

· 光电器件与材料 ·

用于紫外倍频的CLBO晶体最佳切割方式研究

李 修¹, 陈秀艳², 李路海¹

(1. 北京印刷学院, 北京市印刷电子工程技术研究中心印刷与包装工程学院, 北京 102600;

2. 沈阳师范大学物理科学与技术学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘 要: 研究了不同切割方式下CLBO晶体四倍频光反射损失情况, 同时给出了激光倍频晶体实现减反射的优化布儒斯特角切割方法。对于非线性晶体来说, 适用于激光晶体的布儒斯特角切割方法已经不能达到减反射的目的, 这是由于光通过激光晶体后没有新频率产生, 不改变光的偏振状态, 而经过非线性晶体后却有新频率的激光产生, 而这种新产生频率的振动状态与入射光的振动状态总不相同, 这是由相位匹配条件和偏振匹配条件共同决定的, 因而以布儒斯特角将两通光面平行切割的方法不再适合于此类晶体中。通过分析还得出, 采取两通光面以互相垂直的布儒斯特角切割晶体, 可以达到对紫外光减反射的目的。

关键词: 紫外倍频; 切割方式; 偏振匹配; 减反射; o光; e光; 布儒斯特角

中图分类号: O432.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-04-0030-04

Research on Optimal Cutting Method of CLBO Crystal for UV Frequency Multiplication

LI Xiu¹, CHEN Xiu-yan², LI Lu-hai¹

(1. Beijing Printing Electronics Engineering Technology Research Center, College of Printing and Packaging, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China; 2. College of physics science and technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: Losses of light reflection of cesium lithium borate (CLBO) crystal with four frequency multiplication at different cutting modes is researched. Optimal Bruset cutting method of antireflection implemented by laser multiplication frequency crystal is given. For nonlinear crystal, antireflection effect can not be got by the method which is suitable to laser crystal. The reason is that new frequency is not produced when light pass through the laser crystal and polarization states of the light are not changed. But new frequency is produced when light pass through nonlinear crystal. The vibration states of new frequency are always different from those of incident light. It is determined by matching conditions of phase and polarization together. So the method of two pass light surface cutting in parallel at Bruset angle is not suitable to the crystal any more. By analysis, if the crystal is cut by two pass light surface at Bruset angle perpendicular each other, UV light antireflection effect can be got.

Key words: UV frequency multiplication; cutting mode; polarization matching; antireflection; o light; e light; Bruset angle

CLBO晶体以其允许角大、走离角小、容易生产出大尺寸晶体等特点而在产生高功率266 nm紫外激光中具有显著优势^[1-5]。但是, 由于CLBO晶体的潮解特性使其在实际中通常采取特殊方式减少晶体两

通光端面反射损失。

当一束光通过一个光学器件时, 有两种方法可以减少其在表面上的反射损失, 一种是在通光面镀上相应波长的增透膜; 另一种方法是按布儒斯特角

收稿日期: 2013-05-12

基金项目: 北京市科技计划(Z121103003112083)项目资助

作者简介: 李修(1981-), 女, 天津人, 博士, 讲师, 主要研究方向为全固态激光器及印刷电子。

平行切割光学器件的两个通光面^[6-8]。若采用前一种方式,在CLBO两个通光端面镀上增透膜,由于晶体长期置于100℃以上的高温环境中,要求所镀的膜系能在高温环境下工作,而目前的镀膜工艺达不到这样的要求,这样就使膜层极容易脱落^[9-12]。而端面若不镀膜则势必会加大通过晶体的激光的损耗,影响输出功率。后一种方法已经在光学器件制造上使用了许多年,效果相当不错。自从人们发明了激光,尤其是实现了激光的频率变换以后,上面提到的第二种方法也曾不断地被用于产生基频光的减反射。但是,以布儒斯特角切割(以下简称为布氏切割)的倍频晶体在倍频过程中实现减反射的能力对于整个紫外激光系统来说显得尤为重要。

文中研究了垂直切割与布氏切割两种情况下倍频光反射损失情况,同时给出了激光倍频器实现减反射的优化布氏切割方法。

1 理论分析与结果讨论

1.1 布儒斯特定律以及光学元件减反射切割方法

以往对于光学元件要达到减反射的目的,除了镀减反膜之外,另一种办法就是采用对两通光面以布儒斯特角平行切割的方式来达到要求,这种做法的依据也就是布儒斯特定律。

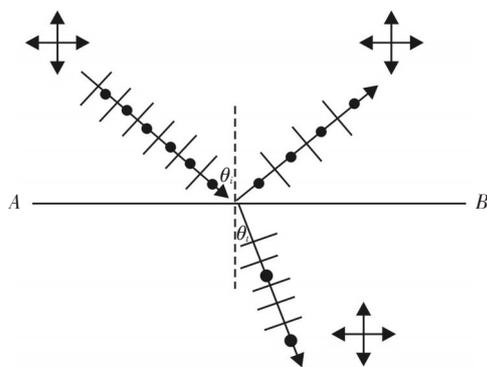


图1 光在介质表面反射与折射产生的偏振

如图1所示,当光波以一定角度传播到介质表面时,必然会发生反射和折射,并且反射光的主要振动方向一定与入射面垂直,折射光的主要振动方向在入射平面内。根据布儒斯特定律,当入射角 θ_i 与折射角 θ_t 之和等于 90° ,即反射光线与折射光线垂直时,反射光发生全偏振,得到垂直于入射面振动的线偏振

光,而且有 $\tan \theta_B = n$,此时的入射角 θ_B 即为布儒斯特角。通过采用将晶体两通光端面以布儒斯特角平行切割的方法,可以使入射光中振动方向平行于入射平面的光在介质表面不反射而是全部以折射的方式进入晶体,因此对于这种振动方式的光即相当于减小(或消除)了反射损耗。

1.2 CLBO晶体切割方式的分析

如上所述,采用将晶体两通光端面按布儒斯特角平行切割减少入射光损耗的办法在光学元件的制造中已经应用了很多年,而且效果非常好。激光出现以后,这种技术也广泛应用于晶体的切割中。但是这种方法作用于非线性晶体时,情况就有所不同。

由菲涅耳方程可以知道垂直于入射面的垂直振动分量反射率 R_s 和平行于入射面的平行振动分量反射率 R_p 分别为^[13]

$$R_s = \frac{I_{rs}}{I_{is}} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{I_{rp}}{I_{ip}} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (2)$$

由以上两式可以看到,由于入射角 θ_i 始终大于折射角 θ_t ,因此 R_s 总不为0,也就是说垂直于入射面的振动分量在界面上的反射是不可避免的;当 $\theta_i + \theta_t = 90^\circ$ 时, $\tan(\theta_i + \theta_t)$ 趋于无穷,相应的 R_p 趋于0,即此时平行于入射面的振动在界面上反射为0,此时的入射角 θ_i 即为布儒斯特角。按照这一角度切割减反射的效果相当不错,若加工精细,振动方向平行于入射面的光透过率可达100%。

这一方法用于如激光晶体等不产生频率变换的物质中效果很好,但对于非线性晶体来说则有很大差别。这种差别主要在于光通过普通光学元件射入Nd:YAG、石英等晶体后没有新频率产生,不改变光的偏振状态,经过非线性晶体后却有新频率的激光产生,而这种新产生的频率的振动状态与入射光的振动状态总不相同,这是由相位匹配条件和偏振匹配条件共同决定的,即非线性晶体既改变基频光的频率又改变其偏振状态。就产生266 nm紫外光的实验来说,CLBO为负单轴晶体,采用I类临界相位匹配的形式,它产生倍频光的方式是两个基频o光作用产生一个倍频e光,因此基频绿光的振动方向必然与倍频出来的紫外光的振动方向互相垂直,否则就不能实现相位匹配^[14]。若晶体的两通光面平行切割,如

图2所示,可以看到绿光若以平行于入射面的振动方向(平行短线代表的振动)以布儒斯特角入射到晶体中,在晶体中倍频产生的紫外光的振动方向就与其垂直(圆点所代表的振动),因此在界面处也要发生反射,由于出射面与入射面平行,对于绿光来说,它在界面处没有反射而全部折射到空气中,而紫外光的情况则有所不同,由于紫外光的振动方向垂直于出射平面,因此在界面处会有一部分紫外光反射、另一部分折射出晶体。若绿光严格按布儒斯特角入射,经计算可知会有大约14.77%的紫外光因反射而不能输出晶体,因此造成了比较大的损耗,降低了绿光-紫外的转换效率。

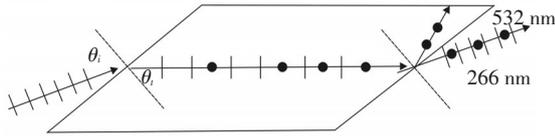


图2 绿光与紫外光在晶体出射面的反射与折射

现在比较一下两端面以布儒斯特角平行切割和端面垂直切割时的反射损失情况^[15]。如图3a和图3b所示,其中图3a表示垂直切割的情况, R_1 、 R_2 分别代表晶体对532 nm与266 nm光垂直通过时的反射率,可知 $R_1 = (\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1})^2$, $R_2 = (\frac{n_2 - 1}{n_2 + 1})^2$, n_1 、 n_2 分别为532 nm与266 nm光的折射率, η 代表532 nm到266 nm的倍频转换效率。由图3不难看出,由CLBO晶体出射的紫外光与入射绿光功率比分别为

$$r_1 = (1 - R_1)(1 - R_2)\eta \quad (3)$$

$$r_2 = (1 - R_s)\eta \quad (4)$$

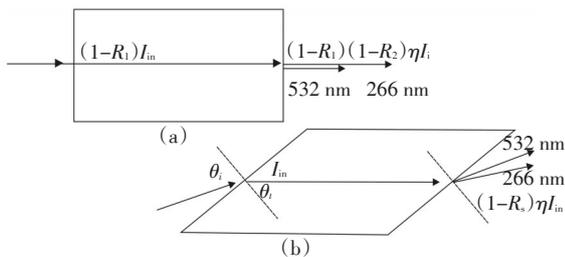


图3 不同切割方式下的反射损失情况

图4为CLBO晶体垂直切割与以布儒斯特角切割两种情况下出射的紫外光相对光强和转换效率之间的关系。不难看出,垂直切割情况下紫外光的输出总是大于以布儒斯特角切割的情况。因此这种切割方式只是增加基频绿光的透过率,对于紫外倍频光,

不但没有增加其透过率反而引入了更大的损耗。

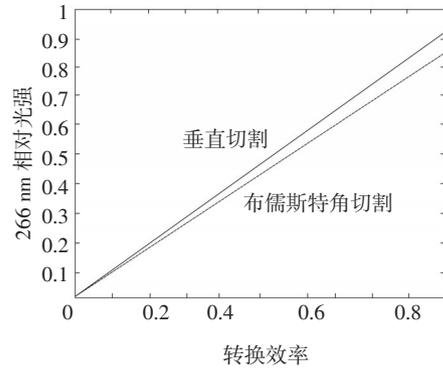


图4 端面不同切割方式下紫外输出与效率的关系

1.3 CLBO对紫外光减反射的切割方式分析

当然,采用以布儒斯特角切割的方式来减少反射损失对于非线性晶体来说也是可行的,只不过以布儒斯特角将两通光面平行切割的方法不再适合于非线性晶体。

对于负单轴晶体的I类临界相位匹配,条件是两个基频o光作用产生一个倍频e光,也就是基频光与倍频光的偏振方向互相垂直,如果两个通光端面以布儒斯特角平行切割,则绿光在出射面处不会有反射损失,但紫外光就会有百分之十几的反射损失,因此为了消除紫外光在晶体内的反射损失,两通光面就不能再按相互平行的方式切割,而是要以互相垂直的方式切割,如图5所示。这样切割的目的是要保证入射面AOB与出射面A'O'B'互相垂直,也就是切割后保证入射平面AOB垂直于主平面COO',而主平面COO'则平行于出射面A'O'B'。这样,若入射绿光的偏振方向平行于入射平面AOB,并以布儒斯特角入射,则会无损失地全部进入非线性晶体中,在晶体中由于它的偏振方向垂直于主平面COO',即为o光,因此倍频后产生的紫外光为e光,偏振方向垂直于绿光的振动而与主平面COO'平行,在出射面A'O'B'处,由于平面A'O'B'也与主平面COO'平行,因此紫外光可以无反射损失地全部折射出晶体外,这样的切割方式就能达到对紫外光的减反射的目的。

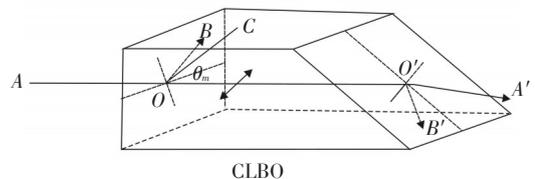


图5 对紫外光减反的CLBO切割方式示意图

2 结 论

由布儒斯特定律出发,分析了CLBO晶体的切割方式对四倍频效率的影响情况。通过理论计算得知,对于激光晶体适用的布氏切割方法不再适用于非线性晶体的情况,这是由于光通过激光晶体后没有新频率产生,不改变光的偏振状态,而经过非线性晶体后却有新频率的激光产生,而这种新产生的频率的振动状态与入射光的振动状态总不相同,这是由相位匹配条件和偏振匹配条件共同决定的,因而以布儒斯特角将两通光面平行切割的方法不再适合于此类晶体中。通过分析还得出,采取两通光面以互相垂直的布氏角切割晶体,可以达到对紫外光减反射的目的。

参考文献

- [1] YU Xue-song, HU Zhang-Gui. Flux growth of CsLiB₆O₁₀ crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2010, 312(16-17): 2415-2418.
- [2] CHEN Qu, MASASHI Yoshimura, JUN Tsunoda. Phase-matching properties at around 190 nm of various borate crystals[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(6): 062601-3.
- [3] VAISH Rahul, VARMA K B R. Electrical relaxation and transport in 0.5Cs(2)O-0.5Li(2)O-3B(2)O(3) glasses[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2011, 18(1): 155-161.
- [4] TAKAHIRO Kawamura, MASAHI Yoshimura, YOHEI Shimizu. Crystal growth of CsLiB₆O₁₀ in a dry atmosphere and from a stoichiometric melt composition[J]. Journal of Crystal Growth, 2010, 312(8): 1118-1121.
- [5] TAKAHIRO Kawamura, MASAHI Yoshimura, YOSHIYUKI Honda. Effect of water impurity in CsLiB₆O₁₀ crystals on bulk laser-induced damage threshold and transmittance in the ultraviolet region[J]. Applied Optics, 2009, 48(9): 1658-1662.
- [6] YU Xue-song, HU Zhang-gui. Growth and characterization of Al-doped CsLiB₆O₁₀ crystal[J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 318(1): 1171-1174.
- [7] KANEDA Yushi, YARBOROUGH J M, LI Li. Continuous-wave all-solid-state 244 nm deep-ultraviolet laser source by fourth-harmonic generation of an optically pumped semiconductor laser using CsLiB₆O₁₀ in an external resonator[J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1705-1707.
- [8] TAKACHIHO Kei, YOSHIMURA Masashi, FUKUSHIMA Yuji. Al doping of CsLiB₆O₁₀ for high resistance to ultraviolet-induced degradation[J]. Applied Physics Express, 2013, 6(2): 022701.
- [9] KUMAR R Arun. Borate crystals for nonlinear optical and laser applications: a review[J]. Journal of Chemistry, 2013: 1-6.
- [10] RYU Gihan, YOON Choon Sup, HAN Thomas P J, et al. Growth and characterisation of CsLiB₆O₁₀ (CLBO) crystals [J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 191(3): 492-500.
- [11] MIROV S B, FEDOROV V V, BOCZAR B, et al. All-solid-state laser system tunable in deep ultraviolet based on sum-frequency generation in CLBO[J]. Optics Communications, 2001, 198(4-6): 403-406.
- [12] 周城. 深紫外和频晶体CLBO产生193 nm激光的频率变换[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1489-1492.
- [13] 龙槐生, 张仲先, 谭恒英, 等. 光的偏振及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 19-21.
- [14] 俞文海, 刘皖育. 晶体物理学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1998: 175.
- [15] SHEN De-zhong, SHEN Guang-qiu, WANG Xiao-qing, et al. Laser doubler with nonparallel light pass surfaces cut in brewster angle[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2000, 29(2): 95-101.
- [16] 沈德忠, 沈光球, 王晓青, 等. 非平行通光面激光变频器[J]. 人工晶体学报, 2000, 29(2): 95-101.

(上接第17页)

- [9] 李林. 应用光学[M]. 4版. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 75.
- [10] 李林, 黄一帆, 王涌天. Applied Optics[M]. 北京: 北京理工

大学出版社, 2005: 102.

- [11] 胡玉禧, 安连生. 应用光学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006: 112.