

文章编号: 1001-3806(2007)04-0351-03

KB_eBO₃F₂ 用于产生紫外波长的角度调谐分析

王守鹏¹, 王 丽^{*}, 门艳彬^{1,2}

(1. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100022; 2 河北师范大学 物理科学与信息工程学院, 石家庄 050016)

摘要: 为了研究非线性光学晶体 KB_eBO₃F₂ 的光参变特性, 根据晶体的色散方程和动量、能量守恒定律, 采用计算机数值模拟的方法, 得出了 KB_eBO₃F₂ 晶体在 I 类和 II 类相位匹配下的角度调谐范围, 并与另一种优良的非线性晶体 CsLiB₆O₁₀ 进行了比较, 从而得出 KB_eBO₃F₂ 晶体比 CsLiB₆O₁₀ 晶体可获得更短的紫外波长输出和更宽的连续调谐输出的结果。理论计算结果表明, 当抽运光为 213nm 时, 对于 I 类相位匹配条件, 可以获得最短波长 220nm 的紫外光输出。

关键词: 非线性光学; 角度调谐; KB_eBO₃F₂ 晶体; 相位匹配

中图分类号: 0734.0437 文献标识码: A

Ultraviolet angle tunable by means of KB_eBO₃F₂

WANG Shou-peng¹, WANG Li¹, MEN Yan-bin^{1,2}

(1. College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)

Abstract In order to study the optical parametric characteristics of KB_eBO₃F₂, according to dispersion equation of nonlinear crystal momentum and energy conservation, the angle tuning curves and range of wavelength in type I and type II were obtained through numerical simulation which were compared with those of CsLiB₆O₁₀. It can be seen that KB_eBO₃F₂ is an excellent nonlinear crystal to obtain ultraviolet continuous tunable output and the shortest wavelength 220nm can be obtained when the pump wavelength is 213nm in type I.

Key words nonlinear optics; angle tuning; KB_eBO₃F₂ crystal; phase matching

引 言

全固态紫外激光器具有体积小、应用方便、产生的紫外波长短等特点, 在机械探伤、制作高密度光盘、光刻技术等方面获得了广泛应用^[1,2]。目前, 产生紫外激光的重要途径之一, 是由固体激光器产生的近红外光经非线性光学晶体变频而获得^[3,4]。现有的用于非线性频率变换的晶体由于其透光谱的紫外截止波长或相位匹配角等因素的限制, 难以实现 200nm 以下的深紫外波长输出^[5]。比如 BBO 晶体, 由于离散角大、接受带窄、吸收边缘长 (190nm) 等缺点, 限制了其在深紫外方面的应用^[6]。1995 年出现的 CsLiB₆O₁₀ (CLBO), 与 BBO 相比具有离散角小、透光波段宽、非线性系数大等特点。目前, 理论上已经对 CLBO 做了详细的研究^[6-8], 实验上通过混频可产生波长为 175nm~180nm

的紫外光输出^[9]。CHEN 等人发明的晶体材料 KB_eBO₃F₂ (KBBF) 是一种各方面都非常优秀的非线性晶体, 其透光范围非常宽, 155nm~3660nm, 且具有非常大的破坏阈值。目前, KBBF 晶体已实现 Nd:YVO₄ 激光的六倍频谐波输出 (177.3nm), 平均输出功率 3.5mW^[10]; 使用 KBBF 晶体的棱镜耦合技术实现了 Ti:sapphire 激光的四倍频, 最短输出波长已可达到 179.4nm^[11]; 通过和频的方法还获得了 Ti:sapphire 的五次谐波可调谐输出, 最短输出波长可达到 156nm, 这是目前为止通过非线性晶体可获得的最短波长输出^[12]。在理论方面只是讨论了其在倍频相位匹配方面的特性^[13,14], 而对于 KBBF 晶体的光参变放大、光参变振荡理论和实验的研究, 未见有关的报道。作者利用计算机数值模拟, 给出了 KBBF 晶体的角度调谐曲线, 并与文献 [15] 中 CLBO 晶体进行了比较。

1 理论分析和数值计算

1.1 I 类相位匹配

设参与非线性作用的 3 个光波的圆频率分别为 ω_1 , ω_2 和 ω_3 , 折射率为 n_1 , n_2 , n_3 , 其相应的波矢分别为

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (4062008)

作者简介: 王守鹏 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光频率变换和新型激光器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: Lwang_l@bjut.edu.cn

收稿日期: 2006-05-18 收到修改稿日期: 2006-07-19

k_1, k_2 和 k_3 , λ 为参与相互作用的光波的波长, θ 为 e 光波矢与光轴之间的夹角, c 为光速。当完全相位匹配时, 根据动量守恒和能量守恒有:

$$\omega_1 n_1 + \omega_2 n_2 = \omega_3 n_3 \quad (1)$$

由于

$$\omega = 2\pi c / \lambda \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_3} \quad (3)$$

在 I 类相位匹配条件下, (1) 式可以表示为:

$$\omega_1 n_1(\omega_1) + \omega_2 n_2(\omega_2) = \omega_3 n_3(\omega_3, \theta) \quad (4)$$

式中,

$$n_1(\omega_1) = n_o(\omega_1), n_2(\omega_2) = n_o(\omega_2), n_3(\omega_3, \theta) = n_e(\omega_3, \theta) = \left[\frac{\sin^2 \theta}{n_e^2(\omega_3)} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2(\omega_3)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中, n_e 为 e 光折射率, n_o 为 o 光折射率。由 KBBF 晶体的色散方程^[16]:

$$n_o^2(\lambda) = 1 + \frac{1\ 168705\lambda^2}{\lambda^2 - 0\ 0062782} - 0\ 0096676\lambda^2 \quad (6)$$

$$n_e^2(\lambda) = 1 + \frac{0\ 957724\lambda^2}{\lambda^2 - 0\ 0059816} - 0\ 028510\lambda^2 \quad (7)$$

联立 (1) 式 ~ (7) 式, 通过计算机数值模拟计算, 得到了当抽运波长为 213nm, 266nm, 355nm 和 532nm 时, KBBF 晶体 I 类相位匹配的角度调谐曲线, 如图 1 所示。从图 1a 可以看出, 当抽运光波长为 213nm 时,

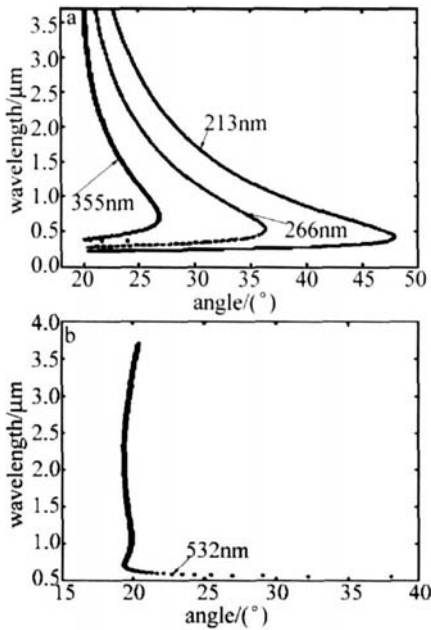


Fig 1 Type I angle tuning curves of KBBF

角度调谐范围为 20.46° ~ 47.95°, 波长调谐范围为 220nm ~ 3664nm, 简并点在 423nm 处; 当抽运波长为 266nm 时, 角度调谐范围为 20.33° ~ 36.33°, 波长调谐范围为 279nm ~ 3664nm, 简并点在 531nm; 当抽运波长为 355nm 时, 角度调谐范围为 20.11° ~ 26.82°, 波长

调谐范围为 383nm ~ 3664nm, 简并点在 704nm。由此可看出, 无论采用那种抽运波长, KBBF 均可实现较宽范围的连续调谐输出, 并且随着抽运波长逐渐变短, 其连续调谐范围更宽, 最短输出波长更短。当抽运波长为 532nm 时, 角度调谐范围为 19.34° ~ 20.43°, 波长调谐范围为 708nm ~ 1063nm, 但存在多个简并点, 因此在实验时可以只取其中的一部分。在 I 类相位匹配条件下, KBBF 实现的最短波长达到 220nm。

1.2 II 类相位匹配

在 II 类相位匹配条件下, 假设参与三波相互作用的信号光为 o 光, 闲频光和抽运光为 e 光, 根据晶体的色散方程, 联立 (1) 式 ~ (7) 式, 通过计算机数值模拟计算, 可以得出当抽运波长为 213nm, 266nm, 355nm 和 532nm 时, KBBF 晶体 II 类相位匹配的角度调谐曲线, 如图 2 所示。

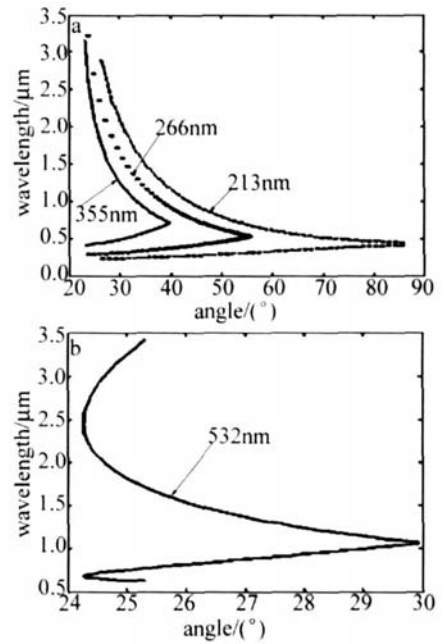


Fig 2 Type II angle tuning curves of KBBF

从图 2a 可以看出, 当抽运光波长为 213nm 时, 角度调谐范围为 26.24° ~ 86.01° 及 26.52° ~ 86.08°, 相应的信号光波长调谐范围为 231nm ~ 400nm, 闲频光调谐输出范围 451nm ~ 2880nm, 但由于角度曲线不存在简并点, 不能实现连续调谐; 当抽运波长为 266nm 时, 角度调谐范围为 23.7° ~ 55.81°, 波长调谐范围为 283nm ~ 3212nm, 简并点在 535nm; 当抽运波长为 355nm 时, 角度调谐范围为 23.28° ~ 39.93°, 波长调谐范围为 400nm ~ 3146nm, 简并点在 709nm。当抽运波长为 532nm 时, 如图 2b 所示, 角度调谐范围为 24.28° ~ 29.94°, 波长调谐范围为 627nm ~ 3408nm, 可看出能在较窄的角度范围内实现很宽的波长调谐, 但是存在多个简并点, 因此, 实验时可以只取其中一部

分,如角度范围为 $25^\circ \sim 29^\circ$, 相应的波长条件范围为 $767\text{nm} \sim 1697\text{nm}$, 此时的简并点在 1057nm 处。

在 II 类相位匹配时, 无论采用那种抽运波长, KBBF 均可实现较宽范围的波长输出, 当抽运波长为 213nm 时, 无法实现连续调谐, 在抽运波长为 532nm 时, 存在多个简并点。因此, 抽运波长为 266nm 和 355nm 时, KBBF 的调谐性能较好, 并且随着抽运波长逐渐变短, 输出波段向紫外扩展。

1.3 KBBF 晶体和 CLBO 晶体的比较

根据 CLBO 晶体的色散方程^[17] 可数值计算其在不同抽运波长下的角度调谐曲线, 并与 KBBF 晶体的进行了比较, 如图 3 和图 4 所示。综合比较 I 类和 II

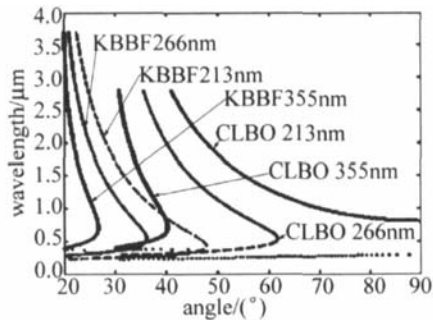


Fig 3 Comparison of KBBF and CLBO type I angle tuning curves

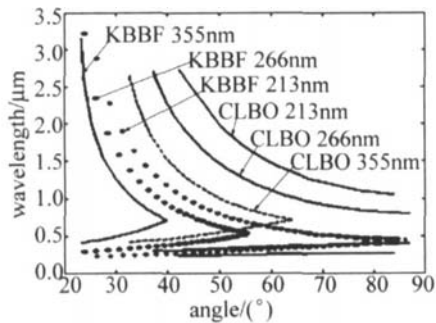


Fig 4 Comparison of KBBF and CLBO type II angle tuning curves

类 KBBF 的角度调谐曲线, KBBF 晶体都能获得比 CLBO 晶体更宽波段的调谐输出。尤其是 KBBF 晶体在 I 类相位匹配下, 无论是哪种抽运波长 (除去 532nm) 都可获得较宽的连续调谐输出。而在 II 类相位匹配下 213nm 作抽运波长时不能实现连续调谐输出。相比之下, 无论是 I 类相位匹配, 还是 II 类相位匹配, 用 KBBF 晶体做非线性晶体时获得的最短波长都比 CLBO 晶体短, 因此, 可认为 KBBF 晶体比 CLBO 晶体更适合作短波波段的参变晶体。

2 结论

通过计算机数值模拟了 KBBF 晶体的 I 类和 II 类相位匹配的角度调谐曲线, 并与 CLBO 晶体进行了比

较, 可看出 KBBF 晶体是一种优良的紫外波段的非线性晶体, 且其调谐性能较好, 并且随着抽运波长逐渐变短, 输出波段向深紫外波段扩展。

参考文献

- [1] LOU Q H, ZHANG L, YE Z H. Experimental research on Si cutting by using UV excimer laser [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 250 ~ 252(in Chinese).
- [2] RAO M H, HE Zh J, YANG G L. The advance of polarization control method to ultraviolet written Bragg gratings [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 61 ~ 64(in Chinese).
- [3] JIA F Q, ZHENG Q, XUE Q H. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched external cavity third harmonic laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 629 ~ 631(in Chinese).
- [4] CHEN D Zh, GUO H Q, QING G B. LD pumped 355nm quasi-CW ultraviolet laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 514 ~ 516(in Chinese).
- [5] CHEN Ch T, LN Zh Sh, WANG Zh Zh. Recent development for uv and deep uv nonlinear optical crystals [J]. Function Materials Information, 2005, 2(3): 5 ~ 11(in Chinese).
- [6] ZHANG X R, ZHANG Sh X, CHAI Y. Harmonic generation in a new nonlinear crystal $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ [J]. Chinese Journal Lasers, 2000, 27(7): 669 ~ 672(in Chinese).
- [7] WANG L, MEN Y B. Comparison study of $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ and $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ as nonlinear media for optical parametric oscillators [J]. Appl Opt, 2003, 42(15): 2720 ~ 2723
- [8] WANG L, HAN X Y. Pulse expanded and delaying effect of second harmonic wave in by group velocity mismatching and dispersion [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9): 1249 ~ 1252(in Chinese).
- [9] PETROV V, NOACK F. Sum-frequency generation of femtosecond pulses in $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ down to 175nm [J]. Appl Opt, 2000, 39(27): 5076 ~ 5079
- [10] 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).
- [11] TOGASHI T, KANAIT. Generation of vacuum-ultraviolet light by an optically contacted prism-coupled $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ crystal [J]. Opt Lett, 2003, 28(4): 254 ~ 256
- [12] KANAIT, KANDA T. Generation of vacuum-ultraviolet light below 160nm in a KBBF crystal by the fifth harmonic of a single-mode Ti:sapphire laser [J]. JO S A, 2004, B21(2): 370 ~ 375
- [13] 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).
- [14] WANG Sh P, WANG L, MAO L Q et al. Analysis of phase matching on laser diode-pumped Nd:GdVO₄/KBBF solid-state laser [J]. Laser Journal, 2006, 27(2): 22 ~ 23(in Chinese).
- [15] MEN Y B, WANG L, CHEN Sh H et al. Analysis of angle tuning on optical nonlinear crystal $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ [J]. Chinese Journal Lasers, 2003, 30(5): 441 ~ 444(in Chinese).
- [16] CHEN Ch T, LN Zh Sh. Recent development for UV, deep UV [J]. Nonlinear Optical Crystals, 2004, 33(4): 455 ~ 464(in Chinese).
- [17] UMEURA N, KATO K. Ultraviolet generation tunable to $0.185\mu\text{m}$ in $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ [J]. Appl Opt, 1997, 36(27): 6794 ~ 6796