

УДК 535.374:621.375.8

ГЕТЕРОСТРУКТУРА С РАСШИРЕННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ ДЛЯ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Т. И. Гущик, Н. В. Дьячков, А. П. Богатов, А. Е. Дракин

Осуществлена оптимизация толщин и состава слоев диодного гетеролазера по параметру отношения оптической ширины пучка d к фактору Γ – оптического ограничения. Проверена устойчивость распределения вертикального поля в ближней зоне и наиболее важных волноводных параметров к статическим изменениям, а также к динамическим вариациям показателей преломления слоев гетероструктуры в рабочем режиме лазера.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры, гетероструктуры, расширение ближнего вертикального поля, вытекание излучения в эмиттерные слои.

Основным фактором, ограничивающим яркость многих типов одномодовых лазеров, является проблема катастрофического оптического разрушения или деградации (КОД) [1–4]. Эта проблема вызвана тем, что размер пятна излучения типичных одномодовых лазеров, как правило, ограничен конструкцией лазера в горизонтальном направлении – 3–6 мкм, и параметрами слоев структуры в вертикальном направлении – типично 0.5 мкм, и таким образом, при достижении на выходном зеркале лазера критической плотности мощности, называемого порогом КОД, грань разрушается. Очевидно, что увеличение выходной мощности при неизменной плотности оптического пучка (ниже критического значения) возможно за счет увеличения ширины пучка в вертикальном направлении (перпендикулярно слоям структуры). Отметим, что увеличение размера пучка в горизонтальном направлении сопряжено со срывом поперечно-одномодовой генерации [5] и явлением филаментации [6]. В свою очередь, расширение вертикального поля, при сохранении толщины активной области, уменьшает тепловыделение на поверхности зеркала, которое пропорционально плотности оптического потока в активной области и является затравочным механизмом КОД [3, 4]. Исходя из этих соображений, нами был выбран критерий оптимизации структуры по отношению d/Γ – оптической ширины пучка d к фактору Γ – оптического ограничения.

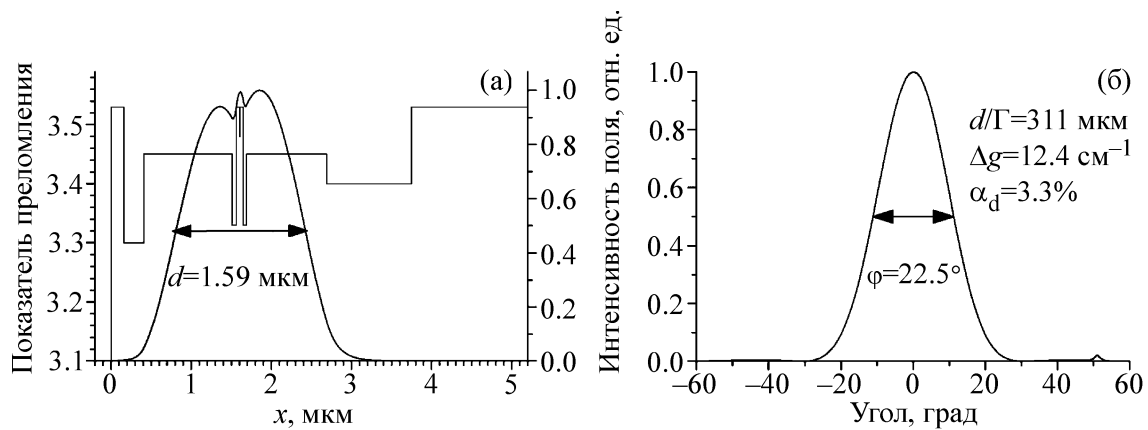


Рис. 1: Распределение ближнего (а) и дальнего (б) поля фундаментальной моды и параметры качества для волновода подобранной структуры. На рис. 1 (а) приведен также профиль показателей преломления слоев подобранной структуры, d – ширина распределения ближнего поля основной моды по полувысоте; φ – ширина диаграммы направленности по полувысоте; d/Γ – отношение ширины ближнего поля к фактору оптического ограничения; Δg – наименьший дефицит усиления ненулевых мод относительно усиления нулевой моды на пороге генерации; α_d – относительное уменьшение модового усиления фундаментальной моды за счет туннелирования (вытекания) из волновода в эмиттерные слои.

Основной подход к проблеме расширения оптического пучка связан с ослаблением волновода (уменьшение Δn слоев). Главными трудностями на этом пути являются срыв поперечно-одномодовой генерации и повышение чувствительности конфигурации и ширины ближнего поля к отклонениям толщин либо показателей преломления слоев от заданных [7]. Такие изменения слоев могут иметь место за счет технологического разброса параметров слоев гетероструктуры при ее изготовлении, а также за счет изменения внешних факторов: температуры слоев при работе лазера, пространственно-неоднородного выедания носителей в активной области при больших мощностях и т.д.

С нашей точки зрения перспективным способом расширения ближнего поля является использование структур с возможностью вытекания части излучения из волновода в эмиттерные слои за счет туннелирования (вытекания) оптической волны через обкладочный слой. Благодаря этому происходит увеличение дефицитов усиления ненулевых мод относительно порога генерации фундаментальной моды [8]. В таких структурах эффективные показатели преломления мод волновода меньше показателей преломления эмиттерных слоев и не более чем на 0.05 больше, чем у обкладочных слоев волново-

да. Малое отличие эффективных показателей преломления мод и обкладочных слоев приводит к вытеканию излучения из волновода.

Целью нашей работы был подбор описанной в предыдущем абзаце структуры, оптимизированной по параметру отношения d/Γ , а также по устойчивости этого и других наиболее важных волноводных параметров к вариациям составов слоев, допустимых при производстве и при работе лазера. Это делалось путем численных расчетов критичных для нас параметров качества волноводов для структур, получающихся из исходной путем варьирования в широких пределах толщин и показателей преломления некоторых ее слоев.

Методика. Расчеты конфигурации ближнего и дальнего полей и интегральных параметров мод подбираемых волноводов осуществлялись с помощью методик [10, 11], реализованных в программном продукте Wave. На рис. 1 представлены примеры рассчитанных такими методиками распределений ближнего и дальнего полей основной моды, а также значений волноводных параметров d , φ , d/Γ , Δg , α_d для соответствующего пространственного профиля показателя преломления слоев гетероструктуры и с пороговым значением модового усиления, взятого равным во всех расчетах 10 см^{-1} .

Наша методика подбора слоев структуры состояла в варьировании толщин и показателей преломления волноводных и обкладочных слоев структуры, параметры которой приведены в табл. 1. В подбираемой структуре было предложено использовать 1 квантовую яму из-за критерия оптимизации по параметру d/Γ . Длина волны излучения, соответствующая выбранному составу квантовой ямы, составляла 980 нм. Расчеты начинались с толщин волноводных слоев в 1 мкм, и в дальнейшем толщина волноводных слоев изменялась на 0.1 мкм. При этом для уменьшения числа вариантов рассматриваемых структур рассматривались случаи с суммарной толщиной волноводных слоев свыше 1.5 мкм, так как нас интересовало широкое ближнее вертикальное поле нулевой моды, лежащее внутри волноводных слоев. Толщина и показатель преломления обкладочных слоев согласовывались с каждым из рассматриваемых вариантов слоев волновода для селективного вытекания ненулевых мод в подложку. В дальнейшем в структуру добавлялись еще волноводные слои толщиной от 0.1 мкм и отличием в показателе преломления от начальных волноводных слоев на 0.05 и 0.1. Потом толщина этих слоев также варьировалась с шагом 0.1 мкм.

Для изготавливаемых структур крайне важно знать, насколько чувствительно поперечное распределение поля и сохраняется ли поперечно-одномодовая генерация при изменениях показателей преломления волноводных и обкладочных слоев, возможных

при производстве структуры. Поэтому при подборе структуры мы учитывали возможность возникновения отклонений состава и толщин слоев. Особое внимание следует уделять отклонениям показателя преломления обкладочных и волноводных слоев, так как показатель преломления подложки нам известен заранее, до выращивания на ней гетероструктуры, а окружающие квантовую яму слои растянутся поатомно с высокой точностью.

Т а б л и ц а 1

Названия и общая формула составов и толщин слоев подбираемой гетероструктуры

№ слоя	Назначение слоя	Состав слоя	Толщина слоя
1	Металлический контакт	Au, Zn	–
2	Полупроводниковый контактный (p-эмиттерный) слой	GaAs	100–150 нм
3	Обкладочный слой	$Al_xGa_{1-x}As$	d_1
4	Волноводный слой	$Al_{0.11}Ga_{0.89}As$	d_2
5	Барьерный слой	$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	40 нм
6	Переходной слой	GaAs	40 нм
7	Активный квантово-размерный слой	InGaAs	8 нм
8	Переходной слой	GaAs	40 нм
9	Барьерный слой	$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	40 нм
10	Волноводный слой	$Al_{0.11}Ga_{0.89}As$	d_3
11	Обкладочный слой	$Al_yGa_{1-y}As$	d_4
12	Подложка (n-эмиттерный слой)	GaAs	100 мкм

В качестве критерия стабильности структуры были взяты условия дефицита усиления мод ненулевого порядка относительно усиления нулевой моды на пороге генерации не менее 3 см^{-1} и изменения отношения d/Γ основной моды не более 30% при вариациях показателей преломления любых волноводных и обкладочных слоев в пределах ± 0.01 , а также при отклонениях n_a до ± 0.1 , моделирующих отклонения показателя преломления активной области n_a из-за неоднородности концентрации носителей по длине и ширине лазера [5]. Также важно, чтобы величина материального усиления в активной области, подбираемая при численных расчетах по условию преодоления фундаментальной модой порога генерации, не превышала 4000 см^{-1} . Такое наибольшее значение усиления дает эксперимент.

Для проверки выполнения наших критериев необходимо было проверять большое количество вариантов изменения слоев. Однако были выявлены 4 ключевых граничных для структур варианта изменения показателей преломления слоев, которые показаны на рис. 2.

Варианты, в которых уменьшается показатель преломления обкладочных слоев и одновременно обеспечивается сохранность нулевой моды при максимальном смещении пика интенсивности от активной области (рис. 2(а), (б)), важны для проверки сохранения условий одномодовости генерации. Варианты, в которых увеличивается показатель преломления обкладочных слоев и также одновременно обеспечивается максимальное смещение пика интенсивности нулевой моды от активной области (рис. 2(в), (г)), важны для проверки работоспособности структуры при максимальном вытекании в поглощающие слои. Также эти описанные 4 случая выявляли наибольшее отклонение параметра d/Γ основной моды.

Т а б л и ц а 2

Названия, составы и толщины слоев подобранной гетероструктуры

№ слоя	Назначение слоя	Состав слоя	Толщина слоя, мкм	Показатель преломления
1	Металлический контакт	Au	–	0.24
2	Полупроводниковый контактный (<i>p</i> -эмиттерный) слой	GaAs	0.16	3.53
3	Обкладочный слой	Al _{0.32} Ga _{0.68} As	0.3	3.32
4	Волноводный слой	Al _{0.11} Ga _{0.89} As	1.1	3.45
5	Барьерный слой	Al _{0.29} Ga _{0.71} As	0.05	3.34
6	Переходной слой	GaAs	0.04	3.53
7	Активный квантово-размерный слой	InGaAs	0.008	3.48
8	Переходной слой	GaAs	0.04	3.53
9	Барьерный слой	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	0.04	3.33
10	Волноводный слой	Al _{0.11} Ga _{0.89} As	1.0	3.45
11	Обкладочный слой	Al _{0.17} Ga _{0.83} As	1.2	3.41
12	Подложка (<i>n</i> -эмиттерный слой)	GaAs	–	3.528

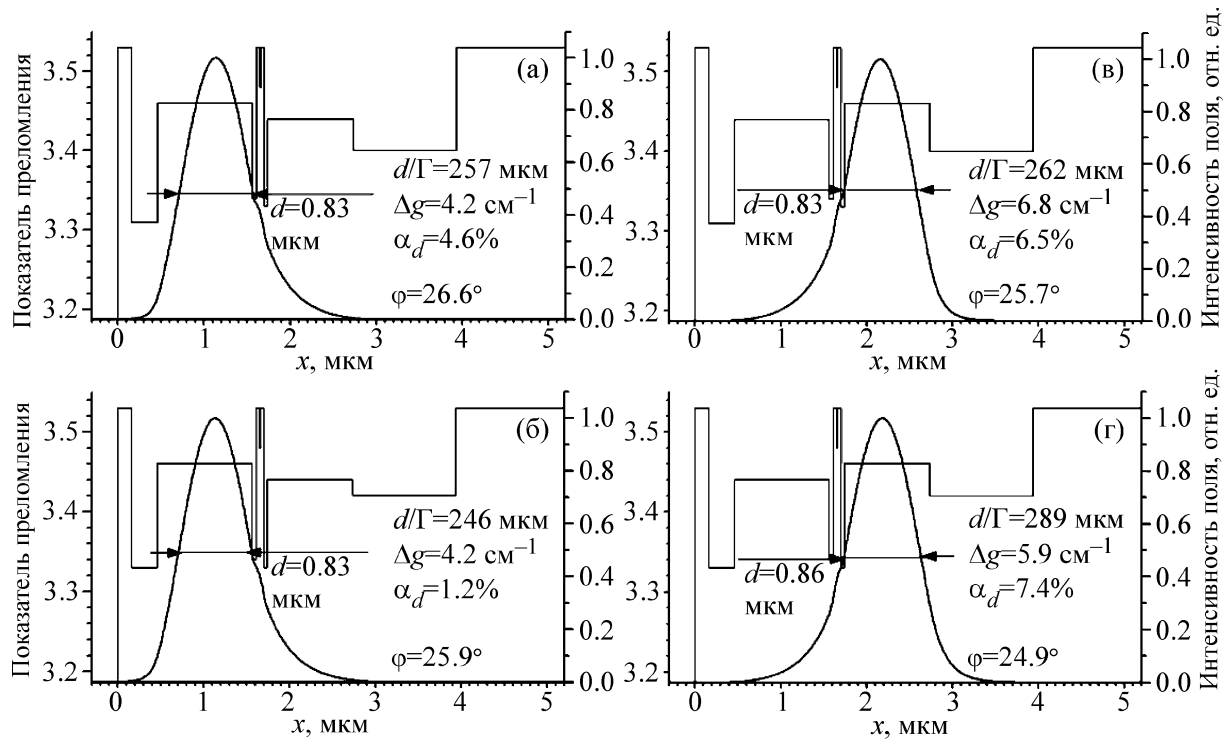


Рис. 2: Вертикальные распределения ближнего поля фундаментальной моды и параметры качества для волноводов, соответствующих структурам, отличающимся от подобранной структуры уменьшением показателя преломления активной области n_a на 0.1 и: (а), (в) – увеличением показателя преломления всех слоев левого волновода на 0.01 при его уменьшении для всех слоев правого волновода на 0.01 и уменьшении (а) или увеличении (в) его для обкладочных слоев на 0.01; (б), (г) – уменьшением показателя преломления всех слоев левого волновода на 0.01 при его увеличении для всех слоев правого волновода на 0.01 и уменьшении (б) или при увеличении (г) его для обкладочных слоев на 0.01. Тонкими линиями приведены распределения показателей преломления в соответствующих структурах.

Результаты. На рис. 1 представлено распределение вертикального профиля ближнего и дальнего поля, наборы волноводных параметров и профиль показателя преломления слоев структуры, подобранной с помощью предложенного нами метода. В табл. 2 приведены параметры слоев этой гетероструктуры. На рис. 2 представлены искажения вертикального профиля ближнего поля и наборы волноводных параметров для подобранной нами структуры в случае отклонений параметров слоев, введенных по нашей методике проверки стабильности излучательных характеристик.

Обсуждение. Как показано на рис. 1(б) доля излучения нулевой моды, туннелирующей из волновода в сторону подложки, составила 3.3%. На диаграмме направленности дальнего поля виден боковой пик, соответствующий этому вытеканию. Δg составил при этом 12.4 см^{-1} , что удовлетворяет критерию одномодовости.

Из данных, полученных нами при расчетах искажений конфигураций ближнего поля и изменений волноводных параметров, следует, что подобранная структура устойчива к отклонениям показателей преломления слоев и удовлетворяет введенному нами критерию стабильности. Граничные варианты просчитывавшихся отклонений слоев представлены на рис. 2. Видно, что сохраняется оптимизация структуры по отношению d/Γ , туннелирование излучения из волновода нулевой моды в эмиттерные слои не превышает 7%, а величина параметра Δg превышает 4 см^{-1} , что свидетельствует о сохранении одномодовой генерации.

Попытки дальнейшего расширения ближнего вертикального поля за счет добавления слоев волновода ограничивались уменьшением дефицита ненулевых мод относительно нулевой моды или ростом вытекания излучения основной моды из волновода в эмиттерные слои. Добавление слоев, смещающих максимум интенсивности первых и вторых мод из активной области, решает проблему недостаточных дефицитов усиления мод 1 и 2 порядка, но при этом возникает вероятность генерации мод более высоких порядков при определенном сочетании отклонений параметров слоев волновода от заданных. Увеличение вытекания излучения в поглощающие слои для решения проблемы возбуждения ненулевых мод также неэффективно, т.к. дальнейшее ослабление волновода сопровождалось значительным увеличением потерь для фундаментальной моды. При данном выборе критерия стабильности, по-видимому, существует ограничение расширения вертикального профиля ближнего поля на уровне 1.6–1.7 мкм, которое и достигнуто в данной работе. Оно обусловлено “силой” волновода, и не зависит от конфигурации (числа, толщин и показателей преломления слоев) волновода, эту “силу” обеспечивающего.

Выводы. Предложена методика подбора структуры с расширенным волноводом, обладающей устойчивостью волноводных параметров к вариациям составов слоев, по принципу максимизации селективности туннелирования излучения из волновода в эмиттерные слои для ненулевых мод. По этой методике была подобрана структура, оптимизированная по параметру отношения d/Γ и отвечающая указанным критериям. Подобранная структура имеет ширину области, занимаемой излучением, $d \sim 1.6$ мкм, отвечает критерию устойчивости, а также отличается малым вытеканием излучения в подложку и имеет повышенную устойчивость распределения поля волноводной моды к отклонениям составов слоев.

Работа была выполнена в рамках темы № 01201156501 “Исследование свойств оптоэлектронных материалов и структур и возможностей их использования в лазерной технике, информатике и медицине” при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ МОЛ_А_2012 № 12-02-31345 и УНК ФИАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. В. Акимова, А. П. Богатов, А. Е. Дракин, В. П. Коняев, Квантовая электроника **38**(11), 647 (1998).
- [2] Д. Р. Мифтахутдинов, И. В. Акимова, А. П. Богатов и др., Квантовая электроника **25**(7), 993 (2008).
- [3] Д. Р. Мифтахутдинов, А. П. Богатов, А. Е. Дракин, Квантовая электроника **40**(7), 583 (2010).
- [4] Д. Р. Мифтахутдинов, А. П. Богатов, А. Е. Дракин, Квантовая электроника **40**(7), 589 (2010).
- [5] С. А. Плисюк, Д. В. Батрак, А. П. Богатов, А. Е. Дракин, Квантовая электроника **36**(11), 1058 (2006).
- [6] А. П. Богатов, А. Е. Дракин, А. А. Стратоников, В. П. Коняев, Квантовая электроника **30**(5), 401 (2000).
- [7] А. П. Богатов, Т. И. Гущик, А. Е. Дракин и др., Квантовая электроника **38**(10), 935 (2008).
- [8] G. Erbert, F. Bugge, J. Fricke, et al., IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **11**(5), 1217 (2005).
- [9] S. Ishizaka, K. Muro, T. Fujimoto, Y. Yamada, Патент US5764668 (1998).

- [10] A. A. Strattonnikov, A. P. Bogatov, A. E. Drakin, F. F. Kamenets, Appl. Opt. **4**, 535 (2002).
- [11] В. В. Поповичев, Е. И. Давыдова, А. А. Мармалюк и др., Квантовая электроника **32**(12), 1099 (2002).

Поступила в редакцию 1 апреля 2013 г.