

07.2

## Субнаносекундная кинетика рекомбинационного излучения высоковольтного арсенид-галлиевого диода при ударно-ионизационном переключении

© А.В. Рожков, В.Х. Кайбышев, А.А. Торопов, П.Б. Родин

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

Поступило в Редакцию 5 октября 2023 г.

В окончательной редакции 5 октября 2023 г.

Принято к публикации 5 декабря 2023 г.

С помощью метода коррелированного во времени счета одиночных фотонов исследована кинетика рекомбинационного излучения высоковольтного арсенид-галлиевого диода при субнаносекундном переключении, инициированном быстрым увеличением обратного напряжения. Переключение происходит по локальным токовым каналам. Показано, что интенсивность излучения достигает максимального значения за время менее 80 ps, что дает оценку сверху для времени переключения диода в проводящее состояние. Спад интенсивности излучения после переключения происходит за аномально малое время 250–700 ps. Субнаносекундный спад интенсивности излучения свидетельствует о высокой концентрации неравновесных носителей в проводящих каналах и достижении порога стимулированного излучения. Стимулированный характер излучения подтверждается сужением спектра рекомбинации.

**Ключевые слова:** высоковольтные GaAs-диоды, рекомбинационное излучение.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.06.57299.19751

Явление субнаносекундного переключения обратно-смещенных диодных структур, инициированного быстрым увеличением обратного напряжения, известно как задержанный ударно-ионизационный пробой и обнаружено в кремниевых [1], арсенид-галлиевых [2] и карбид-кремниевых [3] структурах. Основанные на этом принципе приборы способны формировать в нагрузке киловольтные импульсы со временем нарастания около 100 ps. Распределение тока по площади экспериментально изучалось только для GaAs-структур, для которых возможно прямое наблюдение рекомбинационного излучения [4–6]. Установлено, что сверхбыстрое переключение арсенид-галлиевых обострительных диодов происходит по узким локальным каналам [4,6]. Пространственно-временная динамика переключения арсенид-галлиевых диодов изучалась с помощью электронно-оптического преобразователя (стрик-камеры) при попытке создания ударно-ионизационных лазерных диодов [5]. С этой целью были исследованы диоды малой площади и „кубической“ формы (поперечные размеры  $100 \times 100 \mu\text{m}$ , толщина структуры  $100 \mu\text{m}$ ) при сверхвысокой скорости увеличения обратного напряжения ( $\sim 50 \text{ kV/ns}$ ). Увеличение коммутируемого тока (уровня возбуждения) приводило к скачкообразному уменьшению времени спада излучения (от наносекунд до 100 ps), указывающему на переход от спонтанного к стимулированному излучению [5]. В отличие от [4,6] в работе [5] излучение наблюдалось из всего объема структуры. В настоящей работе кинетика рекомбинационного излучения, сопутствующего субнаносекундному переключению арсенид-галлиевого обострительного ди-

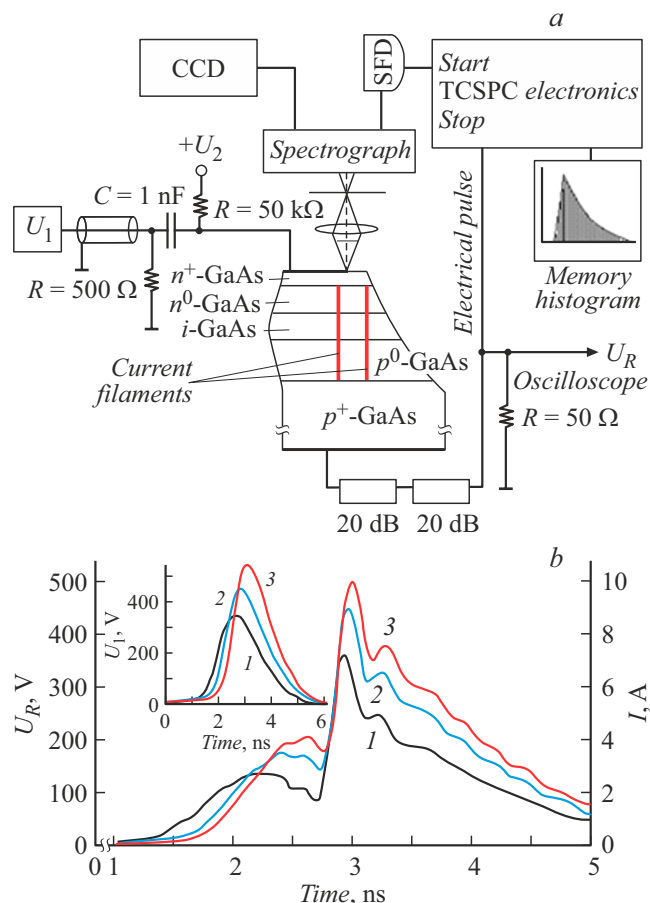
ода, впервые исследована методом коррелированного во времени счета одиночных фотонов.

Исследовались GaAs  $p^+ - p^0 - n^0 - n^+$ -структуры с толщиной базовой  $p^0 - n^0$ -области  $W \sim 100 \mu\text{m}$ , изготовленные методом жидкофазной эпитаксии на легированной цинком  $p^+$ -подложке. Напряжение стационарного пробоя  $U_b = 500 \text{ V}$ , диаметр  $d = 1 \text{ mm}$ . Экспериментальная схема представлена на рис. 1, а. Переключение инициировалось импульсом обратного напряжения  $U_1(t)$ , который формировался генератором на арсенид-галлиевых диодах с быстрым восстановлением [7] и подавался на исследуемый диод через коаксиальный тракт. Амплитуда импульса варьировалась в интервале 350–550 V при длительности фронта 0.65–0.83 ns (вставка на рис. 1, б). Из-за удвоения напряжения на диоде вследствие отражения импульса генератора от непроводящего диода [8] такие амплитуды запускающего импульса достаточны для того, чтобы обратное напряжение на диоде всегда превосходило  $U_b$ , и тем самым достигалось „перенапряжение“ структуры. На диод также подавалось обратное смещение  $U_2 < U_b$ . Максимальная частота повторения импульсов составляла 10 kHz. Временные зависимости тока через структуру  $I(t)$  при переключении получены прямым измерением напряжения на нагрузке  $50 \Omega$  (рис. 1, б) с помощью высоковольтных аттенуаторов и стробоскопического осциллографа с полосой 4 GHz.

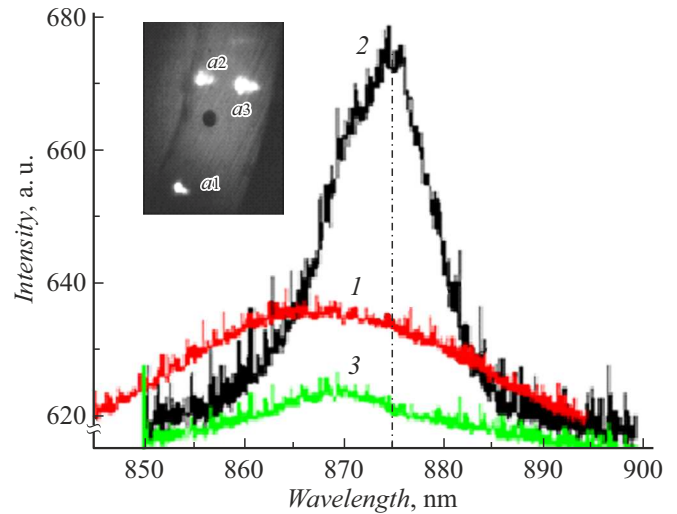
В момент времени  $t \approx 2.8 \text{ ns}$  напряжение на нагрузке возрастает до 350–500 V, что отвечает увеличению тока до 7–10 A. Время переключения составляет 120 ps по уровню 0.1–0.9 амплитуды быстронарастающего участка зависимости  $U_R(t)$ ,  $I(t)$ . Точность определения времени

переключения ограничена собственным временем нарастания регистрирующей цепи. Поэтому значительный интерес представляет независимая оценка времени переключения, основанная на кинетике рекомбинационного излучения неравновесных носителей заряда (ННЗ).

Рекомбинационное излучение в направлении катод–анод наблюдалось со свободной от контакта части  $n^+$ -слоя диодной структуры (рис. 1, *a*). Для регистрации оптических сигналов применялась методика коррелированного во времени счета одиночных фотонов (time correlated single photon counting, TCSPC) [9]. Временное разрешение установки  $\sim 40$  ps определялось быстродействием детектора — кремниевое однофотонного лавинного фотодиода. Схема синхронизации детектора одиночных фотонов и электрического импульса, проходящего через коаксиальный измерительный тракт, имела временную стабильность (джиттер) не хуже 20 ps. При частоте следования запускающих импульсов 10 kHz регистрируемый детектором динамический диапазон был порядка 3 kHz. Это



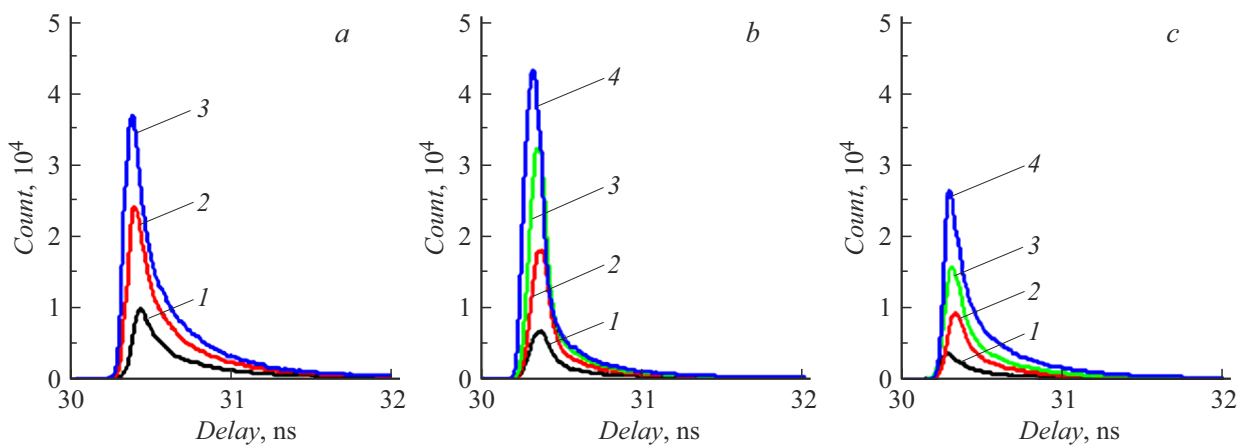
**Рис. 1.** *a* — схема экспериментальной установки; *b* — импульс  $U_R$  на нагрузке  $50 \Omega$  и ток через диод. На вставке — импульс запускающего генератора  $U_1(t)$ . Максимальная амплитуда  $U_1$ , время нарастания  $t_r$  и полуширина  $\Delta t$  показанных на вставке запускающих импульсов составляют  $U_1 = 360$  V,  $t_r = 0.83$  ns,  $\Delta t = 1.7$  ns для кривой 1;  $U_1 = 450$  V,  $t_r = 0.69$  ns,  $\Delta t = 1.65$  ns для кривой 2;  $U_1 = 540$  V,  $t_r = 0.65$  ns,  $\Delta t = 1.5$  ns для кривой 3.



**Рис. 2.** Спектры излучения токовых каналов, полученные осреднением по 1000 накопленным импульсам. Кривые отвечают каналам  $a_1$  (1),  $a_2$  (2) и  $a_3$  (3). На вставке представлена фотография рекомбинационного излучения диода в направлении катод–анод. Измерения проведены при начальном обратном смещении  $U_2 = 50$  V и амплитуде запускающего импульса  $U_1 = 540$  V.

позволило накопить статистические данные с высоким временным разрешением при времени накопления 20 min ( $\sim 10^7$  импульсов) и обеспечить необходимую точность обработки. Спектры оптического излучения записывались с помощью спектрографа и CCD-матрицы.

Пространственная картина рекомбинационного излучения (вставка на рис. 2) качественно сходна с результатами работ [4,6]: переключение происходит по множественным локальным каналам, характерный диаметр которых около  $10 \mu\text{m}$ . Интегральные спектры рекомбинационного излучения, полученные накоплением сигнала за 1000 импульсов, различны для разных каналов. На рис. 2 представлены три таких спектра. Первые два из них можно назвать типичными. Для канала первого типа (кривая 1) спектр качественно схож со спектром спонтанного излучения: при положении максимума спектральной линии 870 nm ее ширина на полувысоте составляет 25–30 nm. Для канала второго типа (кривая 2) при положении максимума спектральной линии 875 nm ее ширина на полувысоте интенсивности излучения составляла 11 nm, т.е. наблюдается существенное сужение спектра излучения. Третий спектр (кривая 3) характеризуется меньшей интенсивностью излучения. По ширине этот спектр занимает промежуточное положение между спектрами первых двух типов. Меньшая интенсивность может быть обусловлена как меньшей интенсивностью излучения в единичном импульсе, так и тем, что включение канала происходит не при каждом импульсе. Результаты детальных исследований спектров спонтанного и стимулированного излучения GaAs-диодов будут представлены отдельно.



**Рис. 3.** Гистограммы оптических импульсов, измеренные методом коррелированного по времени счета фотонов. Начальное обратное смещение диода  $U_2 = 50$  V. Амплитуда импульса обратного напряжения  $U_1$  составила 390 (1), 420 (2) и 480 V (3) для токового канала  $a1$  на фрагменте  $a$ ; 360 (1), 390 (2), 420 (3) и 480 V (4) для канала  $a2$  на фрагменте  $b$ ; 360 (1), 390 (2), 420 (3) и 510 V (4) для канала  $a3$  на фрагменте  $c$ .

Кинетика рекомбинационного излучения исследовалась с помощью TCSPC-методики для каждого из каналов в отдельности (рис. 3). Технические особенности схемы обусловили сдвиг около 30 ns между оптическими и электрическими измерениями, в силу этого временные шкалы на рис. 1,  $b$  и 3 имеют разное начало отсчета времени. Интенсивность излучения различна для разных каналов, что в целом соответствует представленным на рис. 2 интегральным спектрам. Однако временные зависимости для всех каналов сходны. Рассмотрим две главные особенности кинетики излучения.

Во-первых, время нарастания интенсивности излучения по уровню 0.1–0.9 для каждого из каналов составляет 80 ps. Заметим, что рост концентрации ННЗ предшествует падению напряжения на диоде, поскольку последнее связано с разрядкой пассивной части прибора (барьерной емкости прибора) через каналы переключения, причем концентрация продолжает расти вплоть до окончания переключения [10]. Поэтому 80 ps представляет собой оценку сверху времени возрастания тока в цепи и времени переключения диода.

Во-вторых, интенсивность излучения характеризуется быстрым субнаносекундным спадом сразу после переключения (рис. 3). Время спада интенсивности по уровню 0.9–0.1 от максимального значения составляет 710, 240 и 600 ps для каналов  $a1$ ,  $a2$  и  $a3$  соответственно. Эти времена значительно меньше времени жизни ННЗ: время спонтанной излучательной рекомбинации составляет единицы наносекунд, а время рекомбинации Шокли–Рида в исследуемых структурах достигает 100 ns. Таким образом, субнаносекундное время спада интенсивности указывает на стимулированный характер излучения. Заметим, что ток через диод после переключения уменьшается пропорционально амплитуде импульса  $U_1(t)$  (рис. 1,  $b$ ), т. е. проводимость диода остается высокой в течение всего импульса.

На стимулированный характер излучения указывает также сужение спектра (кривая 2 на рис. 2), которое наблюдается для части токовых каналов. Время спада интенсивности излучения ( $\sim 250$  ps) для токового канала  $a2$  с сужением спектра меньше, чем для канала  $a1$  ( $\sim 700$  ps). Однако времена спада аномально малы для всех каналов. Можно предположить, что стимулированное излучение имеет место во всех каналах, а сужение спектра только в некоторых из них связано со случайным характером отбора мод в полупроводниковой структуре, в конструкции которой не предусмотрен оптический резонатор.

Наблюдаемое сужение спектра и субнаносекундный спад интенсивности излучения являются экспериментальным подтверждением того, что в результате переключения концентрация ННЗ в токовых каналах превосходит порог стимулированного излучения ( $1.4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  по оценке [11]). Эта величина находится в согласии с результатами численного моделирования переключения GaAs-диодов, в которых концентрация ННЗ после переключения достигала  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [12]. Механизм генерации столь высокой концентрации ННЗ в GaAs-диоде связан с возникновением биполярных ионизирующих доменов Ганна [12].

Наши эксперименты показывают, что порог стимулированного излучения достигается не только в экстремальных условиях экспериментов [5], но и в типичных режимах работы GaAs-диодов при формировании быстронарастающих импульсов тока. Однако сильное различие между свойствами излучения отдельных каналов является препятствием на пути к практическому применению ударно-ионизационного пробоя для создания когерентных источников излучения. Причины этого различия требуют дальнейшего изучения.

Таким образом, регистрация рекомбинационного излучения сверхбыстрого лавинного переключения

GaAs-диода с помощью метода коррелированного счета одиночных фотонов показывает, что время переключения в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя составляет не более 80 ps. Наблюдаемое сужение спектра и субнаносекундный спад интенсивности рекомбинационного излучения свидетельствуют о том, что концентрация ННЗ в токовых каналах превосходит необходимый для стимулированного излучения порог  $1.4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

### Финансирование работы

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-22-00239.

### 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). [I.V. Grekhov, A.F. Kardo-Sysyoev, Sov. Tech. Phys. Lett., **5**, 395 (1979)].
- [2] Ж.И. Алфёров, И.В. Грехов, В.М. Ефанов, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.И. Корольков, М.Н. Степанова, Письма в ЖТФ, **13** (18), 1089 (1987). [Zh.I. Alferov, I.V. Grekhov, V.M. Efanov, A.F. Kardo-Sysyoev, V.I. Korol'kov, M.N. Stepanova, Sov. Tech. Phys. Lett., **13**, 454 (1987)].
- [3] D. Guo, X. Tang, Q. Song, Y. Zhou, L. Sun, H. Yuan, J. Guo, Y. Zhang, IEEE Trans. Electron Dev., **70** (8), 4075 (2023). DOI: 10.1109/TED.2023.3283368
- [4] С.Н. Вайнштейн, Ю.В. Жилиев, М.Е. Левинштейн, Письма в ЖТФ, **14** (16), 1526 (1988).
- [5] И.В. Грехов, В.М. Ефанов, Письма в ЖТФ, **16** (17), 9 (1990).
- [6] А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин, Письма в ЖТФ, **48** (16), 25 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53203.19271 [A.V. Rozhkov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, Tech. Phys. Lett., **48**, 61 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.08.55065.19271].
- [7] А.В. Рожков, ПТЭ, № 5, 46 (2021). DOI: 10.31857/S003281622104025X [A.V. Rozhkov, Instrum. Exp. Tech., **64**, 680 (2021). DOI: 10.1134/S0020441221040230].
- [8] М.С. Иванов, В.И. Брылевский, П.Б. Родин, Письма в ЖТФ, **47** (13), 32 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.13.51119.18794 [M.S. Ivanov, V.I. Brylevskiy, P.B. Rodin, Tech. Phys. Lett., **47**, 661 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021070087].
- [9] W. Becker, *Advanced time-correlated single-photon counting techniques* (Springer, Berlin–Heidelberg–N.Y., 2005).
- [10] M.S. Ivanov, V.I. Brylevskiy, I.V. Smirnova, P.B. Rodin, J. Appl. Phys., **131**, 014502 (2022). DOI: 10.1063/5.0077092
- [11] М.С. Шур, ФТП, **8** (5), 587 (1974).
- [12] А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин, Изв. РАН. Сер. физ., **87** (6), 873 (2023). DOI: 10.31857/S036767652370151X [A.V. Rozhkov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **87**, 765 (2023). DOI: 10.3103/S1062873823702222].