

文章编号: 1001-3806(2012)03-0289-04

集成双波导半导体光放大器小信号放大纵向特性

缪庆元¹, 何健², 何平安¹, 王宝龙¹, 黄德修²

(1. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079; 2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了研究集成双波导半导体光放大器(ITG-SOA)小信号放大纵向特性, 运用ITG-SOA静态分析模型进行了分析。结果表明, 小信号放大时, ITG-SOA有源和无源波导间能够实现周期性光功率转移和完全的功率交换; 与半导体光放大器中载流子浓度沿纵向单调下降明显不同, ITG-SOA有源波导中的载流子浓度沿纵向周期性摆动, 且摆动幅度沿纵向逐渐加大; 有源波导归一化层厚度、有效折射率和纵向传播常数等特性参量亦呈现出特有的纵向分布。这一结果对于深刻理解ITG-SOA小信号放大时的工作机理是有帮助的。

关键词: 集成光学; 纵向分布特性; 静态分析模型; 集成双波导半导体光放大器

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.001

Longitudinal characteristics under small signal amplification of integrated twin-guide semiconductor optical amplifiers

MIAO Qing-yuan¹, HE Jian², HE Ping-an¹, WANG Bao-long¹, HUANG De-xiu²

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to investigate the longitudinal characteristics under small signal amplification of an integrated twin-guide semiconductor optical amplifier (ITG-SOA), a comprehensive ITG-SOA static model was utilized for analysis. Theoretical analysis reveals the optical power transfer between the active and passive waveguides of ITG-SOA is periodic and complete. Differing prominently from the decreasing monotonously of the carrier density along the propagation direction in SOA, the carrier density in the active waveguide of ITG-SOA swings periodically, whose amplitude increases gradually along the propagation direction. The normalized layer thickness, effective refractive index and longitudinal propagation constant in the active waveguide also present particular longitudinal distribution. This result is helpful for deeply understanding the working mechanism of ITG-SOA under small signal amplification.

Key words: integrated optics; longitudinal distribution characteristics; static analysis model; integrated twin-guide semiconductor optical amplifier

引言

集成双波导半导体光放大器(integrated twin-guide semiconductor optical amplifier, ITG-SOA)^[1]包括两个互相耦合的平行波导。上层为提供光信号放大的有源波导, 下层为完成光信号的输入和输出功能的无源波导。ITG-SOA将光的放大功能与光的输入-输出功能相互分开, 分别由不同的“部件”完成。这种结构形式

非常适合于功能元件之间通过无源波导相互连接, 是构建未来光子集成回路的重要理念之一。例如, 基于ITG-SOA的光开关矩阵^[2-3]很有希望成为下一代光包交换网络中关键的单片集成器件。

ITG-SOA的有源波导即为通常结构的半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)^[4]。受激辐射导致的载流子浓度变化将引起有源波导的材料折射率的改变^[5]。由于光信号在有源波导中沿传播方向放大的同时, 有源和无源波导间又存在着光功率的交换, 因此, 有源波导的不同部分和无源波导间具有不同的相位匹配程度, 并随入射光功率大小变化。所以, 输入光功率的大小改变两波导间光功率转移的效率, 影响ITG-SOA的放大特性。有学者用早期的模型^[1, 6]对ITG-SOA的部分特性进行了研究, 但是忽略了有源波导

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60877039); 湖北省自然科学基金资助项目(2008CDB328)

作者简介: 缪庆元(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事光通信有源器件、通信与电子系统的研究。

E-mail: miaoqy@whu.edu.cn

收稿日期: 2011-09-16; 收到修改稿日期: 2011-10-18

中载流子浓度和光功率间的相互作用,假定了有源和无源波导间的相位匹配程度固定不变且沿整个纵向(即光场传播方向)一致,因而限制了模型的适用范围。

对此,作者考虑了载流子浓度和光功率间的相互作用以及有源和无源波导间相位匹配程度非一致的空间分布及其随输入光功率大小的变化,建立了 ITG-SOA 的静态分析模型,分析了 ITG-SOA 的增益谱和静态增益饱和特性,有效地扩展了先前模型的适用范围^[7]。由于小信号放大纵向特性是 ITG-SOA 工作基础的重要组成部分,因此,本文中进一步应用理论模型,详细分析 ITG-SOA 在小信号放大时,相应于光功率的纵向变化,载流子浓度、有源波导归一化层厚度、有效折射率和纵向传播常数等特性参量的纵向分布特性,从而深刻理解 ITG-SOA 小信号放大时的工作机理,为 ITG-SOA 的应用提供理论依据。因为定量分析的数值大小会随器件参量变化,所以分析中与 SOA 的特性进行了比较,SOA 参量的取值与 ITG-SOA 有源波导参量的取值完全一致。采用比较分析亦有助于对 ITG-SOA 特性的一般性理解。

1 ITG-SOA 静态分析模型

假设波导端面完全增透,只存在前向行波。ITG-SOA 的耦合区沿纵向被等分成许多个小段,当分段数足够大时可近似地认为在每一小段 i 中各种材料和结构参量的分布是均匀的。每一小段对应于时间间隔 t 到 $t + \Delta t$, $\Delta t = \Delta z \times n_{\text{eff}} / c$, Δz 为每一小段的长度, n_{eff} 为波导有效折射率, c 为自由空间的光速, $A_{1,i}$ 和 $A_{2,i}$ 分别代表进入第 i 段无源和有源波导的归一化光场包络函数。

为描述第 i 段有源波导中载流子浓度与光功率间的相互作用,应用速率方程^[8]:

$$\frac{dN_{2,i}}{dt} = \frac{J}{ed} - R - \sum_j \frac{\Gamma_{2,i,j} g_{2,i,j} P_{2,i,j,av}}{A_c h \nu_j} \quad (1)$$

式中 J 代表注入电流密度, e 为电子基本电量, d 为有源区厚度, R 为复合速率项, A_c 代表有源区横截面积, h 为 Planck 常数, ν 代表入射光频, N , n , g , β 和 Γ 分别代表载流子浓度、材料折射率、材料增益系数、纵向传播常数和模场限制因子。 $P_{2,i,j,av} = (|A_{2,i,j}|^2 + |A_{2,i+1,j}|^2) / 2$ 为第 j 个波长的光在有源波导第 i 段中的平均功率。

复合速率项 R 与载流子浓度 N 的关系为:

$$R(N_{2,i}) = c_1 N_{2,i} + c_2 N_{2,i}^2 + c_3 N_{2,i}^3 \quad (2)$$

式中 c_1 , c_2 和 c_3 为复合常数。

材料增益系数 $g_{2,i,j}$ 采用常用的经验公式^[9]:

$$\begin{cases} g_{2,i,j}(N_{2,i}, \lambda_j) = g_N(N_{2,i} - N_1) - a_1 [\lambda_j - \lambda_p(N_{2,i})]^2 + a_2 [\lambda_j - \lambda_p(N_{2,i})]^3 \\ \lambda_p(N_{2,i}) = \lambda_1 - a_3(N_{2,i} - N_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中 g_N , a_1 , a_2 和 a_3 为增益常数, λ_1 为透明载流子浓度为 N_1 时的峰值波长, λ_p 是载流子浓度为 $N_{2,i}$ 时的峰值波长。

考虑载流子浓度对折射率的调制特性,假定折射率变化和载流子浓度线性相关,由此得出折射率的侧向分布。运用平板介质波导模型^[10],求出第 i 段有源区的侧向光场分布、模场限制因子。

第 i 段的输入 $A_{1,i,j}$ 和 $A_{2,i,j}$ 与第 i 段的输出 $A_{1,i+1,j}$ 和 $A_{2,i+1,j}$ 的关系由参考文献[6]导出:

$$\begin{bmatrix} A_{1,i+1,j}(z + \Delta z) \\ A_{2,i+1,j}(z + \Delta z) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} A_{1,i,j}(z) \\ A_{2,i,j}(z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $T = \begin{bmatrix} e^{-j\varphi_i \kappa_i \Delta z} \cos^2 \psi_{i,j} + e^{j\varphi_i \kappa_i \Delta z} \sin^2 \psi_{i,j} & \sin \psi_{i,j} \cos \psi_{i,j} (e^{-j\varphi_i \kappa_i \Delta z} - e^{j\varphi_i \kappa_i \Delta z}) \\ \sin \psi_{i,j} \cos \psi_{i,j} (e^{-j\varphi_i \kappa_i \Delta z} - e^{j\varphi_i \kappa_i \Delta z}) & e^{-j\varphi_i \kappa_i \Delta z} \sin^2 \psi_{i,j} + e^{j\varphi_i \kappa_i \Delta z} \cos^2 \psi_{i,j} \end{bmatrix} e^{\frac{g_{2net,i,j} - j^2(\beta_{1,i,j} + \beta_{2,i,j})}{4} \Delta z}$, $\varphi_{i,j} = [(\Delta \beta_{i,j} + j\delta_{i,j})^2 + 1]^{1/2}$, $\tan \psi_{i,j} = -\Delta \beta_{i,j} - j\delta_{i,j} + \varphi_{i,j}$, $\Delta \beta_{i,j} = (\beta_{1,i,j} - \beta_{2,i,j}) / (2\kappa_{i,j})$, $\delta_{i,j} = -g_{2net,i,j} / (4\kappa_{i,j})$, $g_{2net,i,j} = \Gamma_{2,i,j} \times g_{2,i,j} - \alpha_{int}$ 。其中 α_{int} 和 g_2 分别为有源波导的内部损耗系数和材料增益系数, g_{2net} 为净模增益系数, κ 是有源和无源波导间的耦合系数^[10]。

输入光信号在 SOA 中的传播可表示为:

$$A_{2,i+1,j}(z + \Delta z) = \exp\left[\left(\frac{g_{2net,i,j}}{2} - j\beta_{2,i,j}\right)\Delta z\right] A_{2,i,j}(z) \quad (5)$$

将(1)式和(4)式以及平板介质波导模型相结合,ITG-SOA 各参量的纵向变化可自恰地解得。以(5)式代替(4)式,同样可得到 SOA 中相关参量的变化。

2 小信号放大纵向特性

如表 1 所示,选择目前长波长光通信器件广泛采用的 InGaAsP/InP 作为 ITG-SOA 的材料。其中,有源

Table 1 Layer parameters of the ITG-SOA ($T=300\text{K}$)

| layer No. | materials | thickness | RI | RI change |
|-----------|--|-----------|--------|-----------|
| 1 | p-InP | | 3.1817 | 0.0017* |
| 2 | In _{0.42} Ga _{0.58} As _{0.9} P _{0.1} | 0.144 μm | 3.6331 | -0.0937** |
| 3 | n-InP | 0.54 μm | 3.1817 | 0.0002* |
| 4 | n-In _{0.81} Ga _{0.19} As _{0.43} P _{0.57} | 0.6 μm | 3.3262 | 0.0010* |
| 5 | n-InP | | 3.1817 | 0.0002* |

* : doping-induced RI change, doping density is $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$; ** : injection carrier-induced RI change, carrier density is $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

波导材料为与 InP 晶格匹配、带隙波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的体材料 $\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$; 无源波导为与 InP 晶格匹配、带隙波长为 $1.2\mu\text{m}$ 的体材料 $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ 。各层材料的折射率 (refractive index, RI)、折射率变化以及有源波导材料的微分折射率系数 dn/dN (见表 2) 根据参考文献 [5] 和参考文献 [11] 计算得出。为使 ITG-SOA 有效工作, 必须保证在工作电流注入且无入射光的情况下, 有源波导的有效折射率和无源波导的有效折射率相等或接近。由于在电流注入后, 有源波导的材料折射率仍然高于无源波导的材料折射率, 必须使有源波导的厚度小于无源波导, 以便在电流注入后两波导间满足相位匹配条件。设计两波导的厚度使器件在 $1.55\mu\text{m}$ 窗口单模工作, 同时有源波导应有合适的模场限制因子。计算中采用的其它参量由表 2 给出^[9]。为简单起见, 仅考虑 TE 模的情况, 并假定电流在有源波导纵向各段中均匀注入, 且在没有入射光时载流子浓度在有源波导内均匀分布。

Table 2 Other parameters used in the calculation

| parameter | value | parameter | value |
|-----------|---|-----------------------|--|
| c_1 | $2.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ | g_N | $2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ |
| c_2 | $1 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | λ_1 | $1.617 \mu\text{m}$ |
| c_3 | $9.4 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \cdot \text{s}^{-1}$ | N_t | $0.9 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ |
| a_1 | $7.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ | α_{int} | 2000 m^{-1} |
| a_2 | $3.155 \times 10^{25} \text{ m}^{-4}$ | dn/dN | $-2.08 \times 10^{-26} \text{ m}^3$ |
| a_3 | $3 \times 10^{-32} \text{ m}^4$ | J | $9.65 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ |

设入射连续光的波长为 1550nm , 无源波导端面入射光功率取 3 个不同的值: -30dBm , -26dBm 和 -23dBm 。小信号放大时, 有源和无源波导中光功率沿纵向 (图中用 z 表示) 的分布如图 1 所示。图中纵坐标为归一化光功率, 即纵向各点的光功率与入射光功率的比值 (P/P_{in})。图中同时描述了光信号在 SOA 中沿纵向的放大过程。3 个不同入射功率的光信号无论在 ITG-SOA 中还是在 SOA 中都得到了接近等倍数的放大。在 $400\mu\text{m}$ 和 $800\mu\text{m}$ 耦合区长度处, 无源波导中分别出现小信号放大时的第 2 个和第 3 个光功率峰值, 第 1 个功率峰值点为入射端。为了得到最大的增益, 取 ITG-SOA 耦合区的长度为 $400\mu\text{m}$ 或 $800\mu\text{m}$, 并将相应的 ITG-SOA 分别简称为 ITG-SOA ($400\mu\text{m}$) 和 ITG-SOA ($800\mu\text{m}$)。因为无源波导中第 2 个和第 3 个光功率峰值的位置会随着间隔层的厚度或其它参量变化, 所以 ITG-SOA ($400\mu\text{m}$) 和 ITG-SOA ($800\mu\text{m}$) 实际上代表了两种不同类型的 ITG-SOA。图 1 中, $400\mu\text{m}$ 长的 SOA 的小信号放大倍数与 ITG-SOA ($800\mu\text{m}$) 相等, 功率增益分贝数为同长度的 ITG-SOA ($400\mu\text{m}$) 的两倍。这是因为光信号在 ITG-SOA 的每一个波导中

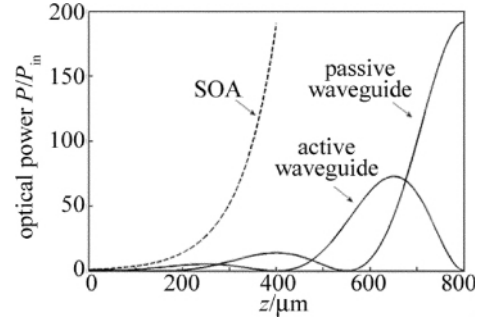


Fig. 1 Longitudinal distribution of optical power in active and passive waveguides

都经历了一半的时间, 其小信号增益为两波导的平均值。上述分析表明: 小信号放大时, 光信号在 ITG-SOA 的有源和无源波导中周期性交替转移, 此时两波导间能够实现完全的功率交换。

不同入射光功率下, ITG-SOA 有源波导和 SOA 中的载流子浓度沿光场传播方向的分布分别如图 2a 和图 2b 所示。与 SOA 中载流子浓度沿纵向单调下降不同, ITG-SOA 有源波导中的载流子浓度呈现周期性的向下摆动。对照图 1 可以看出, 在有源波导中光功率最大处, 载流子浓度最低; 而在光功率归“0”时, 载流子浓度亦回到起始值。载流子浓度的摆动幅度与有源波导中光功率的摆动幅度相对应, 沿纵向逐渐加大。并且随着入射光功率的增大, 载流子浓度摆动的幅度也相应地增加。在小信号放大时, 由于有源波导中的光功率未达到饱和值, 载流子浓度的变化幅度较小。

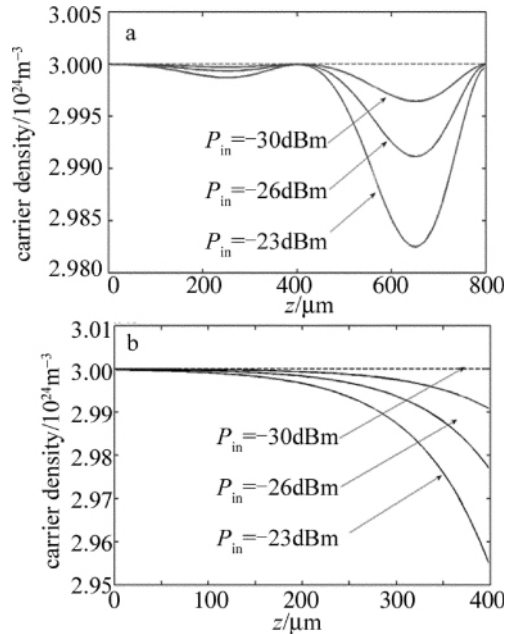


Fig. 2 Longitudinal distribution of carrier density with different input optical power
a—active waveguide of ITG-SOA b—SOA

由于载流子浓度的变化必然引起有源波导材料折射率的改变, 因此, 有源波导归一化层厚度、有效折射率和纵向传播常数皆会周期性地变化。图 3 为有源波

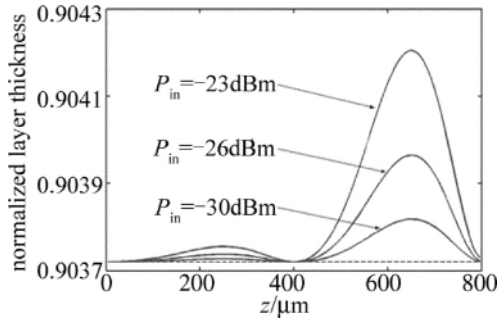


Fig. 3 Longitudinal variation of normalized layer thickness of active waveguide

导归一化层厚度沿纵向的变化情况。对照图 2a 可见, 伴随着载流子浓度周期性地向下摆动, 有源波导归一化层厚度周期性地向上摆动, 且摆动幅度与载流子浓度的摆动幅度相对应, 沿纵向逐渐加大。

图 4 为有源波导的有效折射率沿光场传播方向的变化情况, 图中的虚线表示无源波导的有效折射率, 它等于无光注入时有源波导的有效折射率。图 4 表明, 有源波导的有效折射率沿着光场传播方向, 在无源波导的有效折射率附近小幅度向上周期性地摆动。

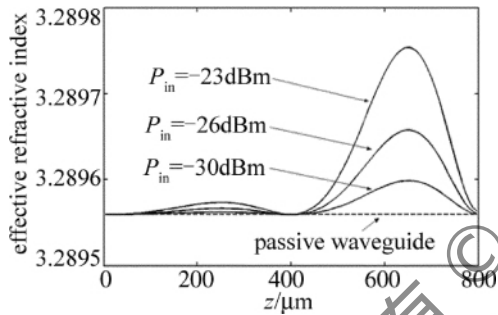


Fig. 4 Longitudinal variation of refractive index of active waveguide

图 5 说明了有源波导的纵向传播常数沿光场传播方向的变化, 图中虚线表示无源波导的纵向传播常数。由图 5 可见, 有源波导的纵向传播常数沿着光场传播方向, 在无源波导纵向传播常数附近小幅度向上周期性地摆动, 在 $0\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 及 $800\mu\text{m}$ 处与无源波导的纵向传播常数相等。

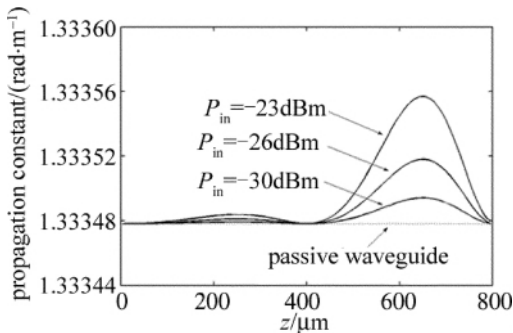


Fig. 5 Variation of longitudinal propagation constant of active waveguide

3 结论

理论分析结果表明, ITG-SOA 在小信号放大时的

纵向特性具有如下特点: 有源和无源波导间能够实现周期性光功率转移和完全的功率交换; 有源波导中的载流子浓度呈现周期性地向下摆动, 摆动幅度沿光场传播方向逐渐加大, 并且随着入射光功率的增大, 载流子浓度摆动的幅度也相应地增加; 有源波导归一化层厚度、有效折射率和纵向传播常数等特性参量呈现出周期性向上摆动, 且摆动幅度沿光场传播方向也不断加大。

参考文献

- [1] KAMBAYASHI T, SUEMATSU Y. Amplification characteristics of integrated twin-guide laser amplifier [J]. The Transactions of the IECE of Japan, 1981, E64(7): 489-496.
- [2] GELDENHUYS R, van der MERWE J S, THAKULSUKANANT K, *et al.* Contention resolution and variable length optical packet switching using the active vertical-coupler-based optical crosspoint switch [J]. Optical Switching and Networking, 2011, 8(2): 86-92.
- [3] HUANG B, LIU H X, WANG X, *et al.* Flexible optical packet compression and switching utilizing an optical crosspoint switch based on active vertical coupler [C] // 2009 Conference on Optical Fiber Communication. San Diego, USA: Optical Fiber Communication Conference 2009: 2370-2372.
- [4] CUI Y Ch, ZHANG Sh L, FENG J Y. The gain and polarization characteristics of semiconductor optical amplifiers [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 462-465 (in Chinese).
- [5] BENNETT B R, SOREF R A, del ALAMO J A. Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs and InGaAsP [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(1): 113-122.
- [6] THOMPSON G H B. Analysis of optical directional couplers that include gain or loss and their application to semiconductor slab dielectric guides [J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(11): 1678-1693.
- [7] MIAO Q Y, HUANG D X. Theoretical study of gain spectrum and static gain saturation characteristics of integrated twin-guide semiconductor optical amplifier [J]. Optics Express, 2006, 14(15): 6864-6869.
- [8] OBERMANN K, KINDT S, BREUER D, *et al.* Performance analysis of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor-optical amplifiers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(1): 78-85.
- [9] WILLNER A E, SHIEH W. Optimal spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting: single stage, fanout, and cascaded [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(5): 771-781.
- [10] YARIV A. Optical electronics in modern communications [M]. London: Oxford University Press, 1997: 491-540.
- [11] WEBER J P. Optimization of the carrier-induced effective index change in InGaAsP waveguides—application to tunable Bragg filters [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(8): 1801-1816.