

文章编号 : 0258-7025(2001)07-0641-04

TOAD 的开关特性研究

逢焕刚 张志远 颜森林 孙小菡 张明德

(东南大学电子工程系 南京 210096)

摘要 讨论了太赫兹光非对称解复用器(TOAD)中半导体光放大器(SOA)对具有不同能量和宽度的控制脉冲的动态增益响应,研究了控制脉冲能量、宽度、环时间非对称性、信号光脉冲相对于控制光脉冲的时延等因素对 TOAD 开关特性的影响,作了优化分析,并与实验结果进行了比较。

关键词 太赫兹光非对称解复用器,半导体光放大器,动态增益响应,开关特性

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Study on the Switching Characteristics of TOAD

PANG Huan-gang ZHANG Zhi-yuan YAN Sen-lin SUN Xiao-han ZHANG Ming-de

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract The dynamic gain responses of the semiconductor optical amplifier (SOA) in a terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) to intense control pulses with different input energies and pulse widths are investigated. The influences on the switching characteristics of TOAD for control pulse energies, widths, loop's time asymmetry, and time delays between the signal and control pulses are studied and optimized in detail. The theoretical analysis is compared with the experimental result.

Key words terahertz optical asymmetric demultiplexer, semiconductor optical amplifier, dynamic gain response, switching characteristics

1 引言

太赫兹光非对称解复用器(TOAD)^[1]响应快、稳定性好、易于集成,是高速光时分复用(OTDM)系统的一种理想解复用器。K. I. Kang 等研究^[2]表明 TOAD 的开关窗口宽度可以达到 6.4 ps。但他们的研究是基于以下假设:脉冲包络在穿过非线性元件(NLE)前后保持不变,增益和相位随控制脉冲能量呈线性变化,NLE 光特性的恢复呈简单的指数关系。J. M. Tang 等^[3]同时考虑 SOA 的增益饱和效应和非线性增益压缩效应,研究了两种模式下 TOAD 的运转特性,但他们主要分析了控制脉冲小于 2 ps 的情形,而且没有专门研究控制脉冲能量、宽度对开关特性的影响。另外,北京邮电大学也对 TOAD 有过涉及^[4]。本文将不作增益和相位随控制脉冲能量线性变化,SOA 呈简单指数关系恢复等假设,深入研究控制脉冲能量、宽度、环时间非对称性、信号脉冲相对于控制脉冲的时延等因素对 TOAD 开关特性的影

响。

2 理论模型

TOAD 结构如图 1 所示。设 NLE 为 SOA,定义环时间非对称性为 $\Delta t = \Delta x / v_{loop}$,式中 Δx 为 SOA 偏离环中点的距离, v_{loop} 为光脉冲在环内的传输速度。信号脉冲由端口 A 输入,经 3 dB 耦合器分成两束,一束沿顺时针(CW)方向传输,另一束沿逆时针(CCW)方向传输。绕环一周后返回 3 dB 耦合器干

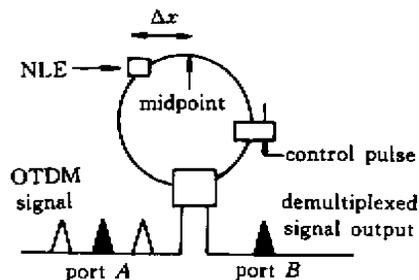


图 1 TOAD 示意图

Fig. 1 Basic configuration of TOAD

涉输出。当没有控制光注入时,由于 SOA 对两共轭信号光的影响相同,信号光全部从端口 A 返回。但当控制脉冲通过环内耦合器注入时,由于控制脉冲使 SOA 的增益特性受到调制,从而影响信号光的功率和相位,端口 B 可能有解复用信号光输出。改变控制脉冲的能量、宽度、注入时间及 SOA 在环内的摆放位置,可以改变 SOA 的动态增益响应,从而控制输出。在本文的分析中,假设控制脉冲的能量足够大,可以显著调制 SOA,而信号光的能量则相对较小,对 SOA 的影响可忽略不计。

假设光脉冲在传输过程中偏振方向保持不变,其沿 SOA 纵向 z 的传播方程^[5]可表示为

$$\frac{\partial A_j(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_j(z,t)}{\partial t} + \frac{i}{2} \alpha g(z,t) A_j(z,t) - \frac{g(z,t)}{2} A_j(z,t) = -\frac{1}{2} \alpha_{int} A_j(z,t) \quad (1)$$

式中 $A_{j=1,2,3}(z,t)$ 为光脉冲的慢变包络(下标 1 代表控制脉冲,2,3 分别代表 CW 和 CCW 信号脉冲), v_g 为光脉冲在 SOA 中的群速度, α 为线宽增强因子, α_{int} 为内部损耗, $g(z,t) = \Gamma a(N - N_0)$ 为增益, Γ 为模式限制因子, a 为增益系数, N 为载流子密度, N_0 为透明载流子密度。SOA 对光场的响应通常用如下载流子密度速率方程来描述

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{g(z,t)}{\hbar\omega_0} |A_j(z,t)|^2 \quad (2)$$

I 为注入电流, q 为电子电荷, V 为有源区的体积, τ_c 为载流子自发寿命, $\hbar\omega_0$ 为光子能量。令 $T = t - z/v_g$ 并将 $A_j(z,t)$ 分解为振幅和相位两部分

$$A_j(z,T) = \sqrt{P_j(z,T)} e^{i\varphi_j(z,T)} \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$P_j(z,T)$ 和 $\varphi_j(z,T)$ 分别代表功率和相位。则(1)和(2)可进一步化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial g(z,T)}{\partial T} &= \frac{g_0 - g(z,T)}{\tau_c} - \frac{g(z,T)P_j(z,T)}{E_{sat}} \\ \frac{\partial P_j(z,T)}{\partial z} &= [g(z,T) - \alpha_{int}] P_j(z,T) \\ \frac{\partial \varphi_j(z,T)}{\partial z} &= -\frac{1}{2} \alpha g(z,T) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $g_0 = \Gamma a N_0 (I/I_0 - 1)$ 为小信号增益, $I_0 = qVN_0/\tau_c$ 为透明所需的注入电流, E_{sat} 为饱和能量。将(4)式对 SOA 的长度 L 积分,并忽略损耗,整理得

$$\frac{dh(T)}{dT} = \frac{g_0 L - h(T)}{\tau_c} - \frac{P_{in}(T)}{E_{sat}} \{ \exp[h(T)] - 1 \} \quad (5)$$

式中 $h(T) = \int_0^L g(z,T) dz$ 为放大函数。可以看出,

它实际上表示了光脉冲功率包络上每一点在整个 SOA 上的积分增益。经过 SOA 后,两入射信号光脉冲的功率和相位可表示为

$$\begin{aligned} P_{jout}(z,T) &= P_{jin}(z,T) \exp[h(z,T)] \quad j = 2, 3 \\ \varphi_{jout}(z,T) &= \varphi_{jin}(z,T) - \frac{1}{2} \alpha h(z,T) \quad j = 2, 3 \end{aligned} \quad (6)$$

TOAD 解复用端口 B 的输出光功率为^[6]

$$P_B(T) = \frac{P_I(T)}{2} \{ 1 - \nu \cos[\Delta\varphi(T)] \} \quad (7)$$

式中 $P_I(T) = P_{2out}(T) + P_{3out}(T)$, $\nu = 2 \cdot \sqrt{P_{2out}(T)P_{3out}(T)}/P_I(T)$, $\Delta\varphi(T)$ 为两共轭信号光的相位差。

3 数值计算与结果讨论

设入射控制、信号脉冲皆为高斯脉冲,并忽略 SOA 的长度效应,通过对(5)(6)和(7)式数值计算,研究了 TOAD 中 SOA 的增益动力学特性及 TOAD 的开关特性。

图 2(a)和(b)分别给出了控制脉冲能量和宽度不同时 SOA 的动态增益响应。由图可见,当没有控制脉冲注入或注入脉冲能量很小时,SOA 的增益为小信号增益;当强控制脉冲注入时,SOA 的增益迅速减小并达到增益饱和。控制脉冲能量越大,则饱和增益越小,增益曲线越陡,脉冲越窄,增益响应曲线变化越快,增益转折区越小。

图 3(a)给出了环时间非对称性不同时端口 B 的平均输出功率随 CCW 信号光相对于控制光时延的

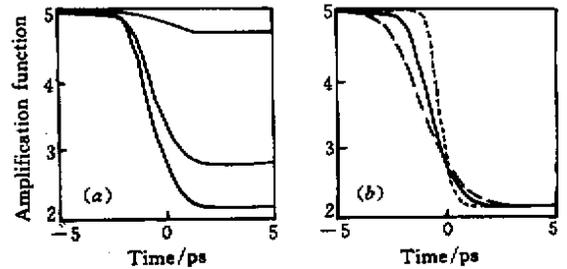


图 2 SOA 对控制脉冲的动态增益响应

(a) 从上至下控制脉冲能量分别为 0.02, 0.5 和 1.0 pJ, 宽 2 ps; (b) 短划线、实线和虚线对应的控制脉冲宽度分别为 1, 2 和 3 ps, 能量为 1.0 pJ

Fig. 2 Dynamic gain response of SOA to control pulses (a) from top to bottom the control pulse energies are 0.02, 0.5 and 1.0 pJ, respectively, the pulse width is 2 ps; (b) the control pulse widths corresponding to the dashed, solid and dotted lines are 1, 2 and 3 ps, respectively, the energy is 1.0 pJ

变化关系。由图可见,当环时间非对称性一定,改变信号光相对于控制光的时延,端口 B 的输出功率也随之改变。若信号光过于超前或滞后于控制光,端口 B 没有输出,输入信号光全部从端口 A 返回,只有当时延在某一范围内,B 端才会有信号光输出。这样就在 TOAD 的输出与输入之间打开了一个时间窗口,称之为

为开关窗口。由图还可以看出,当环时间非对称性变化时,开关窗口的形状和高度变化很大。产生上述结构的原因,是由于当信号光相对于控制光时延不同时,两共轭信号光经过 SOA 的瞬间,处于其动态增益响应曲线的不同位置,从而所受的调制不一样。结合图 2 就可以对此作出很好的解释。

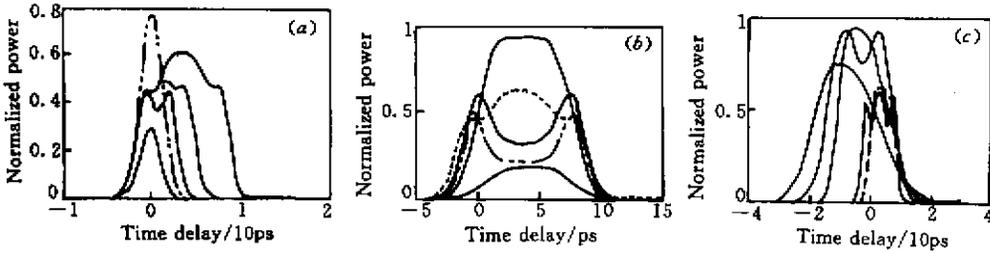


图 3 端口 B 的归一化平均输出功率随 CCW 信号光相对于控制光时延的变化关系

(a) 曲线从右至左环时间非对称性分别为 4, 2, 1, 0.5 和 0.2 ps, 控制、信号脉冲的能量分别为 1.0 pJ 和 0.002 pJ, 脉宽均为 2 ps; (b) 曲线从上至下控制脉冲能量分别为 0.1, 1.0, 0.3, 0.5 和 0.02 pJ, 环时间非对称性称为 4 ps, 其他参数同 (a); (c) 曲线从左至右控制脉冲宽度分别为 28, 20, 14, 3 和 1 ps, 环时间非对称性为 4 ps, 其他参数同 (a)

Fig.3 Dependence of normalized average output power from port B on the time delays between the CCW signal and control pulses

(a) from right to left the time asymmetries are 4, 2, 1, 0.5 and 0.2 ps, respectively, the energies of the control and signal pulses are 1.0 pJ and 0.002 pJ, respectively, their widths are all 2 ps; (b) from top to bottom the control pulse energies are 0.1, 1.0, 0.3, 0.5 and 0.02 pJ, the loop's time asymmetry is 4 ps, the other parameters are the same as (a); (c) from left to right the control pulse widths are 28, 20, 14, 3 and 1 ps, respectively, the loop's time asymmetry is 4 ps, the other parameters are the same as (a)

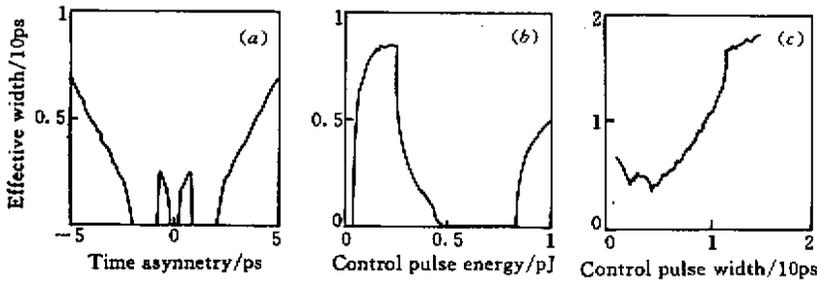


图 4 TOAD 有效开关窗口宽度随环时间非对称性 (a) 控制脉冲能量 (b) 和控制脉冲宽度 (c) 的变化关系

((a) (b) (c) 的参数分别同图 3 (a) (b) (c))

Fig.4 Dependence of the effective switching window width of TOAD on time asymmetry (a), control pulse energy (b) and control pulse width (c)

(the parameters of (a), (b) and (c) are the same as Fig.3 (a), (b) and (c), respectively)

图 3 (b) 给出了控制脉冲能量不同时端口 B 的平均输出功率随 CCW 信号光相对于控制光时延的变化关系。由图可见,控制脉冲能量对窗口宽度影响较小,但对窗口形状及高度影响较大。在适当能量下,窗口顶部平坦,高度达到最高(如 0.1 pJ),此时信号脉冲的功率绝大部分从端口 B 输出,开关比最高,这正是 TOAD 解复用信道所期望的。但若控制脉冲能量过小,由于它对 SOA 的影响已很小(见图 2 (a)),导致窗口高度过低(如 0.02 pJ),大部分光功率从端口 A 返回。由此可见,需要对控制脉冲的能量进行合理

选择。

图 3 (c) 给出了控制脉冲宽度不同时端口 B 的平均输出功率随 CCW 信号光相对于控制光时延的变化关系。由图可见,对应于不同的控制脉冲宽度,窗口形状及高度变化较大。结合图 2 (b) 可知,当控制脉冲宽度不同时,SOA 增益转折区的时间长度不同,对 CW 和 CCW 两束信号光的影响也不一样,从而影响端口 B 的功率输出。若控制脉冲太窄,尽管窗口宽度小,但 B 端输出功率太小,不满足 TOAD 高开关比的要求。反之,若控制脉冲太宽,对应窗口高度可

升高,但窗口太宽,不满足 TOAD 窄的开关窗口的要求(因为开关窗口的宽度直接决定总线比特率)。所以在实际应用中,需要折衷考虑。

图 4 总结了环时间非对称性、控制脉冲能量和宽度对 TOAD 有效开关窗口宽度的影响。此处定义有效开关窗口宽度为解复用输出大于等于信号脉冲总能量(指经过 SOA 放大后)一半时的开关窗口总宽度。解复用时,为了能够高速率运转,要求开关窗口宽度应尽量窄,同时为了提高开关比,减小误码率,解复用输出应尽量大。结合图 3(a)和图 4(a)可以看出,在我们取定的参数下,环时间非对称性落在图 4(a)中间两个小窗口范围内时比较有利。同理,结合图 3(b)和图 4(b)可见,当控制脉冲能量落在图 4(b)左侧窗口的左半部分时比较有利。结合图 3(c)和图 4(c)可见,当控制脉冲宽度落在图 4(c)中间一段范围内时比较有利。

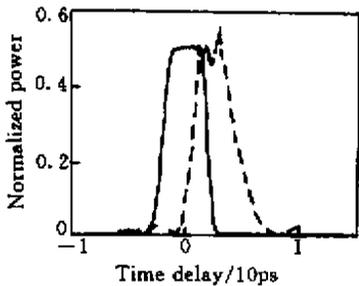


图 5 TOAD 解复用窗口

(实线对应于理论曲线,短划线对应于实验曲线)

Fig.5 TOAD switching window

(the solid and dashed lines correspond to the oretical and experimental curve, respectively)

图 5 给出了理论曲线与实验曲线的比较。实验曲线取自文献 [7] 理论曲线的主要参数如下: SOA 长 $500 \mu\text{m}$, 有源区宽 $1.5 \mu\text{m}$, 深 $0.3 \mu\text{m}$, 限制因子 0.2, 线宽增强因子 6, 载流子寿命 0.5 ns , 增益系数 $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 小信号增益 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$, 中心波长 $1.313 \mu\text{m}$, SOA 中的控制、信号光的群速度 $8.5 \times 10^7 \text{ m/s}$, 环时间非对称性 0.7325 ps , 控制脉冲 800 fJ , 宽 1 ps , 信号脉冲 100 fJ , 宽 1 ps 。理论曲线与实验结果之间的差异是由以下几方面的原因造成的: 实验光脉冲不是严格的高斯脉冲; 光脉冲在 SOA 中的传播时间会对开关窗口的下降沿产生影响, 而此处将 SOA 看成质

点; 实验中 SOA 横跨环中点(SOA 两端到环中点的距离不同, 从而满足非对称条件), 而理论将其看成质点, 导致环时间非对称性小于实际值; 没有考虑 SOA 噪声的影响; 当控制光脉冲非常窄时, 会引起 SOA 的非线性增益压缩, 而理论没有考虑; 忽略了信号光脉冲自身的影响。

4 结 论

采用 TOAD 中控制、信号光脉冲和 SOA 相互作用的一组耦合方程及 TOAD 的解复用输出表达式, 进行数值模拟, 深入研究了 SOA 对不同控制光脉冲的动态增益响应, 控制光脉冲能量、宽度、环时间非对称性、信号脉冲相对于控制脉冲的时延等因素对 TOAD 开关特性的影响, 进行了优化分析, 并与实验结果做了比较。结果表明, 控制脉冲能量越高, 脉冲越窄, SOA 增益响应曲线越陡, 控制脉冲在 TOAD 的输出与输入之间打开了一个开关窗口; 对应于不同的控制脉冲能量、宽度及信号、控制脉冲的不同时延, 开关窗口的形状、高度变化显著; 当 TOAD 各参数在某一范围内时比较有利。因此, 必须选择具有适当能量、宽度的控制脉冲, 仔细调节信号、控制脉冲的注入时间及 SOA 在光纤环内的摆放位置。

参 考 文 献

- 1 J. P. Sokoloff, P. R. Prucnal, I. Glesk *et al.*. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD). *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7): 787 ~ 790
- 2 K. I. Kang, T. G. Chang, I. Glesk *et al.*. Comparison of sagnac and Mach-Zehnder ultrafast all-optical interferometric switches based on a semiconductor resonant optical nonlinearity. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(3): 417 ~ 426
- 3 J. M. Tang, P. S. Spencer, K. A. Shore. Analysis of operating characteristics of TOADs using gain saturation and nonlinear gain in SOAs. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 1998, **145**(1): 83 ~ 87
- 4 Xie Chongjin, Ye Peida. Analysis of all-optical demultiplexer used a semiconductor optical amplifier. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1998, **27**(6): 526 ~ 532 (in Chinese)
- 5 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
- 6 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory*. London, U.K.: Chapman and Hall, 1993
- 7 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