

Анализ энергетической структуры и спектров усиления квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона

Д. В. Ушаков^а, Р. А. Хабибуллин^б

^а Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: ushakovdv@bsu.by

^б Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской АН, Москва, Россия

Проведен краткий обзор терагерцовых квантово-каскадных лазеров с активной областью из трех квантовых ям. Проанализированы энергетические характеристики и спектры усиления структур на основе $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$. Рассчитаны коэффициенты потерь для различных металлических волноводов. Показано согласие результатов расчета с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, три квантовые ямы, резонансное туннелирование, фоновый резонанс, металлический волновод, спектры терагерцового усиления.

Введение

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) ТГц диапазона с активной областью, состоящей из трех квантовых ям (КЯ) реализованы в настоящее время на основе структур $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ с дизайном “резонансное испускание оптического фонона”, основанным на быстром опустошении нижнего рабочего уровня за счет резонансного испускания оптического фонона [1–4]. Максимальные рабочие температуры, достигающие 199.5 К [4], получены за счет как оптимизации характеристик резонатора [2], так и увеличении силы осциллятора f_{nm} и матричных элементов дипольных переходов Z_{nm} между рабочими уровнями. Характеристики полученных ККЛ на трех КЯ представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры выращенных ККЛ на трех КЯ

ν_{nm} , ТГц	$h\nu_{nm}/k$, К	$T_{max}^{эксп}$, К	Z_{nm} , Å	f_{nm}	ΔE_c , мэВ	Ссылка
3.4	163	142	47	0.51	129	[1]
3.0	144	178	61	—	133	[2]
3.9	187	186	37	0.38	135	[3]
3.2	154	199.5	—	0.58	133	[4]

В работе [5] предложена оптимизированная конструкция ККЛ на основе $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ с тремя КЯ, позволяющая получить силу осциллятора ~ 0.91 , что в 1.57 раза превышает значение 0.58 из работы [4]. В [6, 7] предложены пути продвижения в область меньших частот ТГц-диапазона за счет введения в структуру широкой КЯ $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ узкой КЯ из GaAs , а также изменения высоты коллекторного барьера за счет варьирования содержания алюминия.

В работе [8] на базе структуры [4] с двойным металлическим волноводом получена генерации в области 3 ТГц при гелиевых температурах и впервые продемонстрирована возможность создания ККЛ ТГц-диапазона в России. В настоящей работе подробно исследуются энергетические и спектральные характеристики ККЛ на основе $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ с тремя КЯ [4].

Теоретическая модель и обсуждение результатов

Энергии, волновые функции, матричные элементы дипольных переходов, а также профиль потенциальной энергии находились **к**p-методом в расширенной модели Бастарда [9, 10] на основе самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Степень заполнения уровней энергии и соответствующие квазиуровни Ферми находились путем численного решения системы балансных уравнений [11]. Коэффициент усиления g для внутриподзонных переходов в зависимости от частоты света находился в многоуровневом приближении с учетом несимметричного контура уширения линии излучения [12] с параметром уширения 5 мэВ.

На рис. 1 приведены расчеты зонной структуры, уровней энергии, волновых функций, а также концентрации электронов на уровнях ККЛ с активной областью из трех КЯ на основе GaAs–Al_{0.15}Ga_{0.85}As, полученной в работе [4]. Толщины слоев структуры слева направо: 41/160/43/89/24.6/81.5 Å. Во всей последовательности слоев КЯ GaAs выделены жирным. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями Si со слоевой концентрацией $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При вычислениях высота потенциальных барьеров в зоне проводимости полагалась равной $\Delta E_c = 133 \text{ мэВ}$. Рассчитанные эффективные массы носителей тока составляли $m^* = 0.080m_0$ для барьерных слоев Al_{0.15}Ga_{0.85}As и $m^* = 0.067m_0$ для КЯ GaAs.

На рис. 1 нумерация уровней идет снизу вверх 1–5 и в предыдущем каскаде 1'–5'. Особую роль в структуре играет уровень 5 (верхний уровень в широкой КЯ). Когда он между уровнями 3' и 4' (что тоже между 3 и 4), выполняется условие фонованного резонанса и уровни 3 и 4 (3', 4') эффективно опустошаются. Длина волны генерации усредняется по основным переходам 1'–4 (2.7 ТГц) и 2'–4 (3.4 ТГц) и составляет ~3 ТГц, что хорошо согласуется с данными [4].

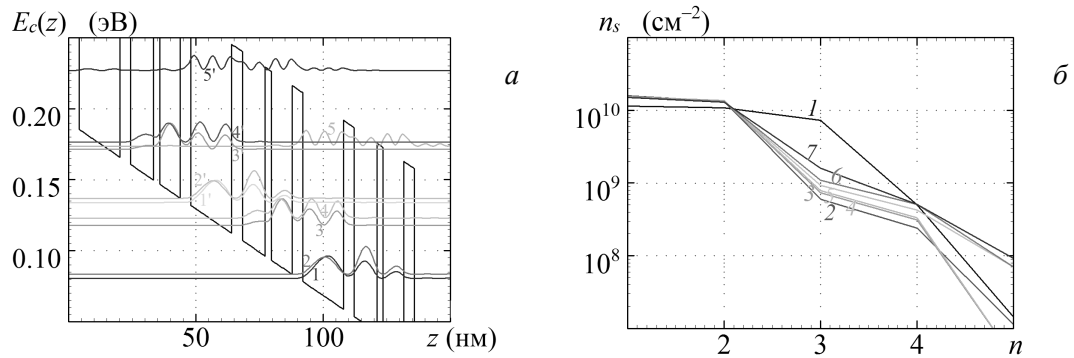


Рис. 1. Диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ и квадраты модулей волновых функций электронов в электрическом поле $E = 12.2 \text{ кВ/см}$ (а) и концентрации электронов на уровнях (б) при напряженностях поля $E = 11.5$ (1), 11.8 (2), 12.1 (3), 12.2 (4), 12.4 (5), 12.6 (6), 12.9 кВ/см (7)

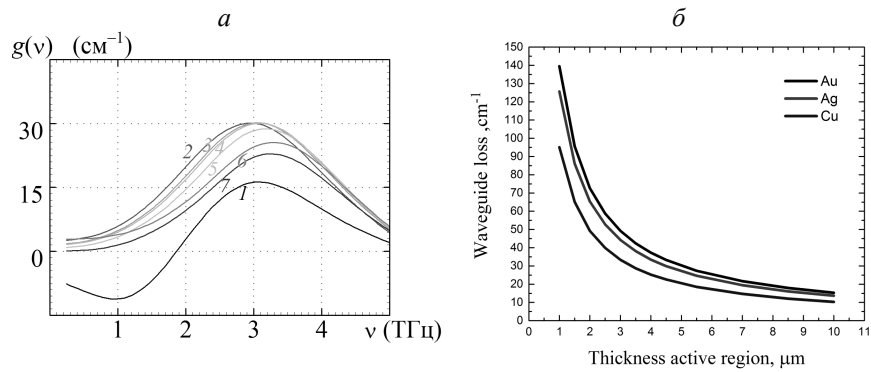


Рис. 2. Спектры усиления при $E = 11.5$ (1), 11.8 (2), 12.1 (3), 12.2 (4), 12.4 (5), 12.6 (6) 12.9 кВ/см (7) (а) и коэффициент внутренних потерь металлического волновода (б)

При напряженности электрического поля $E = 12.2 \text{ кВ/см}$ достигается оптимум населенности между рабочими уровнями 1'–4 и 2'–4. При этом максимум коэффициента усиления составляет 30 см^{-1} на частоте ~3 ТГц. При данном коэффициенте усиления, как следует из рис. 2, б, толщина активной области для различных металлических волноводов должна быть больше 3.5 (Cu), 4.7 (Ag) и 6.2 мкм (Au). Как видно из рис. 2 а, при изменении напряженности поля от 11.8 до 12.5 кВ/см коэффициент усиления составляет ~30 см^{-1} и практически не изменяется. Это обусловлено тем, что условие фонованного резонанса бызизлучательного перехода на уровень 2' выполняется поочередно для уровней 3'–2', 4'–2', 5–2'. Уровень 5 позволяет расширить диапазон напряженностей поля, в котором коэффициент усиления практически не меняется. Следовательно, с температурой будет большая стабильность. Результаты расчета зонной структуры и спектров усиления хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными данными [4].

Литература

1. H. Luo, S.R. Laframboise, Z.R. Wasilewski, G.C. Aers, H.C. Liu. *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. P. 041112(1–3).
2. M.A. Belkin, J.A. Fan, S. Hormoz, F. Capasso, S.P. Khanna, M. Lachab, A.G. Davies, E.H. Linfield. *Opt. Exp.* 2008. Vol. 16. P. 3242–3248.
3. S. Kumar, Q. Hu, J.L. Reno. *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 94. P. 131105-1–131105-3.
4. S. Fatholouloumi, E. Dupont, C.W.I. Chan, Z.R. Wasilewski, S.R. Laframboise, D. Ban, A. Mátyás, C. Jir-
auschek, Q. Hu, H.C. Liu. *Optics Express*. 2012. Vol. 20. P. 3866–3876.
5. Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, N. Samal. *Материалы XVII Междунар. Симпозиума “Нанопфизика и
наноэлектроника”*. Нижний Новгород, 11—15 марта. 2013. Т. 2. С. 619–620.
6. Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, N. Samal. *ФТП*. 2012. Т. 46. С. 1430–1434.
7. Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев. *Материалы X Междунар. науч.-техн. конф.* Минск, 9—13 ноября.
Минск, РИВШ. 2015. С. 99–101.
8. К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, Р.А. Хабибуллин,
Р.Р. Резник, Г.Э. Цырлин, Ф.И. Зубов, А.Е. Жуков, Ж.И. Алфёров, А.В. Иконников. *Письма в ЖТФ*.
2017. Т. 43, № 7. С. 86–94.
9. K.H. Yoo, L.R. Ram-Mohan, D.F. Nelson. *Phys. Rev. B*. 1989. V. 39, No. 17. P. 12808–12813.
10. Д.В. Ушаков, И.С. Манак. *Оптика и спектроскопия*. 2008. Т. 104, № 5. С. 847–852.
11. Д.В. Ушаков, И.С. Манак. *Журн. прикл. спектр.* 2007. Т. 74, № 6. С. 801–804.
12. Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко, И.С. Манак. *Квантовая электроника*. 2010. Т. 40, № 3. С. 195–198.

Analysis of The Energy Structure and Gain Spectra of Thz Quantum-Cascade Lasers

D. V. Ushakov^a, R. A. Khabibullin^b

^a *Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: ushakovdv@bsu.by*

^b *Institute of Ultra High frequency Semiconductor Electronics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

A brief review of terahertz quantum-cascade lasers with an active region of 3 quantum wells are given. The energy characteristics and gain spectra of structures based on $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ are analyzed. The loss coefficients for various metal waveguides are calculated. A good agreement of the calculation results with known theoretical and experimental data are shown.

Keywords: quantum cascade laser, three quantum wells, resonance tunneling, phonon resonance, a metal waveguide, spectra of terahertz gain.