

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ\*

И. В. ШВАБ, Г. И. ДУДНИКОВА

*Институт вычислительных технологий СО РАН*

*Новосибирск, Россия*

e-mail: shva@ict.nsc.ru, dudn@adm.ict.nsc.ru

Д. ЕГЕР\*\*

*Центр полупроводниковой техники и оптоэлектроники*

*Дюйсбург университет, Германия*

In this paper we present numerical results on the nonlinear optical, electrical, electrooptical and optoelectronic properties of hybrid GaAs/AlGaAs multilayer-heterostructures. These structures exhibit fast nonlinear properties and high sensitivity which can be used for high-speed information processing in microwave-photonics.

## Введение

В последние годы многослойные гетероструктуры (МСГС), обладающие свойствами оптической нелинейности и бистабильности, привлекают к себе широкое внимание из-за возможности потенциального использования во всех быстродействующих оптических системах обработки информации. Устройства, основанные на этих структурах, находят применение как фотодетекторы и модуляторы с внутренним усилением, а также используются в качестве быстрых оптических переключателей.

В 1991 г. Дж. Хе обнаружил оптическую бистабильность в 30-периодической структуре GaAs/AlAs при оптической интенсивности  $I = 10 \text{ kW/см}$  [1]. Как показано в работе [2], для оптической обработки информации варьируемая интенсивность  $I \sim 10 \text{ kW/см}$  является, однако, слишком большой величиной. Прикладывая электрическое поле перпендикулярно к слоям МСГС, можно уменьшить варьируемую интенсивность почти на пять порядков. Для рассматриваемой в данной работе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs применяется интенсивность меньшей величины, чем в других аналогичных устройствах.

---

\* Авторы выражают благодарность Volkswagen-Stiftung за финансовую поддержку данной работы по проекту "Nichtlineare Vielschichtheterostrukturen für die Mikrowellen-Photonik" Az. I/74 466.

\*\* D. Jeger. Zentrum für Halbleitertechnik und Optoelektronik, Universität Duisburg, Germany.

© И. В. Шваб, Г. И. Дудникова, Д. Егер, 2000.

## 1. Структура устройства

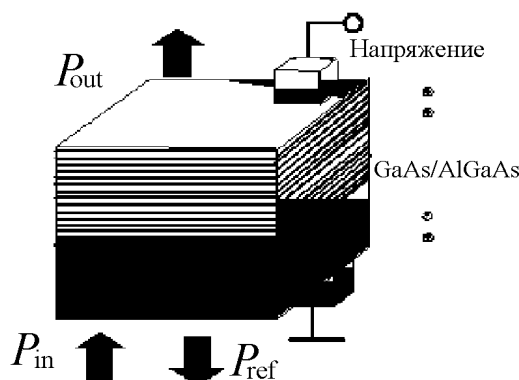


Рис. 1. Схема устройства.

На рис. 1 показана схема устройства, состоящего из периодических многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs, которые наращиваются на подложку из GaAs. Легированные донорной примесью верхние и нижние слои имеют омический контакт с центром и основанием проводника. В центре устройства находится отверстие для света, источником которого является лазер с длиной волны  $\lambda = 880$  нм. Толщина слоев GaAs и AlGaAs равна 58 и 69 нм соответственно.

## 2. Численная модель

При моделировании устройства необходимо провести анализ распространения оптической волны, переноса и накопления носителей зарядов в многослойных гетероструктурах. Дополнительно необходимо рассмотреть эффект Франца — Келдыша (электрооптическое и оптоэлектрическое взаимодействия между оптическими и электрическими подсистемами) и накопление и перенос фототока в слоях GaAs. Рассмотрим оптические и электрические свойства данных структур.

### 2.1. Оптические свойства

Известно, что для оптической волны, распространяющейся в периодических композиционных структурах, подобных МСГС, наблюдается эффект оптического резонанса. При этом распределение интенсивности в данных структурах зависит от оптической длины волны и сильно изменяется при приближении к резонансу. Этот эффект важен для функционирования рассматриваемого устройства, и его необходимо учитывать при численном моделировании. При изменении длины волны в некотором диапазоне наблюдается полное отражение входящей волны. Этот диапазон длин волн называется областью непропускания [1]. Для вычисления распределения интенсивности в периодических структурах в линейном случае используется метод матричной передачи (ММП). Будем рассматривать случай, когда в слоях GaAs коэффициент преломления света нелинейно зависит от распределения его интенсивности. Заметим, что при этом стандартный метод матричной передачи не может быть применен. Поэтому в работе использовался обобщенный метод ММП [3], при

котором слои GaAs разделяются на  $m$  подслоев. При этом в каждом подслое предполагается, что оптическая интенсивность является постоянной, а коэффициент преломления определяется с использованием граничных условий для амплитуд волн в двух смежных слоях. Коэффициент преломления определяется с помощью формулы

$$n = n_1 + n_2|E|^2.$$

На  $m$ -м слое имеем

$$n^m = n_1^m + n_2^m \left( \hat{E}_{+z}^m + \hat{E}_{-z}^m \right)^2.$$

Тогда на смежном  $(m + 1)$ -м слое

$$n^{m+1} = n_1^{m+1} + n_2^{m+1} \left( \hat{E}_{+z}^m e^{-j\gamma^m \Delta z} + \hat{E}_{-z}^m e^{j\gamma^m \Delta z} \right)^2,$$

где  $\hat{E}_{+z}^1$  и  $\hat{E}_{-z}^1$  — амплитуды электромагнитных волн, распространяющихся вперед и назад. Они, в свою очередь, определяются рекуррентными соотношениями

$$\begin{pmatrix} \hat{E}_{+z}^2 \\ \hat{E}_{-z}^2 \end{pmatrix} = \vec{T}^{2 \leftrightarrow 1} \vec{A}^1 \begin{pmatrix} \hat{E}_{+z}^1 \\ \hat{E}_{-z}^1 \end{pmatrix},$$

где  $\vec{T}^{2 \leftrightarrow 1}$  — матрица перехода и  $\vec{A}^1$  — расширенная матрица определяются по формулам

$$\vec{T}^{2 \leftrightarrow 1} = \begin{pmatrix} \frac{\underline{\eta}^1 + \underline{\eta}^2}{2\underline{\eta}^2} & \frac{\underline{\eta}^2 + \underline{\eta}^1}{2\underline{\eta}^2} \\ \frac{\underline{\eta}^2 + \underline{\eta}^1}{2\underline{\eta}^2} & \frac{\underline{\eta}^1 + \underline{\eta}^2}{2\underline{\eta}^2} \end{pmatrix}, \quad \vec{A}^1 = \begin{pmatrix} \exp(-j\gamma^1 \Delta z) & 0 \\ 0 & \exp(+j\gamma^1 \Delta z) \end{pmatrix}.$$

Комплексный коэффициент преломления  $\underline{\eta} = n - j \frac{\lambda}{4\pi} \alpha$  в каждом слое зависит от коэффициента преломления  $n$  и коэффициента поглощения  $\alpha$ , а  $\underline{\gamma}^1 = n^1 - j \frac{\alpha^1}{2}$ .

В результате, определяя поле в последнем слое структуры с помощью стандартного метода ММП, можно вычислить нелинейные оптические характеристики многослойных гетероструктур.

На рис. 2, а приведена рефлексивность отраженной волны в многослойной гетероструктуре, состоящей из 20 пар слоев GaAs/Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As. Нелинейность рассчитанной упомянутым выше методом зависимости коэффициента отражения от интенсивности хорошо видна на рис. 2, б. Кривые приведены для двух различных длин волн,  $\lambda = 880$  нм и  $\lambda = 885$  нм, в области непропускания. Из приведенных рисунков можно видеть, что для интенсивности в диапазоне от 120–130 кВт/см<sup>2</sup> при длине волны 885 нм получаем Z-форму, а при длине волны 880 нм — петлю гистерезиса, что доказывает бистабильность исследуемой структуры. Экспериментально показано [5], что если приложить электрическое поле перпендикулярно к слоям МСГС, описанные эффекты можно наблюдать при интенсивности ниже, чем  $I = 10$  кВт/см<sup>2</sup>. Поэтому наряду с оптическими свойствами электрические, оптоэлектрические и электрооптические свойства многослойных гетероструктур также представляют несомненный интерес для исследования.

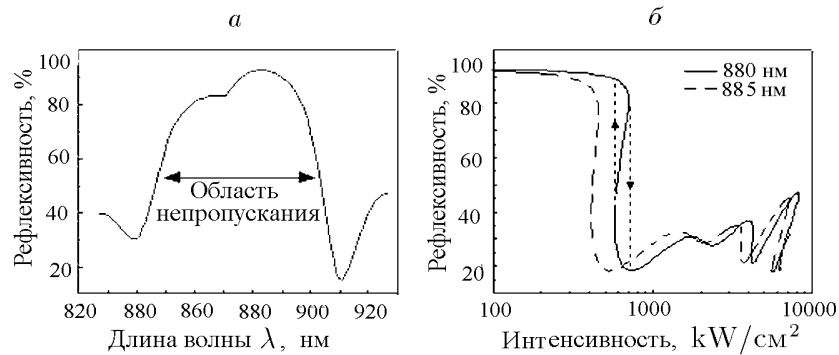


Рис. 2. Зависимость отражающей способности МСГС без приложенного напряжения: в линейном случае — от длины волны (а) и в нелинейном случае — от интенсивности (б).

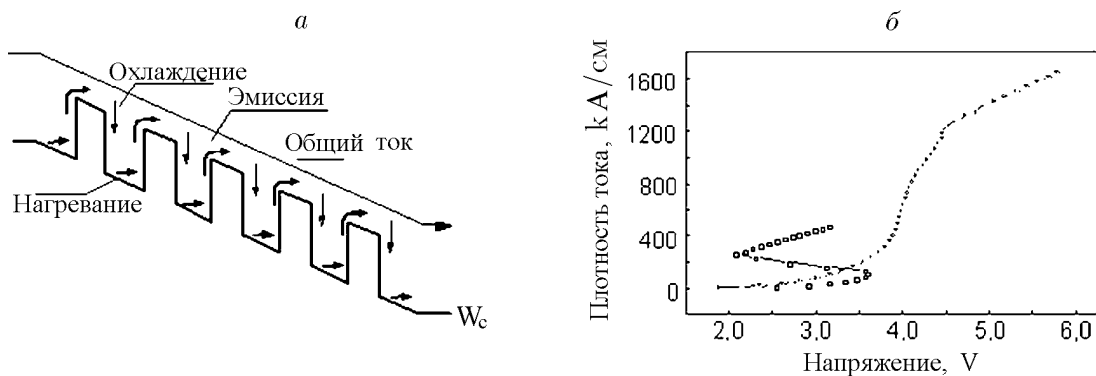


Рис. 3. Схематическое представление проводимости и физического процесса переноса носителей зарядов в МСГС с перпендикулярно приложенным электрическим полем (а) и зависимость плотности тока от напряжения многослойных гетероструктур для двух различных размеров слоев GaAs 100 нм / Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As 70 нм и GaAs 58 нм / Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As 69 нм (б).

## 2.2. Электрические свойства

В качестве модели для переноса и накопления носителей заряда обычно применяется аналитическая модель, разработанная Векером [4] для диодов с “горячими” электронами. Модель состоит из двух беспримесных смежных слоев GaAs/AlGaAs с омическим контактом. В таких структурах условно можно выделить два типа проводимости. В областях низкой проводимости поток ограничивается только прохождением через слой AlGaAs (подавленное состояние проводника). В областях высокой проводимости электроны нагреваются до достаточно высокой энергии. При этом эмиссия через барьеры становится доминирующей (возбужденное состояние проводника). Очень быстрый переход между этими состояниями приводит к появлению отрицательной дифференциальной подвижности.

Схема физического процесса переноса носителей заряда изображена на рис. 3, а. Для вычисления электрических свойств многослойных гетероструктур в данной работе предлагается модификация модели Векера, учитывающая охлаждение носителей зарядов, которое предполагает их поглощение в квантовых ямах GaAs. На рис. 3, б показаны результаты расчета зависимости плотности тока от напряжения, полученные на основе предложенного метода. Эти результаты находятся в хорошем согласовании с результатами, полученными Реклайтисом [5] с помощью метода Монте-Карло.

### 3. Результаты численных расчетов

Схема расчета, основанная на предложенной выше модели для нелинейных многослойных гетероструктур, показана на рис. 4. Оптические и электрические свойства структуры связаны между собой двумя механизмами взаимодействия: генерацией фототока (опто-электрическое взаимодействие) и эффектом Франца — Келдыша (электрооптическое взаимодействие).

Фототок в структуре генерируется посредством поглощения света в слоях GaAs. По заданному на входе напряжению  $U$  электрического поля в слое GaAs рассчитываются напряжение  $U_1$ , концентрация носителей зарядов  $n_{el}$ , кинетическая энергия  $W_{kin}$  и плотность тока  $j_1$ . В зависимости от значения  $W_{kin}$  для электронов возможно прохождение, отражение или туннельный эффект. Мерой для характеристики движения носителей зарядов является коэффициент проходимости  $D$ . Количество носителей зарядов, которые проходят из слоя 1 (GaAs) в слой 2 (AlGaAs), зависит от плотности объемного заряда  $r_s$  и от электрического поля  $E_2$  в слое 2. По значению  $E_2$  определяется напряжение  $U_2$ , которое влияет на  $U_1$ . На выходе вычисляется плотность тока  $J$ .

В силу нелинейных электрических свойств многослойных гетероструктур, возникновение фототока ведет к сильному перераспределению внутреннего напряжения, а в силу эффекта Франца — Келдыша — к изменению коэффициента поглощения в слоях GaAs. Включая эти механизмы в модель, можно следующим образом описать обратную связь, определяющую оптическую бистабильность. Заданными характеристиками на входе являются мощность лазера  $P_{in}$  и интенсивность света  $I$ . Поглощенная в слое GaAs интенсивность  $I_{abs}$  изменяет коэффициент преломления  $n$ , коэффициент отражения  $R$  (влияет на  $I_{abs}$ ), интенсивность отраженной волны  $I_{ref}$  и определяемую на выходе  $P_{out}$ .

В рамках предложенной модели были проведены расчеты многослойной гетероструктуры с 20 парами слоев GaAs/Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As, толщина которых равна 58 и 69 нм соответственно. Параметры содержания Al, толщина слоев и количество пар в структуре были выбраны по результатам серии расчетов оптимальными, исходя из максимальной области непропускания и отсутствия гистерезиса. Индекс преломления GaAs и AlGaAs равен 3.8 и 3.08 соответственно.

Рассмотрим некоторые результаты численных расчетов нелинейных многослойных гетероструктур.

На рис. 5 приведены графики зависимости выходного оптического сигнала  $P_{out}$  (а) и плотности тока на выходе  $J_{out}$  (б) от входного оптического сигнала  $P_{in}$ . На этом же рисунке представлены зависимости выходного оптического сигнала  $P_{out}$  (б) и плотности тока  $J_{out}$  (з) от входного напряжения  $U$ .

Представленные зависимости позволяют полностью характеризовать физические про-

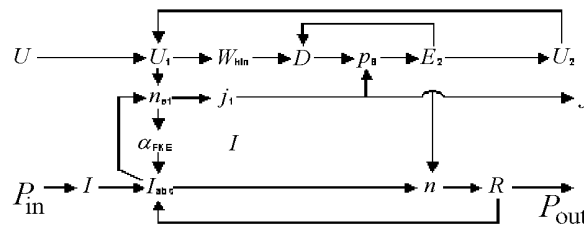


Рис. 4. Схема численного расчета.

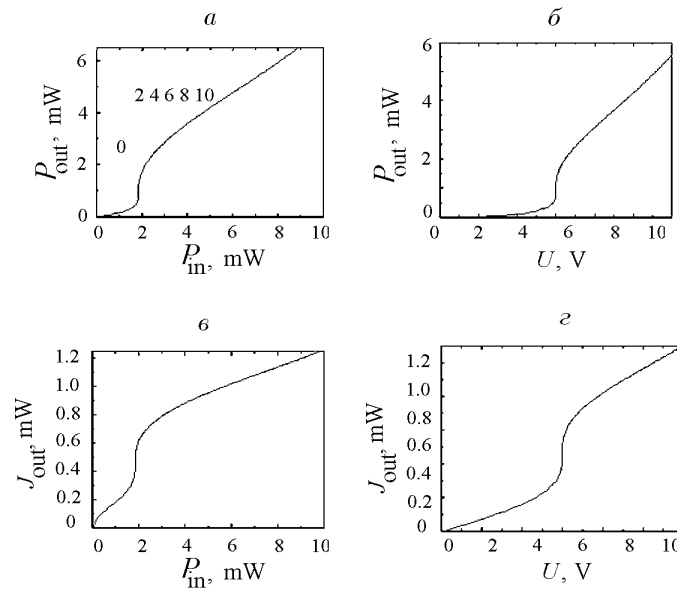


Рис. 5. Графики оптического (*a*), электрооптического (*б*), оптоэлектрического (*в*) и электрического (*г*) взаимодействия в структуре GaAs/Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As.

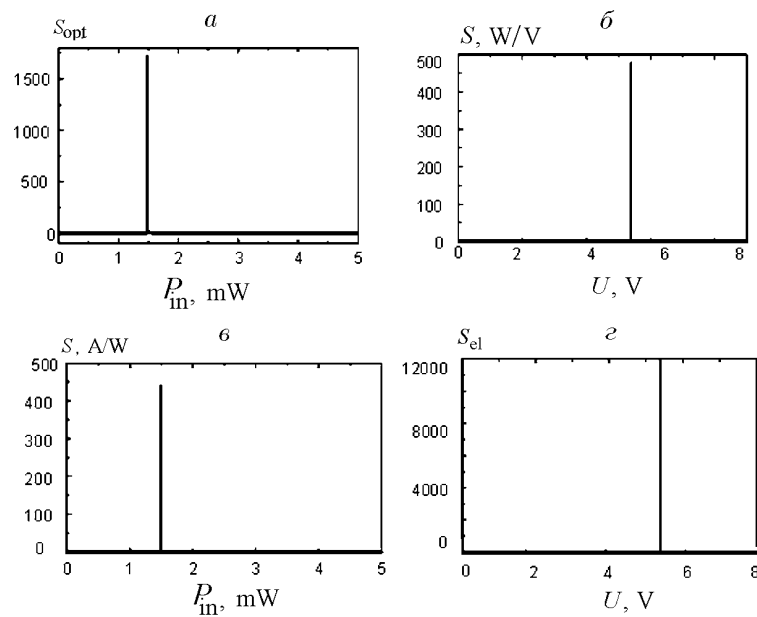


Рис. 6. Усиление оптического (*a*), электрооптического (*б*), оптоэлектрического (*в*) и электрического (*г*) сигнала при длине волны 890.3 нм.

цессы взаимодействия электрических и оптических подсистем устройства и сделать вывод об отсутствии гистерезиса. На основании этих результатов можно найти величины усиления входных сигналов, которые для всех функций (см. рис. 5) определяются через производные.

На рис. 6 показана зависимость величины усиления входного сигнала от мощности лазера  $P_{in}$  и напряжения электрического поля  $U$ . Из приведенных графиков видно, что усиление происходит при  $P_{in} = 1.8$  mW и  $U = 5$  V на длине волны  $\lambda = 890.3$  нм. Вели-

чина длины волны была выбрана на правом фланге области непропускания, где при всех значениях длин волн  $\lambda < 890.3$  нм наблюдается гистерезис. Усиление оптического сигнала составляет около 2000 (рис. 6, а), элетрооптического — около 1200 W/V (рис. 6, б), оптоэлектрического — около 3000 A/W (рис. 6, в) и электрического — около 15000 mS (рис. 6, г).

Результаты расчетов при длинах волн  $\lambda > 890.3$  нм показывают экспоненциальное уменьшение коэффициента усиления сигнала с ростом длины волны в области непропускания. Таким образом, проведенные расчеты позволяют сделать вывод о возможности применения устройств, основанных на многослойных гетероструктурах, в быстродействующих оптических системах обработки информации в качестве оптического усилителя (рис. 6, а), модулятора (рис. 6, б), детектора (рис. 6, в) и электрического усилителя (рис. 6, г).

## Заключение

В статье предложена модель и проведены результаты серии расчетов нелинейных многослойных гетероструктур. Полученные данные по усилению входных сигналов позволяют сделать вывод о возможности использования устройств, основанных на таких структурах, в качестве оптических усилителей, модуляторов и детекторов. Кроме того, результаты расчетов позволяют оптимизировать работу устройств, основанных на многослойных гетероструктурах.

## Список литературы

- [1] HE J., CADA M. Combined distributed feedback and Fabry-Perot structures with a phase-matching layer for optical bistable devices. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 1992, 2150–2152.
- [2] EGGLETON B. J., SLUSHER R. E., DE STERKE C. M., KRUG P. A., SIPE J. E. Bragg Grating Solitons. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 76, No. 10, 1996, 1627–1630.
- [3] JEGER D. Large Optical Nonlinearities in Hybrid Semiconductor Devices. *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 6, No. 4, 1989, 588–594.
- [4] WACKER A., SCHULL E. Oscillatory instability in the heterostructure hot-electron diode. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 1991, 1702–1704.
- [5] REDLICH S., KAMPERMANN C., JEGER D. Modeling and Simulation of Nonlinear Hybrid AlGaAs/GaAs Multilayer Heterostructures. *10th III-V Semiconductor Device Simulation Workshop*, Torino, Italy, 1997.

Поступила в редакцию 18 мая 2000 г.