# Квантово-каскадный лазер на основе AlGaInP с частотой генерации 6.8 ТГц

## А. А. Дубинов<sup>1)</sup>, Д. В. Ушаков<sup>2)</sup>, А. А. Афоненко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия, e-mail: <u>sanya@ipmras.ru</u> <sup>2)</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: <u>UshakovDV@bsu.by</u>

В работе рассчитаны температурные зависимости усиления и поглощения на частоте 6.8 ТГц для квантово-каскадного лазера (ККЛ) на основе GaInP/AlGaInP с двумя квантовыми ямами в каскаде и волноводом металл-металл. Предложена структура лазера, обеспечивающая модовое усиление свыше 90 см<sup>-1</sup> при максимальной рабочей температуре 104 К. Результаты данного исследования открывают путь к созданию ККЛ для работы в значительной части области фононной полосы поглощения GaAs, недоступной для существующих ККЛ.

*Ключевые слова:* квантово-каскадный лазер; терагерц; фосфиды; фононная полоса поглощения.

# Quantum cascade laser based on AlGaInP with a generation frequency of 6.8 THz

# A. A. Dubinov<sup>1)</sup>, D. V. Ushakov<sup>2)</sup>, A. A. Afonenko<sup>2)</sup>

#### <sup>1)</sup> Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: <u>sanya@ipmras.ru</u> <sup>2)</sup> Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: <u>UshakovDV@bsu.by</u>

The temperature dependences of gain and absorption at 6.8 THz have been calculated for a GaInP/AlGaInP-based quantum-cascade laser (QCL) with two quantum wells in the cascade and a metal-to-metal waveguide. A laser structure providing modal gain of over 90 cm<sup>-1</sup> at a maximum operating temperature of 104 K is proposed. The results of this study open the way to the development of QCLs for operation in a significant part of the GaAs phonon absorption band region, which is inaccessible for existing QCLs.

Keywords: quantum-cascade laser; terahertz; phosphides; phonon absorption band

#### Введение

В настоящее время основными компактными источниками когерентного излучения в терагерцовом диапазоне частот являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ) [1]. Однако существует диапазон частот (5.5–10.5 ТГц), где ККЛ не работают из-за сильного фононного поглощения в гетероструктурах, из которых они сделаны (GaAs/AlGaAs, InGaAs/InAlAs) [2]. Поэтому альтернативой арсенидам металлов III группы для создания ККЛ могут послужить полупроводники с другой энергией полярно-оптических фононов.

В данной работе впервые исследуется возможность использования материальной системы на основе фосфидов металлов III группы (GaInP/AlGaInP) для создания ККЛ с частотой генерации в области ~ 7 ТГц с двойным металлическим волноводом. Выбор данной гетеропары связан с тем, что это полярные полупроводники с частотами оптических фононов в диапазоне 10–12 ТГц, бо́льшими, чем у

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

традиционной гетеропары GaAs/AlGaAs (энергия фонона ~ 8 ТГц) [3]. Также, как и у GaAs, их структура кристаллической решетки представляет собой цинковую обманку. При этом постоянные решетки Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P/Al<sub>0.52</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs очень близки, как и у пары GaAs/AlAs, что позволяет выращивать ненапряженные многослойные структуры на подложках GaAs. Огромным преимуществом этой системы является разработанная технология роста данных полупроводниковых соединений с помощью как молекулярно-пучковой, так и газофазной эпитаксии. Кроме того, достаточно много работ было посвящено росту качественных сверхрешеток GaInP/AlGaInP, которые использовались с целью создания межзонных лазеров красно-оранжевого диапазона (см., например, [4]).

## 1. Модель

Для моделирования ТГц ККЛ на основе GaInP/AlGaInP была использована модель на основе системы балансных уравнений для локализованных состояний и состояний континуума. Для учета влияния дефазировки на процессы переноса носителей заряда был использован метод модификации собственного базиса уравнения Шредингера путем уменьшения дипольных моментов туннельно-связанных состояний. Алгоритм расчета оптоэлектронных свойств включает в себя определение уровней энергии и волновых функций на основе решения уравнения Шредингера в 3-х зонном k-p-приближении, расчет матричных элементов дипольных переходов, вычисление скоростей рассеяния на оптических фононах, ионизированных примесях, шероховатостей гетерограниц и электрон-электронного рассеяния, определение поверхностных концентраций носителей заряда для соответствующих энергетических подзон из системы замкнутых балансных уравнений, расчет электрического тока и спектров усиления. Подробности метода расчета, апробированного на гетероструктуре GaAs/AlGaAs, и сравнение расчетов с экспериментальными результатами, показывающее хорошее согласие, можно найти в работах [5, 6].

#### 2. Результаты расчетов

Для расчета характеристик лазера был выбран дизайн двух квантовых ям (КЯ) в каскаде с резонансно-фононной схемой депопуляции, когда рабочее напряжение, умноженное на заряд электрона, на одном каскаде близко к сумме энергии фотона излучения и энергии продольного оптического фонона. Наш выбор количества КЯ в периоде мотивирован самыми высокими рабочими температурами ТГц ККЛ на основе GaAs/AlGaAs с 2-ямным дизайном [2]. В ходе оптимизации (сканирования толщин структуры для получения наибольшего коэффициента усиления на частоте 6.8 ТГц) была выбрана следующая последовательность слоев одного каскада в нм: **4.8**/5.36/**1.98**/<u>12.98</u> (**17**/19/**7**/<u>46</u> монослоев соответствующих полупроводников) с барьерами (Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>)<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P, выделенными жирным шрифтом, и КЯ Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P (см. рис. 1). Предполагается, что центральная часть подчеркнутой КЯ легирована с поверхностной концентрацией электронов  $4.64 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup>.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.



*Рис. 1.* Профиль энергии дна зоны проводимости *V*, уровни энергии и квадраты модулей волновых функций в направлении роста предложенной структуры при величине приложенного напряжения *V*<sub>1</sub> = 73 mV на один каскад и температуре *T* = 77 K. Количество стрелок пропорционально плотности тока

Полагалось, что сверхрешетка толщиной 10 мкм ограничена контактными слоями  $n^+$ -Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P толщиной 27 нм и легированными до концентрации  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. При расчете потерь генерируемой ТМ моды (рис. 2) считалось, что в качестве металлических обкладок двойного металлического волновода используется золото [7]. При вычислении коэффициента полных потерь были учтены также полезные потери в зеркалах резонатора и потери при поглощении оптическими фононами и свободными носителями заряда. Диагональный лазерный переход реализуется на частоте 6.8 ТГц и соответствует максимуму спектра усиления (рис. 2).





*Рис.* 2. Спектры усиления в режиме генерации (сплошные кривые) и кривые потерь (штриховые кривые) для различных температур (цветная шкала справа)

*Рис. 3.* Зависимость плотности тока *J* от напряжения на одном каскаде *V*<sub>1</sub> при температуре 77 К

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

Проведенный для предложенного ККЛ расчет показал, что коэффициент усиления на частоте 6.8 ТГц достигает величины 90 см<sup>-1</sup>, что позволит такому лазеру работать вплоть до достаточно большой температуры 104 К (рис. 2).

Рабочий участок попадает на возрастающую ветвь ВАХ (рис. 3). Плотность тока при 77 К в пороге генерации составила около 1.5 кА/см<sup>2</sup>.

#### Заключение

Таким образом, в работе проведено моделирование температурных характеристик ККЛ, генерирующего на частоте 6.8 ТГц, на основе GaInP/AlGaInP с двухямной конструкцией каскада и волноводом металл-металл. Результаты расчетов показывают, что возможен оптимальный подбор толщин и состав материалов GaInP/AlGaInP для работы такого лазера при температуре до 104 К. Мы считаем, что структуры GaInP/AlGaInP могут быть перспективными кандидатами для ККЛ, работающих в диапазоне частот 5.5–7 ТГц.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 23-19-00436, https://rscf.ru/project/23-19-00436/.

## Библиографические ссылки

- 1. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges / M. S. Vitiello [et al.] // Opt. Exp. 2015. Vol. 23, iss. 4. P. 5167–5182.
- 2. Wen B., Ban D. High-temperature terahertz quantum cascade lasers // Progress in Quantum Electronics. 2021. Vol. 80. P. 100363.
- 3. *Madelung O.* Semiconductors: Data Handbook. NY: Springer, 2003.
- 4. 600-nm wavelength range GaInP/AlInP quasi-quaternary compounds and lasers prepared by gassource molecular-beam epitaxy / Y. Kaneko [et al.] // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74, iss. 2. P. 819–824.
- 5. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций со сниженными дипольными моментами туннельно-связанных состояний / Д. В. Ушаков [и др.] // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 10. С. 913–918.
- HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method / D. V. Ushakov [et al.] // Opt. Exp. 2020. Vol. 28, iss. 17. P. 25371–25382.
- Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag / Д. В. Ушаков [и др.] // Квантовая электроника. 2018. Т. 48, № 11. С. 1005–1008.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.