

УДК 621.378.35

ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ С ШИРОКИМ ПЛОСКИМ СПЕКТРОМ ВОЛНОВОДНОГО УСИЛЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 1–3 мкм

© 2008 г. И. С. Манак, Д. В. Ушаков, В. С. Белявский

Белорусский государственный университет, Минск.

E-mail: manak@bsu.by

Проанализированы спектры усиления многослойных квантово-размерных гетероструктур на основе соединений GaInAs/GaInPAs и GaInAsSb/AlGaAsSb. Показана возможность реализации в них широкого и практически плоского спектра волноводного усиления в ближнем инфракрасном диапазоне при неоднородном возбуждении квантовых ям.

Для создания высокоэффективных систем волочно-оптической связи и передачи информации, мониторинга окружающей среды и прецизионной светодальнометрии требуются лазерные диоды, перекрывающие диапазон длин волн 1–3 мкм. Наибольшие перспективы при решении поставленных выше задач имеют инжекционные лазеры на многослойных асимметричных квантово-размерных гетероструктурах на основе четверных соединений GaInPAs и GaInAsSb, в которых можно получить широкий спектр волноводного усиления и реализовать оптические модули с разнесенными частотами генерации и одинаковой мощностью генерируемого излучения.

Известно, что спектр пропускания атмосферы имеет окна прозрачности в диапазонах 1.2–1.3, 1.55–1.7 и 2–2.3 мкм, а также достаточно эффективные полосы прозрачности на длинах волн 2.3–2.5 и 2.85–3 мкм [1]. С другой стороны, коэффициент затухания лазерного излучения в кварцевом волокне на длине волны $\lambda = 1.27$ мкм порядка $0.2 \text{ дБ} \cdot \text{нм}^{-1}$, а германатное стекло GeO_2 , легированное окислом сурьмы Sb_2O_3 и не содержащее примесей гидроксидов OH, ионов переходных металлов и других сторонних примесей, обеспечивает в интервале длин волн 1.8–2.5 мкм светоослабление линии $0.1 \text{ дБ} \cdot \text{нм}^{-1}$ [2]. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании двухчастотных оптических модулей в диапазоне 1–3 мкм на основе соединений GaInPAs и GaInAsSb.

В квантово-размерных гетероструктурах длина волны, соответствующая излучательным межзонным переходам, зависит от толщины и компонентного состава активных и барьерных слоев, поэтому в таких структурах отдельные квантовые ямы усиливают излучение в разных диапазонах длин волн. Для создания условий неоднородного возбуждения квантовых ям проводится селективное легирование барьерных слоев донорными или акцепторными примесями [3, 4]. Тогда суммарный

спектр усиления многослойной гетероструктуры с неоднородно возбужденными активными слоями может охватывать достаточно широкий диапазон длин волн.

На примере соединений AlGaAs/GaAs ранее было показано, что существует несколько способов получения асимметричных многослойных квантово-размерных гетероструктур [3, 4]. Активные слои структуры могут различаться толщиной, компонентным составом, порядком размещения относительно друг друга и эмиттеров.

В данной работе проанализированы спектры усиления структур на основе четверных соединений GaInPAs и GaInAsSb и показана возможность реализации в них широкого плоского спектра волноводного усиления. В случае первого из соединений расчеты проведены для асимметричной квантово-размерной гетероструктуры с тремя и четырьмя квантовыми ямами различной толщины, генерирующей в полосе 1.3–1.6 мкм. Роль барьерных слоев выполняло соединение $\text{Ga}_{0.17}\text{In}_{0.83}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$, а квантовые ямы состояли из материала $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.55}\text{As}$. Параметры активных и барьерных слоев подбирались, в соответствии с [5], так, чтобы согласовались постоянные решетки, был прямозонный полупроводник и ширина запрещенной зоны соответствовала межзонным переходам в диапазоне 1.3–1.6 мкм.

Для данных квантово-размерных гетероструктур при расчете зонной энергетической диаграммы необходимо учитывать эффект смещения дырочных состояний, поэтому уровни энергии и волновые функции валентной зоны рассчитывались в приближении четырехзонного $k\text{p}$ -метода [6].

В работе рассмотрены характеристики гетероструктур с квантовыми ямами разной ширины. Активная область гетероструктуры состояла из трех и четырех квантовых ям с ширинами $d_1 = 4$, $d_2 = 9$, $d_3 = 14$ и $d_4 = 5$ нм. Квантовые ямы подобраны таким образом, чтобы длины волн оптических

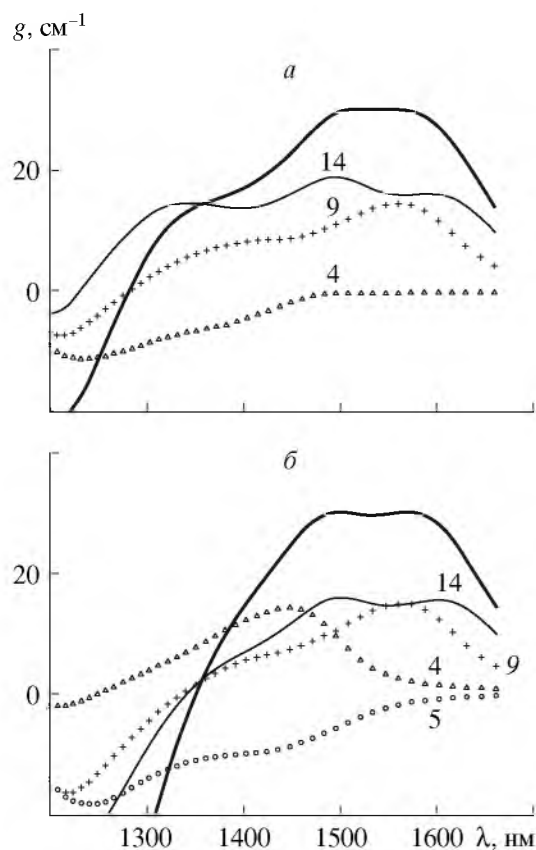


Рис. 1. Спектры волноводного усиления ТЕ-моды для квантово-размерной структуры $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.55}\text{As}/\text{Ga}_{0.17}\text{In}_{0.83}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$ с тремя (а) и четырьмя (б) квантовыми ямами при различных уровнях возбуждения и толщинах квантовых ям d_w (числа на кривых в нм), а также суммарный спектр усиления (жирная линия); а – $d = 4$ нм, $\Delta F = 0.85$ эВ, $\Gamma = 2.6 \cdot 10^{-3}$; $d = 9$ нм, $\Delta F = 0.97$ эВ, $\Gamma = 5.9 \cdot 10^{-3}$; $d = 14$ нм, $\Delta F = 1.0$ эВ, $\Gamma = 9.1 \cdot 10^{-3}$; б – $d = 4$ нм, $\Delta F = 0.98$ эВ, $\Gamma = 3.2 \cdot 10^{-3}$; $d = 5$ нм, $\Delta F = 0.80$ эВ, $\Gamma = 4.0 \cdot 10^{-3}$; $d = 9$ нм, $\Delta F = 0.93$ эВ, $\Gamma = 7.2 \cdot 10^{-3}$; $d = 14$ нм, $\Delta F = 0.93$ эВ, $\Gamma = 11 \cdot 10^{-3}$.

переходов электронов на уровни тяжелых и легких дырок в разных квантовых ямах были немного разнесены и перекрывали желаемый диапазон длин волн.

Проведена оптимизация разности квазиуровней Ферми ΔF квантовых ям различной толщины с целью получения широкого и практически плоского суммарного спектра волноводного усиления. Результаты расчетов спектров волноводного усиления ТЕ-моды с учетом фактора оптического ограничения Γ для активной области с различным числом квантовых ям представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1б, широкая квантовая яма усиливает в длинноволновой области, а узкая толщиной 4 нм – в области 1.35–1.5 мкм. Для получения широкого и плоского спектра усиления необходимо, чтобы одна узкая квантовая яма усиливала, а вторая – поглощала. Для ТЕ-моды усиливающей является яма

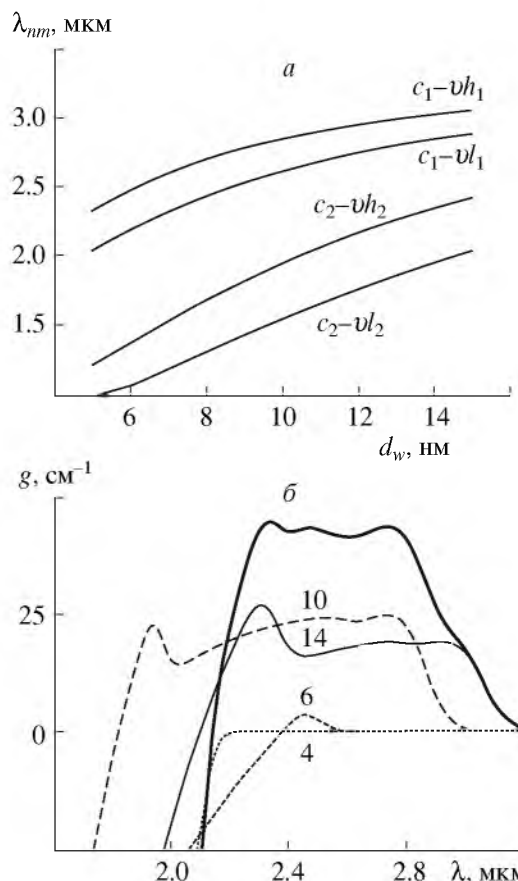


Рис. 2. а – длины волн оптических переходов квантово-размерной структуры $\text{Ga}_{0.60}\text{In}_{0.40}\text{As}_{0.36}\text{Sb}_{0.64}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ между уровнями электронов и легких дырок λ_{nm} в зависимости от толщины квантовой ямы d_w ; б – спектры волноводного усиления ТЕ-моды для квантово-размерной структуры с четырьмя квантовыми ямами при различных уровнях возбуждения и толщинах квантовых ям d_w (числа на кривых в нм), а также суммарный спектр усиления (жирная линия). $d = 4$ нм, $\Delta F = 0.50$ эВ; $d = 6$ нм, $\Delta F = 0.52$ эВ; $d = 10$ нм, $\Delta F = 0.68$ эВ; $d = 14$ нм, $\Delta F = 0.59$ эВ.

толщиной 4 нм, а поглощающей – 5 нм. Квантовая яма толщиной 9 нм служит для увеличения суммарного коэффициента усиления гетероструктуры в области 1.5–1.6 мкм. Расчеты показывают, что для активной области с четырьмя квантовыми ямами ширина спектра усиления с практически постоянным максимальным значением ~ 30 см $^{-1}$ составляет ~ 120 нм в области 1.48–1.6 мкм. Как видно из рис. 1а, уменьшение количества квантовых ям до трех приводит к сокращению диапазона постоянного коэффициента усиления. Увеличение числа квантовых ям до пяти приводит к возрастанию максимума коэффициента усиления, однако область плоского участка сужается.

Аналогично можно подобрать толщины квантовых ям и уровней возбуждения для гетероструктур на основе узкозонных полупроводников GaInAsSb. Расчеты уровней энергии проведены для системы

$\text{Ga}_{0.60}\text{In}_{0.40}\text{As}_{0.36}\text{Sb}_{0.64}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ с соответствующими эффективными массами в квантовых ямах $m_c = 0.033m_e$, $m_{vl} = 0.030m_e$, $m_{vh} = 0.289m_e$ и барьерных слоях $m_c = 0.075m_e$, $m_{vl} = 0.059m_e$, $m_{vh} = 0.295m_e$.

Как видно из рис. 2а при ширине квантовых ям от 5 до 15 нм длины волн основных оптических переходов лежат в интервале 2–3 мкм. Оптимизированные спектры волноводного усиления для структуры с четырьмя квантовыми ямами представлены на рис. 2б. Согласно расчетам, область практически плоского участка усиления на уровне 43 см^{-1} составляет $\sim 490 \text{ нм}$.

Таким образом, при использовании асимметричных многослойных квантово-размерных гетероструктур на основе четверных соединений GaInPAs и GaInAsSb с неоднородно возбужденными активными слоями, отличающимися толщиной, можно получить широкий и практически плоский спектр волноводного усиления в ближнем ИК-диапазоне. Для разных уровней возбуждения проанализированы спектры усиления таких структур. При неоднородном возбуждении квантовых ям, различающихся толщиной, получен широкий и практически плоский спектр волноводного усиления. Показано, что структура с четырьмя квантовыми ямами оптимальна для получения широкого и плоского спектра волноводного усиления.

Инжекционные лазеры на основе соединений AlGaAs, GaInPAs и GaInAsSb с широким плоским спектром волноводного усиления позволяют реализовать двухчастотные модули в случае стыковки их с волокном, в котором нарезаны две брэгговские решетки, либо непрерывно перестраиваемые в широкой полосе частот излучатели при использовании внешних дисперсионных элементов.

Работа выполнена при поддержке ГКПНИ “Фотоника” и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по лазерам / Под ред. Прохорова А.М. В двух томах. Т. 1. М.: Сов. радио, 1978. 504 с.
2. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Под ред. Свечникова С.В., Андрущенко Л.М. Киев: Техника, 1988. 240 с.
3. Kononenko V.K., Manak I.S., Nalivko S.V. // Spectrochim. Acta. Pt A. 1999. V. 55. P. 2091.
4. Manak I.S., Kononenko V.K., Nalivko S.V. // Phys. Chem. Solid State. 2005. V. 6. С. 666.
5. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981. 364 с.
6. Наливко С.В., Манак И.С., Чиж А.Л. // Литовский физ. журн. 1999. Т. 39. № 1. С. 365.