

ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ GaAs/AlGaAs КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ТРЕХ КВАНТОВЫХ ЯМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МОЛЕВОГО СОСТАВА КОЛЛЕКТОРНОГО БАРЬЕРА

Д. В. Ушаков¹, Ю. Г. Садофьев²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

E-mail: ushakovdv@bsu.by

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) ТГц диапазона с активной областью из 3 квантовыми ямами (КЯ) реализованы в настоящее время на основе структур GaAs/AlGaAs с дизайном «резонансное испускание оптического фонона» [1–4]. Исследуемый в работе дизайн структур соответствовал 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 3 КЯ, описанному в работе [1]. Рассчитанная структура показана на рисунке 1. Толщины слоев структуры, выраженные в монослоях, слева направо, начиная с коллекторного барьера, имеют следующие значения: 15/57/17/34/7/26. Во всей последовательности слоев квантовые ямы GaAs выделены жирным. Подчеркнутые слои легированы примесями Si со слоевой концентрацией $3.06 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Толщины слоев ККЛ кратны толщине монослоя GaAs (0.2825 нм), что обеспечивает лучшее качество гетерограниц, высокую скорость роста структур и более высокие ожидаемые рабочие температуры [5].

Инверсия населенности достигалась за счет туннелирования электронов из инжектора (уровень 4) на верхний рабочий уровень 3 и опустошения нижних рабочих уровней 1 и 2 за счет резонансного

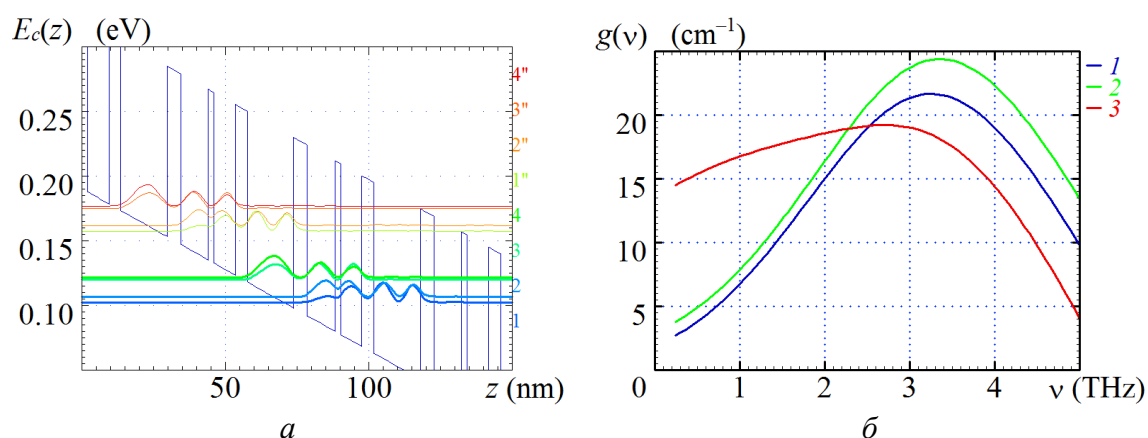


Рис. 1. *а* – Диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ и квадраты модулей волновых функций электронов в электрическом поле $E=12.5 \text{ кВ/см}$ и
б – спектры усиления при $E= 12.0(1), 12.5(2), 13.0 \text{ кВ/см}$ (3)

рассеяния с испусканием оптических фононов. Основные излучательные переходы осуществляются между уровнями 4–2 ($h\nu = 15.2$ мэВ, $\nu = 3.7$ ТГц, $z_{nm} = 3.13$ нм) и 3–2 ($h\nu = 13.2$ мэВ, $\nu = 3.2$ ТГц, $z_{nm} = 4.91$ нм). В результате коэффициент усиления имеет максимум на частоте ~ 3.4 ТГц, при этом происходит резонансное испускание оптического фонона – переход $(1', N-1) \rightarrow (4, N)$ с нижнего уровня в каскаде с номером $N-1$ на верхний уровень каскада с номером N , а также эквивалентный переход $(1, N) \rightarrow (4, N+1)$. При возрастании электрического поля происходит уменьшение коэффициента усиления из-за того, что опустошение уровня 1 или $1'$ происходит не так эффективно, т.к. энергия перехода $(1', N-1) \rightarrow (4, N)$ растет.

В работе [7] для ККЛ на 2 КЯ 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 увеличение высоты коллекторного барьера (увеличение содержания алюминия).

Представляется интересным проведение численных расчетов ККЛ с 3 КЯ для различного молевого состава ($x=0.2, 0.1, 0.05, 0$) коллекторного барьера (толщина 15 монослоев = 4.2 нм) перед широкой КЯ. В таблице 1 представлены рассчитанные данные для напряженности электрического поля E , частоты максимума коэффициента усиления ν , энергии основных переходов E_{ij} , матричных элементов дипольных элементов Z_{ij} , силы осциллятора f_{ij} , а также разности населенностей для основных переходов Δn_{ij} .

Таблица 1

Параметры ККЛ на 3 КЯ при изменении молевого состава
коллекторного барьера

x	E (кВ/см)	ν (ТГц)	E_{32} (мэВ)	$E_{1'3}$ (мэВ)	$E_{2'3}$ (мэВ)	Z_{32} (\AA)	f_{32}	Δn_{32} 10^9 см^{-2}	E_{42} (мэВ)	$E_{1'4}$ (мэВ)	$E_{2'4}$ (мэВ)	Z_{42} (\AA)	f_{42}	Δn_{42} 10^9 см^{-2}
0.0	11.6	2.1	8.9	19.6	42.1	62	0.51	13.6	10.4	18.1	40.6	63	0.67	9.7
0.05	11.5	2.6	10.0	29.6	40.5	61	0.58	12.7	11.8	27.8	38.7	52	0.52	11.8
0.1	12.0	3.5	11.6	34.9	41.1	52	0.51	11.0	13.5	33.0	39.2	40	0.35	12.2
0.1	12.5	3.8	12.5	36.1	42.5	59	0.74	7.5	14.8	33.8	40.4	25	0.14	13.7
0.15	12.5	3.4	13.2	37.7	42.0	49	0.51	19.6	15.2	35.7	40.0	31	0.24	12.8
0.2	12.5	3.4	13.3	38.4	41.7	45	0.49	17.4	15.3	37.4	39.6	22	0.12	16.4

Как видно из таблицы 1, при уменьшении молевого состава коллекторного барьера частота максимума спектра усиления ведет себя неоднозначно и может меняться скачкообразно сначала увеличивается

при $x = 0.1$ до 3.5 ТГц, а затем резко уменьшается до 2.1 ТГц при $x = 0$. Причиной начального увеличения частоты является нарушение условия «резонансного испускания оптического фонона» для нижележащего уровня 3, по сравнению с уровнем 4. Уровень 1' перестает работать ($E_{1'3} < h\nu_{\text{oph}}$, $E_{1'4} < h\nu_{\text{oph}}$) и увеличивается скорость безызлучательного ухода носителей с уровня 2' на уровень 4. При дальнейшем уменьшении содержания алюминия ($x < 0.1$), волновые функции 3 и 4 уровней начинают «чувствовать» барьер, т.к. его высота становится сравнима со значения энергий E_4 и E_3 . Как видно из рисунка 2 при $x = 0$, уровни опускаются из-за исчезновения коллекторного барьера и слияния его с 2 соседними КЯ в одну более широкую. При этом частота генерации падает, а структура с 3КЯ преобразуется в ККЛ с 2КЯ (рис. 2).

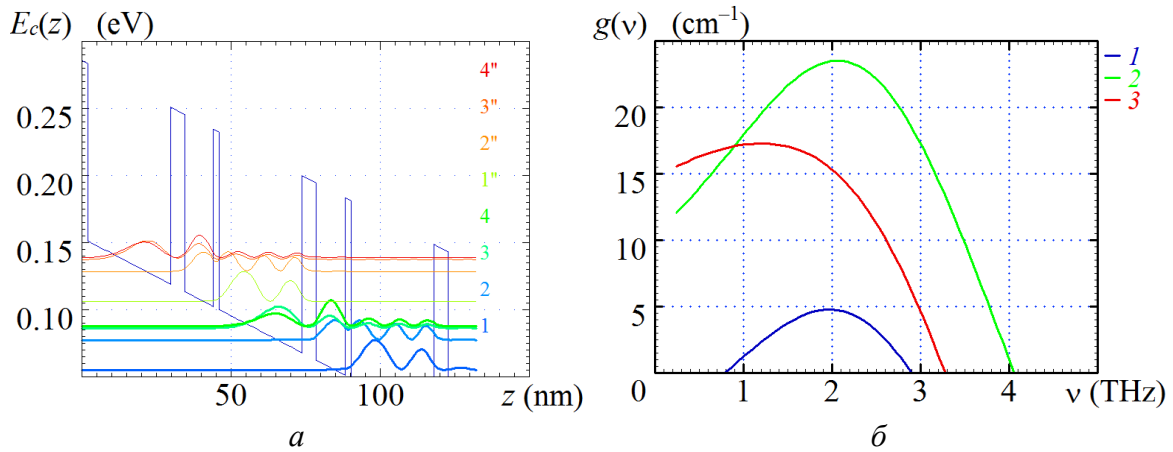


Рис. 2. а – Диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ и квадраты модулей волновых функций электронов в электрическом поле $E = 11.6$ кВ/см и б – спектры усиления при $E = 11.3(1)$, $11.6(2)$, 12.0 кВ/см (3)

1. Luo H., Laframboise S. R., Wasilewski Z. R. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. P. 041112(1-3).
2. Belkin M.A., Fan J.A., Hormoz S. et al. // Opt. Exp. 2008. Vol. 16. P. 3242–3248.
3. Kumar S., Hu Q., Reno J. L. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. P. 131105-1–131105-3.
4. Fatholouloumi S., Dupont E., Chan C. W. I. et al. // Optics Express. 2012. Vol. 20. P. 3866–3876.
5. Садофьев, Ю. Г. // Мат. XV Междунар. Симпозиума "Нанопизика и Нанозлектроника". Т. 1. Нижний Новгород, 2011. С. 244–245.
6. Van de Walle C. G. // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 39. P. 1871–1883.
7. Ушаков Д. В., Садофьев Ю. Г., Samal N. // ФТП. 2012. Т. 46. С. 1430–1434.