

07.2

Самовозбуждение высокочастотных автоколебаний в лавинных арсенид-галлиевых диодах

© А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: rozh@hv.ioffe.rssi.ruПоступило в Редакцию 27 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 2 июля 2024 г.
Принято к публикации 2 июля 2024 г.

Экспериментально обнаружено самовозбуждение СВЧ-колебаний тока в лавинных диодах на основе арсенида галлия, включенных последовательно с омической нагрузкой. Колебания имеют частоту от 5.3 до 8.2 GHz в зависимости от напряжения пробоя (от 100 до 220 V), диаметра (от 100 до 200 μm) и профиля легирования $p^+ - p - i - n - n^+$ -структуры. Амплитуды напряжения и тока составляли десятки вольт и единицы ампер. Численное моделирование показывает, что в диоде происходит автоколебательный процесс генерации и последующего рассасывания пакета неравновесных электронов и дырок, сопровождающийся экранированием электрического поля неравновесными носителями. Стационарное состояние прибора с лавинным током неустойчиво на участке положительного дифференциального сопротивления обратной вольт-амперной характеристики в отсутствие внешнего резонатора.

Ключевые слова: высоковольтные GaAs-диоды, СВЧ-колебания, автоколебания.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58938.19977

Лавинное размножение носителей в полупроводниковых структурах с обратносмещенным $p - n$ -переходом может приводить к пространственным и временным токовым неустойчивостям и применяется для создания приборов как ключевого, так и генераторного типа [1]. Наиболее известным прибором для СВЧ-генерации на основе обратносмещенного диода является лавинно-пролетный диод (ЛПД) [1,2]. Колебания тока в ЛПД требуют согласования модулирующего напряжения с пролетным временем и, как правило, реализуются при размещении ЛПД в специально сконструированном резонаторе [1,2]. Однако еще основоположник исследований ЛПД А.С. Тагер [2] указал на возможность самовозбуждения лавинных осцилляций [2]. В 2000-х годах было обнаружено, что высокочастотные автоколебания лавинного тока могут наблюдаться в силовых Si- и GaAs-диодах в отсутствие внешнего резонатора [3–5]. В настоящей работе сообщается об экспериментальном наблюдении самовозбуждения мощных СВЧ-колебаний тока в лавинных GaAs-диодах с напряжением стационарного лавинного пробоя 100–200 V. Проведено численное моделирование и объяснен механизм автоколебаний. Показано, что их спонтанное возникновение связано с „мягкой“ осцилляционной неустойчивостью стационарного состояния на обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) с положительным дифференциальным сопротивлением.

Схема эксперимента была близка к применявшейся в эксперименте по наблюдению lock-on эффекта, подробно описанной в [6]. На включенный последовательно с нагрузкой 50 Ω диод подавался сформированный квазипрямоугольный импульс напряжения длительностью около 20 ns (рис. 1). Амплитуда

запускающего импульса выбиралась выше напряжения стационарного лавинного пробоя, но меньше порога, необходимого для переключения прибора в течение 100 ps в состояние с высокой проводимостью в режиме обострителя импульсов [1,6,7]. Передний фронт запускающего импульса имел длительность несколько наносекунд. Частота повторения импульсов 1 kHz. Измерения проводились в пределах полосы частот ≤ 8 GHz, в которой амплитуда входного синусоидального сигнала ослаблялась осциллографом не более чем до 70%.

Автоколебания были обнаружены в семи партиях GaAs $p^+ - p - i - n - n^+$ -структур, изготовленных методом жидкофазной эпитаксии (см. таблицу). Диоды имели различный диаметр d (от 100 до 200 μm). На рис. 1, a приведена временная зависимость напряжения $U_R(t)$ на последовательной нагрузке 50 Ω для одного из диодов партии 6. Размах колебаний напряжения ΔU и тока составлял около 80 V и 1.6 A соответственно, частота колебаний $f = 6$ GHz. Максимальный обнаруженный размах колебаний более 120 V и 2.4 A (партия 7 в таблице). Наблюдаются начальная фаза постепенного нарастания амплитуды и задержка наносекундной длительности. Обнаруженное явление сходно с автоколебаниями, которые были исследованы для кремниевых диодных структур в работах [3,5]. На возможность высокочастотных колебаний в GaAs-структуре было ранее указано в [4]. В работе [6] автоколебания с частотой ~ 1.5 GHz наблюдались нами при исследовании lock-on эффекта в GaAs-диодах с $U_b = 500$ V и $d = 500$ μm . Было указано на необходимость отдельного исследования обнаруженного явления.

Оптическое излучение на фаске и свободной от металлизации части диодной структуры регистрировалось

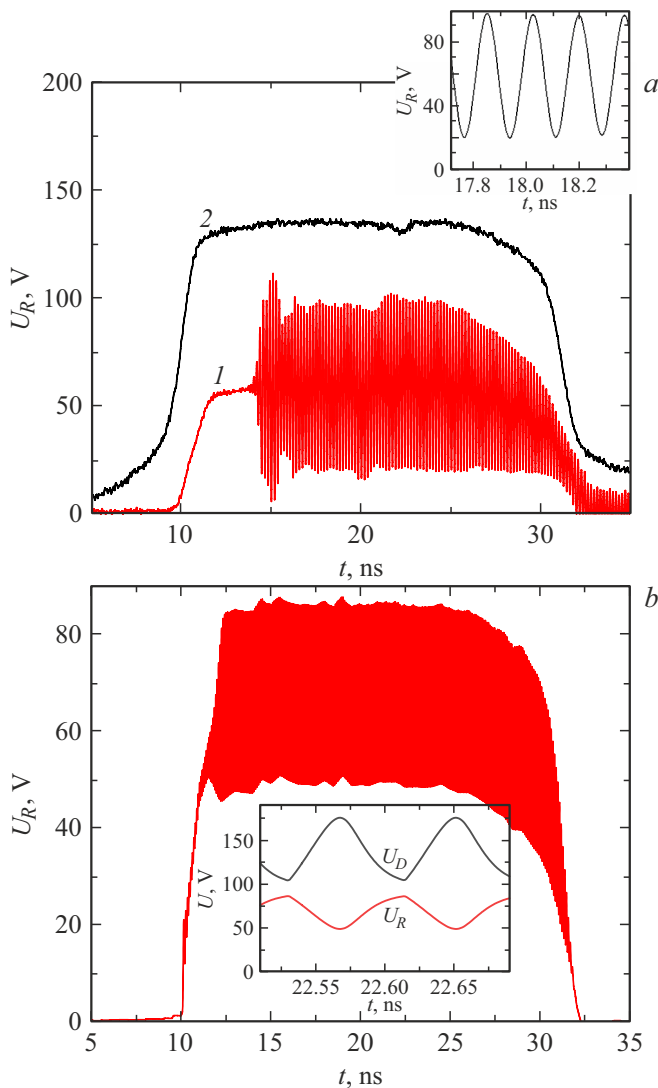


Рис. 1. *a* — экспериментальные данные: напряжение $U_R(t)$ на последовательной нагрузке 50Ω при возникновении колебаний (1) и запускающий импульс напряжения, измеренный на согласованной нагрузке 50Ω (2). На вставке — экспериментальная зависимость $U_R(t)$ показана в более крупном масштабе. *b* — расчетная зависимость напряжения на нагрузке, полученная с помощью одномерного численного моделирования в диффузионно-дрейфовом приближении. На вставке — расчетные зависимости напряжения на нагрузке $U_R(t)$ и напряжения на диоде $U_D(t)$.

при длительности импульса от 20 до 300 ns и частоте повторения 1 kHz. Локализация тока в узких токовых шнурах, характерная для микроплазменного пробоя и переключения длительностью 100 ps лавинных GaAs-обострителей [1,6], не была обнаружена. Это позволяет предположить однородность лавинных процессов по площади структуры.

Одномерное численное моделирование было выполнено для условий эксперимента в диффузионно-дрейфовом приближении с учетом уравнений для внешней цепи.

Параметры диодов и СВЧ-колебаний (U_b — напряжение стационарного пробоя, d — диаметр диодной структуры, f — частота СВЧ-колебаний, ΔU — размах колебаний напряжения на последовательной нагрузке 50Ω)

Номер партии	Параметры структур		Параметры СВЧ-колебаний	
	U_b , V	d , μm	f , GHz	ΔU , V
1	180–220	200	6.0–6.4	66–70
2	120–180	100	6.1–7.0	16–70
3	140–160	100	6.6–6.9	26–33
4	120–130	100	7.2–8.2	3–15
5	120–130	100	6.3–6.9	25–31
6	100–120	150	5.9–6.3	35–80
7	100–160	150	5.3–5.4	50–120

Результаты моделирования также показывают спонтанное возникновение автоколебаний (рис. 1, *b*). Достигнуто только качественное согласие с экспериментом: расчетная частота автоколебаний составила 12 GHz, размах напряжения на нагрузке около 35 V. Для расчета применялся модельный профиль легирования $p^+ - p - i - n - n^+$ структуры, отвечающий технологии изготовления и обеспечивающий согласование по напряжению стационарного пробоя U_b . Предполагалась однородность колебаний на всей площади структуры S . Расчетная амплитуда уменьшалась при уменьшении активной площади S_a и сохранении полной площади S . Колебания полностью исчезали при $S/S_a = 1.2$.

Анализ динамики электрического поля и концентраций носителей показывает (рис. 2), что механизм колебаний аналогичен описанному в [3,5] для Si-диодов. В $p-i-n$ -области структуры периодически возникает и рассеивается пакет неравновесных носителей. Концентрация носителей на $p-n$ -переходе при этом колеблется в интервале от $5 \cdot 10^{14}$ до 10^{16} cm^{-3} , а напряженность электрического поля — в интервале от 180 до 350 kV/cm. Механизм колебаний связан с лавинным размножением, экранированием электрического поля свободными носителями и дрейфовым выносом носителей. При достижении концентрации 10^{16} cm^{-3} электрическое поле начинает вытесняться из области, занятой неравновесными электронами и дырками (рис. 2, *a*, $t = 22.58 \text{ ns}$). Профиль поля приобретает двугорбый вид, а напряженность становится недостаточной для дальнейшей ударной ионизации (рис. 2, *a*, $t = 22.60 \text{ ns}$). В этих условиях происходит разделение электронов и дырок и рассеивание пакета неравновесных носителей (рис. 2, *b*, $t = 22.62 \text{ ns}$). Концентрация неравновесных носителей на $p-n$ -переходе снижается до $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Электрическое поле вновь увеличивается до пробойной величины, и цикл колебания повторяется.

В отличие от малосигнального режима работы ЛПД [1,2] в описанном выше механизме центральную роль играет экранирование электрического поля свободными носителями. Однако из-за малой толщи-

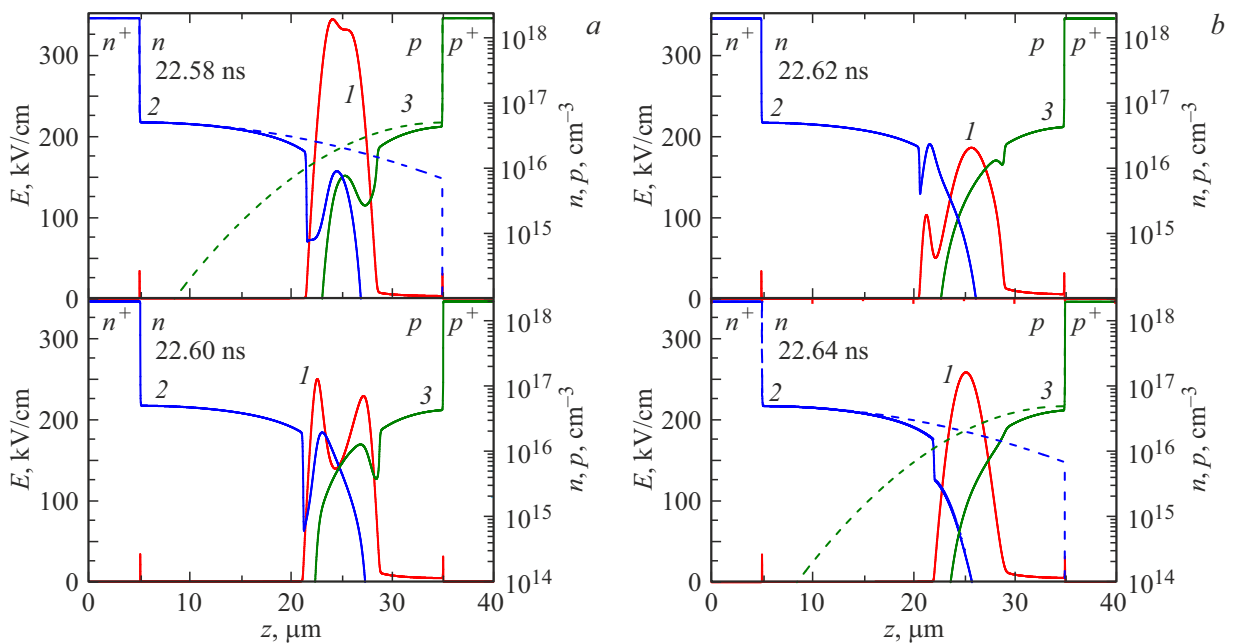


Рис. 2. Динамика электрического поля $E(z, t)$ и концентраций носителей $n, p(z, t)$ при колебаниях лавинного тока с частотой 12 GHz: распределения электрического поля (1), концентрации электронов (2) и дырок (3), отвечающие одному периоду колебаний, в последовательные моменты времени $t = 22.58, 22.60$ ns на фазе спада (a) и $t = 22.62, 22.64$ ns на фазе роста напряженности электрического поля (b). Штриховыми линиями показан профиль легирования структуры.

ны пакета неравновесных носителей и их умеренной концентрации электрическое поле не вытесняется из пакета полностью, как это происходит при большей амплитуде приложенного импульса [1,6,7]. По-видимому, рассмотренный здесь сильно нелинейный режим является пограничным между классическим и режимом работы ЛПД с захваченной плазмой (лавинно-ключевой диод, или TRAPATT-диод [1]).

Стационарная обратная ВАХ исследуемого диода, соответствующая приведенному на рис. 1, b и 2 численному расчету, показана на рис. 3, a. Квазистационарная рабочая точка на ВАХ отвечает току 1.1 А. Максимальная концентрация носителей в области $p-n$ -перехода в этом состоянии $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Рабочая точка отвечает участку ВАХ с положительным дифференциальным сопротивлением на нулевой частоте. Область ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением, отвечающая режиму двойной лавинной инжекции [1], соответствует току более 10 А. В условиях нашего эксперимента переход в автоколебательный режим инициируется сильным возбуждением системы вдали от стационарной точки (кривая 3 на рис. 3, b). Однако численное моделирование показывает, что стационарное состояние с положительным дифференциальным сопротивлением неустойчиво относительно малых возмущений (колебательная суперкритическая неустойчивость Андронова–Хопфа [8]). Колебания возникают в „мягком“ режиме, когда вначале неустойчивое стационарное состояние с необходимой плотностью тока достигается „квазистатистически“ (при времени нарастания напряжения

20 ns), после чего самовозбуждаются колебания (кривая 4 на рис. 3, b).

Перечислим основные отличия наших экспериментов от работ по Si-диодам [3,5]. Во-первых, в [3,5] для достижения перехода в автоколебательный режим применялась специфическая схема последовательной накачки и выкачки диода, типичная для диодов с резким восстановлением [9]. Наши эксперименты показывают, что колебания могут быть инициированы и в простейшей схеме при сравнительно медленном увеличении напряжения на диоде, что важно для практического применения. Во-вторых, наш анализ указывает на осцилляционную неустойчивость стационарного состояния с лавинным током как на универсальную причину СВЧ-колебаний. В-третьих, для части исследованных нами структур была достигнута существенно большая мощность генерации на единицу площади структуры, достигающая 1 MW/cm^2 . Исследованные нами структуры имеют на порядок меньшую площадь и большую плотность тока ($\sim 10 \text{ kA/cm}^2$). В то же время физический механизм обнаруженных колебаний в GaAs-диодах такой же, как в Si-диодах [3,5]. Влияние отрицательной дифференциальной подвижности электронов в GaAs нуждается в дальнейшем изучении.

Благодаря высоким значениям амплитуды СВЧ-колебаний (более 1 А) и простой электрической схеме исследованные диоды представляют интерес для модуляции мощных полупроводниковых лазеров и приложений в новой области радиофотоники [10,11]. Отметим, что профиль легирования исследованных $p^+-p-i-n-n^+$

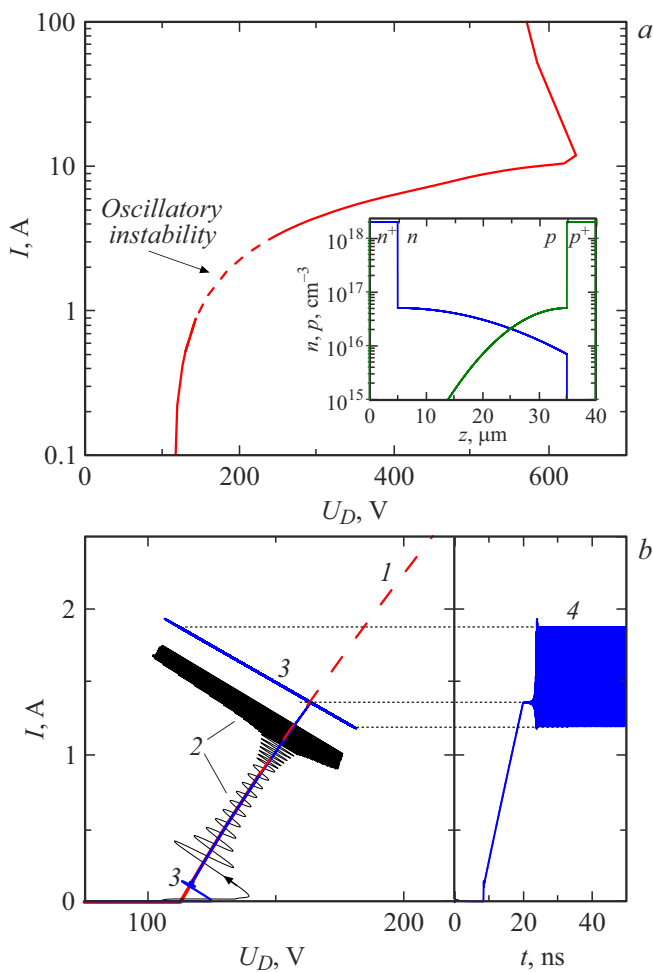


Рис. 3. *a* — расчетная стационарная ВАХ исследуемой $p^+ - p - i - n - p^+$ -структуры. Неустойчивая часть ВАХ показана штриховой линией. На вставке — модельный профиль легирования. *b* — расчетная ВАХ в линейном масштабе (1); „фазовая траектория“ (I, U_D) (2), построенная по результатам численного расчета, представленного на рис. 1, *b* (нарастание напряжения за 2 ns); „фазовая траектория“ (I, U_D) (3) и соответствующая временная зависимость тока $I(t)$ (4) — результаты моделирования „мягкого“ перехода к осцилляциям при медленном (за 20 ns) увеличении напряжения на приборе.

структур не только не был оптимизирован для СВЧ-колебаний, но и технологически плохо контролировался в области i -слоя. Этим может быть объяснен значительный разброс амплитуды колебаний для различных структур из разных партий (см. таблицу). Дальнейшие исследования влияния профиля легирования и его оптимизация необходимы для практического применения данного эффекта.

Таким образом, в работе экспериментально обнаружено и интерпретировано новое нелинейное явление — самовозбуждение мощных СВЧ-колебаний в импульсных GaAs-диодах, включенных в схему с последовательной омической нагрузкой без внешних резонаторов.

Финансирование работы

Работа поддержана РФФ (грант № 23-22-00239). В части постростовых технологий работа выполнена в рамках госзадания ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein, *Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductor devices* (World Scientific, 2005).
- [2] А.С. Тегер, УФН, **90** (12), 631 (1966). DOI: 10.3367/UFNr.0090.196612d.0631 [A.S. Tager, Sov. Phys. Usp., **9** (6), 892 (1967). DOI: 10.1070/PU1967v009n06ABEH003231].
- [3] С.А. Дарзнец, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, ФТП, **36** (5), 629 (2002). [S.A. Darznez, S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovskii, Semiconductors, **36** (5), 599 (2002). DOI: 10.1134/1.1478555].
- [4] В.А. Козлов, А.В. Рожков, А.Ф. Кардо-Сысоев, ФТП, **37** (12), 1480 (2003). [V.A. Kozlov, A.V. Rozhkov, A.F. Kardo-Sysoev, Semiconductors, **37** (12), 1428 (2003). DOI: 10.1134/1.1634667].
- [5] С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов, ФТП, **47** (5), 658 (2013). [S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky, S.N. Tsyranov, Semiconductors, **47** (5), 670 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613050151].
- [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** (8), 61 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.08.55065.19271].
- [7] M. Ivanov, A. Rozhkov, P. Rodin, Solid State Commun., **379**, 115420 (2024). DOI: 10.1016/j.ssc.2023.115420
- [8] E. Schoell, *Nonequilibrium phase transitions in semiconductors* (Springer, Berlin, 1987).
- [9] В.А. Козлов, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.И. Брылевский, ФТП, **35** (5), 629 (2001). [V.A. Kozlov, A.F. Kardo-Sysoev, V.I. Brylevskii, Semiconductors, **35** (5), 608 (2001). DOI: 10.1134/1.1371631].
- [10] В.М. Андреев, Д.Ф. Зайцев, Н.Ю. Новиков, В.С. Калиновский, Д.В. Мордасов, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов, А.И. Фадеев, Радиотехника, № 11, 177 (2016).
- [11] Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, А.А. Березовский, П.Ю. Владиславский, Ю.Б. Гурфинкель, Л.И. Цветкова, В.С. Калиновский, Н.М. Кондратьев, В.Н. Косолюбов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев, Радиотехника, **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17