

КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЕ НИЗКОПОРОГОВЫЕ AlGaAs-ГЕТЕРОЛАЗЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Аксенов В. Ю., Ларионов В. Р.,
Румянцев В. Д., Хвостиков В. П.

Исследовано проявление эффектов размерного квантования в спектрах спонтанного и когерентного излучения, а также приведена зависимость пороговой плотности тока ($j_{\text{п}}$) от длины резонатора Фабри—Перо (L) в AlGaAs-гетеролазерах, выращенных методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии. При толщине активной области $d=120\div 160 \text{ \AA}$ минимальное значение $j_{\text{п}}$ составило 175 A/cm^2 при $L=1400 \text{ мкм}$ ($T=300 \text{ K}$). В диапазоне малых длин резонатора ($L\approx 60\div 200 \text{ мкм}$) получены значения $j_{\text{п}}$, рекордно низкие по сравнению с опубликованными результатами других работ.

В работах [1-5] продемонстрирована возможность выращивания методом низкотемпературной ($T < 600 \text{ }^\circ\text{C}$) жидкофазной эпитаксии AlGaAs-гетероструктур с толщинами слоев до $\sim 20 \text{ \AA}$, а также гетеролазеров с отдельным ограничением, имеющих пороговые плотности тока вплоть до $j_{\text{п}}=200 \text{ A/cm}^2$ при толщине активной области $d \sim 150 \text{ \AA}$ и длине резонатора $L=500 \text{ мкм}$.

В настоящей работе приводятся результаты исследований спектрального распределения электролюминесценции (ЭЛ) AlGaAs-гетеролазеров с квантово-размерными активными областями в спонтанном режиме при температурах 77 и 300 K и высоких плотностях накачки, а также их пороговых характеристик при варьировании потерь в резонаторе Фабри—Перо.

На рис. 1, а приведено изображение скола AlGaAs-гетеролазера, полученное методом регистрации вторичных электронов, а на рис. 1, б — профиль распределения AlAs по толщине исследованных лазерных структур. На GaAs-подложке n -типа проводимости ($N_D \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) вначале выращивались слои n -GaAs ($\sim 0.5 \text{ мкм}$) и n -Al_{0.68}Ga_{0.34}As ($\sim 1.3 \text{ мкм}$), легированные теллуром. Следующие далее волноводные слои Al_{0.3}Ga_{0.7}As и активная область (до 5 % AlAs в твердой фазе) преднамеренно не легировались. Слой верхнего широкозонного эмиттера p -Al_{0.7}Ga_{0.3}As легировался магнием, а контактный слой p^+ -GaAs — германием. Кристаллизация активной области производилась при температуре $545 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 с. При этом толщина области составляла $d=120\div 160 \text{ \AA}$. Толщина эмиттерного слоя p -Al_{0.7}Ga_{0.3}As варьировалась в диапазоне $0.4\div 0.6 \text{ мкм}$. Суммарная толщина волноводных слоев и активной области поддерживалась в пределах $0.25\div 0.3 \text{ мкм}$. Использовались контактные покрытия Au—Ge/Ag к подложке и Au—Zn/Ag к слою p^+ -GaAs.

Исследовались образцы двух типов — с узким ($\sim 8 \text{ мкм}$) и широким ($\sim 80 \text{ мкм}$) полосковыми контактами к p -области (контакт к n -подложке был сплошным). Образцы с узким полосковым контактом использовались для записи спектров ЭЛ в спонтанном и когерентном режимах. Для обеспечения спонтанного режима излучения при возможно более высоких плотностях тока выбирались образцы с малой толщиной широкозонного эмиттера и коротким резонатором Фабри—Перо, т. е. имеющие большие потери в волноводе за счет поглощения

волноводной моды в контактном слое p^+ -GaAs и большие потери на выход излучения. Один из сколов образца, не использующийся для вывода излучения, подвергнулся матированию. В образцах с гладкими сколами, работающих в когерентном режиме, локализация протекания тока под узким полосковым контактом исключала возможность возникновения нескольких шнуров генерации по мере увеличения плотности тока. Что касается образцов с широким полосковым контактом, то они использовались для построения зависимости пороговой плотности тока от обратной длины резонатора. Все измерения проводились в импульсном режиме ($\tau_n=1$ мкс, $f=1$ кГц).

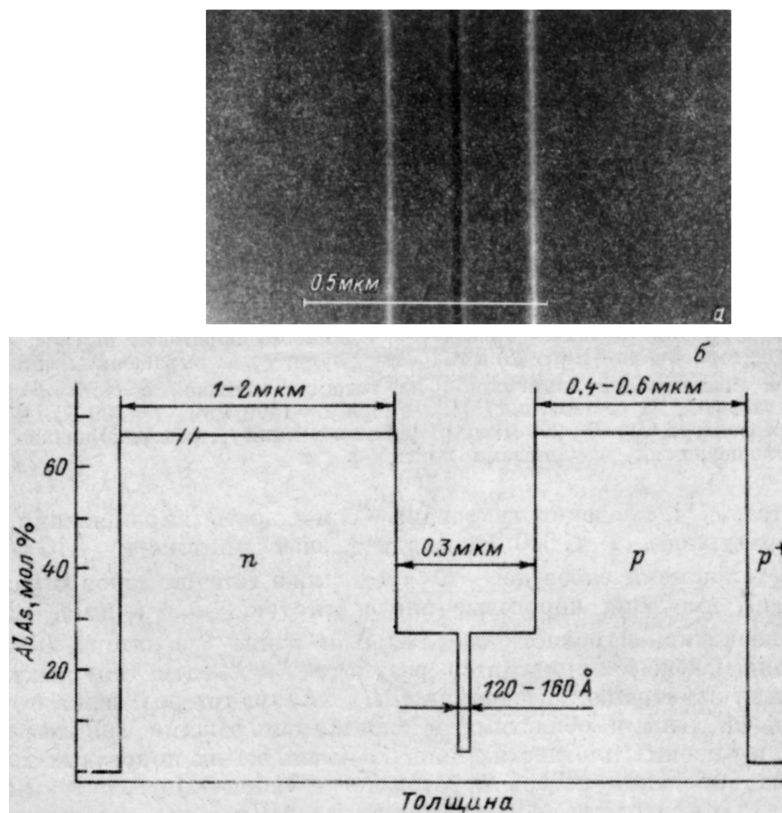


Рис. 1. Изображение скола AlGaAs-гетеролазера, полученное методом регистрации вторичных электронов (а) и профиль распределения AlAs по толщине исследованных лазерных структур (б).

На рис. 2 представлены спектры спонтанной ЭЛ одного из образцов при 77 и 300 К и спектры генерации лазерного диода, выколотого из той же пластины ($T=300$ К). При 77 К и низкой плотности тока спектр ЭЛ состоит из одной полосы, сформированной излучательными переходами с первого электронного уровня зоны проводимости на уровни тяжелых и легких дырок валентной зоны (рис. 2, а, кривая 1). По мере увеличения плотности тока и заполнения высокоэнергетических состояний в спектре ЭЛ проявляются также полосы, соответствующие излучательным переходам со второго электронного уровня на второй уровень тяжелых (кривая 2) и на второй уровень легких дырок, а также соответствующие переходам с участием третьего электронного уровня (кривая 3). Энергетические зазоры между полосами ЭЛ удовлетворительно согласуются с расчетными [4] при предполагаемом значении толщины активной области в данном образце $d=130$ Å.

Уровни размерного квантования проявляются в спектрах ЭЛ также и при комнатной температуре. На рис. 2, б показано спектральное распределение

интенсивности ЭЛ в поляризациях TE (кривая 1) и TM (кривая 2) при одной и той же плотности тока, соответствующей появлению высокоэнергетической полосы излучения с участием второго электронного уровня и второго уровня тяжелых дырок. На этом же рисунке (кривая 3) показано спектральное распределение степени поляризации излучения $(TE - TM)/(TE + TM)$, рассчитанное

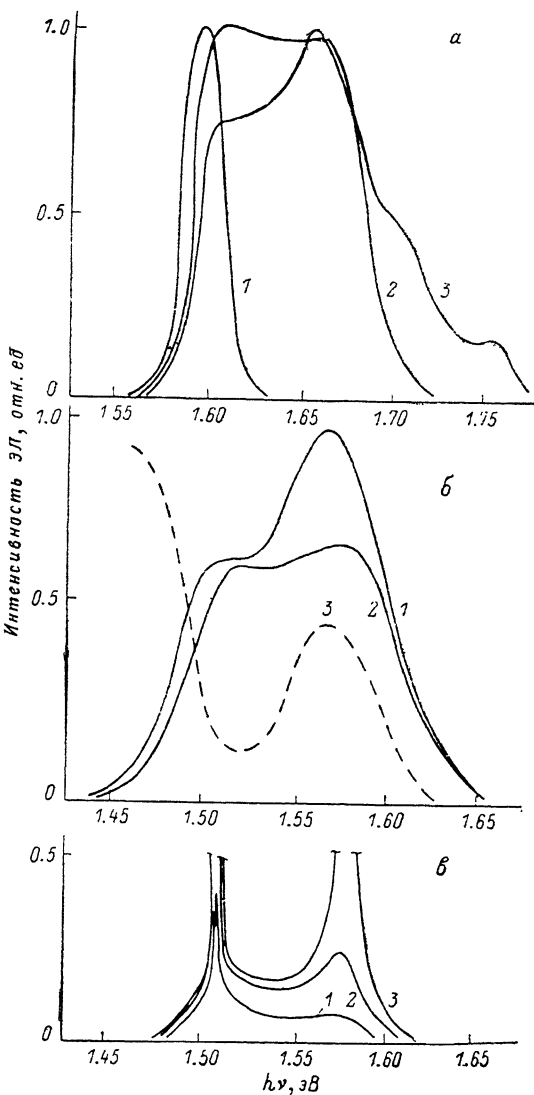


Рис. 2. Спектры спонтанной ЭЛ одного из образцов AlGaAs-гетеролазера (а, б) и спектр, генерации лазерного диода (в).

а) j , кА/см²: 1 — 0.032, 2 — 5.9, 3 — 16.1 ($T=77$ К); б) $j=4.3$ кА/см², $T=300$ К; поляризации: — TE , 2 — TM ; 3 — спектральное изменение степени поляризации; в) j , кА/см²: 1 — 4.0, 2 — 4.7, 3 — 5.0 ($T=300$ К).

из спектров 1 и 2. В соответствии с представлениями о поляризации люминесцентного излучения квантовой ямы [6] длинноволновый спад низкоэнергетической полосы ЭЛ, в формировании которого участвуют переходы на первый уровень тяжелых дырок, а также высокоэнергетическая полоса ЭЛ, сформированная переходами с участием второго уровня тяжелых дырок, имеют преимущественную TE -поляризацию.

В образцах лазерных диодов, выколотых из той же пластины и имеющих высокую плотность порогового тока, полоса генерации локализовалась вблизи максимума либо низкоэнергетической, либо высокоэнергетической полосы

спонтанной ЭЛ в зависимости от величины потерь излучения на выход. На рис. 2, в представлен спектр одного из образцов, в котором генерация могла наблюдаться одновременно на двух переходах с участием как первого, так и второго электронных уровней.

Обратимся теперь к рассмотрению результатов исследований характеристик низкороговых лазеров с широким полосковым контактом. На рис. 3 зачерченными точками показаны значения пороговой плотности тока для таких образцов, выколотых из нескольких эпитаксиальных пластин и имеющих разную длину резонатора. Минимальное измеренное значение составило $j_n = 175 \text{ А/см}^2$ при $L=1400 \text{ мкм}$ ($T=300 \text{ К}$). Кривая 1 на рис. 3 соединяет лучшие точки j_n , измеренные при уменьшении длины резонатора Фабри—Перо.

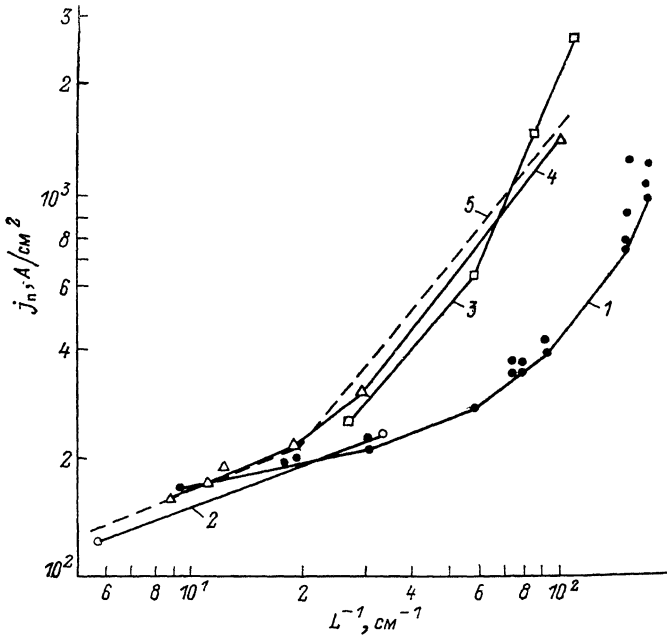


Рис. 3. Зависимости пороговой плотности тока j_n гетеролазеров от обратной длины резонатора Фабри—Перо L^{-1} .

Результаты работ: 1 — настоящей, 2, 3 — [7, 8] для AlGaAs-гетеролазеров, 4 — [9] для InGaAsP-гетеролазеров, 5 — расчет для AlGaAs-гетеролазеров [10]. $T=300 \text{ К}$.

На этом же рисунке проведено сравнение полученных в данной работе значений j_n с лучшими опубликованными результатами для гетеролазеров в системе Al—Ga—As (кривая 2 — для лазеров, полученных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений [7]; кривая 3 — для лазеров, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [8]), а также в системе In—Ga—As—P при длине волны излучения $\lambda \approx 0.85 \text{ мкм}$ (кривая 4 — модифицированный метод жидкофазной эпитаксии [9]). Кривая 5 — расчетные [10] значения j_n для AlGaAs-гетеролазеров при толщине активной области $d=100 \text{ \AA}$ и содержании AlAs в широкозонных эмиттерах и волноводных слоях соответственно ~ 40 и 25% . Как и в работах [7–10], в исследованных образцах наблюдается вначале слабое, а затем резкое увеличение пороговой плотности тока по мере увеличения потерь на выход излучения, что связывается с процессом насыщения усиления в квантово-размерной активной области.

Обращает на себя внимание тот факт, что если при значениях внешних потерь $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ ($L=500 \text{ мкм}$) полученные нами образцы имеют примерно те же значения $j_n \approx 200 \div 250 \text{ А/см}^2$, что и в работах [7–10], то в диапазоне потерь $50 \div 160 \text{ см}^{-1}$ ($L=60 \div 200 \text{ мкм}$) они имеют j_n в 2–3 раза ниже, чем в упомянутых работах. Уменьшенные значения j_n в диапазоне малых длин резонатора могут быть объяснены тем обстоятельством, что в исследованных образцах величина d превышала значения $d=60 \div 100 \text{ \AA}$, использованные в работах [7–10], так что

переход к режиму насыщения усиления в нашем случае должен происходить при больших внешних потерях. В то же время ограничение излучения в волноводе, образованном слоями AlGaAs с большим различием по составу, более сильное, чем принято в расчетах [10], обеспечивает сохранение низких значений j_n в диапазоне средних длин резонатора ($L \sim 500$ мкм). В диапазоне $L > 500$ мкм полученные нами значения j_n , по-видимому, являются завышенными, определяемыми величиной внутрирезонаторных потерь ($5 \div 10$ см⁻¹), что связано с частичным проникновением волноводной моды в поглощающий слой p^+ -GaAs через слой широкозонного p -эмиттера толщиной 0.5–0.6 мкм. Однако при постановке задачи, например, создания лазеров с минимальным рабочим током малая толщина p -эмиттера дает определенные преимущества, обеспечивая минимальный эффект растекания тока в лазерах с узким полосковым контактом, а также пониженные тепловое и электрическое сопротивления. Определяющим является тот факт, что в лазерах на основе исследованных структур может быть достигнуто радикальное снижение абсолютного порогового тока за счет уменьшения длины резонатора.

Таким образом, методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии получены низкороговые AlGaAs-гетеролазеры со сверхтонкими активными областями, в которых проявляется квантовый характер энергетического спектра носителей тока. Рекордно низкие значения пороговой плотности тока в области малых длин резонатора Фабри—Перо позволяют надеяться на создание на основе подобных структур микролазеров с минимальными абсолютными значениями рабочего тока.

Авторы выражают благодарность С. Г. Конникову и А. О. Косонову за проведение электронно-микроскопических исследований образцов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Воднев А. А., Ивентьева О. О., Ларионов В. Р., Румянцев В. Д. — ФТП, 1986, т. 20, в. 2, с. 381–383.
- [2] Андреев В. М., Ивентьева О. О., Конников С. Г., Погребницкий К. Ю., Пурон Э., Сулима О. В., Фалеев Н. Н. — Письма ЖТФ, 1986, т. 12, в. 9, с. 533–537.
- [3] Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Воднев А. А., Конников С. Г., Ларионов В. Р., Погребницкий К. Ю., Румянцев В. Д., Хвостиков В. П. — Письма ЖТФ, 1986, т. 12, в. 18, с. 1089–1093.
- [4] Андреев В. М., Воднев А. А., Минтаиров А. М., Румянцев В. Д., Хвостиков В. П. — ФТП, 1987, т. 21, в. 7, с. 1212–1216.
- [5] Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Конников С. Г., Ларионов В. Р., Погребницкий К. Ю., Фалеев Н. Н., Хвостиков В. П. — Письма ЖТФ, 1988, т. 14, в. 2, с. 171–176.
- [6] Магарилл Л. И., Романов А. А., Шик А. Я. — ФТП, 1987, т. 21, в. 3, с. 404–410.
- [7] Baldy M., Hersee S. D., Assenat P. — Rev. Techn. Thomson-CSF, 1983, v. 15, N 1, p. 5–37.
- [8] Mittelstein M., Arakawa Y., Larson A., Yariv A. — Appl. Phys. Lett., 1986, v. 49, N 25, p. 1689–1691.
- [9] Алфёров Ж. И., Антонишкис Н. Ю., Арсентьев И. Н., Гарбузов Д. З., Тикуннов А. В., Халфин В. Б. — ФТП, 1987, т. 21, в. 8, с. 1517–1519.
- [10] Гарбузов Д. З., Тикуннов А. В., Халфин В. Б. — ФТП, 1987, т. 21, в. 6, с. 1085–1094.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 10.03.1988
Принята к печати 29.03.1988