

Д. В. БОНДАРЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ «Вектор»

Дата поступления в редакцию  
05.04 1999 г.

Оппонент д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

*На основе системы уравнений, описывающей динамическое поведение полупроводникового инжекционного гетеролазера, проведено моделирование лазера и его анализ.*

*On the basis of system of equations that describes dynamic behavior of semiconductor injection heterogeneous laser, the simulation of laser and its analysis has been conducted.*

Достижения в области эпитаксиальных полупроводниковых технологий вызвали большой интерес к полупроводниковым источникам оптического излучения, в частности, к инжекционным полупроводниковым гетеролазерам. Их основными отличительными свойствами являются высокий коэффициент полезного действия, небольшие размеры, возможность модуляции выходных оптических характеристик изменением тока инжекции. Благодаря этим свойствам инжекционные полупроводниковые лазеры на основе арсенида галлия и других соединений (к примеру, InGaAsP) находят и могут найти еще более широкое применение в различных направлениях техники. Основной областью их использования является волоконно-оптическая связь.

Естественно, что построение различных электронных систем, включающих в качестве составного элемента полупроводниковый лазер, предопределяет необходимость анализа его динамических характеристик и, в частности, переходных процессов при изменении тока инжекции. Основой такого анализа, предложенного в данной работе, является использование компьютерного моделирования переходных процессов.

Динамическое поведение полупроводниковых лазеров описывается следующими уравнениями кинетики, связывающими концентрацию носителей заряда в активной области лазера и плотность фотонов в этой же области [1, с. 78]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \alpha NP; \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha NP - \frac{P}{\tau_p} + \beta \frac{N}{\tau_s}, \quad (2)$$

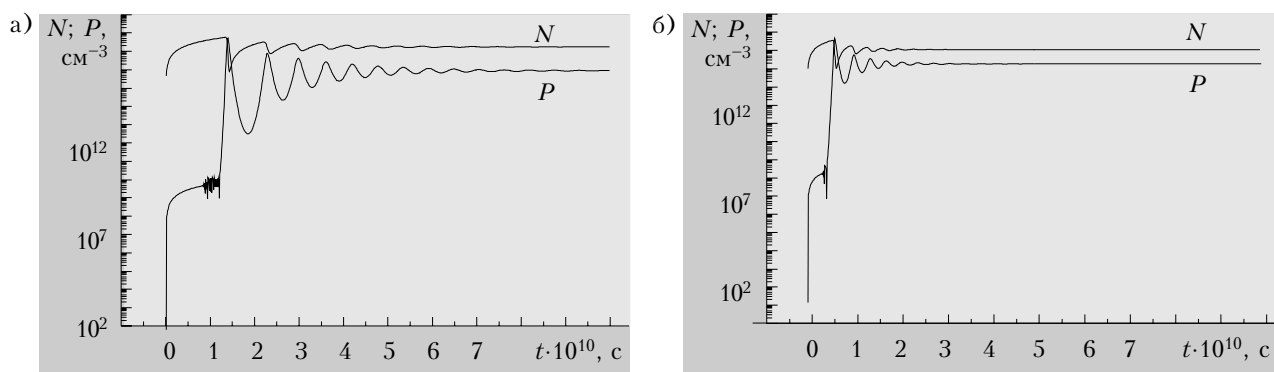
где  $N$  — концентрация носителей заряда;  
 $t$  — время протекания процессов в активной области лазера;  
 $J$  — плотность тока накачки;  
 $e$  — заряд электрона;  
 $d$  — толщина активного слоя лазера;  
 $\tau_s$  — время спонтанной излучательной рекомбинации;  
 $\alpha$  — коэффициент оптического усиления;  
 $P$  — плотность фотонов в моде резонатора;  
 $\tau_p$  — время жизни фотона в резонаторе;  
 $\beta$  — доля спонтанного излучения, попадающего в лазерную моду.

Уравнение (1) показывает, что скорость увеличения концентрации носителей равна скорости инжекции током  $J/ed$  за вычетом скорости потерь носителей при спонтанной рекомбинации  $N/\tau_s$  и потерь, обусловленных стимулированной рекомбинацией,  $\alpha NP$ . Уравнение (2), в свою очередь, показывает, что скорость увеличения плотности фотонов равна скорости рождения фотонов при стимулированном излучении  $\alpha NP$  за вычетом диссипативных потерь фотонов в резонаторе  $P/\tau_p$  плюс скорость спонтанного излучения фотонов в лазерную моду  $\beta N/\tau_s$ .

Уравнения (1), (2) можно трактовать как уравнения баланса поступления, гибели и рождения носителей заряда и фотонов в лазерном резонаторе, которые описывают динамику лазера в кинетическом приближении. Более детальные аспекты динамического поведения лазера (в частности, при модуляции тока инжекции) могут быть получены при уточнении модели (1), (2) путем добавления или модификации отдельных компонент.

Для решения системы уравнений (1), (2) целесообразно использовать численные методы: т. к. система уравнений модели нелинейная, то другими методами решать систему будет сложно или вообще невозможно.

Для решения задачи Коши, формулируемой в данной работе, существует много методов. Основные из них базируются на разложении в ряд Тейлора и обычно сводятся к алгоритмам метода Рунге-Кутты. Не описывая разновидности методов, отметим, что наиболее распространенным и приемлемым по точности для данного класса задач является метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Этот метод позволяет достичь более высокой точности, чем ме-



Переходный процесс в инжекционном полупроводниковом лазере при мгновенном включении тока:  
а — 160 мА; б — 400 мА

тоды низшего порядка, но достаточной для того, чтобы не использовать методы более высшего порядка [2, с. 7].

Было проведено моделирование мощного (до 0,3 Вт излучаемой мощности) полупроводникового инжекционного AlGaAs-лазера с двойной гетероструктурой.

Параметры полупроводниковой структуры, использованные в численном расчете, —

длина активной области:  $l=500$  мкм= $5 \cdot 10^{-2}$  см;

ширина активной области:  $b=4$  мкм= $4 \cdot 10^{-4}$  см;

толщина активного слоя:  $d=80$  нм= $8 \cdot 10^{-6}$  см;

время жизни неосновных носителей в активном слое:

$\tau_s=4$  нс= $4 \cdot 10^{-9}$  с;

время жизни фотона в резонаторе:  $\tau_p=2$  пс= $2 \cdot 10^{-12}$  с;

коэффициент оптического усиления:  $\alpha=2,8 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/с;

часть спонтанного излучения, попадающего в оптическую моду:  $\beta=10^{-4}$ .

Математической моделью переходных процессов являлась система уравнений кинетики (1), (2).

При использовании различных уровней тока накачки (от 160 до 400 мА) была определена длительность переходного процесса, который составил 700 и 300 пс, соответственно (см. рисунок). Таким образом, было установлено, что данный тип лазера может использоваться в оптических системах связи гигабитного диапазона. (Мощностные характеристики данного лазера позволяют использовать его не только в волоконно-оптических системах связи, но и в открытых оптических системах.)

В результате моделирования было отмечено также, что при возрастании тока накачки уменьшается длительность переходного процесса.

Результаты моделирования были проверены экспериментальным путем по методике, изложенной в [3].

Получаемые с помощью предложенного моделирования результаты позволяют выбирать нужный тип полупроводниковых лазеров и устанавливать их рабочие параметры на определенных уровнях. Кроме того, совмещая моделирование передающей части с моделированием приемной части можно создать программный комплекс для предварительного проектирования оптических систем.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры / Под. ред. У. Тсанга. — М.: Радио и связь, 1990.

2. Бондаренко Д. В. Математическое моделирование переходных процессов в инжекционных полупроводниковых лазерах. — К., 1998. (Препринт / Ин-т электродинамики НАНУ: № 813.)

3. Осинский В. И., Бондаренко Д. В., Воронько А. А., Ориховский Б. Г. Влияние электронной подсистемы на переходные процессы в гетеролазерах гигабитного диапазона // Мат-лы 7-й междунар. крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 1997. — С. 413–414.

## радиоизмерения и электроника **КВАРЦ**

Научно-технический и  
рекламно-коммерческий  
периодический журнал  
НИПИ «Кварц»

Издается с 1993 г.  
(До 1993 г. — «Техника средств связи».  
Сер. РИТ.)  
Почтовый адрес редакции: Россия,  
603009, Нижний Новгород,  
пр-т Гагарина, 176.  
Тел./факс: (8312) 66-55-62.