

ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ МНОГОПРОХОДНОЙ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ p-n-ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

У.Бекирев, к.ф.-м.н. bekirev@niifp.ru; С.Бабенко¹, д.т.н. babenkosvetlana@mail.ru;
В.Крюков¹, к.т.н. vitk3@mail.ru; Б.Потапов borpot@niifp.ru; А.Скипер¹ vitk3@mail.ru

Развитие современных оптоэлектронных систем передачи, записи, считывания информации невозможно без совершенствования полупроводниковых лазеров. Наиболее эффективными являются инжекционные лазеры на основе многопроходных p-n-гетероструктур. Дальнейшее улучшение характеристик лазеров можно получить при переходе к тонкопленочным многопроходным p-n-гетероструктурам. В настоящей статье впервые представлены результаты исследования полупроводниковых инжекционных лазеров на основе таких гетероструктур. В решетках тонкопленочных многопроходных лазеров достигнуты значения параметров, превосходящие параметры нетонкопленочных многопроходных лазеров.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Наиболее эффективные излучающие полупроводниковые приборы изготавливаются на основе многопроходных p-n-гетероструктур в системе соединений A³B⁵. Это связано с тем, что в результате многократных проходов излучения внутри гетероструктуры его интенсивность может многократно возрасти, значительно увеличивая тем самым и выход излучения наружу. При этом накопленное в структуре излучение может испытывать частичное самопоглощение в активной области структуры и последующее переизлучение в ней. Самопоглощение и переизлучение приводят к увеличению концентрации неосновных носителей в активной области излучающего прибора, которая

может оказаться значительно выше концентрации носителей заряда, образуемой в результате их инжекции через p-n-переход. Это обстоятельство позволяет улучшать характеристики полупроводниковых излучающих приборов на основе многопроходной p-n-гетероструктуры [1-3].

Об уменьшении пороговых токов экспериментальных инжекционных лазеров на основе многопроходных p-n-гетероструктур более чем в пять раз впервые сообщили французские исследователи [4]. Затем в НИИФП также экспериментально было показано, что пороговые токи инжекционного лазера на основе многопроходной p-n-гетероструктуры уменьшались в три – пять раз, а внешний квантовый выход возрастал с 15-20 до 60% при 300К и до 80% при 77-150К [5]. В лазерах на основе многопроходных p-n-гетероструктур значительно увеличился

¹ МГТУ им. Баумана (ООО "Мега Эпитех")

динамический диапазон рабочих токов и мощностей излучения, улучшился теплоотвод за счет большей мощности полезного излучения, выводимого из кристалла [5, 6]. Лазеры, рассматривавшиеся в указанных публикациях, изготавливались на основе выращенных жидкофазной эпитаксией гетероструктур с толщиной активной области, равной десятым долям микрометра. Пороговые и рабочие токи таких лазеров были относительно высокими. Для усиления эффектов переизлучения в активной области и улучшения характеристик излучающих приборов в НИИФП были предложены гетероструктуры с дополнительным узкозонным слоем в активной области [7–11]. Эти гетероструктуры были несколько усовершенствованы и названы гетероструктурами с внутренним усилением инжекции. Их применение в многопроходных инжекционных лазерах позволило увеличить внешний квантовый выход до 65% и более при 300К и до 85% при 77–200К [12, 13]. В гетероструктурах с дополнительным слоем обнаружилось очень полезное для излучающих приборов явление – самоохладение их активной области [13]. Наблюдавшееся экспериментально снижение температуры оценивалось примерно в 30°С. По этой причине применение оптимизированных под самоохладение излучающих гетероструктур с внутренним усилением инжекции перспективно как для светодиодов, так и для лазеров.

Приведенные значения внешнего квантового выхода, полученные в 1980–1990-е годы, были рекордными. Дальнейшее повышение внешнего квантового выхода в лазерах было достигнуто при переходе к многопроходным гетероструктурам, в которых в слой волновода и одновременно в переизлучающий активный слой микронных размеров была встроена квантовая яма. Такая гетероструктура была нами запатентована [14]. В решетке лазеров на основе такой гетероструктуры, выращенной методом МOCVD на GaAlAs-подложке толщиной ~120 мкм, мы получили внешний квантовый выход более 90% при $T=77\text{K}$ [15]. Однако при 300К внешний квантовый выход этого лазера не превышал 50%. По нашему мнению, это связано с малой глубиной квантовой ямы (менее 0,15 эВ). В результате при 300К из нее мог происходить значительный термический выброс носителей заряда и, кроме того, носители заряда в переизлучающем слое активной области вследствие неконтролируемой сильной перекомпенсации легирующими примесями могли в значительной степени рекомбинировать через хвосты плотности состояний. Энергия квантов при такой рекомбинации понижена, поэтому эффекты самопоглощения и переизлучения

не были интенсивными. Следует заметить, что высокий внешний квантовый выход более 90% при температуре 77К является следствием проявления тонкопленочности у нетонкопленочного лазера.

При низкой температуре произошло значительное уменьшение концентрации носителей заряда во всех слоях гетероструктуры за счет их вымораживания, что эквивалентно уменьшению толщины протяженных ограничивающих слоев и уменьшению поглощения излучения в них свободными носителями заряда при 300К. Кроме того, при 77К внутренний квантовый выход был примерно равен единице, интенсивность рекомбинации через хвосты плотности состояний ослабевала, поэтому эффекты самопоглощения и переизлучения стали более интенсивными. Все это и позволило получить высокий внешний квантовый выход и указало путь к повышению излучательных характеристик лазеров, а именно – улучшение параметров переизлучения в активной области и уменьшение толщины ограничивающих слоев гетероструктуры.

Объединение конструкций гетероструктур, защищенных указанными выше пятью авторскими свидетельствами [7–11], с конструкцией гетероструктуры с квантовой ямой также защищенной патентом [14], позволило получить новый тип излучающих многопроходных гетероструктур, попадающих под классификацию гетероструктур с внутренним усилением инжекции. Этот новый тип многопроходных гетероструктур был запатентован [16]. В них сохранен эффект самоохладения активной области. Они могут оказаться перспективными в дальнейших разработках.

Но работы по улучшению характеристик обычных многопроходных лазеров продолжались и имели определенный успех. В России были созданы экспериментальные лазеры на основе асимметричных InGaAsP/InP-гетероструктур с внешним квантовым выходом 60% и более [17, 18]. Ранее за рубежом внешний квантовый выход, равный 60%, был получен в мощных лазерах на основе гетероструктур с расширенным волноводом [19]. Что касается целенаправленных и осмысленных работ по инжекционным лазерам на основе излучающих многопроходных p-n-гетероструктур и посвященных им других публикаций, кроме публикаций НИИФП, нам не известно. Хотя, по-видимому, эффект многопроходности присутствует, например, в лазерах на основе асимметричных InGaAsP/InP-гетероструктур раздельного ограничения [17].

В целом можно заметить, что в перспективе рабочие и максимальные мощности лазеров на основе многопроходных гетероструктур окажутся выше,

чем лазеров без многопроходности. Связано это с тем, что дальнейшее совершенствование лазеров на основе многопроходных гетероструктур возможно за счет устранения поглощения излучения на свободных носителях в излучающем кристалле. Поглощение может быть существенным, если толщина легированных слоев многопроходной гетероструктуры составляет 100–200 мкм и более. Но при такой толщине гетероструктуры сложно изготовить светодиод, например, с внешним квантовым выходом более 30–35% или инжекционный лазер либо с повышенным внешним квантовым выходом, либо с пониженными рабочими токами.

Специалистами фирмы OSRAM (Германия) для уменьшения потерь излучения в кристалле многопроходной гетероструктуры на свободных носителях и увеличения внешнего квантового выхода светодиодов предложено изготавливать тонкопленочные светодиоды. Предлагалось уменьшить толщину кристалла до 5–50 мкм [20, 21]. Сообщается, что внешний квантовый выход таких светодиодов превысил 40%, а световая отдача составила 100 лм/Вт [22]. Разработчики OSRAM намерены превзойти полученный результат и довести квантовый выход до 75–80% [23].

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Создание тонкопленочных многопроходных лазеров в НИИФП началось с разработки конструкции такого лазера, способа его изготовления и патентования [24, 25]. Для уменьшения порогового тока при переизлучении была выращена многопроходная излучающая

гетероструктура с квантовой ямой в активной переизлучающей области, которая одновременно является и волноводом [15]. GaAlAs p-n-гетероструктуры выращивались методом MOCVD на GaAs- и GaAlAs-подложках. Толщина GaAlAs-подложки составляла 120–150 мкм, содержание AlAs – не менее 15% мол. Подложки выращивались методом жидкофазной эпитаксии. Общая толщина выращенных методом MOCVD излучающих GaAlAs p-n-гетероструктур была равна ~13–16 мкм, толщина области переизлучения – 0,3 или 1 мкм. Область переизлучения легировалась цинком до концентрации $(5-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, содержание AlAs в ней составляло ~10% мол. В середине каждой области переизлучения находилась слаболегированная GaAs-квантовая яма толщиной ~50–70 Å и глубиной ~130 мэВ. Ограничивающие p- и n-слои легировались соответственно цинком и кремнием до концентраций $\sim 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, содержание AlAs составляло ~35% мол. На рис.1 приведены распределения алюминия, цинка и кремния, снятые с помощью вторично-ионного микроскопа IMS-4F компании CAMECA. Из распределения алюминия видно, что наличие квантовой ямы четко проявилось в распределении примесей (разрешение не хуже 10 Å).

Для оценки основных характеристик излучающих гетероструктур изготавливались следующие решетки лазеров:

- немногoproходные на GaAs-подложке;
- многопроходные нетонкопленочные на GaAlAs-подложке;
- многопроходные тонкопленочные.

По конструкции решеток тонкопленочный многопроходный лазер был идентичен немногoproходному и многопроходному нетонкопленочному лазеру, описанному в литературе [5, 6].

Гетероструктура тонкопленочного лазера изготавливалась на подложке из арсенида галлия с пониженной плотностью дислокаций. Это было необходимо для обеспечения минимального дефектообразования в активной области гетероструктуры при термических процессах. Толщина излучающей гетероструктуры составляла 13–16 мкм. На поверхности гетероструктуры методами фотолитографии изготавливались омические контакты в виде полосок шириной 3–5 мкм с шагом 15 мкм. Между контактами оставался слой окисла, а затем поверх контактов и окисла наносилось металлическое (золотое) покрытие. В результате на поверхности гетероструктуры между полосковыми контактами возникало зеркальное покрытие для отражения спонтанного излучения из активной области.

На позолоченную поверхность напайвалась арсенидгаллиевая или кремниевая пластина толщиной

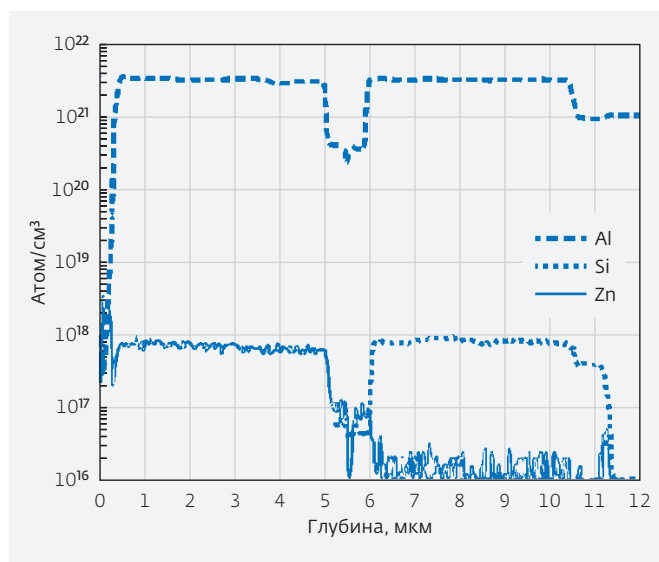


Рис.1. Распределение алюминия, цинка и кремния в GaAlAs p-n-гетероструктуре

более 100 мкм. Обе стороны напаиваемой пластины имели омические контакты. Такая пластина, названная подложкой-носителем, обеспечивала механическую прочность и электрическую проводимость прибора (рис.2). Толщина слоя припоя выбиралась так, чтобы обеспечить минимальные значения напряжения между слоями кристалла-излучателя, возникающего при термических процессах. В патенте [26] рекомендуемая толщина припоя – не более 0,1 мкм. Однако в рассматриваемом случае толщина могла быть и больше, с тем чтобы припой мог полностью компенсировать возможные неровности поверхности эпитаксиальной р-п-гетероструктуры. В качестве припоя рекомендуется применять сплав золота и серебра с температурой плавления 450–500°C. Эта температура должна быть на несколько десятков градусов выше температуры вжигания омических контактов. После напайки подложки-носителя исходная подложка арсенида галлия, на которой выращивалась излучающая р-п-гетероструктура, удалялась химическим травлением. На освободившуюся поверхность GaAlAs излучающей гетероструктуры также наносились полосковые омические контакты и проводилось их вжигание импульсным фотонным поверхностным нагревом. Это позволяло сохранить выполненное ранее паяное соединение излучающей структуры и подложки-носителя. При фотонном нагреве вместо припоя можно использовать высокотемпературный проводящий клей, например Н20Е. Теплопроводность клея хуже, чем припоя, но зато он обеспечивает минимальные значения напряжения между подложкой-носителем и гетероструктурой при термических процессах.

Ширина многопроходной области и площадь р-п-перехода лазера, задаваемая числом полосковых контактов (нами изготавливалось до восьми контактов), выделялись канавками, сформированными травлением излучающей гетероструктуры на всю ее толщину вдоль боковых полосковых контактов. На канавки и всю поверхность структуры наносился слой окисла. С контактов окисел удалялся, и вся поверхность покрывалась

металлической пленкой, которая образовывала между контактами зеркала для обеспечения отражения внутреннего спонтанного излучения. Лазерные кристаллы разделялись скрайбированием со стороны подложки-носителя и последующим раскалыванием структуры по канавкам скрайбирования. Образцы чипов лазеров с длиной резонатора Фабри-Перо в пределах 200–800 мкм выкалывались перпендикулярно полосковым контактам из созданных структур (рис.2). Нами исследовались чипы с площадью р-п-перехода до ~250×600 мкм.

Лазерное излучение в решетках многопроходных лазеров возникало как под полосковыми контактами, так и между ними. Как показали наблюдения картины ближнего поля в ИК-микроскопе, увеличение выходной мощности лазерного излучения с увеличением тока сопровождалось расширением как существующих каналов генерации, так и ростом их числа. При токах, превышающих пороговый ток в 1,5–2 раза, картина свечения на грани резонатора, как правило, состояла из двух наиболее ярких точек, расположенных у краев двух соседних полосковых контактов, между которыми находились еще по две точки за пределами

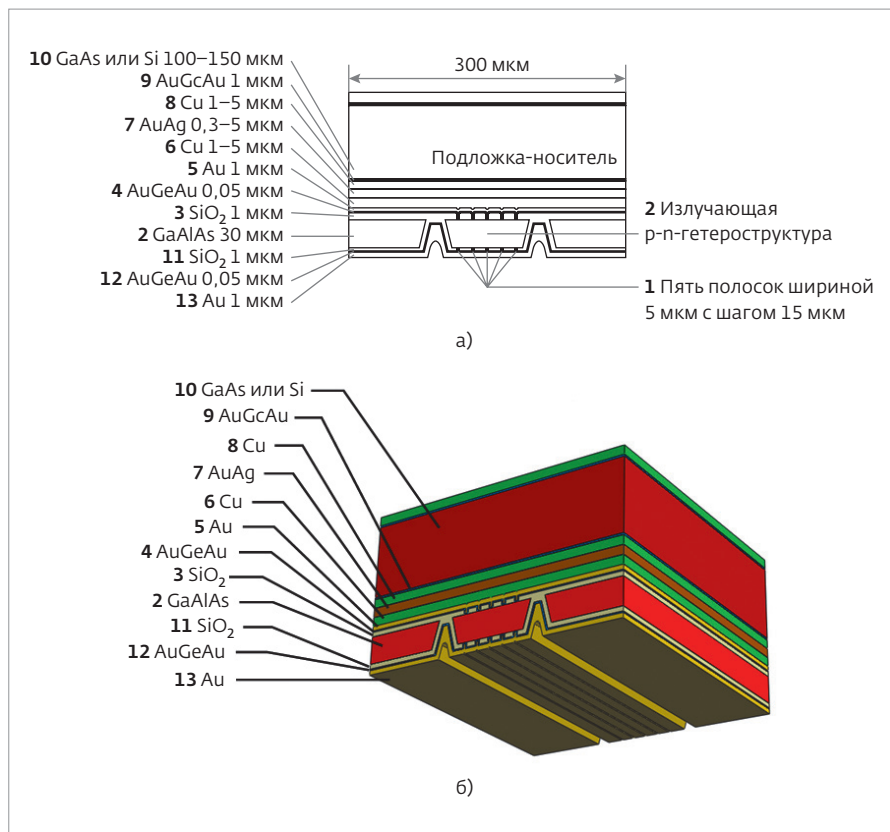


Рис.2. Исходная р-п-гетероструктура с омическими контактами (а) и тонкопленочный чип лазера (б)

этих контактов с в 1,5–4 раза меньшим свечением. Расположение точек на грани резонатора было близким к эквидистантному.

Однородность картины ближнего поля тонкопленочного многопроходного лазера при 300К в каналах лазерной генерации была больше, чем в каналах нетонкопленочного лазера. Это свидетельствует о более равномерных процессах переизлучения и накопления носителей заряда в активной области под всей поверхностью р-п-перехода. Следует заметить, что картина ближнего поля сильно зависела от качества сколов резонаторных граней. Это в большей мере относилось к тонкопленочным образцам, где сколы производились через металлизированные слои подложки-носителя и припоя.

При 300К длина волны излучения многопроходных лазеров составляла ~860 нм (рис.3), при 80К – ~830 нм. Спектр излучения лучших образцов был характерным для решеток лазеров с гетероструктурой, описанной в литературе [5, 15], и состоял из одной полосы полушириной 1,5–2 Å. Длина волны 860 нм для квантовой ямы толщиной ~7 нм ближе всего соответствует рекомбинационным

переходам носителей с уровня электронов на верхний уровень тяжелых дырок в яме.

Для снятия ватт-амперных характеристик лазеров с толщиной области переизлучения ~1 мкм (структуры с такой волноводной областью называют структурами с расширенным волноводом [27]) при токах более 1,5–2 А во избежание разогрева чипов на лазеры подавались импульсы питания длительностью 0,1–0,2 мкс с частотой повторения до 100 Гц. При 300К внешний квантовый выход лазера на основе решетки с неудаленной GaAs-подложкой, в котором многопроходность отсутствовала, едва достигал 27–30% (рис.4, кривая 1). Характеристика 2 на рис.4 соответствует многопроходному нетонкопленочному лазеру при 300 К. Его квантовый выход превысил 65%. Характеристика 3 – многопроходному тонкопленочному лазеру при 300К. Его внешний квантовый выход достигал 77%. Характеристика 4 соответствует многопроходному тонкопленочному лазеру при 77К. Для него был получен наибольший внешний квантовый выход, равный 90–92%. Такой же примерно внешний квантовый выход наблюдался нами и ранее, но для обычного нетонкопленочного многопроходного лазера [15]. Это связано с тем, что при такой температуре коэффициенты поглощения излучения свободными носителями настолько малы, что при различии толщины кристаллов-излучателей в 100–200 мкм разница в квантовых выходах не превышает 1–2%. При значениях внутреннего квантового выхода в активных областях обоих лазеров, близких к единице, интенсивности накопленного излучения и величины накопленного заряда становятся почти равными. По этой же причине различие в значениях внешнего квантового выхода тонкопленочного и нетонкопленочного лазеров мало.

Подобную ситуацию, вероятно, можно получить и при комнатной температуре. Для этого необходимо уменьшать толщину излучающей р-п-гетероструктуры, например до 5 мкм, как и предлагала фирма OSRAM [20, 21]. В такой структуре возрастают интенсивность излучения внутри кристалла лазера и накопленный заряд в активной области. Это позволяет при меньших токах перейти к квадратичной рекомбинации в этой области и получить внутренний квантовый выход, близкий к единице. Другой вариант – для создания высокоэффективного лазера использовать гетероструктуру с внутренним усилением инжекции. В этом случае можно реализовать в весьма малом объеме излучающую многопроходную р-п-гетероструктуру толщиной менее 5 мкм [28].

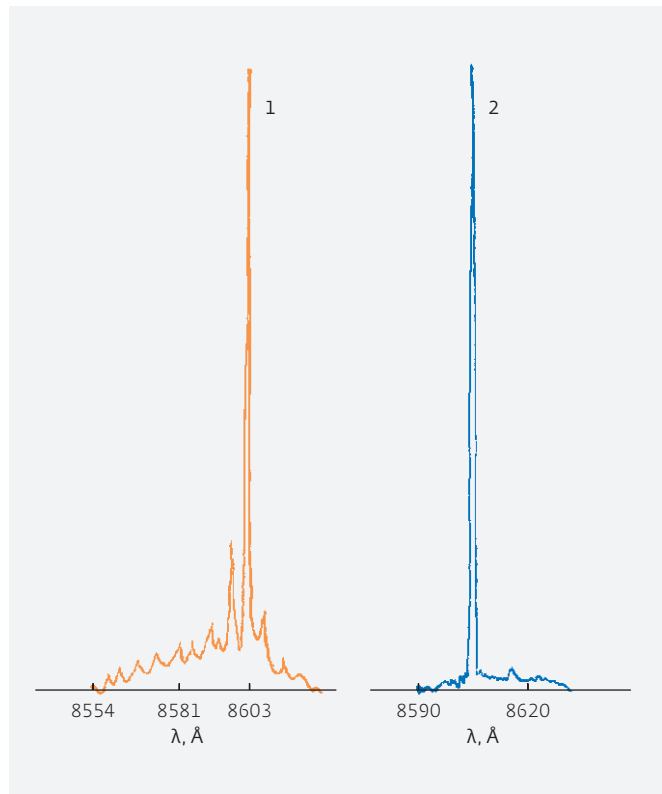


Рис.3. Нормированные спектры лазерного излучения при $T=300\text{K}$, импульсном токе ~600 мА (1) и 1,5 А (2), длительности импульсов 0,2 мкс, частоте 100 Гц

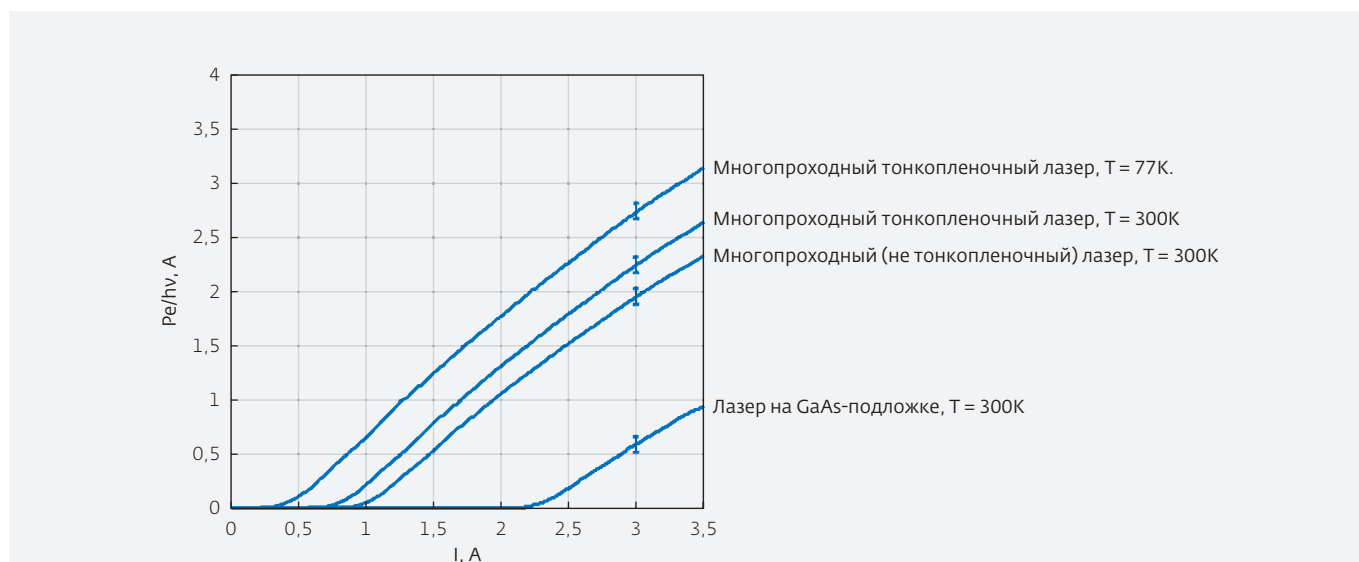


Рис.4. Ватт-амперные характеристики лазеров (P – мощность излучения в ваттах, e – заряд электрона, $h\nu$ – энергия кванта излучения)

Следует заметить, что при питании лазера более короткими и более мощными токовыми импульсами, очевидно, можно получить еще большие внешние квантовые выходы. Все это позволяет говорить о возможности почти полного преобразования электрической энергии в лазерное излучение. Публикации о столь высоких результатах для лазеров на основе многопроходных гетероструктур нам не известны.

Из детального анализа рис.4 следует, что в диапазоне токов 1-2 А дифференциальный квантовый выход превышает 100%. Этот параметр определялся как отношение приращения числа квантов лазерного излучения, выводимых наружу, к соответствующему приращению числа электронов в токе накачки. На упомянутых участках прирост квантов лазерного излучения, выводимых наружу, превосходит добавленную концентрацию электронов, инжектируемых током через p-n-переход. Согласно экспериментальным данным [5] и теоретическому анализу [15], это свидетельствует об эффективном преобразовании спонтанного излучения в лазерное.

Из характеристики 1 видно, что в многопроходном нетонкопленочном лазере с квантовой ямой пороговый ток примерно в три раза ниже, чем в таком же лазере, но без квантовой ямы, описанном ранее [5, 15]. Обсуждение этого уменьшения порогового тока [27, 15] показало, что термический выброс носителей с уровня рекомбинации в квантовой яме не позволил еще больше уменьшить пороговую плотность тока. Для предотвращения термического выброса

необходимо делать более глубокую квантовую яму. Это проще выполнить, например, в GaAlInP-гетероструктурах. Однако такой промышленной технологии в России практически нет. Тем не менее пороговый ток тонкопленочного лазера уменьшается более значительно, чем нетонкопленочного лазера. Чем меньше пороговый ток при многопроходности, тем больше диапазон рабочих токов и внешний квантовый выход лазеров. Диапазон рабочих токов расширяется не только за счет уменьшения порогового тока, но и за счет увеличения верхней границы рабочих токов. При высоком внешнем квантовом выходе больше тепла отводится лазерным излучением, отодвигая тем самым перегрев кристалла в сторону больших токов.

В итоге можно сказать, что рабочие и предельные параметры тонкопленочных многопроходных лазеров оказываются лучше, чем просто многопроходных лазеров. Кроме того, имеются предпосылки для дальнейшего улучшения параметров тонкопленочных лазеров на основе гетероструктур с внутренним усилением инжекции. Правда, это связано с усложнением технологии. Возможно, в этом и состоит новый этап совершенствования полупроводниковых излучающих приборов. Открывается возможность почти полного преобразования электрической энергии в излучение. Достигнутые значения внешнего квантового выхода в 77% при 300К являются очень высокими, а более 90% при 77К – рекордными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Халфин В.Б., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю.** Многопроходные структуры I. Спектральные и угловые характеристики излучения. – ФТП, 1976, т.10, вып.8, с.1490–1496.
2. **Алферов Ж.И., Агафонов В.Г., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Ларионов В.Р., Халфин В.Б.** Многопроходные структуры II. Внешний квантовый выход излучения. – ФТП, 1976, т.10, вып.8, с.1497–1506.
3. **Гарбузов Д.З., Ермакова А.Н., Румянцев В.Д., Трукан М.К., Халфин В.Б.** Многопроходные структуры III. Эффективное время жизни неравновесных носителей. – ФТП, 1977, т.11, вып.4, с.717–725.
4. Patent №86401106 Brilloues Unique IC's Laser a semiconducteur muni moyens de reinjection de l'emission spontanee dans la couche active / Semarge Bernard. Date of issue 26.05.86.
5. **Бекирев У.А. и др.** Решетка лазеров на основе многопроходной p-n-гетероструктуры. – Письма в ЖТФ. 1988, т.14, вып.23, с.2140–2144.
6. **Бекирев У.А., Сурис Р.А., Мухамедов А.Х., Потапов Б.Г.** Расчет параметров лазеров на основе многопроходных гетероструктур. – Тезисы докладов V Всесоюзной конференции "Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах". Калуга, 1990, т.1, с.46–47.
7. А.с. №1111645 СССР от 03.05.1984 г. (приоритет от 01.10.1982 г.). Излучательная многопроходная гетероструктура. Оpubл. 2012 г.
8. А.с. №1163777 СССР от 22.02.1985 г. (приоритет от 12.04.83 г.). Излучательная полупроводниковая гетероструктура. Оpubл. 2012 г.
9. А.с. №1157994 СССР от 22.11.1985 г. (приоритет от 12.04.1983 г.). Полупроводниковая излучательная многопроходная гетероструктура. Оpubл. 2012.
10. А.с. №1165211 СССР от 01.03.1985 г. (приоритет от 01.12.1982 г.). Полупроводниковая излучающая многопроходная гетероструктура. Оpubл. 2012.
11. А.с. №1387821 СССР от 08.12.1987 г. (приоритет от 10.12.1984 г.). Излучательная многопроходная гетероструктура. Оpubл. 2012 г.
12. **Бекирев У.А., Галченков Д.В., Гранкин М.А., Потапов Б.Г.** Высокоэффективные решетки лазеров на основе многопроходных p-n-гетероструктур с внутренним усилением инжекции. – Тезисы докладов V Всесоюзной конференции "Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах". Калуга, 1990, т. II, с.83–84.
13. **Бекирев У.А.** Самоохлаждение активной области излучающих гетероструктур. – Перспективные технологии, 1996, т.3, вып. 7/8, с.5–6.
14. Патент №2301486 России. Полупроводниковый инжекционный лазер / Бекирев У.А. Оpubл. 2007 г.
15. **Бекирев У.А., Крюков В.Л., Потапов Б.Г., Сидорова Л.П., Скипер А.В.** Характеристики полупроводникового лазера на основе многопроходной гетероструктуры. – Российские нанотехнологии, 2007, т.2, №7–8, с.128–133.
16. Патент №2012138772, Россия. Излучающие гетероструктуры с внутренним усилением инжекции / Бекирев У.А., Потапов Б.Г. Положительное решение ФИПС 2013 г.
17. **Лифшиц Д.А., Егоров А.Ю. и др.** Рекордные мощностные характеристики лазеров на основе... – ФТП2001, т.35, вып.3, с.380.
18. **Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Лешко А.Ю., Липченко С.О., Соколова З.Н., Рябоштан Ю.А., Мармалюк А.А., Тарасов И.С.** Мощные диодные лазеры ($\lambda = 1,7-1,8$ мкм) на основе асимметричных квантово-размерных InGaAsP/InP гетероструктур раздельного ограничения. – ФТП, 2009, т.43, вып.12, с.1646–1649.
19. **Mawst L.J., Bhattacharya A., Garbuzov D.Z., et al.** 8 W continuous wave front-facet power from broad-waveguide Al-free 980 nm diode lasers. – Appl.Phys. Lett., Sept. 9 1996, – 69(11), p.1532–1534.
20. Patent US6,929,966 B2 Aug.16.2005. Stefan Dleek, Andreas Plossol.
21. Patent Application Publication, Pub. No: US 2006/0180820 A1. Light-Emitting Semiconductor chip and Method For The Manufacture / Jelek S., Plossol A., Streubel K., Wegleiter, W. Wirth R.
22. **Windisc, R et al.** 100 -lm/W InGaAlP Thin-Film Light-Emitting Diodes. – IEEE Xplore, 2007, v.19, is.10, p.774–776.
23. **Bergenek K., Weismann Ch., et al.** Beam-shapping properties of InGaN thin-film micro-cavity light-emitting diodes with photonic crystals. – Proc.of SPIE, v.7231 72310C-1.
24. **Бекирев У.А., Сидорова Л.П., Тишин Ю.И.** Тонкопленочный полупроводниковый лазер. – Патент №2351047. Бюллетень, № 9, 2009.
25. Патент №2381604, Россия. Способ изготовления тонкопленочного лазера на основе тонкой многопроходной излучающей p-n-гетероструктуры / Бекирев У.А., Сидорова Л.П., Тишин Ю.И., Крюков В.Л., Скипер А.В. Оpubл. 2010 г.
26. **Stefan Jelek, Andreas Plossol, Klaus Streubel, Walter Wegleiter, Ralf Wirth.** Light-Emitting Semiconductor chip and Method For The Manufacture. – Patent Application Publication. № US2006/0180820, 2006.
27. **Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Скрынников Г.В., Соколова З.Н., Тарасов И.С., Фетисова Н.В.** О внутреннем квантовом выходе и выбросе носителей в квантово-размерных лазерах на основе InGaAs/InP. – ФТП, 2000, т.34, вып.12, с.1457–1461.
28. **Бекирев У., Потапов Б.** Некоторые особенности излучателей на основе гетероструктур с внутренним усилением инжекции. – Наст. номер. с.122.