

文章编号: 0253-2239(2006)12-1787-5

光纤型热光可调光衰减器的设计及其衰减分析*

黄旭光¹ 叶晓靖^{2*} 张小康² 冯金垣² 罗 坚²

(¹ 华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广州 510630)
(² 华南理工大学物理科学与技术学院, 广州 510640)

摘要: 提出了一种基于热光调节的可调光衰减器结构。该衰减器通过腐蚀光纤包层到一定厚度和长度后,在表面涂覆较大热光系数的聚合物材料得到。从模场变化角度分析了传输光束的衰减与涂覆材料折射率的关系,并从实验上测试了使用不同涂覆材料时的衰减。理论分析与实验结果均表明在涂覆材料折射率略大于原光纤包层材料折射率时,涂覆材料折射率微小的变化将引起传播光束衰减的大幅度变化,并且光纤被腐蚀的长度越长或包层材料剩余厚度越小,衰减越大。因此,由热光系数大、折射率略大于光纤包层的聚合物材料所组成的可调光纤衰减器,具有衰减调节范围大且功耗小、插入损耗小、成本低、低偏振特性、易于与其它光纤器件耦合或集成等特点。

关键词: 光纤通信; 可调光衰减器; 热光效应; 聚合物; 光波导器件

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Design and Attenuation Analysis for Fiber-Typed Variable Optical Attenuator Based on Thermo-Optic Effect

Huang Xuguang¹ Ye Xiaojing² Zhang Xiaokang² Feng Jingyuan² Luo Jian²

(¹ Laboratory of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou 510630)
(² School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: A fiber-type variable optical attenuator (VOA) based on thermo-optic effect is proposed. The VOA is fabricated by etching down a certain depth and length of the cladding of optical fiber and covering with polymer with large thermo-optic coefficient. The relationship of the attenuation and the refractive index of the substitute is theoretically analyzed in terms of the mode field distribution (MFD) of the fiber. The attenuation of the VOA is measured in different substitutes of cladding. It is shown theoretically and experimentally that the attenuation varies significantly when the refractive index of the substitute has a little change, as long as the refractive index is slightly larger than that of the cladding. Moreover, the longer the etched fiber or the thinner the cladding is, the larger the attenuation of the VOA is. Therefore, this fiber-type VOA, which is substituted by a polymer with large thermo-optic coefficient and refractive index slightly higher than that of the cladding, is of large dynamic range, low insertion loss, low polarization-dependent loss, low power consumption and easily coupled or integrated with other fiber-optic components.

Key words: optical fiber communication; variable optical attenuator; thermo-optic effect; polymer; optical waveguide component

1 引 言

可调光衰减器(VOA)的用途是降低或控制光信号,按其工作原理大致可分为以下几类:机械型分立式微光学衰减器^[1]、液晶型可调光衰减器^[2]、光纤

可调光衰减器^[3~5]、微机电系统(MEMS)光衰减器^[6,7]和平面波导型光衰减器^[8,9]等。其中,光纤可调光衰减器具有结构简单、插入损耗小、成本低、可直接与光纤或作为尾纤与其它波导器件对接等突出

* 广东省自然科学基金(04010398)资助课题。

作者简介: 黄旭光(1962~),男,华南师范大学信息光电子科技学院教授,理学博士,美国迈阿密大学和 Rensselaer 工学院(RPI)博士后,主要从事微纳光子学、光通信和光传感方面的研究。E-mail: huangxg@scnu.edu.cn

** 通信联系人。E-mail: yexj@scut.edu.cn

收稿日期: 2006-01-10; 收到修改稿日期: 2006-05-26

的优点而具有广泛的应用前景,但有关光纤模场(热光)控制的可调光衰减器研究却很少。

光波导的光场分布主要是由折射率的空间分布和波导的几何结构所决定,因此改变光纤包层折射率,将改变光纤中光束的传输特性。据此本文提出一种结构简单的光纤型热光可调光衰减器的设计方案:通过腐蚀光纤包层,使包层剩余厚度少于一定值后,在其表面涂覆较大热光系数的聚合物材料得到。

2 工作原理

将单模光纤中某一段的包层腐蚀到一定厚度以后,在其外部涂覆上折射率热光可调的材料。当材料折射率受热光调节发生变化时,经过上述处理的光纤模场发生变化,从而引起模场失配甚至导模能量泄漏衰减。下面从模场变化的角度分析涂覆材料折射率与衰减的关系。

通常用高斯模型来近似描述单模光纤中光能量的分布。模场直径(MFD)定义为光能量降低到 $\exp(-2)$ 时的光斑直径,用符号 $2w_0$ 表示, r 为离开光轴的距离,则光纤截面上的光强 $I(r)$ 按下式分布:

$$I(r) = I(0) \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right).$$

如果在模场半径为 w_0 的光纤中插入一段模场半径为 w 的光纤,将共带来模场失配损耗 $A^{[10]}$:

$$A = -20 \lg \left[\left(\frac{2w_0 w}{w_0^2 + w^2} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

2.1 可调光衰减器的基本结构和可调原理

光纤模场可调衰减器的基本结构如图1所示:单模光纤纤芯直径为 a_1 ,折射率为 n_1 ;将单模光纤上一段长度为 Z 的包层腐蚀,其剩余厚度为 s ,称为内包层,折射率为 n_2 ;在内包层外涂覆上热光系数大的聚合物材料外包层,折射率为 n'_3 :

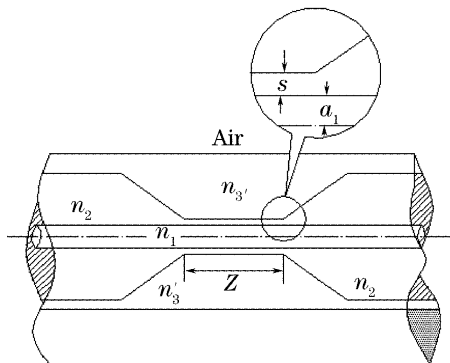


图1 可调光衰减器基本结构示意图

Fig. 1 Diagram of variable optical attenuator

$$n'_3 = n_3 + \Delta n,$$

n_3 为初始温度 t_0 时聚合物折射率, Δn 由材料热光系数 $\partial n/\partial T$ 和温度变化范围 ΔT 决定:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T.$$

调节涂覆材料温度,将使其折射率变化,光纤模场 w 也产生相应变化,从而可实现传输光束的衰减调节。

2.2 可调光衰减器的模场变化分析

下面将使用双包层光纤模型(DCM)对模场变化情况进行分析。

令 $\Delta_1 = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$, $\Delta_2 = \frac{n_1^2 - (n'_3)^2}{2n_1^2}$, 光纤径向折射率分布为

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2, & r < a_1 \\ n_1^2(1 - 2\Delta_1), & (a_1 + s) > r > a_1 \\ n_1^2(1 - 2\Delta_2), & r > (a_1 + s) \end{cases} \quad (3)$$

单模光纤的主要横场分量可以表示为^[10,11]

$$\varphi = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp(-j\beta z), \quad (4)$$

式中 β 为导模传播常量。通过变分运算, β 可表示为

$$\beta^2 = \frac{4k_0^2}{w^2} \int_0^\infty m^2(r) \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) dr - \frac{2}{w^2}, \quad (5)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数。由于 β^2 是一个稳定值,因而满足

$$d\beta^2/dw = 0,$$

对(5)式求导得

$$1 + 2k_0^2 \int_0^\infty r \left(\frac{2r^2}{w^2} - 1 \right) n^2(r) \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) dr = 0, \quad (6)$$

将(3)式代入(6)并化简后有

$$1 - 2n_1^2 k_0^2 \left\{ \Delta_1 a_1^2 \exp\left(-\frac{2a_1^2}{w^2}\right) - (\Delta_1 - \Delta_2)(a_1 + s)^2 \exp\left[-\frac{2(a_1 + s)^2}{w^2}\right] \right\} = 0, \quad (7)$$

当 $s = 0$ 时,是直接调制光纤包层折射率的情况。参考文献[11]中的结果为

$$1 - 2n_1^2 \Delta_2 k_0^2 a_1^2 \exp\left(-\frac{2a_1^2}{w^2}\right) = 0, \quad (8)$$

(8)式的数值计算结果与(7)式中 $s = 0$ 的结果一致。因为 $s \rightarrow 0$ 时,有 $\Delta_1 \approx \Delta_2$,由(7)可推导出(8)式。

当 s 较大时,涂覆材料对光纤内光能分布的影响可忽略不计,此时 w 值与普通单模阶跃型光纤

相当。

使用数值解法求解(7)式得到 ω 后,代入(1)式可得到相应的衰减量,各参量取为 $a_1 = 4.1 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 4.6 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.4675$, $\Delta_1 = 0.36\%$ 。计算结果表明:当涂覆材料折射率改变时,求解得到的 ω 值和衰减值也相应改变。当 s 分别取 $0, 1 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}$ 和 $4 \mu\text{m}$ 时,不同涂覆材料折射率时的衰减如图2所示。从图中可看出,在涂覆材料折射率与包层折射率的关系为 $n_3 < n_2$ 时,同一曲线上的衰减值变化很小,不同 s 的曲线之间的衰减差别也不大;当 $n_3 = n_2$ 时,无论 s 的取值范围如何,衰减均为最小;当 $n_3 > n_2$ 后,随着 n_3 的小范围变化衰减迅速增加。

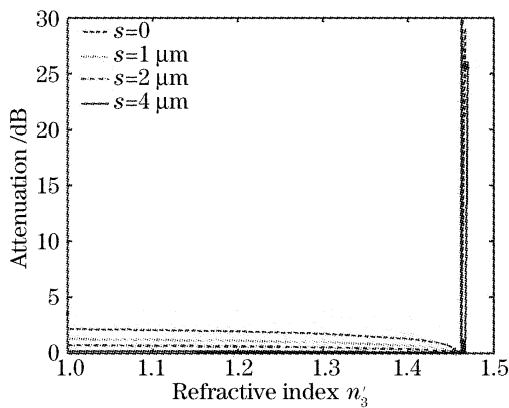


图2 s 和 n'_3 值改变时对(7)式和(1)式计算衰减 A 的结果
Fig. 2 Attenuation calculated from formula (7) and (1) with different values of s and n'_3

还计算了 $s < 0.1 \mu\text{m}$ 和 $s > 4 \mu\text{m}$ 时的损耗。前一种情况与 $s = 0$ 时的结果接近,相当于 $(a_1 + s) < \omega_0$ 时, s 厚度可以不计;当 $s > 4 \mu\text{m}$,涂覆材料折射率取不同数值时,损耗均很小,可以认为 $s > 4 \mu\text{m}$ 后,涂覆材料对光纤中的光场没有影响。

3 实 验

使用不同折射率的涂覆材料模拟涂覆单一热光可调材料并在折射率变化范围很大的情况下,从实验上分析了涂覆材料折射率与衰减的关系。

实验采用 Corning SMF-28 光纤,已知其纤芯直径 $2a_1$ 为 $8.3 \mu\text{m}$, $\lambda = 1310 \text{ nm}$ 时模场直径 $2\omega_0$ 为 $9.2 \mu\text{m}$,折射率为 1.4675 。为去掉光纤包层,先将光纤的外涂覆层去掉,然后放入氢氟酸,氟化氨,去离子水为混合(氢氟酸 30 ml ,氟化氨 60 g ,去离子水 100 ml)的腐蚀液中浸泡约 3 h 。经测量,该批光纤被腐蚀段长度平均为 $Z = 14.165 \text{ mm}$;平均直径为 $2(a_1 + s) = 14.25 \mu\text{m}$,即 s 取值为 $2.975 \mu\text{m}$ 。通过显微镜拍摄的腐蚀后光纤形貌如图3所示。图中可

见光纤外涂覆层和经过腐蚀的包层。包层所呈现的锥形区域反映腐蚀程度随时间的关系。

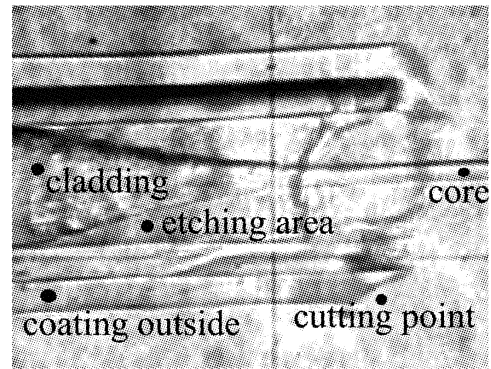


图3 被腐蚀后的光纤照片

Fig. 3 Picture of an etched fiber

在被腐蚀段处涂覆不同折射率的材料,测量了在 1310 nm 波长上的光纤衰减量。为方便测量,将光纤两端制成尾纤。对衰减量的计算为每种涂覆材料各取5根样品的测量数据求平均值,并以相同长度 Corning SMF-28 光纤跳线衰减量为比较基准,记下衰减量如表1所示。表中材料的折射率是根据柯西色散公式^[12]计算得到,其中 H-3081、H-3270 为有机硅产品牌号。有关参量选取为: $s = 2.975 \mu\text{m}$, $a_1 = 4.1 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 4.6 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.4675$, $\Delta_1 = 0.36\%$, n_3 取值从 1.0000 到 1.4700 。

为便于与理论计算结果进行比较,根据表1的数据绘出了衰减曲线,如图4中带星号的点线;图中的实线是根据(7)式和(1)式的理论计算结果;虚线是考虑包层与涂覆材料分界面的粗糙度、纤芯-包层同心度误差后,对理论结果进行修正后的拟合曲线。从图中看出,实验结果与数值计算结果的趋向相吻合。同样,在 $n_3 > n_2$ 后,随着 n_3 的小范围变化衰减迅速增加。

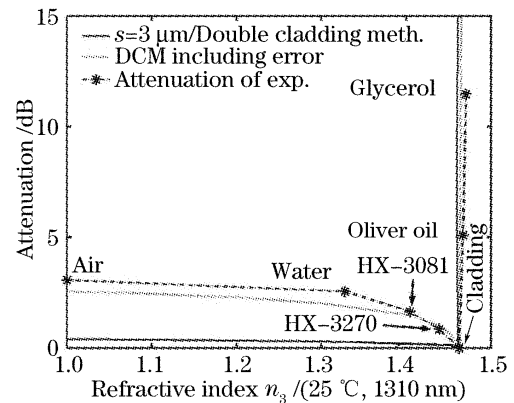


图4 $s = 2.975 \mu\text{m}$ 时,理论计算和实际测得不同涂覆材料下的衰减比较

Fig. 4 Attenuation comparison between theoretical calculations and experimental results at $s = 2.975 \mu\text{m}$

表 1 采用不同涂覆材料时实测的衰减

Table 1 Values of attenuation measured with different surrounded materials

Materials	Refractive index 25 °C, 1310 nm	Measuring attenuation /dB
Fiber cladding	1.4622	0
Air	1.0000	3.061
Water	1.3274	2.550
H-3081	1.4044	1.620
H-3270	1.4383	0.840
Oliver oil	1.4667	5.088
Glycerol	1.4702	11.460

此外,理论与实验表明,增大涂覆材料的轴向长度 L ,可进一步增大可调光衰减器的衰减动态范围。图 5 为实验测得的轴向涂覆长度改变时对光衰减器衰减量的影响,其涂覆材料为甘油(折射率为 1.4702,室温 25 °C)。图中显示出衰减量几乎随光纤的腐蚀长度线性增加。如果用光纤熔接机将两个 $s=2.975 \mu\text{m}$, $Z=14 \text{ mm}$ 的光衰减器串连,总衰减量还可超过 23 dB。这说明,在 $n_3 \approx n_1$ 时,即弱导情况,辐射模被激发。尤其当 $n_3 \geq n_1$ 时,衰减主要来源于辐射模的贡献,假设导模的功率衰减系数为 2α ,经过 z 的传输距离后,导模的功率 $P(z)$ 为

$$P(z) = P(0)\exp(-2\alpha z),$$

由于辐射模衰减系数与长度有关,所以总衰减量也与 z 有关:

$$A \approx -10\lg\left[\frac{P(z)}{P(0)}\right] \propto \alpha z, \quad (9)$$

因此,从模场变化的角度对衰减进行的理论分析只能近似成立,在 $n_3 > n_2$ 后,应加以修正,即应加上辐射模对总衰减量的贡献。因此如图 5 所示,衰减与轴向涂覆长度有关。

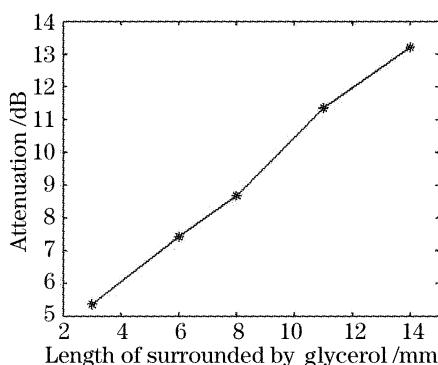
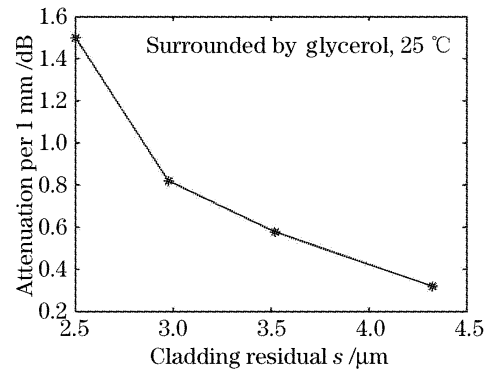


图 5 涂覆材料为甘油时不同腐蚀长度下的衰减

Fig. 5 Attenuation at different lengths of etched fiber surrounded by glycerol

我们还从实验上研究了光纤内包层厚度 s 对衰减的影响。图 6 为腐蚀程度不同时,每 1 mm 材料

涂覆长度带来的衰减, s 取值为:测量得到的经过腐蚀后的光纤直径减去纤芯直径 $2a_1$ 后除以 2,仍然使用甘油作为涂覆材料。从图中看到, s 值越小,衰减越大,因此,在 $n_3 > n_2$ 的条件下,减小 s 能大大增加可调光衰减器的衰减动态范围。

图 6 涂覆材料为甘油、1 mm 长度、不同 s 值的衰减Fig. 6 Attenuations at different value of s in 1 mm etched fiber surrounded by glycerol

最后,用美国道康宁(DowCorning)公司 OE-4110 作为涂覆材料,其折射率在室温下略大于光纤包层的折射率,从而在实验上实现了 0~25 dB 衰减连续可调的光可调衰减器。相关的工作,将另文进行介绍。

4 结 论

提出了一种光纤型热光可调光衰减器的结构,理论计算和实验均表明,当涂覆材料折射率略大于光纤包层折射率时,衰减幅度变化很大。利用该区域的衰减变化规律,小范围的涂覆材料折射率变化就可以实现大幅度的衰减调节。而且随着轴向涂覆长度越长,衰减越大;包层腐蚀程度越高,衰减越大。

利用本研究结果设计的光纤热光可调光衰减器具有衰减调节范围大且功耗小、插入损耗小、制作成本低、无偏振特性、便于与光纤和光纤器件耦合等优点,非常适合用于光通信网络。此外,本设计可推广应用于平面波导型可调衰减器的研制——使用具有良好的环境稳定性、与二氧化硅良好的亲核性、大的热光系数等优点的聚合物材料^[13,14]作为平面波导光可调衰减器的涂覆层,进而可实现平面波导光可调衰减器与其它平面光波导器件的单芯片集成。

参 考 文 献

- Xie Xiaoqiang, Dai Xuhan, Zhao Xiaolin *et al.*. Research on an offset-type micro mechanical variable optical attenuator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 717~718 (in Chinese)
- 谢晓强,戴旭涵,赵小林等. 位错型微机械可变光衰减器的研究

- [J]. 光学学报, 2005, **25**(5): 717~718
- 2 P. Jingjiong. Fiberoptic liquid crystal on-off switch and variable attenuator[P]. United States Patent; 2001:6181846
- 3 V. Morozov, H. Fan, L. Eldada *et al.*. Fused fiber optic variable attenuator [C]. *OFC' 2000*, 2000, **25** (Supplment): 22~24
- 4 Q. Li, A. A. Au, C. H. Lin *et al.*. An efficient all-fiber variable optical attenuator via acoustooptic mode coupling [J]. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 2002, **14**(11): 1563~1565
- 5 J. E. Ford, J. A. Walker, D. S. Greywall *et al.*. Micromechanical fiber-optic attenuator with $3\mu\text{s}$ response [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9): 1663~1670
- 6 R. R. A. Syms, H. Zou, J. Stagg *et al.*. Multistate latching MEMS variable optical attenuator [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 191~193
- 7 Yuan Ye, Zou Yongzhuo, Bao Junfeng *et al.*. A novel variable optical attenuator based on micro- electromechanical system (MEMS) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 364~368 (in Chinese)
袁野, 邹勇卓, 鲍俊峰等. 一种新型微机电系统可调光衰减器 [J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 364~368
- 8 Y. O. Noh, C. H. Lee, J. M. Kim *et al.*. Polymer waveguide variable optical attenuator and its reliability [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **242**(4~6): 533~540
- 9 Y. Y. Kim, S. S. Yun, C. S. Park *et al.*. Refractive variable optical attenuator fabricated by silicon deep reactive ion etching [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 485~487
- 10 Zhou Shutong. *Fiber Theory and Measurement* [M]. Shanghai: Fudan university Press, 1988; 54~61 (in Chinese)
周树同. 光纤理论与测量 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1988. 54~61
- 11 Yan Fengping, Zhang Liangzhong, Shan Ying *et al.*. Numerical analysis of the mode filed radius for the square law and step index fiber [J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(1): 66~67 (in Chinese)
延凤平, 张良忠, 单英等. 基于平方律和阶跃型纤芯折射率分布下光纤模场半径的数值分析 [J]. 光学技术, 2000, **26**(1): 66~67
- 12 J. Rheims, J. Köser, T. Wriedt. Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(6): 601~605
- 13 Ye Xiaojing, Zhang Xiaokang. Study of silicone wave-guide techniques [J]. *Optical Communication Technology*, 2004, **28**(123): 31~32 (in Chinese)
叶晓靖, 张小康. 有机硅介质光波导技术研究 [J]. 光通信技术, 2004, **28**(123): 31~32
- 14 Zhang Xiaokang, Liao Changjun, Liu Peiqiang *et al.*. Test and analysis for thermo-optic effect of silicon resin [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 629~632 (in Chinese)
张小康, 廖常俊, 刘沛强等. 硅树脂材料热光特性的测试与分析 [J]. 光学学报, 2005, **25**(5): 629~632

更 正

《光学学报》2006年26卷第9期第1326页。图2图题应为 C_6v 对称的光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的光谱及布拉格波长随光纤结构参量的变化情况。(a)反射谱与透射谱,(b) λ_B 随空气孔数量而增大,(c) λ_B 随 f 而减小,(d) λ_B 随空气孔间距而增大。

《光学学报》2006年26卷第10期第1557~1558页。参考文献[4~7]应为:

- 4 Xue Ting, Yu Jian, Yang Tianxin *et al.*. Tunability and tolerance of optical parametric oscillator in periodically poled lithium niobate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(11): 2528~2535 (in Chinese)
薛挺, 于建, 杨天新等. 周期极化铌酸锂晶体光参量振荡调谐与容差特性分析 [J]. 物理学报, 2002, **51**(11): 2528~2535
- 5 Xue Ting, Yu Jian, Yang Tianxin *et al.*. Numerical analysis and optimization of quasi-phase-matched second-harmonic-generation in LiNbO_3 waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(3): 565~572 (in Chinese)
薛挺, 于建, 杨天新等. 准位相匹配铌酸锂波导倍频特性分析与优化设计 [J]. 物理学报, 2002, **51**(3): 565~572
- 6 Yu Jian, Xue Ying, Yang Tianxin *et al.*. Fan-out grating quasi-phase-matched second-harmonic-generation in LiNbO_3 waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 921~923 (in Chinese)
于建, 薛挺, 杨天新等. 准相位匹配扇形光栅铌酸锂光波导倍频绿光输出 [J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 921~923
- 7 Yu Jian, Ni Wenjun, Xue Ting *et al.*. Frequency doubled CW green light generation in periodically poled KTiOPO_4 crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 793~795 (in Chinese)
于建, 倪文俊, 薛挺等. 周期极化 KTiOPO_4 晶体连续倍频绿光输出 [J]. 光学学报, 2003, **23**(7): 793~795

《光学学报》2006年26卷第10期第1585页。中文摘要第4行。46.1 mrad 应为 0.80 mrad, 81.4 mrad 应为 1.42 mrad。第1586页, 第3节第1段第3,4行。46.1 mrad 应为 0.80 mrad, 50.8 mrad 应为 0.88 mrad, 81.4 mrad 应为 1.42 mrad, 103.9 mrad 应为 1.81 mrad。