

### 3. Заключение

Рассмотренные методы формирования гравитационных потоков открывают пути практической реализации как энергетических установок для получения электрической энергии из гравитационной

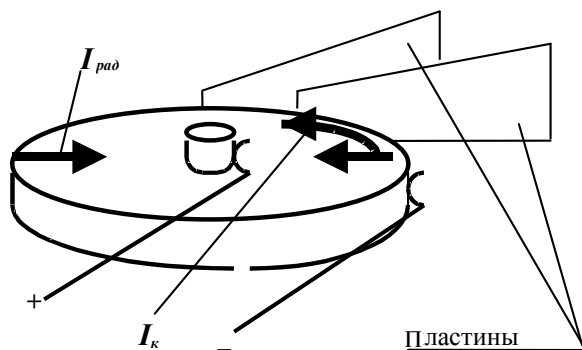


Рис.8. Формирование разности электрических потенциалов кольцевым гравитационным потоком

среды, так и устройств, позволяющих компенсировать гравитационный поток Земли.

**Литература:** 1. Вейник А.И. Термодинамика реальных процессов. Мн.: Наука і тэхніка, 1991. 576 с. 2. Гравовский М.А., Млодзевский А.Б., Телеснин Р.В., Шаскольская М.П., Яковлев И.А. Лекционные демонстрации по физике / Под ред. В.И. Ивероновой. Изд. 2-е. М.: Наука. 1972. 324 с. 3. Балабай В.И. Энергетические начала. Гравитационная масса Экспериментальные подтверждения // Радиоэлектроника и информатика. 1998. № 2. С. 24-29. 4. Балабай В.И. Энергетические начала. Гравитационное поле // Радиоэлектроника и информатика. 1998. № 2. С. 30-34.

Поступила в редколлегию 12.10.1998

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Пресняков И.Н.

**Балабай Валерий Иванович**, ведущий инженер ЦКБ "ПРОТОН". Научные интересы: вопросы гравитации и фазовой селекции. Адрес: Украина, 310001, Харьков, ул. Кирова, 1, корп. 2, кв. 1008, тел. 67-82-64, 21-78-68.

УДК 681. 7. 069

## LASDYN – ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ

СУХОИВАНОВ И.А., ЛЫСАК В.В.,  
САМОХВАЛОВ М.В.

Описывается программный пакет моделирования динамических характеристик полупроводниковых лазеров, основанный на оригинальной методике расчета трехуровневой динамической модели, который является Windows-ориентированным приложением с многооконным интерфейсом. Проводится анализ динамических моделей лазерных диодов с различной структурой активной области. Приводятся результаты моделирования динамических характеристик квантоворазмерного лазера. В пакете LasDyn предусматривается возможность расширения его функциональных возможностей и подключения новых модулей.

Применение методов компьютерного моделирования для выполнения операций проектирования сложных устройств и систем имеет большое значение в современной электронной промышленности.

Можно предположить, что моделирование на компьютере станет основным методом при разработке фотонных устройств и систем, так как позволит определить большинство технических и технологических параметров и характеристик без сложных и дорогостоящих экспериментов. Сказанное особенно актуально для элементной базы оптоэлектроники: она основана на чрезвычайно тонких и сложных структурах и физических процессах.

Базовым и наиболее сложным элементом оптоэлектроники является полупроводниковый лазер, поэтому усилия при создании методов компьютерного моделирования в данной области концентрируются именно на этих устройствах.

Разработка комплексных пакетов автоматизированного проектирования представляет собой слож-

ную проблему и в настоящее время не решена. Программные продукты [1] предназначены для решения широкого круга задач РОС лазеров (лазеров с распределенной обратной связью), что требует значительных вычислительных мощностей, недоступных для широкого круга пользователей. Поэтому целесообразно разрабатывать специализированные программы, решающие ограниченный перечень задач, либо базирующиеся на упрощенных моделях.

При проектировании источников излучения для оптоволоконных систем необходимо решить ряд задач, связанных с оценкой динамического поведения лазера и воздействия на него геометрических и технологических параметров прибора.

Первая модель базируется на системе из двух скоростных уравнений [2], описывающих скорость изменения плотности электронов и фотонов. Основными выбраны динамические характеристики плотности электронов и мощности излучения, так как они показывают реакцию лазера на аналоговую и импульсную токовую модуляцию.

Практически необходимые параметры, определяемые из динамических характеристик: время задержки, время выхода на стационарный режим и стационарный уровень излучения. По данным показателям можно найти максимальную скорость цифровой модуляции. Модуляционная характеристика определяет полосу пропускания лазера в режиме малосигнальной токовой модуляции, а мощностная характеристика — максимальную ширину пропускания. Пороговое значение тока, при котором начинает генерировать лазер, определяет ватт-амперная характеристика.

Разработанная версия программного пакета позволяет решать эти задачи и имеет следующие особенности: полная совместимость с Windows 3.11, Windows 95; решение нескольких задач; удобная форма для ввода данных; просмотр и изменение значений параметров, входящих в данную задачу; сохранение текущих параметров на диске; работа с файлами ранее сохраненных параметров; наличие минимального набора процедур для организации подключения новых моделей; вывод рассчитанных зависимостей на экран и принтер в удобном формате; наличие системы оперативной справки.

Структурная схема программы показана на рис. 1. Программа является Windows-ориентированным приложением с многооконным интерфейсом и разработана в среде программирования Delphi. Созданный пакет позволяет проводить расчет следующих характеристик для объемных лазеров и для лазеров на основе квантово-размерных структур: динамической характеристики для плотности электронов и фотонов, модуляционной, мощностной, ватт-амперной.



Рис. 1. Структурная схема программного пакета LasDun

Для исследования динамических характеристик типового лазера с двойной гетероструктурой используется система скоростных уравнений [2]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_n} - \frac{g_L(N - N_{th})S}{\sqrt{1 + \varepsilon S}},$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma g_L(N - N_{th})S}{\sqrt{1 + \varepsilon S}} - \frac{S}{\tau_s} + \frac{\Gamma \beta N}{\tau_n}, \quad (1)$$

где  $\frac{dN}{dt}$ ,  $\frac{dS}{dt}$  – изменение плотности электронов  $N$  и фотонов  $S$ ;  $I$  – ток накачки;  $q$  – заряд электрона;  $V$  – объем активной области;  $\tau_n$ ,  $\tau_s$  – время рекомбинации электронов и фотонов;  $N_{th}$  – пороговая плотность электронов;  $\varepsilon$  – коэффициент насыщения усиления,

$g_L$  – линейный коэффициент усиления;  $\beta$  – коэффициент спонтанной рекомбинации. Параметры, использованные при численном интегрировании [2]:

$$V = 2 \times 10^{-17} \text{ м}^3, \quad \Gamma = 0.34, \quad I = 40 \text{ мА}, \quad \tau_n = 10^{-9} \text{ с},$$

$$N_{th} = 7 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}, \quad \tau_s = 10^{-13} \text{ с}, \quad \beta = 3 \times 10^{-4},$$

$$g_L = 1.8 \times 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}, \quad \varepsilon = 1.2 \times 10^{23} \text{ м}^3.$$

Интегрируя систему (1) методом Рунге-Кутты 4-го порядка, получили такие характеристики: динамическую для плотности электронов и фотонов, модуляционную мощностную излучения, мощностную (зависимость частоты от мощности на пике модуляционной характеристики) и ватт-амперную характеристику.

На рис. 2 представлено семейство ватт-амперных характеристик для различных значений толщины активного слоя. При уменьшении его толщины уменьшается значение порогового тока (тока, при котором значение мощности отлично от нуля), следовательно, для уменьшения потребляемой мощности лазера необходимо уменьшать толщину активного слоя.

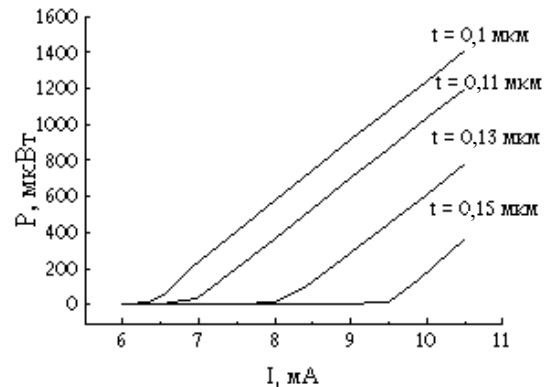


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики при различных значениях толщины активного слоя

При переходе к активным слоям толщиной порядка длины волны де Бройля мы приходим к новому типу – полупроводниковому квантоворазмерному лазеру (КРС). Для моделирования КРС лазеров двухуровневой модели вида (1) недостаточно. В настоящее время наиболее приемлемой для описания работы КРС лазера считается трехуровневая модель, которая строится путем расширения модели, описанной выше. КРС структура представляется в виде трех энергетических уровней: уровень, соответствующий носителям в области ограничения; уровень воронки – области над КР слоем; носители, непосредственно захваченные КР слоем. В разработанном программном пакете применена трехуровневая модель [3], которая была проанализирована в [4]:

$$\frac{dN_D}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_D \eta_D - N_C}{\tau_D} - \frac{N_D}{\tau_n},$$

$$\frac{dN_C}{dt} = \frac{N_D \eta_D - N_C}{\tau_D} - \frac{N_C \eta_F - N_g}{\tau_c} - \frac{N_C}{\tau_n},$$

$$\frac{dN_g}{dt} = \frac{N_C \eta_F}{\tau_c} - \frac{g_L(N_g - N_{th})S}{\sqrt{1 + \varepsilon S}} - \frac{N_g}{\tau_n},$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma g_L(N_g - N_{th})S}{\sqrt{1 + \varepsilon S}} - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N_g}{\tau_n}. \quad (2)$$

Система (2) состоит из четырех уравнений, каждое из которых описывает временное изменение числа носителей на соответствующем уровне: первое — плотность носителей  $N_D$  в области ограничения; второе — плотность носителей  $N_C$  в воронке; третье — плотность носителей  $N_g$  в кванто-размерном слое; четвертое — плотность фотонов  $S$  в излучаемой моде.

Каждое уравнение включает ряд временных констант, которые характеризуют состояние носителей заряда на соответствующем уровне:  $\tau_D$  — время переноса носителей вдоль области ограничения;  $\tau_C$  — время эффективного захвата носителей;  $\tau_n$  — время жизни неизлучающих носителей;  $\tau_p$  — время жизни фотонов. Для описания коэффициента усиления используется линейная модель со следующими параметрами:  $\Gamma$  — параметр ограничения;  $g_L$  — дифференциальное усиление;  $N_{th}$  — пороговая плотность носителей;  $\varepsilon$  — коэффициент насыщения усиления. При расчете динамики числа фотонов учитывается вклад спонтанной эмиссии с помощью коэффициента эмиссии  $\beta$ . Взаимодействие между уровнями воронки и КР слоя описывается с помощью 2-х относительных параметров —  $\eta_F$  и  $\eta_D$ . Геометрический параметр  $\eta_D$  определяет отношение ширины КР слоя к ширине области ограничения. Второй параметр  $\eta_F$  определяется как отношение между числом носителей в КР слое и носителями над КР слоем.

Согласно выводам работы [4] относительные параметры  $\eta_F$  и  $\eta_D$  оказывают значительное влияние на динамические характеристики. С использованием программы “LasDyn” был проведен анализ влияния относительных параметров на импульсный оптический отклик (рис. 3) и отмечена сильная зависимость величины времени задержки оптического отклика от значения данных параметров.

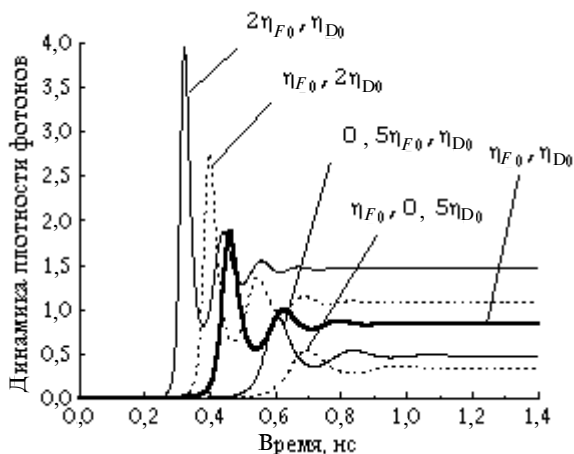


Рис. 3. Влияние относительных параметров на время задержки

Увеличение любого из них приводит к уменьшению времени задержки, и наоборот. Кроме того, обнаружено также и различие в уровнях стационарной плотности фотонов, что в итоге дает разные значения излучаемой оптической мощности.

Следовательно, система уравнений (2) должна строго связываться с конкретной лазерной структурой, а параметры  $\eta_F$  и  $\eta_D$  — определяться дополнительно. Поэтому в пакете LasDyn предусмотрена возможность расширения его функций и подключения других моделей с последующим сравнением результатов моделирования.

На основании построенных модуляционных характеристик (рис. 4) проведен анализ влияния параметров лазерной структуры на полосу частот модуляции. При уменьшении длины резонатора полоса частот модуляции

лазера увеличивается, а увеличение линейного размера области объемного ограничения приводит к резкому сокращению полосы модуляции. Уменьшение времени жизни фотонов в области КР слоя выражается в увеличении полосы модуляции.

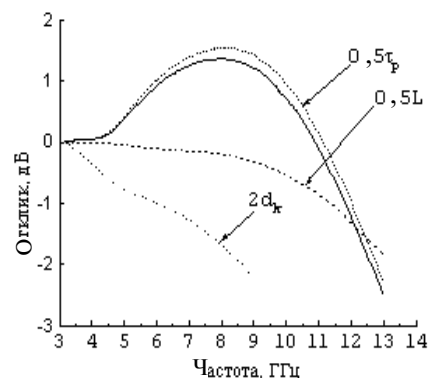


Рис. 4. Анализ модуляционных характеристик

При расчетах использованы следующие значения параметров:  $V = 6,2 * 10^{-18} \text{ м}^{-3}$ ,  $\eta_D = 1,225$ ,  $\eta_F = 2,57$ ,  $\tau_e = 5,6 * 10^{-12} \text{ с}$ ,  $\tau_n = 10^{-9} \text{ с}$ ,  $\tau_D = 5 * 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau_C = 10^{-12} \text{ с}$ ,  $\tau_S = 10^{-13} \text{ с}$ .

Представленные результаты моделирования лазерных диодов с помощью пакета LasDyn позволяют определять основные динамические параметры и будут учтены при создании динамических моделей, более точно характеризующих модуляционные свойства полупроводниковых лазерных диодов.

Таким образом, анализ полученных характеристик полупроводниковых лазеров дает возможность сделать вывод об адекватности работы созданного пакета. Для получения более точной динамической модели квантово-размерного лазера необходимо детальное исследование нелинейных характеристик и их учет при построении модели.

**Литература:** 1. LASTIP: a power 2D simulator for semiconductor laser// Beam Xpress, Feb. 1997. Vol.2. №15. P. 1-4. 2. Bowers J. E. Modulation properties of semiconductor lasers // Research in optoelectronics (B): reprints Prof. J. E. Bowers and Collaborators ECE Technology Santa Barbara, California 1993. P. 109 - 141. 3. Tessler N., Esenstein G. Modelling carrier dynamics and small-signal modulation response in quantum well lasers// Opt. and Quant. Electron, 26. 1994. P.767-787. 4. Сухоиванов И. А. Трехуровневая динамическая модель высокоскоростных КРС лазерных диодов// Радиотехника. 1997. Вып.. 101. С. 90-97.

Поступила в редколлегию 12.10.1998

**Рецензент:** канд. техн. наук Лукин В.В.

**Сухоиванов Игорь Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры ФОЭТ ХТУРЭ. Научные интересы: волоконно-оптические технологии, полупроводниковые квантово-размерные лазеры и усилители, методы их моделирования. Увлечения: искусство, музыка, путешествия. Адрес: Украина, 310166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-84.

**Лысак Владимир Валериевич**, аспирант кафедры ФОЭТ ХТУРЭ. Научные интересы: методы моделирования оптического усиления и нелинейных характеристик полупроводниковых лазерных структур. Адрес: Украина, 310166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 37-75-23.

**Самохвалов Михаил Владимирович**, студент ХТУРЭ. Научные интересы: методы моделирования квантово-размерных полупроводниковых лазерных структур, структуры с вертикальным резонатором. Адрес: Украина, 310166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-84.