

07

Экспериментальное наблюдение задержанного ударно-ионизационного пробоя полупроводниковых структур без $p-n$ -переходов

© В.И. Брылевский, И.А. Смирнова, Н.И. Подольская,
Ю.А. Жарова, П.Б. Родин[¶], И.В. Грехов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

[¶] E-mail: rodin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2017 г.

Экспериментально исследована динамика ударно-ионизационного переключения полупроводниковых структур без $p-n$ -переходов при приложении субнаносекундного высоковольтного импульса. Исследованы кремниевые n^+-n-n^+ -структуры и объемные образцы ZnSe с плоскими омическими контактами. Обнаружено обратимое лавинное переключение в проводящее состояние за время около 200 ps, сходное с хорошо известным явлением задержанного лавинного пробоя обратносмещенных диодных p^+-n-n^+ -структур. Приведено сравнение эксперимента с численным моделированием.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.04.45640.17086

Быстронарастающие высоковольтные импульсы применяются для инициирования лавинного пробоя и создания проводящей электронно-дырочной плазмы в двух типах полупроводниковых структур: в диодных полупроводниковых структурах с плоскими контактами [1–3] и полупроводниковых образцах с „точечным“ контактом [4]. Диодные полупроводниковые структуры, переключение которых осуществляется короткими высоковольтными импульсами, известны как диодные обострители импульсов. Переключение кремниевого диодного обострителя длится менее 100 ps и начинается при напряжении, существенно превышающем напряжение стационарного пробоя [1,5]. Это явление, получившее название задержанного ударно-ионизационного пробоя диодных структур [1], обнаружено в кремниевых и арсенид-галлиевых

структурах [6,7] и нашло применение в мощной быстродействующей импульсной электронике [2,3,8–10]. Поперечный размер диодного обострителя существенно превосходит расстояние между плоскими контактами, в силу чего электрическое поле, обеспечивающее лавинную ионизацию в n -базе, квазиоднородно по площади структуры, и, хотя бы в принципе, лавинная генерация носителей может происходить во всем объеме структуры. Напротив, в полупроводниковых образцах с точечным контактом-острием быстро нарастающий высоковольтный импульс инициирует формирование и распространение стримеров [4], т.е. генерацию плотной электронно-дырочной плазмы в узких нитевидных областях. Целью исследований [4] являлось создание ударно-ионизационных лазеров.

В настоящей работе впервые приведено экспериментальное исследование лавинного пробоя полупроводниковых структур с плоскими контактами без p - n -переходов. Исследованы кремниевые $n^+ - n - n^+$ -структуры и объемные образцы селенида цинка с планарными омическими контактами. Показано, что быстро нарастающий высоковольтный импульс инициирует сверхбыстрое (длительностью около 200 ps) переключение структуры в проводящее состояние. Сравнение экспериментальных данных с численным моделированием приводит к заключению, что неравновесная электронно-дырочная плазма генерируется в большей части объема структуры.

Кремниевые $n^+ - n - n^+$ -структуры были изготовлены из n -кремния с концентрацией легирующей примеси $N = 1.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ с помощью той же диффузионной технологии, что и $p^+ - n - n^+$ -структуры кремниевых диодных обострителей [5], и имели сходные с диодными обострителями размеры: диаметр около 1 mm, общая толщина около 200 μm . Толщина полученных посредством диффузии фосфора n^+ -слоев составляла $\sim 10 \mu\text{m}$. Также была изготовлена партия $n^+ - n - n^+$ -структур с толщиной n^+ -слоев по $\sim 60 \mu\text{m}$ и n -слоя 80 μm .

Пластины ZnSe (111) имели толщину 450 μm ; для формирования омического контакта на них был напылен индий [11]. Двухэтапное напыление с промежуточным отжигом позволило получить слой индия толщиной 0.5–1 μm . Из пластины были вырезаны шайбы диаметром 1 mm.

Экспериментальная установка состояла из генератора запускающих высоковольтных колоколообразных импульсов с нано- и субнаносекундным временем нарастания, резистивного ответвителя, двух измерительных трактов, состоящих из высоковольтных аттенюаторов, и стробоско-

пического осциллографа с полосой пропускания 20 GHz. Резистивный ответитель выполняет также функцию держателя, в котором исследуемая структура помещается в разрыв центральной жилы коаксиального тракта. Установка обеспечивает одновременное и независимое измерение напряжения U_R на нагрузке величиной $R = 50 \Omega$ и напряжения U_{in} на структуре вместе с нагрузкой, т.е. тока через структуру $I_S = U_R/R$ и напряжения на ней $U_S = U_{in} - U_R$, с временным разрешением не хуже 50 ps. Более полное описание установки приведено в работе [5].

Результаты измерений представлены на рис. 1. Показаны напряжения U_R на последовательной нагрузке $R = 50 \Omega$ (т.е. тока в структуре $I_S = U_R/R$) и напряжение на структуре U_S при различных амплитудах и формах приложенных импульсов. Рассмотрим сначала (рис. 1, *a*) колоколообразный импульс полушириной ~ 1.5 ns и амплитудой 2.6 kV, который обеспечивал успешное сверхбыстрое лавинное переключение обратносмещенных диодных структур [5]. В случае $n^+ - n - n^+$ -структуры напряжение U_S близко следует за приложенным напряжением U_{in} (рис. 1, *a*).

Отклик структуры несколько меняется при увеличении амплитуды приложенного импульса до 4.1 kV при том же времени нарастания (рис. 1, *b*). В этом случае напряжение U_S на структуре перестает следовать за напряжением U_{in} и в момент $t = 4.76$ ns начинает уменьшаться (рис. 1, *b*). Это указывает на заметный рост концентрации свободных носителей вследствие ударной ионизации. Одновременно увеличивается и ток в нагрузке. Однако сверхбыстрого переключения в проводящее состояние не происходит.

Качественное изменение динамики обнаруживается при резком уменьшении времени нарастания приложенного импульса (рис. 1, *c*) (это достигалось с помощью обострительной головки на основе кремниевых диодных обострителей). В этом случае в момент времени $t = 2.46$ ns начинается сверхбыстрое переключение: напряжение на структуре U_S уменьшается с 3.17 до ~ 0.63 kV за время около 200 ps, а ток I_S при этом возрастает до величины ~ 35 A. После переключения величина U_S мало меняется на всем протяжении приложенного импульса. Аналогичное сверхбыстрое переключение наблюдалось и для $n^+ - n - n^+$ -структуры с толщинами слоев примерно 60–80–60 μm (рис. 1, *d*). В момент времени $t = 2.48$ ns начинается сверхбыстрое переключение: напряжение на структуре U_S уменьшается с 2.22 до ~ 0.45 kV за время около 155 ps, а ток I_S при этом возрастает до вели-

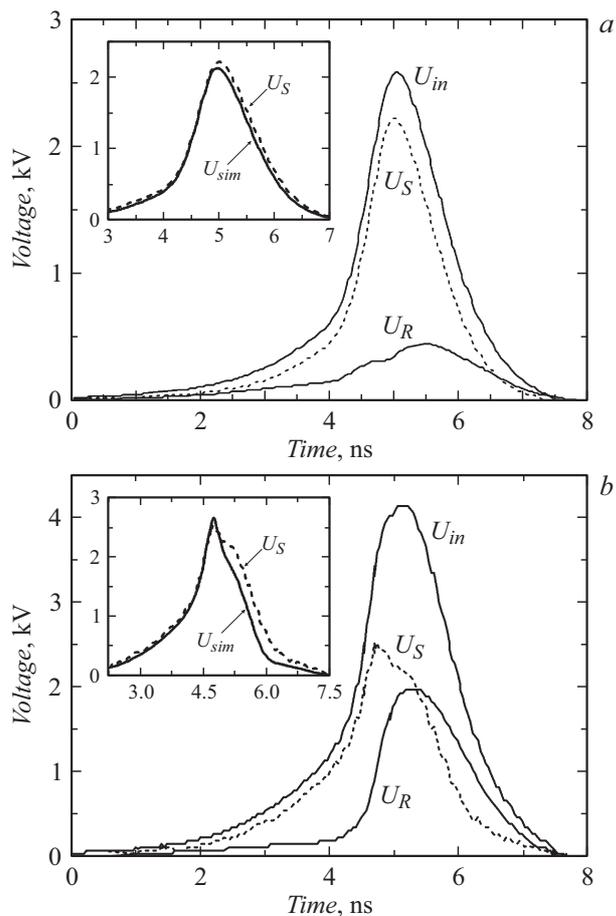


Рис. 1. Напряжение на кремниевой $n^+ - n - n^+$ -структуре U_S и напряжение U_R на последовательной 50Ω нагрузке при различных приложенных импульсах. U_{in} — измеренное напряжение на структуре вместе с нагрузкой. На частях $a - c$ представлены измерения для $n^+ - n - n^+$ -структуры с толщинами слоев $10 - 180 - 10 \mu\text{m}$, d — измерения для $n^+ - n - n^+$ -структуры с толщинами слоев $60 - 80 - 60 \mu\text{m}$. На вставках показано сравнение результатов экспериментов и численного моделирования: расчетные зависимости напряжения на структуре $U_{sim}(t)$ (сплошная линия) показаны вместе с зависимостями $U_S(t)$, полученными в экспериментах (штриховая линия).

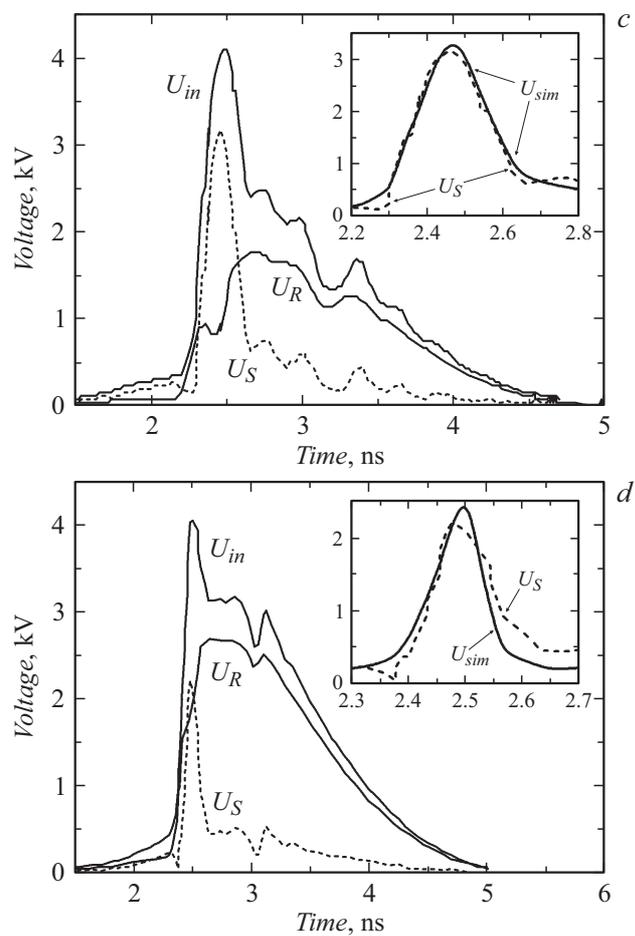


Рис. 1 (продолжение).

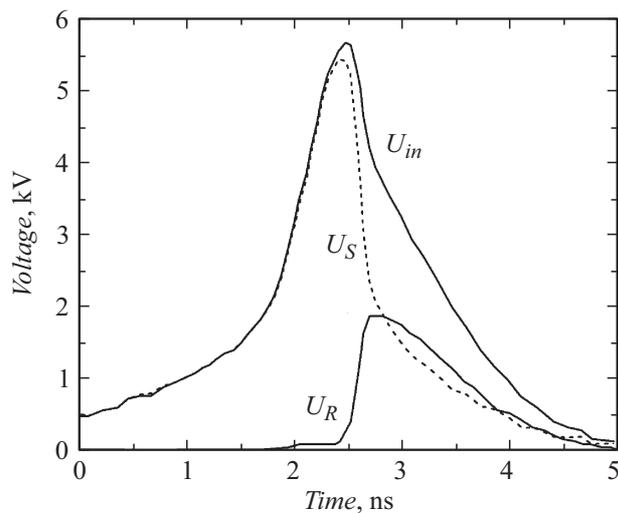


Рис. 2. Напряжение U_{in} на структуре ZnSe вместе с напряжением на 50Ω нагрузке, напряжение U_R на 50Ω нагрузке и напряжение U_S на структуре.

чины более 50 А. Таким образом, нами экспериментально обнаружено сверхбыстрое лавинное переключение кремниевых $n^+ - n - n^+$ -структур в проводящее состояние.

Для достижения сверхбыстрого переключения структуры ZnSe амплитуда импульса была увеличена до 5.7 kV, ширина импульса по половине амплитуды составляла 1.2 ns (рис. 2). Переключение сопровождается быстрым падением напряжения U_S на структуре и ростом тока I_S в нагрузке и происходит за ~ 200 ps. Амплитуда импульса в данном случае находилась на пределе возможностей запускающего генератора измерительной установки, что не позволило исследовать переключение более детально.

Все структуры были исследованы при частоте повторения импульсов 300 Hz. После работы в непрерывном режиме в течение нескольких минут не наблюдалось никаких изменений формы импульса, а также изменений электрофизических параметров структур, что указывает на полностью обратимый характер пробоя.

Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования представлено на вставках к рис. 1. Численное моделирование проведено в одномерном приближении с помощью программного обеспечения SILVACO [12]. Представленные результаты получены для площади структуры $S = 1.2 \text{ mm}^2$ и толщин слоев $10\text{--}160\text{--}10 \mu\text{m}$ и $55\text{--}90\text{--}55 \mu\text{m}$ (эти размеры при моделировании рассматривались как подгоночные параметры и варьировались в интервале, обусловленном технологическими допусками при изготовлении реальных структур). Хорошее согласие одномерного численного моделирования с экспериментом указывает на то, что процессы ударной ионизации происходят квази-однородно по площади структуры. Численное моделирование также показывает, что созданные ударной ионизацией неравновесные носители распределены квазиоднородно и вдоль направления протекания тока. Концентрация неравновесных носителей для экспериментов, показанных на рис. 1, *c, d* и вставках к ним, по результатам численного моделирования составляет примерно 10^{15} cm^{-3} , причем концентрации электронов и дырок одинаковы. Таким образом, при переключении электронно-дырочная плазма создается, по-видимому, однородно во всем объеме $n^+ - n - n^+$ -структуры.

При численном моделировании для коэффициентов ударной ионизации была выбрана модель [13] вместо модели [14], которая была использована в предшествующей работе [15]. Как оказалось, некоторое различие аппроксимаций [13] и [14] в области электрических полей $10^5\text{--}3 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ приводит к качественно различным результатам численного моделирования. При применении модели [14] ударная ионизация начинается при большем напряжении на структуре, и согласие эксперимента и расчета не может быть достигнуто. Влияние аппроксимации для коэффициентов ударной ионизации на характеристики переключения станет предметом дальнейших исследований.

Таким образом, нами экспериментально показана возможность субнаносекундного лавинного переключения в проводящее состояние полупроводниковых структур без p - n -переходов с помощью субнаносекундного высоковольтного импульса напряжения. Сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами численных расчетов приводит к заключению, что в кремниевых $n^+ - n - n^+$ -структурах инициированная быстронарастающим высоковольтным импульсом лавинная ионизация генерирует неравновесную электронно-дырочную плазму квазиоднородно во всем объеме структуры.

Исследование проведено при поддержке гранта РФФ 14-29-00094.

Список литературы

- [1] *Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 15. С. 950–953.
- [2] *Kardo-Sysoev A.F.* // Ultra-wideband radar technology / Ed. J.D. Taylor. Boca Raton—London—N.Y.—Washington: CRS Press, 2001. Ch. 9.
- [3] *Grekhov I.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. P. 1118–1123.
- [4] *Месяц Г.А., Насибов А.С., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. В. 6. С. 1162–1168.
- [5] *Брылевский В.И., Смирнова И.А., Родин П.Б., Грехов И.В.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 8. С. 80–87.
- [6] *Алферов 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.
- [7] *Brylevskiy V.I., Smirnova I.A., Rozhkov A.V., Brunkov P.N., Rodin P.B., Grekhov I.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. P. 1941–1946.
- [8] *Focia R.J., Schamiloghu E., Flederman C.B., Agee F.J., Gaudet J.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. P. 138–144.
- [9] *Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 5. С. 36–46.
- [10] *Гусев А.И., Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н.* // ФТП. 2014. Т. 48. В. 8. С. 1095–1106.
- [11] *Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А.* // ФТП. 2007. Т. 41. В. 11. С. 1281–1308.
- [12] <http://www.silvaco.com>
- [13] *Selberherr S.* Analysis and simulation of semiconductor devices. Wien—N.Y.: Springer-Verlag, 1984. 293 p.
- [14] *Valdinoci M., Ventura D., Vecchi M.C., Rudan M., Vaccarani G., Illien F., Stricker A., Zullinob L.* // Proc. of the Int. Conf. on simulations of semiconductor processes and devices (SISPAD '99). Kyoto, Japan, 1999. P. 27–30.
- [15] *Подольская Н.И., Родин П.Б.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 11. С. 55–62.