

УДК 621.375.8

© В. П. Дураев, С. В. Медведев

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ
В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 840–1550 нм**

Представлены результаты разработки и исследования полупроводникового оптического усилителя на длины волн 840, 1064, 1300 и 1550 нм. Рассмотрена конструкция полупроводникового оптического усилителя на основе квантоворазмерных гетероструктур. Проведены исследования основных характеристик: коэффициента усиления, мощности насыщения, шум-фактора и др.

Кл. сл.: полупроводниковый оптический усилитель, коэффициент усиления, мощность насыщения, шум-фактор

ВВЕДЕНИЕ

С самого зарождения квантовой электроники особое внимание уделялось усилению оптического излучения. В волоконной оптике основным источником излучения является полупроводниковый лазер, обладающий следующими основными преимуществами: компактные размеры, высокая эффективность, большой выбор полупроводниковых структур и соответственно длин волн. Другим типом полупроводниковых приборов, обладающим теми же преимуществами, являются полупроводниковые оптические усилители (ПОУ).

ПОУ применяются в качестве усилителей мощности выходного излучения; линейных усилителей для компенсации потерь в линиях связи при передаче информации по волокну; оптических предусилителей для повышения чувствительности фотоприемников; основы для полупроводниковых кольцевых лазеров, гироскопов и волновых конвертеров; оптических модуляторов; для съема информативного сигнала в электрической цепи по электрическому отклику на оптический сигнал, проходящий через активную среду; оптических коммутаторов и т. д. [1–3].

КОНСТРУКЦИЯ ПОУ

Принцип действия ПОУ основан на использовании возбужденной эмиссии, возникающей благодаря взаимодействию фотонов входного возбуждающего излучения с электронно-дырочными парами активной среды. При этом входной сигнал — источник первичных фотонов, энергия которых должна быть достаточна, чтобы сбросить электроны с верхних уровней зоны

проводимости на нижний уровень валентной зоны, где электроны и дырки рекомбинируют, вызывая появление вторичных фотонов. Последние проходят по волноводной структуре активной области, где происходит их лавинное увеличение и выход излучения с формой, длиной волны, состоянием поляризации и другими параметрами, идентичными поступающему на вход ПОУ [4].

В данной работе создавались и исследовались полупроводниковые оптические усилители на основе гетероэпитаксиальных структур:

- с одной квантовой ямой на основе GaAlAs/GaAs для диапазона 840 нм;
- с двумя квантовыми ямами на основе InGaAs/GaAlAs/GaAs для диапазона 1060 нм;
- с пятью квантовыми ямами на основе InGaAsP/InP для диапазонов 1300 и 1550 нм.

Использование квантоворазмерных структур обеспечивает увеличение эффективности инжекции носителей и предотвращение утечки носителей из активной области при повышенных температурах [5].

Геометрические размеры квантоворазмерной структуры на основе InGaAsP/InP с пятью квантовыми ямами представлены на рис. 1. Из исходных квантово-размерных гетероструктур изготавливались мезаполосковые активные элементы полупроводникового оптического усилителя, изображенные на рис. 2.

Ширина мезаполоски составляла 3 мкм, длина резонатора 800–1600 мкм. На переднюю и заднюю грани активного элемента наносились многослойные просветляющие покрытия с коэффициентом отражения < 0.05 %. Мезаполоска располагалась под углом 7 град к сколотым граням активного элемента. Активный элемент оптического усилителя монтировался на медный

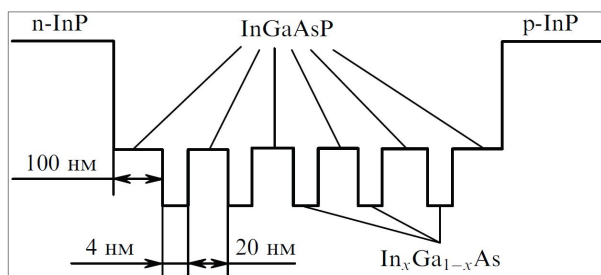


Рис. 1. Конструкция активной области ПОУ

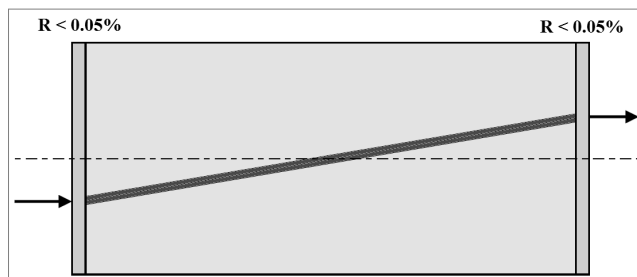


Рис. 2. Активный элемент ПОУ

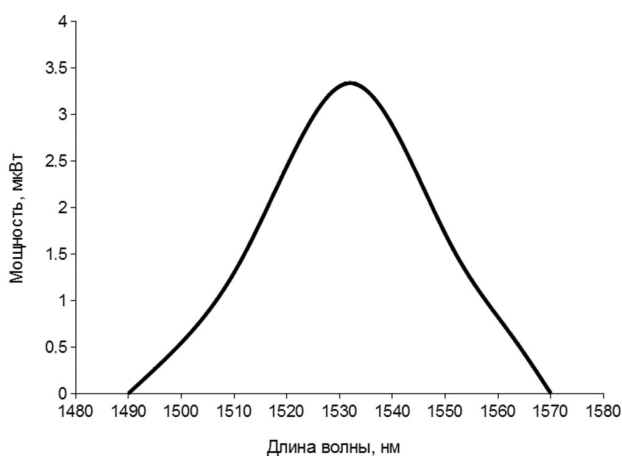


Рис. 3. Оптический спектр излучения ПОУ при токе инжекции 300 мА

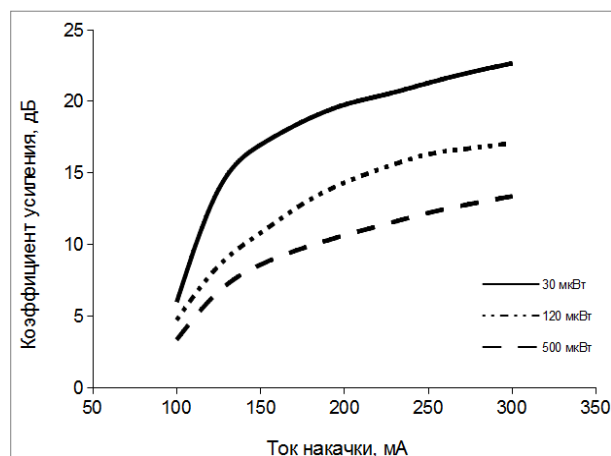


Рис. 4. Коэффициент усиления ПОУ в функции от тока накачки при входном сигнале 30, 120, 500 мкВт

теплоотвод, который помещался на термоэлектрический микрохолодильник, управляемый схемой термостабилизации. Излучение с задней и передней граней активного элемента усилителя вводилось в одномодовый световод с цилиндрической микролинзой на торце, обеспечивающий коэффициент ввода до 80 %. Волоконно-оптические кабели на входе и выходе ПОУ оконцовывались коннекторами типа FC/APC и содержали одномодовое волокно с сохранением или без сохранения поляризации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОУ

Исследование характеристик осуществлялось с помощью оптического анализатора спектра ANDO при подключении оптического изолятора на вход усилителя.

Исследование спектра излучения усилителя на длине волны 1532 нм при токе накачки 300 мА без

подачи усиливаемого сигнала на вход усилителя показало (рис. 3), что полуширина спектра излучения составляет 30–40 нм, что указывает на суперлюминисцентный характер излучения и что данный тип усилителя является усилителем бегущей волны.

Излучение на выходе ПОУ представляет собой усиленное спонтанное излучение (УСИ). УСИ является комбинацией спонтанного и вынужденного излучений. При достаточно высокой плотности носителей в зоне проводимости происходит спонтанное излучение фотонов. Часть этих фотонов соответствует основной моде активного волновода, поэтому происходит их усиление. На выходе усилителя возникает излучение с широким спектром (из-за спонтанной природы УСИ) и относительно высокой мощности (из-за оптического усиления с помощью вынужденного излучения).

Коэффициент усиления G определялся как отношение мощности P_{out} сигнала на выходе

оптического усилителя к мощности P_{in} сигнала на его входе [6]:

$$G = P_{out} / P_{in}. \quad (1)$$

Зависимость коэффициента усиления ПОУ от тока накачки при различных значениях входного сигнала на входе усилителя представлена на рис. 4.

Коэффициент усиления ПОУ также зависит от усиленной мощности сигнала. Мощный входной сигнал уменьшает плотность носителей в активной области, что в свою очередь уменьшает коэффициент усиления и смещает максимум усиления в сторону больших длин волн.

Зависимость коэффициента усиления от мощности на выходе ПОУ при токе инжекции 180 мА показана на рис. 5.

Насыщение коэффициента усиления записывается в виде функции выходной мощности P [7]

$$G = G_{ss} \exp(P / P_{sat}), \quad (2)$$

где G_{ss} — коэффициент усиления слабого сигнала, P_{sat} — мощность насыщения

$$P_{sat} = hvA\eta / (\tau\Gamma\alpha), \quad (3)$$

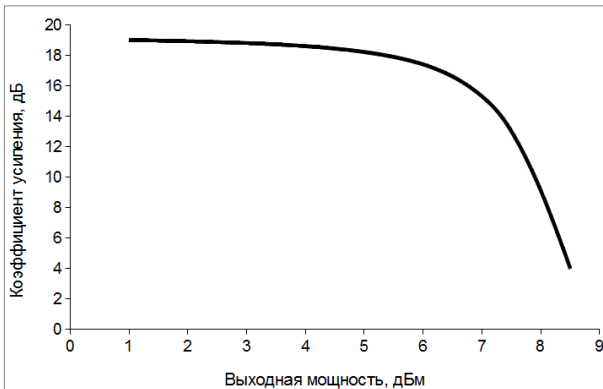


Рис. 5. Насыщение коэффициента усиления. Ток инжекции 180 мА

Табл. 1. Зависимость мощности насыщения от тока инжекции

Ток накачки, мА	Мощность насыщения, дБм
150	5
200	8
250	10
300	11

где τ — время жизни носителей, Γ — коэффициент оптического ограничения, a — дифференциальное усиление, A — площадь поперечного сечения активной полоски, η — коэффициент ввода излучения.

Мощностью насыщения называется мощность на выходе, при которой коэффициент усиления падает в 2 раза. Увеличение тока инжекции увеличивает мощность насыщения, т.к. уменьшается время жизни носителей и дифференциальное усиление. Значения мощности насыщения при различных токах инжекции приведены в табл. 1.

Основной характеристикой, влияющей на качество усиливаемого сигнала, является шум-фактор. Шум-фактор показывает, как сильно возрастает шум в усилителе по сравнению с полезным сигналом, и определяется как отношение сигнал-шум на входе к отношению сигнал-шум на выходе усилителя. Основным источником шума оптического усилителя являются биения между сигналом и усиленным спонтанным излучением. Шум-фактор выражается следующим образом:

$$NF = 2 n_{sp} \alpha, \quad (4)$$

где n_{sp} — коэффициент инверсии (равен 1 при полной инверсии), α — коэффициент потерь на входе (обратно пропорционален коэффициенту ввода). Минимально достижимый коэффициент шума равен 2 (3 дБ). На практике измерение шум-фактора производится по формуле, которая в упрощенном виде записывается [8]

$$NF = 2 \cdot \rho_{ASE} / Gh\nu, \quad (5)$$

где ρ_{ASE} — спектральная плотность УСИ, G — коэффициент усиления. Результаты измерения шум-фактора приведены в табл. 2.

Высокий шум-фактор при низких токах инжекции связан с недостаточной инверсией. При высоких токах на шум-фактор оказывают влияние нагрев активной области; обратные отражения на гранях кристалла и торцах волокна.

Табл. 2. Шум-фактор при разных токах инжекции

Ток инжекции, мА	Шум-фактор, дБ
100	10
200	7
300	8

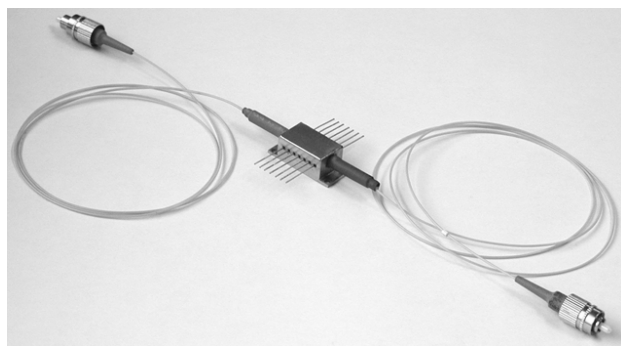


Рис. 6. Полупроводниковый оптический усилитель

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований характеристик оптических усилителей получены следующие данные.

Коэффициент усиления	20–27 дБ
Максимальная выходная мощность на выходе усилителя	12 дБм
Минимальная мощность входного сигнала (чувствительность)	–20 дБм
Мощность насыщения	8–11 дБм
Шум-фактор	7–8 дБ
Ширина полосы усиления	30–40 нм

Конструкция модуля полупроводникового оптического усилителя в корпусе типа "Баттерфляй" представлена на рис. 6.

В результате проведенной работы были созданы полупроводниковые оптические усилители на длину волны 840, 1064, 1300, 1550 нм на основе квантоворазмерных гетероструктур. Описанные в работе оптические усилители использовались в волоконно-оптических системах передачи информации в качестве усилителей мощности выходного излучения. На основе ПОУ были созданы полупроводниковый кольцевой лазер и датчик вращения на длину волны 1550 нм [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дураев В.П. // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. № 3-4. С. 40.
2. Слепов Н.Н. Оптические усилители. Ч. 1 // Мир связи. 1999. № 8. С. 88–91.
3. Слепов Н.Н. Оптические волновые конвертеры и модуляторы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2000. № 6. С. 6.
4. Волоконно-оптическая техника (история, достижения, перспективы) / Под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. Москва, 2000.
5. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П. и др. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 6. С. 529–530.
6. Eisenstein G., Jopson R.M., Linke R.A. et al. Gain measurements of InGaAsP 1.5 μm optical amplifiers // Electron. Lett. 1985. V. 21, N 23. P. 1076–1077.
7. Siegman A.E. Lasers. University Science Books. Mill Valley, 1986. Section 7.7. P. 297–303.
8. Simon J.C., Doussiere P., Pophillat L., Fernier B. Gain and noise characteristics of a 1.5 μm near-travelling-wave semiconductor laser amplifier // Electron. Lett. 1989. V. 25. P. 434–436.
9. Акпаров В.В., Дмитриев В.Г., Дураев В.П., Казаков А.А. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 10. С. 851.

ЗАО "Новая лазерная техника", Москва
(Дураев В.П.)

Научно-исследовательский институт "Полюс"
им. М.Ф. Стельмаха, Москва (Медведев С.В.)

Контакты: Медведев Сергей Витальевич,
smdvdv@gmail.com

Материал поступил в редакцию 16.03.2012.

SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIERS FOR THE 840–1550 nm SPECTRAL RANGE

V. P. Duraev¹, S. V. Medvedev²

¹*Joint-stock company "NOLATECH" (New Laser technology), Moscow*

²*POLYUS Research and Development Institute, Moscow*

This paper presents the results of research and development of semiconductor optical amplifiers for the 840–1550 nm spectral range. The design of a semiconductor optical amplifier based on quantum-well heterostructures is presented. Investigations of the main characteristics (gain, saturation power, noise factor etc.) are discussed.

Keywords: semiconductor optical amplifier, optical gain, saturation power, noise factor

•