

基于半导体光放大器的一阶 IIR 微波光子学滤波器 及其品质因素分析*

周俐娜^{1)†} 张新亮^{1)†} 徐恩明¹⁾ 黄德修¹⁾

1) 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)和光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

2) 中国地质大学物理系, 武汉 430074)

(2008 年 1 月 12 日收到, 2008 年 7 月 31 日收到修改稿)

对基于半导体光放大器(SOA)环形腔结构的一阶无限冲击响应(IIR)微波光子学滤波器的品质因数(Q 值)进行了实验和理论研究. 通过在有源环内置入窄带光滤波器, 并调节有源环的输入光功率、SOA 抽运电流, 实验得到的最高 Q 值接近 200. 理论分析表明为了得到较高的 Q 值, 应尽可能提高信噪比和信号光的环路增益. 在考虑了 SOA 中放大的自发辐射(ASE)噪声的基础上, 计算了输入光功率、SOA 抽运电流、环内光滤波器的带宽对 Q 值的影响. 数值计算的结果与实验现象基本符合.

关键词: 微波光子学滤波器, Q 值, 半导体光放大器, 放大的自发辐射

PACC: 4280S

1. 引 言

利用光器件来产生、传输、处理及探测微波信号的技术已经被研究者们持续关注了近三十年, 微波光子学滤波器是其中最重要的研究成果之一^[1]. 微波光子学滤波器之所以引起人们广泛的关注, 是因为传统的微波滤波器具有如下缺点: 对电磁干扰敏感、损耗大、存在电子瓶颈、与光纤传输系统不兼容, 而微波光子学滤波器则可以克服以上缺点^[2]. 最先提出利用光器件处理微波信号的是 Wilner 等^[3], 他们于 1976 年提出利用单模光纤低损耗高带宽的优点, 构成延迟线滤波器用来处理宽带微波信号. 此后, 使用各种光器件按照各种结构提出来的微波光子学滤波器方案层出不穷. 提高滤波器的频率选择性即 Q 值是微波光子学滤波器发展方向之一. 有限冲击响应(FIR)滤波器的 Q 值由于和信号路数正相关, 通过提高信号路数来提高 Q 值无疑会成倍增加器件成本^[4-8], 无限冲击响应(IIR)滤波器则可以用较少的器件实现高的 Q 值. 对于 IIR 滤波器, 使 z 域内的极点尽可能靠近单位圆或提高滤波器阶次都可以提高 Q 值. 悉尼大学的 Hunter 和 Minasian 带领

的研究小组在提高 Q 值这个方向取得了不错的成绩^[9-11]. 他们先是在 1996 年提出了基于掺铒光纤的有源环形腔结构的一阶 IIR 滤波器, 使 Q 值达到 200^[9], 又于 1997 年提出了基于 FBG 对和 EDFA 的 F-P 腔结构的一阶 IIR 滤波器, 同样实现了 200 左右的 Q 值^[10]. 在此基础上, 他们于 1999 年又提出在一阶 IIR 滤波器后级联 FIR 滤波器成倍提高 Q 值的方法, 使 Q 值提高到 1000 左右^[11]. 在 2006 年, 他们又提出基于有源环形腔结构的三阶 IIR 滤波器, 实验达到的 Q 值为 100 左右^[12]. Hunter 和 Minasian 侧重于实验研究和各种方案的提出, 但对制约 Q 值的原因未做深入的理论探讨. 本文采用与文献[9]相似的有源环形腔结构的一阶 IIR 滤波器(主要区别是用 SOA 代替了掺铒光纤), Q 值接近 200. 实验中发现制约 Q 值的主要因素是放大的自发辐射噪声, 本文对此做了详细的理论分析和计算. 作为区别和比较, 本文所采用的环形结构中, SOA 仅用来对单向(逆时针)传输的光信号提供增益, 构建的是高 Q 值一阶 IIR 带通滤波器. SOA 能在正反两个方向传输信号之间产生相移^[13], 将 SOA 置于萨格纳克环中, 利用环中由 SOA 产生的顺时针和逆时针传输信号之间的 π 相移, 还可以构建含两路信号的 FIR 陷波

* 国家重大基础研究计划(批准号: 2006CB320805)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(批准号: NCET-04-0715)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

滤波器^[14].

2. 基本原理

微波光子学滤波器采用光器件对微波信号进行处理,首先将微波信号调制到光载波上,然后对信号光进行分路,利用光器件对各路信号光进行延时,并保证相邻两路信号光延时时间相同.延时后的各路信号光再进行合波,当相邻两路信号光延时时间大于光源相干时间时,合波时各路信号光互不相干,合波后的光强为各路信号光强的叠加,合波后的光信号被光电接收器接收并转化为电信号.这样,就相当于对微波信号分路、延时,而后叠加,从而实现对微波信号的处理.类似于数字滤波器的分类,微波光子学滤波器根据参与叠加的微波信号路数是有限路数还是无限路数分为 FIR 滤波器和 IIR 滤波器.两类滤波器对于微波信号的传输网络(并联结构)如图 1.其中,若系数 a_k 全为零,输出信号无反馈的结构为 FIR 滤波器,对应于图 1 的左半部分,否则为 IIR 滤波器.微波信号的频域传输方程为

$$H(f) = \frac{\sum_{r=0}^M b_r e^{-jr2\pi fT}}{1 - \sum_{k=1}^N a_k e^{-jk2\pi fT}}. \quad (1)$$

从传输方程可见,该网络的幅频特性是频率 f 的周期函数,其周期为 $1/T$.故这种滤波器是一种梳状滤波器,自由谱宽(FSR)的值 a_{FSR} 刚好为 $1/T$, T 为相邻两路信号之间的延迟时间.到目前为止,任意传输函数(或任意传输网络)的微波光子学滤波器尚未研制出来,主要受制于任意阶 IIR 滤波器难以实现.对于级联结构的高阶 IIR 滤波器,很难避免各路信号光之间的干涉,而光的干涉受环境影响相当大,导致系统不稳^[12].而对于并联结构的高阶 IIR,也尚未研制出理想的器件.较为成熟的是任意阶 FIR 滤波器和一阶 IIR 滤波器的方案.

微波光子学滤波器的 Q 值反映了滤波器的频率选择性, Q 值的定义为自由谱宽与通频带 3 dB 带宽的比值. Q 值越高,频率选择性越好.一阶 IIR 滤波器(设除 b_0 外的 b_i 全为零)的 z 域传输函数为

$$H(z) = \frac{b_0 z}{z - z_p}, \quad (2)$$

其中 $z = \exp(jw)$, $z_p = a_1$, 为信号在环内绕行一周的增益, $w = 2\pi f/a_{\text{FSR}}$, w 为归一化频率.在 w 域内考查,滤波器幅频响应曲线的周期为 2π .根据 Q 值

的定义,可求得

$$Q = \frac{\pi}{\arccos \frac{-3z_p^2 + 8z_p - 3}{2z_p}}, \quad (3)$$

由(3)式可知, z_p 越接近 1, Q 值越大, z_p 无限接近 1, Q 值可趋于无穷大.

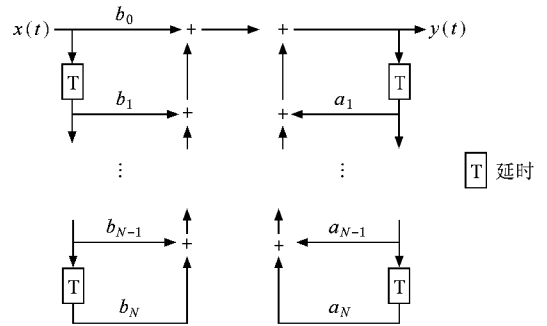


图 1 并联结构的微波信号传输网络

3. 实验和结果分析

我们采用了基于 SOA 的有源环路构造了一个一阶 IIR 微波光子学滤波器,实验装置如图 2 所示,分布反馈式半导体激光器(DFB LD)输出光波长为 1563.65 nm,对准 SOA 增益谱的中心频率,网络分析仪输出扫频微波信号对光源进行强度调制.掺饵光纤放大器(EDFA)对信号光进行前置放大,光滤波器 1 以及光滤波器 2 对准激光器波长,对非信号光进行抑制.由于该 EDFA 增益不可调节,衰减器 1 用来调节有源环的输入功率 P_{in} ,衰减器 2 对光探测器起保护作用.信号光经 3 dB 耦合器实现分波与合波,具体路径为:第一路直接输出,第二路绕环一周输出,第三路绕环两周输出,……,相邻两路信号延时时间 T 为光在有源环中绕行一周所用的时间,决定了滤波器的自由谱宽.合波后的信号光经光电探测器转变为电信号后由网络分析仪接收.理想情况下,信号光可以在环内绕行无限多次,此结构对应于一个 IIR 滤波器.但由于自发辐射噪声的存在,信号光在环内绕行有限次数后信噪比将降至探测器无法分辨出信号,它仍然是一个 FIR 滤波器,实际上,所有的 IIR 滤波器都是不考虑接收器分辨率和信噪比时的理想状况.

实验中观察到以下几个现象:1)提高 SOA 的抽运电流,滤波器 Q 值明显提高,但 Q 不能无限增大,当 Q 值达到一定值后继续提高抽运电流,发现

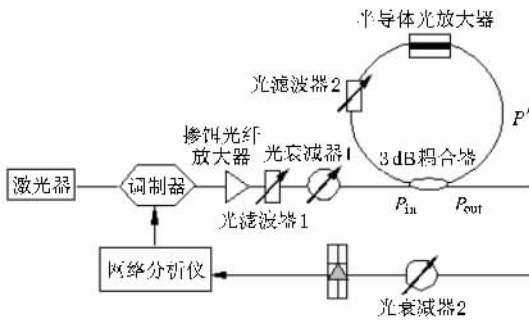


图2 实验装置

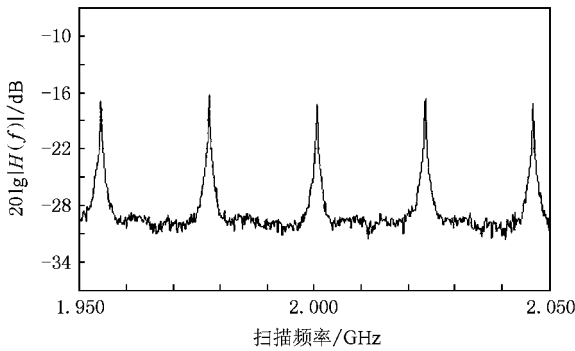


图3 网络分析仪测得的幅频传输特性 $H(f)$ 为传输函数

Q 反而略为下降. 2) 提高输入光功率 P_{in} , Q 值明显提高, 但 Q 值达到一定值后继续提高输入光功率, Q 反而下降. 3) 去掉环内光滤波器, Q 值急剧恶化, 减小到 1—2 左右, 改变环内光滤波器的通带带宽, 发现带宽越小, Q 值越高(带宽大于信号光线宽, 不阻碍信号光的通过). 通过调节, 该实验装置可以达到的最高 Q 值为 193, 图 3 为网络分析仪测得的幅频传输特性曲线, 实验得到的 FSR 的值为 $a_{FSR} = 23.2$ MHz, 最高 Q 值处 3 dB 带宽为 0.12 MHz.

当不考虑自发辐射和探测器灵敏度时, 该装置对微波信号构成一个一阶 IIR 滤波器, 如上一节分析滤波器的 Q 值取决于环路对信号光的单程增益, 为了提高 Q 值, 应使环路单程增益尽可能接近 1. 假设稳定工作时环路对信号光的单程增益为 G' (以后简称为环路增益) 则

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} + P_{out} \cdot G' \Rightarrow G' = \frac{P_{out} - \frac{1}{2} P_{in}}{P_{out}} < 1. \quad (4)$$

忽略滤波器对信号光的损耗, 可推知 SOA 对信号光增益 G (G 为中心频率单程增益, 信号光波长对准 SOA 增益谱中心频率) 小于 2, 根据实验所设置的

SOA 抽运电流大小以及 SOA 的增益可判断实验中 SOA 工作在饱和状态. 饱和工作时 SOA 中心频率处的增益 G 与小信号中心频率处的增益 G_0 满足公式^[15]

$$G = G_0 \exp\left[\frac{(1 - G)P'}{P_s}\right], \quad (5)$$

其中 P' 为 SOA 前端输入功率, 如图 2 上标注, 而 $P' = P_{out}$, 由(4)式得

$$P' = P_{out} = \frac{\frac{1}{2} P_{in}}{1 - \frac{1}{2} G}, \quad (6)$$

(6) 式代入(5)式得

$$G = G_0 \exp\left[\frac{(1 - G)P_{in}}{2P_s(1 - 0.5G)}\right]. \quad (7)$$

由图 4 可见, 增加 G_0 (即增加抽运电流), 减小输入功率 P_{in} , 将提高 SOA 增益 G , 使之接近 2, 从而使环路对信号光的增益 G' 接近 1 (考虑 3 dB 耦合器损耗).

当考虑自发辐射 ASE 噪声后, 被探测到的有效信号路数为有限值, 设为 n , 则 z 域传输函数为

$$H(z) = 1 + G'z^{-1} + G'^2z^{-2} + \dots + G'^nz^{-n} = \frac{1 - (G'/z)^n}{1 - (G'/z)}, \quad (8)$$

w 域传输函数为

$$H(w) = \frac{1 - (G'e^{jw})^n}{1 - G'e^{jw}} = \frac{1 - G'^n[\cos(nw) + j\sin(nw)]}{1 - G'[\cos(nw) + j\sin(nw)]}, \quad (9)$$

$$|H(w)| = \sqrt{\frac{1 + G'^{2n} - 2G' \cos(nw)}{1 + G'^2 - 2G' \cos(nw)}}, \quad (10)$$

$w=0$ 时, $|H(w)|$ 取最大值, 设幅频特性下降到最大值一半(-3 dB)时对应的归一化频率为 w_{-3dB} , 则

$$\sqrt{\frac{1 + G'^{2n} - 2G' \cos(nw_{-3dB})}{1 + G'^2 - 2G' \cos(nw_{-3dB})}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - G'^n}{1 - G'} \quad (11)$$

$$Q = \frac{2\pi}{2w_{-3dB}}. \quad (12)$$

根据以上两式, 可作出 Q 值与环路增益 G' 及信号有效路数 n 的关系, 如图 5. 由图可见, 环路增益 G' 越接近 1, 有效信号路数 n 越大, Q 越大. 增加 SOA 抽运电流一方面将增加 G' , 但当 G' 趋近于 1 时, 再增加抽运电流 G' 增加相当缓慢, 而抽运电流增加导致 ASE 功率的增加将导致信噪比减小, 信号有效路数 n 随之减小. 故抽运电流对 Q 值的影响是矛盾的, 存在一个最佳电流. 同样, 输入信号光功率 P_{in} 对 Q

值的影响也是矛盾的,提高 P_{in} 一方面可增加信噪比,对提高有效信号路数 n 有贡献,但另一方面,提高 P_{in} 又导致环路增益 G' 减小,故而也存在一个最佳信号光功率 P_{in} . 而环内接入一个光滤波器能有效抑制 ASE,而让信号光通过,从而提高 Q 值. 光滤波器带宽越小,对 ASE 抑制得越好,则 Q 值越高.

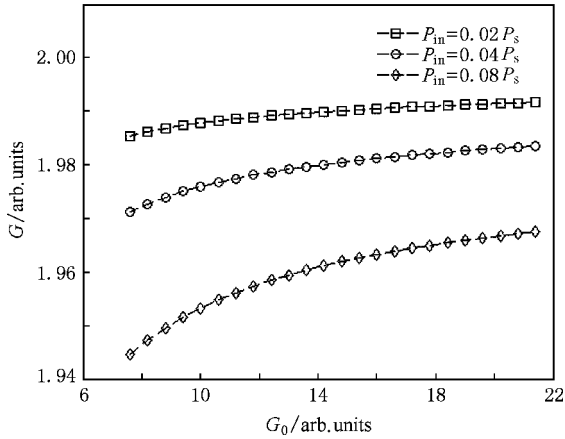


图4 SOA 饱和时中心频率处增益 G 与小信号中心频率处增益 G_0 以及输入功率 P_{in} 的关系

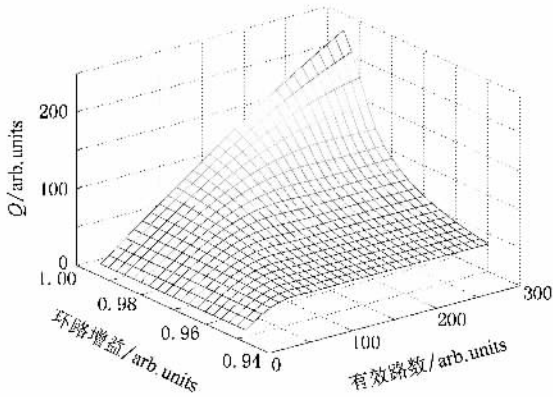


图5 考虑 ASE 后滤波器 Q 值与环路增益 G' 以及信号有效路数 n 的关系

4. 模拟及结果分析

为了更进一步分析输入功率、SOA 抽运电流、环内光滤波器带宽对 Q 值的影响,本文调用考虑端面反射和 ASE 的 SOA 程序模块^[16]。该程序模块以 SOA 材料参数、抽运电流、输入信号功率 P' 为输入参数,可输出信号增益、ASE 功率谱,对如图 2 所示的基于 SOA 的一阶 IIR 微波光子学滤波器的 Q 值进行

了数值模拟。

具体方法:设置光电探测器所能分辨信号的信噪比极限 γ_{SNR} ,设置环内滤波器带宽 δ_ν (为了简化分析,设传输特性为理想矩形),设置调制器调制深度 m . 当第 k 路信号光功率与调制深度的乘积,与第 k 路自发辐射光功率的比值小于光电探测器的信噪比极限 γ_{SNR} 时,认为第 k 路信号未被接收,有效信号路数为 $k-1$. 判断条件为

$$\frac{m \cdot P_{s,k}}{P_{n,k}} > \gamma_{SNR}, \quad (13)$$

其中,第 k 路信号光功率的计算式为

$$P_{s,k} = \frac{1}{2} P_{in} G'^{k-1}, \quad (14)$$

第 k 路噪声(ASE)光功率的计算式为

$$p_{n,k}(\nu) = \frac{1}{2} p_{ASE}(\nu) \mathcal{G}(\nu),$$

$$p_{n,k}(\nu) = \frac{1}{2} [p_{ASE}(\nu) + p_{n,k-1}(\nu) \mathcal{G}(\nu)] \mathcal{G}(\nu),$$

$$P_{n,k} = \int_0^\infty p_{n,k}(\nu) d\nu. \quad (15)$$

式中 $p_{ASE}(\nu)$ 为 SOA 自发辐射功率谱密度, $\mathcal{G}(\nu)$ 为 SOA 单程增益, $\mathcal{G}(\nu)$ 为环内光滤波器传输函数。

采取此方法,我们通过改变抽运电流 I ,输入光功率 P_{in} ,以及环内光滤波器带宽 δ_ν ,得到 Q 值与它们的关系曲线. 分别如图 6,图 7,图 8 所示. 由图 6 可见,当增加抽运电流时,一开始环路增益和信号路数都增加, Q 值也增加. 但抽运电流增加到一定值后,由于环路增益增加变缓,即信号光衰减速度并没有因为抽运电流的增加而变慢多少,而 ASE 功率增加较多,导致噪声功率较快地积累到将信号淹没,信

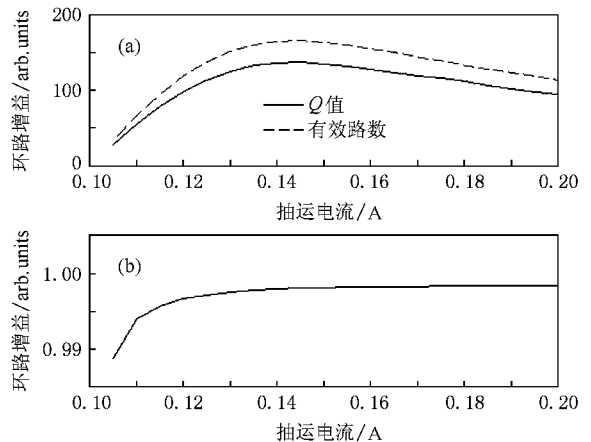


图6 计算得到的(a) Q 值、信号路数和(b)环路增益与抽运电流的关系. 输入功率为 0.2 mW,光电探测器接受信噪比为 2:1,调制深度为 0.02,SOA 饱和功率为 10 mW,光滤波器带宽为 1 nm

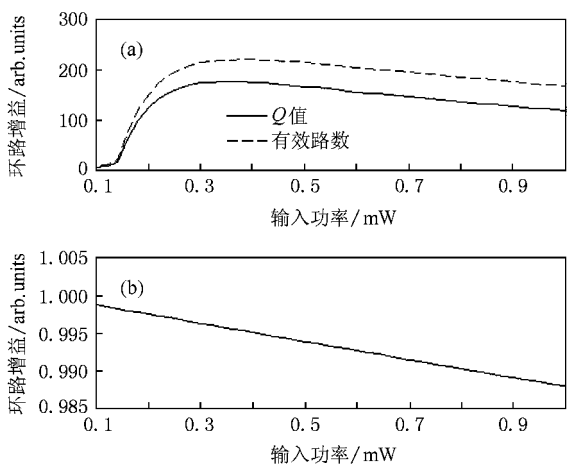


图 7 计算得到的(a) Q 值、信号路数和(b) 环路增益与输入功率的关系 抽运电流为 0.13 A, 光电探测器接收信噪比为 2:1, 调制深度为 0.02, SOA 饱和功率为 10 mW, 光滤波器带宽为 1 nm

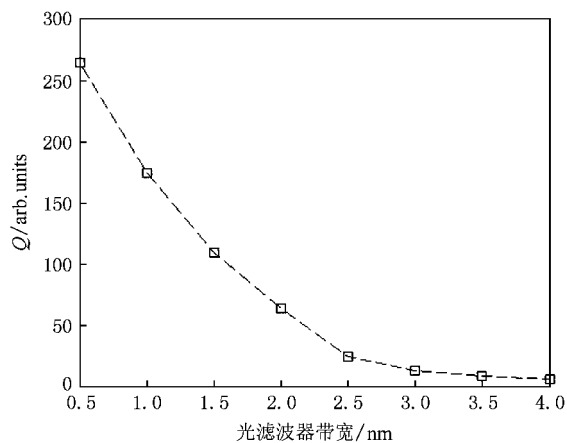


图 8 计算得到的 Q 值与环内光滤波器带宽的关系 抽运电流为 0.13 A, 输入功率为 0.4 mW, 光电探测器接收信噪比为 2:1, 调制深度为 0.02, SOA 饱和功率为 10 mW

号路数减小 综合考虑增益增加对提高 Q 的贡献和信号路数减小对提高 Q 的负面作用后, 最终 Q 值减

小. 由图 7 可见, 增加输入光功率 P_{in} , 环路增益一直在减小, 但输入光功率很小时, 尽管环路增益非常大, 但由于信噪比太差, n 非常小, 导致 Q 值很小. 此时增加输入光功率改善信噪比, 提高信号路数 n 对提高 Q 值的贡献大于由于环路增益的降低对提高 Q 值的负面作用, Q 增加. 但当输入光功率增加到一定值以后, 环路增益下降较多, 信号衰减加快, 反而降低了信噪比, 信号路数 n 减小, Q 也随之减小. 由图 8 可见, 减小环内光滤波器带宽, 只要满足大于信号光线宽, 可以单方面减小噪声功率而对信号光无影响, 从而有效地改善信噪比, 提高了信号路数 n 以及 Q 值. 数值模拟得到的结果和实验现象符合. 此模型虽然是以基于 SOA 的一阶 IIR 微波光子学滤波器为对象来分析的, 但对于其他结构的 IIR 微波光子学滤波器 Q 值的分析同样具有借鉴意义.

5. 结 论

使用有源器件的 IIR 微波光子学滤波器由于放大的自发辐射的存在, 以及光电接收器对接收信号有一定的信噪比要求, 使得在输出端发生叠加的信号路数为有限路数, 从而使 Q 值不可能无限制提高. 对于本文采用的基于 SOA 的有源环形腔结构的 IIR 滤波器, 为了得到较高的 Q 值, 应努力提高信号的信噪比和信号光的环内增益. 可以通过在环内 SOA 后侧置入窄带光滤波器滤除 ASE 噪声, 使用 ASE 功率较小的 SOA, 并调节有源环的输入光功率、SOA 抽运电流来实现. 利用弱信号检测技术降低光电接收器对信噪比的要求, 提高光电接收器性能也可以增加 Q 值, 另外使用调制深度较大的调制器, 提高输入信号的信噪比也可以增加 Q 值, 但增加调制深度又会增加滤波器的非线性, 应综合考虑滤波器设计指标后谨慎采用.

[1] Seeds A J 2002 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **50** 877
 [2] Capmany J, Ortega B 2005 *J. Lightw. Technol.* **23** 702
 [3] Wilner K, van den Heuvel A P 1976 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **64** 805
 [4] Zhang W, Yu G, Williams J A R 2000 *Electron. Lett.* **36** 1708
 [5] Pastor D, Ortega B, Capmany J, Sales S, Martinez A, Muñoz P 2003 *Opt. Lett.* **28** 1802

[6] You N, Minasian R A 1999 *Proc. Int. Topic. Meeting Microw. Pho.* **1** 223
 [7] Wang C C 1987 *J. Lightw. Technol.* **LT-5** 77
 [8] Hunter D B, Minasian R A 1996 *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* **6** 103
 [9] Hunter D B, Minasian R A 1996 *Proc. Int. Topical Meeting on Microwave Photonics* 273

- [10] Hunter D B , Minasian R A 1997 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **45** 1463
- [11] You N , Minasian R A 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **47** 1304
- [12] Chan E H W , Minasian R A 2007 *J. Lightw. Technol.* **25** 1
- [13] Eiselt M , Pieper W , Weber H G 1995 *J. Lightw. Technol.* **13** 2099
- [14] Guo X N , Shum P , Aditya S 2008 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **50** 225
- [15] Jiang J P 2000 *Semiconductor Laser* (Beijing : Publishing House of Electronics Industry) p229 (in Chinese) [江剑平 2000 半导体激光器(北京:电子工业出版社)第 229 页]
- [16] Jiang Z , Zhang X L , Huang D X 2006 *Acta Phys. Sin.* **9** 4713 (in Chinese) [蒋中、张新亮、黄德修 2006 物理学报 **9** 4713]

Q value analysis of a first-order IIR microwave photonic filter based on SOA *

Zhou Li-Na^{1,2)} Zhang Xin-Liang^{1)†} Xu En-Ming¹⁾ Huang De-Xiu¹⁾

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China)

² Department of Physics , China University of Geosciences , Wuhan 430074 , China)

(Received 12 January 2008 ; revised manuscript received 31 July 2008)

Abstract

The Q value of a first-order infinite impulse response (IIR) microwave photonic filter based on a semiconductor optical amplifier (SOA) in a loop is investigated theoretically and experimentally. The maximum Q value measured is around 200 by setting a narrow bandwidth optical filter in the active loop and changing the input optical power of the loop and the pump current of the SOA. Analysis shows that increasing the signal to noise ratio and the gain of the signal light through the loop contributes to achieving higher Q value. The influences of the input optical power , the pump current of the SOA and the bandwidth of the optical filter in the loop on the Q value are calculated , based on the amplified spontaneous emission (ASE) noise of the SOA being investigated. Experimental results are in good agreement with the calculated results.

Keywords : microwave photonic filter , Q value , semiconductor optical amplifier , amplified spontaneous emission

PACC : 4280S

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB320805) and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-04-0715).

† Corresponding author. E-mail : xlzhang@mail.hust.edu.cn