

文章编号 1004-924X(2017)12-3041-07

深紫外倍频用 KBBF 晶体光栅耦合器设计

谭 鑫^{1*}, 张嘉航^{1,2}, 巴音贺希格¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要:分析了氟硼铍酸钾($\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$, KBBF)晶体的倍频特性,结合基波光栅耦合和 KBBF 晶体内全反射特性设计了新型 KBBF 晶体光栅耦合器。介绍了 KBBF 晶体光栅耦合器设计原理。在 KBBF 晶体表面制作光栅结构,使其衍射级次满足匹配角进而产生倍频光;结合在 KBBF 晶体内的全反射传输,增大光程,获得高的倍频转化效率。通过计算晶体匹配角、走离角、倍频系数等参数,获得合适的光栅匹配类型。优化设计匹配光栅参数,获得了槽型参数及较高的衍射效率;基于光栅衍射效率与倍频转化率的关系获得了 KBBF 晶体光栅耦合器的倍频转化率计算公式,并给出它们的适用范围。最后,基于 $5.2\text{ mm}\times 5.2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ KBBF 晶体研制了晶体光栅耦合器,该光栅耦合器能够实现深紫外波段倍频光的输出,总倍频转化效率达到了 16.86%

关键词:氟硼铍酸钾晶体;深紫外非线性光学晶体;激光晶体;转化率;晶体耦合器;深紫外激光
中图分类号:O734.1;TN244 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3041

Design of KBBF crystal grating coupler in deep ultraviolet band

TAN Xin^{1*}, ZHANG Jia-hang^{1,2}, BAYANHESHIGE¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: xintan_grating@163.com*

Abstract: The double frequency characteristics of $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ (KBBF) crystals were analyzed. A new KBBF crystal grating coupler was designed with combination of the base wave grating coupling and the total reflection properties of KBBF crystals. The design principle of KBBF crystal grating coupler was introduced. By etching diffraction grating on the surface of a KBBF crystal, the diffraction order matching with the grating was chosen to generate double frequency. The total reflection in the KBBF crystal was used to increase optical path to obtain higher frequency conversion efficiency. Then, appropriate matching types were put forward by calculating matching angle, walk-off angle, frequency factor and other parameters. And the matched grating parameters were optimized to calculate groove parameters and diffraction efficiency of grating. Moreover, grating coupler frequency conversion formulas were given and their applicable ranges were shown. Finally, crystal grating coupler based on a

收稿日期:2017-05-27;修订日期:2017-06-28.

基金项目:国家重大科研装备开发专项(No. 2011YQ120023);国家自然科学基金面上项目(61675197)

5.2 mm×5.2 mm×1 mm KBBF crystal was fabricated, and the results indicate that the grating coupler realizes double frequency outputs in deep ultraviolet waveband and its total frequency conversion efficiency reaches 16.86%.

Key words: KBBF crystal; deep ultraviolet nonlinear optical crystal; laser crystal; SHG conversion; coupling device; deep ultraviolet lasers

1 引言

全固态深紫外激光光源由于其体积小、寿命长、效率高、光束质量好等优点,在国防、工业、农业等领域具有巨大的应用前景,也是国内外科学界寻求突破的重要研究方向。随着 193 nm 光刻技术、微纳精密加工以及光电子能谱仪等多个方向的发展,下一代技术将需求更短波长的光源(约 150 nm),因此,对深紫外 200 nm 以下的相干光源的需求越来越大。

全固态深紫外激光光源的核心器件为用于产生高频光的倍频晶体。自 20 世纪 90 年代初开始研究深紫外非线性光学晶体-KBBF 晶体和激光技术,经过 20 多年的努力,我国在国际上首次生长出可直接倍频产生深紫外激光非线性光学晶体,并发明棱镜耦合技术,设计了一种 KBBF 棱镜耦合器(KBBF-PCT),各项测试结果表明这种棱镜耦合器的倍频转化效率为 10% 左右^[1-4];同时,率先开发出实用化的深紫外固态激光源,使中国成为当今世界上唯一掌握深紫外全固态激光技术的国家。然而,倍频转化效率低一直是困扰着高功率深紫外激光输出的“瓶颈”。目前,提高倍频转化效率的途径是增加 KBBF 晶体的生长尺寸,但在现有技术条件下,KBBF 晶体尺寸仅能达到 2~3 mm 厚,而此时的倍频转化效率约为 10%。制备的厚度较大的晶体,由于存在晶格缺陷等问题产生相应的倍频效果,无法用于深紫外波段激光的倍频输出。倍频转化效率与 KBBF 晶体厚度之间的矛盾严重制约了深紫外激光光源的发展^[5-6]。

本文提出了一种基于光栅耦合与全反射相结合的新型 KBBF 光栅耦合器设计方法,通过光栅耦合将基波光以一定的角度耦合进入 KBBF 晶体内,设计特定耦合角,使基波光在 KBBF 晶体内实现全反射,通过多次全反射增大基波光在晶体内的光程来实现倍频转化效率的提高。同时,

对 KBBF 晶体光栅、KBBF 晶体的光栅耦合特性进行了理论设计,证实了该 KBBF 光栅耦合器的可行性。

2 KBBF 晶体光栅耦合器设计原理

KBBF 晶体在深紫外激光的应用领域内仅存在 I 类相位匹配和 II 类相位匹配^[7]。具体选择哪类匹配方式与所要输出的倍频光波段、相位匹配角、走离角、允许角及允许波长、倍频系数等相关。其中,允许角和允许波长的意义在于给出产生倍频光输出时的允许误差,在入射角及入射波长在允许误差范围内改变时,仍旧能够产生既定波长的倍频光实现输出,且 I 类和 II 类相位匹配的允许角及允许波长对于输出倍频光波长理论上无影响^[8-9],因此这里不做讨论。

2.1 KBBF 晶体相位匹配角

KBBF 晶体相位匹配过程如下:通过调节入射光波矢与晶体光轴之间的夹角,改变非常光(e 光)折射率使之满足 $\Delta k=0$,实现角度相位匹配,从而得到倍频光输出。

相位匹配机制:在负单轴晶体中,有 $n_o > n_e$,相位匹配示意图如图 1 所示。

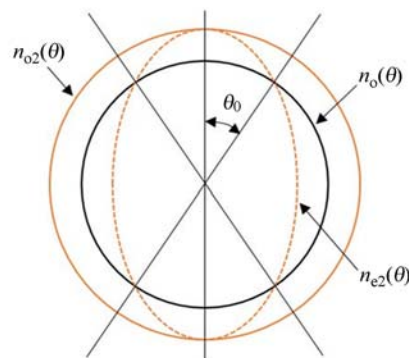


图 1 相位匹配机制示意图

Fig. 1 Sketch map of phase matching mechanism

当入射光与光轴夹角为 θ_0 时,基波的 o 光折射率与二次谐波的 e 光折射率相同,此时认为达

到 I 类相位匹配。并且式(1)成立时,会有二次谐波(倍频光)产生。

$$n_o(\theta) = n_{e2}(\theta). \quad (1)$$

当入射光与光轴夹角达到另一个特殊值,并且式(2)成立时,会有二次谐波(倍频光)产生。

$$n_o(\theta) + n_e(\theta) = 2n_{e2}(\theta). \quad (2)$$

在共线作用下,根据能量守恒方程和动量守恒方程,可计算得到负单轴 KBBF 晶体的 I 类、II 类倍频匹配角 θ 的计算公式分别为:

$$\theta(I) = \arcsin^{-1} \sqrt{\frac{n_o^{-2}(\omega) - n_o^{-2}(2\omega)}{n_e^{-2}(2\omega) - n_o^{-2}(2\omega)}}, \quad (3)$$

$$\left[\frac{\cos^2 \theta(II)}{n_o^2(2\omega)} + \frac{\sin^2 \theta(II)}{n_e^2(2\omega)} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{n_o(\omega)}{2} + \frac{1}{2} \left[\frac{\cos^2 \theta(II)}{n_o^2(2\omega)} + \frac{\sin^2 \theta(II)}{n_e^2(2\omega)} \right]. \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,KBBF 晶体 I 类倍频基波的下限为 322 nm,直接倍频产生的谐波波长为 161 nm,其相位匹配角为 89.56°。KBBF 晶体为目前直接倍频匹配波长最短的晶体,可在 200 nm 以下的深紫外波段实现相位匹配,突破 200 nm 深紫外固体激光的壁垒。II 类倍频基波的下限波长为 461 nm,其相位匹配角为 86.98°,高于 I 类倍频谐波的下限波长;基波波长在 322~461 nm 波段内不存在 II 类匹配角,倍频只能用 I 类匹配。因此要产生 150~200 nm 激光只能利用 KBBF 晶体 I 类倍频产生深紫外激光。

2.2 KBBF 晶体走离角

在产生倍频光的过程中,满足相位匹配条件下,正常光(o 光)的波法线方向与光线方向一直;但是对于非常光(e 光),波法线方向与光线方向则不一致,此时处于不同偏振态的基频光与二次谐波光线方向发生偏离,将增加衍射和反射损耗,从而降低转化效率。对于 KBBF 晶体,走离效应中的 e 光走离角 α 的计算公式为:

$$\alpha = \arctan \left[\frac{1}{2} \frac{n_o^2(\lambda) - n_e^2(\lambda)}{n_o^2(\lambda) \sin^2 \theta + n_e^2(\lambda) \cos^2 \theta} \sin 2\theta \right]. \quad (5)$$

由式(5)可知:基波波长为 434 nm 时,对应得到 I 类倍频光的走离角达到最大值,为 3.80°。在深紫外波段(即基波波长在 322~400 nm),走离角为 0.063°~3.72°,走离角较小,因此利用 KBBF 晶体产生的深紫外光源的光束质量较高。在基波波长小于 560 nm 时,II 类相位匹配的走离角小于 I 类相位匹配的走离角,但二者差距较

小;然而,在倍频产生的波段,II 类匹配走离角明显大于 I 类匹配。考虑到走离效应的影响,o 光和 e 光在空间上发生分离,不易产生二次谐波,所以 KBBF 晶体的倍频优先选择 I 类相位匹配。

2.3 KBBF 晶体的倍频系数

KBBF 晶体有两个倍频系数 d_{11} 和 d_{14} ,它们构成矩阵:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

理论和实验均指出 d_{14} 非常小,因此 d_{14} 系数并不进入有效倍频系数的公式中,KBBF 晶体的有效倍频系数 d_{eff} 表达式为:

$$\begin{cases} d_{11} \cos \theta \cos 3\phi & (\text{Type-I}) \\ d_{11} \cos 2\theta \cos 3\phi & (\text{Type-II}) \end{cases}, \quad (7)$$

其中 θ, ϕ 分别为波长对应的相位匹配角和晶体方位角。在数值计算时,取 I 类 KBBF 晶体的切割角 θ 为 0°,取 II 类 KBBF 晶体的切割角 ϕ 为 30°。从实验上来说,只要测定 d_{11} 就够了,而后采用 Maker 条纹法测定出实验值为 $d_{11} = \pm 0.49$ pm/V。

在达到相位匹配的条件下,I 类,II 类相位匹配对应的最大有效非线性系数取值分别为 0.463 3 pm/V 和 0.392 3 pm/V。对应基波波长为 1350 nm,同时,在相同基波波长情况下,I 类相位匹配得到的有效非线性系数始终比 II 类大;而对于所要应用的紫外波段,I 类相位匹配的有效非线性系数仍然比 II 类大,在 KBBF 晶体 I 类相位匹配产生倍频输出光的深紫外波段(即 161.5~200 nm),有效非线性系数为 0.003 79~0.297 11 pm/V, KBBF 晶体用于紫外波段光源(即 200~400 nm),有效非线性系数的最大值为 0.446 47 pm/V。

2.4 KBBF 晶体光栅耦合器结构

由 2.1~2.3 小节的设计和计算可知,在紫外-深紫外波段,以 KBBF 晶体为倍频输出器件,应选择 I 类相位匹配模式产生倍频输出光,本文的设计和计算均基于 I 类相位匹配。

KBBF 晶体光栅耦合器的设计思路如图 2 所示。利用匹配光栅衍射分光,使衍射光以 I 类相位匹配角入射进入 KBBF 晶体,使光线以全反射方式在 KBBF 晶体内传输,增加基波光在 KBBF 晶体内的光程,传输一段距离后,在相应位置利用

输出晶体将倍频光引出。

在 KBBF 晶体中进行全反射的情况下还要满足光线传播方向与光轴方向的夹角为相位匹配角,这就要求相位匹配角大于其对应波长的全反射角。

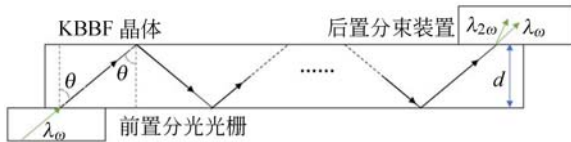


图 2 KBBF 光栅耦合器原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of KBBF grating coupler

利用式(3)计算对应基波波长的 I 类倍频相位匹配角 θ_1 , 然后利用折射定律 $n_o \sin \theta_2 = n_s \sin 90^\circ$ 计算出相位匹配角 θ_1 、全反射角 θ_2 以及基波波长的关系曲线,如图 3 所示。从图中可知,相位匹配角与全反射角交点处对应波长在 471~472 nm 之间,对应基波波长为 471.073 nm,即 471.073 nm 及其以下波长作为基波光均可实现全反射增强倍频输出。

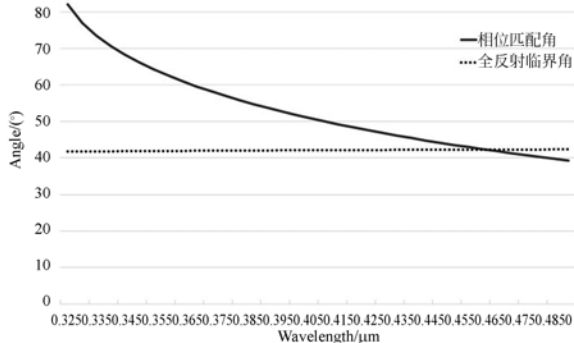


图 3 KBBF 相位匹配角、全反射角与基波波长的关系曲线

Fig. 3 Relationship of KBBF phase matching and total reflection angle with fundamental wavelength respectively

3 KBBF 光栅耦合器匹配光栅设计

在进行匹配光栅设计时,选取 441.6 nm 波长作为基波光,其倍频输出光波长为 220.8 nm。以 441.6 nm 激光正入射的方式进行匹配光栅设计,选择 +1 级、-1 级衍射光进行相位匹配,即让 +1 级与 -1 级衍射光与 0 级衍射光夹角为相位匹配角,通过光栅方程得到光栅刻线密度为

2 385.089 gr/mm。以此为输入条件,对光栅进行衍射效率及槽型优化设计,设计通过 PCgrate SX 6.4 进行。441.6 nm 处闪耀槽型光栅的衍射效率与矩形槽相当,但其工艺难度相对较大,因此选择类矩形槽型进行优化设计。

在刻线密度和入射角度确定的情况下,影响类矩形光栅衍射效率的因素主要有侧壁倾角、槽深、占宽比。基于工艺考虑,占宽比一般选择在 0.5 ± 0.1 , ± 0.1 的容差对于衍射效率的影响较小。

在进行匹配光栅设计时,采用三步设计法:第一步,依据工艺容限先给定左右侧壁倾角,然后优化类矩形槽深,获得槽深范围;第二步,以槽深最优值为参数,将左右侧壁倾角开放,优化左右侧壁倾角,获得最优侧壁倾角值;第三步,以第二步获得的侧壁倾角值为输入,对槽深再进行优化,实现衍射效率与槽型参数的优化设计。

第一步,以左右倾角为 80° 为设计输入,进行槽深优化设计。图 4 为 441.6 nm 波长激光的 +1 级衍射效率与矩形槽深度的关系曲线。由图可知,在槽深约为 250~330 nm 时,衍射效率较高,高于 22.5%,峰值衍射效率为 23.9619%,在槽深 287.4 nm 处获得。

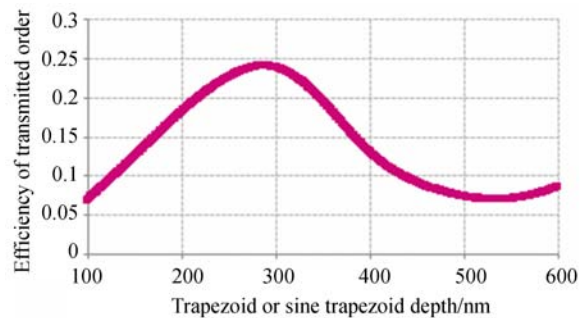


图 4 441.6 nm 波长激光的 +1 级衍射效率与类矩形槽深度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between diffraction efficiency of +1 diffraction at 441.6 nm wavelength and depth of trapezoid groove

第二步,以第一步获得的槽深峰值参数为设计输入,进行侧壁倾角的优化设计。图 5 为 441.6 nm 波长激光的 +1 级衍射效率与侧壁倾角的关系曲线。由图可知,在侧壁倾角约为 $80^\circ \sim 83^\circ$ 时,衍射效率较高,高于 27.5%,峰值衍射效率为 27.82%,在侧壁倾角 81.3° 处获得。

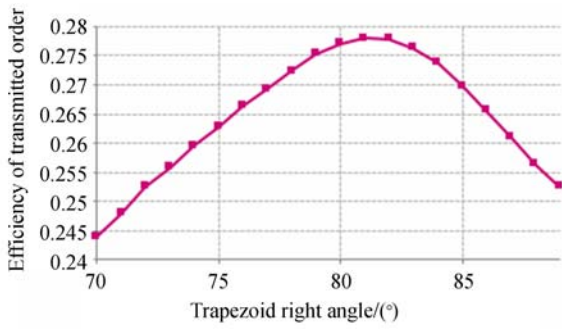


图 5 441.6 nm 波长激光的 +1 级衍射效率与类矩形槽侧壁倾角的关系曲线

Fig. 5 Relationship between diffraction efficiency of +1 diffraction at 441.6 nm wavelength and sidewall angle

第三步,以第二步获得的侧壁倾角峰值参数为设计输入,再次进行槽深优化设计。图 6 为 441.6 nm 波长激光的 +1 级衍射效率与槽深的关系曲线。由图可知,在槽深约为 300~350 nm 时,衍射效率较高,高于 28%,峰值衍射效率为 29.5%,在槽深 329.6 nm 处获得。

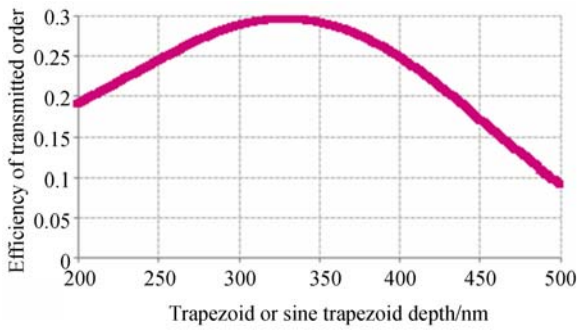


图 6 441.6 nm 波长激光的 +1 级衍射效率与类矩形槽槽深的最优关系曲线

Fig. 6 Relationship between diffraction efficiency of +1 diffraction at 441.6 nm wavelength and depth of trapezoid groove

结合工艺及上述参数的优化设计,最终获得的最优匹配光栅参数如表 1 所示。

表 1 匹配光栅槽型设计参数

Tab. 1 Groove design parameters of matched gratings

刻线密度/ (gr · mm ⁻¹)	占宽比	槽深 /nm	侧壁倾角 /(°)	衍射效率 /%
2 385 ± 2	0.5 ± 0.1	330 ± 20	81.5 ± 1	> 28

4 结果及讨论

KBBF 晶体的倍频转化效率与波矢 k_1 , 晶体厚度 z 和电场截面分布峰值 v_0 有关,其表达式为:

$$\eta_2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{\sqrt{2}}{k_1 z v_0} \text{th}(\sqrt{2} k_1 z v_0) + \frac{1}{(k_1 z v_0)^2} \ln[\text{ch}(\sqrt{2} k_1 z v_0)] \right|. \quad (8)$$

由式(8)可知,电场截面分布峰值 v_0 与基波能量相关,且倍频转化效率 η_2 随其变化而变化,与光程路径无关;而一旦基波波长确定,波矢 k_1 为常数;在入射基波确定的情况下,只有晶体厚度 z 对最终的倍频转化效率 η_2 产生影响,因此,采用参数 t 来代替三者乘积,将式(9)简化为:

$$\eta_2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{\sqrt{2}}{t} \text{th}(\sqrt{2} t) + \frac{1}{t^2} \ln[\text{ch}(\sqrt{2} t)] \right|. \quad (9)$$

根据式(9),计算不同 t 时倍频效率 η_2 的变化曲线,如图 7 所示。

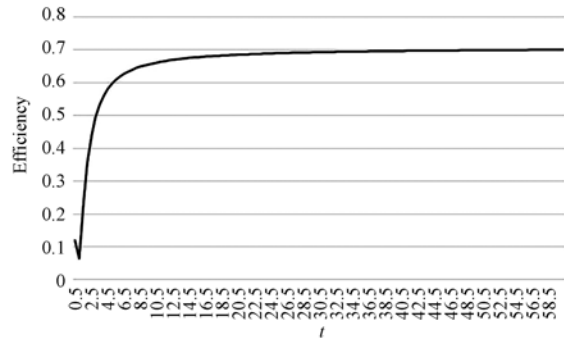


图 7 KBBF 晶体倍频效率与参数 t 的关系曲线

Fig. 7 Relationship between frequency doubling efficiency of KBBF crystal and parameter t

从图 7 可以看出,当参数 t 达到 5.5 时,倍频转化率从 10% 左右增长到 60% 以上,而之后随着 t 的增长,倍频转化率增长缓慢;当参数 t 达到 60 时,倍频效率仅增长到 70%。因此, t 值只需增大到 5.5 左右即可获得较高的 KBBF 晶体理论倍频转化效率。

通过上面的讨论可知,基波光在 KBBF 晶体的厚度对倍频效率的影响最大;而在利用全反射原理设计的 KBBF 光栅耦合器中即为全反射次数,每次全反射相当于穿越了一次 KBBF 晶体的厚度, n 次全反射即相当于穿越了厚度为 $(n+1)$

倍的 KBBF 晶体。因此, KBBF 光栅耦合器的总倍频转化率为:

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{\sqrt{2}}{t(n+1)} \operatorname{th}(\sqrt{2}t(n+1)) + \frac{1}{t(n+1)^2} \ln[\operatorname{ch}(\sqrt{2}t(n+1))] \right|, \quad (10)$$

其中 η_2 为将 η_1 中的参数 t 替换为 $t(n+1)$, 称之为等效厚度倍频转化率, η_1 为匹配光栅的衍射效率。

结合目前 KBBF 晶体的生长工艺, 厚度在 1.5 mm 以下时样品的制备难度较小^[10], 因此, 选择 1 mm 厚度的 KBBF 晶体作为计算标准。表 2 给出了不同全反射次数对应的 KBBF 晶体的尺寸参数。

表 2 全反射次数对应 KBBF 晶体横向尺寸

Tab. 2 Total reflection times correspond to transverse dimension of KBBF crystal

基波波长 /nm	全反射次数对应的横向尺寸/mm			
	1	2	3	4
441.6	2.2	3.2	4.2	5.2

从表 2 中可知, 在 KBBF 晶体中进行 4 次全反射, KBBF 晶体的横向尺寸约为 5.2 mm, 厚度为 1 mm, 这类晶体的生产相对较易获得。

以 4 次全反射为例, 即 $n=4$, 代入式(10)计算获得 KBBF 光栅耦合器的总转化效率, 如表 3 所示。

参考文献:

- [1] 陈剑天. 紫外、深紫外非线性光学晶体探索十年回顾[J]. 人工晶体学报, 2001, 30(1): 36-42.
CHEN CH T. Overview of violet and deep-UV nonlinear optical crystals in the last decade [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2001, 30(1): 36-42. (in Chinese)
- [2] YANG F, WANG ZH M, ZHOU Y, *et al.*. 41 mw high average power picosecond 177.3 nm laser by second-harmonic generation in KBBF[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(1): 142-145.
- [3] 陈剑天, 刘丽娟. 深紫外非线性光学晶体及其应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(S1): 1-9.
CHEN CH T, LIU L J. Deep ultraviolet nonlinear optical crystals and their applications[J]. *Journal*

表 3 KBBF 光栅耦合器的总转化效率

Tab. 3 Total conversion efficiency of KBBF grating coupler (%)

基波波长 /nm	匹配光栅 衍射效率	等效厚度 倍频转化率	总转化率
441.6	>28	60.23	16.86

由表 3 可知, KBBF 光栅耦合器的总倍频转化率超过了 16%, 如果横向尺寸增大, 全反射次数增加, 总倍频转化率可以进一步提高。

5 结 论

本文对 KBBF 晶体的倍频特性进行了深入分析, 提出采用基波光栅耦合结合 KBBF 晶体内全反射的新型 KBBF 晶体光栅耦合器, 并进行了 KBBF 晶体匹配光栅、等效厚度倍频转化率及总倍频转化率的设计和计算。设计及实验结果表明: KBBF 晶体光栅耦合器能够实现深紫外波段倍频光的输出; 在 KBBF 晶体尺寸相同时, KBBF 晶体光栅耦合器可获得更高的总倍频转化效率; KBBF 晶体光栅耦合器的总转化效率不受制于 KBBF 晶体厚度, 而随着 KBBF 晶体横向尺寸的增大(全反射次数增加)而增大; 尺寸 5.2 mm × 5.2 mm × 1 mm 的 KBBF 晶体的光栅耦合器总倍频转化效率可达到 16.86%。

of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(S1): 1-9. (in Chinese)

- [4] LU J H, WANG G L, XU Z Y, *et al.*. High-efficiency fourth-harmonic generation of KBBF crystal [J]. *Optics Communications*, 2001, 200(1-6): 415-418.
- [5] 张承乾, 王继扬, 吴以成, 等. 深紫外激光倍频新晶体 $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ [J]. 功能材料, 2001, 32(6): 595-597.
ZHANG CH Q, WANG J Y, WU Y CH, *et al.*. The novel vacuum ultraviolet double frequency crystal $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ [J]. *Journal of Functional Materials*, 2001, 32(6): 595-597. (in Chinese)
- [6] TANG D Y, XIA Y N, WU B CH, *et al.*. Growth of a new UV nonlinear optical crystal: $\text{KBe}_2(\text{BO}_3)\text{F}_2$ [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, 222(1-

- 2); 125-129.
- [7] KUMBHAKAR P, KOBAYASHI T. Ultra-broad-band optical parametric amplification in $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ crystal[J]. *Optics Communications*, 2007, 277(1): 205-208.
- [8] 刘丽娟, 陈剑天. 新型深紫外非线性光学晶体 $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ 族的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(10): 16-20.
LIU L J, CHEN CH T. Recent advances in new deep-UV nonlinear optical crystal $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ family[J]. *Materials China*, 2010, 29(10): 16-20. (in Chinese)
- [9] 陈剑天, 许祖彦. KBBF 晶体的棱镜耦合技术和深紫外谐波输出[J]. 人工晶体学报, 2002, 31(3): 224-227.
CHEN CH T, XU Z Y. Prism coupling technique and deep-UV harmonic output of KBBF crystal[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2002, 31(3): 224-227. (in Chinese)
- [10] ZHANG X, WANG L R, WANG X Y, *et al.*. High-power sixth-harmonic generation of an ND:YAG laser with $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ prism-coupled devices [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(21-22): 4519-4522.

作者简介:



谭 鑫(1981—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2003年、2008年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事光栅设计制作技术及光学器件微细加工技术的研究。E-mail:xintan_grating@163.com



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com