

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В МНОГОСЛОЙНЫХ GaAs/AlGaAs ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ© 2018 г. О. Ю. Волков¹, И. Н. Дюжиков¹, М. В. Логунов¹, С. А. Никитов^{1, 2},
В. В. Павловский^{1, *}, Н. В. Щаврук³, А. Ю. Павлов³, Р. А. Хабибуллин³¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Российская Федерация, 141701 Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9³Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Российская Федерация, 117105 Москва, Нагорный пр., 7/5

*E-mail: pvv@cplire.ru

Поступила в редакцию 15.12.2017 г.

Приведены результаты исследования спектров терагерцового излучения многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs, синтезированных на подложках GaAs. Продемонстрированы температурные зависимости порогового тока генерации и мощности излучения изготовленных на основе таких структур квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот с двойным металлическим волноводом. Получены зависимости: мощности излучения от температуры; спектра излучения от амплитуды возбуждающего импульса тока; порогового тока генерации излучения от температуры. Сделана оценка максимального значения амплитуды интегральной мощности излучения, которое составило 28 мкВт в диапазоне частот 3.25...3.32 ТГц при температуре 15 К. Представлены результаты измерений спектральной плотности излучения генератора. Продемонстрировано изменение модового состава излучения при изменении тока смещения генератора.

DOI: 10.1134/S0033849418090243

ВВЕДЕНИЕ

При разработке компактных источников терагерцового (ТГц) излучения для приборов спектроскопии специального назначения и визуализации скрытых объектов [1–3] большое внимание уделяется поиску и оптимизации условий генерации излучения в многослойных гетероструктурах, являющихся основой квантово-каскадных лазеров (ККЛ) [4–7] и считающихся наиболее перспективными компактными источниками ТГц-излучения. В то же время на базе многослойных гетероструктур ведется разработка ТГц-генераторов, работающих на других физических принципах [8–11]. Первые ККЛ ТГц-диапазона (далее – ТГц ККЛ) были реализованы в начале 2000 годов [12, 13]. К настоящему времени созданы ТГц ККЛ, работающие при температуре вплоть до 200 К [14] и имеющие мощность излучения несколько десятков милливольт при температуре жидкого азота. Реализованы работающие при комнатной температуре лазерные источники ТГц-излучения, основанные на внутризонном усилении разностной частоты двух ККЛ среднего ИК-диапазона [15].

В данной работе исследованы спектры ТГц-излучения многослойных гетероструктур на основе GaAs/AlGaAs, предназначенных для создания ТГц ККЛ. Структуры синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии (228 каскадов, общая толщина ~10 мкм) на подложках GaAs [6, 7, 9]. В работе [6] по полученным спектрам фотолюминесценции было выявлено хорошее согласие энергий межзонных оптических переходов с расчетными значениями, а расчет ТГц-переходов в прямосмещенных структурах показал возможность сдвига частоты излучения в диапазоне вблизи 3 ТГц при сохранении высокой вероятности переходов с помощью масштабирования толщины квантовых ям в каскаде; продемонстрированы вольт-амперные характеристики, типичные для квантовых каскадных лазеров; наблюдался пороговый рост интенсивности и узкий спектр излучения, что характерно для лазерной генерации [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика измерения мощности ТГц-излучения в гетероструктуре (далее – ККЛ) основана на принципе непосредственной оценки, т.е. электри-

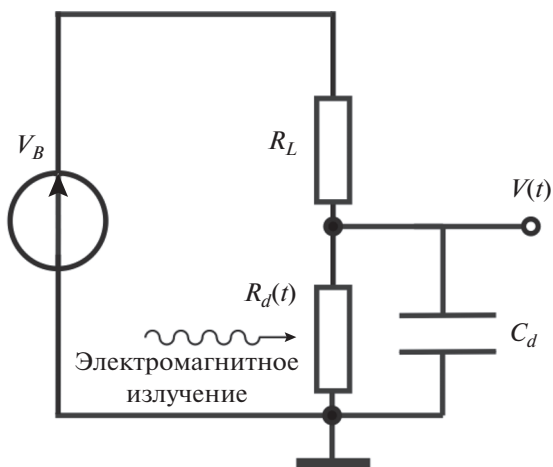


Рис. 1. Эквивалентная схема болометра; R_L – нагрузочное сопротивление, конденсатор C_d характеризует инерционные свойства болометра.

ческий сигнал измеряется на выходе фотоприемника, в котором энергия излучения преобразуется в энергию электрического сигнала. В качестве фотоприемника используется охлаждаемый кремниевый болометр BrukerOptic#3340. Для обеспечения необходимых температурных режимов работы генератор и болометр помещали в отдельные криостаты Infrared Labs, которые размещали таким образом, чтобы окна при измерении мощности были расположены непосредственно друг против друга. Измерения проводили в диапазоне температур 15...77 К. Для электромагнитного согласования излучения генератора и приемника использовали гиперполусферическую линзу из сапфира, установленную непосредственно на генератор, и конус Уинстона, интегрированный в криостат с болометром вместо фотометрического шара. Спектральную плотность излучения исследовали с помощью широкополосного фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v со спектральным разрешением до 1.8 ГГц.

Для управления ККЛ и контроля его параметров в процессе работы было разработано специальное программное обеспечение. Программа предназначена для использования в составе аппаратно-программного комплекса измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых приборов, являющихся источниками электромагнитного излучения и работающих в импульсном режиме. Программа осуществляла следующие функции: управление формированием импульсов тока через исследуемый прибор с заданными амплитудой, длительностью и скважностью; развертку во времени амплитуды импульсов тока; ввод в компьютер форм импульсов тока и напряжения в цифровой форме; обработку импульсов и определение средних по времени значений тока и на-

пряжения в заданном интервале времени в пределах длительности импульса; отображение полученной информации в графическом виде и сохранение ее в виде файлов в графическом формате JPEG; сохранение измеренных ВАХ, а также форм и импульсов напряжения и тока в виде ASCII-файлов.

Исследования интегральной мощности и спектральной плотности излучения проводились в импульсном режиме работы генератора. Длительность импульса тока варьировалась от 2 до 10 мкс при скважности 1000. При этом для корректного измерения мощности излучения необходим детальный анализ отклика болометра на внешнее излучение. Для этого использовали эквивалентную схему болометра (рис. 1).

Под действием внешнего импульсного электромагнитного излучения сопротивление болометра изменяется во времени и на нем возникает зависящее от времени напряжение, пропорциональное мощности излучения, а также зависящее от длительности и скважности импульсного сигнала. Напряжение $V(t)$ удовлетворяло уравнению:

$$\frac{dV}{dT} + \beta(t)V = \frac{V_B}{R_L C}, \quad (1)$$

$$\text{где } \beta(t) = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R(t)} + \frac{1}{R_L} \right).$$

Решение уравнения (1) имеет вид

$$V(t) = A \exp \left(- \int_0^t \beta(\tau) d\tau \right) + \frac{V_b}{R_L C} \int_0^t d\xi \exp \left(- \int_\xi^t \beta(\tau) d\tau \right), \quad (2)$$

где $A = V(0)$ – константа, определяемая конкретным видом сигнала.

В случае периодического сигнала прямоугольной формы функция $\beta(t)$ имеет вид

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta, & 0 < t < \Delta t \\ \beta_0, & \Delta t < t < T \end{cases}, \quad (3)$$

где T – период сигнала.

Для оценки временных параметров детектора рассмотрим скважность, равную 1. Тогда относительный отклик напряжения на детекторе $V(f)$ на внешнее излучение при высоких частотах ($f\beta T \ll 1$ и $\beta_0 T \ll 1$) и $\beta \ll \beta_0$ имеет вид

$$\frac{|V_1(f)|}{|V_1(0)|} = \frac{\beta}{f} \sqrt{1 + \frac{1}{\pi^2}}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлена частотная характеристика используемого болометра при периодической модуляции падающего излучения (данные фирмы-производителя). Экстраполируя приве-

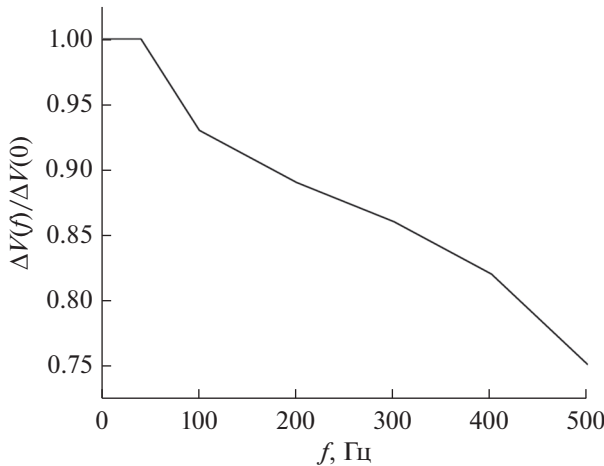


Рис. 2. Зависимость отклика болометра от частоты.

денные на рис. 2 данные с помощью модели, основанной на эквивалентной схеме (см. рис. 1), можно получить параметр $\beta = 140 \text{ с}^{-1}$. С учетом этих данных оценим характеристики болометра в случае импульсного сигнала с большой скважностью. Используя (2), можно показать, что в случае сигнала большой скважности ($\beta\Delta t \ll 1$) амплитуда мощности P_a падающего на детектор излучения связана с амплитудой отклика напряжения на детекторе $V_{\text{макс}}$ следующим соотношением:

$$P_a = \frac{V_{\text{макс}}}{\beta\Delta t S_V}, \quad (5)$$

где S_V – вольт-ваттная чувствительность детектора.

Для рассматриваемого болометра получены следующие данные: $S_V = 2.82 \times 10^5 \text{ В/Вт}$ и $P/V_{\text{макс}} = 2.53 \times 10^{-3} \text{ Вт/В}$ при $\Delta t = 10 \text{ мкс}$. Кроме того, была проведена оценка ослабления излучения при его передаче от генератора к приемнику по квазиоптическому тракту фурье-спектрометра. Ослабление излучения в квазиоптическом тракте может быть объяснено следующими причинами: поглощение в воздухе; отражение от окон в криостатах; ослабление в фильтре ближнего ИК-диапазона в болометре. Всего в квазиоптическом тракте присутствует четыре окна из полиэтилена. Коэффициент пропускания K границы полиэтилена и вакуума (воздуха) определяется выражением:

$$K = \frac{4n}{(n+1)^2}, \quad (6)$$

где n – коэффициент преломления материала окна. Таким образом, в рассматриваемом случае $K = 0.91$. Всего в тракте присутствует восемь границ, поэтому полный коэффициент пропускания всех окон составляет $K^8 = 0.48$. Коэффициент пропускания электромагнитного излучения фильтром ближнего ИК-диапазона, по спецификации фир-

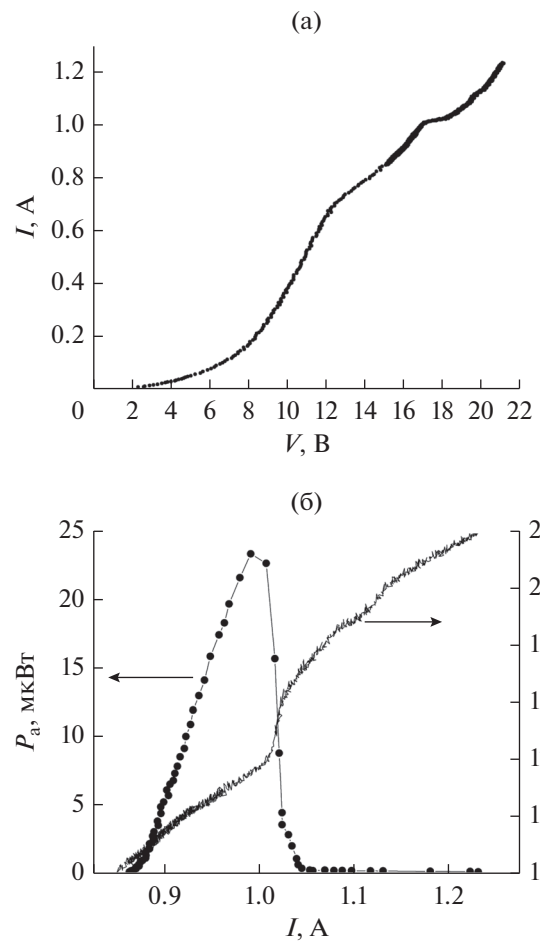


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика генератора $I(V)$ (а); зависимость амплитуды мощности излучения от тока смещения $P_a(I)$ (б) при температуре 30 К.

мы-производителя составляет 0.6. В связи с тем, что окна криостатов генератора и приемника при измерении интегральной мощности излучения находились в непосредственной близости друг от друга, поглощением в воздухе можно пренебречь. Таким образом, общий коэффициент ослабления составил 0.29.

На рис. 3 представлены ВАХ генератора и зависимость амплитуды интегральной мощности излучения P_a от тока смещения I . ВАХ генератора содержит особенности в виде скачков напряжения, присущие ВАХ ККЛ с резонансно-фононным дизайном, когда за счет выравнивания уровней энергий при увеличении напряженности электрического поля наблюдались характерные изломы. После второго излома ВАХ наблюдается резкое увеличение интегральной мощности генерации (рис. 3б).

На рис. 4 показана зависимость максимальной амплитуды мощности $P_{\text{макс}}$ от рабочей температуры генератора T . Максимальное значение инте-

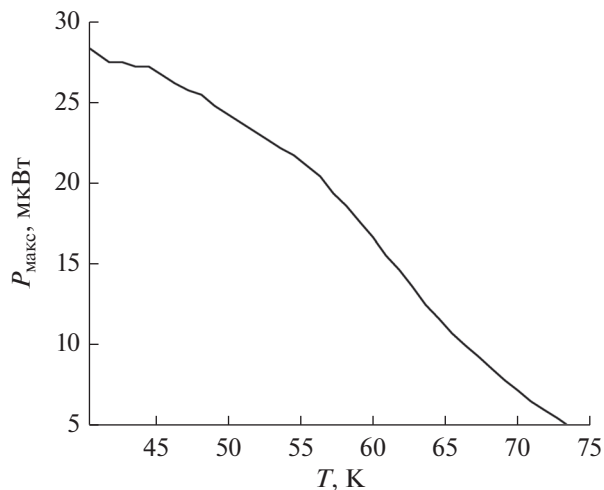


Рис. 4. Зависимость максимальной амплитуды мощности излучения генератора от рабочей температуры $P_{\max}(T)$.

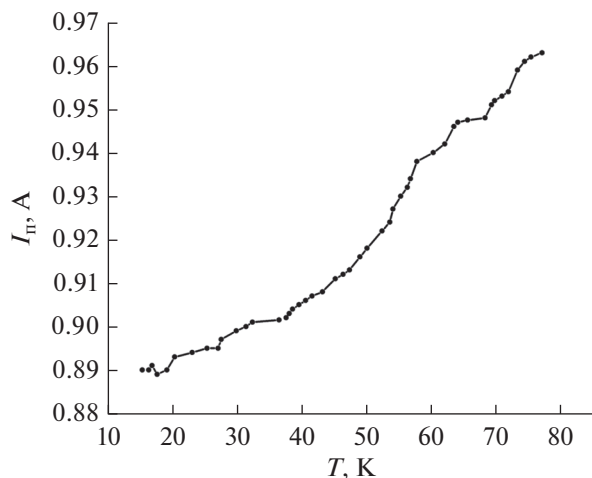
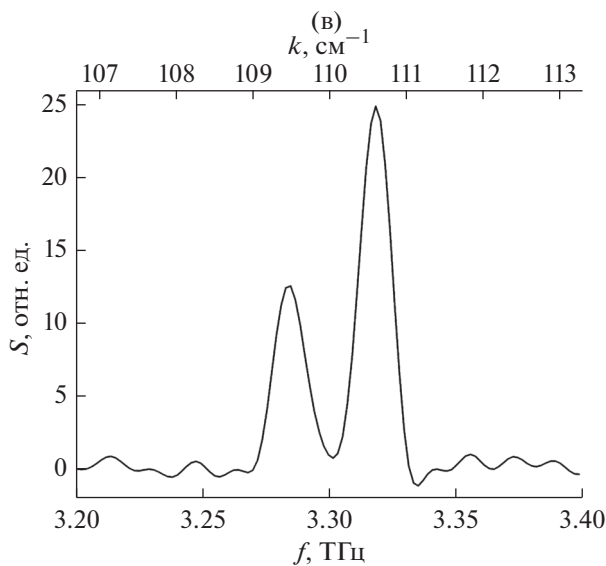
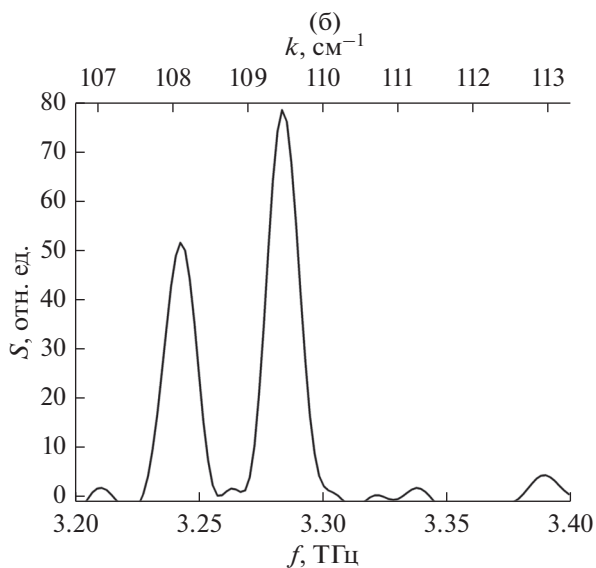
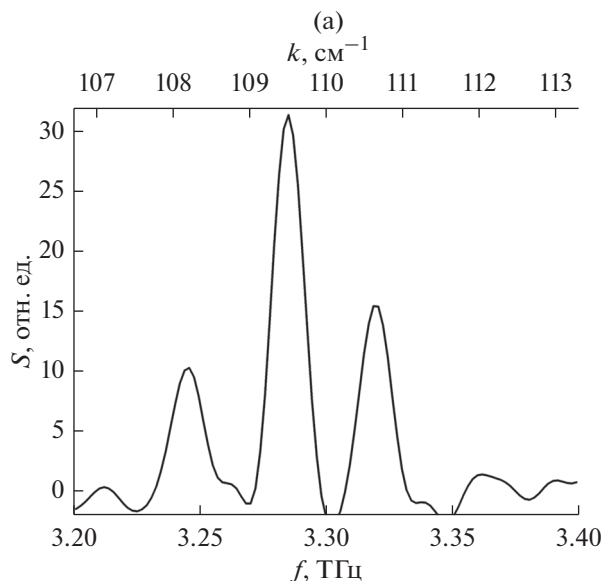


Рис. 5. Зависимость порогового тока генерации от температуры $I_{\text{п}}(T)$.

гальной мощности излучения составило 28 мкВт. Из представленной зависимости следует, что при увеличении температуры от 40 до 58 К мощность излучения генератора уменьшается в 1.5 раза, что позволяет использовать для охлаждения лазера откачку паров азота. Используя экстраполяцию данной зависимости оценим верхнее значение рабочей температуры, которое составляет 84 К.

На рис. 5 представлены зависимость порогового тока генерации $I_{\text{п}}$ от температуры T , из которого следует, что при увеличении температуры от 15

Рис. 6. Спектральная плотность излучения генератора S при температуре 15 К и различных значениях тока смещения: 0.940 (а), 1.005 (б) и 1.058 А (в).



до 78 К увеличение тока порога генерации и лазера составило 7%.

Спектральная плотность излучения генератора существенно зависит от условий возбуждения. На рис. 6 представлены зависимости спектральной плотности излучения S от частоты f (волнового вектора k) при различных значениях тока смещения. В частности, в зависимости от величины тока смещения наблюдался различный модовый состав излучения. При токе накачки 0.940 А наблюдались три моды излучения 3.25, 3.28 и 3.32 ГГц, которые соответствуют собственным модам резонатора Фабри–Перо, образованного гранями кристалла генератора. При увеличении тока до 1.005 А исчезает возбуждение на высшей гармонике 3.32 Гц, а при увеличении тока до 1.058 А остаются только две высокочастотные гармоники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, продемонстрированы вольтамперные характеристики, температурные зависимости порогового тока генерации и мощности излучения квантово-каскадных лазеров ТГц-диапазона частот с двойным металлическим волноводом на основе туннельно-связанных квантовых ям. В качестве источника накачки гетероструктур использованы импульсы тока длительностью до 10 мкс, амплитудой до 1.5 А. На ВАХ исследуемых структур наблюдались особенности в виде изломов, характерные для ККЛ с резонансно-фононным дизайном. В результате проведенных измерений получены следующие зависимости: мощности излучения от температуры; спектра излучения от амплитуды возбуждающего импульса тока; порогового тока генерации излучения от температуры. Максимальное значение амплитуды интегральной мощности излучения составило 28 мкВт в диапазоне частот 3.25...3.32 ТГц при температуре 15 К. Максимальная рабочая температура составила 84 К. Показано, что в зависимости от тока смещения

генератора возможно возбуждение различных мод резонатора Фабри–Перо, образованного гранями кристалла генератора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.607.21.0141, RFMEFI60715X0141).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore, 1994.
2. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181. № 8. С. 867.
3. Jewariya M., Abraham E., Kitaguchi T. et al. // Optics Express. 2013. V. 21. № 2. P. 2423.
4. Казаринов Р.Ф., Суриц Р.А. // ФТП. 1971. Т. 5. № 4. С. 797.
5. Faist J., Capasso F., Sivco D.L. et al. // Science. 1994. № 264. P. 553.
6. Жуков А.Е., Цырлин Г.Э., Резник Р.Р. и др. // ФТП. 2016. Т. 50. № 5. С. 674.
7. Иконников А.В., Маремьянин К.В., Морозов С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 7. С. 86.
8. Гергель В.А., Алтухов И.В., Верховцева А.В. и др. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 7. С. 83.
9. Хабибуллин Р.А., Шаврук Н.В., Пономарев Д.С. и др. // Матер. XXII Междунар. симп. “Нанозифика и нанозлектроника”. 2017. Т. 2. С. 752.
10. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Чигарев С.Г. // РЭ. 2015. Т. 60. № 5. С. 992.
11. Nikitov S.A., Maltsev P.P., Gergel V.A. et al. // Proc. SPIE, Intern. Conf. Micro- and Nano-Electronics. 2016. V. 10224. P. 102240X.
12. Hargreaves S., Lewis R.A. // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2007. V. 18. № 13. P. S299.
13. Karpowicz N., Zhong H., Xu J. et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5727. P. 132.
14. Dobroiu A., Yamashita M., Ohshima Y.N. et al. // Appl. Opt. 2004. V. 43. № 30. P. 5637.
15. Lee A.W.M., Williams B.S., Kumar S. et al. // IEEE Photon. Tech. Lett. 2006. V. 18. № 13. P. 1415.