

07

Аномальная динамика остаточного напряжения на арсенид-галлиевом диоде при субнаносекундном лавинном переключении

© В.И. Брылевский, А.В. Рожков, 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 13 ноября 2014 г.

Экспериментально обнаружено качественное отличие высоковольтных арсенид-галлиевых диодов от аналогичных кремниевых приборов при сверхбыстром переключении в режиме задержанного лавинного пробоя. Показано, что арсенид-галлиевый диод после переключения остается в высокопроводящем состоянии на всем протяжении приложенного импульса напряжения, восстановление обратного напряжения на $p-n$ -переходе вследствие рассасывания неравновесной электронно-дырочной плазмы не происходит. За это же время (в нашем эксперименте 2 ns) кремниевый диод полностью переходит в блокирующее состояние. Величина остаточного напряжения для арсенид-галлиевого диода на порядок меньше, чем для кремниевого прибора. Обнаруженный эффект сходен с известным эффектом „залипания“ в проводящем состоянии арсенид-галлиевых диодных ключей, переключаемых лазерным импульсом.

Явление задержанного лавинного пробоя высоковольтных диодов состоит в субнаносекундном переходе структуры из блокирующего в проводящее состояние, возникающем при быстром росте обратного напряжения. На сегодняшний день задержанный лавинный пробой на-

блюдался для структур на основе кремния [1,2] и арсенида галлия [3–6]. Кремниевые структуры широко применяются в импульсной электронике большой мощности для формирования киловольтных перепадов напряжения длительностью 100 ps и менее [7–9]. В данной работе приведены результаты сравнительного экспериментального исследования субнаносекундного переключения высоковольтных арсенид-галлиевых и кремниевых диодов, имеющих близкие напряжения стационарного пробоя и геометрические параметры. Полученные результаты не только подтверждают способность арсенид-галлиевых диодов формировать киловольтные перепады напряжения с длительностью около 100 ps, но и обнаруживают неизвестное ранее качественное отличие в поведении арсенид-галлиевых и кремниевых структур после сверхбыстрого переключения.

Экспериментальная установка состоит из генератора импульсов, резистивного ответвителя, системы сверхширокополосных аттенуаторов и широкополосного осциллографа. Резистивный ответвитель, служащий одновременно держателем исследуемой структуры, является частью высококачественного коаксиального измерительного тракта с волновым сопротивлением $\rho = 50 \Omega$. Наличие ответвителя обеспечивает одновременную и независимую регистрацию напряжения $U^\Sigma(t)$ на структуре вместе с последовательно подключенной нагрузкой $\rho = 50 \Omega$ и напряжения на нагрузке $U^\rho(t)$. Это позволяет определить как напряжение на исследуемой структуре, так и протекающий через нее ток $I(t) = U^\rho/\rho$ с временным разрешением не хуже 50 ps. Более подробное описание установки приведено в работе [10]. Импульс напряжения $V(t)$, приложенный к диоду и последовательной нагрузке ρ в наших экспериментах, имел колоколообразный вид, амплитуду 3.7 kV и полуширину 2.5 ns, как и в работе [10].

Измерения были проведены для арсенид-галлиевых $p^+ - p_0 - n_0 - n^+$ -структур; p_0 - и n_0 -области изготовлены методом жидкофазной эпитаксии и имели суммарную толщину около 100 μm . Соотношение толщины p_0 и n_0 -областей определялось содержанием остаточных акцепторных (Si) и донорных (O) примесей, а также профилем концентрации глубоких уровней [11]. Уровень эффективного легирования в области $p_0 - n_0$ -перехода составлял менее 10^{13} cm^{-3} . Диаметр структуры $d^{\text{GaAs}} \approx 1 \text{ mm}$. Измеренное напряжение стационарного пробоя составляет $U_b^{\text{GaAs}} \approx 600 \text{ V}$. Плавное нарастание тока при повышении напряжения указывает на поверхностный характер стационарного пробоя. Для сравнения были выбраны кремниевые $p^+ - n - n^+$ -структуры с

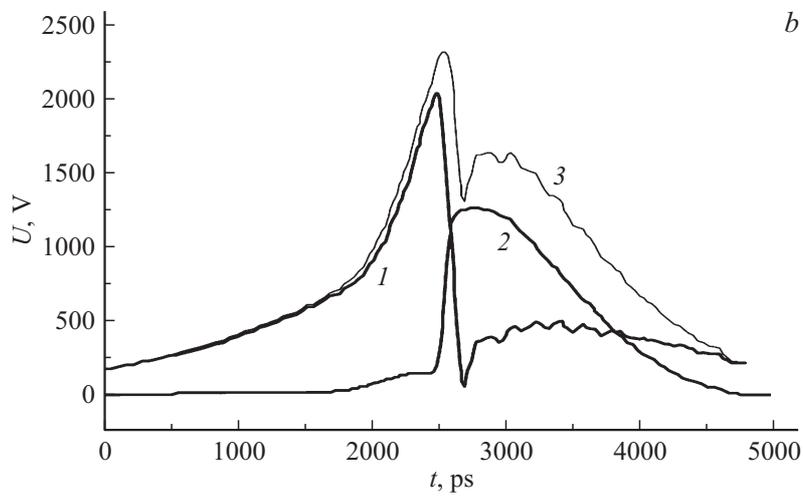
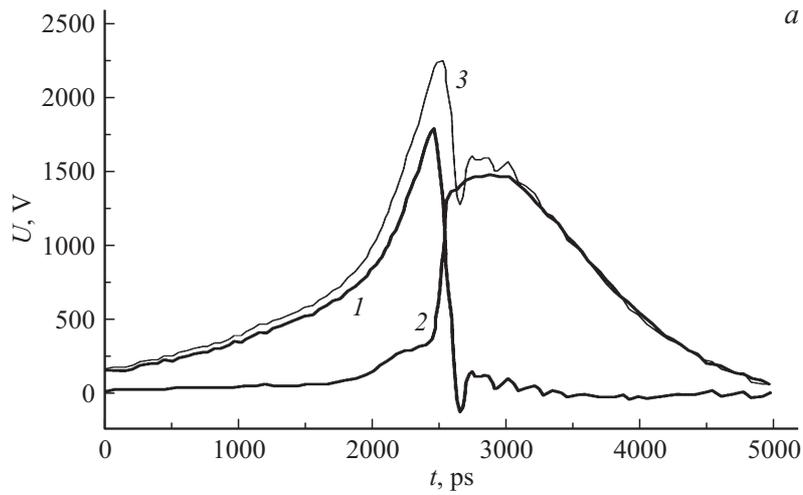
близким диаметром $d^{\text{Si}} \approx 1.1 \text{ mm}$ и напряжением стационарного пробоя $U_b^{\text{Si}} \approx 1 \text{ kV}$. Структуры были изготовлены из кремния, выращенного методом Чохральского, p - n -переход формировался диффузией бора. Эти диоды демонстрировали резкий рост тока вблизи напряжения стационарного пробоя, что указывает на его объемный характер.

При исследовании задержанного лавинного пробоя колоколообразный импульс напряжения $V(t)$ прикладывается к диоду вместе с последовательно подключенной нагрузкой, роль которой играет сопротивление коаксиального тракта $\rho = 50 \Omega$. На рисунке показаны напряжение $U^{\Sigma}(t)$ на приборе вместе с нагрузкой и напряжение на нагрузке $U^{\rho}(t)$, полученные прямым измерением, и напряжение на приборе $U^D(t) = U^{\Sigma} - U^{\rho}$. Напряжение на нагрузке пропорционально току через структуру. Переключение арсенид-галлиевого диода начинается при напряжении $U_{\text{GaAs}}^m \approx 1660 \text{ V}$. Измеренное время переключения по уровню перепада напряжения 0.9–0.1 составило 140 ps (см. рисунок, *a*). Измерительный тракт включает в себя 4 аттенюатора с собственным временем нарастания 30 ps и осциллограф с собственным временем нарастания 20 ps. Считая измеренное время среднеквадратичным значением всех времен нарастания элементов тракта, включая исследуемый диод, получим время переключения прибора не более 125 ps.

Ближкие параметры сверхбыстрого переключения получены для кремниевой структуры: напряжение начала переключения около 2000 V, измеренное время переключения 120 ps (см. рисунок, *b*). Таким образом, как для арсенид-галлиевых, так и для кремниевых приборов наблюдался задержанный лавинный пробой „перенапряженной“ структуры, приводящий к ее сверхбыстрому переходу в проводящее состояние и сопровождающийся формированием киловольтного перепада напряжения в нагрузке длительностью около 100 ps.

Однако динамика напряжения после сверхбыстрого переключения для арсенид-галлиевой и кремниевой структур обнаруживает качественные, ранее неизвестные различия. Во-первых, остаточное напряжение на арсенид-галлиевом диоде после переключения оказывается на порядок меньше, чем на кремниевом диоде. Во-вторых, остаточное напряжение на арсенид-галлиевом диоде не имеет тенденции к возрастанию на всем протяжении приложенного импульса напряжения. Обсудим эти различия подробнее.

Измеренное остаточное напряжение на арсенид-галлиевом диоде составляет десятки вольт (см. рисунок, *a*), что сравнимо с точностью измерения остаточного напряжения в нашем эксперименте. Эта точность



Динамика переключения для арсенид-галлиевого (*a*) и кремниевого (*b*) диодов. Показаны напряжение на структуре $U^D(t)$ (кривая 1), напряжение на омической нагрузке $U^\rho(t)$ (кривая 2) и напряжение на приборе вместе с нагрузкой $U^\Sigma(t) = U^D + U^\rho$ (кривая 3). Непосредственно и независимо измеряются U^Σ и U^ρ . Ток через структуру определяется как $I(t) = U^\rho / \rho$, где $\rho = 50 \Omega$.

ограничена, во-первых, затухающими осцилляциями в измерительном тракте, вызванными резким киловольтным падением напряжения на диоде при переключении. Во-вторых, напряжение на приборе U^D определяется как разность двух одновременно измеряемых с помощью двух различных каналов осциллографа величин U^Σ и U^ρ , которые для арсенид-галлиевой структуры после переключения близки друг к другу. Остаточное напряжение на кремниевом приборе составляет сотни вольт (см. рисунок, *b*). Такие значения остаточного напряжения типичны для кремниевых $p^+ - n - n^+$ -структур с „резким“ $p - n$ -переходом [10].

Динамика напряжения на арсенид-галлиевом диоде не обнаруживает признаков восстановления напряжения на обратносмещенном $p - n$ -переходе после лавинного переключения (см. рисунок, *a*), которое явно демонстрирует кремниевая структура (см. рисунок, *b*). Эффективное сопротивление кремниевой структуры после переключения монотонно возрастает, и полное восстановление обратного напряжения наступает уже через 2 ns после пробоя. Наблюдаемый на рисунке, *b* спад напряжения на приборе обусловлен исключительно уменьшением приложенного напряжения $V(t)$. Такая картина находится в хорошем соответствии с общепринятыми представлениями о дрейфовом выносе избыточных носителей из обратносмещенной структуры. Напротив, сопротивление арсенид-галлиевой структуры не меняется на протяжении всего импульса, а ток через структуру определяется последовательным сопротивлением коаксиального тракта ρ . Такое аномальное поведение арсенид-галлиевого диода после переключения сходно с хорошо известным эффектом „залипания“ в проводящем состоянии оптических ключей на основе арсенид-галлиевых диодов (lock-on эффект) [12].

В арсенид-галлиевых диодах важную роль может играть фотогенерация носителей излучением из плотной электронно-дырочной плазмы, созданной ударной ионизацией [13]. Эффект переизлучения [13] может приводить к более равномерному распределению электронно-дырочной плазмы по объему структуры. Однако данный механизм не может поддерживать проводимость после прекращения ударной ионизации.

Поддержание низкого значения остаточного напряжения на протяжении времени, превышающего время дрейфового рассасывания плазмы, указывает на существование механизма генерации плазмы, который действует после сверхбыстрого переключения даже при низких значениях среднего электрического поля. Поиски такого механизма долгое время велись для объяснения lock-on эффекта в оптических ключах

на основе GaAs, переключение которых инициируется импульсом лазера [12]. Физические условия, в которых оказывается такой оптический ключ после переключения, полностью аналогичны с условиями нашего эксперимента: заполненный проводящей плазмой обратносмещенный диод подключен к внешнему источнику последовательно с нагрузкой. Lock-on эффект наблюдается только в структурах на основе материалов, обладающих отрицательной дифференциальной проводимостью электронов [12]. В недавней работе [14] поддержание проводящего состояния объяснено спонтанным возникновением узких коллапсирующих доменов сильного электрического поля, напряженность поля в которых достаточна для интенсивной ударной ионизации. Такие домены были предсказаны в арсенид-галлиевом лавинном транзисторе как механизм его субнаносекундного переключения [15]. Для возникновения доменов средняя напряженность электрического поля должна превышать порог отрицательной подвижности электронов в GaAs $3\text{--}4\text{ kV/cm}$. При длине базы $100\text{ }\mu\text{m}$ это значение среднего поля отвечает остаточному напряжению $\sim 30\text{ V}$, что не противоречит результатам наших измерений.

В нашем эксперименте время измерения напряжения на диоде после переключения было ограничено длительностью колоколообразного импульса $V(t)$ и составляло около 2 ns . Исследование динамики остаточного напряжения на больших временах составляет предмет наших дальнейших исследований. Обнаруженный нами эффект может иметь большое практическое значение, поскольку открывает возможность с помощью арсенид-галлиевых диодов формировать быстронарастающие импульсы тока, временная протяженность которых не ограничена временем рассасывания неравновесной электронно-дырочной плазмы и восстановлением блокирующей способности $p\text{--}n$ -перехода.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 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] Grekhov I.V., Kardo-Sysoev A.F., Kostina L.S., Shenderov 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] Вайнштейн С.Н., Жилев Ю.В., Левинштейн М.Е. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 16. С. 1526–1530.
- [5] Грехов И.В., Ефанов В.М. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 14. В. 23. С. 2121–2124.
- [6] Грехов И.В., Ефанов В.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 17. С. 9–14.
- [7] Focia R.J., Schamiloghu E., Fleddermann C.B., Agee F.J., Gaudet J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. P. 138–144.
- [8] Kardo-Sysoev A.F. / Ed. by Taylor J.D. Boca Raton, London, New York, Washington: CRS Press, 2001.
- [9] Grekhov I.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. P. 1118–1123.
- [10] Брылевский В.И., Смирнова И.А., Родин П.Б., Грехов И.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 8. С. 80–87.
- [11] Корольков В.И., Рахимов Н. Диоды, транзисторы и тиристоры на основе гетероструктур. Ташкент: Фан, 1986. 152 с.
- [12] High-power optically activated solid-state switches / Ed. A Rosen, F. Zutavern. Boston, London: Artech House, 1994.
- [13] Rossin V.V., Sidorov V.G. // Physica Status Solidi (a). 1986. V. 95. N 1. P. 15–40.
- [14] Long Hu, Jiancang Su, Zhenje Ding, Qingsong Hao, Xueling Yuan // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 094 503(1–8).
- [15] Vainshtein S.N., Yuferev V.S., Kostamovaara J.T. // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. P. 024 502(1–9).