

Влияние барьерных слоев GaAsP на параметры лазерных InGaAs/AlGaAs-диодов спектрального диапазона 1050–1100 нм

В.П.Дураев, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, А.В.Петровский,
Ю.А.Рябоштан, М.А.Сумароков, А.В.Сухарев

Для улучшения параметров лазерных диодов спектрального диапазона 1000–1070 нм и создания высокоэффективных лазерных диодов с длинами волн 1070–1100 нм предлагается ввести в активную область квантоворазмерной лазерной InGaAs/AlGaAs-гетероструктуры барьерные слои GaAsP, компенсирующие повышенные механические напряжения. Это позволит значительно улучшить люминесцентные характеристики гетероструктур и изменить условия для генерации дислокаций несоответствия. Появляется возможность получения длинноволновой генерации в районе 1100 нм за счет увеличения толщин квантовых ям и мольной доли InAs в них. Изготовленные лазерные диоды с длиной волны 1095–1100 нм имели низкие пороговые токи, большую выходную мощность и высокую надежность.

Ключевые слова: гетероструктура, барьерные слои GaAsP, компенсация напряжений, квантовая яма, лазерный диод.

1. Введение

Лазерные диоды (ЛД) спектрального диапазона 1050–1100 нм широко используются в настоящее время в качестве задающих источников излучения в твердотельных и волоконных лазерных системах, открытых атмосферных линиях связи, а также для исследовательских целей. Создание эффективных ЛД на основе InGaAs/AlGaAs-гетероструктур в этом диапазоне длин волн связано с проблемой уменьшения концентрации кристаллических дефектов в активной области. Образованию дефектов и, в первую очередь, дислокаций несоответствия способствует различие в периодах решетки материала активной области (InGaAs) и подложки (GaAs). Для получения лазерной генерации на длине волны 1050 нм и более необходимо ввести в гетероструктуру значительное количество атомов In. При этом напряжения в гетероструктуре приближаются к критическим значениям, необходимым для генерации дислокаций несоответствия, или превышают их. В результате дефектообразования значительно снижается внутренний квантовый выход, возрастают оптические потери, появляются дополнительные каналы утечек тока.

Существуют несколько путей решения этой проблемы. В работе [1] предлагается использовать напряженные буферные слои InGaAs, изменяющие картину распределения механических напряжений в районе активной области. Другой путь состоит в изменении стандартных условий эпитаксиального роста и в использовании новых материалов, способствующих подавлению генерации дислокаций несоответствия кинетическими методами [2]. В настоящей работе использован подход, основанный на компенсации механических напряжений в активной об-

ласти [3]. Он представляется более перспективным, поскольку минимально изменяет геометрию активной области, практически не сказывается на транспорте носителей, а также не требует значительной модификации технологического цикла.

Использование напряженных барьерных слоев GaAsP с напряжениями, обратными тем, что создает слой InGaAs, позволяет компенсировать возникающие в активной области напряжения несоответствия, что приводит к повышению кристаллического совершенства гетероструктур, увеличивая эффективность ЛД. Кроме того, появляется возможность увеличить длину волны излучения лазерных диодов по сравнению с уже существующими приборами.

2. Эксперимент

Гетероструктуры InGaAs/AlGaAs были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном кварцевом реакторе «СИГМОС-130» с вращающимся графитовым подложкодержателем при температуре роста 720 °С и давлении 60 Тор. В качестве источников элементов III и V групп использовались Al(CH₃)₃, Ga(C₂H₅)₃, In(CH₃)₃, AsH₃ и PH₃, а газом-носителем служил водород. Эпитаксиальный рост проводился на подложках n-GaAs (100). Был выращен ряд гетероструктур с квантоворазмерной напряженной активной областью InGaAs/GaAsP/AlGaAs (рис.1). Толщина квантовой ямы (КЯ) In_xGa_{1-x}As составляла 60 Å, а ее состав *x* варьировался в диапазоне 0.08–0.35. Состав барьерного слоя GaAs_{1-y}P_y изменялся в диапазоне *y* = 0–0.12 при толщине 70 Å. Квантовая яма и барьер помещались между волноводными слоями Al_{0.2}Ga_{0.8}As толщиной 0.15 мкм и эмиттерными слоями Al_{0.3}Ga_{0.7}As толщиной 1.5 мкм. Гетероструктура заканчивалась контактными слоями n- и p-GaAs толщиной 0.5 мкм. Для исследования излучательных характеристик выращенных гетероструктур проводились фотолюминесцентные измерения. Возбуждение люминесцентного излучения осуществлялось пучком твердотельного лазера на длине волны 532 нм. Из описанных структур были изготовлены ЛД с длиной волны излучения 1050–1100 нм.

В.П.Дураев, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, А.В.Петровский,
Ю.А.Рябоштан, М.А.Сумароков, А.В.Сухарев. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, д. 3; e-mail: nolatech@mail.magelan.ru, marm@siplus.ru, ant@siplus.ru, apetrov@siplus.ru, juri@siplus.ru, andrew@siplus.ru

Поступила в редакцию 6 июня 2005 г.

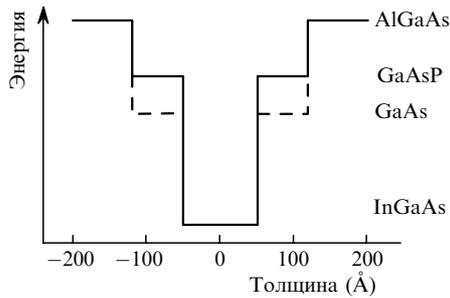


Рис.1. Энергетическая диаграмма зоны проводимости активной области исследованных InGaAs/GaAs/AlGaAs- и InGaAs/GaAsP/AlGaAs-гетероструктур.

3. Результаты и их обсуждение

Разработка InGaAs/AlGaAs-ЛД спектрального диапазона 1050–1100 нм сопряжена с необходимостью контроля величины механических напряжений в активной области исходной гетероструктуры. Эти напряжения не должны превышать критического значения, при котором начинается процесс активного дефектообразования. На рис.2 (кривая 1) представлена зависимость критической толщины КЯ от ее состава для гетероструктуры с одной квантовой ямой (InGaAs/GaAs), рассчитанная в соответствии с [4]. Область ниже кривой 1 является «разрешенной». Если состав и ширина КЯ находятся в этой области, то генерации дислокаций несоответствия не наблюдается. Также на рис.2 (кривая 3) приведена расчетная зависимость длины волны межзонного перехода для InGaAs/GaAs-КЯ той же геометрии, что и в выращенных гетероструктурах: при толщине 60 Å (отмечена штриховой линией) мольная доля InAs варьировалась в диапазоне 0.04–0.40. Как видно из представленных зависимостей, в том случае, когда толщина КЯ равна 60 Å, а мольная доля InAs превышает 0.31–0.32, гетероструктура переходит в «запрещенную» зону. При этом максимальная длина волны фотолюминесценции гетероструктуры в «разрешенной» зоне с такой активной областью составляет 1045–1050 нм. Длины волн лазерной генерации диодов, изготовленных из такой гетероструктуры, находятся в диапазоне 1065–1070 нм. Изготовление полупроводникового лазера из гетероструктуры на границе «разрешенной» области связано с возможностью начала процесса дефектообразования вследствие погрешностей эпитаксиального роста или под действием последующих операций технологического цикла.

Для решения указанных проблем в настоящей работе предлагается использовать метод компенсации напряже-

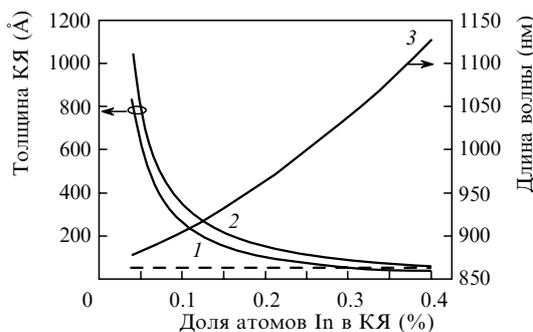


Рис.2. Зависимости критической толщины для InGaAs/GaAs- (1) и InGaAs/GaAs_{0.88}P_{0.12}-КЯ (2), а также длины волны межзонного перехода (3) от состава InGaAs/GaAs-КЯ толщиной 60 Å. Горизонтальной штриховой линией отмечена толщина КЯ, равная 60 Å.

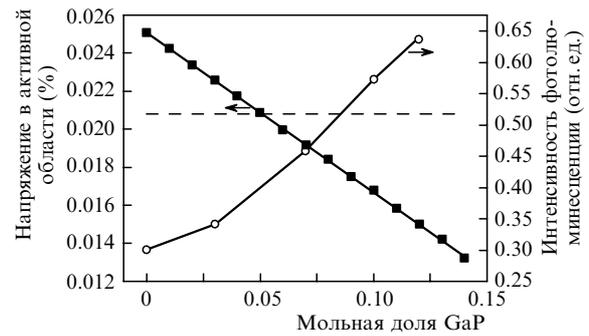


Рис.3. Зависимости величины механических напряжений в активной области и интенсивности фотолюминесценции гетероструктуры с In_{0.35}Ga_{0.65}As/GaAsP-КЯ толщиной 60 Å от мольной доли GaP в барьерном слое. Штриховой линией отмечена величина критических напряжений КЯ.

ний. Для этого вводятся барьерные слои GaAsP. Материал квантовой ямы InGaAs имеет большую постоянную решетки, чем подложка GaAs, в то время как для барьерного слоя GaAsP она меньше. В результате происходит компенсация суммарных механических напряжений в районе активной области.

На рис.3 приведены расчетная зависимость механических напряжений и экспериментальная зависимость интенсивности фотолюминесценции гетероструктуры с одной In_{0.35}Ga_{0.65}As/GaAs_{1-y}P_y-КЯ толщиной 60 Å от мольной доли y GaP в барьерном слое. Введение фосфора в барьерный слой является эффективным способом снижения суммарного напряжения в гетероструктуре: при мольной доле GaP, равной 0.12, напряжения снижаются более чем на 40 %. Для приведённого на рис.3 примера замена барьерного слоя GaAs на GaAs_{0.88}P_{0.12} позволяет уменьшить механические напряжения до значения ниже критического и тем самым перевести структуру из «запрещенной» зоны в «разрешенную». Об этом отчётливо свидетельствует рост интенсивности фотолюминесценции с увеличением доли атомов фосфора в барьере.

Введение напряжённого барьерного слоя GaAsP позволяет увеличить толщину КЯ и мольную долю InAs в её составе по сравнению с гетероструктурами, в которых использованы барьерные слои GaAs. При этом происходит изменение критических условий на генерацию дислокаций несоответствия. Этот факт отражён на рис.2, где также приведена новая расчётная зависимость критической толщины КЯ для структуры с барьерным слоем GaAs_{0.88}P_{0.12} (кривая 2). В соответствии с полученными результатами максимально достижимая длина волны смещается в область 1100 нм. Выращенная гетероструктура имеет высокую интенсивность фотолюминесценции с максимумом на длине волны 1097 нм.

Поскольку GaAsP является более широкозонным материалом, чем GaAs, введение атомов фосфора приводит к изменению зонной диаграммы активной области. Происходит повышение барьерных слоев, глубина КЯ в валентной зоне и зоне проводимости растет. Это сопровождается поднятием уровней размерного квантования относительно дна КЯ. В итоге длина волны фотолюминесценции укорачивается, что является нежелательным эффектом. Однако величина описанного эффекта незначительна. Наши экспериментальные данные показывают, что добавление 12 % атомов фосфора при неизменном составе КЯ приводит к смещению длины волны фотолюминесценции всего на 7 нм.

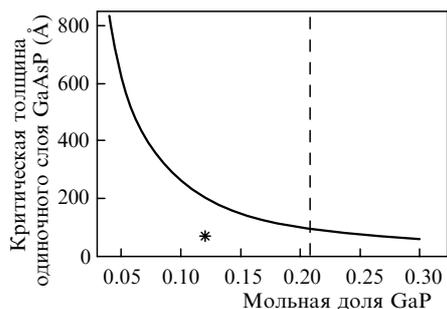


Рис.4. Зависимость критической толщины одиночного слоя GaAsP, выращенного на подложке GaAs, от мольной доли GaP. Штриховой линией отмечен состав барьера, потенциал которого равен потенциалу волновода $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, звездочкой – барьерный слой GaAsP 70 Å с максимальной мольной долей GaP, составляющей 0.12.

Следует отметить, что увеличение высоты барьерного слоя вызывает ограничение максимальной мольной доли GaP. Потенциал барьера ни в зоне проводимости, ни в валентной зоне по крайней мере не должен превышать уровня волноводного слоя. В данной работе этот уровень соответствует уровню волновода $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. На состав барьерного слоя может накладываться и более жесткое ограничение, поскольку наличие энергетического скачка на границе раздела волновод–барьер сказывается на транспорте носителей через гетероструктуру. Требования к минимальному значению этого скачка зависят от конкретного типа прибора.

С другой стороны, максимально допустимое содержание атомов фосфора в барьерном слое ограничено требованием высокого кристаллического совершенства гетероструктуры. Барьерные слои GaAsP, так же как и InGaAs-КЯ, являются напряженными, и для них также существует условие на генерацию дислокаций несоответствия. Рассмотрение механических напряжений, возникающих в процессе роста гетероструктуры, показывает, что с наибольшей вероятностью активное дефектообразование может начаться при выращивании первого (нижнего) барьерного слоя. Поскольку рассматриваемые гетероструктуры содержат большое количество атомов индия, в начале роста второго (верхнего) барьерного слоя напряжения сжатия от InGaAs превышают напряжения растяжения от GaAsP. Это хорошо видно из рис.3, где несмотря на то, что учитываются оба барьерных слоя GaAsP (верхний и нижний), механические напряжения в активной области имеют тот же знак, что и в случае структур с традиционными GaAs-барьерами.

На рис.4 показана зависимость критической толщины одиночного слоя $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$, выращенного на подложке GaAs, от содержания атомов фосфора (y). Кроме того, штриховой линией отмечена доля атомов фосфора, при которой в данной геометрии потенциал барьерного слоя становится равным потенциалу волновода в зоне проводимости. На границе раздела слоев AlGaAs–GaAsP скачок потенциала распределяется поровну между валентной зоной и зоной проводимости. Используемые в работе слои GaAsP находятся в «разрешенной» области.

В ходе выполненных исследований установлено, что замена барьерного слоя GaAs на GaAsP позволяет улучшить люминесцентные характеристики гетероструктур с длинами волн 1000–1070 нм, а также вырастить структуры, которые можно использовать для изготовления отвечающих современным требованиям ЛД спектрального диапазона 1070–1100 нм. Из полученных квантово-

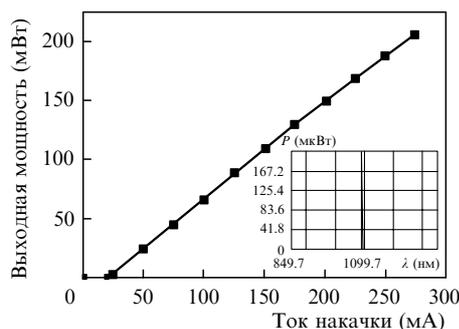


Рис.5. Типичная ватт-амперная характеристика ЛД, изготовленных из исследованных в работе InGaAs/GaAsP/AlGaAs-гетероструктур. На вставке показан спектр излучения при выходной мощности 200 мВт (разрешение 1 нм).

размерных гетероструктур InGaAs/GaAsP/AlGaAs были изготовлены тестовые ЛД с широким контактом, а также одномодовые диоды с гребневой мезаполоской шириной 3 мкм.

При исследовании генерационных характеристик ЛД с широким контактом, изготовленных из гетероструктур с напряженными барьерными слоями GaAsP, было обнаружено, что по сравнению с диодами из InGaAs/GaAs/AlGaAs-гетероструктур наблюдается значительное увеличение длины волны излучения (достигнуто $\lambda = 1090$ нм) и уменьшение плотности порогового тока (в 1.5 раза). Плотность порогового тока для лазеров с напряженными барьерными слоями составила менее 600 А/см^2 .

Типичная ватт-амперная характеристика одномодового мезаполоскового ЛД с длиной резонатора 1000 мкм, работающего в непрерывном режиме при температуре 25°C , представлена на рис.5. Минимальный пороговый ток равнялся 12 мА, а разброс пороговых значений тока для 100 ЛД составил не более 16 мА. Мощность одномодового излучения в непрерывном режиме генерации превышала 200 мВт при токе накачки 300 мА. Спектр излучения ЛД состоял из трех-пяти продольных мод и имел ширину на полувысоте 4–5 нм. Экспериментально определена зависимость длины волны излучения ЛД от температуры – она составила 4–5 Å/К. Оценка ресурса работы ЛД при температуре 25°C дала значение более 10^4 ч.

4. Заключение

Для повышения кристаллического совершенства кванторазмерных InGaAs/AlGaAs-гетероструктур с длиной волны люминесценции 1050–1100 нм в данной работе предлагается использовать напряжённые барьерные слои GaAsP, компенсирующие механические напряжения в активной области. Как показал эксперимент, это позволяет значительно снизить механические напряжения в структуре, повысить порог образования дислокаций несоответствия, а также увеличить интенсивность фотолюминесценции структуры. Из выращенных гетероструктур были изготовлены одномодовые ЛД с длиной волны излучения вплоть до 1100 нм, имеющие низкие пороговые токи (12 мА), большую квантовую эффективность (70 %) и повышенную надёжность.

- Schlenker D. et al. *J. Cryst. Growth*, **209**, 27 (2000).
- Schlenker D. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11**, 946 (1999).
- Bugge F. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1965 (2001).
- Matthews J.W., Blakeslee A.E. *J. Cryst. Growth*, **27**, 118 (1974).