

07.3

Активная копланарная линия передач на основе двухбарьерных GaAs/AlAs резонансно-туннельных диодов

© А.С. Соболев^{1,2}, А.Ю. Павлов³, М.В. Майтама^{3,4}, И.А. Глинский⁵, Д.С. Пономарев^{2,3},
К.Е. Спиригин⁶, Б.А. Жмудь², Р.А. Хабибуллин^{2,3}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия

⁴ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

⁵ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

⁶ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

E-mail: khabibullin_r@mail.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2022 г.

В окончательной редакции 31 октября 2022 г.

Принято к публикации 9 ноября 2022 г.

Двухбарьерные GaAs/AlAs резонансно-туннельные диоды (РТД) являются перспективными элементами для создания генераторов субмиллиметрового и терагерцевого диапазонов частот. Образцы GaAs/AlAs РТД изготовлены и исследованы методом СВЧ-рефлектометрии, что позволило определить параметры эквивалентной схемы данных диодов. Теоретически показано, что копланарная линия передач с периодически включенными в нее GaAs/AlAs РТД является усиливающей до частоты 8 GHz.

Ключевые слова: резонансно-туннельные диоды, активные линии передач, распределенные генераторы, диоды с двойными металлическими контактами.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54279.19395

Значительное развитие методов генерации терагерцевых (THz) волн открыло широкие возможности для применения данного излучения во многих областях науки [1,2]. Существенный прогресс наблюдается в генерации частот от 100 GHz до 1 THz с использованием умножителей, диодов Ганна [3] и транзисторов с высокой подвижностью электронов [4]. Непрерывно улучшаются характеристики (рабочая температура и выходная мощность излучения) квантово-каскадных лазеров с рабочими частотами от 1.5 до 5 THz [5,6]. Кроме того, одним из перспективных источников СВЧ- и THz-излучения являются резонансно-туннельные диоды (РТД), которые позволяют работать при комнатной температуре и достигать частот генерации более 1 THz. Важно отметить, что на основе РТД были продемонстрированы источники и детекторы THz-излучения [7–9], что позволяет использовать их в качестве элементной базы для интегральных схем на кристалле. Одним из недостатков использования РТД в качестве генератора является малая мощность излучения, которая обычно составляет сотни μW . Для увеличения выходной мощности излучения предлагается использовать двумерные массивы РТД с излучающей антенной, что позволит суммировать генерируемую мощность излучения большого числа диодов. При этом возникают вопросы, связанные с согласованием РТД в составе всего массива, а также с согласованием коллективной моды массива с излучающей антенной. Это приводит к необходимости построения принципиальной эквивалентной схемы РТД с учетом особенностей как

двухбарьерной гетероструктуры, так и архитектуры изготовленного диода.

Одним из экспериментальных подходов к построению принципиальной эквивалентной схемы РТД является измерение комплексного S_{11} -параметра (коэффициентов отражения) в широком диапазоне частот при помощи зондовой станции, вычисление в этом диапазоне его импеданса и аппроксимация импедансных кривых $\text{Re}Z$ и $\text{Im}Z$ формулами, полученными для эквивалентной схемы на сосредоточенных элементах. Данный подход был использован в настоящей работе для оценки параметров распределенных генераторов на основе линий передач с периодически включенными в них РТД.

Двухбарьерные РТД-структуры GaAs/AlAs были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полупроводящих подложках (100) GaAs. Активная область РТД, заключенная между эмиттерным (800 nm) и коллекторным (300 nm) слоями n^+ -GaAs, имела следующую последовательность слоев: 2/4.5/2.3 nm, где квантовая яма i -GaAs имела барьерные слои i -AlAs. На основе выращенной гетероструктуры изготовлены РТД с электрическим питанием коллектора с помощью воздушного моста (рис. 1).

Для измерения импеданса при помощи двухпортового векторного анализатора и зондовой станции были изготовлены тестовые структуры, которые позволяют выполнить необходимую калибровку и переместить измерительную плоскость в точку расположения диодов [10]. Коэффициент отражения измерялся до частоты

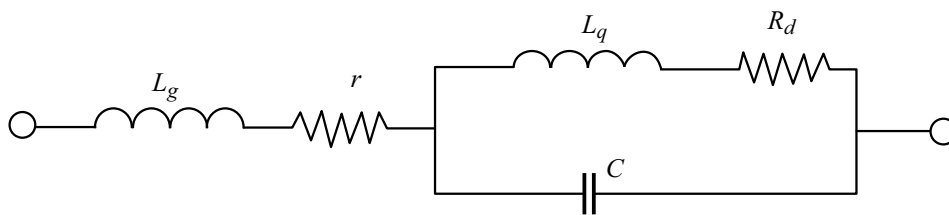
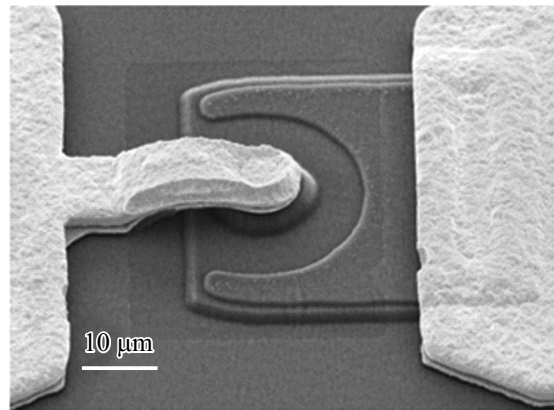


Рис. 1. Изображение изготовленного GaAs/AlAs РТД, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, и эквивалентная схема диода.

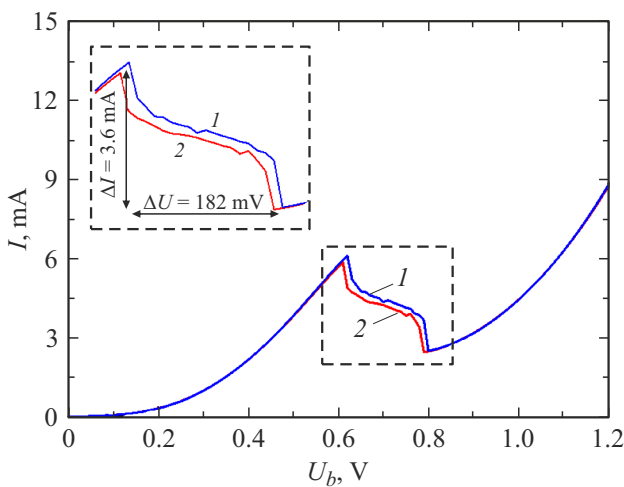


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика GaAs/AlAs РТД, измеренная в прямом (при увеличении напряжения) (1) и обратном (при уменьшении напряжения) (2) направлениях. На вставке приведен увеличенный участок ВАХ с гистерезисом.

65 GHz при мощности -40 dBm, чтобы выполнялось приближение малого сигнала. В работе используются значения R_d , полученные дифференцированием измеренной вольт-амперной характеристики (ВАХ), и следующие постоянные параметры эквивалентной схемы: $L_g = L_q = 0.1$ нН, $C = 0.35$ пФ, $r = 8$ Ω.

Изготовленные РТД имеют хорошо воспроизводимую ВАХ N-образной формы (рис. 2). Изгиб в области отри-

цательного дифференциального сопротивления является следствием внутренних осцилляций в диоде. Отрицательные значения R_d диода, полученные дифференцированием ВАХ, лежат в диапазоне от -12 до ~ 150 Ω, что связано с наличием гистерезиса (см. вставку на рис. 2). Усредненное значение R_d в отсутствие паразитных осцилляций можно оценить из соотношения $R_d = \Delta U / \Delta V = 50$ Ω. При изменении напряжения смещения в зависимости от направления движения рабочей точки изменяется соотношение плотности заряда внутри квантовой ямы и в электродах, что приводит к разным профилям самосогласованного потенциала и появлению гистерезиса ВАХ в области отрицательных R_d [11].

В качестве активной (усиливающей) линии передач рассматривалась копланарная линия с волновым сопротивлением 50 Ω и периодически включенными в нее с периодом L сосредоточенными GaAs/AlAs РТД (см. вставку на рис. 3). Возможность усиления проверялась при помощи численного расчета S_{21} -параметра элементарной ячейки такой линии передач с $W = 50$ μm, $W_g = 130$ μm, $g = 40$ μm, $L = 200$ μm. Расчет проводился методом конечных разностей во временной области. Результаты моделирования показаны на рис. 3 для трех отрицательных значений R_d . Видно, что $S_{21} > 0$ dB достигается на частотах менее 8 GHz, а самое большое усиление получается для значения $|R_d|$, близкого к величине волнового сопротивления копланарной линии. Также следует отметить, что у диода $\text{Re}Z < 0$ может реализоваться на частотах до 26 GHz, однако для повышения рабочей частоты активных линий передач необхо-

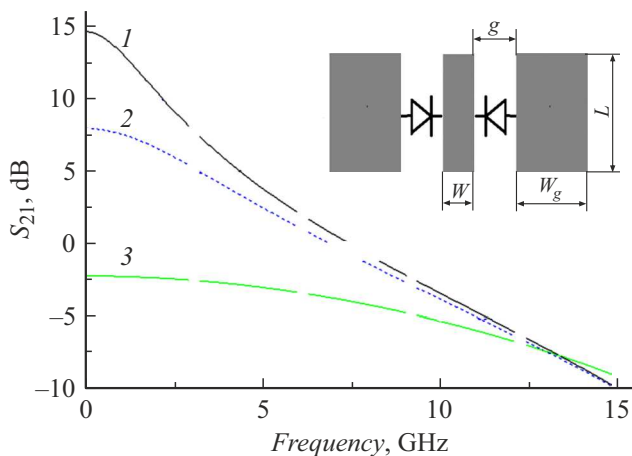


Рис. 3. Коэффициент усиления элементарной ячейки активной копланарной линии с включенными в нее GaAs/AlAs РТД при значениях $R_d = -25$ (1), -45 (2) и -15Ω (3). На вставке показан упрощенный вид такой ячейки.

димо включить в элементарную ячейку дополнительные отстрочные элементы, компенсирующие реактивный импеданс диода, а также уменьшить сопротивление омических потерь при помощи внедрения технологии нижнего металлического электрода.

В результате выполненной работы изготовлены резонансно-туннельные диоды с барьерами GaAs/AlAs, для которых построена эквивалентная схема на основании измерения коэффициента отражения на частотах до 67 GHz. Полученная эквивалентная схема единичного РТД использовалась при моделировании копланарной линии передач с периодически внедренными в нее диодами. Результаты расчета предсказывают усиление в такой линии до частоты 8 GHz с возможностью ее увеличения до граничной частоты диода 27 GHz.

Финансирование работы

Изготовление РТД и измерение их СВЧ-характеристик выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-22-00767, рост гетероструктуры GaAs/AlAs проведен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-79-10240, а расчет и дизайн активной линии передачи осуществлены в рамках программы Приоритет-2030 (соглашение № 075-02-2021-1316).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.E. Yachmenev, S.S. Pushkarev, R.R. Reznik, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, Prog. Cryst. Growth. Charact. Mater., **66** (2), 100485 (2020). DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485

- [2] A.E. Yachmenev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, J. Phys. D: Appl. Phys., **55** (19), 193001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac43dd
- [3] H. Eisele, Electron. Lett., **46** (6), 422 (2010). DOI: 10.1049/el.2010.3362
- [4] Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, Р.Р. Галиев, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, Ю.В. Федоров, П.П. Мальцев, ФТП, **48** (1), 73 (2014). [D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, R.R. Galiev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, Yu.V. Fedorov, P.P. Maltsev, Semiconductors, **48** (1), 69 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614010187].
- [5] D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, D. Ponomarev, V. Aleshkin, S. Morozov, A. Dubinov, Opt. Express, **28** (17), 25371 (2020). DOI: 10.1364/OE.398552
- [6] Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, И.А. Глинский, Р.А. Хабибуллин, Russ. Technol. J., **10** (3), 45 (2022). DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-3-45-55
- [7] T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki, M. Asada, Appl. Phys. Express, **9** (2), 024101 (2016). DOI: 10.7567/APEX.9.024101
- [8] H. Mizuta, T. Tanoue, *The physics and applications of resonant tunneling diodes* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [9] K. Kasagi, S. Suzuki, M. Asada, J. Appl. Phys., **125** (15), 151601 (2019). DOI: 10.1063/1.5051007
- [10] A. Sobolev, S. Zaitsev-Zotov, M. Maytama, E. Klimov, A. Pavlov, D. Ponomarev, R. Khabibullin, Opt. Eng., **60** (8), 082019 (2021). DOI: 10.1117/1.OE.60.8.082018
- [11] N.C. Kluksdahl, A.M. Kriman, D.K. Ferry, C. Ringhofer, Phys. Rev. B, **39** (11), 7720 (1989).