

ПОДБОРКА РАБОТ, ДОЛОЖЕННЫХ НА СИМПОЗИУМЕ  
«ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ: ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ»

## Полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP с повышенным электронным барьером

А.А.Мармалюк, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, М.А.Ладугин,  
А.В.Лобинцов, А.А.Падалица, В.И.Романцевич, Ю.Л.Рябоштан,  
С.М.Сапожников, В.Н.Светогоров, В.А.Симаков

*Представлены результаты экспериментальных исследований полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с различными барьерными слоями. Показано, что использование напряженных слоев с увеличенной шириной запрещенной зоны в качестве блокирующих барьеров, ограничивающих утечку носителей, позволяет увеличить выходную мощность при том же токе накачки.*

*Ключевые слова:* полупроводниковый лазер, гетероструктура, AlGaInAs/InP, электронный барьер.

### 1. Введение

Полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур AlGaInAs/InP, излучающие в области 1.3–1.55 мкм, активно применяются в системах передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи. Одной из известных проблем, сдерживающих дальнейшее улучшение выходных характеристик таких лазеров, является недостаточная энергетическая глубина квантовых ям. С увеличением тока накачки часть носителей может покидать активную область и формировать каналы утечки в эмиттерные слои. Для борьбы с этим нежелательным явлением предложено как увеличивать энергетическую глубину квантовых ям, так и применять барьерные слои в волноводе для блокирования носителей, выброшенных из квантовых ям. Квантовые ямы с увеличенной глубиной получаются при использовании упругокомпенсированной активной области, в которой напряжения квантовых ям и барьеров имеют противоположные знаки [1–3]. В качестве барьеров могут быть слои AlInAs [4–6], GaInP [7] или короткопериодная сверхрешетка GaInAs/AlInAs [8]; при этом слои, используемые для барьеров, как правило, согласованы по периоду кристаллической решетки с подложкой. Требование такого согласования задает состав барьера и фиксирует ширину запрещенной зоны  $E_g$ . Для повышения потенциальной высоты барьера можно использовать составы, обеспечивающие увеличение ширины запрещенной зоны, однако при этом нарушается условие изопериодности с подложкой. В этой связи представляет значительный интерес изучение перспектив использования напряженных слоев с увеличенной шириной запрещенной зоны в качестве блокирующих барьеров, ограничивающих утечку носителей.

А.А.Мармалюк, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, М.А.Ладугин, А.В.Лобинцов, А.А.Падалица, В.И.Романцевич, Ю.Л.Рябоштан, С.М.Сапожников, В.Н.Светогоров, В.А.Симаков. АО «НИИ «Поллюс» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; e-mail: almarm@mail.ru

Поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.

### 2. Экспериментальная часть

Лазерные квантово-размерные гетероструктуры радиального ограничения AlGaInAs/InP выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии. Конструкция гетероструктуры представляла собой активную область из шести упругокомпенсированных ( $\epsilon_{\text{tot}} = +0.6\%$ ) квантовых ям GaInAs, расположенных в центре волновода AlGaInAs ( $E_g = 1.08$  эВ). Волновод ограничивался эмиттерными слоями InP. Для снижения утечек на границе волновод–эмиттер помещался блокирующий барьерный слой AlInAs. Были выращены два типа гетероструктур со слоем AlInAs, согласованным с подложкой и не согласованным с ней. При этом ширина запрещенной зоны несогласованного барьера ( $E_g = 2.3$  эВ) была больше, чем у согласованного слоя (1.48 эВ). Из полученных гетероструктур изготавливались однододовые полупроводниковые лазеры и изучались их характеристики в непрерывном режиме работы при комнатной температуре.

### 3. Результаты и их обсуждение

В традиционной конструкции лазерных гетероструктур на основе AlGaInAs/InP на границе волновод–эмиттер зачастую используется барьерный слой AlInAs [4–6, 9]. Ввиду различного расположения краев зоны проводимости и валентной зоны он позволяет формировать энергетический барьер для электронов между волноводом и эмиттером (рис.1,а), который блокирует утечки тока в эмиттер и способствует повышению дифференциальной квантовой эффективности генерации и выходной оптической мощности [10]. Как правило, этот слой согласован по периоду с подложкой InP, что определяет ширину его запрещенной зоны и, следовательно, величину энергетического барьера. Очевидно, что эффективность барьера можно увеличить, перейдя к использованию более широких слоев. В случае трехкомпонентного твердого раствора AlInAs это будет сопряжено с изменением периода кристаллической решетки и накоплением напряжений растяжения в таких слоях. При таком подходе (рис.1,б) допустимая толщина слоя связана с величиной предельного рассогласования, при котором еще не возни-

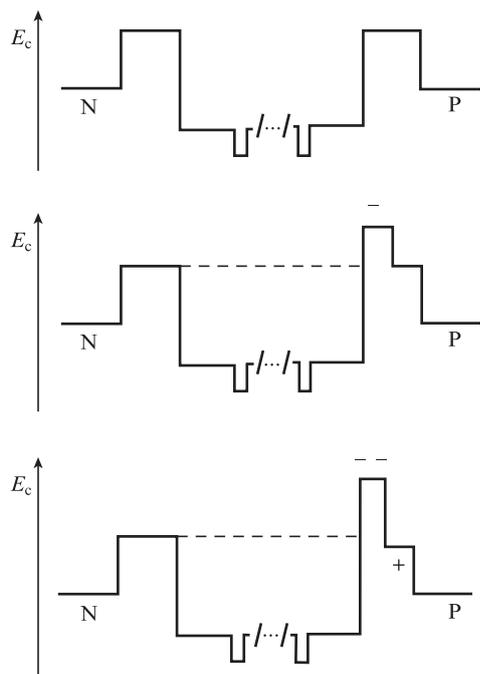


Рис.1. Диаграммы зоны проводимости лазерных гетероструктур AlGaInAs/InP: с согласованным барьерным слоем AlInAs (а), с напряженным барьерным слоем AlInAs (б) и с упругокомпенсированным барьерным слоем AlInAs (в) (знаком «+» обозначено наличие напряжения сжатия, знаком «-» – наличие напряжения растяжения; количество знаков указывает на уровень напряжений).

кает генерация дислокаций несоответствия. Данное условие накладывает ограничения на увеличение ширины запрещенной зоны барьерного слоя требуемой толщины. В этой ситуации может помочь метод компенсации упругих напряжений, хорошо зарекомендовавший себя при формировании излучающей квантово-размерной области лазеров на основе AlGaInAs/InP [1–3] и заключающийся в том, что более широкозонный слой с напряжениями растяжения помещается на границе с волноводом для улучшения электронного ограничения, а более узкозонный компенсирующий слой с напряжениями противоположного знака (сжатия) смещается ближе к эмиттеру (рис.1,в). Для усиления эффекта компенсации можно использовать несколько комбинаций таких слоев.

Для выбора допустимых параметров барьерных слоев по отношению к генерации дислокаций несоответствия проведены фотолюминесцентные исследования активной области лазера. Изучалось влияние вариации параметров широкозонного барьера, помещенного на границе волновод–р-эмиттер для ограничения утечек электронов. Определены геометрия и условия получения барьерных слоев, приводящих к увеличению интенсивности сигнала фотолюминесценции. В эксперименте сравнивались люминесцентные характеристики образцов с согласованным по периоду барьером и упругокомпенсированным барьером ( $\epsilon_{\text{tot}} = -1.4\%$ ), состоящим из двух пар слоев. Типичные спектры фотолюминесценции образцов представлены на рис.2. Видно, что даже в условиях оптической накачки сигнал в максимуме спектра фотолюминесценции гетероструктуры с более широкозонным барьером более чем в два раза превышает сигнал гетероструктуры с согласованным барьером.

На основе лазерных гетероструктур с такими активными областями были изготовлены одномодовые лазер-

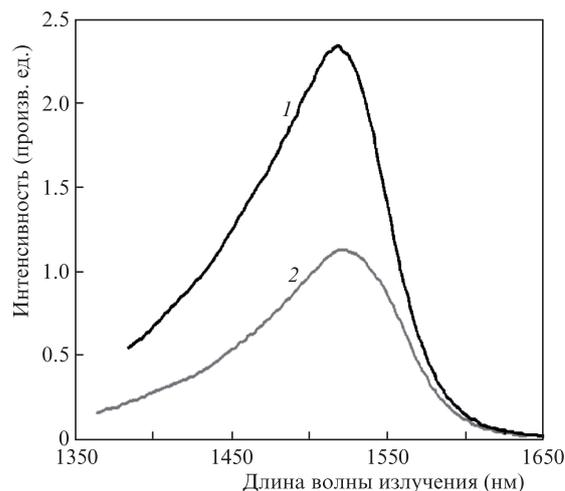


Рис.2. Спектры фотолюминесценции квантово-размерных гетероструктур AlGaInAs/InP: с упругокомпенсированным барьерным слоем AlInAs (1) и с согласованным барьерным слоем AlInAs (2).

ные диоды [11]. Ширина мезаполоскового контакта составляла 2 мкм, а длина резонатора – 200 мкм. При сборке диодов активная область размещалась поверх медного основания. Измерения проводились в непрерывном режиме без нанесения отражающих и просветляющих покрытий на грани резонатора.

Установлено, что наклон ватт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров на основе гетероструктуры с более широкозонным барьером на 10%–20% больше, чем у лазеров с традиционным (согласованным) барьером AlInAs (рис.3,а). При этом имело место и незначительное снижение пороговых токов, однако наличие дополнительного барьера привело к ухудшению вольт-амперной характеристики (рис.3,б). Итак, лазеры с широкозонным барьером продемонстрировали более высокую

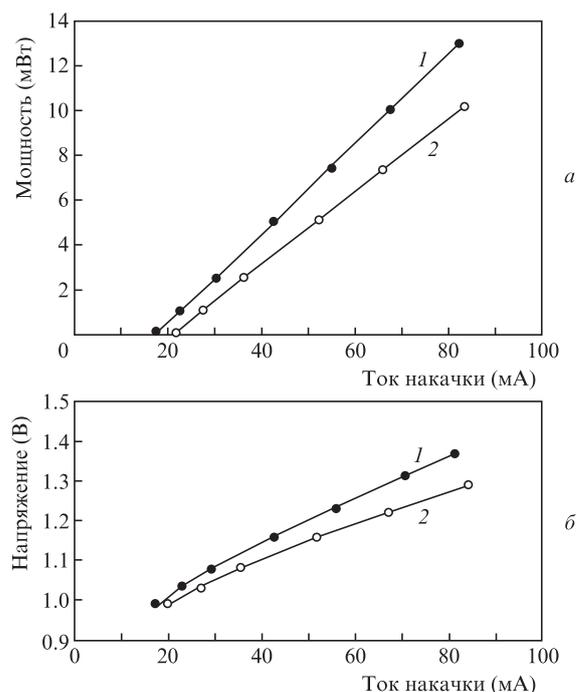


Рис.3. Ватт-амперные (а) и вольт-амперные (б) характеристики полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с упругокомпенсированным (1) и согласованным (2) барьером.

выходную мощность, что подтверждает эффективность использованного подхода по снижению токов утечки в р-эмиттер.

Напыление диэлектрических покрытий (с коэффициентами отражения 15% и 80%) позволило увеличить наклон ватт-амперных характеристик до 0.34–0.36 Вт/А, что почти вдвое больше, чем у лазеров без покрытий. Несмотря на повышенные рабочие напряжения лазеров с широкозонным электронным барьером, ресурсные испытания подтвердили надежность работы таких приборов.

Проведенные исследования показали, что блокировка утечки носителей в активной области полупроводникового лазера способствует достижению более высокой выходной мощности. В частности, для лазеров спектрально-диапазона 1.3–1.55 мкм оказалось действенным повышение ширины запрещенной зоны барьера на границе волновод–р-эмиттер.

#### 4. Заключение

Итак, выполнены экспериментальные исследования полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с использованием в качестве блокирующих барьеров упругокомпенсированных слоев AlInAs с увеличенной шириной запрещенной зоны. Наличие более широкозонных слоев AlInAs улучшает локализацию электронов в активной области и снижает утечку носителей за-

ряда в эмиттерные слои. Это способствует улучшению выходных характеристик лазеров, в частности повышению выходной мощности при том же токе накачки.

1. Yamamoto N., Yokoyama K., Yamanaka T., Yamamoto M. *Electron. Lett.*, **30**, 243 (1994).
2. Lin C.-C., Liu K.-S., Wu M.-C., Shiao H.-P. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 3309 (1998).
3. Wu M.-Y., Yang C.-D., Lei P.-H., Wu M.-C., Ho W.-J. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, L 643 (2003).
4. Kazarinov R.F., Belenky G.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 423 (1995).
5. Murai H., Matsui Y., Ogawa Y., Kunii T. *Electron. Lett.*, **31**, 2105 (1995).
6. Takemasa K., Munakata T., Kobayashi M., Wada H., Kamijoh T. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 495 (1998).
7. Abraham P., Piprek J., DenBaars S.P., Bowers J.E. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 1239 (1999).
8. Fukushima T., Shimizu H., Nishikata K., Hirayama Y., Irikawa M. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 2025 (1995).
9. Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Лешко А.Ю., Рябоштан Ю.Л., Голикова Е.Г., Тарасов И.С. *Письма в ЖТФ*, **29**, 65 (2003).
10. Веселов Д.А., Шашкин И.С., Бахвалов К.В., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Растегаева М.Г., Слипченко С.О., Бечвай Е.А., Стрелец В.А., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **50** (9), 1247 (2016).
11. Горлачук П.В., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Мармалюк А.А., Романцевич В.И., Симаков В.А., Чернов Р.В. *Квантовая электроника*, **48** (6), 495 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (6), 495 (2018)].