

Особенности генерации волноводных мод в многоямных гетеролазерах

С.М. Некоркин^{1,*}, Н.В. Байдусь^{1,§}, А.В. Самарцев¹, К.С. Жидяев¹, А.Б. Чигинева¹,
А.Н. Орлова¹, Д.А. Павлов¹, А.А. Афоненко², Д.В. Ушаков²

1 Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23/3. Нижний Новгород, 603950, Россия.

2 Белорусский государственный университет, просп. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь.

*nekorkin@nifti.unn.ru §bnv@nifti.unn.ru

В работе приводятся результаты сравнительного анализа двух конструкций гетеролазеров, содержащих в волноводном слое десять InGaAs/GaAs квантовых ям сдвинутых к р-эмиттеру. В зависимости от конструктивных особенностей лазеров генерация излучения может осуществляться как на поперечных модах 2-4 порядка, так и на модах с признаками их локализации в окрестности квантовых ям, что в свою очередь приводит к существенному изменению электрофизических характеристик гетеролазеров.

В последнее время возрастает интерес к гетеролазерам с увеличенной активной областью на основе квантовых ям (КЯ) [1, 2]. Настоящая работа посвящена исследованию спектральных, пространственных и энергетических характеристик двух конструкций гетеролазеров, содержащих в волноводном слое десять InGaAs/GaAs квантовых ям, сдвинутых к р-эмиттеру.

Исследуемые образцы и методы исследования

Методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на подложке p^+ -GaAs были выращены две лазерные гетероструктуры с активными областями, состоящими из десяти InGaAs/GaAs квантовых ям с компенсирующими слоями GaAsP (структура 1 и структура 2). Квантовые ямы были сдвинуты к р-эмиттеру. Общая толщина GaAs-волновода с КЯ и толщины p^+ -AlGaAs (p^+ -AlGaAs) ограничительных слоев составляли 4,3 и по 0,55 мкм соответственно. Волноводные слои не легировались и имели величину фоновой концентрации носителей n -типа порядка $1,0 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для снижения заселенности волноводных слоев и уменьшения поглощения носителями в волноводе структуры 2 перед квантовыми ямами на расстоянии 100 нм со стороны n -эмиттера был встроен тонкий слой (15 нм) n -InGaP с концентрацией носителей $1,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, решёточно-согласованный с GaAs. Содержание фосфора в компенсирующем слое GaAsP в структуре 2 составляло 5–6%, что в 2 раза меньше, чем в подобном слое структуры 1, а доля индия в КЯ структуры 2 на 2–3 % больше, чем в КЯ структуры 1. На выращенных структурах формировалась меза-полосковая геометрия актив-

ной области путем химического травления эпитаксиальных слоёв до волновода с последующей ионной имплантацией вытравленной области. Ширина активных полосок составляла 170 мкм, расстояние между полосками – 30 мкм. На основе полученных гетероструктур были изготовлены лазерные диоды с длиной резонатора 2 мм и двумя мезаполосковыми контактами с общей шириной активной области на излучающей грани 340 мкм (170 + 170 мкм). На излучающие грани диэлектрические зеркала не наносились.

Лазерные структуры исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Проведены исследования спектральных зависимостей, диаграмм направленности и ватт-амперных характеристик (ВтАХ) изготовленных лазеров. Для наблюдения и фотографирования излучающей грани лазерных диодов использовалась ССД камера, встроенная в оптический микроскоп МИИ-4. Для устранения засветки камеры использовались спектральные фильтры. Токовая накачка лазеров осуществлялась в импульсно-периодическом режиме (200 нс; 1,43 кГц).

Результаты и обсуждение

Метод ПЭМ подтвердил заданную геометрию эпитаксиальных слоев на обеих структурах. Дефекты и дислокации при этом не наблюдались.

Из-за различия содержания индия в КЯ в выращенных структурах максимумы генерации лазерных диодов имели разные значения: для структуры 1 типичный максимум генерации соответствовал 1,01 мкм, а для структуры 2 – 1,05 мкм.

Угловые зависимости интенсивности излучения в плоскости, перпендикулярной р-п-переходу лазерных диодов структуры 1 после начала стимулированной генерации лазеров, имели двухпиковый вид (с провалом в нулевой компоненте), соответствующий моде второго порядка. Подобная диаграмма направленности наблюдалась в многослойном лазере схожей конструкции с InGaP слоем, предназначенным для снижения заселенности волноводных слоёв [1]. При увеличении тока накачки ширина диаграммы на полувысоте имеет тенденцию к уширению за счет генерации мод более высокого порядка. Диаграммы направленности лазерных диодов структуры 2 кардинально отличаются от лазерных диодов структуры 1 (рис. 1). Характерные интенсивности излучения имеют ярко выраженную нулевую компоненту, а при увеличении токовой накачки формируется симметричный «педестал», образованный двумя максимумами с углами $\pm 30^\circ$.

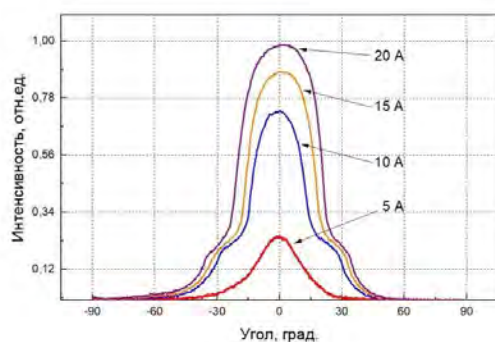


Рис. 1. Характерные интенсивности излучения лазерного диода структуры 2 от угла при разных токах накачки

Место локализации волноводных мод изготовленных лазеров было исследовано с помощью оптического микроскопа со встроенной ССД камерой (рис. 2). В качестве индикатора места локализации волноводных мод использовалась вытравленная вдоль резонатора со стороны р-эмиттера тридцатимикронная канавка, проникающая в волноводные слои, но не достигающая до излучающих слоев. Уверенная засветка частично вытравленных волноводных слоев наблюдалась на грани лазерных диодов в структуре 1 вследствие распространения излучающих мод в волноводных слоях как в допороговом, так и в послепороговом режимах токовой накачки. В структуре 2 в допороговом режиме накачки засветка вытравленной области не наблюдалась, а в послепороговом режиме засветка наблюдалась с интенсивностью, позволяющей наблюдать вытравленную область во всем диапазоне токовой накачки. Эксперимент позволил предположить, что вол-

новодные моды в структуре 2 локализованы в районе квантовых ям.

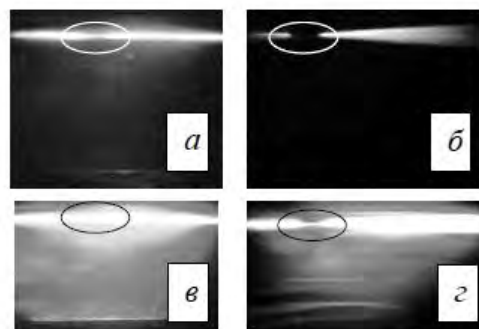


Рис. 2. Микрофотографии излучающей грани лазерных диодов, сделанные в допороговом и послепороговом режимах накачки а, б и в, г соответственно: а и в – структура 1, б и г – структура 2. Овалом отмечены вытравленные области между активными полосками

Анализ ВТАХ показал значительное различие рабочих характеристик исследуемых лазеров, как в отношении достижения мощности излучения, так и в отношении порогового тока. Пороговый ток структуры 1 соответствовал 15 А, а лазерных диодов структуры 2 – 5 А. При этом максимально достижимая мощность излучения для структуры 1 составляла 9,5 Вт, а для структуры 2 – не более 6,5 Вт. Такое поведение ВТАХ наряду с результатом эксперимента по определению места излучения волноводных мод могут свидетельствовать в пользу их локализации в окрестностях квантовых ям в структуре 2. В этом случае возникает большой параметр оптического ограничения и, как следствие, меньший пороговый ток. Локализация моды вблизи р-эмиттера ведёт к большим внутренним потерям на поглощение свободными носителями, что в свою очередь не позволяет получить значительную выходную мощность. Симметричная диаграмма направленности может свидетельствовать о проявлении волноводного эффекта квантовых ям. Этому способствует уменьшенное количество фосфора в компенсирующем слое, увеличение концентрации индия в квантовых ямах в структуре 2, а также пониженная концентрация носителей заряда в волноводе.

Литература

1. Некоркин С.М. и др. // XXIV Междунар. симп. «Нанофизика и нанoeлектроника», Т.2, 679 (2020).
2. Некоркин С.М. и др. // XXV Междунар. симп. «Нанофизика и нанoeлектроника», Т.2, 780 (2021).