

# Оптимизация гребенчатого волновода лазера на основе HgCdTe гетероструктуры для одномодовой генерации излучения дальнего ИК диапазона

© А.А. Дубинов, С.В. Морозов

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: sanya@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 30 июня 2022 г.

В окончательной редакции 7 июля 2022 г.

Принята к публикации 7 июля 2022 г.

Проведена оптимизация параметров гребенчатого волновода лазера с оптической накачкой на основе гетероструктуры HgCdTe с квантовыми ямами для одномодовой генерации излучения в диапазоне длин волн 25–41 мкм. Было показано, что ширина гребня не должна превышать 15 мкм для осуществления одномодовой генерации в лазере с глубиной травления, захватывающей активную область.

**Ключевые слова:** лазер, волновод, мода, HgCdTe, дальний ИК диапазон.

DOI: 10.21883/FTP.2022.09.53404.39

## 1. Введение

В настоящее время крайне востребованы источники когерентного излучения дальнего ИК диапазона длин волн для различных применений в спектроскопии газов, медицине, мониторинге окружающей среды [1–3]. В этой области длин волн лидирующее место среди полупроводниковых источников излучения занимают монополярные квантовые каскадные лазеры (ККЛ) на основе соединений  $A^{III}B^V$ . Однако существует диапазон длин волн (25–55 мкм), в котором работа ККЛ на основе упомянутых выше соединений затруднена, а зачастую невозможна из-за сильного поглощения на полярно-оптических фонах [4]. Есть только одна работа, посвященная возможности генерации в этом диапазоне на длине волны 28 мкм [5].

Альтернативой материалам  $A^{III}B^V$  могут служить полупроводники, в которых частоты полярно-оптических фононов располагаются вдали от рассматриваемой выше области частот. В частности, одним из таких полупроводников являются твердые растворы HgCdTe, имеющие длины волн оптических фононов в районе 75 мкм, при этом ширину запрещенной зоны в HgCdTe можно менять в широких пределах — от нуля до 1.6 эВ — за счет изменения доли Cd. Эти материалы широко применяются для создания приемников и приемных матриц среднего ИК диапазона (см., например, работу [6] и ссылки в ней). Недавно было предложено использовать квантовые ямы на основе HgCdTe для создания ККЛ [7], излучающего в недоступном для ККЛ на основе соединений  $A^{III}B^V$  диапазоне длин волн.

Однако ККЛ, в том числе на HgCdTe, достаточно сложны в изготовлении из-за необходимости роста огромного числа квантово-размерных слоев требуемого качества. Поэтому альтернативой усилению на межподзонных оптических переходах (как в ККЛ) может

стать усиление на межзонных оптических переходах [8]. До недавнего времени межзонные лазеры на основе HgCdTe генерировали излучение лишь на длинах волн короче 5.3 мкм [9]. Но благодаря улучшению методики роста структур HgCdTe методом молекулярно-пучковой эпитаксии, из выращенных этим методом планарных волноводных структур HgCdTe с квантовыми ямами удалось наблюдать суперлюминесценцию на длинах волн вплоть до 31 мкм [10].

Для практических применений часто необходима одномодовая лазерная генерация. Первым шагом к ее созданию служит определение параметров гребенчатого волновода лазера с целью генерации одной моды, поперечной направлению распространения. В дальнейшем использование стандартных принципов создания лазера с распределенной обратной связью [11] позволит добиться одномодовой генерации по продольным модам.

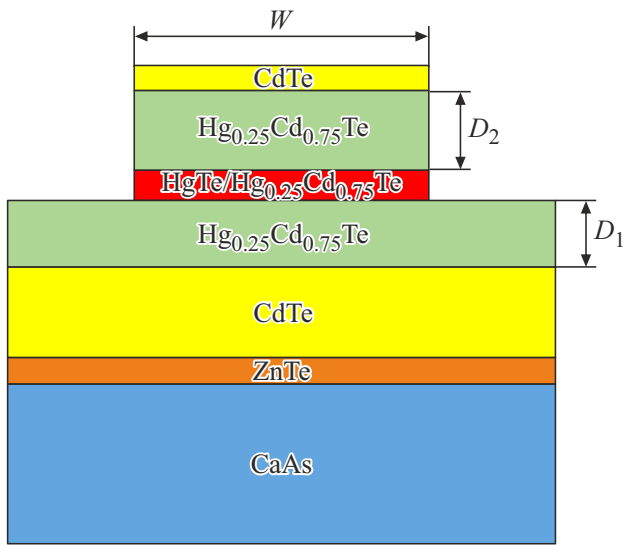
## 2. Моделирование и его результаты

В рассматриваемой структуре (см. таблицу и рис. 1), предназначенной для оптической накачки, мы будем полагать толщину буферного слоя CdTe, равной 15 мкм, так как ранее было показано, что для излучения в диапазоне длин волн 25–41 мкм оптимальный вариант волновода по отношению внутренних потерь  $\alpha$  к фактору оптического ограничения  $\Gamma$  реализуется при росте лазерной структуры HgCdTe на подложке GaAs с буферным слоем CdTe именно такой толщины [12].

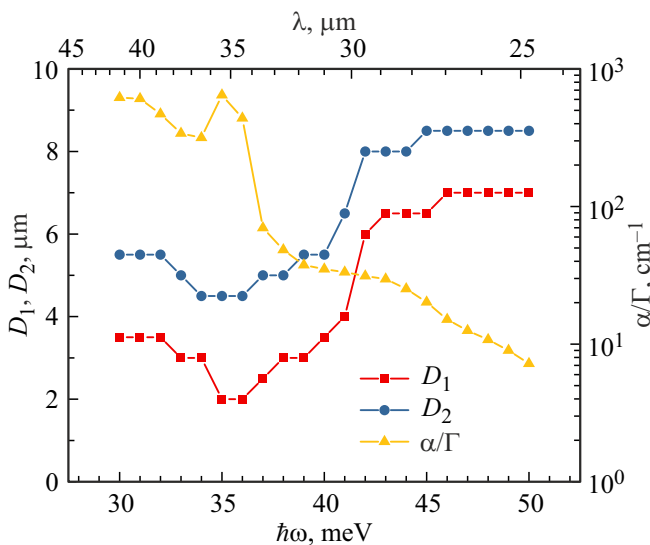
Путем варьирования толщин волноводных слоев  $D_1$  Hg<sub>0.25</sub>Cd<sub>0.75</sub>Te и  $D_2$  при решении уравнений Максвелла для волноводных TE-мод [13] были определены их оптимальные толщины (см. рис. 2), при которых порог генерации для TE<sub>0</sub>-моды был минимальным (что соответствует минимальному отношению  $\alpha/\Gamma$ ) [12]. При

Параметры исследуемой структуры

№ слоя	Название	Состав	Толщина, нм
1	Подложка	GaAs	–
2	Буферный слой	ZnTe	50
3	Буферный слой	CdTe	15000
4	Волноводный слой	Hg <sub>0.25</sub> Cd <sub>0.75</sub> Te	$D_1$
5	Активный слой (10 КЯ/барьер)	HgTe/Hg <sub>0.25</sub> Cd <sub>0.75</sub> Te	6/30
6	Волноводный слой	Hg <sub>0.25</sub> Cd <sub>0.75</sub> Te	$D_2$
7	Покровный слой	CdTe	50



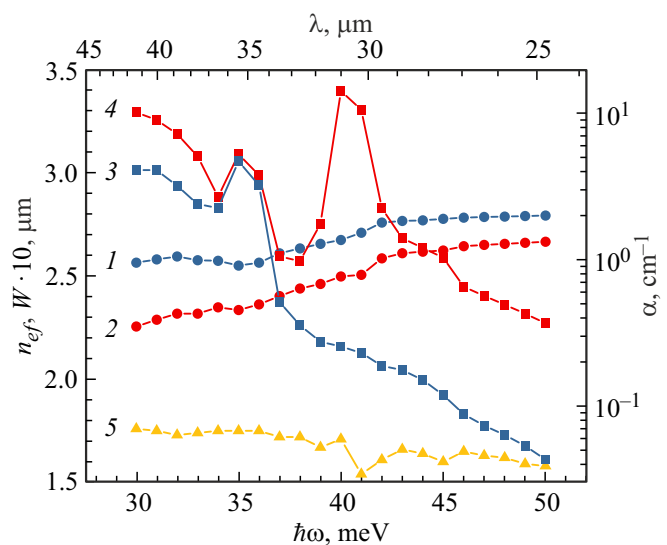
**Рис. 1.** Ростовая схема лазерной структуры (не в масштабе). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).



**Рис. 2.** Частотная зависимость минимального отношения  $\alpha/\Gamma$  и соответствующих оптимальных значений  $D_1$  и  $D_2$ .

этом порог генерации для неосновных мод был выше на 1–2 порядка. Из рис. 2 видно, что  $\alpha/\Gamma$  быстро растет с уменьшением частоты моды, что связано с резким увеличением поглощения при приближении частоты моды к частотам полярно-оптических фононов в CdTe, ZnTe и GaAs [14]. Отметим также максимум поглощения на 35 мэВ, который соответствует двухфононному пику поглощения в CdTe [14]. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости для Hg<sub>0.25</sub>Cd<sub>0.75</sub>Te аппроксимировалась из работы [15].

Для определения максимальной ширины гребенчатого волновода  $W$ , при которой существует только одна поперечная мода, мы использовали метод эффективного показателя преломления [13]. Полагалось, что травление при формировании гребня будет осуществляться до волноводного слоя, находящегося под слоем с активной областью. Это необходимо для того, чтобы при оптической накачке лазерная генерация возникла только в гребне. Вычислив эффективные показатели преломления  $n_{ef}$  и потери  $\alpha$  TE<sub>0</sub>-мод под гребнем и вне его (см. рис. 3), можно найти искомую величину  $W$  в зависимости от ча-



**Рис. 3.** Частотная зависимость  $n_{ef}$  (1) и  $\alpha$  (3) под гребнем и  $n_{ef}$  (2) и  $\alpha$  (4) вне его, а также максимальной ширины  $W$  (5).

стоты излучения. Отметим, что для  $TE_0$ -моды вне гребня частотная зависимость  $\alpha$  имеет пик вблизи 40 мЭВ, что связано с уменьшением общей толщины волноводного слоя при травлении, которое приводит к увеличению потерь на вытекание моды в подложку GaAs и росту  $\alpha$ .

На рис. 3 представлена частотная зависимость  $W$  для рассматриваемого гребенчатого волновода в диапазоне длин волн 25–41 мкм. Из рисунка видно, что зависимость  $W$  достаточно слабая и при ширине  $W$  менее 15 мкм во всем рассматриваемом диапазоне длин волн должна наблюдаться одномодовая генерация на моде  $TE_{00}$ .

### 3. Заключение

В заключение в работе было проведено численное моделирование модового состава гребенчатого волновода лазера на основе CdTe/Hg<sub>0.25</sub>Cd<sub>0.75</sub>Te с квантовыми ямами HgTe. Было показано, что в диапазоне длин волн 25–41 мкм ширина гребня не должна превышать 15 мкм для осуществления одномодовой генерации в лазере с глубиной травления, захватывающей активную область.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00310).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.S. Dhillon, M.S. Vitiello, E.H. Linfield, A.G. Davies. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50** (4), 043001 (2017).
- [2] T. Hochrein. *J. Infr. Milli. Terahz. Waves*, **36**, 235 (2015).
- [3] P.F.-X. Neumaier, K. Schmalz, J. Borngraber, R. Wylde, H.-W. Hubers. *Analyst*, **140**, 213 (2015).
- [4] M.S. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, P. De Natale. *Opt. Express*, **23**, 5167 (2015).

- [5] K. Ohtani, M. Beck, M.J. Süess, J. Faist, A.M. Andrews, T. Zederbauer, H. Detz, W. Schrenk, G. Strasser. *ACS Photonics*, **3** (12), 2280 (2016).
- [6] A. Rogalski. *Rep. Progr. Phys.*, **68**, 2267 (2005).
- [7] D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, D. Ponomarev, V. Aleshkin, S. Morozov, A. Dubinov. *Opt. Express*, **28**, 25371 (2020).
- [8] A. Afonenko, D. Ushakov, G. Alymov, A. Dubinov, S. Morozov, V. Gavrilenko, D. Svintsov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54**, 175108 (2021).
- [9] J.M. Arias, M. Zandian, R. Zucca, J. Singh. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, S255 (1993).
- [10] S.V. Morozov, V.V. Rumyantsev, M.S. Zholudev, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, V.V. Utochkin, M.A. Fadeev, K.E. Kudryavtsev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzkii, V.I. Gavrilenko, F. Teppé. *ACS Photonics*, **8**, 3526 (2021).
- [11] H. Kogelnik, C.V. Shank. *J. Appl. Phys.*, **43**, 2327 (1972).
- [12] A.A. Дубинов, В.В. Румянцев, М.А. Фадеев, В.В. Уточкин, С.В. Морозов. *ФТП*, **55**, 455 (2021).
- [13] М. Адамс. *Введение в теорию оптических волноводов* (М., Мир, 1984).
- [14] *Handbook of optical constants of solids*, ed. by E.D. Palik (Academic Press, Orlando, 1985).
- [15] J. Polit. *Bull. Polish Acad. Sciences. Tech. Sciences*, **59** (3), 331 (2011).

Редактор Г.А. Оганесян

### Optimization of a stripe laser waveguide based on an HgCdTe heterostructure for single-mode generation of far-IR radiation

A.A. Dubinov, S.V. Morozov

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The parameters of an optically pumped stripe waveguide laser based on an HgCdTe heterostructure with quantum wells for single-mode generation of radiation in the wavelength range of 25–41  $\mu\text{m}$  are optimized. It was shown that the width of the ridge should not exceed 15  $\mu\text{m}$  to implement single-mode generation in a laser with an etching depth covering the active region.

Публикация материалов Симпозиума завершена.