

# Мощные полупроводниковые лазеры на гетероструктурах

И. С. Тарасов

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

**Аннотация.** В докладе представлены результаты исследований физических основ и технологии МОС-гидридной эпитаксии мощных полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур раздельного ограничения с квантовыми ямами.

— Физические основы мощных полупроводниковых лазеров с малыми внутренними оптическими потерями.

— Особенности технологии МОС-гидридной эпитаксии для мощных полупроводниковых лазеров.

— Фундаментальный предел оптической мощности полупроводниковых лазеров в импульсном и непрерывном режиме генерации.

## Введение

Полупроводниковые лазеры существуют уже более сорока лет. О мощных полупроводниковых лазерах заговорили в 80-е годы, когда излучаемая оптическая мощность в лазере со 100 мкм апертурой превысила 1 Вт в непрерывном режиме генерации.

В основе мощных полупроводниковых лазеров лежит лазерная гетероструктура раздельного ограничения. Первоначально раздельное ограничение было предложено для снижения пороговой плотности тока, за счет уменьшения толщины активной области. Идея снижения внутренних оптических потерь долгое время не была очевидной по причине большого различия (более двух порядков) между величинами внутренних оптических потерь и коэффициентом усиления полупроводникового материала активной области. Но только благодаря снижению внутренних оптических потерь можно бороться с падением дифференциальной квантовой эффективности полупроводникового лазера с увеличением длины резонатора. Увеличение длины резонатора полупроводникового лазера обеспечивает достижение максимального тока накачки, следовательно, мощности оптического излучения. Развитие технологии и технологических подходов в конструировании лазерных гетероструктур так же позволяет увеличить максимальный ток накачки, но без увеличения длины резонатора будет приводить к перегреву активной области лазера. Таким образом, потребность увеличения максимального тока накачки полупроводникового лазера требует снижения внутренних оптических потерь.

## Концепция мощных полупроводниковых лазеров

Простейшим способом снижения внутренних оптических потерь в полупро-

водниковых лазерах на основе гетероструктур раздельного ограничения является расширение нелегированных волноводных слоев. Этот прием позволяет снизить долю распространяющейся электромагнитной волны в эмиттерах и активной области полупроводникового лазера. Другого столь эффективного способа снижения внутренних оптических потерь в активной области и сильно легированных эмиттерах нет. К сожалению, расширение волновода в лазерной гетероструктуре раздельного ограничения приводит к возникновению поперечных мод высших порядков, что абсолютно недопустимо для всех практических применений. Поскольку усиление каждой поперечной моды в лазерной гетероструктуре раздельного ограничения происходит пропорционально фактору ее оптического ограничения, то открывается возможность управлять пороговым током поперечных мод, изменяя положение активной области в волноводе. При разумном числе поперечных мод (до четырех) всегда можно определить положение активной области в волноводе гетероструктуры, когда фактор оптического ограничения основной поперечной моды, по крайней мере в два раза будет превышать факторы оптического ограничения мод высших порядков. Этот прием позволяет расширить волновод лазерных гетероструктур до 2–3 мкм в зависимости от длины волны генерации. Внутренние оптические потери при этом могут быть снижены до  $0.3\text{--}0.5\text{ см}^{-1}$ .

### **Фундаментальный предел ограничения мощности полупроводникового лазера**

Мощность полупроводникового лазера ограничена четырьмя причинами, две из которых представляют технологический характер и две фундаментальный. Первой причиной, ограничивающей мощность полупроводникового лазера является уровень совершенства применяемой технологии, позволяющий осаждать эпитаксиальные слои высокого кристаллографического качества, обеспечивающего протекание токов накачки высокой плотности и разогрев до высоких температур без дефектообразования.

Второй причиной, ограничивающей максимально достижимые мощности оптического излучения, является оптическая прочность диэлектрических зеркал наносимых на торцы резонатора Фабри-Перо.

Третьей причиной является температурный разогрев активной области полупроводникового лазера протекающим током накачки.

Четвертой причиной является конечная величина энергетической релаксации носителей заряда в активной области.

### **Технология мощных полупроводниковых лазеров**

Для изготовления мощных полупроводниковых лазеров, как впрочем и всех полупроводниковых инжекционных лазеров, необходимо применение эпитак-

сиальных технологий, обеспечивающих осаждение полупроводниковых пленок наноразмерных толщин, формирование гетропереходов на границе эпитаксиальных слоев и позволяющих обеспечить легирование эпитаксиальных слоев в широких пределах. Другими словами, необходимы технологии формирования полупроводниковых наногетероструктур. Для этого наилучшим образом подходят технологии газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений и молекулярно-пучковой эпитаксии. Молекулярно-пучковая эпитаксия отличается малыми скоростями роста и высокой прецизионностью осаждения тонких слоев. Газотранспортная эпитаксия из металлоорганических соединений обеспечивает высокие скорости роста полупроводниковых слоев и меньшую прецизионность при осаждении тонких эпитаксиальных слоев. Поэтому чаще предпочтение отдается технологии молекулярно-пучковой эпитаксии для изготовления наногетероструктур с высокими требованиями к прецизионности по толщинам слоев (например каскадные лазеры), а технология газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений чаще применяется при необходимости введения в гетероструктуры толстых эпитаксиальных слоев. Для изготовления лазерных гетероструктур в настоящее время успешно применяются обе технологии.

### **Диэлектрические зеркала для мощных полупроводниковых лазеров**

Долгое время вопрос выбора материалов и технологии нанесения диэлектрических зеркал на торцы резонатора Фабри–Перо оставался не решенным. В настоящее время есть несколько вариантов такой технологии, обеспечивающих удовлетворительное решение этой проблемы и для каждого разработчика полупроводниковых лазеров представляет свое собственное «ноу-хау». Поэтому при описании этого вопроса можно только перечислить проблемы, которые при этом решаются.

В качестве технологий нанесения покрытий на зеркала применяются: термическое распыление, магнетронное напыление, напыление посредством распыления мишени электронным пучком и даже нанесение покрытий в установке высокого вакуума типа молекулярно-пучковой эпитаксии. Перед нанесением зеркал широко используется: процессы нитридации поверхности сколов лазерных линеек (напыление, обработка ионами азота, обработка в азот-содержащих растворах), чистка сколов посредством сухого ионно-плазменного травления и применение алюминий не содержащих твердых растворов лазерной гетероструктуры. В качестве просветляющего диэлектрического слоя применяют:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnSe}$  и другие.

## **Монтаж лазеров на теплоотводы**

Лазерный кристалл с омическими контактами можно назвать лазером только после монтажа на теплоотводе. Наиболее распространенным низкотемпературным припоем для этой цели является мягкий индий. Несмотря на все известные недостатки, больше половины фирм производителей используют индий в качестве припоя для монтажа, как одиночных лазерных кристаллов, так и лазерных линеек. Основным недостатком индия является прорастание «вискеров» вдоль силовых линий, приводящее к закорачиванию р-п перехода в высокотемпературных деградационных тестах. Решение этой проблемы было найдено в применении твердых высокотемпературных припоев, а именно эффекики золото-олово. Длинные — десяти миллиметровые лазерные линейки при этом растрескиваются из-за разности коэффициентов термического расширения меди и полупроводникового кристалла. Поэтому в качестве промежуточного носителя применяется материал с высоким коэффициентом теплопроводности и с коэффициентом термического расширения, совпадающий с материалом полупроводниковой подложки. Для этого широко применяются нитрид алюминия и композитный материал медь-вольфрам.