

半导体光放大器的快速饱和效应及其长度对 TOAD 解复用器性能的影响*

谢崇进 叶培大

(北京邮电大学 57 信箱 北京 100876)

提要 分析了半导体光放大器(SOA)的快速饱和效应及其长度对 TOAD 解复用器性能的影响, 对小开关窗口和大开关窗口两种工作模式进行了研究。经分析发现, 半导体光放大器的快速增益饱和效应对开关窗口的形状和开关能量都有很大的影响, 而且开关能量随控制脉冲宽度的变化关系对两种工作模式是完全不同的。研究表明考虑 SOA 长度效应后, 第二个开关窗口的幅度可大大减小, 这说明适当地增加半导体光放大器的长度可以进一步降低 TOAD 的开关窗口, 提高 TOAD 的速率。

关键词 光时分复用, 解复用器, 半导体光放大器, 全光信号处理, 快速增益饱和

全光解复用器是光时分复用(OTDM)系统的一个关键器件^[1]。最近人们提出了一种称之为 TOAD(Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer)的全光解复用器, 并在实验上得到了证实^[2,3]。由于 TOAD 具有开关能量小、结构紧凑、易于集成等特点, 是一种应用前景非常好的光时分复用系统的全光解复用器。

表示全光解复用器性能的两个最重要的参数是开关速度和开关能量, 如何提高开关速度降低开关能量是研究全光解复用器需要解决的问题。目前利用 TOAD 实现的最高速度是 250 Gb/s^[3], 由于半导体光放大器 SOA 的快速增益饱和效应的影响, TOAD 速率的进一步提高受到了限制。以前对 TOAD 的理论分析大多基于传统的半导体光放大器增益模型, 该模型只考虑了半导体光放大器中的载流子的脉动现象引起的增益饱和^[4,5]。最近, J. M. Tang 考虑了载流子发热和谱烧孔效应引起的快速增益饱和对 TOAD 性能的影响, 指出快速饱和效应将使 TOAD 的开关窗口产生振荡结构^[6]。本文就半导体光放大器中的快速增益饱和效应和半导体光放大器的长度对 TOAD 性能的影响进行了详细的分析, 包括开关窗口的形状、大小和开关能量, 就如何选取参数、优化 TOAD 的性能得到了相应的结论。

1 半导体光放大器的动态增益特性和 TOAD 的工作原理

1.1 半导体光放大器的动态增益特性

我们知道, 半导体光放大器的增益随输入光脉冲的变化而变化。当输入光脉冲的脉宽较宽

* 国家 863 计划(项目编号 863-317-9602-03-2)资助项目。

收稿日期: 1999-01-05; 收到修改稿日期: 1999-04-12

时, 半导体光放大器的动态增益特性主要由载流子密度的脉动效应决定^[7]。当输入信号为皮秒级的脉冲时, 载流子发热和谱烧孔效应将对其动态增益特性产生重要影响^[8,9]。当考虑各种非线性效应, 包括载流子密度的脉动效应、载流子发热和谱烧孔效应, 半导体光放大器的动态增益可以用下列公式来描述^[9]

$$\frac{dh_N(t)}{dt} = -\frac{h_N(t) - g_0}{\tau_s} - \frac{1}{P_s \tau_s} [G(t) - 1] P_{in}(t) \quad (1)$$

$$\frac{dh_\beta(t)}{dt} = -\frac{h_\beta(t)}{\tau_{1\beta}} - \frac{\epsilon_{SHB,\beta}}{\kappa \tau_{1\beta}} [G(t) - 1] P_{in}(t) - \frac{dh_{\beta,h}(t)}{dt} - y_\beta \frac{dh_N(t)}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dh_{\beta,h}(t)}{dt} = -\frac{h_{\beta,h}(t)}{\tau_{h\beta}} - \frac{\epsilon_{CH,\beta}}{\kappa \tau_{h\beta}} [G(t) - 1] P_{in}(t) \quad (3)$$

$$G(t) = \exp[g_m(t)] \quad (4)$$

$$g_m(t) = h_N(t) + \sum_{\beta} [h_{\beta,h}(t) + h_\beta(t)] \quad (5)$$

$$\Delta\phi(t) = -\frac{1}{2} \alpha_N h_N(t) - \frac{1}{2} \sum_{\beta} \alpha_{r\beta} h_{\beta,h}(t) \quad (6)$$

这里 $G(t)$ 为半导体光放大器的功率增益; $P_{in}(t)$ 为输入的信号光功率; $\beta = c, v$ 代表导带内的电子和价带内的空穴; $h_N(t)$, $h_\beta(t)$, $h_{\beta,h}(t)$ 分别代表和载流子密度脉动效应、载流子发热效应及谱烧孔效应相关的动态增益; g_0 为小信号增益系数; P_s 为半导体光放大器的饱和功率; τ_s 为载流子寿命时间; $\tau_{1\beta}$ 和 $\tau_{h\beta}$ 分别为谱烧孔效应和载流子发热效应的特征时间; $\epsilon_{SHB,\beta}$, $\epsilon_{CH,\beta}$ 分别为和谱烧孔效应及载流子发热效应相关的非线性增益压缩因子; $\kappa = \hbar\omega A v_g / \Gamma$ 为半导体光放大器中光子密度到光功率的转换系数, 其中 $\hbar\omega$ 为每个光子的能量, A 为半导体光放大器有源区的横截面积, Γ 为模式限制因子, v_g 为半导体光放大器中光的速度; y_β 代表半导体光放大器中总的载流子密度对导带和价带中的本地载流子密度的影响的相对大小, 并有关系式 $y_c + y_v = 1$; $\Delta\phi(t)$ 为信号经过半导体光放大器产生的相位移; α_N 和 $\alpha_{r\beta}$ 分别为与载流子密度脉动效应及载流子发热效应有关的线宽增强因子。如果忽略载流子发热效应及谱烧孔效应的影响, 这时 (1) 式即可描述半导体光放大器的动态增益, 以前的分析大多采用这种模型。

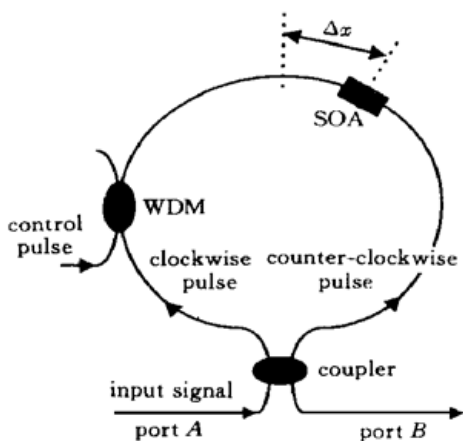


图 1 TOAD 结构示意图

Fig. 1 Configuration of TOAD. SOA: semiconductor optical amplifier

1.2 TOAD 的工作原理

TOAD 的结构如图 1 所示。它包括一个短光纤环, 其两端由一个 2×2 的 3 dB 耦合器连接, 一个稍微偏离光纤环中点放置的半导体光放大器, 和一个波分复用 (WDM) 耦合器。偏置量 Δx 为环的中点到半导体光放大器中心的距离。控制光脉冲从 WDM 耦合器注入。当信号注入 TOAD 时, 在 3 dB 耦合器处分成等幅同相的顺时针信号和逆时针信号, 这两路信号绕环一周后, 再在耦合器处重新合并。假定顺时针信号和逆时针信号绕环一周经历的增益和相位移分别为 $G_{cw}(t)$, $\Delta\phi_{cw}(t)$ 和 $G_{ccw}(t)$, $\Delta\phi_{ccw}(t)$, 则 A 端口和 B 端口的输出信号为

$$P_A(t) = \frac{1}{4} P_{in}(t) \{ G_{cw}(t) + G_{ccw}(t) + 2 \sqrt{G_{cw}(t) G_{ccw}(t)} \cos[\Delta\phi_{cw}(t) - \Delta\phi_{ccw}(t)] \} \quad (7)$$

$$P_B(t) = \frac{1}{4}P_{in}(t) \{G_{cww}(t) + G_{ccw}(t) - 2\sqrt{G_{cww}(t)G_{ccw}(t)}\cos[\Delta\phi_{cww}(t) - \Delta\phi_{ccw}(t)]\} \quad (8)$$

只要知道两路信号经历的增益和相位移,就可求出 TOAD 的输出信号。从上式可以看出,当没有控制脉冲时,顺时针和逆时针信号经历的增益和相位移相等,输入信号完全从 A 端口输出,当注入控制脉冲时,控制脉冲使得两路信号经历的增益和相位移不同,这时将有信号从 B 端口输出,从而实现解复用功能。

当忽略半导体光放大器长度时,半导体光放大器可以作为一个偏离环的中心放置的点元件。这时顺时针信号和逆时针信号经历的增益和相位移只有一个时延差,可表示为

$$G_{cww}(t - \Delta t) = G_{ccw}(t + \Delta t) = G(t) \quad (9)$$

$$\Delta\phi_{cww}(t - \Delta t) = \Delta\phi_{ccw}(t + \Delta t) = \Delta\phi(t) \quad (10)$$

这里 $\Delta t = \Delta x/v_{loop}$ 为偏置时间, v_{loop} 为光信号在环中的速度, $G(t)$ 和 $\Delta\phi(t)$ 为控制光脉冲经历的增益和相位移。这里假定输入信号光的功率很小,它不会改变半导体光放大器的增益特性,半导体光放大器的增益特性只受控制光脉冲的控制。控制光脉冲对半导体光放大器增益特性的影响可以由式(1)至(6)来描述。

1.3 半导体光放大器长度的影响

精确分析半导体光放大器的长度对 TOAD 性能的影响需要同时求解控制光脉冲、顺时针信号脉冲和逆时针信号脉冲在半导体光放大器中的传输方程,非常复杂。这里采用一种近似模型^[6]。假定半导体光放大器几乎是透明的,控制光在其中传输时形状不改变。根据这个假设,可以认为半导体光放大器的增益系数可以形状不变地在半导体光放大器中传输,就象控制光脉冲在其中传输一样。还假定控制光和信号光在半导体光放大器中的传输速度相同。根据这些假设,可以得到下面的关系式

$$G_{cww}(t) = G(t + \Delta t) \quad (11)$$

$$\Delta\phi_{cww}(t) = \Delta\phi(t + \Delta t) \quad (12)$$

$$G_{ccw}(t) = \exp\left[\frac{1}{L} \int_{L/2}^{L/2} \ln G(t - \Delta t - 2x/v_{SOA}) dx\right] \quad (13)$$

$$\Delta\phi_{ccw}(t) = \frac{1}{L} \int_{L/2}^{L/2} \Delta\phi(t - \Delta t - 2x/v_{SOA}) dx \quad (14)$$

这里 L 为半导体光放大器的长度, v_{SOA} 为光信号在半导体光放大器中的传输速度。

2 数值结果

根据上面的理论,采用数值计算来对 TOAD 的性能进行分析。在下面的计算中,采用的半导体光放大器的参数和文献[9]中的相同:饱和功率 $P_s = 28.4$ mW,载流子寿命时间 $\tau = 200$ ps,半导体光放大器的有源区横截面积 $A = 0.4 \mu\text{m}^2$,模式限制因子 $\Gamma = 0.3$,材料的折射率 $n_g = 3.56$,谱烧孔效应和载流子发热效应的特征时间常数为 $\tau_c = 70$ fs, $\tau_{hc} = 700$ fs,与它们相关的非线性增益压缩因子为 $\epsilon_{SHB,c} = 0.5 \times 10^{-23} \text{ m}^3$, $\epsilon_{CH,c} = 1.0 \times 10^{-23} \text{ m}^3$,线宽增强因子 $\alpha_v = 4.0$, $\alpha_{rc} = 3$,小信号增益 $G_0 = 25$ dB。计算中,假设控制脉冲为高斯脉冲,脉冲周期为 200 ps。

谱烧孔效应和载流子发热效应对半导体光放大器增益的影响见图 2,为便于比较,图中也给出了不考虑谱烧孔效应和载流子发热效应时的半导体光放大器的动态增益曲线。从图可以看出,由于谱烧孔效应和载流子发热效应的影响,半导体光放大器的动态增益曲线中产生了快

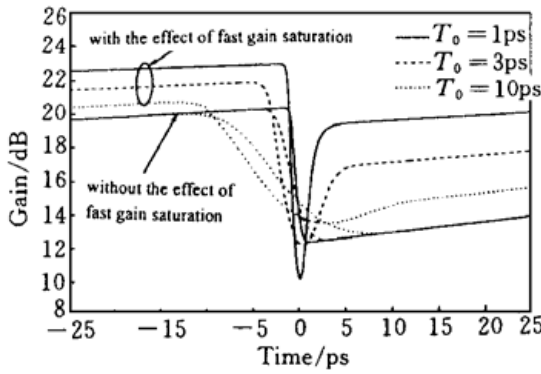


图 2 快速增益饱和效应对半导体光放大器动态增益特性的影响, T_0 为脉冲宽度
 Fig. 2 The effects of fast gain saturation on the gain dynamics of SOA. T_0 is the pulsewidth

速增益饱和现象。这时半导体光放大器的动态增益曲线可分成两部分:即快速增益饱和区和缓慢增益恢复区。快速增益饱和区是由谱烧孔效应和载流子发热效应产生,该区域很短,为皮秒量级,缓慢增益恢复区由载流子密度脉动效应产生,时间较长,恢复时间由载流子寿命时间决定,一般为几百皮秒。快速增益饱和效应受脉冲宽度的影响很大,脉冲越窄,快速增益饱和效应越大,当脉冲很宽时,该效应可以忽略。根据半导体光放大器的动态增益特性,可以把 TOAD 分成两种工作模式,即小开关窗口模式和大开关窗口模式。小开关窗口即是 TOAD 的偏置时间小于或等于快速增益饱和时间,对应于开关窗口很小的情况,TOAD 的开关特性由半导体光放大器的

快速增益饱和过程决定,而大开关窗口的偏置时间比半导体光放大器的快速增益饱和时间长很多,对应于开关窗口较大的情况,这时 TOAD 的开关特性主要由半导体光放大器缓慢增益恢复过程决定。

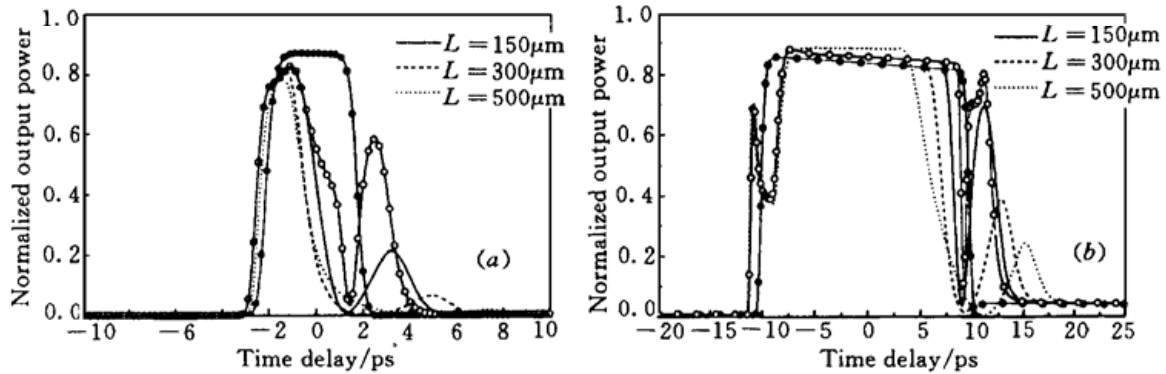


图 3 快速增益饱和效应和放大器的长度对 TOAD 开关窗口的影响,带实心圆和空心圆的线分别为不考虑快速增益饱和效应和长度及只考虑快速增益饱和效应的结果
 (a) 2 ps 偏置时间; (b) 10 ps 偏置时间
 Fig. 3 The effects of fast gain saturation and SOA length on the switching performance. solid and open circles are the results without the effects of fast gain saturation and SOA length and with the effects of fast gain saturation only, respectively
 (a) 2 ps offset time; (b) 10 ps offset time

图 3 给出了快速增益饱和效应和半导体光放大器的长度对 TOAD 性能的影响。图中给出三种不同长度的情况,即 $L = 150 \mu\text{m}$, $L = 300 \mu\text{m}$ 和 $L = 500 \mu\text{m}$ 。为便于比较,图中也给出了不考虑快速增益饱和效应和长度及只考虑快速增益饱和效应的结果,分别用带实心圆和空心圆的线表示。小开关窗口模式取偏置时间为 2 ps,脉冲能量为 0.125 pJ;大开关窗口模式取偏置时间为 10 ps,脉冲能量为 5 pJ。控制脉冲的宽度都是 1 ps。从图可以看出,由于快速增益饱和效应的影响,开关窗口被分成了两部分。对于小开关窗口,第一个窗口的宽度和第二个窗口的宽度差不多,对于大开关窗口,第一个窗口比第二个窗口大很多,第二个窗口基本可以忽略。

当考虑了半导体光放大器长度的效应时,第二个开关窗口的幅度大大降低了,这种效应对小开关窗口尤其明显。由图可见,当半导体光放大器长度为 $500\ \mu\text{m}$ 时,第二个开关窗口基本消失。这可从(13)式得到解释,由于积分的作用,逆时针信号经历的增益更加平缓。这说明,考虑半导体光放大器长度的影响后,TOAD 的开关窗口可进一步减小。但从图 3(b) 可看出,对大开关窗口模式,加大半导体光放大器长度却使得开关窗口的形状变坏。

快速增益饱和效应对开关能量也有极大的影响。图 4 给出了开关能量和控制脉冲宽度的关系曲线。这里定义开关能量为在顺时针信号脉冲和逆时针信号脉冲之间产生 π 相位差所需的控制脉冲的能量。图 4 表明,小开关窗口模式的开关能量比大开关窗口模式的开关能量小得多。对于小开关窗口模式,开关能量随着控制脉冲宽度的增加而增加,而对于大开关窗口模式,开关能量却随着控制脉冲宽度的增加而减少,当控制脉冲的宽度大于 $2\ \text{ps}$ 时,开关能量随着脉冲宽度的增加下降得很慢。这是因为对于小开关窗口模式,开关窗口主要由半导体光放大器的快速增益饱和效应决定,而对于大开关窗口模式,开关窗口主要由半导体光放大器的缓慢增益恢复过程决定,当脉冲能量相同时,脉冲越窄,快速增益饱和区的最小增益越小,而缓慢增益恢复区的增益越大,如图 2 所示。

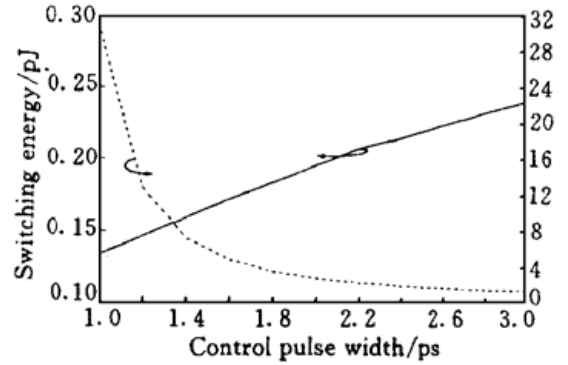


图 4 不同开关窗口的 TOAD 开关能量和控制脉冲宽度之间的关系图

实线的偏置时间为 $2\ \text{ps}$, 短划线的偏置时间为 $10\ \text{ps}$

Fig. 4 Dependence of the switching energy of TOAD on control pulse width for different switching window width

Solid line is for $2\ \text{ps}$ offset time, dashed line is for $10\ \text{ps}$ offset time

3 结 论

我们详细探讨了半导体光放大器的快速增益饱和效应及其长度对 TOAD 解复用器性能的影响。根据半导体光放大器动态增益曲线的特征,分析了两种工作模式。通过分析和数值计算,可以得到以下结论:

1) 快速增益饱和效应使得开关窗口出现振荡现象,但半导体光放大器的长度效应却可大大降低第二个窗口的幅度,特别是对于开关窗口较窄,即小开关窗口模式时,尤为明显,可以消除第二个窗口的影响,这说明通过适当地增加半导体光放大器的长度可以进一步降低 TOAD 的开关窗口,提高 TOAD 的速率。但对于大开关窗口模式,加大半导体光放大器长度却使开关窗口的形状变坏。所以对于不同的情况,要做相应的选择。

2) 快速增益饱和效应限制了开关窗口的进一步减小,实际中应选取非线性增益压缩系数小的半导体光放大器,而不象利用半导体光放大器中四波混频的器件,非线性增益压缩系数大可提高四波混频的效率。

3) 快速增益饱和效应对开关能量也有很大的影响,而且对开关能量的影响在两种工作模式下是完全不同的。从分析结果看,对小开关窗口,应采用较窄的控制脉冲,而对于大开关窗口,应采用较宽的控制脉冲,这有助于改善开关窗口的形状和降低开关能量。

参 考 文 献

- 1 D. M. Spirit, A. D. Ellis, P. E. Barnsley. Optical time division multiplexing: system and networks. *IEEE Commun. Mag.*, 1994, (12): 56~ 62
- 2 J. P. Sokoloff, I. Glesk, P. R. Prucnal *et al.*. Performance of a 50 Gbit/s optical time domain multiplexed system using a terahertz optical asymmetric demultiplexer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, 6(1): 98~ 100
- 3 I. Glesk, J. P. Sokoloff, P. R. Prucnal. Demonstration of all-optical demultiplexing of TDM data at 250 Gbit/s. *Electron. Lett.*, 1994, 30(4): 339~ 341
- 4 M. G. Kane, I. Glesk, J. P. Sokoloff *et al.*. Asymmetric optical loop mirror: analysis of an all-optical switch. *Appl. Opt.*, 1994, 33(29): 6833~ 6842
- 5 M. Eiselt, W. Pieper, H. G. Weber. SLALOM: semiconductor laser amplifier in a loop mirror. *J. Lightwave Technol.*, 1995, 13(10): 2099~ 2112
- 6 J. M. Tang, P. S. Spencer, K. A. Shore. Influence of fast gain depletion on the dynamic response of TOAD's. *J. Lightwave Technol.*, 1998, 16(1): 86~ 91
- 7 G. P. Agrawal, N. A. Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, 25(11): 2297~ 2306
- 8 A. Mecozzi, J. Mork. Saturation induced by picosecond pulses in semiconductor optical amplifiers. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1997, 14: 761~ 770
- 9 A. Mecozzi, J. Mork. Saturation effects in nondegenerate four-wave mixing between short optical pulses in semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 1997, 3(5): 1190~ 1207

Influences of Fast Gain Saturation and Length of SOA on the Performances of TOAD

Xie Chongjin Ye Peida

(Optical Communications Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract The influences of the fast gain saturation and the length of SOA on the performances of terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) are investigated in this paper. Two operation modes, small width switching window mode and large width switching window mode, are all analyzed. It is found that the fast gain saturation has great influences on both the shape of switching window and the switching energy, and the dependence of the switching energy on the control pulse width are completely different for the two operation modes. In addition, we find that effect of SOA length can greatly reduce the amplitude of the secondary switching window, which indicates that by properly choosing the length of SOA, the switching window width can be reduced and the speed of TOAD can be increased.

Key words optical time division multiplexing, demultiplexer, semiconductor optical amplifier, all-optical signal process, fast gain saturation