

## **ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ В РЕЖИМЕ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ**

**А. А. Афоненко, И. С. Манак, А. Б. Матюхин**

Белорусский государственный университет, г. Минск

Наиболее важным для современных приложений является знание динамических параметров инжекционных полупроводниковых лазеров. Наряду с большими преимуществами, связанными с возможностью высокочастотной модуляции и малой инерционностью, такие лазеры имеют и недостатки: нестабильность длины волны генерации, большую ширину полосы излучения  $\sim 100$  МГц, ограничение на диапазон модуляции. Многие динамические характеристики, такие как диапазон модуляции и устойчивость к возмущениям, определяются частотой релаксационного резонанса и скоростью релаксации, которые в свою очередь зависят от времени жизни фотонов и носителей заряда, а также параметров линейного и нелинейного усиления. В полупроводниковых лазерах параметр дифференциального усиления тесно связан с высокочастотной восприимчивостью [1].

Увеличение дифференциального усиления имеет важное значение для уменьшения ширины импульса генерации и увеличения диапазона модуляции. Такие свойства лазера, как ширина линии генерации и диапазон синхронизации, сильно зависят от параметра увеличения ширины линии генерации. Поэтому точное знание фундаментальных динамических параметров является предметом первостепенной важности при разработке и применении полупроводниковых инжекционных лазеров.

Будучи зависимыми от многих факторов, эти параметры не поддаются точному теоретическому расчету и подлежат экспериментальному измерению. Их исследование открывает новые возможности по совершенствованию полупроводниковых лазеров. Именно поэтому анализу методов определения внутренних параметров уделяется большое внимание. Одно из явлений, в котором наиболее полно проявляются все динамические свойства полупроводниковых инжекционных лазеров, есть явление четырехволнового смешения, которое впервые было проанализировано в 1975 г. А. П. Богатовым, П. Г. Елисеевым и Б. Н. Свердловым в связи с асимметрией спектра

усиления по разные стороны от частоты мощного луча накачки. Эта асимметрия оказалась ответственной за различные динамические свойства лазерного диода, такие как конкуренция мод и высокоскоростная модуляция [2]. Вырожденное и практически вырожденное четырехволновое смешение представляет собой нелинейное взаимодействие излучения с полупроводниковой усиливающей средой и находит широкое применение в таких областях науки и техники как нелинейная и адаптивная оптика, голография и т. д.

Процессы четырехволнового смешения обычно описываются моделями, рассматривающими пространственную зависимость нелинейных взаимодействий. Хотя в раннем анализе для интерпретации процессов четырехволнового смешения и использовалась модель открытого оптически управляемого полупроводникового лазера, однако она не смогла объяснить некоторые особенности спектра четырехволнового смешения, в частности его асимметрию. Тем не менее в большинстве экспериментальных работ сделан акцент на измерении коэффициента четырехволнового преобразования или нелинейности усиливающей среды. Мало внимания было уделено фазовым и амплитудным характеристикам смешанных полей по отношению к параметрам полупроводникового лазерного осциллятора.

Впервые использовать амплитудно-частотные характеристики в режиме четырехволнового смешения для определения динамических параметров предложили Т. В. Simpson и J. M. Liu [1, 3]. Однако анализ амплитудно-частотных характеристик у них проводился на основе приближенного уравнения для медленно меняющейся амплитуды, которое было введено в рассмотрение тогда, когда нелинейное усиление еще не было детально изучено.

Целью данной работы являлось нахождение амплитудно-частотных характеристик лазера при четырехволновом смешении, полученных на основе решения волнового уравнения, их анализ, а также определение влияния нелинейного усиления и нелинейного преломления на спектры четырехволнового смешения лазера и разработка программного обеспечения для экспериментального определения динамических параметров полупроводникового инжекционного лазера.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести анализ четырехволнового смешения в полупроводниковом лазере на основе волнового уравнения; теоретиче-

ски проанализировать уравнения для медленно меняющейся амплитуды и получить модернизированное уравнение для медленно меняющейся амплитуды с учетом нелинейного усиления и нелинейного преломления; найти комплексные амплитуды смешанных сигналов в зависимости от параметров полупроводникового лазера с использованием нового уравнения; предложить численный метод определения динамических параметров из экспериментальных данных.

В работе проведен анализ амплитудно-частотных характеристик полупроводникового инжекционного лазера в режиме четырехволнового смешения. На основе волнового уравнения получены аналитические выражения для комплексных амплитуд генерируемого излучения. Показано, что приближение медленно меняющейся амплитуды оказывается достаточно точным при расчете мощностей генерируемых сигналов, однако приводит к заметным погрешностям при расчете фазовых характеристик.

Введен в рассмотрение новый, ответственный за нелинейное усиление, параметр  $\beta$ , который является коэффициентом пропорциональности между вариациями действительной и мнимой частей показателя преломления при изменении плотности фотонов в резонаторе. Предложен теоретический вывод модернизированного уравнения для медленно меняющейся амплитуды с учетом влияния нелинейного усиления на действительную и мнимую части показателя преломления. На основе этого уравнения получены аналитические выражения для комплексных амплитуд регенеративно усиленного и четырехволнового смешанного полей, а также вариации плотности фотонов в резонаторе.

С использованием разработанного программного обеспечения определены динамические параметры лазера с погрешностью до 5 %. Параметр  $\beta$  определен с погрешностью  $\sim 20$  %. Показано, что параметр увеличения ширины линии генерации  $\alpha$  и параметр  $\beta$  не равны друг другу. Предлагается использовать экспериментальные данные по параметру  $\beta$  для выявления доминирующего физического механизма нелинейного усиления.

Работа выполнялась при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по проекту №Ф99-220.

1. Liu J. M., Simpson T. B. // IEEE Photon. Techn. Lett. – 1993. – Vol. 4, № 4. – P. 380–382.

2. Inoue K., Mukai T., Saitoh T. // Appl. Phys. Lett. – 1987. – Vol.51, № 14. – P. 1051–1053.
3. Simpson T. B., Liu J. M. // J. Appl. Phys. – 1993. – Vol. 73, № 5. – P. 2587–2589.

## **НЕЛИНЕЙНАЯ ДИСПЕРСИЯ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР**

**В. И. Цвирко, В. К. Кононенко**

Белорусский государственный университет, г. Минск

Ранее были изучены особенности нелинейной дисперсии и оценено изменение показателя преломления вблизи краевого поглощения  $\Delta n$  при заполнении уровней подзон в квантоворазмерных гетероструктурах [1]. Значение максимального изменения  $\Delta n$  составляет порядка  $-0,1$  в GaAs. При этом нелинейная дисперсия имеет резонансный характер на частотах, соответствующих начальным межподзонам переходам.

В данной работе учитывается влияние спектрального уширения, поляризационной зависимости вероятности оптических переходов и анизотропии эффективных масс дырок на изменение показателя преломления при возбуждении лазерной квантоворазмерной гетероструктуры. Известные механизмы спектрального уширения, дающие лоренцевскую или гауссову формы спектральных полос испускания, приводят к сглаживанию резонансного поведения показателя преломления и уменьшению величины его изменения.

Нелинейные дисперсионные свойства квантовой ямы для ТЕ- и ТМ-мод отличаются. Так, для излучения ТЕ-поляризации изменение показателя преломления при возбуждении гетероструктуры будет наибольшим для переходов с участием тяжелых дырок, а для ТМ-моды – в области частот, соответствующих переходам с участием легких дырок. Также установлено, что изменение показателя преломления  $\Delta n$  с ростом плотности светового потока  $S$  в активной области лазерной структуры происходит в общем случае нелинейно и описывается практически степенной зависимостью с показателем  $1/2$ .

Численные расчеты проведены для лазерной квантоворазмерной гетероструктуры в системе GaAs-Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As. В частности, в случае нерезонансного оптического возбуждения гетероструктур с квантовыми ямами шириной 5 и 20 нм максимальное изменение  $|\Delta n|$  на