

Новые диодные лазеры с вытекающим излучением в оптическом резонаторе

В.И.Швейкин, В.А.Геловани

Представлен новый тип широкоапертурного мощного и высокоэффективного полупроводникового лазера с вовлечённым в лазерную генерацию излучением, вытекающим из активной области. Описан принцип его работы. Впервые созданы одномодовые полупроводниковые лазеры с выходными апертурами на оптической грани 5×6 мкм, 7×7.5 мкм и 10×10 мкм и дифракционными углами расходимости излучения от 6.9° до 12° в вертикальной плоскости и от 3.3° до 7.8° в горизонтальной. На длине волны 980 нм получена мощность излучения 0.5 Вт в непрерывном одномодовом и одночастотном режиме с дифракционными углами расходимости в горизонтальной и вертикальной плоскостях 5.7° и 12.3° . В многомодовом режиме при ширинах гребня 10 и 50 мкм получены мощности излучения 1.3 и 3.0 Вт соответственно с малыми углами расходимости.

Ключевые слова: диодный лазер, вытекающее излучение, оптический резонатор, апертура и расходимость излучения.

1. Введение

Полупроводниковые инжекционные лазеры – компактные и эффективные диодные преобразователи энергии электрического тока в лазерное излучение – стали ключевыми и незаменимыми элементами в таких современных достижениях цивилизации, как оптические телекоммуникации, устройства оптической памяти, волоконные и твердотельные лазеры, лазерная печать, лазерная медицина, обработка материалов и многое другое.

Самые распространённые в настоящее время торцевые диодные лазеры (ДЛ) имеют один существенный недостаток – малый вертикальный размер излучающей площадки на выходной грани, обычно составляющий около 1 мкм и менее. Это принципиальное для ДЛ обстоятельство определяет высокую плотность лазерного излучения на его выходной грани и большую расходимость лазерного излучения в вертикальной плоскости. Высокая плотность излучения ограничивает уровень выходной мощности из-за катастрофического разрушения грани и существенно снижает надёжность и ресурс работы ДЛ в режимах с близкими к предельным плотностями мощности излучения на выходном зеркале.

Так, для одномодового ДЛ при типичной ширине поперечного контакта $w = 3$ мкм и предельной плотности мощности разрушения грани (без упрочняющих покрытий) $p_{cr} \approx 10^6$ Вт/см² максимально достижимая мощность излучения оценивается в 30 мВт, а для многомодового ДЛ с $w = 100$ мкм – в 1 Вт. Углы расходимости θ_{ver} в вертикальной плоскости (по уровню 0.5) обычно составляют $25^\circ - 45^\circ$, что часто усложняет конструкцию приборов и приводит к значительным потерям при вводе излучения в одномодовые волоконные световоды. В связи с этим увеличение размера излучающей площадки на вы-

ходной грани ДЛ в вертикальной плоскости имеет большое практическое значение.

Известны лишь немногие работы [1–6], где предложены и реализованы диодные лазеры с увеличенным размером излучающей площадки, в которых используется вытекающее излучение. Общим для них является то, что развитие лазерной генерации идет в тонкой волноводной активной области (как в обычных торцевых ДЛ), а выходящим излучением является вытекающее в полупроводниковую подложку излучение. Несмотря на достигнутое высокую направленность выходного излучения ($\theta_{ver} = 1.2^\circ$ [4] и даже 0.45° [5]), этим ДЛ присущи следующие недостатки:

- использование подложки в качестве области распространения излучения ограничивает выбор как лазерных длин волн (из-за требования прозрачности подложки), так и необходимых углов вытекания, особенно в области их малых значений;

- наличие на одной грани расположенных рядом каналов излучений (вытекающего и традиционного торцевого) приводит к снижению эффективности ДЛ из-за технологической трудности разделения этих излучений.

В [7, 8] предложены конструкции ДЛ, в которых заложены новые принципы вовлечения в лазерную генерацию излучения, вытекающего при определённых условиях из активной области (оптического волновода). Эти конструкции ДЛ с вытекающим излучением в оптическом резонаторе (далее ДЛ-ВИОР) обладают многими достоинствами, в том числе многократно увеличенным размером излучающей площадки на выходной поверхности ДЛ. В настоящей работе рассмотрены основные особенности одной из таких конструкций и приведены первые результаты измерения ее основных параметров.

2. Принцип работы ДЛ-ВИОР

Схема одной из возможных простейших конструкций гетероструктуры для ДЛ-ВИОР с длинами волн в диапазоне примерно 900–1100 нм представлена на рис.1. Ак-

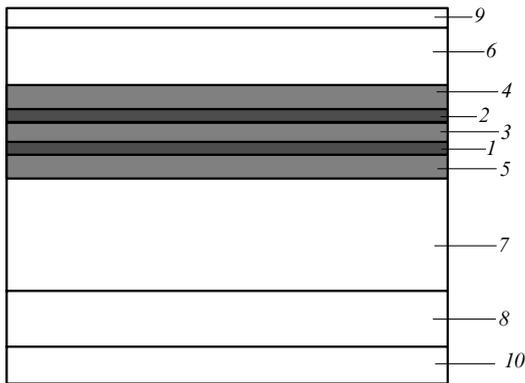


Рис.1. Схема простейшей конструкции гетероструктуры для ДЛ-ВИОР: 1, 2 – активные слои из InGaAs; 3, 4, 5 – барьерные слои из GaAs; 6 – ограничительный слой (*p*-типа); 7 – слой вытекания; 8 – отражательный слой (*n*-типа) для вытекающего излучения; 9 – контактный слой *p*⁺-типа; 10 – подложка *n*-типа из GaAs.

тивная область гетероструктуры состоит из двух активных квантоворазмерных слоёв 1 и 2 из InGaAs и трёх барьерных слоёв 3, 4 и 5 из GaAs. Со стороны *p*-контакта на барьерном слое 4 расположен ограничительный слой 6 из Al_{*x*}Ga_{1-*x*}As, к которому примыкает сильнолегированный контактный слой *p*⁺-GaAs 9. Со стороны *n*-контакта барьерный слой 5 граничит со слоем втекания 7 из Al_{*y*}Ga_{1-*y*}As, имеющим, как правило, наибольшую толщину (примерно 3–10 мкм и более). Далее на подложке 10 *n*-типа из GaAs размещён отражательный (для вытекающего излучения) слой 8 из Al_{*x*}Ga_{1-*x*}As, для которого *x* > *y*.

Несмотря на внешнюю схожесть обычных лазерных гетероструктур с гетероструктурами для ДЛ-ВИОР, радикальное различие между ними состоит в том, что если в первых вытекающее излучение стараются снизить практически до нуля (поскольку это потери лазерного излучения), то в ДЛ-ВИОР, напротив, в области рабочих токов обеспечивается достаточно высокий уровень перехода излучения из активного слоя в слой втекания. Управление вытеканием излучения осуществляется таким выбором состава и толщин слоёв лазерной гетероструктуры, в том числе и технологически введенного слоя втекания, при котором, по крайней мере в заданном интервале токов, показатель преломления слоя втекания n_{in} превышает эффективный показатель преломления n_{eff} гетероструктуры [7, 8].

При этом вытекающее из активного слоя излучение, распределённое по всей его поверхности (а следовательно, имеющее малый угол расходимости), будет входить в слой втекания вдоль продольной оси оптического резонатора под углами $\varphi = \pm \cos(n_{eff}/n_{in})$ в двух противоположных направлениях. В рассматриваемом здесь случае, когда $\tan \varphi$ в несколько (два-три и более) раз превышает отношение толщины слоя втекания d_{in} к длине оптического резонатора L_{cav} , вытекающее излучение многократно отражается в вертикальной плоскости от ограничительного и отражающего слоёв, а также от зеркал оптического резонатора (с коэффициентами отражений R_1 и R_2), в результате чего в ДЛ-ВИОР формируется излучение в виде волноводной моды. Выходное излучение при этом будет направлено практически под прямым углом к плоскости выходной оптической грани, а диа-

грамма его направленности будет зависеть, главным образом, от номера возбуждённой моды и от толщины слоя втекания.

Фундаментальной особенностью ДЛ-ВИОР является возможность устойчивой работы в режиме основной моды даже при больших толщинах слоя втекания, по крайней мере вплоть до экспериментально проверенных нами значений 10 мкм. Это позволило многократно (до 10 мкм) увеличить размер выходной апертуры в вертикальной плоскости и получить при этом угол расходимости излучения $\theta_{veg} = 6.9^\circ$, тогда как в известных ДЛ с расширенным волноводом [9] уже при ширине волноводного слоя свыше 1 мкм возникают поперечные моды высоких порядков. Такое существенное отличие объясняется принципиально другим механизмом формирования мод в ДЛ-ВИОР – номер возбуждаемой моды в них жёстко определяется углом вытекания φ , который в свою очередь зависит от толщины слоя втекания d_{in} .

Для создания эффективных ДЛ-ВИОР с высоким качеством излучения необходимо контролировать токовую зависимость коэффициента локализации Γ оптического излучения в активном слое. При малых плотностях токов для обеспечения низких порогов лазерной генерации желательно, чтобы коэффициент Γ был относительно велик и сравним с таковым для обычных ДЛ. При этом вытекающее излучение может быть незначительным или даже практически отсутствовать. После достижения порога генерации достаточно лишь поддерживать пороговый уровень излучения в активном слое во всём диапазоне. Теперь вытекающее излучение будет возрастать с увеличением надпорогового тока, и при достаточном превышении порога генерации коэффициент локализации Γ в активном слое ДЛ-ВИОР может стать на один-два порядка (и более) меньше такового для обычных ДЛ.

3. Эксперимент

Основное внимание при создании ДЛ-ВИОР было сосредоточено на получении лазерного излучения с длиной волны в области 980 нм, которое широко используется для накачки волоконных усилителей и лазеров. Перед выращиванием гетероструктуры проводились численные расчёты, обеспечивающие выполнение приведённых выше условий по вытеканию излучения в ДЛ-ВИОР.

Гетероструктуры для ДЛ-ВИОР на подложках из *n*-GaAs были изготовлены методом МOCVD при пониженном давлении. Оба напряжённых квантоворазмерных активных слоя состава In_{0.20}Ga_{0.80}As имели толщину 8 нм. Толщина барьерного слоя между ними составляла 12 нм. Ограничительный и отражательный слои *p*- и *n*-типа соответственно имели один и тот же состав Al_{0.3}Ga_{0.7}As и одну и ту же толщину 1 мкм. Слой втекания *n*-типа был выращен из нелегированного Al_{0.21}Ga_{0.79}As *n*-типа толщиной 5 мкм. Толщина сильнолегированного контактного слоя GaAs *p*⁺-типа была равна 0.1 мкм.

Активный элемент ДЛ-ВИОР гребнёвого (ridge) типа изготавливался ионным травлением с последующим заравниванием вытравленных боковых областей полужонированием селенидом цинка [10]. Ширины накачиваемых током гребней были выбраны равными 6, 10, 15, 20 и 50 мкм. Омические контакты к *p*-стороне формировались лазерным распылением тонких слоёв Ni, легированного Zn, затем барьерных слоёв Mo–Ti–Ni с последующим термическим напылением Au. Омические контакты к

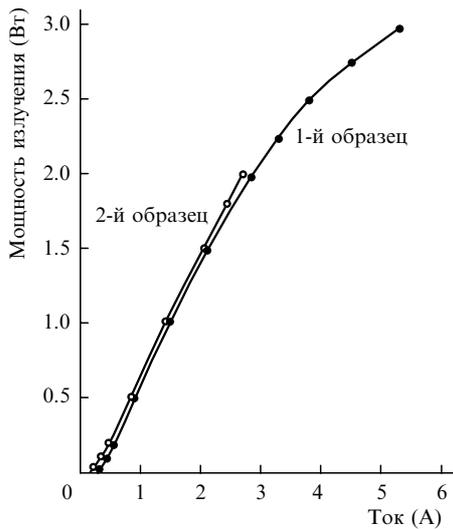


Рис.2. Ватт-амперная характеристика ДЛ-ВИОР с шириной гребня 50 мкм для 1-го образца ДЛ-ВИОР, питаемого на медную пластину гетероструктурой вниз, и 2-го образца, питаемого гетероструктурой вверх.

подложке *n*-GaAs были получены обычным способом – термическим распылением Ge – Au.

Сборка ДЛ-ВИОР проводилась стандартным способом. Активные элементы ДЛ-ВИОР спаивались с использованием индиевого припоя на медную пластину размером $2 \times 3 \times 4$ мм, которая устанавливалась в цилиндрический корпус диаметром 11 мм. Корпус механически крепился к теплоотводящей массе. Все измерения ДЛ-ВИОР проводились в непрерывном режиме работы без использования принудительного охлаждения.

Сначала были изготовлены и исследованы пять групп образцов ДЛ-ВИОР с шириной гребня $w = 50$ мкм. У четырех групп образцов на одну сколотую грань было нанесено глухое отражающее покрытие с коэффициентом отражения $R_1 \approx 95\%$, а на другую – покрытие с $R_2 = 3\%$, 10% , 30% (нейтральное покрытие) и 80% соответственно. Образцы из пятой группы не имели покрытий на зеркальных гранях, поэтому у них $R_1 = R_2 \approx 30\%$. Длины оптического резонатора L_{cav} лазеров всех групп делались равными 600, 1000 и 1600 мкм.

На всех образцах измерялись ватт-амперные (ВТАХ) и вольт-амперные (ВАХ) характеристики, а также распределение излучения в дальнем поле (ДП) в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Пороговые плотности токов j_{th} у большинства образцов составляли 200–330 А/см². Наклонная (дифференциальная) эффективность η_d в первых трёх группах образцов была равна 52%–79%, а в четвертой группе (с $R_2 = 80\%$) – около 33%.

Ватт-амперные характеристики двух образцов ДЛ-ВИОР с $w = 50$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм и $R_2 = 10\%$ показаны на рис.2. Достиженная мощность излучения 1-го образца $P = 3$ Вт. Загиб ВТАХ при токах более 2 А связан с перегревом. Измерения мощности для 2-го образца, установленного, в отличие от 1-го, на медную пластину гетероструктурой вверх, были проведены только до 2 Вт. Видно, что до мощности 2 Вт ВТАХ обоих образцов практически идентичны, несмотря на радикальные различия в монтаже кристаллов лазеров.

Дальнее поле излучения в вертикальной плоскости для ДЛ-ВИОР без покрытий (пятая группа образцов)

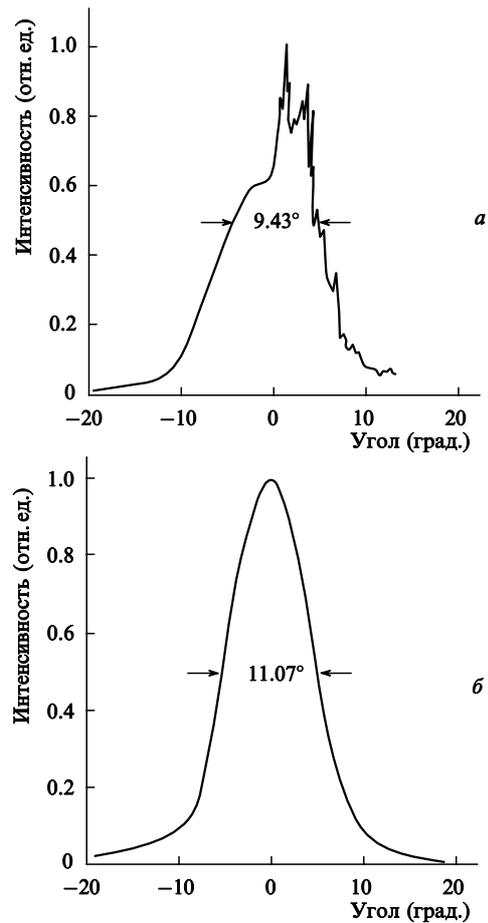


Рис.3. Распределение излучения в дальнем поле в вертикальной плоскости для ДЛ-ВИОР с шириной гребня $w = 50$ мкм без нанесения покрытий на оптические грани (а) и после нанесения отражающего покрытия с $R_2 = 95\%$ на одну оптическую грань (б).

имеет необычный вид (рис.3,а). Нанесение на одну грань всех образцов глухого отражающего покрытия с $R_1 \approx 95\%$ приводило к сглаживанию картины излучения (рис.3,б). При этом в зависимости от значений L_{cav} или R_2 угол расходимости θ_{ver} находился в пределах $11.07^\circ - 12.3^\circ$. Для этих ДЛ-ВИОР с $w = 50$ мкм отмечена также очень слабая зависимость угла θ_{ver} (по уровню 0.5) от

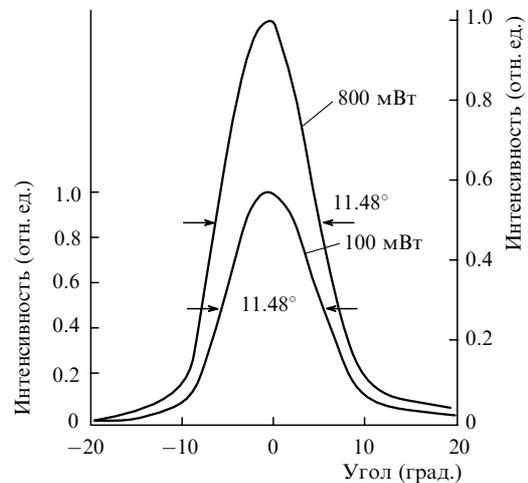


Рис.4. Распределение излучения в дальнем поле в вертикальной плоскости для ДЛ-ВИОР с $w = 50$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм и $R_2 = 10\%$ при мощности излучения 100 и 800 мВт.

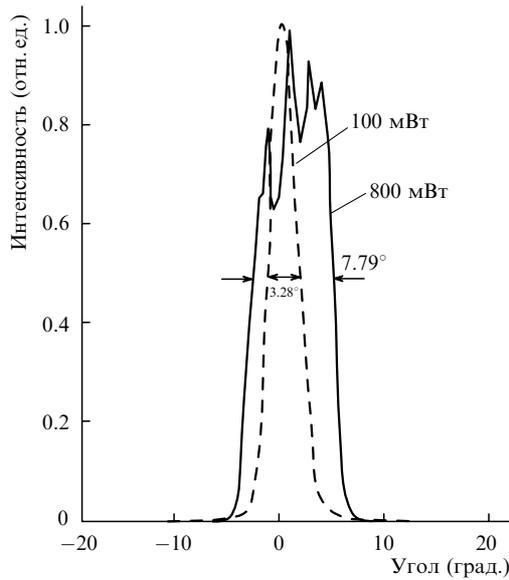


Рис.5. Распределение излучения в дальнем поле в горизонтальной плоскости для ДЛ-ВИОР с $w = 50$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм и $R_2 = 10\%$ при мощности излучения 100 и 800 мВт.

излучаемой мощности (рис.4), в то время как угол расходимости θ_{hor} (по уровню 0.5) в горизонтальной плоскости, напротив, с увеличением мощности излучения возрастал от 3.28° при 100 мВт до 7.8° при 800 мВт (рис.5). Представленные на рис.4 и 5 картины ДП свидетельствуют о том, что эти лазеры с $w = 50$ мкм генерируют лазерное излучение в одной пространственной моде при мощности не менее 100 мВт.

Анализ зависимостей η_d от α_{out} и j_{th} от α_{out}^{-1} (где $\alpha_{out} = L_{cav}^{-1} \ln(R_1 R_2)^{-0.5}$) позволил оценить внутренние параметры ДЛ-ВИОР, а именно внутреннюю квантовую эффективность η_{int} , оптические нерезонансные потери α_{int} и значение $2j_0 + j_{leak}$, где j_0 – плотность тока инверсии носителей в одной квантовой яме, а j_{leak} – возможная плотность надбарьерного тока утечки. Установлено, что $\eta_{int} = 87\%$, $\alpha_{int} = 4.0 \pm 1.0 \text{ см}^{-1}$ и $2j_0 + j_{leak} = 101 \text{ А/см}^2$. То, что $\alpha_{int} = 4.0 \text{ см}^{-1}$, свидетельствует о невысоком качестве выращенной гетероструктуры и объясняет недостаточно высокие значения η_d для рассматриваемых ДЛ-ВИОР. Отметим, что рассчитанные на основе измерений ВАХ в интервале токов 0.4–1.4 А дифференциальные сопротивления диодов составили $1.24 \times 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

На рис.6 приведены ВАХ для двух ДЛ-ВИОР с шириной гребня $w = 10$ мкм. Коэффициенты отражения граней R_1 и R_2 равнялись 95% и 7%, а длина резонатора $L_{cav} = 1600$ мкм. Выходные мощности были измерены до значений $P = 1$ Вт (3-й образец) и 1.3 Вт (4-й образец). Пороговый ток 3-го образца $j_{th} = 70$ мА, а максимальная наклонная эффективность $\eta_d = 58\%$. В отличие от рассмотренных ДЛ-ВИОР с $w = 50$ мкм, в данном случае угол расходимости θ_{ver} возрастал от 11.5° до 12.3° с увеличением мощности излучения от 100 до 1000 мВт. Лазеры устойчиво генерировали на одной пространственной моде вплоть до мощности 0.5 Вт. При изменении мощности от 50 до 500 мВт расходимость излучения является дифракционной, а угол θ_{hor} возрастает от 3.3° при 300 мВт до 5.7° при 500 мВт (рис.7). С дальнейшим увеличением мощности вплоть до 1 Вт одна мода по поперечному индексу в вертикальной плоскости сохраняется при увеличении θ_{ver} до 12.3° , а в горизонтальной

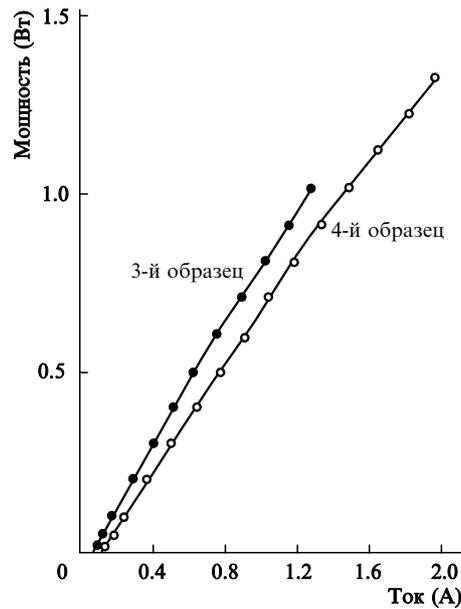


Рис.6. Ватт-амперные характеристики для ДЛ-ВИОР с $w = 10$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм, $R_1 = 95\%$ и $R_2 = 7\%$.

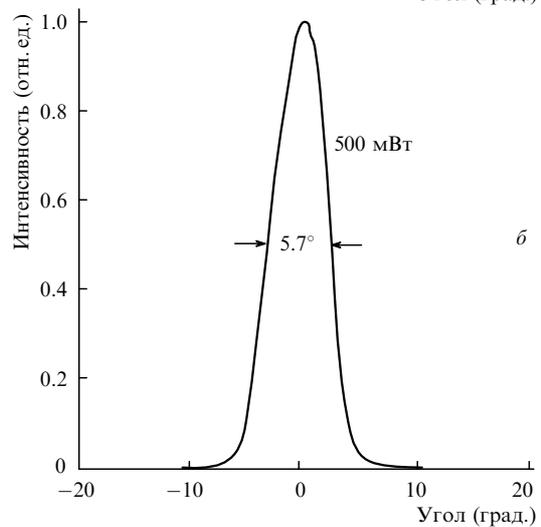
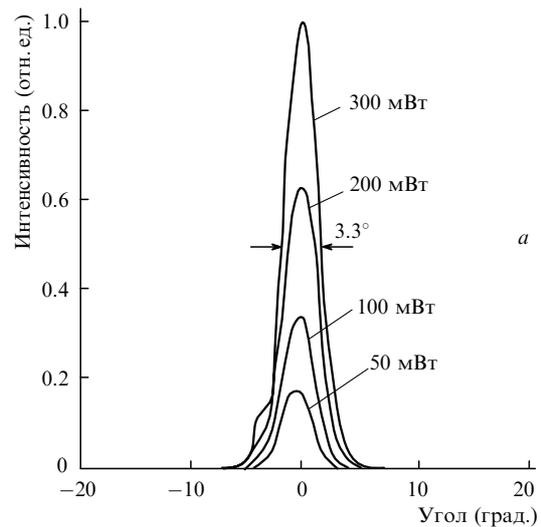


Рис.7. Распределение излучения в дальнем поле в горизонтальной плоскости для ДЛ-ВИОР с $w = 10$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм, $R_1 = 95\%$, $R_2 = 7\%$ при мощности излучения от 50 до 300 мВт (а) и 500 мВт (б).

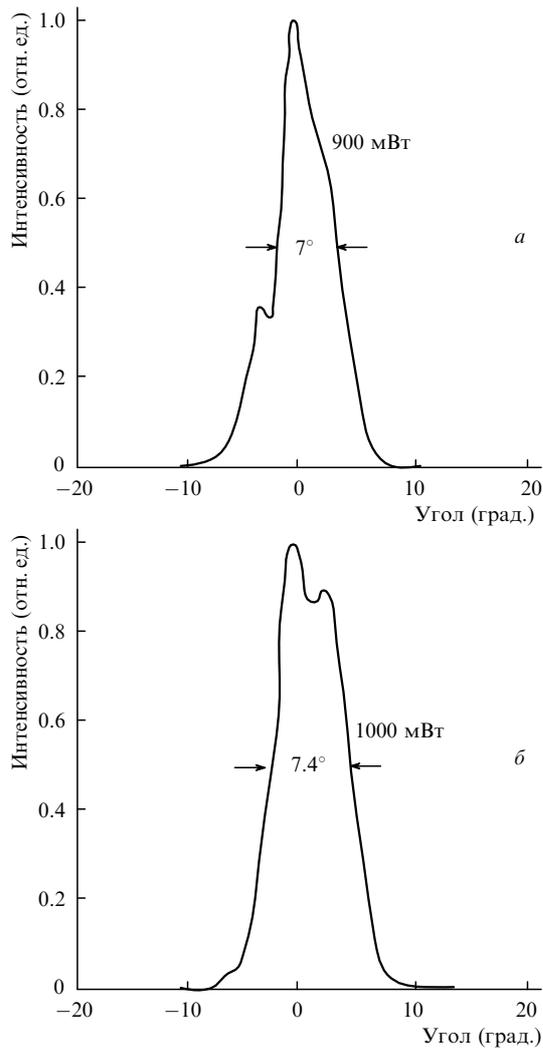


Рис.8. Распределение излучения в дальнем поле в горизонтальной плоскости для ДЛ-ВИОР с $w = 10$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм, $R_1 = 95\%$, $R_2 = 7\%$ при мощности излучения 900 (а) и 1000 мВт (б).

плоскости (рис.8) возникает «слабая игра мод», при которой угол θ_{hor} увеличивается до 7.0° (т.е. примерно на 13%).

Были также изготовлены ДЛ-ВИОР с длиной волны лазерного излучения 915 нм. Основные особенности гетероструктур для этих ДЛ-ВИОР состояли в том, что слой втекания в них был выращен из $Al_{0.30}Ga_{0.70}As$ и его

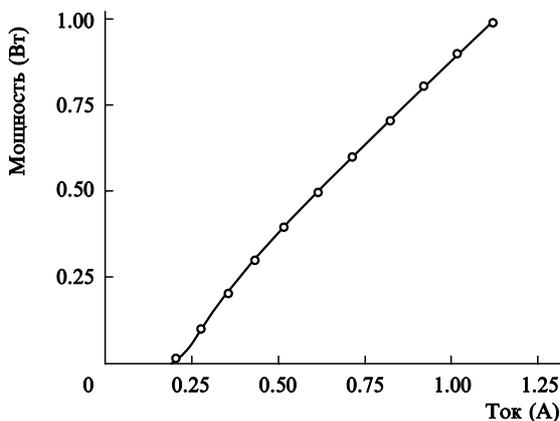


Рис.9. Ватт-амперные характеристики для ДЛ-ВИОР на $\lambda = 915$ нм с $d_{in} = 7$ мкм, $w = 7.5$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм, $R_1 = 95\%$ и $R_2 = 5\%$.

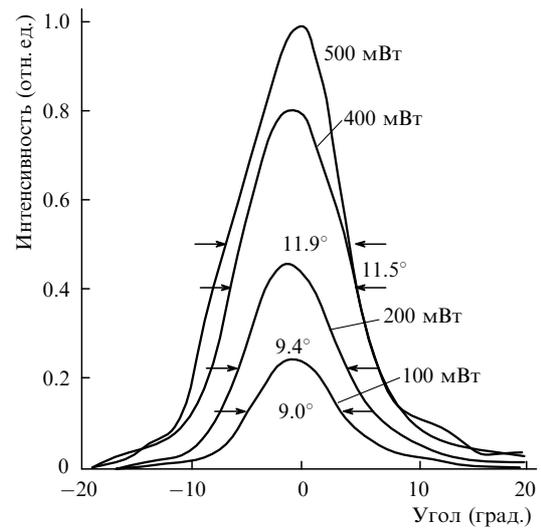


Рис.10. Распределение излучения в дальнем поле в вертикальной плоскости для ДЛ-ВИОР на $\lambda = 915$ нм при мощности излучения от 100 до 500 мВт.

толщина была увеличена до 7 мкм, а ограничительный и отражательный слои выращивались из $Al_{0.60}Ga_{0.40}As$. Ширина гребней активного элемента (7.5 мкм) была выбрана примерно равной толщине слоя втекания, длина резонатора L_{cav} равнялась 1000 мкм, коэффициенты R_1 и R_2 составляли соответственно 95% и 5%. Максимальная мощность излучения этих ДЛ-ВИОР была равна 1 Вт (рис.9). Пороговый ток (204 мА) был относительно высоким, $j_{th} = 2.7$ кА/см².

В то же время высокие значения наклонной эффективности η_d были близки к предельным вплоть до мощностей 500 мВт, после чего наблюдалось некоторое снижение η_d (примерно до 85% при мощности $P = 1$ Вт). При этом во всём диапазоне мощностей была получена устойчивая генерация на основной поперечной моде в вертикальной плоскости, в то время как в горизонтальной плоскости устойчивый режим генерации одной пространственной моды для этих лазеров имел место вплоть до мощности 500 мВт. Угол θ_{ver} в этом случае изменялся

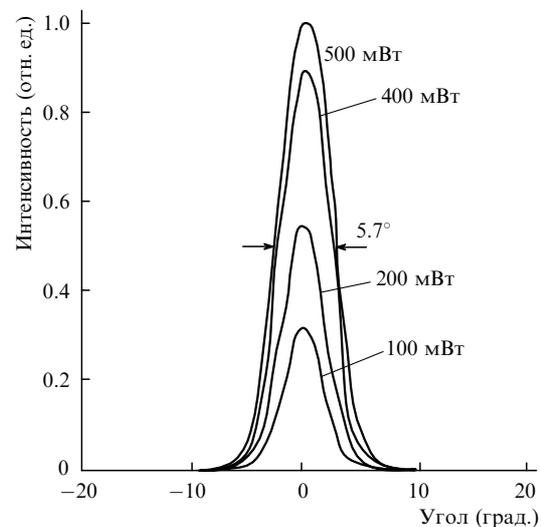


Рис.11. Распределение излучения в дальнем поле в горизонтальной плоскости для ДЛ-ВИОР на $\lambda = 915$ нм при мощности излучения 100–500 мВт.

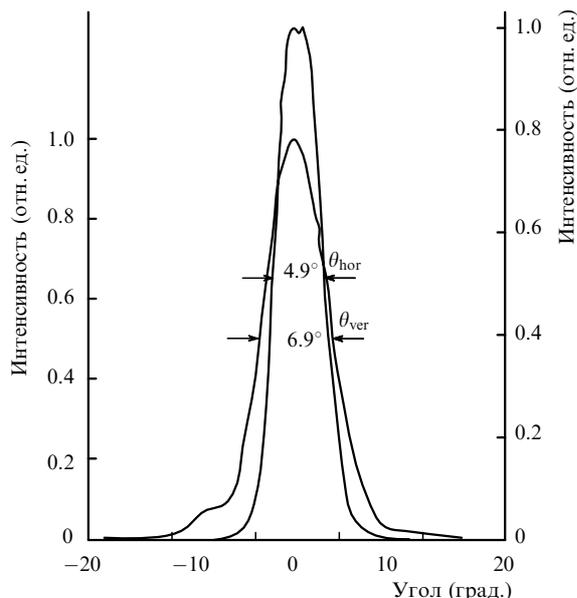


Рис.12. Распределение излучения в дальнем поле для ДЛ-ВИОР на 980 нм с размером $d_{in} = w = 10$ мкм, $L_{cav} = 1600$ мкм, $R_1 = 95\%$ и $R_2 = 12\%$ при $P = 400$ мВт в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

от 9.0° при 100 мВт до 11.9° при 500 мВт (рис.10), а угол θ_{hor} – от 4.1° при 50 мВт до 5.7° при 500 мВт (рис.11). Измерение спектра излучения этого ДЛ-ВИОР показало, что в интервале мощностей 100–500 мВт лазер генерирует в одночастотном режиме. Длина волны излучения при этом увеличилась от 916.4 нм при 100 мВт до 925.0 нм при 500 мВт.

Наименьший угол расходимости θ_{ver} в вертикальной плоскости, равный 6.9° при мощности 400 мВт и токе 1.47 А (рис.12), был достигнут на ДЛ-ВИОР с длиной волны излучения 980 нм и $d_{in} = w = 10$ мкм. Эти ДЛ-ВИОР, несмотря на большой пороговый ток $J_{th} = 1.07$ А ($j_{th} = 6.75$ кА/см²), также устойчиво генерировали в одной пространственной моде вплоть до $P = 500$ мВт и имели достаточно большое значение η_d (80%). Причинами высоких пороговых плотностей этих ДЛ-ВИОР могут быть как неоптимальная гетероструктура, так и неоптимальная конструкция гребня.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлен новый тип широкоапертурных высокоэффективных и высокоомощных полупроводниковых лазеров с вовлеченным в лазерную генерацию излучением, вытекающим из активной области. Изготовлены экспериментальные образцы этих лазеров и измерены их основные параметры в непрерывном режиме работы. Впервые реализованы одномодовые по поперечному индексу полупроводниковые лазеры с размером ближнего поля от 5 до 10 мкм и со-

ответствующими углами расходимости излучения в вертикальной плоскости от 11.1° до 6.9° . Созданы полупроводниковые лазеры с формой выходной апертуры, близкой к квадратной, с размерами 5×6 мкм, 7×7.5 мкм и 10×10 мкм. Впервые на длине волны 980 нм при ширине гребня $w = 10$ мкм с углами расходимости в вертикальной и горизонтальной плоскостях 12.3° и 5.7° и низкими пороговыми плотностями токов реализованы одномодовый лазер с мощностью излучения 0.5 Вт и лазер с высокой яркостью и мощностью излучения 1.3 Вт. Получена мощность излучения 3.0 Вт в непрерывном режиме от широкоапертурного лазерного диода с шириной гребня 50 мкм и углами расходимости 11.5° и 7.2° . Впервые получена генерация одночастотного лазерного излучения на длине волны 915 нм с мощностью 500 мВт и углами расходимости излучения 12° и 5.7° .

В заключение отметим, что при оптимизации условий эпитаксиального роста лазерных гетероструктур можно получить коэффициент потерь ДЛ $\alpha_{int} = 0.75 - 1$ см⁻¹ (см., напр., [11]). В связи с тем, что в ДЛ-ВИОР подавляющая часть излучения распространяется в прозрачном однородном нелегированном слое втекания (коэффициент локализации излучения Γ для ДЛ-ВИОР может составлять, например, 10^{-4} вместо обычных 10^{-2} для ДЛ), можно ожидать, что при использовании гетероструктур высокого качества коэффициент потерь α_{int} ДЛ-ВИОР может быть заметно меньше 1 см⁻¹. В этом случае можно рассчитывать на создание ДЛ-ВИОР с существенно большей эффективностью и мощностью, чем полученные в настоящей работе.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской программы, проведенной Корпорацией D-LED в 2000–2001 гг.

1. Scifers D.R., Burnham R.D., Streifer W. USA Patent «Leaky wave diode laser» № 4063189 (1977), H01S 3/19.
2. Scifers D.R., Streifer W., Burnham R.D. *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 23 (1976).
3. Швейкин В.И., Богатов А.П., Дракин А.Е., Курняк Ю.В. Патент РФ на изобретение «Инжекционный лазер» № 2133534 (08.08.1997).
4. Звонков Н.Б., Звонков Б.Н., Ершов А.В., Ускова Е.А., Максимов Г.А. *Квантовая электроника*, **25**, 622 (1998).
5. Швейкин В.И., Богатов А.П., Дракин А.Е., Курняк Ю.В. *Квантовая электроника*, **26**, 33 (1999).
6. Богатов А.П., Дракин А.Е., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **26**, 28 (1999).
7. Швейкин В.И. Патент РФ на изобретение «Инжекционный лазер» № 2142665 (10.08.1998).
8. Швейкин В.И. Международная заявка «Инжекционный лазер», PCT/RU99/00275 (публикация № WO00/10235 от 24.02.2002 г.) и дополнение от 5.06.2000 г.
9. Garbuzov D.Z., et al. *J. IEEE Quantum Electron.*, **33**, 2266 (1997).
10. Давыдова Е.И., Поповичев В.В., Усинский М.Б., Хлопотин С.Е. Швейкин В.И., Шишкин В.А. Патент РФ на изобретение «Инжекционный лазер» № 2035103 (26.01.1993).
11. Jun Wang, Smith B., Xiaotin Xie, Xingjiao Wang, Burnham G.T. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, № 11, 1525 (1999).