

Модель уровней эквивалентной схемы и усовершенствование терагерцевых квантовых каскадных лазеров*

Вэй Чжоу, Шаобинь Лю, Дье У, Сяолю Чжан, У Тан

На основе скоростных уравнений разработана модель уровней эквивалентной схемы для терагерцевых квантовых каскадных лазеров (ККЛ). Эта модель может быть использована для точного исследования характеристик терагерцевых ККЛ и усовершенствования их конструкции. С помощью модели уровней схемы анализируется новая активная структура, которая может улучшить характеристики терагерцевых ККЛ путем усиления инжекции носителей заряда. Результат моделирования показывает, что терагерцевые ККЛ с новой активной структурой имеют гораздо более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с лазерами с обычной структурой. Ожидается, что терагерцевые ККЛ с высокими эксплуатационными характеристиками будут использоваться при более высоких температурах.

Ключевые слова: квантовые каскадные лазеры, модель уровней схемы, скоростное уравнение.

1. Введение

Изобретение квантового каскадного лазера (ККЛ) в 1994 г. [1] позволило получить мощный и компактный твердотельный источник излучения в дальней ИК области. С тех пор характеристики источников постоянно улучшались, и сейчас их спектральный диапазон распространяется от средней ИК области до терагерц.

Терагерцевый диапазон частот располагается между микроволновой и ИК областями – от 0.1 до 10 ТГц, или от 3.3 до 333 см⁻¹. Этот диапазон подходит для многих применений, например для определения характеристик материалов, рентгенографии и биологического зондирования. Благодаря новым свойствам и уникальному взаимодействию со многими материалами терагерцевое излучение стало горячей темой исследований в последние несколько лет и все еще ей остается [2, 3]. Недостаточное количество компактных и мощных терагерцевых источников излучения ограничило их практическое применение. Когда появились терагерцевые ККЛ, они стали самыми мощными полупроводниковыми терагерцевыми источниками в диапазоне частот 2–5 ТГц.

Однако эксплуатация терагерцевых ККЛ возможна лишь при низких (ниже 200 К) температурах [4]. С целью повышения рабочей температуры предлагается очень много способов, в том числе вариант с двухфононным резонансом [5], который может повысить экстракцию носителей заряда. Тем не менее существенно улучшить характеристики такая конструкция не может. Авторы [6] предложили новую конструкцию с новой активной структурой,

которая может уменьшить пороговую скорость накачки, соответствующую пороговому току, и увеличить дифференциальную эффективность, что позволяет этой конструкции ККЛ работать при высоких температурах. Поэтому ККЛ с новой активной структурой имеют более высокие эксплуатационные характеристики, чем обычные терагерцевые ККЛ.

Моделирование поведения ККЛ является важным шагом к прогнозированию характеристик таких полупроводниковых источников. Моделирование очень важно для проектирования ККЛ, с его помощью мы можем исследовать основные физические процессы, изучить характеристики ККЛ и выявить решающие факторы их работы. Модель позволяет оценить, является ли конструкция эффективной или нет, что экономит и время, и деньги при совершенствовании конструкции.

Методы моделирования включают формализм неравновесной функции Грина [7], моделирование методом Монте-Карло [8] и модель самосогласованных скоростных уравнений [9]. Первые два метода требуют очень большого объема вычислений, поэтому они не годятся для оптимизации конструкции, в то время как модель самосогласованных скоростных уравнений является точной и быстрой, что делает ее пригодной для проектирования и оптимизации. Поэтому в настоящей статье мы используем последний вариант. С его помощью мы создаем модели как для обычных терагерцевых ККЛ, так и для терагерцевых ККЛ с высокими эксплуатационными характеристиками (ВЭХ). Затем мы получаем соответствующие им эквивалентные схемы и подробно изучаем их характеристики на основе литературных данных.

2. Моделирование традиционных терагерцевых ККЛ

Анализ обычных терагерцевых ККЛ. Активную область обычных терагерцевых ККЛ мы рассматриваем с помощью трехуровневой модели [10], которая изображена на рис.1 для одного каскада активной области.

* Перевод с англ. Е.А.Витовой.

Wei Zhou, Shaobin Liu, Jie Wu, Xiaoliu Zhang, Wu Tang. State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, Peoples Republic of China; e-mail: weizhou@uestc.edu.cn, liushaobinbei@126.com

Поступила в редакцию 8 сентября 2013 г., после доработки – 4 декабря 2013 г.

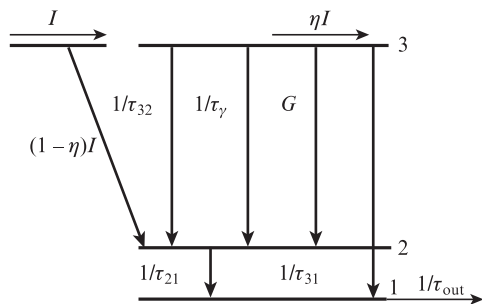


Рис.1. Зонная структура и перенос носителей заряда для одного каскада активной области обычных терагерцевых ККЛ.

Дискретные энергетические уровни 3, 2, 1 – это верхний и нижний лазерные уровни, а также лазерный уровень экстракции носителей заряда. Находящийся между уровнями 3 и 2 лазерный переход включает спонтанное и индуцированное излучения.

Носители заряда инжектируются из области инжектора в уровень 3 [11] путем резонансного туннелирования. Имеет место также некоторое рассеяние носителей заряда из области инжектора непосредственно в уровни 2 и 1, минуя уровень 3. Поскольку количество носителей заряда, рассеивающихся из области инжектора непосредственно в уровень 1, малое, в настоящей статье мы пренебрегаем этим рассеянием, чтобы упростить вычисления. После излучательного перехода $3 \rightarrow 2$ носители заряда релаксируют к уровню 1 путем излучения продольных оптических фононов и затем проходят в следующую область инжектора.

Итак, скоростные уравнения могут быть записаны следующим образом:

$$\eta \frac{I}{e} = \frac{dN_3}{dt} + \frac{N_3}{\tau_3} + G(N_3 - N_2)N_{ph}, \quad (1)$$

$$(1 - \eta) \frac{I}{e} + \frac{N_3}{\tau_{32}} + \frac{N_3}{\tau_\gamma} + G(N_3 - N_2)N_{ph} = \frac{dN_2}{dt} + \frac{N_2}{\tau_{21}}, \quad (2)$$

$$\frac{N_3}{\tau_{31}} + \frac{N_2}{\tau_{21}} = \frac{dN_1}{dt} + \frac{N_1}{\tau_{out}}, \quad (3)$$

$$NG(N_3 - N_2)N_{ph} + N\beta \frac{N_3}{\tau_\gamma} = \frac{dN_{ph}}{dt} + \frac{N_{ph}}{\tau_{ph}}, \quad (4)$$

где η – эффективность инжекции; I – ток инжекции; N_3 , N_2 и N_1 – мгновенные числа электронов на уровнях 3, 2 и 1 соответственно; $G = g\Gamma c/(n_{eff}LW)$ – скорость индуцированных переходов; g – дифференциальное усиление; Γ – оптическое ограничение; c – скорость света в вакууме; n_{eff} – групповой показатель преломления; L – длина резонатора; W – ширина резонатора; N_{ph} – число фотонов в резонаторе, N – число каскадов ККЛ; τ_{ij} – время безызлучательной релаксации от уровня i к уровню j ; τ_γ – время спонтанной релаксации; $1/\tau_3 = 1/\tau_{32} + 1/\tau_{31} + 1/\tau_\gamma$; τ_{out} – время выхода электронов; $1/\tau_{out}$ – скорость выхода электронов между двумя соседними каскадами; τ_{ph} – время жизни фотонов в резонаторе; β – коэффициент спонтанного излучения.

Выходная оптическая мощность P и число фотонов N_{ph} связаны соотношением

$$P = \frac{v_g h\nu}{2L} \ln\left(\frac{1}{r}\right) N_{ph}, \quad (5)$$

где $v_g = c/n_{eff}$ – скорость света в резонаторе; h – постоянная Планка; ν – частота генерации; r – отражательная способность грани.

Модель уровней схемы. С целью улучшения сходимости установим связь между величинами N_3 , N_2 , N_1 , N_{ph} и P (система (1)–(4)) и переменными эквивалентной схемы V_3 , V_2 , V_1 , V_{ph} и V_{laser} . Примем $N_3 = V_3$, $N_2 = V_2$, $N_1 = V_1$, $N_{ph} = V_{ph}$, $P = V_{laser}$.

В подсхеме верхнего (третьего) лазерного уровня V_3 – узловой потенциал,

$$G_{j1} = C_3 \frac{dV_3}{dt} + \frac{V_3}{R_3} + G_{stim}. \quad (6)$$

Связь между элементами подсхемы и переменными уравнения (1) такова: $G_{j1} = \eta I/e$, $C_3 = 1$, $R_3 = \tau_3$, $G_{stim} = G(N_3 - N_2)N_{ph}$.

В подсхеме нижнего (второго) лазерного уровня V_2 – узловой потенциал,

$$G_{j2} + G_{32} + G_{stim} = C_2 \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{R_2}, \quad (7)$$

$$G_{j2} = (1 - \eta)I/e, \quad G_{32} = (1/\tau_{32} + 1/\tau_\gamma)N_3, \quad C_2 = 1, \quad R_2 = \tau_{21}.$$

В подсхеме лазерного (первого) уровня экстракции носителей заряда V_1 – узловой потенциал,

$$G_{31} + G_{21} + G_{stim} = C_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{R_1}, \quad (8)$$

$$G_{31} = (1/\tau_{31})N_3, \quad G_{21} = (1/\tau_{21})N_2, \quad C_1 = 1, \quad R_1 = \tau_{out}.$$

В оптической подсхеме V_{ph} – узловой потенциал, а V_{laser} – выходная оптическая мощность,

$$G_{stimN} + G_{sp} = C_{ph} \frac{dV_{ph}}{dt} + \frac{V_{ph}}{R_{ph}}, \quad (9)$$

$$V_{laser} = G_{laser}, \quad (10)$$

$$G_{stimN} = NG_{stim}, \quad G_{sp} = N\beta N_3/\tau_\gamma, \quad C_{ph} = 1, \quad R_{ph} = \tau_{ph},$$

$$G_{laser} = \frac{v_g h\nu}{2L} \ln\left(\frac{1}{r}\right) N_{ph}.$$

Полная модель уровней схемы представлена на рис.2, а символическое изображение обычных терагерцевых ККЛ, которое может быть описано как трехблочное устройство, показано на рис.3.

3. Моделирование терагерцевых ККЛ с ВЭХ

Анализ терагерцевых ККЛ с ВЭХ. Во Введении мы упомянули о том, что увеличение экстракции носителей заряда не может в значительной степени улучшить характеристики терагерцевых ККЛ. Авторы [6] предложили новую конструкцию с новой активной структурой, которая может усилить инжекцию носителей заряда в верхний лазерный уровень. В этой структуре над верхним лазерным уровнем появляется еще один уровень, названный нами инжекционным. Носители заряда интенсивно переходят при рассеянии продольных оптических фононов из инжекционного уровня в верхний лазерный уровень благодаря субпикосекундному времени рассеяния на инжекционном уровне.

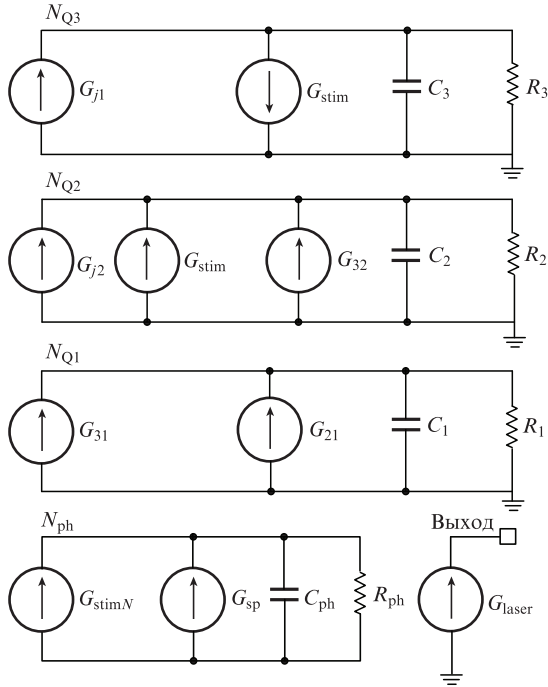


Рис.2. Эквивалентная схема обычных терагерцевых ККЛ.



Рис.3. Символическое изображение обычных терагерцевых ККЛ: NA – анод; NC – катод; NO – оптический выход.

Энергетическая диаграмма для одного каскада активной области терагерцевых ККЛ с ВЭХ дана на рис.4. Здесь уровень 4 – инжекционный уровень, уровень 3 – верхний лазерный уровень, уровень 2 – нижний лазерный уровень и уровень 1 – лазерный уровень экстракции носителей заряда. Лазерный переход все еще находится между уровнями 3 и 2. Мгновенное число электронов на инжекционном уровне – N_4 .

Теперь скоростные уравнения имеют следующий вид:

$$\eta \frac{I}{e} = \frac{dN_4}{dt} + \frac{N_4}{\tau_{43}} + \frac{N_4}{\tau_{42}}, \quad (11)$$

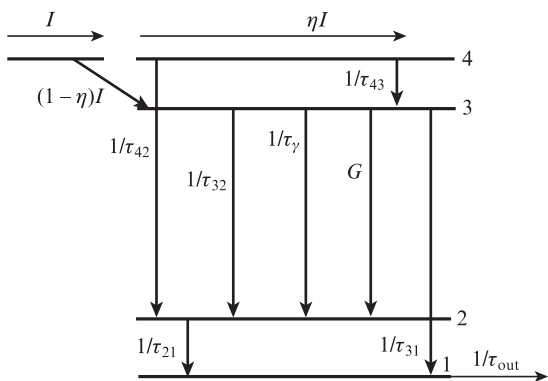


Рис.4. Энергетическая диаграмма для одного каскада активной области терагерцевых ККЛ с ВЭХ.

$$(1 - \eta) \frac{I}{e} + \frac{N_4}{\tau_{43}} = \frac{dN_3}{dt} + \frac{N_3}{\tau_3} + G(N_3 - N_2)N_{ph}, \quad (12)$$

$$\frac{N_3}{\tau_{32}} + \frac{N_3}{\tau_\gamma} + \frac{N_4}{\tau_{42}} + G(N_3 - N_2)N_{ph} = \frac{dN_2}{dt} + \frac{N_2}{\tau_{21}}, \quad (13)$$

$$\frac{N_3}{\tau_{31}} + \frac{N_2}{\tau_{21}} = \frac{dN_1}{dt} + \frac{N_1}{\tau_{out}}, \quad (14)$$

$$NG(N_3 - N_2)N_{ph} + N\beta \frac{N_3}{\tau_\gamma} = \frac{dN_{ph}}{dt} + \frac{N_{ph}}{\tau_{ph}}, \quad (15)$$

$$P = \frac{v_g h\nu}{2L} \ln\left(\frac{1}{r}\right) N_{ph}. \quad (16)$$

Модель уровней схемы. Как и в предыдущем случае, установим связь между величинами $N_4, N_3, N_2, N_1, N_{ph}$ и P (система (11)–(16)) и переменными эквивалентной схемы $V_4, V_3, V_2, V_1, V_{ph}$ и V_{laser} . Примем $V_4 = N_4, V_3 = N_3, V_2 = N_2, V_1 = N_1, V_{ph} = N_{ph}, V_{laser} = P$.

В подсхеме инжекционного (четвертого) уровня V_4 – узловой потенциал,

$$G_{j1} = C_4 \frac{dV_4}{dt} + \frac{V_4}{R_4}. \quad (17)$$

Связь между элементами подсхемы и переменными уравнения (11) такова: $G_{j1} = \eta I/e, C_4 = 1, R_4 = \tau_{43}\tau_{42}/(\tau_{43} + \tau_{42})$.

В подсхеме верхнего (третьего) лазерного уровня V_3 – узловой потенциал,

$$G_{j2} + G_{43} = C_3 \frac{dV_3}{dt} + \frac{V_3}{R_3} + G_{stim}, \quad (18)$$

$G_{j2} = (1 - \eta)I/e, G_{43} = N_4/\tau_{43}, C_3 = 1, R_3 = \tau_3, G_{stim} = G(N_3 - N_2)N_{ph}$.

В подсхеме нижнего (второго) лазерного уровня V_2 – узловой потенциал,

$$G_{32} + G_{42} + G_{stim} = C_2 \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{R_2}, \quad (19)$$

$G_{32} = (1/\tau_{32} + 1/\tau_\gamma)N_3, G_{42} = N_4/\tau_{42}, C_2 = 1, R_2 = \tau_{21}$.

В подсхеме лазерного (первого) уровня экстракции носителей заряда V_1 – узловой потенциал,

$$G_{31} + G_{21} = C_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{R_1}, \quad (20)$$

$G_{31} = (1/\tau_{31})N_3, G_{21} = (1/\tau_{21})N_2, C_1 = 1, R_1 = \tau_{out}$.

В оптической подсхеме V_{ph} – узловой потенциал, а V_{laser} – выходная оптическая мощность,

$$G_{stimN} + G_{sp} = C_{ph} \frac{dV_{ph}}{dt} + \frac{V_{ph}}{R_{ph}}, \quad (21)$$

$$V_{laser} = G_{laser}, \quad (22)$$

$G_{stimN} = NG_{stim}, G_{sp} = N\beta N_3/\tau_\gamma, C_{ph} = 1, R_{ph} = \tau_{ph}$,

$$G_{laser} = \frac{v_g h\nu}{2L} \ln\left(\frac{1}{r}\right) N_{ph}.$$

Полная модель уровней схемы показана на рис.5. Символические изображения обоих типов рассматриваемых ККЛ одинаковы (см. рис.3).

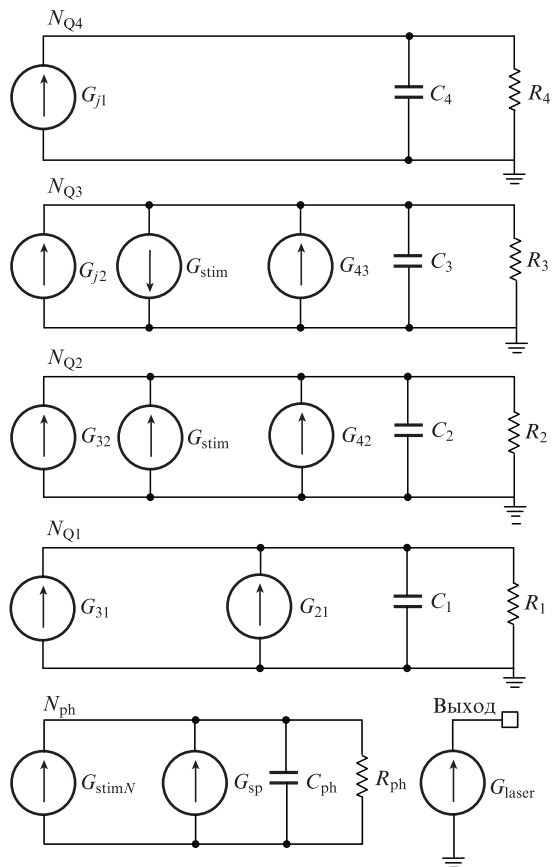


Рис.5. Эквивалентная схема терагерцевых ККЛ с ВЭХ.

4. Результат моделирования

Характеристики рассмотренных ККЛ мы моделируем с помощью имитатора PSpice. Параметры устройства, взятые из [6, 12–14], приведены ниже:

Длина резонатора (мкм)	3000
Ширина резонатора (мкм)80
Число каскадов ККЛ30
Частота генерации (ТГц)	2.9
τ_{43} (пс)	0.5
τ_{42} (пс)	100
Групповой показатель преломления	3.27
Дифференциальное усиление (см)	$.5 \times 10^{-8}$
Оптическое ограничение	0.27
τ_{32} (пс)	2
τ_{31} (пс)	2.4
τ_{21} (пс)	0.3
Скорость индуцированных переходов (c^{-1})	5.3×10^4
Эффективность инжекции.	0.6
Коэффициент спонтанного излучения.	$.2 \times 10^{-3}$
τ_{out} (пс).	0.5
τ_γ (нс)	0.5

Моделирование при постоянном токе. Схема моделирования при постоянном токе, используемая в PSpice, приведена на рис.6,а. На рис.7 показаны ватт-амперные характеристики терагерцевых ККЛ с ВЭХ и обычных терагерцевых ККЛ. Пороговый ток первых составляет 0.75 А, а обычных терагерцевых ККЛ – 1.65 А. За порогом дифференциальная эффективность терагерцевых ККЛ с ВЭХ

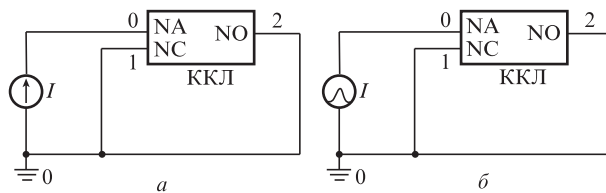


Рис.6. Схемы моделирования при постоянном токе (0–3 А) (а) и моделирования переходных процессов (б); I – импульс входного тока.

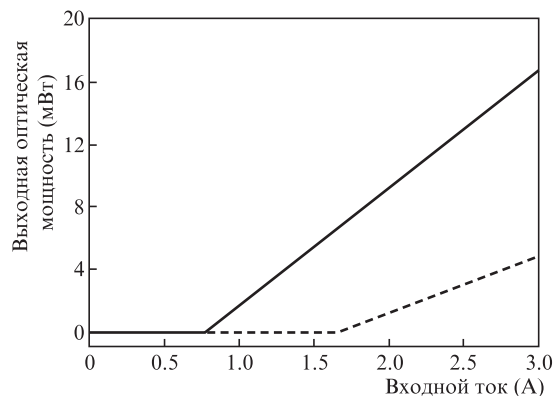


Рис.7. Ватт-амперные характеристики ККЛ с ВЭХ (сплошная линия) и обычных ККЛ (штриховая линия).

равна 7.2 мВт/А, что в два раза выше, чем у обычных терагерцевых ККЛ. Таким образом, характеристики терагерцевых ККЛ с ВЭХ намного лучше.

Влияние эффективности инжекции η на выходную оптическую мощность ККЛ показано на рис.8, где изображены ватт-амперные характеристики обычных терагерцевых ККЛ (при $\eta = 0.9, 0.7$ и 0.5) и терагерцевых ККЛ с ВЭХ. Видно, что для обычных ККЛ чем меньше η , тем больше пороговый ток и меньше дифференциальная эффективность. В то же время моделирование терагерцевых ККЛ с ВЭХ показывает, что при различных η пороговый ток и дифференциальная эффективность те же, что и при $\eta = 0.6$.

Полученные результаты моделирования при постоянном токе схожи с результатами работы [6] и демонстрируют преимущество терагерцевых ККЛ с ВЭХ с новой активной областью перед обычными ККЛ. Результаты также подтверждают, что наша модель является точной. Поскольку считается, что уменьшение η соответствует повышению температуры терагерцевых ККЛ [6], то терагер-

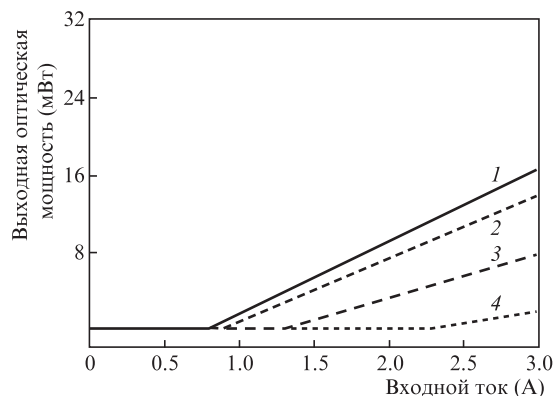


Рис.8. Ватт-амперные характеристики ККЛ с ВЭХ (1) и обычных ККЛ при $\eta = 0.9$ (2), 0.7 (3) и 0.5 (4).

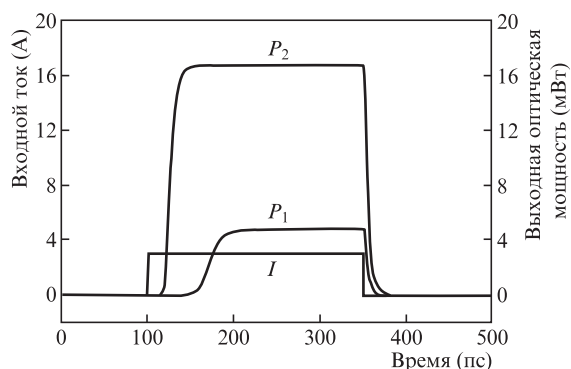


Рис.9. Переходные процессы обычных ККЛ (P_1) и ККЛ с ВЭХ (P_2); I – импульс входного тока амплитудой 3 А и длительностью 250 пс.

цевые ККЛ с ВЭХ имеют большую допустимую вариацию рабочих температур.

Моделирование переходных процессов. Схема моделирования переходных процессов, используемая в PSpice, показана на рис.6,б, а результаты моделирования – на рис.9. Видно, что терагерцевые ККЛ с ВЭХ имеют меньшее время включения и выключения, а также большую максимальную выходную оптическую мощность. Это означает, что такие ККЛ могут иметь высокое быстродействие и излучать большую оптическую мощность (табл.1).

Табл.1. Сравнение переходных характеристик обычных терагерцевых ККЛ и ККЛ с ВЭХ.

Лазеры	t_{in} (пс)	t_{out} (пс)	P_{max} (мВт)
Обычные ККЛ	85	39	4.8
ККЛ с ВЭХ	24	15	16.7

Примечание: t_{in} – время включения; t_{out} – время выключения; P_{max} – максимальная выходная мощность.

5. Заключение

Создана модель уровней эквивалентной схемы для терагерцевых ККЛ, которая может быть использована для быстрого и точного анализа характеристик лазеров. С помощью этой модели исследованы терагерцевые ККЛ с

новой активной структурой. Результаты показывают, что такие ККЛ имеют высокие эксплуатационные характеристики – более низкий пороговый ток и большую дифференциальную эффективность, что позволит оптимизировать их рабочую температуру. Быстродействие новых терагерцевых ККЛ может быть выше, а их выходная оптическая мощность значительно больше, чем у традиционных ККЛ. Полученные результаты вносят вклад в развитие терагерцевых ККЛ.

Работа выполнена при поддержке Стратегической программы исследований по приоритетным направлениям Китайской Академии наук (грант № XDA01020304), Государственного фонда естественных наук Китая (гранты № 91026005, 11275156, 51071038, 11305029), Научного молодежного фонда провинции Сычуань (грант № 2010JQ0002) и Государственной ведущей лаборатории по изучению механических характеристик материалов Сианьского университета Цзяотун (грант № 20131309).

1. Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., Cho A.Y. *Science*, **264**, 553 (1994).
2. Siegel P.H. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **50**, 910 (2002).
3. Saedkia D., Safavi-Naeini S. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 2409 (2008).
4. Fatholouloumi S., Dupont E., Chan C.W.I., Wasilewski Z.R., Laframboise S.R., Ban D., Matyas A., Jirauschek C., Hu Q., Liu H.C. *Opt. Express*, **20**, 3866 (2012).
5. Williams B.S., Kumar S., Callebaut H., Hu Q., Reno J.L. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2124 (2003).
6. Sekine N., Hosako I. *Phys. Status Solidi C*, **6**, 1428 (2009).
7. Lee S.C., Wacker A. *Phys. Rev. B*, **66**, 245314 (2002).
8. Koehler R., Iotti R.C., Tredicucci A., Rossi F. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3920 (2001).
9. Indjin D., Harrison P., Kelsall R.W., Ikonic Z. *J. Appl. Phys.*, **91**, 9019 (2002).
10. Bartalini S., Borri S., Cancio P., Castrillo A., Galli I., Giusfredi G., Mazzotti D., Gianfrani L., Natale P.D. *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 083904 (2010).
11. Gmachl C., Capasso F., Sivco D.L., Cho A.Y. *Rep. Prog. Phys.*, **64**, 1533 (2001).
12. Haldar M.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **41**, 1349 (2005).
13. Faist J., Ajili L., Scalari G., Giovannini M., Beck M., Rochat M., Beere H.E., Davies A.G., Linfield E.H., Ritchie D.A. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **362**, 215 (2004).
14. Petitjean Y., Destic F., Mollier J.-C., Sirtori C. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **17**, 22 (2011).