ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2002. Т. LV, № 3.

УДК 621.38 РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

О.В. БАГДАСАРЯН, С.Г. ДАШЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представлена математическая модель, описывающая работу полупроводникового оптического усилителя. Проведено исследование его усилительных свойств методом компьютерного моделирования.

Ключевые слова: оптические усилители, полупроводниковые оптические усилители, скоростные уравнения.

Одним из основных компонентов волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) являются оптические усилители (ОУ) [1-3]. ОУ, применяемые в современных волоконно-оптических линиях связи, подразделяются на усилители-ретрансляторы типа свет-ток-свет и чисто оптические усилители, такие как: волоконные усилители с примесью эрбиума и полупроводниковые оптические усилители (ППОУ). Чисто оптические усилители обладают важным преимуществом: способностью работать независимо от стандарта передачи в канале связи. Это свойство, а также малые шумы и возможность интегрального исполнения для ППОУ способствуют их широкому распространению.

ППОУ оказались первыми чисто ОУ, доработанными до уровня промышленного использования. Они способны работать в отличие от других видов ОУ как в окне прозрачности 1300 *нм*, так и 1550 *нм* [1, 4]. Работа полупроводниковых ОУ основана на использовании возбуждаемой эмиссии в p-n переходе, возникающей благодаря взаимодействию фотонов входного излучения с электронами на возбужденном уровне зоны проводимости. Усиление возможно при условии создания определенного уровня инверсии населенности (избытка электронов в зоне проводимости) за счет накачки, роль которой играет ток инжекции в полупроводнике. Однако при этом энергия основной массы электронов еще недостаточна для преодоления потенциального барьера между зонами. Для этого еще требуется дополнительная энергия возбуждения. Входной сигнал - источник первичных фотонов - служит таким источником возбуждения, энергия которого должна быть достаточна, чтобы сбросить электроны с верхнего уровня на нижний, где электронно-дырочная рекомбинация приводит к появлению вторичных фотонов. Если один первичный фотон вызывает эмиссию k вторичных фотонов, то имеется k-кратное оптическое усиление [2,4].

ППОУ могут быть использованы по крайней мере в трех различных классах оптических систем: усилителях, компенсаторах дисперсии и оптических коммутаторах [2-5].

Существует два типа ППОУ: подпороговые и надпороговые. Подпороговые усилители - это полупроводниковые лазеры, работающие в режиме ниже порога генерации излучения, надпороговые (или усилители с фиксированным усилением) - лазеры, работающие в режиме выше порога генерации излучения, у которых устранен резонатор [2,4]. В настоящей работе проводится моделирование работы подпорогового усилителя, используемого в качестве узкополосного усилителя, широко применяемого в современных системах WDMA (системы связи с частотным разделением каналов).

Математические модели, описывающие работу ППОУ, бывают двух видов: стационарные и скоростные. С тенденцией увеличения скорости передачи информации в сетях ВОЛС произошел переход от стационарных моделей к скоростным. В настоящей работе с помощью компьютерного моделирования проведено исследование ППОУ на основе известной математической модели скоростных уравнений [4-9].

Работа ППОУ описывается дифференциальными уравнениями, которые определяют скорость изменения концентрации фотонов p(t) и электронов n(t) [5,6]:

$$\begin{cases} \dfrac{dp(t)}{dt} = \Gamma G(t)(n(t) - n_0)p(t) - \dfrac{p(t)}{\tau_ф} + \dfrac{\beta\Gamma n(t)}{\tau_н} + p_{ВХ}(t), \\ \dfrac{dn(t)}{dt} = \dfrac{I}{qV_a} - G(t)(n(t) - n_0)p(t) - \dfrac{n(t)}{\tau_н}, \end{cases}$$

где Г - коэффициент ограничения мод; n_0 - концентрация электронов в состоянии покоя; β - коэффициент спонтанного излучения; $\tau_ф$ и $\tau_н$ - продолжительность жизни фотонов и электронов; I - постоянный ток инжекции; q - заряд электрона; V_a - объем активного слоя; $p_{вх}(t)$ - плотность фотонов входного сигнала; G(t) - параметр насыщения коэффициента усиления, который определяется как $G(t) = v_{гр}\alpha_0 / (1 + \varepsilon p(t))$; ε - коэффициент ограничения усиления; α_0 - коэффициент усиления; Vгр - групповая скорость.

В рассматриваемой модели на вход усилителя подается битовая последовательность, каждый импульс которой описывается системой выражений

$$p_{ВХ}(t) = \begin{cases} p_{0вх} + p_{1вх}(1 - e^{-\frac{2,2t}{\tau_r},}) & \text{если } Б_{тек.} = 1, Б_{пред.} =, 0 \\ p_{0вх} + p_{1вх}e^{-\frac{2,2t}{\tau_r},} & \text{если } Б_{тек.} = 0, Б_{пред.} =, 1 \\ p_{0в.}, & \text{если } Б_{тек.} = 0, Б_{пред.} = 0 \\ p_{0вх} + p_{1в}, & \text{если } Б_{тек.} = 1, Б_{пред.} =, 1 \end{cases}$$

где $Б_{тек}$ и $Б_{пред}$ - соответственно текущие и предыдущие биты сигнала; $p_{0вх}$ и $p_{1вх}$ - минимальное и максимальное значения плотности фотонов входного оптического сигнала, т.е. значения плотности фотонов при нулевом и единичном битах сигнала; τ_r - продолжительность подъема или спада импульса сигнала.

Выходная мощность зависит от плотности фотонов следующим образом [7]:

$$P(t) = \frac{p(t)}{2} \frac{V_a \eta_0 h\nu}{\Gamma \tau_ф},$$

где η_0 - квантовая эффективность; $h\nu$ - энергия фотона.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений проводилось методом Рунге-Кутта с переменным шагом интегрирования по заданной точности счета.

Исследование усилительных свойств моделировалось при следующих значениях параметров ППОУ, соответствующих сплаву InGaAsP [7] (табл.):

Таблица

Обозначение	Название	Значение
Γ	Коэффициент ограничения мод	0,4
n_0	Начальная плотность электронов	10^{18} *см*$^{-3}$
$\tau_ф$	Продолжительность жизни фотонов	3 *пс*
$\tau_н$	Продолжительность жизни электронов	1 *нс*
β	Коэффициент спонтанного излучения	$3*10^{-5}$
q	Заряд электрона	$1,6*10^{-19}$ *К*
$V_{гр}$	Групповая скорость	$8,5*10^{9}$ *см/с*
ε	Коэффициент ограничения усиления	10^{-17} *см*^{3}
V_a	Объем активного слоя	$1,5*10^{-10}$ *см*^{3}
η_0	Полная квантовая эффективность	0,1
λ	Длина волны	1,3 *мкм*
$p_{вх}$	Мощность входного сигнала	8 *мкВт*

На рис.1 приведен входной сигнал усилителя с битовой последовательностью 01010101 со скоростью 3 *Гбит/с*, τ_r =0,2 *T*, где T - период импульса, а на рис.2 - соответствующий выходной сигнал усилителя при токе инжекции 32,6 *мА*.

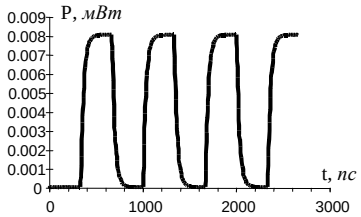

Рис. 1

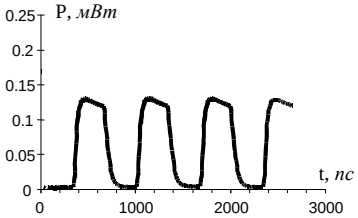

Рис.2

Как видно из полученных зависимостей, усиленные импульсы с хорошей точностью повторяют форму входных импульсов. Небольшой наклон вершин импульсов обусловлен релаксационными процессами в полупроводниковой структуре.

Исследование оптического усилителя производилось при разных скоростях передачи входного сигнала, в частности, при 300 *Мбит/с* и 3 *Гбит/с*, а также при токах инжекции 32,6 и 33,5 *мА*, что меньше порогового значения лазерной генерации (33,7 *мА* при приведенных выше параметрах). Исследование показало, что происходит запаздывание выходных импульсов по сравнению с входными примерно на 20 *пс*, а также увеличение коэффициента усиления до ≈13 *дБ* с увеличением тока инжекции. Полученные значения хорошо согласуются с известными параметрами современных оптических усилителей [10]. При увеличении скорости входной последовательности импульсов (в частности, до 10 *Гбит/с*) происходит незначительное изменение формы выходных импульсов с сохранением усилительных свойств (усиление ≈ 13 *дБ*). А при увеличении мощности входного излучения ППОУ начинает переходить в нелинейный режим усиления с выходом в режим насыщения. В нелинейном режиме происходит уменьшение коэффициента усиления, а при насыщении оно доходит до минимума (в частности, 5 *дБ*).

Составленная компьютерная модель дает возможность исследовать различные ППОУ и оптимизировать ее конкретные параметры. В дальнейшем предполагается исследовать возможность моделирования полупроводниковых оптических коммутаторов-переключателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jungkeun Lee**, Roles of Semiconductor Laser Amplifiers in WDM/TDM Fiber-Optical Communications // Kamaya&Tsuchiya Lab. Departament of Electronic Engineering/ The University of Tokyo,1997.
2. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы: Сборник статей / Под ред. **С.А. Дмитрева, Н.Н.Слепова.** - М.: Изд. Connect, 2000.- 376 с.
3. **Иванов А.Б.** Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения.- М.: Компания Сайрус Системс, 1999. – 671 с.
4. Photonic devices for telecommunications: how to model and measure / **Ed. G. Guekos,** Springer-Verlag, 1999. – 404 p.
5. Coherence, Amplification, and Quantum Effects in Semiconductor Laser. **Edited by Yoshihisa Yamamoto**, John Wiley&Sons, Inc.,1991.- 641p.
6. **Yamamoto Y.** IEEE, Quantum Electronics, QE - 19, 34 - 46, 1983.
7. **Chung-Sheng L., Franklin Fuk-Kay Tong, Karen Lui, David G. Messerschmitt.** Channel Capacity Optimization of Chirp-Limited Dense WDM/WDMA Systems Using OOK/FSK Modulation and Optical Filters // Journal of Lightwave Technology. – 1992. - Vol.10, ¹ 8. - P. 1148 - 1161.
8. Физика полупроводниковых лазеров: Пер. с японск; Под ред. **Х.Такумы.** - М.: Мир, 1989. – 310 с.
9. **Corvini P.J.and Koch T.L.** Computer Simulation of High-Bit-Rate Optical Fiber Transmission Using Single - Frequency Laser// Journal of Lightwave Technology. – 1987. - Vol. 5, No.11. – P.1591 - 1595.
10. http://www.optospeed.com

11. ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.02.2001.

Հ.Վ. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Ս.Գ. ԴԱՇՅԱՆ

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԿՈՄՊՅՈՒՏԵՐԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ներկայացված է կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարի աշխատանքը նկարագրող մաթեմատիկական մոդելը, քոմփյութերային մոդելավորման մեթոդով հետազոտված են վերջինիս հատկությունները:

H.V. BAGHDASARYAN, S.G. DASHYAN

INVESTIGATION OF SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER'S OPERATION VIA COMPUTER SIMULATION

A semiconductor optical amplifiier (SOA) application and its mathematical model are described. Investigations of amplifying properties of SOA by a computer simulating method are carried out.