

06.3;07

©1993 г.

## МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ В ДГС ЛАЗЕРАХ С МНОГОМОДОВЫМ АКТИВНЫМ СЛОЕМ

*Н.Ю.Гордеев, С.В.Зайцев, Е.Л.Портной,  
М.П.Сошников, В.П.Хвостиков*

Данная работа продолжает серию статей, посвященных исследованию процессов автомодуляции добротности резонатора в полупроводниковых лазерах с насыщающимся поглотителем, полученным глубокой имплантацией тяжелых ионов [1-3].

Одним из важных направлений в этой области является изучение возможных путей увеличения энергии оптического импульса в режиме модуляции добротности. Очевидно, например, что увеличение толщины активного слоя должно увеличивать энергию светового импульса в режиме модуляции добротности в лазерах с насыщающимся поглотителем, поскольку при этом увеличивается общее количество электронно-дырочных пар, участвующих в излучении лазерного импульса. Это подтверждается расчетами, проведенными на основе простейших динамических уравнений, причем оказывается, что степень изменения энергии импульса сильно зависит также от дифференциальной квантовой эффективности генерации исходных лазеров.

Увеличение толщины активного слоя приводит, разумеется, к увеличению пороговой плотности тока, но при используемых обычно импульсах тока накачки длительностью от 0.5 до 5 нс разогрев активной области исключается и этот фактор не является лимитирующим.

Возможность увеличения толщины активного слоя обычно ограничивается условием отсечки волноводных мод высшего порядка, поскольку развитие генерации уже в моде первого порядка резко сужает возможность применения таких лазеров из-за значительного ухудшения картины дальнего поля излучения.

Для исследования этого вопроса были изготовлены лазерные двухсторонние гетероструктуры с толщиной активного слоя 0.55 мкм. Изготовленные из них лазеры полосковой конструкции с оксидной изоляцией имели максимум спектра генерации в области  $\lambda = 767$  нм. Наилучшая полученная дифференциальная эффективность не превышала 25% при длине резонатора 170 мкм. Ширина окна в оксидной изоляции составляла 8 мкм.

Для сравнения использовались лазеры, аналогичные описанным ранее в [2], имевшие максимум спектра излучения в области 814 нм, толщину активного слоя 0.2 мкм и типичную дифференциальную квантовую эффективность около 40% при длине резонатора 180 мкм и ширине окна в оксидной изоляции 4.4 мкм, а также лазеры с отдельным ограничением и квантоворазмерным активным слоем толщиной 90 Å, имевшие максимум спектра излучения на длине волны 720 нм и ДКЭ генерации около 50% при длине резонатора 550 мкм.

Важно отметить, что во всех случаях измерение спектра генерации производилось в режиме модуляции усиления при накачке импульсами тока длительностью 2–5 нс, то есть такими же, как и при исследовании режима модуляции добротности.

Для создания области насыщающегося поглотителя лазеры всех трех типов были подвергнуты имплантации ионов азота в обе торцевые грани, причем энергия ионов для исследуемых лазеров с толстым активным слоем равнялась 25 МэВ, а увеличение порогового тока в 2–2.5 раза было достигнуто только при дозе  $1.1 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>. При дальнейшем увеличении дозы наблюдалось заметное снижение внешней квантовой эффективности. Энергия импульса в режиме модуляции добротности составила для такого лазера 25 пДж. Это хорошо согласуется с результатами расчетов, если положить остаточные потери в слое поглотителя равными  $1400 \text{ см}^{-1}$  (при эффективной глубине слоя насыщающегося поглотителя 15 мкм), что выглядит разумным для такой дозы.

Для обычной ДГС структуры повышение порога генерации в 4 раза наблюдалось уже при дозе  $7 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>, причем энергия ионов была ниже — 17 МэВ. При этом энергия импульсов излучения составляла около 10 пДж. Для лазеров раздельного ограничения с тонким активным слоем наблюдалось насыщение роста порогового тока на уровне  $1.5 \cdot I_{th0}$  при дозе облучения  $5 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>. Максимальная энергия импульса излучения не превышала 3 пДж.

Обращает на себя внимание изменение спектра излучения лазеров до и после имплантации тяжелых ионов в торцевые грани. Наблюдался воспроизводимый длинноволновый сдвиг максимума спектра излучения, причем тем больший, чем большее возрастание порогового тока наблюдалось в результате имплантации ионов. Характерная пара спектров приведена на рис. 1. Максимальный полученный сдвиг составил 60 Å. Причиной подобного сдвига является резкая спектральная зависимость потерь в поглощающих областях, однако полученный результат свидетельствует также об увеличении коэффициента усиления в длинноволновой области при увеличении тока накачки. Этот эффект может быть интерпретирован как следствие уменьшения ширины запрещенной зоны при увеличении концентрации носителей заряда.

Важной особенностью лазеров с толстым активным слоем оказалось изменение модового состава излучения при переходе от режима модуляции усиления к режиму модуляции добротности. Как видно из рис. 2, где показаны сечения соответствующих диаграмм направленности плоскостью, перпендикулярной плоскости слоев лазеров, в первом случае лазер излучает в многомодовом режиме, а после создания области насыщающегося поглотителя в его излучении доминирует нулевая мода в соответствующей плоскости. Подобное сокращение количества участвующих в генерации мод, вероятно, связано с тем, что моды низших порядков имеют большую плотность излучения в области насыщающегося поглотителя и, в силу его нелинейности, испытывают меньшие потери.

Хотя эффект перехода к генерации именно в моде нулевого порядка наблюдался не во всех случаях, всегда наблюдалось устойчивое понижение порядка моды излучения. По-видимому, степень влияния этого эффекта определяется соотношением всевозможных потерь для мод различного порядка, а значит, всегда можно подо-

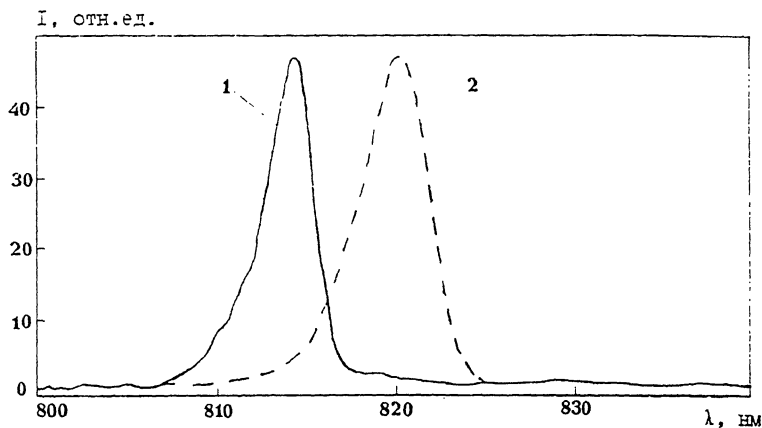


Рис. 1. Спектры излучения инжекционного лазера с толщиной активного слоя 0.2 мкм в режиме модуляции усиления (1) и в режиме модуляции добротности после имплантации ионов (2).

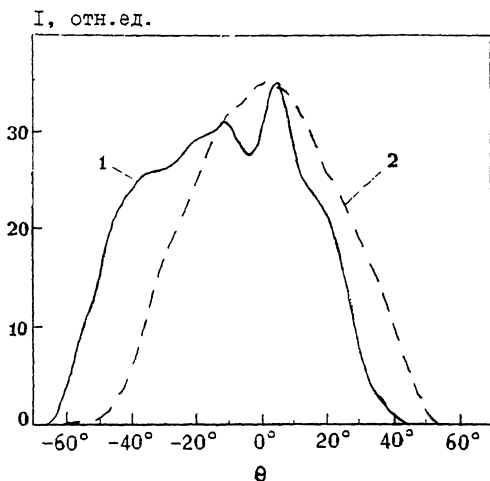


Рис. 2. Сечение картины дальнего поля излучения лазеров вертикальной плоскостью в режиме модуляции усиления (1) и в режиме модуляции добротности после имплантации ионов (2).

брать лазерные параметры такими, чтобы обеспечить устойчивую генерацию импульсов излучения в нулевой волноводной моде в режиме модуляции добротности для лазеров с существенно неодномодовым волноводным слоем.

В заключение авторы благодарят В.П.Евтихиева за предоставленные образцы и В.М.Андреева за рекомендации в области технологии выращивания гетероструктур.

## Список литературы

- [1] Алферов Ж.И., Журавлев А.Б., Портной Е.Л., Стельмаг Н.М. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 18. С. 1097-1098.
- [2] Журавлев А.Б., Портной Е.Л., Стельмаг Н.М. и др. // Физика и техника полупроводников. 1988. Т. 22. Вып. 2. С. 248-251.
- [3] Portnoi E.L., Avrutin E.A., Chelnokov A.V. Proc. of the Joint Soviet-American Workshop on the Physics of Semicond. Lasers. May-June 1991. American Institute of Physics Conference Proceedings, 240. NY, 1991, P. 58-67.

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

Поступило в Редакцию  
29 апреля 1993 г.

---