

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0099-08

对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪 解复用器的开关特性分析*

赵永鹏 叶培大

(北京邮电大学电信工程学院,北京 100876)

摘要: 分析了以半导体光放大器(SOA)为基础的对称马赫-曾德尔干涉仪(MZI)解复用器在控制脉冲和信号脉冲反向传播(CPMZ)与同向传播(TPMZ)两种工作模式下的开关特性。研究表明,控制脉冲宽度、半导体光放大器的长度和非线性增益压缩影响着控制脉冲和信号脉冲反向传播开关窗口的大小,是限制控制脉冲和信号脉冲反向传播高速工作的主要因素。当控制脉冲宽度小于半导体光放大器的渡越时间时,延时量小于于两倍的半导体光放大器渡越时间,控制脉冲和信号脉冲反向传播的峰值开关比开始恶化;当控制脉冲宽度超过半导体光放大器的渡越时间时,即使延时量大于两倍的半导体光放大器渡越时间,峰值开关比也出现恶化。因此当控制脉冲和信号脉冲反向传播高速工作时,控制脉冲应尽可能窄,且延时量必须大于两倍的半导体光放大器渡越时间以确保有较高的峰值开关比。而半导体光放大器长度效应对控制脉冲和信号脉冲同向传播的影响甚微。

关键词: 马赫-曾德尔干涉仪;半导体光放大器;非线性增益压缩效应;全光解复用

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

1 引 言

在光时分复用(OTDM)系统与网络中,全光解复用器及上下路复用器是非常重要的部分。基于光纤非线性克尔效应的非线性光纤环路镜(NOLM)具有Tbit/s量级的超快开关能力,目前最高速率达640 Gbit/s的解复用传输实验就是利用非线性光纤环路镜解复用器实现的^[1]。但是由于光纤的非线性较弱,非线性光纤环路镜的尺寸较大,很难集成。近来基于半导体光放大器非线性效应的马赫-曾德尔干涉仪光开关开始引起人们的兴趣,半导体光放大器的强非线性使得这种器件尺寸小,功耗低,并且易于集成,因此具有很好的应用前景。半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪具有高速光信息处理能力,可用于未来光网络中的3R(再整形、再定时、再放大)光再生^[2],光上下路复用^[3]和解复用^[4]等。最近,文献[5]利用对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪光开关成功实现了160 Gbit/s的解复用。

高速(Tbit/s)光时分复用系统的发展,对解复用器的超快开关特性提出了更高的要求。半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪的主要问题之一是其工作

速度受半导体光放大器载流子慢恢复特性的限制。最近,文献[2]报道了半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪的差分工作方式,采用双路控制方案,使半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪的开关速度与载流子的慢恢复特性无关,而与两控制脉冲间的相对时延有关。因脉冲宽度、半导体光放大器长度影响半导体光放大器增益响应^[6,7],因此半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪的开关速度还与这些因素有关。Toliver^[8]用脉冲响应模型^[9]研究了半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪在不同时延下的开关特性,由于该模型过于简单,理论分析不能解释模拟结果与实验结果之间的差别。为了研究半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪高速工作特性,本文采用文献[7]的方法分析了半导体光放大器长度、脉宽与时延量对控制脉冲和信号脉冲反向传播与控制脉冲和信号脉冲同向传播开关窗口的形状、大小与峰值幅度的影响,并考虑了载流子非线性增益压缩效应的影响。其结果可更好地解释文献[8]的实验结果。

2 对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪解复用器的工作原理及半导体光放大器的动态增益特性

控制脉冲和信号脉冲反向传播工作模式的半导

* 国家科委 863 高科技(863-317-02-03-99)资助课题。

E-mail: zhaoype@263.net.

收稿日期: 2000-10-23; 收到修改稿日期: 2000-01-27

体光放大器马赫-曾德尔干涉仪结构如图 1 所示,它是由两个 2×2 3 dB 耦合器、两个波分复用器(WDM)以及两个半导体光放大器组成,马赫-曾德尔干涉仪的两臂采用集成波导结构。为了简化分析,这里假设半导体光放大器的两臂长度相等, SOA_1 与 SOA_2 在两臂中的位置对称,信号光与控制光反向传输。如果输入信号从端口 A 入射,则信号光与控制光同向传播,这就是控制脉冲和信号脉冲同向传播工作模式。

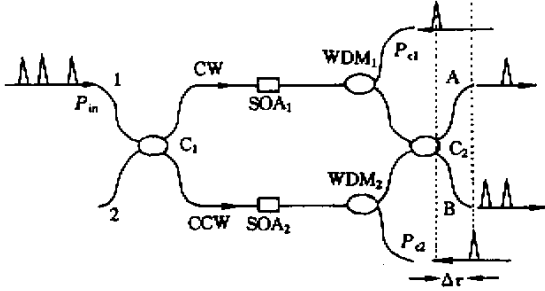


Fig.1 Configuration of SOA based Mach-Zehnder interferometer demultiplexer

控制脉冲和信号脉冲同向传播与控制脉冲和信号脉冲反向传播的解复用原理完全相同,这里以控制脉冲和信号脉冲反向传播为例。如图1所示,输

入光信号经由耦合器 C_1 分成两路等幅信号,一路在马赫-曾德尔干涉仪的上臂中沿顺时针方向(CW)通过 SOA_1 ,另一路在马赫-曾德尔干涉仪的下臂中反时针方向(CCW)通过 SOA_2 ,两路信号在耦合器 C_2 汇合并发生干涉。控制信号被分成两路等幅信号 P_{c1} 与 P_{c2} 后, P_{c1} 在由 WDM_1 直接耦合到干涉仪的上臂中, P_{c2} 在延迟 $\Delta\tau$ 后由 WDM_2 耦合进干涉仪的下臂中。 P_{c1} 首先在 SOA_1 中与顺时针方向中被解复用信号相遇,二者之间的交叉相位调制(XPM)引起信号的非线性相移,而此时反时针方向信号未产生非线性相移,二者在耦合器处干涉,端口 A 打开,解复用信号被输出;在时间 $\Delta\tau$ 后, P_{c2} 在下臂中使反时针方向信号产生相等的非线性相移,上下臂的相差被抵消,端口 A 关闭,从而实现了对期望信号的解复用。下面推导输出信号和输入信号的关系。

假设输入信号光功率为 $P_{in}(t)$,输入信号在到达输出端口时在顺时针方向和反时针方向所经历的增益和非线性相移分别为 $G_{CW}(t)$ 、 $\Delta\phi_{CW}(t)$ 和 G_{CCW} 、 $\Delta\phi_{CCW}(t)$,忽略信号的初始相位及损耗,假设 C_1 、 C_2 为理想的 3 dB 耦合器,干涉仪两臂的初始相差为 0,则在输出端 A 和 B 的功率为

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

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

因此欲得到输出信号,首先要求出顺时针方向和反时针方向信号的增益和相位移,这需要求解半导体光放大器增益特性的载流子密度速率方程和传播方程^{10]}。

半导体光放大器的增益特性与输入脉冲有很大关系,在输入脉冲较宽时,半导体光放大器的增益特性主要由载流子密度的脉动效应决定,与载流子的寿命(约为 200 ps)有关^{10]},但当输入脉冲为皮秒级脉冲时,载流子发热和谱烧孔效应占主要地位,引起非线性增益压缩^{6,11]}。因此在研究解复用器的高速开关特性时,考虑非线性增益压缩效应是非常必要的。考虑载流子脉动效应以及非线性增益压缩效应,脉冲在半导体光放大器中传播特性由以下公式表示^{6]}:

$$\frac{\partial g(z,t)}{\partial t} = \frac{g_0 - g(z,t)}{\tau_c} - \frac{g(z,t)}{1 + \epsilon P_c(z,t)} \frac{P_c(z,t)}{P_{sat} \tau_c}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_c(z,t)}{\partial z} = \frac{g(z)}{1 + \epsilon P_c(z,t)} P_c(z,t), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_c(z,t)}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha \frac{g(z,t)}{1 + \epsilon P_c(z,t)}, \quad (5)$$

其中 $P_c(z,t)$ 为控制光功率; $g(z,t)$ 为半导体光放大器的增益系数; g_0 为小信号增益; P_{sat} 为半导体光放大器的饱和功率; τ_c 为载流子的寿命; $E_{sat} = P_{sat} \tau_c$ 为半导体光放大器的饱和能量; $\phi_c(z,t)$ 为控制脉冲的相移; ϵ 为非线性增益压缩因子,是载流子发热和谱烧孔效应总和; α 为线宽增益因子。

需要指出的是(3)式~(5)式是在如下前提下得出的:1)控制脉冲和信号脉冲均为同向线偏振光;2)信号光很弱,它不改变半导体光放大器的光学特性,弱顺时针方向与反时针方向信号仅用以探测由强控制脉冲引起的半导体光放大器折射率的变化;3)控制脉冲足够强以至于只有它才经历非线性增

益,故控制脉冲与信号脉冲之间的重叠都不会影响半导体光放大器的动态增益响应。4)控制脉冲在马赫-曾德尔干涉仪其它地方不会导致非线性效应。在解复用时信号功率远小于控制脉冲功率,故该假

设是有效的。

$$\text{令 } h(t) = \int_0^L g(z, t) [1 + \epsilon P_c(z, t)] dz, \quad L \text{ 为半} \\ \text{导体光放大器的长度,经推导可以得出}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{1 + (\epsilon \exp h) P_c(0, t)} \left[\frac{h_0 - h}{\tau_c} - \epsilon (\exp h - 1) \frac{dP_c(0, t)}{dt} - (\exp h - 1) P_c(0, t) \left(\frac{\epsilon}{\tau_c} + \frac{1}{E_{\text{sat}}} \right) \right], \quad (6)$$

其中 h_0 为小信号增益。半导体光放大器的增益 $G(t) = \exp[h(t)]$, 需要指出的是 $G(t)$ 为控制脉冲增益, 欲求出信号脉冲的相位和增益, 还需知道 $G_{\text{CW}}(t) \Delta\phi_{\text{CW}}(t) \setminus G_{\text{CCW}}(t) \Delta\phi_{\text{CCW}}(t)$ 与 $G(t)$ 的关系。下面分别从忽略半导体光放大器长度效应与考虑半导体光放大器长度效应两方面来得出它们之间的关系。

2.1 零长度近似

在零长度近似下, 半导体光放大器可视为在马赫-曾德尔干涉仪两臂中的放置的点元件, 在此假设的前提下, 顺时针方向与反时针方向信号光的增益就等于 SOA_1 与 SOA_2 的增益 $G_1(t)$ 与 $G_2(t)$ 。如假设 SOA_1 与 SOA_2 完全相同, 在控制脉冲同时入射时有 $G_1(t) = G_2(t) = G(t)$ 。故当 P_{c2} 相对于 P_{c1} 延迟 $\Delta\tau$ 时, 有 $G_1(t) = G(t), G_2(t) = G(t - \Delta\tau)$ 。因而

$$G_{\text{CW}}(t) = G(t) = \exp[h(t)], \quad (7)$$

$$G_{\text{CCW}}(t) = G(t - \Delta\tau) = \exp[h(t - \Delta\tau)]. \quad (8)$$

信号光在半导体光放大器中的传输方程和相位为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{CW}}(t) &= P_{\text{in}}(t) G_{\text{CW}}(t), \\ P_{\text{CCW}}(t) &= P_{\text{in}}(t) G_{\text{CCW}}(t), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\Delta\phi_{\text{CW}}(t) = -\alpha [\ln G_{\text{CW}}(t)]/2, \quad (10)$$

$$\Delta\phi_{\text{CCW}}(t) = -\alpha [\ln G_{\text{CCW}}(t)]/2. \quad (11)$$

对控制脉冲和信号脉冲同向传播可得到同样的结果。

2.2 考虑半导体光放大器的长度效应

这里定义 $T_{\text{tran}} = L/v_{\text{SOA}}$ 为半导体光放大器的渡越时间, $v_{\text{SOA}} = c/n_{\text{SOA}}$ 为光信号在半导体光放大器中的速度, n_{SOA} 为半导体光放大器的折射率。对马赫-曾德尔干涉仪, 在 $2T_{\text{tran}} \ll \Delta\tau$ 时, 忽略半导体光放大器的长度是非常好的近似; 而当 $2T_{\text{tran}} \ll \Delta\tau$ 不满足时, 半导体光放大器的长度效应却不能忽略。

考虑半导体光放大器长度, 顺时针方向与反时针方向信号到达输出端口时所经历的增益和非线性相位移表示为

$$h_{\text{CW}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-L/2}^{L/2} g(z, \tau) [\tau - t \pm z/v_{\text{SOA}}] dz, \quad (12)$$

$$h_{\text{CCW}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-L/2}^{L/2} g(z, \tau - \Delta\tau) [\tau - t \pm z/v_{\text{SOA}}] dz \quad (13)$$

$$\Delta\phi_{\text{CW}}(t) = -\alpha h_{\text{CW}}(t)/2, \quad (14)$$

$$\Delta\phi_{\text{CCW}}(t) = -\alpha h_{\text{CCW}}(t)/2, \quad (15)$$

(12)式、(13)式中“+”对应控制脉冲和信号脉冲反向传播工作模式, “-”对应控制脉冲和信号脉冲同向传播工作模式。同样,

$$G_{\text{CW}} = \exp h_{\text{CW}}(t), \quad G_{\text{CCW}} = \exp h_{\text{CCW}}(t).$$

直接求解 $h_{\text{CW}}(t)$ 与 $h_{\text{CCW}}(t)$ 比较复杂, 这里采用一种简化模型^[7]。假设半导体光放大器近乎“透明”, 控制光在半导体光放大器中传输形状不变, 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, 就像控制光在其中传输一样; 另外, 还假设信号光与控制光在半导体光放大器中的传输速度相同。在“透明”假设前提下, 半导体光放大器中的增益系数具有行波形式:

$$g(z, t) = g(t - z/v_{\text{SOA}}),$$

将其代入(12)式与(13)式, 对控制脉冲和信号脉冲反向传播,

$$h_{\text{CW}}(t) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \ln G(t - 2z/v_{\text{SOA}}) dz, \quad (16)$$

$$h_{\text{CCW}}(t) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \ln G(t - \Delta\tau - 2z/v_{\text{SOA}}) dz \quad (17)$$

对控制脉冲和信号脉冲同向传播

$$h_{\text{CW}} = g(t)L = h(t), \quad (18)$$

$$h_{\text{CCW}}(t) = g(t - \Delta\tau)L = h(t - \Delta\tau). \quad (19)$$

可见结果与零长度近似相同, 故半导体光放大器长度效应对控制脉冲和信号脉冲同向传播几乎没有影响。将(16)式~(19)式代入(14)式与(15)式, 即可求出顺时针方向与反时针方向信号在控制脉冲和信

号脉冲反向传播与控制脉冲和信号脉冲同向传播中的增益及非线性相移。

3 模拟结果与讨论

根据前面的分析结果,定义归一化开关窗为:

$$S = P_A / (P_A + P_B),$$

采用数值计算方法分析控制脉冲和信号脉冲反向传播与控制脉冲和信号脉冲同向传播的开关特性。由于控制脉冲和信号脉冲同向传播的增益响应与零长度近似下的控制脉冲和信号脉冲反向传播增益响应相同,下面只介绍控制脉冲和信号脉冲反向传播的开关特性。计算中用到的有关参为:小信号增益 $g_0 = 25$ dB,线宽增益因子 $\alpha = 4$,半导体光放大器的折射率 $n_{\text{SOA}} = 3.56$,脉冲中心波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,载流子寿命 $\tau_c = 200$ ps,半导体光放大器饱和功率 $P_{\text{sat}} = 28.4$ mW。假设控制脉冲为高斯脉冲,脉冲能量为 0.1375 pJ。如未特别说明,控制脉冲宽度 T_0 (FWHM)及时延 $\Delta\tau$ 均为 1 ps。

图 2 示出了非线性增益压缩、半导体光放大器长度及脉冲宽度对半导体光放大器增益响应的影响。半导体光放大器的增益响应中包含了快速增益饱和区和缓慢增益恢复区,快速增益饱和区是载流子加热和谱烧孔等引起增益非线性压缩的结果,时间较短,约为几个皮秒,与文献 [12] 中实测的结果相符。缓慢增益恢复区则较长,由载流子寿命决定。长度效应使得增益饱和下降过程变缓,这是由于顺时针方向与反时针方向信号的增益在半导体光放大器长度上积分的结果。当脉宽很小时,这个过程约为 $2T_{\text{tran}}$,且长度效应抑制了非线性增益压缩效应,这与文献 [13, 14] 中的实验结果是一致的。脉冲宽

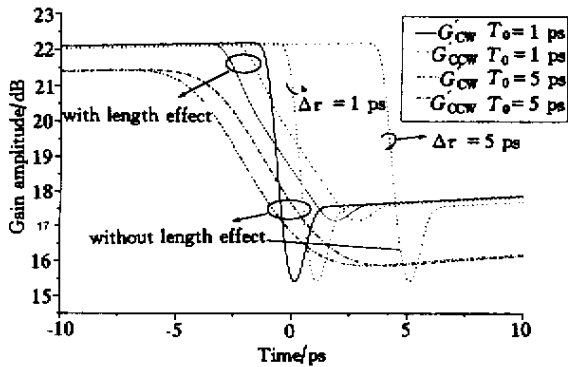


Fig. 2 Gain compression effect on the Gain response with various pulse width and delay with and without SOA length effect

度同样减缓了增益饱和的下降过程,文献 [15] 的报道证实了这一点。

图 3 为非线性增益压缩效应对开关窗的影响,增益压缩效应使开关窗口分裂成主次两个窗口,增益压缩效应越大,次开关窗口的幅度越大。从图 2 其增益响应中可明显看出该主次窗口产生的原因:主开关窗口产生于顺时针方向信号增益饱和和下降过程的开始,终止于反时针方向信号增益饱和的下降过程与顺时针方向信号的增益恢复过程的交点;次开关窗口开始于反时针方向信号增益的饱和区,终止于反时针方向信号增益进入缓慢恢复区结束。

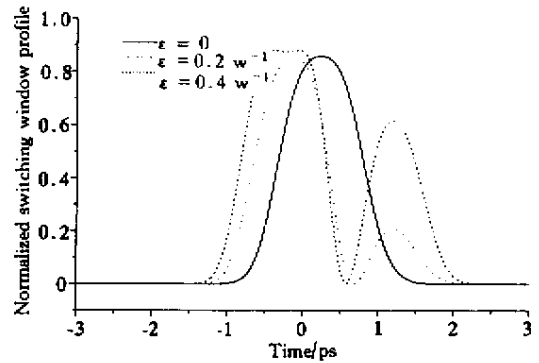


Fig. 3 Switching window of CPMZ and TPMZ at various gain compression factors with out length effect

半导体光放大器长度对开关窗口的影响见图 4,可以看出,半导体光放大器的长度越大,主开关窗口宽度越宽,次开关窗口的幅度越小。这是长度效应减缓了增益饱和下降过程(图 2)的结果。另外半导体光放大器长度效应对主开关窗口的峰值幅度的影响与时延量有关。在小开关窗口模式, $\Delta\tau < 2T_{\text{tran}}$,由于增益饱和过程的减慢,顺时针方向与反时针方向瞬时增益幅度差在 $\Delta\tau$ 内很小(图 2),因而主开关窗口峰值幅度减小。在大开关窗口模式, $\Delta\tau > 2T_{\text{tran}}$,顺时针方向与反时针方向瞬时增益幅度差可以取得最大值,半导体光放大器长度效应对主开关窗口的峰值幅度影响变小。这可由图 4 明显看出,在 $\Delta\tau = 6$ ps 时,当半导体光放大器长度 $L < 300 \mu\text{m}$ 时, $2T_{\text{tran}} < \Delta\tau$, L 的变化对开关窗的峰值幅度影响不大,而 $L = 400 \mu\text{m}$ 时,控制脉冲和信号脉冲反向传播的开关窗的峰值幅度已迅速降为 $L = 200 \mu\text{m}$ 的一半。在 $\Delta\tau = 1$ ps 时,即使 $L = 100 \mu\text{m}$, $2T_{\text{tran}}$ 已远大于 $\Delta\tau$,与大时延模式相比,开关窗峰值减小了一半还多。故半导体光放大器的长度不仅限制了小开关窗模式的开关速度,还限制了控制脉冲和信号脉冲反向传播的开关比。

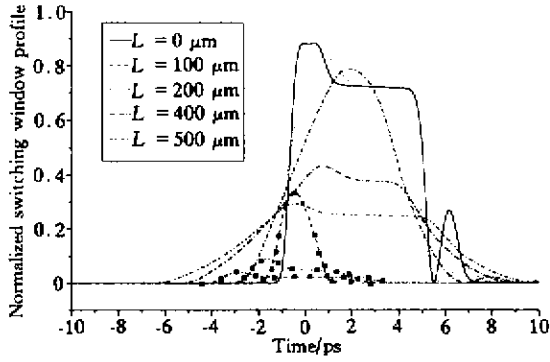


Fig. 4 SOA length effect on the switching window of CPMZ demultiplexer with fast gain compression effect. $\Delta\tau$ is 1 ps for solid square symbol curve and 6 ps for the rest. 时延与开关窗口的关系见图 5, 当控制脉冲宽度很小时(忽略半导体光放大器长度效应), 主开关窗口宽度基本由时延量 $\Delta\tau$ 决定, 并等于 $\Delta\tau$ 。当 $\Delta\tau$ 大于增益快速饱和时间时, 主开关窗口成为方形。而次窗口宽度和幅度随 $\Delta\tau$ 的增大变化很小。这一点可以由图 2 解释: 当时延量超过顺时针方向信号增益由快速饱和区进入缓慢恢复区的过渡时间后, 次窗口的宽度和幅度由反时针方向信号的增益从饱和区到开始进入缓慢恢复区的过程决定。主开关窗口的凸起结构是信号快速增益饱和的结果, 且当时延量超过顺时针方向信号增益由快速饱和区和进入缓慢恢复区的过渡时间后, 该凸起结构完全由顺时针方向信号的快速增益饱和决定。

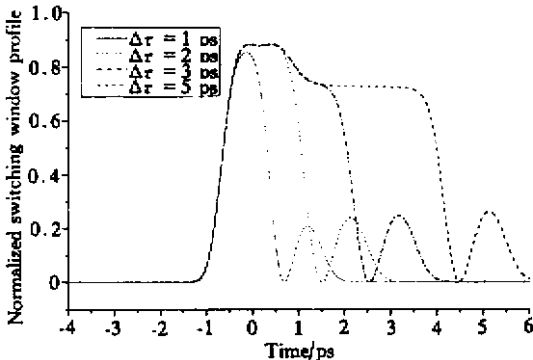


Fig. 5 Switching window at various delay $\Delta\tau$ (without SOA length effect)

图 6(a) 图 6(b) 为脉冲宽度对开关窗口的影响(忽略半导体光放大器长度效应)。当控制脉冲宽度很窄时, 主开关窗口的宽度由信号相对时延决定, 且开关窗口近似为矩形, 但次开关窗口幅度较大。当控制脉冲宽度增加时, 主开关窗口的上升沿和下降沿宽度增加, 幅度减小, 中心位置向与时延反方向移动; 次开关窗口的幅度则随控制脉冲增加而减小, 并逐渐消失。这是由于脉冲越宽, 其前后沿越远离脉

冲中心位置, 造成顺时针方向和反时针方向信号增益饱和及由增益饱和区和到进入增益缓慢恢复区的过程减慢(图 2), 使开关窗中心位置移动及幅度减小。

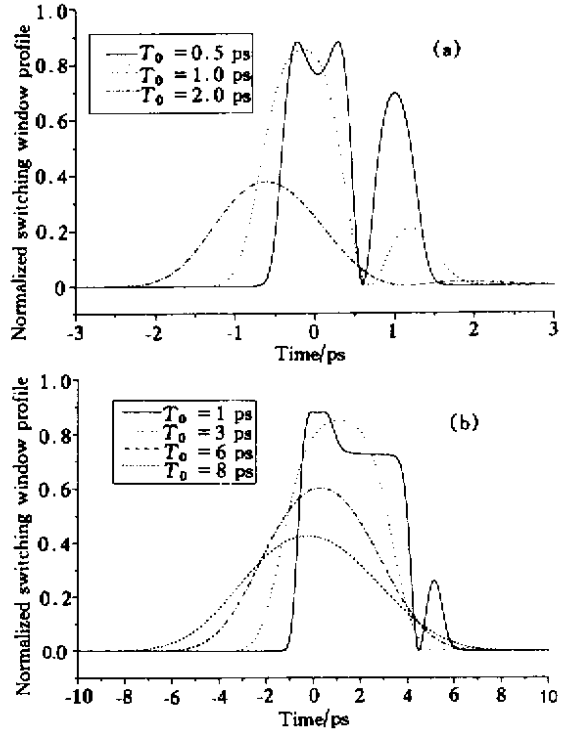


Fig. 6 Switching window of CPMZ and TPMZ at different control pulse width gain compression effect (length effect is neglected). (a) $\Delta\tau = 1$ ps; (b) $\Delta\tau = 5$ ps

图 7 为开关窗与时延间的关系, T_0 、 T_{tran} 与文献 8] 相同, 图 7(a) 给出了不同时延量下, 控制脉冲和信号脉冲反向传播的归一化开关窗口。可以看出我们的模拟结果与文献 8] 模拟的结果有些不同。后者模拟的结果中, 开关窗的上升沿坡度没有任何变化, 在大偏移量时, 窗口顶部较平坦。而在我们的模拟结果中, 开关窗的下降沿(相应于文献 8] 的上升沿)的坡度出现了明显的变化, 这与文献 8] 中的实验结果是一致的, 这是非线性增益压缩导致的快速增益饱和与恢复的结果。之所以文献 8] 的模拟结果中没有出现这种变化, 是由于 Toliver 所用的模型较简单, 忽略了非线性增益压缩效应, 因而不能解释存在这种差别的原因。由于文献 8] 中的实验脉冲宽度为 1.6 ps, 因此考虑非线性增益压缩效应的影响是必要的^[6]。但图 7(a) 中的次窗口在文献 8] 的实验结果中没有出现, 这一方面是由于我们取的参数(线性增益压缩因子)与文献 8] 中的参数有差别, 另一方面可能是由于测量误差和噪声掩盖了文献 8] 中次窗口的出现。图 7(b) 为开关窗峰值幅度与不同时延量间的关系, 当 $T_0 < T_{tran}$ 时, 在 $\Delta\tau <$

$2T_{\text{tran}}$ 处,开关窗的峰值幅度开始下降。当 $T_0 > T_{\text{tran}}$ 时,即使 $\Delta\tau > 2T_{\text{tran}}$,窗口的峰值幅度也会出现较大的恶化。并且控制脉冲越宽,窗口的开关比下降越严重。由于高速工作时,脉冲宽度应很窄,因此阐明这种关系对于设计和优化高速系统是非常重要的。

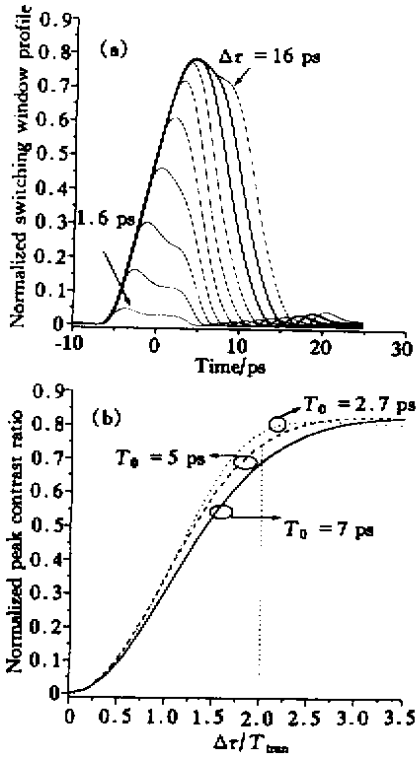


Fig.7 The relationship of switching window versus $\Delta\tau$. $\Delta\tau$ ranges from 1.6 ps with a step of 1.6 ps. $T_0 = 1$ ps, $T_{\text{tran}} = 5.28$ ps, $\epsilon = 0.4$ W⁻¹

图 8 为开关窗宽度(FWHM)与 T_{tran} 和 $\Delta\tau$ 间的关系,该图进一步阐明了半导体光放大器长度效应对控制脉冲和信号脉冲反向传播开关速度的限制。如欲获得小于 2.7 ps 的开关窗, $T_{\text{tran}} < 2.8$ ps,而 $\Delta\tau < 3$ ps。因此对给定长度的半导体光放大器,降低群折射率可以提高控制脉冲和信号脉冲反向传播的开关速度。

这里需要指出的是,我们的分析的结果是基于弱信号假设的前提下得出的,忽略了信号脉冲对载流子密度的影响以及群速度色散和增益色散的影响,此外还忽略了控制脉冲和信号脉冲间的群速度差。这些假设对于几个皮秒的信号脉冲和控制脉冲,且群速度差比脉冲宽度小得多时,是非常好的近似^[16]。当需要精确模拟时,需要在载流子速率方程和传输方程中考虑这些因素。此外,还需要考虑线宽增益因子的频率依赖性。因此在优化设计半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪的开关特性时,有必要

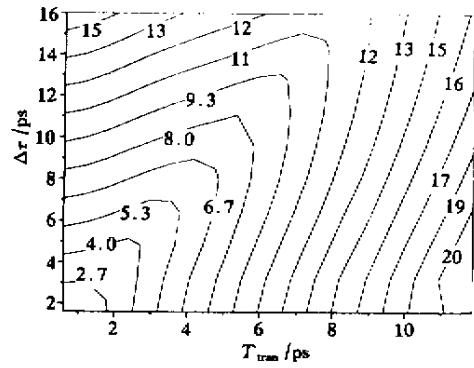


Fig.8 The contour of the FWHM switching window of CPMZ versus T_{tran} and $\Delta\tau$. $\epsilon = 0.2$ W⁻¹

考虑控制脉冲与信号脉冲的这种频率失谐效应^[16]。前面的透明假设认为控制脉冲在半导体光放大器中传播时,半导体光放大器的增益系数是恒定不变的,并且控制光与信号光的传输速度相同,这与实际情况有差别,故该透明假设得出的结果具有一次精度,但该假设对于研究半导体光放大器的长度效应是非常有效的^[7],众多实验^[13,14]也证实了这一点。如果要精确模拟半导体光放大器的长度效应,就必须考虑增益系数和折射率随空间的变化。在忽略群速度失配时,可以采用分段透明假设进行计算,只要把半导体光放大器分段考虑,在每一小段中,增益系数及折射率是恒定的,具体见附录。

结论 本文分析了半导体光放大器载流子的非线性增益压缩效应、半导体光放大器长度效应、时延与控制脉冲宽度对控制脉冲和信号脉冲反向传播与控制脉冲和信号脉冲同向传播解复用的开关特性,分析结果表明:

1) 非线性增益压缩效应引起控制脉冲和信号脉冲反向传播的开关窗口中次开关窗口的出现,在小开关窗口模式时,非线性增益压缩效应更为严重,这限制了控制脉冲和信号脉冲反向传播开关窗口的减小。增加脉冲宽度可以减小非线性增益压缩效应,但增加脉冲宽度同样增加了开关窗口的宽度,故在小开关窗口模式时,控制脉冲宽度应很窄。增加半导体光放大器的长度可以减小快速增益饱和效应,但半导体光放大器的长度效应不仅增加了开关窗口宽度,时延 $\Delta\tau$ 必须大于两倍半导体光放大器的渡越时间 T_{tran} ,否则会使控制脉冲和信号脉冲反向传播的开关比恶化,这限制了其在小窗口模式下的应用。因此半导体光放大器的长度效应和增益饱和效应限制了控制脉冲和信号脉冲反向传播的马赫

-曾德尔干涉仪的开关最终速度。在大开关窗口模式下,脉宽在大于 2 ps 时,可以基本消除增益饱和和效应的影响。由于脉冲宽度同样引起开关窗口宽度增加以及形状的恶化,必须根据实际情况选取。在设计和优化半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪解复用器时,必须合理选择 $\Delta\tau$ 和半导体光放大器的长度,以获得具有较为理想的开关比和指定宽度的开关窗口。控制脉冲和信号脉冲同向传播的开关窗口特性与控制脉冲和信号脉冲反向传播的在零长度近似下的开关特性相同,几乎不受半导体光放大器长度效应的影响。

2) 为了减小半导体光放大器快速增益饱和效应及其长度效应的影响,应选取非线性增益压缩因子与折射率较小的半导体光放大器。

3) 与文献 8 理论模拟相比,本文的模拟结果更符合实验结果,并且很好地解释了文献 8 中理论与实验的差别。

4) 本文提出了分段透明假设模型,可用于更精确地研究半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪的开关特性。

参 考 文 献

- [1] Nakaza M, Yoshida E, Yamamoto T *et al.*. TDM single channel 640 Gbit/s transmission experiment over 60 km using a 400 fs pulse train and a walk-off free, dispersion-flattened nonlinear optical loop mirror. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(9):907~908
- [2] Fischer S, Dulk M, Gamper E *et al.*. Optical 3R regenerator for 40 Gbit/s networks. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(23):2047~2049
- [3] Penty R. Optical TDM makes faster networks possible. *Lightwave*, 2000, **17**(8):142~143
- [4] Kang K I, Glesk I, Sokoloff J P *et al.*. Demonstration of all-optical Mach-Zehnder demultiplexer. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(9):749~750
- [5] Diez S, Schubert C, Ludwig R *et al.*. 160 Gbps all-optical demultiplexer using gain-transparent SOA Mach-Zehnder Interferometer. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(17):1484~1486
- [6] Tang J M, Spencer P S, Shore K A. Influence of fast gain

depletion on the dynamic response of TOAD's. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1):86~91

- [7] Kane M G, Glesk I, Scokoloff J P *et al.*. Asymmetric optical loop mirror: Analysis of an all-optical switch. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(29):6833~6842
- [8] Toliver P, Runser R J, Glesk I *et al.*. Comparison of three nonlinear interferometric optical switch geometries. *Opt. Commun.*, 2000, **175**(4~6):365~373
- [9] Kang K I, Chang T G, Glesk I *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
- [10] Pagrawal G, Olsson N A. Self-pulse modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, QE-25(11):2297~2306
- [11] Mecozzi A, Mork J. Saturation induced by picosecond pulses in semiconductor optical amplifiers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **14**(7):761~770
- [12] Hong M Y, Chang Y H, Dienes A *et al.*. Femtosecond self-and cross-phase modulation in semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1996, **2**(3):523~539
- [13] Gueorgui Toptchiyski, Stefan Kindt, Klaus Petermann *et al.*. Time-domain modeling of semiconductor optical amplifiers for OTDM Applications. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(12):2577~2583
- [14] Kang K I, Chang T G, Glesk I *et al.*. Demonstration of ultrafast, all optical, low control energy, single wavelength, polarization independent, cascaded, and integratable switch. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(5):605~607
- [15] Hong M Y, Chang Y H, Dienes A *et al.*. Subpicosecond pulse Amplification in semiconductor laser amplifiers: Theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, QE-30(4):1122~1131
- [16] Tang J M, Spencer P S, Rees P *et al.*. Enhanced TOAD performance by negative frequency-detuned signal and control picosecond optical pulses. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, QE-36(5):574~581
- [17] Durhuus T, Mikkelsen B, Stubjaer K E. Detailed model for semiconductor optical amplifiers and their crosstalk and intermodulation distortion. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(8):1056~1065

附录 A

如果把半导体光放大器分为若干小段,在每一小段中认为控制光的形状不变,且增益系数在每一段中形状不变,这里称之为分段透明假设。如果假设信号脉冲与控制脉冲的群速度相同,在每一小段中信号以速度 v_l 对半导体光放大器的增益系数进行抽样,抽样函数为 $\chi(t \pm z_l/v_l)$,此段中增益系数具有行波形式

$$g(z_l, t) = g(t - z_l/v_l).$$

于是有

$$h_{cw}(t) = \sum_l g(t \mp z_l/v_l - z_l/v_l) \Delta L, \quad (A1)$$

$$h_{ccw}(t) = \sum_l g(t - \Delta\tau \mp z_l/v_l - z_l/v_l) \Delta L, \quad (A2)$$

其中“-”对应控制脉冲和信号脉冲反向传播;“+”对应控制脉冲和信号脉冲同向传播。 z_l 为第 l 段的长度, $z_l = l\Delta L$, ΔL 为分段间隔;

$$v_l = c / \{n_0 - (dn/dN) \mathbf{I} g(z_l) \Gamma \alpha \},$$

n_0 为半导体光放大器的材料折射率, dn/dN 为折射率对载流子密度的变化系数。 $g(z, t)$ 可通过半导体光放大器的分段模型^[13,17] 计算。

Switching Characteristic of Semiconductor Optical Amplifier Based Demultiplexer with Symmetric Mach-Zehnder Interferometer Configuration

Zhao Yongpeng Ye Peida

(*Beijing University of Posts and Telecommunications, The School of Telecommunication Engineering, Beijing 100876*)

(Received 23 October 2000; revised 27 January 2001)

Abstract: The switching characteristic of a semiconductor optical amplifier based demultiplexer with symmetric Mach-Zehnder Interferometer (SOA-MZI) operating at colliding pulse Mach-Zehnder (CPMZ) and travelling pulse Mach-Zehnder (TPMZ) configuration is analyzed. It shows that the control pulse width, the SOA length effect and the nonlinear gain compression effect influence the width of the switching window, and they are the main factors in limiting the switching speed of the CPMZ configuration. When the control pulse width is less than the SOA transition time, switching contrast ratio of CPMZ will begin to decrease if the delay between the two control pulses is less than the twice of SOA transition time. However when the control pulse width exceeds the SOA transition time, the switching contrast ratio will decrease even the delay is larger than the twice of SOA transition time. Hence a short control pulse and a delay larger than the twice of SOA transition time are required to enable the CPMZ to operate at a high speed with a high switching contrast ratio. While TPMZ configuration is almost free from the SOA's length effect.

Key words: Mach-Zehnder Interferometer; semiconductor optical amplifier; nonlinear gain compression; all-optical demultiplexing