U_d(t) \equiv U_C(t) - U_A(t)$ :

$$U_d(t) = 2U_i(t, x_C) - 2U_t(t, x_A) = 2U(t, x_C) - 2U_t(t, x_C). \quad (4)$$

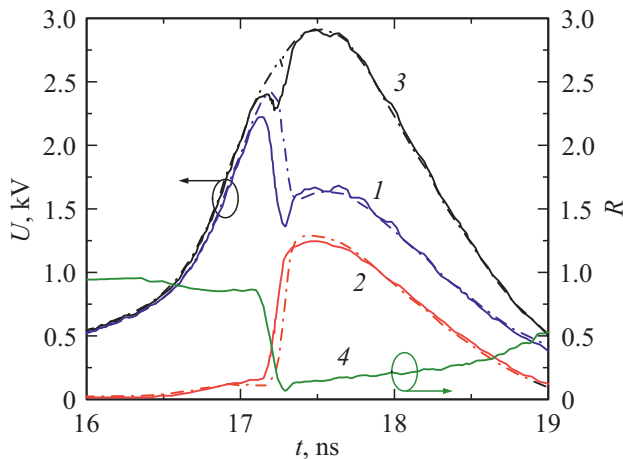
Из уравнений (2) и (4) следует, что амплитуда отраженной от ДО волны в точке  $x = x_C$  составляет половину напряжения на ДО

$$U_d(t) = 2U_r(t, x_C). \quad (5)$$

Амплитуды падающей  $U_i(t, x_C)$  и прошедшей  $U_t(t, x_A)$  волн на электродах ДО с учетом временной задержки могут быть представлены как  $U_i(t, x_C) = V(t - x_C/c)$  и  $U_A(t) \equiv U_t(t, x_A) = U_R[t + (x_R - x_A)/c]$ . С учетом этих соотношений из уравнения (3) получаем

$$U_C(t) + U_R[t + (x_R - x_A)/c] = 2V[t - x_C/c]. \quad (6)$$

Таким образом, сумма напряжения на катоде ДО и напряжения на нагрузке оказывается равной удвоенной амплитуде импульса генератора  $V(t)$ , измеренного в режиме работы на согласованную нагрузку. На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$  по данным работы [7] и их сумма. Зависимости (см. рис. 2



**Рис. 2.** Зависимости от времени напряжений на диоде и нагрузке  $U_C(t)$  (кривая 1) и на нагрузке  $U_R(t)$  (кривая 2) по данным эксперимента [7] (сплошные линии) и результатам численного моделирования (штрихпунктирные линии). Сумма  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$  (кривая 3), согласно уравнению (6), соответствует удвоенному импульсу запускающего генератора  $V(t)$ , имеющему колоколообразную форму. 4 — зависимость от времени коэффициента отражения ДО  $R(t)$ .

в [7]) соответствуют диодной  $p^+ - n - n^+$ -структуре с напряжением стационарного пробоя  $U_b = 1.1$  kV и площадью  $1$  mm<sup>2</sup>, изготовленной по диффузионной технологии из нейтронно-легированного кремния. Колоколообразный импульс генератора имел полуширину  $1.5$  ns [7]. Штрихпунктирными линиями на рис. 2 показаны зависимости  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$  и их сумма, полученные путем численного моделирования переключения ДО в коаксиальном тракте с помощью TCAD Silvaco (результаты моделирования будут представлены отдельно). Как для экспериментальных, так и для расчетных кривых сумма с разумной точностью представляет собой колоколообразный импульс полушириной  $1.5$  ns и амплитудой около  $3$  kV. Значительное отклонение от колоколообразной формы для экспериментальных зависимостей отражает неидеальность тракта в эксперименте, в том числе обусловленную наличием резистивного ответвителя [7], необходимого для измерения напряжения в точке  $x = x_C$ . Таким образом, соотношение (3) позволяет восстановить форму импульса генератора без непосредственного измерения на согласованной нагрузке.

Из уравнения (6) следует, что до момента начала переключения напряжение на катоде  $U_C$  почти в 2 раза превышает амплитуду импульса генератора. Этот эффект связан со сложением падающей и отраженной волн. При возрастании тока в нагрузке напряжение на катоде падает, поскольку амплитуда импульса генератора задана. Известно, что переключение ДО в режиме задержанного лавинного пробоя происходит, когда напряжение на приборе примерно вдвое превосходит напряжение стационарного лавинного пробоя  $U_b$  [1,2,7]. Описанный выше эффект удвоения напряжения означает,

что переключение диода в волновом тракте может быть достигнуто для запускающего импульса  $V(t)$ , амплитуда которого лишь незначительно превосходит  $U_b$ .

Установим связь между экспериментально измеряемыми величинами  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$  и пространственно-временными амплитудами импульсов в тракте. Для амплитуд волн в идеальной линии выполняются соотношения

$$\begin{aligned} U_i(t, x) &= U_i[t + (x_C - x)/c, x_C], \\ U_r(t, x) &= U_r[t - (x_C - x)/c, x_C], \\ U_i(t, x) &= U_R[t + (x_R - x)/c]. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая уравнения (1), (2) и полагая  $x_A = x_C$  (в силу  $W = x_A - x_C \ll c\delta$ ), получаем

$$2U_i(t, x) = U_C[t + (x_C - x)/c] + U_R[t + (x_R - x)/c], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} 2U_r(t, x) &= U_C[t - (x_C - x)/c] \\ &- U_R[t + (x_R + x - 2x_C)/c]. \end{aligned} \quad (9)$$

Полное напряжение  $U(t, x) = U_i(t, x) + U_r(t, x)$  в тракте между генератором и ДО и временные зависимости для коэффициентов отражения и прохождения

$$\begin{aligned} R(t) &= U_r(t, x_C)/U_i(t, x_C), \\ T(t) &= U_i(t, x_A)/U_i(t, x_C) \end{aligned} \quad (10)$$

могут быть явно выражены через  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$  с помощью уравнений (7)–(10).

Коэффициент отражения  $R(t)$ , построенный с помощью уравнений (7)–(10) по данным эксперимента [7], показан на рис. 2 (кривая 4). Резкое уменьшение коэффициента отражения при  $100$ -пикосекундном переключении обострителя оказывает решающее влияние на динамику электромагнитных импульсов в тракте.

Пространственно-временные зависимости амплитуд волн в тракте, вычисленные с помощью полученных выше соотношений (7)–(9), и измеренных в экспериментах [7] напряжений  $U_C(t)$  и  $U_R(t)$  (рис. 2) представлены на рис. 1, б. ДО находится в точке  $x_C = 300$  см;  $x_R = 600$  см,  $(x_A - x_C) \ll x_C, x_A, x_R$ . До переключения падающая волна почти полностью отражается, так как коэффициент отражения  $R$  близок к единице (рис. 2). Ток в нагрузке незначителен. На этой фазе процесса сложение падающей и отраженной волн почти удваивает напряжение на ДО по сравнению с амплитудой импульса генератора  $V(t)$ . В процессе переключения ДО коэффициент отражения быстро уменьшается вследствие увеличения проводимости прибора. Это приводит к резкому уменьшению амплитуды отраженной волны. Как следствие, напряжение на катоде  $U_C$  значительно и резко уменьшается. Одновременно нарастает амплитуда прошедшей волны, т.е. ток в нагрузке. Заметим, что значительная величина  $x_R$  выбрана для наглядности представления результата. При длине тракта около  $100$  см принципиально возможно отражение волны  $U_r$  от генератора. Однако в эксперименте [7] конструкция

выходного каскада генератора обеспечивает поглощение этой волны.

Таким образом, в работе установлена связь между измеряемыми в эксперименте напряжениями и запускающим импульсом генератора, определена временная зависимость коэффициента отражения ДО при субнаносекундном ударно-ионизационном переключении, а также реконструированы профили падающей, отраженной и прошедшей волн в коаксиальном тракте.

### Благодарности

Авторы признательны А.Ф. Кардо-Сысоеву за полезные обсуждения.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев, Письма в ЖТФ, **5** (15), 950 (1979).
- [2] A.F. Kardo-Sysoev, in *Ultra-wideband radar technology*, ed. by J.D. Taylor (CRS Press, Boca Raton–London–N.Y.–Washington, 2001), p. 205.
- [3] R.J. Focia, E. Schamiloglu, C.B. Fledermann, F.J. Agee, J. Gaudet, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25** (2), 138 (1997). DOI: 10.1109/27.602484
- [4] I.V. Grekhov, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **38** (5), 1118 (2010). DOI: 10.1109/TPS.2010.2043857
- [5] С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов, Письма в ЖТФ, **31** (5), 36 (2005). [Пер. версия: 10.1134/1.1894430]; ФТП, **44** (7), 962 (2010). [Пер. версия: 10.1134/S1063782610070171].
- [6] L.M. Merensky, A.F. Kardo-Sysoev, D. Shmilovitz, A.M. Kesar, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **42** (12), 4015 (2014). DOI: 10.1109/TPS.2014.2366551
- [7] V. Brylevskiy, I. Smirnova, A. Gutkin, P. Brunkov, P. Rodin, I. Grekhov, *J. Appl. Phys.*, **122** (18), 185701 (2017). DOI: 10.1063/1.5004524
- [8] P. Rodin, M. Ivanov, *J. Appl. Phys.*, **127** (4), 044504 (2020). DOI: 10.1063/1.5097831
- [9] A.S. Kesar, A. Raizman, G. Atar, S. Zoran, S. Gleizer, Y. Krasik, D. Cohen-Elias, *Appl. Phys. Lett.*, **117** (1), 013501 (2020). DOI: 10.1063/5.0016228
- [10] C.C. Herrmann, J. Croman, S.V. Baryshev, arXiv: 2011.13081 (2020).
- [11] P.W. Smith, *Transient electronics: pulsed circuit technology* (John Wiley & Sons, Chichester, 2002).