

# ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДВОЙНЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ

При создании терагерцевого квантово-каскадного лазера (ТГц ККЛ) особую роль играет выбор конструкции волновода. На сегодня наибольшее распространение имеют волноводы двух типов — поверхностно-плазмонный волновод и двойной металлический волновод (ДМВ), представленные на рис. 1.

Условие возникновения лазерной генерации, когда усиление активной среды превышает волновые потери, описывается следующим выражением (1):

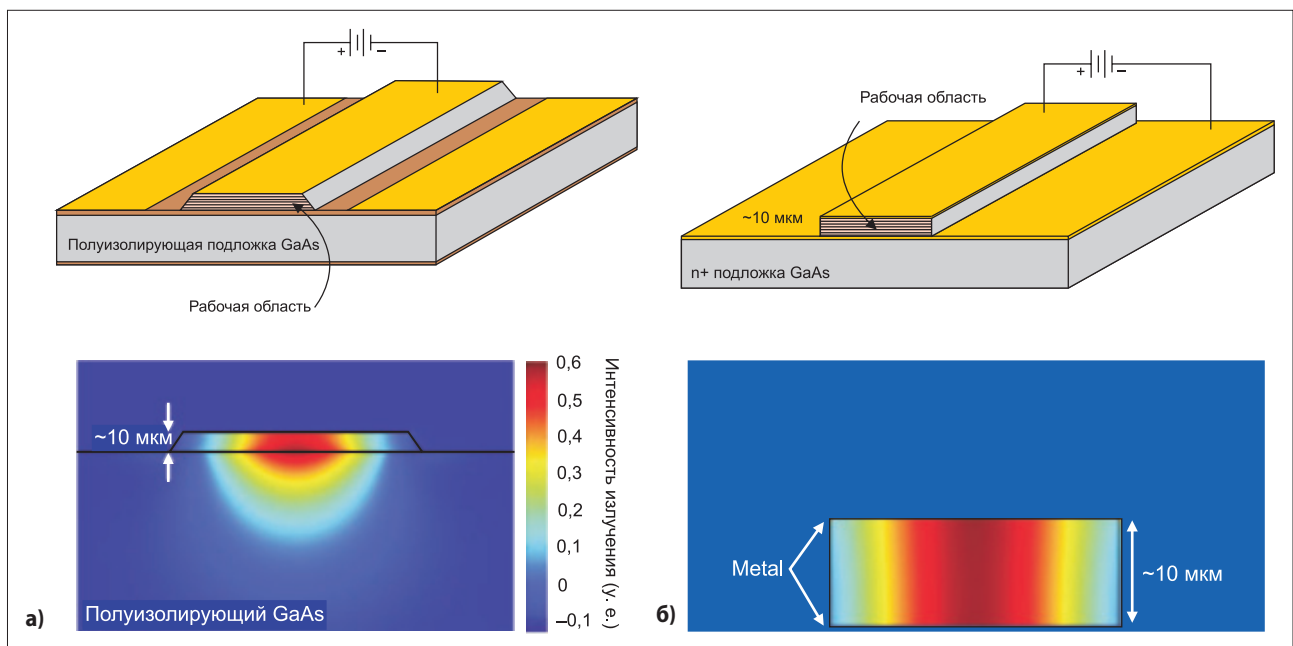
$$\Gamma \cdot g_{th} = \alpha_w + \alpha_m, \quad (1)$$

где:  $\alpha_w$  — собственные потери в волноводе, связанные с рассеянием и поглощением излучения;  $\alpha_m$  — потери при отражении излучения на зеркалах резонатора;

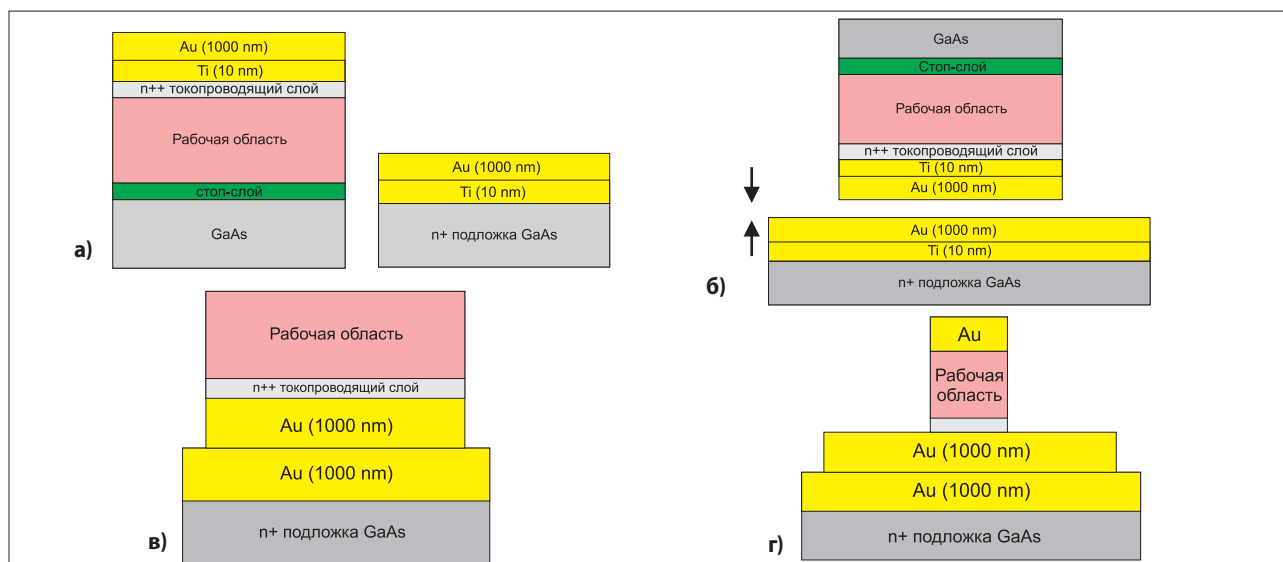
$\Gamma$  — фактор перекрытия волноводной моды с активной областью лазера.

Это выражение позволяет получить требуемое пороговое усиление  $g_{th}$ , при котором модальное усиление должно равняться сумме собственных потерь в волноводе и потерь на усиление сигнала. Конструкция волновода прямо влияет на фактор перекрытия волноводной моды с активной областью лазера ( $\Gamma$ ). Для поверхностно-плазмонных волноводов фактор перекрытия составляет 0,1–0,5, а для двойных металлических

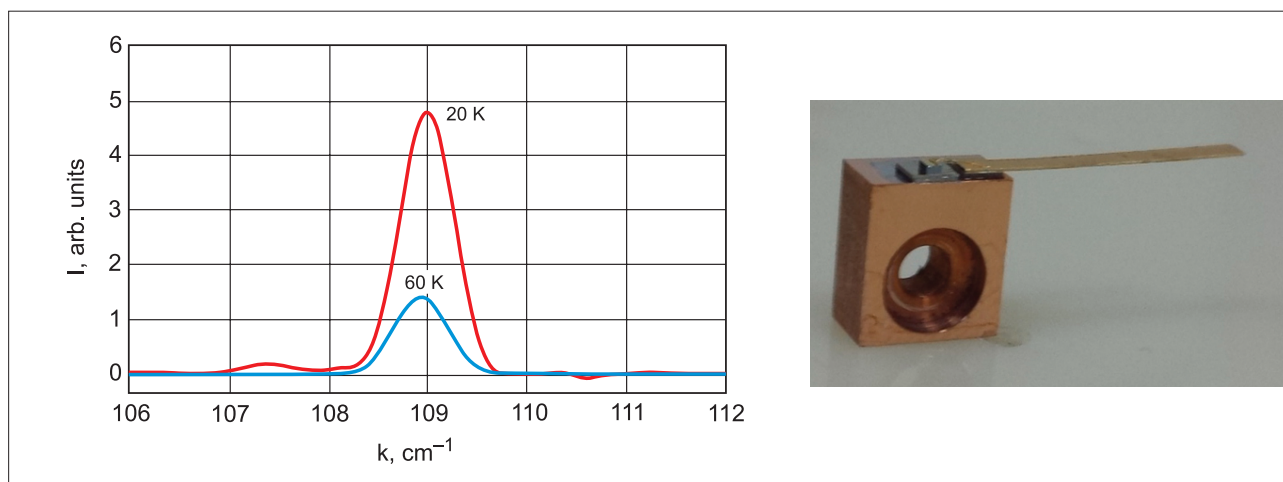
он приблизительно равен 1. Поскольку требуемое усиление  $g_{th}$  падает с ростом температуры, становится понятно, что наиболее подходящая конструкция для волновода ТГц ККЛ — двойной металлический волновод. Это подтверждает и создание ТГц ККЛ с рабочей температурой 199,5 К [2]. Повышению рабочей температуры лазера способствует выбор не только конструкции волновода, но и металла с меньшими потерями при прохождении излучения в резонаторе с ДМВ, чему посвящен ряд работ [2, 3].



▲ Рис. 1. Схематичное представление (верх) и интенсивность перекрытия волновой моды с активной областью лазера (низ) для: а) поверхностно-плазмонного волновода; б) двойного металлического волновода



▲ **Рис. 2.** Основные этапы изготовления ККЛ с ДМВ: а) напыление металлов; б) термокомпрессионная сварка; в) вскрытие поверхности активной области гетероструктуры; г) формирование мезаполоска ДМВ ККЛ



▲ **Рис. 3.** Спектральная характеристика и фотография изготовленного ТГц ККЛ-лазера

Наиболее перспективными металлами являются медь и серебро: выигрыш в рабочей температуре лазера оценивается не менее 20 К.

Изготовление ТГц ККЛ схематично представлено на рис. 2 на примере квантово-каскадного лазера с ДМВ на основе золота.

Ключевая особенность производства ККЛ с ДМВ заключается в проведении операции термокомпрессионной сварки, при осуществлении которой требуется специализированное оборудование и особые условия: для применения перспективных металлов (серебра или меди) при изготовлении ДМВ необходимо выполнение процесса в инертной атмосфере из-за химической активности данных металлов.

Также нами было установлено, что термокомпрессионная сварка оказывает решающее влияние на выход годных при выпуске заготовок ТГц ККЛ. Для неразрушающего контроля качества термокомпрессионной сварки нами применялся ультразвуковой микроскоп SonoScan 9000, что позволило оперативно опре-

делять качество термокомпрессионного соединения заготовок и корректировать режимы термокомпрессионного соединения.

По предложенному маршруту были изготовлены заготовки ТГц-лазеров и смонтированы на теплоотводе. Данные лазеры были успешно измерены. Результаты измерений и внешний вид заготовок представлен на рис. 3. Изготовленные лазеры имеют пик излучения около  $109 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует 3,2 ТГц.

### ВЫВОДЫ

Несмотря на отсутствие задела в России в области создания ТГц ККЛ, авторами работы в период с 2015 по 2018 год удалось усовершенствовать процессы постростовой обработки выращенных гетероструктур для создания ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом. Исследования излучательных характеристик ТГц ККЛ проведены независимо в ИФМ и ИРЭ РАН и подтверждают стимулированный характер излучения в осваиваемых

приборах. В спектре излучения ТГц ККЛ присутствует спектральная линия около  $109 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует 3,2 ТГц.

Создание ТГц ККЛ ставит ряд научно-практических задач: во-первых, необходимо освоение роста генерирующих ТГц излучение полупроводниковых гетероструктур, а во-вторых, требуется создание технологического комплекса, оснащенного специализированным технологическим оборудованием для выполнения технологических операций для изготовления ТГц ККЛ. —

### ЛИТЕРАТУРА

1. Williams B. S. *Terahertz quantum-cascade lasers*//*Nature Photonics*. 2007. Vol. 5.
2. Fatholouloumi S. et al. *Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling*//*Optics Express*. 2012. Vol. 20. Iss. 4.
3. Han Y. J., Li L. H., Zhu J. X. et al. *Silver-based surface plasmon waveguide for terahertz quantum cascade lasers*//*Optics Express*. 2018. Vol. 26. Iss. 4.