

07

## Субнаносекундное лавинное переключение высоковольтных кремниевых диодов с резкими и плавными $p-n$ -переходами

© В.И. Брылевский, И.А. Смирнова, П.Б. Родин, И.В. Грехов

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

Поступило в Редакцию 18 декабря 2013 г.

Задержанный лавинный пробой высоковольтных кремниевых диодов впервые исследован с помощью экспериментальной установки со специально сконструированным резистивным ответвителем, являющимся частью высококачественного согласованного измерительного тракта. Исследованы три типа структур с одинаковыми геометрическими параметрами и близкими напряжениями стационарного пробоя 1.1–1.3 кВ:  $p^+-n-n^+$ -структуры с резким  $p-n$ -переходом и два различных типа  $p^+-p-n-n^+$ -структур с плавным переходом. При переключении всех структур в нагрузку формировался перепад напряжения амплитудой более киловольта и скоростью нарастания  $\sim 100$  ps при напряжении пробоя около 2 кВ. Однако переключение в состоянии с низким ( $\sim 150$  В) остаточным напряжением обнаружено только для структур с резким переходом; для структур с плавным переходом напряжение уменьшалось только до величины  $\sim 1$  кВ, близкой к напряжению стационарного пробоя.

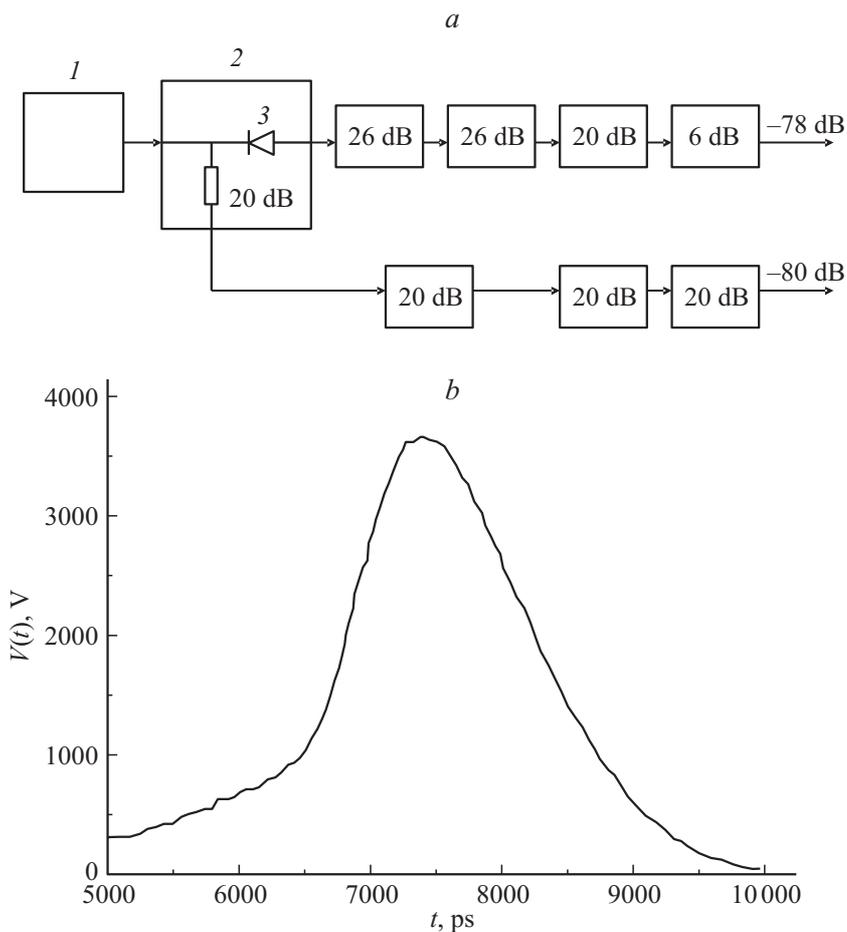
Эффект задержанного лавинного пробоя высоковольтных диодных структур состоит в быстром (100 ps или менее) переходе обратносмещенной структуры из блокирующего в проводящее состояние при приложении нарастающего импульса обратного напряжения. Он был обнаружен как в кремниевых [1,2], так и в арсенид-галлиевых структурах [3,4]. Пробой происходит при напряжении, значительно превосходящем напряжение стационарного лавинного пробоя, и характеризуется аномально малой кратковременной нестабильностью импульса (джиттером). Открытие эффекта задержанного лавинного пробоя на порядки улучшило параметры импульсных полупроводниковых систем большой мощности, сделав возможным формирование киловольтных

перепадов напряжения со временем нарастания до 100 ps, что привело к созданию новой области — полупроводниковой субнаносекундной импульсной электроники большой мощности [5–7].

Несмотря на успешное практическое применение приборов на основе задержанного лавинного пробоя, физическое понимание эффекта остается недостаточным. В частности, однозначно не установлен механизм появления затравочных носителей [4,5,8], неясна степень однородности процесса по площади структуры [9,11], до сих пор высказываются различные гипотезы относительно механизма модуляции проводимости [11,12]. Отсутствуют также систематические сравнительные исследования субнаносекундного лавинного переключения для различных полупроводниковых структур. Одна из причин такого положения дел состоит в том, что долгое время в фокусе интереса находились именно приложения данного эффекта, а исследованию его физических основ не уделялось достаточного внимания. Сейчас это стало существенным препятствием не только для совершенствования существующих приборов, но и для создания устойчивой промышленной технологии их производства. Другой причиной неудовлетворительного физического понимания является сочетание высокой скорости процесса переключения с большим (несколько киловольт) перепадом напряжений, что делает измерение тока и напряжения сложной задачей. Субнаносекундные времена переключения соответствуют гигагерцовому диапазону частот, в силу чего измерения переходных процессов требуют полностью согласованных измерительных трактов, включающих в себя ответители и сверхширокополосные высоковольтные аттенюаторы. Систематическая работа по созданию таких измерительных систем до настоящего времени не велась.

В данном сообщении представлены первые результаты измерений, проведенных на созданной в ФТИ экспериментальной установке, специально спроектированной для исследования субнаносекундных киловольтных перепадов напряжения в полупроводниковых приборах. Исследования показали качественное различие процесса сверхбыстрого переключения в кремниевых структурах с резкими и плавными переходами, имеющих близкие стационарные характеристики и геометрические параметры.

Схема установки показана на рис. 1, а. Установка состоит из генератора колоколообразных импульсов, резистивного ненаправленного ответителя, набора сверхширокополосных аттенюаторов и двухканального широкополосного осциллографа. Генератор импульсов построен на



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки (а) и форма исходного импульса генератора (b): 1 — генератор колоколообразных импульсов, 2 — ненаправленный резистивный ответвитель, служащий также держателем исследуемой структуры, 3 — исследуемая диодная структура.

базе дрейфовых диодов с резким восстановлением и предназначен для формирования импульсов, амплитуда которых может плавно изменяться от 2 до 5 кV. Фронт имеет длительность  $\sim 0.5$  ps (по уровням 0.2–0.9), а

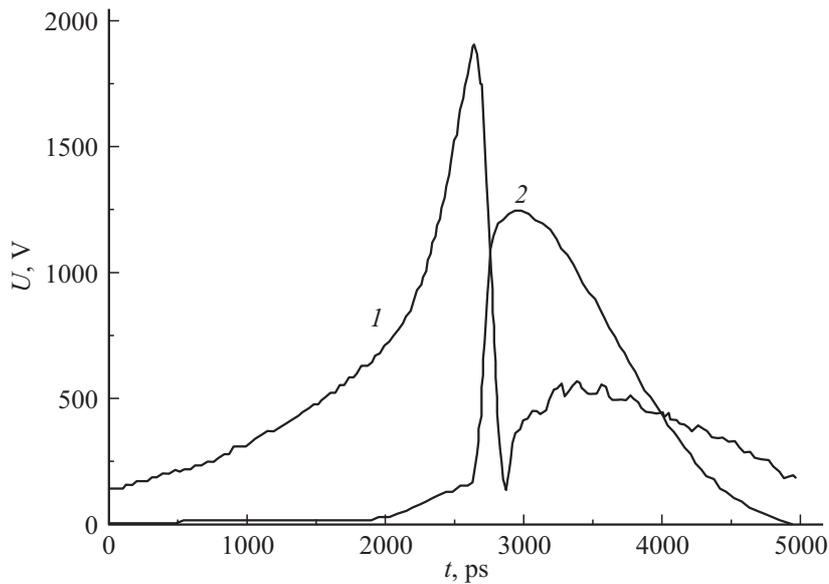
частота повторения может быть изменена от 1 Hz до 3 kHz. На рис. 1, *b* в качестве примера показан импульс  $V(t)$  генератора амплитудой 3.7 kV и полушириной 2.5 ns, измеренный при короткозамкнутом держателе диода.

Резистивный ненаправленный ответвитель предназначен для измерения формы и амплитуды импульсного напряжения, приложенного к исследуемым структурам в процессе их переключения, и одновременно служит держателем исследуемой структуры. Поскольку время сверхбыстрого переключения кремниевых высоковольтных структур составляет величину, близкую к 100 ps, резистивный ответвитель является частью высококачественного измерительного тракта с волновым сопротивлением  $\rho = 50 \Omega$ . Он имеет временное разрешение не хуже 50 ps и коэффициент ослабления измеряемого импульсного напряжения 20 dB. Подключаемый к выходу ответвителя тракт измерения тока через исследуемую структуру имеет временное разрешение не хуже 50 ps.

Набор сверхширокополосных аттенюаторов состоит из двух высоковольтных аттенюаторов фирмы „Barth Electronics, Inc.“, высоковольтного аттенюатора разработки ФТИ и четырех отечественных аттенюаторов ДН-4, каждый из которых имеет время нарастания переходной характеристики менее 30 ps и коэффициент деления напряжения 20 dB. Аттенюаторы совместно с резистивным ответвителем ослабляют измеряемые сигналы в трактах напряжения и тока на 80 и 78 dB соответственно и обеспечивают возможность измерений с помощью осциллографа HP54750A с полосой пропускания 20 GHz.

Непосредственно измеряемыми величинами являются напряжение  $U^\Sigma(t)$  на структуре вместе с последовательно включенной нагрузкой величиной  $\rho = 50 \Omega$  и напряжение на нагрузке  $U^\rho(t)$ . Это позволяет определить напряжение на исследуемой диодной структуре  $U^D(t) = U^\Sigma(t) - U^\rho(t)$  и протекающий через нее ток  $I(t) = U^\rho/\rho$ . Экспериментальная установка позволяет производить измерения параметров переключения при изменении в широких пределах как амплитуды приложенного напряжения, так и времени нарастания этого напряжения.

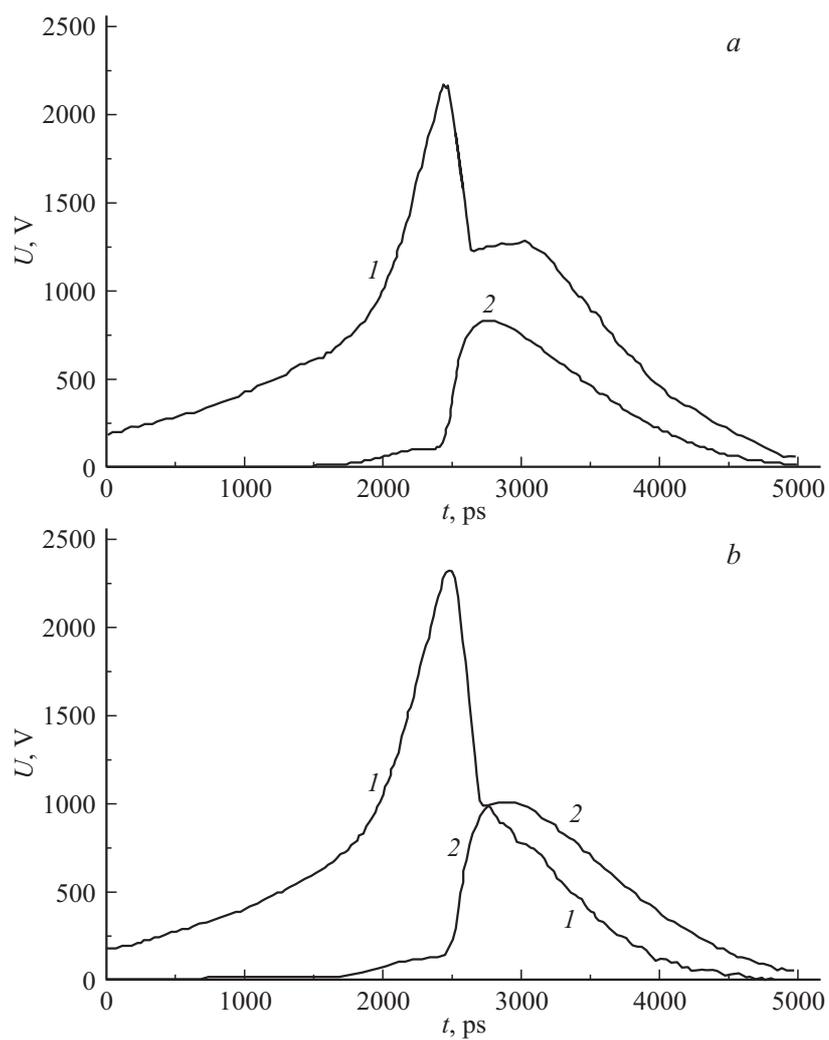
Для сравнительных исследований были изготовлены 3 группы кремниевых  $p^+ - n - n^+$ -структур. Все структуры изготавливались из кремния с исходной концентрацией примеси  $1.45 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (сопротивление  $30 \Omega \cdot \text{cm}$ ), полученного методом нейтронно-трансмутационного легирования, с помощью диффузии примеси в шлифованную поверхность. Структуры 1 типа имели резкий  $p - n$ -переход, сформированный



**Рис. 2.** Напряжение на структуре  $U^D(t)$  (кривая 1) и напряжение на омической нагрузке  $U^\rho(t)$  (кривая 2) для  $p^+-n-n^+$ -структуры первого типа с резким переходом, полученным диффузией бора. Ток через структуру определяется как  $I(t) = U^\rho/\rho$ , где  $\rho = 50 \Omega$ .

диффузией бора. Структуры 2 и 3 типов — плавный  $p-n$ -переход, сформированный совместной диффузией бора и алюминия (для 2 типа) или бора и галлия (для 3 типа). Для создания  $n^+$ -слоя применялась диффузия фосфора. Для всех 3 типов структур глубина залегания  $p-n$ - и  $n-n^+$ -переходов составляет  $\sim 75 \mu\text{m}$ , общая толщина структуры —  $220 \mu\text{m}$ , диаметр  $d \approx 1.1 \text{ mm}$ . Напряжение стационарного пробоя  $U_b$  составляет  $U_b^1 \approx 1100 \text{ V}$  и  $U_b^2 \approx U_b^3 \approx 1300 \text{ V}$  для структур с резким и плавными переходами соответственно.

На рис. 2, 3 представлены напряжения  $U^D(t)$  на структуре (кривые 1) и напряжения  $U^\rho(t)$  на омической нагрузке величиной  $50 \Omega$  (кривые 2). Для структуры с резким  $p-n$ -переходом (рис. 2), полученным диффузией бора, напряжение переключения составляет  $U_{m1}^D = 1900 \text{ V}$ , остаточное напряжение  $U_{res1}^D \approx 150 \text{ V}$ . Величина тока после переключе-



**Рис. 3.** Напряжение на структуре (кривые 1) и напряжение на нагрузке (кривые 2) для  $p^+-p-n-n^+$ -структур 2 и 3 типа с плавным переходом. *a* — структура с  $p-n$ -переходом, полученным последовательной диффузией бора и алюминия, *b* — с переходом, полученным диффузией бора и галлия.

чения составляет  $I_{m1} = 25$  А. Измеренное время переключения по уровню сигнала 0.1–0.9 составляет 120 ps. Собственное время нарастания переходной характеристики каждого из 4 применяемых в цепи измерения аттенуаторов составляет 30 ps, а осциллографа — 20 ps. Оценивая измеряемое время как среднеквадратичное всех собственных времен нарастания последовательных элементов тракта, включая время нарастания тока в диоде, можно заключить, что время нарастания тока в диоде не больше 100 ps.

Переключение структур с плавным переходом (рис. 3) происходит при несколько больших значениях напряжения, чем для структуры с резким переходом:  $U_{m2}^D \approx 2150$  В и  $U_{m3}^D \approx 2300$  В для структур 2 и 3 типов соответственно. При этом также формируется быстрый перепад тока с амплитудой  $I_{m2} \approx 16.5$  А,  $I_{m3} \approx 20$  А, однако амплитуда перепада напряжения почти в 2 раза меньше, чем для структуры с резким переходом. Это связано с большой величиной остаточного напряжения  $U_{res2}^D \approx 1200$  В,  $U_{res3}^D \approx 1000$  В, которое почти на порядок превосходит остаточное напряжение для структуры с резким переходом  $U_{res1}^D$  и составляет примерно половину напряжения начала пробоя. Величины  $U_{res2}^D$ ,  $U_{res3}^D$  близки к напряжению стационарного пробоя. Большая величина остаточного напряжения в приборах с плавным переходом не позволяет говорить о том, что существенная часть прибора заполнена проводящей плазмой, хотя способность структуры сформировать быстрый перепад тока в нагрузке сохраняется. Физическая причина возникновения такого режима субнаносекундного лавинного переключения остается неясной.

Важно отметить, что опасная для работы структуры величина остаточного напряжения не может быть выявлена при измерении только тока, что является, например, стандартной практикой при отборе полупроводниковых структур для импульсных генераторов. Исследованные нами приборы с плавными переходами сохраняли свои свойства в сериях импульсов длительностью несколько минут при частоте повторения 300 Hz, однако можно ожидать их деградации при большей длительности импульса генератора. Исследование этого вопроса, равно как и емкостная спектроскопия исследованных структур с целью выявить возможные различия в механизмах запуска, является темой проводимых в настоящее время исследований, результаты которых будут представлены отдельно.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-02-00813.

## Список литературы

- [1] Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 15. С. 950–953.
- [2] Grekhov I.V., Kardo-Sysoev A.F., Kostina L.S., Shenderey S.V. // Electron. Lett. 1981. V. 17. P. 422–423.
- [3] Алфёров Ж.И., Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Корольков В.И., Степанова М.Н. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 18. С. 1089–1093.
- [4] Levinshtein M., Kostamovaara J., Vainshtein S. // Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductor devices. London: World Scientific, 2005.
- [5] Kardo-Sysoev A.F. // New Power Semiconductor Devices for Generation of Nano- and Subnanosecond Pulses, in Ultra-Wideband Radar Technology / Ed. J.D. Taylor. Boca Raton, London, New York, Washington: CRS Press, 2001.
- [6] Focia R.J., Schamiloghu E., Flederman C.B., Agee F.J., Gaudet J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. P. 138–144.
- [7] Grekhov I.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. P. 1118–1123.
- [8] Rodin P., Rodina A., Grekhov I. // J. Appl. Phys. 2006. V. 98. P. 094 506(1–11).
- [9] Вайнштейн С.Н., Жиляев Ю.В., Левинштейн М.Е. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 16. С. 1526–1530.
- [10] Кюрегян А.С. // ЖЭТФ. 2012. Т. 141. В. 5. С. 983–993.
- [11] Грехов И.В., Родин П.Б. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 41. В. 6. С. 87–94.
- [12] Кюрегян А.С. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 24. С. 11–19.