

文章编号: 1001-3806(2005)05-0462-04

半导体光放大器的增益特性和偏振特性

崔迎超¹, 张书练^{2*}, 冯金垣¹

(1. 华南理工大学 理学院 应用物理系, 广州 510640; 2. 清华大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 介绍了半导体光放大器的两个重要特性: 增益特性和偏振特性。增益特性中, 描述了放大器中增益调制现象和增益饱和现象, 并介绍了提高半导体光放大器增益的方法。偏振特性中, 分析了半导体光放大器增益偏振敏感产生的原因, 并列出了低偏振敏感度放大器的实现方法。最后报道了近几年才被注意的半导体光放大器相位偏振敏感特性。

关键词: 半导体光放大器; 增益调制; 增益饱和; 增益偏振敏感度; 相位偏振敏感度

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A

The gain and polarization characteristics of semiconductor optical amplifiers

CUI Ying-chao¹, ZHANG Shu-lian², Feng Jin-yuan¹

(1. Department of Applied Physics, College of Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The two important characteristics of semiconductor optical amplifiers (SOA), gain and polarization, are introduced completely. In the section of gain characteristic, the phenomena of gain modulation and gain saturation are described. The methods to enhance the gain of SOA are presented. In the other section, the reasons resulting in polarization sensitivity of SOA are analyzed and the way to perform SOA with low gain polarization sensitivity is discussed. At last, the phenomenon of the phase polarization sensitivity in SOA paid much attention in recent years is reported.

Key words: semiconductor optical amplifier; gain modulation; gain saturation; gain polarization sensitivity; phase polarization sensitivity

引 言

光放大器是光通信系统必不可少的关键器件。目前常用的光放大器主要有 3 种: 掺铒光纤放大器、半导体光放大器和光纤喇曼放大器。掺铒光纤放大器具有增益高、饱和输出功率大, 与光纤耦合容易, 可以用于任何偏振方向的优点。但掺铒光纤放大器需要较长的掺铒光纤 (几十米甚至 100 多米), 还需要半导体抽运光源, 因而体积庞大, 价格昂贵。光纤喇曼放大器具有串扰小、温度稳定性好等优点, 能在掺铒光纤放大器不能放大的波段提供放大, 特别适用超长距离传输和海底光缆通信等不方便设立中继器的场合。不足之处在于需要特大功率的抽运激光器。半导体光放大器在性能上与这两种光纤放大器有一定差距, 但半导体光放大器体积小、结构简单、成本低、不需抽运源、易于同其它光器件和电路集成, 近几年来发展很快, 技术上已比较成熟。可以用作功率放大、中继放大和接收机前置放大外, 还可以在波分复用系统中作波长转换器或

构成光开关阵列及光交换系统^[1]。这里主要介绍半导体光放大器, 并对它的两个重要特性: 增益特性和偏振特性进行介绍。

1 半导体光放大器工作原理

半导体光放大器的工作原理与半导体激光器一样, 都是通过半导体增益介质的粒子数反转引发受激辐射产生光放大, 不同的是半导体激光器放大的是内部电子空穴复合产生的光子, 而半导体光放大器放大的是外部输入的光子或光信号^[2]。半导体光放大器有法布里-珀罗光放大器 (FP-SOA) 和行波光放大器 (TW-SOA) 两种。FP-SOA 实际上就是一个工作在阈值电流以下的半导体激光器, 它的增益谱宽很窄。在光纤通信中有实际应用价值的是行波半导体光放大器 (TW-SOA), 它是把半导体激光器两解理面进行理想增透, 剩余反射率小于 10^{-3} , 尽量使入射的光信号只在其内获得单程放大。

2 半导体光放大器的增益特性

半导体光放大器的有源介质有很大的增益系数, 一般 $50\text{cm}^{-1} \sim 100\text{cm}^{-1}$, 这是其它气体和固体激光工作物质所不能比拟的, 例如 He-Ne 激光器工作物质的

作者简介: 崔迎超 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事双频正交偏振半导体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zsl-dpi@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-07-02; 收到修改稿日期: 2004-09-07

增益系数仅有 $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ^[3]。外来光信号在半导体光放大器中获得的单程增益表示为：

$$G_s = \exp[(\Gamma g - \alpha_i)L] \quad (1)$$

式中, Γ 为光场限制因子, L 为 SOA 有源区长度, g 和 α_i 为增益系数和损耗系数。但实际的半导体光放大器两端面仍旧有一定的剩余反射率, 本身可形成一个 F-P 腔, 外来光信号很难获得完全单程放大, 有一定的谐振效应。半导体光放大器的腔增益 $G (G = P_{\text{out}}/P_{\text{in}})$ 应表示为：

$$G = \frac{G_s (1 - R_1) (1 - R_2)}{(1 - G_s R_1 R_2)^2 + 4G_s R_1 R_2 \sin^2[\pi(\nu - \nu_0)/\Delta\nu_L]} \quad (2)$$

式中, R_1, R_2 为两端面反射率; ν_0 为增益谱的中心频率; ν 为输入光的频率; $\Delta\nu_L = c/2n_g L$ 为纵模间隔 (n_g 为群折射率), 也即 F-P 腔的自由光谱范围; G_s 为单程信号增益。半导体光放大器的全部小信号增益谱一般平坦且宽, 3dB 增益谱宽一般有 50nm~70nm^[2], 甚至有的可以达到 90nm~100nm。对于典型长度 250 μm ~500 μm 中心波长 1550nm 的半导体光放大器, 若增益谱宽 70nm, 增益带宽内大约有 56~112 个模。图 1 是半导体光放大器的自发辐射谱线图, 在自发辐射谱线上可以看到许多的“毛刺”, 这是因为放大器两端面镀膜没有到达完全增透所造成的, 从“毛刺”的深浅可以大致判断出镀膜质量的好坏。两端面剩余反射率越低, 曲线越光滑。

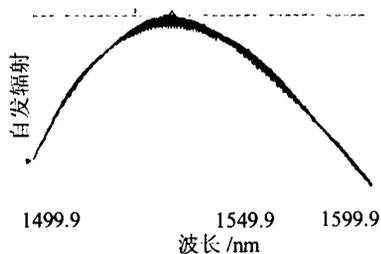


图 1 半导体光放大器的自发辐射谱线

这里所谓的“毛刺”实际上是腔增益调制, 图 2 显示了半导体光放大器腔增益与波长的关系 (直线为

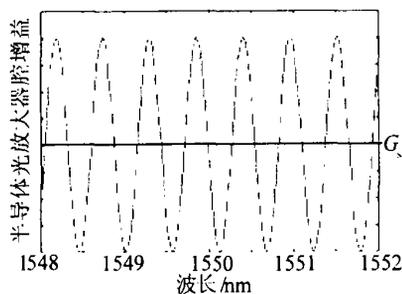


图 2 半导体光放大器的腔增益调制

G_s), 增益调制的深度由 $G_s \sqrt{R_1 R_2}$ 决定, 若 $R_1 = R_2 = 0$, 增益调制为 0, 自发辐射曲线光滑没“毛刺”。实际的半导体光放大器端面反射率不可能做到完全增透, 因

此具有有限的增益调制。从腔增益表达式 (2) 式可以看出, 端面反射率越低, 增益调制越小, 放大器的放大率越高。当 $R_1 = R_2 = R < 5 \times 10^{-4}$, 允许增益调制为 1dB 的话, 单程信号增益为 20dB, 若 $R < 5 \times 10^{-5}$, 同样 1dB 的增益调制, 则单程信号增益可达到 30dB ($G_s = 1000$)。

为了降低端面反射率, 最普通的方法是在端面镀膜增透膜^[4], 但得到反射率小于 10^{-3} 、一致性和重复性都很好的增透膜并不容易。为了更好地降低反射反馈, 通常还采用一些别的技术。一种是倾斜条形结构^[5], 即将有源区的 SiO_2 条形与腔面的垂直方向倾斜一个角度, 这个角度通常是 7° 或者 12°^[4]。由于存在一定角度, 从腔面的反射光束与正向光束分开不能再返回到有源区了。这种方法得到的端面反射率在优化时可达 10^{-4} 。还有一种办法是在有源区和腔面插入透明窗口^[6], 光束在半导体与空气界面被透明窗口分束, 反射光束经过分束后就不能回到有源区。这种方法得到的反射率可低于 10^{-4} 。

半导体光放大器中存在着增益饱和现象, 在注入电流恒定时, 输入信号光功率较小时, 随着输入光功率的增加, 输出光功率相应增加, 增益为常数, 但当输入光功率较高时, 增益就会出现饱和甚至发生下降。这是因为大的输入光信号使过量的载流子参加受激辐射复合而得不到及时补充。定义饱和输出功率为 P_s : 电流恒定时, 输入信号增大使增益值从未饱和值减小 3dB 时所对应的光放大器的输出光功率。考虑到增益饱和现象, 可以得到半导体光放大器的输出功率 P_{out} :

$$P_{\text{out}} = G_0 P_{\text{in}} \exp[-(G - 1) \frac{P_{\text{in}}}{P_s}] \quad (3)$$

$$G_0 = \exp[(\Gamma g_0 - \alpha_i)L] \quad (4)$$

式中, G_0 为单程小信号增益; g_0 为小信号增益系数; G 为半导体光放大器腔增益; P_{in} 为输入光功率; P_s 为饱和输出功率。现在一般的半导体光放大器的饱和输出功率都能做到 10dBm 以上, 2003 年报道的日本富士通公司实验室研究的高输出半导体光放大器输出功率可达 17dBm^[7]。

上面所提到的饱和现象是对半导体光放大器影响较大的一种增益饱和现象, 其实在半导体光放大器中还存在一种不太被重视的增益饱和现象。在输入光信号一定时, 半导体光放大器的增益随着注入电流的增加而增加, 输出功率也相应的增加, 但注入电流增加到某一个值后再增加, 增益不但不增加反而下降。这种饱和现象是由于受到载流子增益恢复时间限制造成的。

半导体光放大器的增益饱和与大家熟悉的激光器的增益饱和在本质上是一样的, 因为半导体光放大器的增益饱和和实际上是由于增益系数 g 的饱和所导致。

半导体光放大器的增益展宽属于均匀展宽,增益系数同样满足大信号增益系数公式 $g = g_0 / (1 + P/P_s)$ (g 为小信号增益系数; P 为输出功率; P_s 为饱和输出功率)。

3 半导体光放大器的偏振特性

半导体光放大器的偏振特性主要是指放大器对输入信号光的偏振态敏感,对不同的偏振态的增益不相同,没有经过特殊设计的半导体光放大器对 TE 模、TM 模的增益可相差 5 dB ~ 8 dB,而且会使增益的有效带宽减小,这当然是光纤通信中不希望见到的。

对半导体光放大器的增益偏振敏感性影响较大的原因有 3 种^[8,9]。一种是在增益介质中,轻空穴和重空穴价带在 K 空间原点处简并,导带电子与重空穴之间的跃迁产生 TE 模辐射,电子与轻空穴之间的跃迁产生 TM 模辐射,TE 模的辐射远远大于 TM 模,随着电流的增加,它们的增益差也越来越大。第 2 种是因为半导体光放大器的波导结构为不对称的平板结构,通常条宽是条厚的 10 倍 ~ 20 倍,这导致有源层对 TE 模、TM 模的限制因子不同 ($\Gamma_{TE} > \Gamma_{TM}$),这也使 TE 模的增益大于 TM 的增益。第 3 种是半导体光放大器的两端面对 TE 模、TM 模的剩余反射率也不相同 ($R_{TE} > R_{TM}$),TE 模的损耗小于 TM 模,相当于 TE 模的增益大于 TM 模的增益。

半导体光放大器偏振敏感度 ΔG 的定义为 TE 模增益的最大值与 TM 模增益的最小值的比值^[10]:

$$\Delta G = G_{\max}^{TE} / G_{\min}^{TM} = [(1 + \sqrt{R_1 R_2 G_s^{TM}})^2 / (1 - \sqrt{R_1 R_2 G_s^{TE}})^2] \exp [(\Gamma_{TE} - \Gamma_{TM}) g L] \quad (5)$$

式中, R_1, R_2 为两端面剩余反射率; G_s^{TE}, G_s^{TM} 分别为 TE 模、TM 模的单程信号增益; Γ_{TE}, Γ_{TM} 分别为 TE 模、TM 模的光场限制因子; g 为材料的增益系数; L 为半导体光放大器有源区长度。从 (5) 式可以看出,减少端面剩余反射率和减少 TE 模、TM 模限制因子差 $\Gamma_{TE} - \Gamma_{TM}$ 可以降低偏振敏感度。减少端面反射率通常在端面镀高质量的增透膜并用倾斜条形结构或透明窗口结构相辅助,这在前面的增益特性里已描述。降低 TE 模、TM 模的限制因子差,可以通过提高有源层的厚度来增大 TM 模的限制因子 Γ_{TM} ,使有源层有对称的波导结构,在加工有源层时,把宽度减到 0.4 μm 以下,厚度 0.26 μm 左右,有源层截面有相当的各向同性,这样可以使偏振敏感度降到 1.5 dB 以下^[11]。但是,有源层变厚会影响半导体光放大器的可靠性并使饱和输出功率变低,同时会增大与光纤耦合时的耦合损耗^[12]。降低增益偏振敏感度的另一种方法是有源层采用应变量子阱结构^[10~19],国内的华中科技大学做了不少这方面的研究工作^[14,15]。他们采用张应变与压应变相结合的

混合应变量子阱结构的方法,混合应变量子阱从根本上改变增益介质的价带结构。张应变量子阱主要提供 TM 模增益,对 TE 模也有较少的一部分增益;压应变量子阱基本上只提供 TE 模增益。通过改变应变量子阱的应变量和层数就能使 TE 模、TM 模的增益趋于一致,达到降低偏振敏感度的目的。图 3 是采用了 4

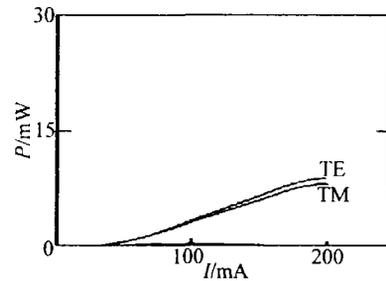


图 3 混和应变量子阱半导体光放大器 $P-I$ 曲线

个张变量子阱和 3 个压变量子阱并且两端面镀了增透的半导体光放大器的功率电流 ($P-I$) 曲线,可看出输出有两个模式: TE 模式和 TM 模式,它们的 $P-I$ 曲线都没有明显阈值,是一种超辐射输出而且模式的曲线非常接近。图 4 是这种放大器的增益电流曲线,从图中可以看出,TE 模和 TM 的增益在很大的电流范围内接近一致^[15]。

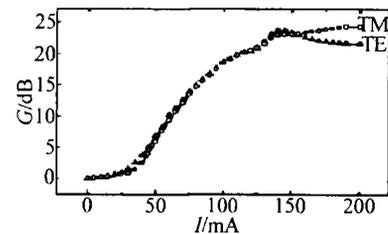


图 4 混和应变量子阱半导体光放大器增益与电流曲线

国外的研究工作中为了降低增益偏振敏感性采取了多种不同的量子阱结构,有低张应变量子阱结构^[16],张力势垒量子阱结构^[17],张应变和压力势垒量子阱结构^[18],张应变和压应变交替的混和应变量子阱结构^[19,20]等。近年来,提出一种三角形应力层量子阱结构^[12,21],是在量子阱中引入薄 GaAs 张力三角形应力层,通过这种方法偏振敏感度可以大大降低。增益偏振敏感度的大小受到三角形应力层数目和位置的影

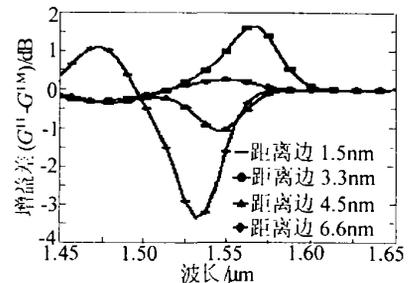


图 5 厚度为 5 单层的三角形应力层在距量子阱边沿不同位置处 TE 模与 TM 模增益差

响。图 5 显示的是一个厚度为 5 个单层三角形应力层在距离量子阱边沿不同距离处 TE 模与 TM 模的增益差^[22]。可以看出,在距离量子阱边沿 3.3nm 处,光放大器的偏振不敏感的性能最好。单层三角形应力层数目不同,偏振不敏感性能最佳的位置也不同。2004 年,WARTAK 和 WEETMAN 用 8 个三角形应力层并选取距离量子阱边沿适当的位置,做到使偏振敏感度降到 1dB 以下^[22]。

半导体光放大器的偏振敏感通常指增益偏振敏感,其实,在半导体光放大器中还存在着一种很少被提到的、近几年才被关注的偏振敏感叫相位偏振敏感^[23,24]。由于 SOA 固有的材料双折射效应和 TE 模、TM 模具有不同的传播常数使 TE 模和 TM 模的有效折射率不同,此外,TE 模、TM 模的有效折射率会随着有源区载流子浓度变化而有不同的改变。由于 TE 模、TM 模的有效折射率不同,导致 TE 模、TM 模在同样的几何光程下产生的物理光程不同,TE 模、TM 模相位变化不同,即 SOA 的相位对偏振敏感。入射光通过 SOA 后,偏振方向会发生旋转(SOTO 等人曾在实验中观察到随着输入光束功率从 0~300 μ W 变化时,偏振方向旋转了 73.5 $^\circ$ ^[25])。相位偏振敏感主要对超短光脉冲影响较大,导致超短光脉冲光谱展宽^[24]。由于相位偏振敏感是在近几年才被注意起来,比较优良的消除相位偏振敏感的方法还没有。一些国外研究多是利用半导体光放大器的这种相位偏振敏感现象做高速解复用和波长转换^[26]或者实现全光开关、全光异或门、全光同或门^[25]等。

4 结束语

介绍了半导体光放大器的增益特性和偏振特性。半导体光放大器的增益受到端面剩余反射率的制约,通过镀高质量的增透膜并辅以斜腔结构或透明窗口结构能大大降低端面反射率,提高半导体光放大器的增益。由于有源层波导结构的不对称性和端面对 TE 模、TM 模的反射率不同,半导体光放大器对输入光信号的偏振态敏感。通过减少端面剩余反射率、以及增加有源层厚度或采用应变量子阱或三角形应变层量子阱结构可以降低增益偏振敏感度,实现低偏振敏感半导体光放大器。此外,近几年才被注意起来的相位偏振敏感是由于半导体光放大器内部增益材料和不对称波导结构造成的固有双折射与载流子浓度变化引起的附加双折射共同造成的,利用相位偏振敏感特性可以做高速解复用和波长转换、全光开关、全光异或门、同或门等。

参 考 文 献

[1] 程振杰,余重秀.利用半导体光放大器(SOA)实现全光波长变换

- (WC) [J]. 激光技术, 2000, 24(3): 158~162.
- [2] 黄德修,刘雪峰. 半导体激光器及其应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 2001. 149~153.
- [3] 李士杰,张书练. 应用激光基础 [M]. 杭州:浙江大学出版社, 1994. 69~70.
- [4] BARNSELEY P E, ISAAC J I, ELTON D J. Ultra-low reflectivity broadband 1.5 μ m GaInAsP semiconductor optical amplifiers [J]. Electron Lett, 1990, 26(12): 825~827.
- [5] ZAH C E, CANEAU C, SHOKOOHI F K *et al*. 3 μ m GaInAsP near-travelling-wave laser amplifiers made by combination of angled facets and antireflection coatings [J]. Electron Lett, 1988, 24(20): 1275~1276.
- [6] CHA J, KITAMURA M, HONMOTO H *et al*. 1.5 μ m band traveling-wave semiconductor optical amplifiers with window facet structure [J]. Electron Lett, 1989, 25(18): 1241~1242.
- [7] MORITO K, EKAWA M, WATANABE T *et al*. High-output-power polarization-insensitive semiconductor optical amplifier [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2003, 21(1): 176~181.
- [8] OLSSON N A. Polarization-independent configuration optical amplifier [J]. Electron Lett, 1988, 24(17): 1075~1076.
- [9] 刘雪峰,孙军强,刘德明 *et al*. 行波半导体光放大器的偏振特性研究 [J]. 光学学报, 1995, 15(10): 1306~1310.
- [10] NEWKRK M A, MILLER B I, KOREN U *et al*. 1.5 μ m multi-quantum-well semiconductor optical amplifier with tensile and compressively strained wells for polarization independent gain [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1993, 5(4): 406~408.
- [11] DOUSSIER P, GARABEDIAN P, GRAVER C *et al*. 1.55 μ m polarization-independent semiconductor optical amplifier with 25dB fiber to fiber gain [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1994, 6(2): 170~172.
- [12] CHO Y S, CHO I W Y. Analysis and optimization of polarization-insensitive semiconductor optical amplifiers with delta-strained quantum wells [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(4): 574~579.
- [13] MATHUR A, DAPKUS P D. 1.55 μ m dual-polarization lasers implemented with compressive and tensile-strained quantum wells [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7(11): 1243~1245.
- [14] 段子刚,张哲民,刘德明 *et al*. 低偏振灵敏度半导体光放大器 [J]. 中国激光, 2000, 27(3): 203~205.
- [15] 刘德明,徐文超,黄德修. 低偏振相关的半导体光放大器 [J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(10): 1~3.
- [16] ITO T, YOSHIMOTO N, MAGARI K *et al*. Wide-band polarization-independent tensile-strained InGaAs MQW-SOA gate [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(5): 657~659.
- [17] MAGARI K, OKAMOTO M, NOGUCHI Y. 1.55 μ m polarization insensitive high-gain tensile-strained-barrier MQW optical amplifier [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1991, 3(11): 998~1000.
- [18] GODEFROY A, Le CORRE A, CLEROT F. 1.55 μ m polarization-insensitive optical amplifier with strain-balanced superlattice active layer [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7(5): 473~475.
- [19] TIEMEIJER L F, THIJSS P J A, Van DONGEN T *et al*. Polarization insensitive multiple quantum well laser amplifiers for the 1300 nm window [J]. A P L, 1993, 62(8): 826~828.
- [20] TISHNIN D, UPPAL K, KIM I *et al*. 1.3 μ m polarization insensitive amplifiers with integrated mode transformers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(10): 1337~1339.
- [21] Di CARLO A, REALE A, TOCCA L *et al*. Polarization-independent delta-strained semiconductor optical amplifiers: a tight-binding study [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(9): 1730~1739.
- [22] WARTAK M S, WEETMAN P. The effect of thickness of delta-strained layers in the design of polarization-insensitive semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(4): 996~998.

(下转第 483 页)

3 从圆孔衍射图样到椭圆衍射图样

圆孔衍射图样与椭圆衍射图样之间有着很强的联系^[14]。

对于圆孔 H_1 : $x^2 + y^2 = a^2$ (6)
其衍射光强分布:

$$U_1(P) = c \iint_{H_1} \exp[-ik(p_1x + q_1y)] dx dy \quad (7)$$

$$U_1(P) = c \int_{-a}^a \int_{-\sqrt{a^2-y^2}}^{\sqrt{a^2-y^2}} \exp[-ik(p_1x + q_1y)] dx \quad (8)$$

对于椭圆孔 H_2 : $\frac{x^2}{(ha)^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1$ (9)

可以写为: $(x/h)^2 + y^2 = a^2$ (10)

其衍射光强分布:

$$U_2(P) = c \iint_{H_2} \exp[-ik(p_1x + q_1y)] dx dy \quad (11)$$

其中令: $x' = x/h, y' = y$ (12)

代入 (11) 式得:

$$U_2(P) = c \iint_{H_1} \exp[-ik(p_1hx' + q_1y')] h dx' dy' \quad (13)$$

$$U_2(P) =$$

$$ch \int_{-a}^a \int_{-\sqrt{a^2-y'^2}}^{\sqrt{a^2-y'^2}} \exp[-ik(p_1hx' + q_1y')] dx' \quad (14)$$

比较 (8) 式与 (14) 式可知, H_2 的衍射图样的光强分布在 ξ 轴方向上与 H_1 的分布按尺度 $1/h$ 缩放; 同时 H_2 各点的光强是 H_1 上各点的 h^2 倍。可以看出, 这一结果与第 2 节中图形的递推结果是一致的。

选择 $h=2$ 的孔径, 由 (14) 式计算其光强, 通过数值仿真得到的图形显示结果与图 1 完全一致, 说明两种情况下得到的结论是相同的。

因此, 对于任意的类椭圆的微粒的衍射图样, 可以在其上任意取一等高线, 由计算机图像处理, 求得其形态因子^[15]。由上述结论可知衍射图像的缩放对应着微粒的缩放, 很容易反演得到微粒的形体因子, 以得到微粒的两维形貌。

4 结论

对椭圆的夫琅和费衍射作了详细的讨论, 通过应

用 MATLAB 软件进行模拟, 得到了精确的衍射光谱。指出使用椭圆衍射方程, 只需改变椭圆形体因子的大小, 即可比较真实的模拟多种形态的微粒。比单一的使用球模型更具有优越性, 能得到更精确的测量结果, 对提高激光微粒粒度分析的精度, 扩展其应用领域具有重要的实用价值, 且从衍射光谱反演得到了微粒的形态因子, 使得椭圆模型可以很好地被应用于微粒或生物细胞的形态学的研究中。

参考文献

- [1] 刘子超, 赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1988. 161~165.
- [2] LOCK J A, TODGES J T. Far-field scattering of axis-symmetric laser beam of arbitrary profile by an on-axis spherical particles [J]. Appl Opt, 1996, 35 (21): 4283~4290.
- [3] GOUESBET G. Scattering of higher-order Gaussian beams of an infinite cylinder [J]. J Opt, 1997, 28 (1): 45~65.
- [4] JMBO G, TSUBAKI J, YAMATO H. The comparison of measuring result of Particle sizes [J]. Powder Technol, 1991, 74 (2): 130~134.
- [5] ADLER C L, LOCK J A, STONE B R. Rainbow scattering by a cylinder with a nearly elliptical cross-section [J]. Appl Opt, 1998, 37 (9): 1540~1550.
- [6] HOLLAND A C, GAGNE G. The scattering of polarized light by polydisperse systems of irregular particles [J]. Appl Opt, 1970, 9 (5): 1113~1121.
- [7] V DEEN G, PNNICK R G, NGO D *et al*. Asymmetry parameter and aggregate particle [J]. Appl Opt, 1998, 37 (6): 1104~1109.
- [8] HRST E, DA YE P H, GUPPY J R. Light scattering from nonspherical airborne particles: experimental and theoretical comparisons [J]. Appl Opt, 1994, 33 (30): 7180~7186.
- [9] 任中京, 王少清. 用于激光颗粒测试技术的非球形颗粒的椭圆衍射模型 [J]. 中国激光, 1997, 24 (2): 127~132.
- [10] BATON J P. Electromagnetic field calculations for a sphere illuminated by a higher-order Gaussian beam II Far-field scattering [J]. Appl Opt, 1998, 37 (15): 3339~3344.
- [11] TSANG L, DING K H, SHIN S E *et al*. Scattering of electromagnetic waves from dense distributions of spherical particles based on Monte Carlo simulations [J]. J O S A, 1998, A15 (10): 2660~2669.
- [12] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. New York: Pergamon Press, 1975. 381~450.
- [13] 王亚伟, 贺安之, 刘晓然. 任意形体微粒分布的概率表述及测量方法 [J]. 光学学报, 2002, 22 (3): 363~367.
- [14] 程路. 光学——原理及发展 [M]. 北京: 科学出版社, 1990. 143~145.
- [15] 王亚伟, 韩广才. 微粒形体分布函数的光学图像确定方法 [J]. 光电子·激光, 2003, 14 (9): 999~1001.

(上接第 465 页)

- [23] SOTO H, ERASME D, GUEKOS G. Cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11 (8): 970~972.
- [24] MANNING R J, ANTONIOPOULOS A, ROUX L R *et al*. Experimental measurement of nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers [J]. Electron Lett, 2001, 37 (4): 229~231.

- [25] SOTO H, ALVAREZ E, DIAZCA *et al*. Design of an all-optical NOT XOR gate based on cross-polarization modulation in a semiconductor optical amplifier [J]. Opt Commun, 2004, 237: 121~131.
- [26] STEPHENS M F C, ASGHAR IM, PENTY R V *et al*. Demonstration of ultrafast all-optical wavelength conversion utilizing birefringence in semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9 (4): 449~451.