

И. В. Шваб, О. И. Потатуркин, Д. Егер, И. Егер

(Новосибирск, Россия – Дюйсбург, Германия)

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА
ГИБРИДНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР***

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования нелинейных оптоэлектронных свойств периодической многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Продемонстрирована возможность использования данной структуры в качестве детектора и модулятора с явным дифференциальным выигрышем, позволяющим реализовывать оптические связи с усилением входных сигналов.

Введение. Работы [1, 2] положили начало исследованиям оптоэлектрической нелинейности в гибридных многослойных гетероструктурах для оптических переключателей. Физика таких SEED (Self Electrooptic Effect Device) элементов базируется на взаимодействии поглощения электронов и фотодетектирования, приводящем к большой искусственной нелинейности [3], например оптической бистабильности. Возрастающий интерес к оптической нелинейности в гибридных брэгговских многослойных гетероструктурах объясняется их потенциальным использованием в оптических высокоскоростных системах обработки сигналов [4]. Оценки низкой переключаемой интенсивности (~ 10 пДж/см²) и предельные величины RC-константы (~ 220 ГГц) определены в [4, 5]. В данной работе представлены численные и экспериментальные результаты исследования этих структур в качестве оптоэлектронного транзистора и демонстрируется возможность потенциального использования многослойных гетероструктур в качестве детектора и модулятора с внутренним усилением.

Описание устройства. Полупроводниковое устройство состоит из периодической GaAs/AlGaAs многослойной гетероструктуры с буферным n^+ -GaAs слоем, нанесенной на подложку GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Напряжение прикладывается к металлическим контактам вертикально, чтобы установить высокое электрическое поле в структуре. Эти контакты реализованы в компланарном виде для увеличения частотного диапазона RC. Оптические порты ввода и вывода определяются отверстием размером 40×40 мкм. Оптическая структура представляет собой брэгговский отражатель с периодическими оптическими барьерами, состоя-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Volkswagen Stiftung (проект "Nichtlineare Vielschichtheterostrukturen für die Mikrowellen Photonik", Az: 1/74466).

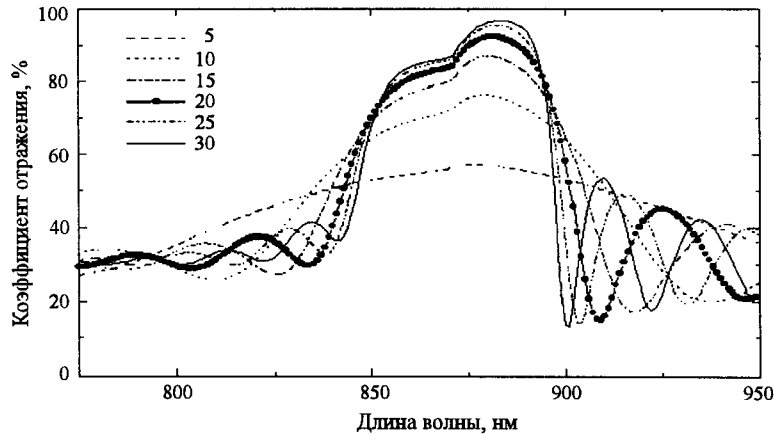


Рис. 1. Коэффициент отражения в зависимости от длины волны и количества пар слоев в гетероструктуре

щими из GaAs/AlGaAs для длины волны 860 нм. С точки зрения электрических свойств устройство представляет собой периодическую зонную структуру, в которой носители заряда накапливаются в тонких слоях GaAs вследствие экранирования электрического поля и проходят поперек барьеров туннельно или с помощью термоионной эмиссии. Электрооптическое и оптоэлектронное взаимодействия обусловлены эффектом Франца – Келдыша (поглощение носителей заряда и изменение коэффициента преломления) и генерацией фототока в слоях. Полное описание устройства и предварительные экспериментальные данные представлены в работах [4–7]. Численная модель и алгоритмы расчетов описаны в [8].

Результаты численных расчетов. В рамках предложенной модели проведены расчеты многослойной гетероструктуры с двадцатью парами слоев GaAs/Al_{0,45}Ga_{0,55}As для длины волны $\lambda = 870$ нм. Содержание Al (45%), толщины слоев 58 и 69 нм и количество пар в структуре выбраны для обеспечения максимального коэффициента отражения с большей крутизной на правом крае зависимости от длины волны в ближайшей инфракрасной области спектра (рис. 1). При этом коэффициенты преломления GaAs и AlGaAs равны 3,32 и 3,08 соответственно.

В работе [8] приведены характеристики оптических и оптоэлектронных взаимодействий многослойной гетероструктуры. Приложенное напряжение $U = 4$ В рассматривается как параметр, и его увеличение (уменьшение) приводит к увеличению (уменьшению) крутизны характеристик и сдвигу их вправо (влево).

Для электрооптических и электрических характеристик этой же гетероструктуры в качестве параметра рассматривалась интенсивность падающего света. Ее увеличение (уменьшение) приводит к увеличению (уменьшению) крутизны характеристик и сдвигу их вправо (влево).

На рис. 2 приведена зависимость величины усиления входного сигнала для электрооптического (S_1)(a) и оптоэлектронного (S_2)(b) преобразований от мощности лазера $P_{вх}$ и напряжения электрического поля U .

Из приведенных графиков видно, что усиление происходит при $P_{вх} = 1,8$ мВт или $U = 5$ В. При этом увеличение (уменьшение) мощности лазера

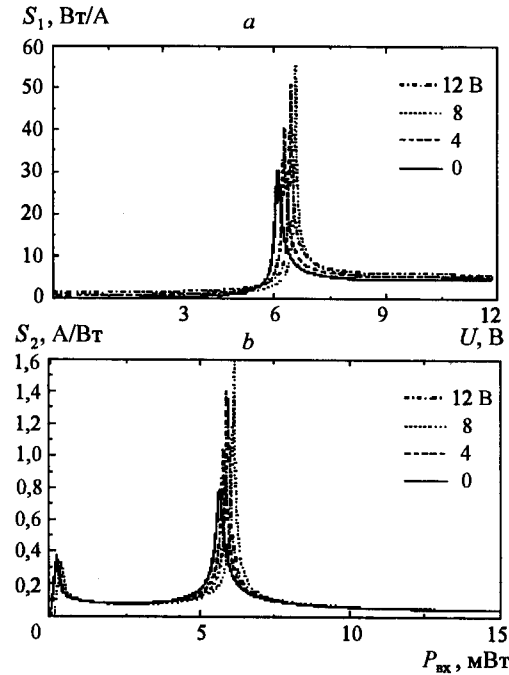


Рис. 2. Зависимость величины усиления входного сигнала от мощности лазера $P_{вх}$ и напряжения электрического поля U при длине волны $\lambda = 892$ нм

или напряжения электрического тока приводит к увеличению (уменьшению) коэффициента усиления входного сигнала на выходе гетероструктуры.

Для оценки характеристик электрооптических и оптоэлектронных преобразователей на основе многослойных гетероструктур длина волны $\lambda = 890,3$ нм выбрана на правом краю области непропускания, где при всех значениях длин волн $\lambda < 890,3$ нм наблюдается оптическая бистабильность (рис. 3, *a, b*).

Из рис. 4 видно, что при $\lambda = 890,3$ нм наблюдается максимальное усиление электрооптического сигнала ($\sim 3 \cdot 10^4$ Вт/А) (*a*) и оптоэлектронного ($\sim 2,5 \cdot 10^2$ А/Вт) (*b*).

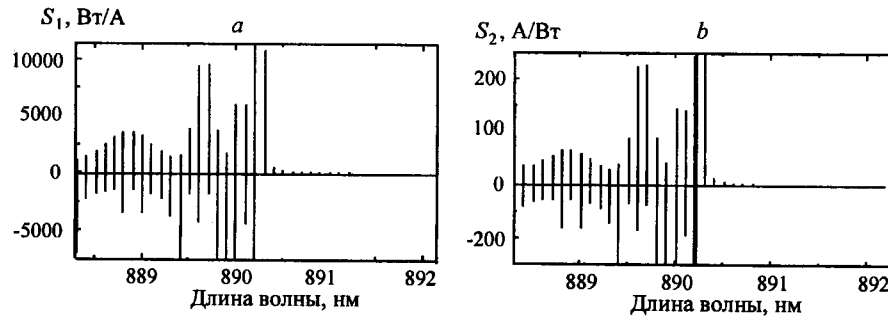


Рис. 3. Зависимость величины коэффициента усиления входного сигнала от длины волны

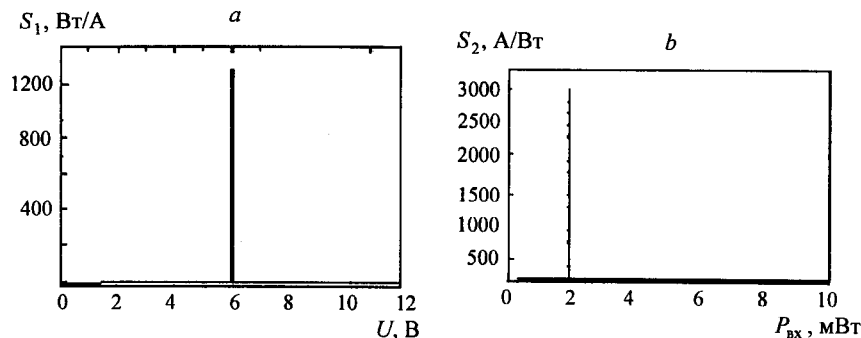


Рис. 4. Максимальное усиление электрооптического (а) и оптоэлектронного (б) взаимодействий

Результаты расчетов для длин волн $\lambda > 890,3$ нм показывают, что коэффициент усиления уменьшается экспоненциально с ростом длины волны (рис. 5, а, б).

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Характеристики оптооптических и оптоэлектрических преобразований определялись измерением мощности отраженного света $P_{отр}$ и электрического тока J в зависимости от мощности падающего света $P_{вх}$ при постоянном напряжении на гетероструктуре $V_0 = 35$ В. Для определения электроэлектрических и электрооптических преобразований V_0 изменялось в диапазоне от 0 до 40 В, ток J и оптическая мощность $P_{отр}$ измерялись при постоянной входной мощности $P_{вх} = 0,9$ мВт.

Для получения большего внутреннего оптоэлектронного усиления рабочая точка выбиралась на длине волны, при которой оптическая бистабильность не наблюдалась, но внутренняя обратная связь положительна. На рис. 6 представлено сравнение экспериментальных результатов с численными расчетами.

При оптооптическом (рис. 6, а) и оптоэлектронном (рис. 6, б) взаимодействиях усиление входного сигнала происходит при 0,85 мВт (эксперимент) и 0,89 мВт (численный расчет) соответственно. Тем самым различие составляет всего 4 %. При электрооптическом (рис. 6, с) и электроэлектрическом (рис. 6, д) взаимодействиях усиление наблюдается при 34 В (эксперимент) и 30 В (численный расчет). Различие составляет 11 %.

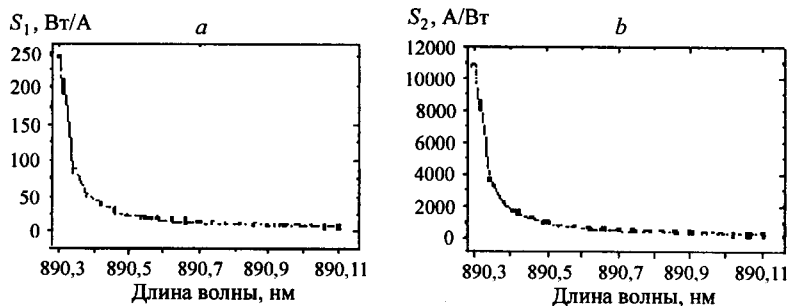


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от длины волны, взятой на правой стороне области непропускания

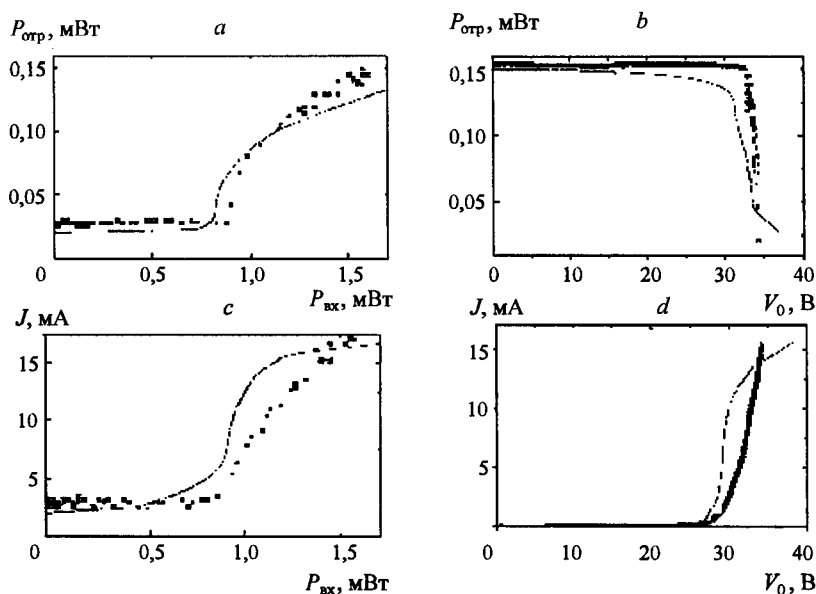


Рис. 6. Экспериментальные результаты для оптоэлектрического транзистора (точки) и результаты численного расчета (сплошные линии) на длине волны 870 нм (брэгговская длина волны гетероструктуры)

Напыление слоев проводилось в Институте оптоэлектроники университета г. Дюйсбурга (Германия) методом МЛЭ. Точность напыления по толщине составляет 2%. Разброс от образца к образцу по степени легированности буферного n^+ -GaAs слоя составляет около 10%. Оба эти фактора могут влиять на различие между экспериментальными результатами и результатами численного расчета.

Согласно этим измерениям можно вычислить, например, максимальный коэффициент усиления входного сигнала для фотодетектора (~ 192 А/Вт (см. рис. 6, b)) и модулятора ($\sim 0,2$ Вт/В (см. рис. 6, c)), который в стандартизированной системе (с сопротивлением 50 Ом) составляет около 10 Вт/А. Пренебрегая дополнительными потерями, окончательно получим общий коэффициент усиления по току $192 \text{ А/Вт} \cdot 10 \text{ Вт/А} = 1920$ для системы, состоящей из модулятора и фотодетектора как преобразователя мощности. В результате такое полупроводниковое устройство представляет собой приемопередатчик, который позволяет осуществлять полное двунаправленное преобразование и может быть использован для цифровой обработки информации.

Заключение. В данной статье представлены новые численные и экспериментальные результаты для нелинейных гибридных брэгговских многослойных гетероструктур. Получены характеристические кривые и зависимости увеличения входных сигналов для оптических, оптоэлектронных, электрооптических и электрических преобразований. Расчеты и измерения показывают возможность применения таких гетероструктур в качестве фотодетекторов и модуляторов с большим коэффициентом усиления. Это позволяет реализовать системы цифровой обработки информации и оптические линии с усилением входных сигналов в микроволновой фотонике, волоконных системах связи и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Miller D. A. B., Chemla D. S., Damen T. C. et al.** Novel hybrid optically bistable switch: The quantum well self-electro-optic effect device // Appl. Phys. Lett. 1984. **45**. P. 13.
2. **Jäger D., Forsmann F., Wedding B.** Low power optical bistability and multistability in a self-electro-optic silicon interferometer // IEEE Journ. Quant. Electron. 1985. **21**. P. 1453.
3. **Jäger D.** Large optical nonlinearities in hybrid semiconductor devices // JOSA. 1989. **B6**. P. 588.
4. **Redlich S., Kampermann C., Jäger D.** Nonlinear hybrid GaAs/GaAlAs multilayer heterostructures for high speed information processing // Optics in Computing, OC'98, June 17–20, 1998, Brugge, Belgium.
5. **Ivanov A., Haug H., Knigge S., Jäger D.** Mesoscopic semiconductor switching element with giant electro-optical nonlinearities due to intrinsic photoconductivity // Jap. Journ. Appl. Phys. 1995. **34**. P. 15.
6. **Kalinowski D., Redlich S., Jäger D.** Novel micromachined fiber-optic E-field sensor // Proc. IEEE Laser and Electro-optics Society (LEOS), November 8–9, 1999, San Francisco, USA. P. 385.
7. **Ivanov A., Haug H.** Analysis of an electro-optical switching device due to intrinsic photoconductivity // Semicond. Sci. Technol. 1994. **9**. P. 1527.
8. **Шваб И. В., Дудникова Г. И., Егер Д.** Моделирование нелинейных многослойных гетероструктур для высокоскоростных процессов // Вычисл. техн. 2000. **5**, № 4. С. 104.

*Институт вычислительных технологий СО РАН,
Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Институт оптоэлектроники (г. Дюйсбург),
E-mail: shva@jict.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
26 сентября 2001 г.*