

用 BBO 晶体产生 196~228 nm 波长的紫外辐射*

范琦康 陆祖康 吴碧珍 洪 治
(浙江大学光电与科仪工程系, 杭州 310027)

提 要

本文报道了用 BBO 晶体通过混频产生 196~228 nm 可调谐紫外辐射的研究结果。产生 200 nm 及 222 nm 的量子转换效率分别为 12% 及 23%, 与理论计算值基本相符。

关键词: 可调谐紫外辐射, BBO 晶体。

一、引 言

200 nm 附近的可调谐相干紫外辐射在原子光谱和同位素分离等方面的研究有着重要的应用^[1,2]。将染料激光器可调谐输出通过非线性晶体倍频、混频是产生此波长范围相干辐射的有效途径。由于 BBO 晶体有较高的非线性系数、紫外透过性能好, 通过 BBO 晶体倍频可获得的最短波长为 204.8 nm^[3]。为了产生更短波长的紫外辐射, 本文将染料激光器输出(480~580 nm)的二次谐波(240~290 nm)的紫外辐射再与 Nd:YAG 激光器的基波(1.064 μm)混频, 产生 196~228 nm 的可调谐紫外辐射。

二、理论考虑

在非线性晶体中混频过程的三波耦合幅度方程(SI 制)为^[4]

$$\left. \begin{aligned} (dA_1/dz) &= iB_1 A_3 A_2^* \exp(-i\Delta kz), \\ (dA_2/dz) &= iB_2 A_3 A_1^* \exp(-i\Delta kz), \\ (dA_3/dz) &= iB_3 A_1 A_2 \exp(i\Delta kz), \\ B_i &= \pi\chi_{\text{eff}}/n_i\lambda_i, \Delta k = k_1 + k_2 - k_3, (i=1, 2, 3) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, 下标 1 代表 1.064 μm 的激光, 下标 2 代表 240~290 nm 的可调谐紫外辐射。下标 3 代表产生的和频波, 波长为 196~228 nm。

实验中参与混频的 λ_1 (1.064 μm) 脉冲能量为 150 mJ 左右, 相应功率密度 I_1 为 20 MW/cm²; 而 240~290 nm 的最大脉冲能量为 26 mJ(280 nm), 相应功率密度 I_2 为 6.2 MW/cm²。两者光子数之比($I_2\lambda_2/I_1\lambda_1$) 小于 8%。根据 Manley-Rowe 关系可知, 在混频过程中 λ_1 和 λ_2 两波的光子数变化应该是相等的。由两输入光波的光子数之比可知, 在此混频过程

收稿日期: 1991年7月1日; 收到修改稿日期: 1991年8月19日

* 本课题为国家自然科学基金资助的项目。

中 I_1 的变化不会超过 8%。因此在本实验条件下,耦合幅度方程(1)中的 A_1 可以近似作为常数。这样大大简化了方程组(1)的求解,得其解为

$$|A_3(l)|^2 = B_3^2 |A_{10}|^2 |A_{20}|^2 l^2 \{\text{sinc}[\sqrt{\Gamma_0^2 + (\Delta k/2)^2} \cdot l]\}^2, \quad (2)$$

式中 l 为 BBO 晶体的长度, A_{10} 、 A_{20} 为输入光场的幅度。

$$\Gamma_0^2 = B_1 B_2 |A_{10}|^2 = (2\pi I_{10} \chi_{\text{eff}}^2 / n_1 n_2 n_3 \varepsilon_0 \lambda_2 \lambda_3 C). \quad (3)$$

由(2)式可以得出量子转换效率 η 为

$$\eta = [I_3(l) \omega_2 / I_{20} \omega_3] = (\Gamma_0 l)^2 \{\text{sinc}[\sqrt{\Gamma_0^2 + (\Delta k/2)^2} \cdot l]\}^2, \quad (4)$$

方程(1)的严格解是椭圆函数^[47],数值计算比较复杂。而(4)式解的形式简单、计算简便,且比较容易分析各参量对输出光强的影响。(4)式计算的结果与严格解椭圆函数计算,结果进行比较表明,两者计算得到的值是非常接近的。两者的差远小于实验误差。根据(4)式很容易确定 l 一定数值下最佳的 I_{10} 值,或在一定的 I_{10} 值下确定 l 的最佳值。

在本实验中,由染料(R6G 和 C500)激光输出经倍频产生的 240~290 nm 可调谐辐射与 1.064 μm 波长的激光混频产生波长范围 196~228 nm 的可调谐辐射。倍频及混频过程都用 I 型相位匹配的 BBO 晶体。

利用 Kato^[55]的色散方程

$$\left. \begin{aligned} n_o^2 &= 2.7359 + [0.01878/(\lambda^2 - 0.01822)] - 0.01354\lambda^2, \\ n_e^2 &= 2.3753 + [0.01224/(\lambda^2 - 0.01667)] - 0.01516\lambda^2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

非常光(e 光)折射率同 θ 角的关系式及相位匹配条件分别为

$$n_e(\theta) = n_o n_e (n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta)^{-1/2}, \quad (6)$$

$$(n_{10}/\lambda_1) + (n_{20}/\lambda_2) = [n_{3e}(\theta_m)/\lambda_3]. \quad (7)$$

可以求得倍频及混频过程的相位匹配角。计算结果如图 1 所示。480~580 nm 产生 240~290 nm 的匹配角为 $56^\circ \sim 42.3^\circ$ 。240~290 nm 与 1.064 μm 混频产生 196~228 nm 的匹配角为 $57.1^\circ \sim 47.2^\circ$ 。

BBO 晶体 I 型相位匹配的有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}}^I = d_{31} \sin \theta + (d_{11} \cos 3\phi - d_{22} \sin 3\phi) \cos \theta, \quad (8)$$

由于 $|d_{22}|$ 、 $|d_{31}| \ll |d_{11}|$, 故(8)式可近似为

$$d_{\text{eff}}^I = d_{11} \cos 3\phi \cos \theta. \quad (9)$$

在本实验的波长范围内,倍频的有效非线性系数在 $0.56 d_{11} \sim 0.74 d_{11}$ 范围内;混频的有效非线性系数在 $0.54 d_{11} \sim 0.68 d_{11}$ 范围内($\phi = 0^\circ$)。

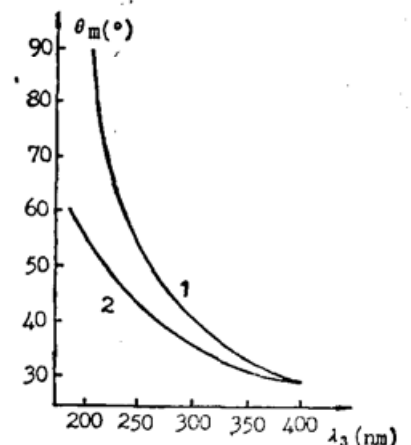


Fig. 1 Curves of phase-matching (PM) angle θ_m vs output wavelength in processes of frequency-doubling (1) and frequency-mixing (2)

三、实验装置

整个实验装置如图 2 所示。Nd:YAG 激光器可输出基波(1.064 μm)、二次谐波(0.532 μm)及三次谐波(0.355 μm)。经阿贝棱镜分光后,二次或三次谐波用于泵浦染料激光器。二次谐波泵浦 R6G 染料激光器,产生 560~580 nm 的可调谐波长激光。三次谐波泵浦 C500 染料激光器,产生 480~558 nm 可调谐波长的激光。此波段的染料激光用两块 BBO 晶体倍频分别产生 280~290 nm 及 240~279 nm 的紫外辐射。然后用两块 BBO 晶体将

上述两个波段的紫外辐射与 $1.064 \mu\text{m}$ 激光混频分别产生 $0.222 \sim 0.228 \text{ nm}$ 及 $0.221 \sim 0.196 \text{ nm}$ 的可调谐紫外辐射。 $1.064 \mu\text{m}$ 射入混频晶体前通过一光学可变延迟器, 使它同

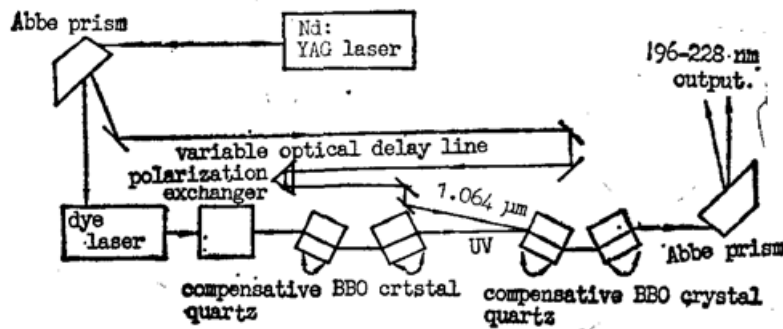


Fig. 2 Experimental setup

参与混频的紫外辐射能同步射入混频的 BBO 晶体。这两束入射光的夹角约为 3° 。

实验中两个波段所用的 BBO 倍频晶体的切割角 θ 分别为 44° 及 50.5° , ϕ 为 0° , 晶体厚度为 7 mm ; 混频的 BBO 晶体切割角 θ 分别为 48° 和 53° , ϕ 为 0° , 晶体厚度为 8 mm 。

在调谐过程中为了消除因倍频及混频晶体的转动而引起的输出光束位移, 伴随倍频晶体及混频晶体各配以一补偿石英玻璃块(见图 2)。此石英玻璃块在波长调谐过程中同晶体作反向转动以抵消倍频及混频晶体因转动引起的光束位移。两块石英玻璃块的光程分别等于倍频及混频晶体的光程, 倍频晶体和混频晶体的角度调谐采用闭环反馈自动跟踪系统, 能自动调节到相位匹配的最佳角度。混频后的输出光束通过阿贝棱镜将 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分开。

四、实验结果及讨论

在上述实验装置中, 获得了 $196 \sim 228 \text{ nm}$ 的紫外可调谐辐射。R6G 染料激光器在 560 nm 处的输出能量为 100 mJ , 脉宽为 10 ns 。实际进入 BBO 倍频晶体的 o 光偏振分量为 85 mJ 。倍频后 280 nm 输出能量为 26 mJ 。同脉宽为 15 ns 、波长 $1.064 \mu\text{m}$ 激光混频后产生 222 nm 的能量为 7.6 mJ , 脉宽约为 7 ns 。相应的量子效率为 23% ; O500 染料激光器在 492 nm 处的输出能量为 16 mJ , 进入倍频晶体的 o 光偏振分量为 12 mJ , 倍频后 246 nm 的能量为 2.4 mJ 。与 $1.064 \mu\text{m}$ 激光混频后产生 200 nm 的能量为 0.35 mJ , 相应的量子效率为 12% 。

混频过程中光束发散角对转换效率有极大的影响, 有一定的发散角光束相当于有一部分入射光偏离相位匹配方向, 致使转换效率下降。对于 $00 \rightarrow e$ I 型相位匹配, Δk 与 $\Delta\theta$ 的关系可表示为

$$\Delta k = (\pi/\lambda_s) n_{e3}^3(\theta) (n_{e3}^{-2} - n_{o3}^{-2}) \sin 2\theta_m \Delta\theta. \quad (10)$$

Δk 对转换效率 η 的影响如(4)式所示。在本实验的波长范围内, 由(10)式计算得到: $\Delta k = (3.6 \sim 5.4) \times 10^4 \Delta\theta (\text{cm}^{-1})$ 。混频输入光的全发散角约为 1 mrad (包含 85% 的能量)。为了估算量子转换效率 η , 把入射光束简化为光强均匀分布的圆锥光束, 其张角为 1 mrad 。光束中心线沿相位匹配方向, 因此整个光束的 Δk 值在 $\pm(18 \sim 27)$ 范围内。圆锥光束内相对中心线的偏角 $\Delta\theta$ 会造成失匹配*, 而方位偏角 $\Delta\varphi$ 并不引起失匹配(更精确地说 Δk 为 $\Delta\varphi$ 的二阶小量)。为了求得整个光束的总转换效率, 需要对光束内不同 Δk 的部分求平均。对于

* Δk 与 $\Delta\theta$ 的关系如(10)式所示。

光强均匀分布的情况, 不同 Δk 值所对应的能量比例为

$$[2\sqrt{(\Delta k_m)^2 - (\Delta k)^2} / \pi(\Delta k_m)^2] d(\Delta k),$$

式中 Δk_m 为 Δk 的最大值, 即对应于 $\Delta\theta_m = 0.5 \text{ mrad}$ 的值, 如图 3 所示。由(4)式可以求得整个光束的平均转换效率 $\bar{\eta}$ 为

$$\bar{\eta} = \frac{2(\Gamma_0 l)^2}{\pi(\Delta k_m)^2} = \int_{-\Delta k_m}^{\Delta k_m} [\text{sinc}(\sqrt{\Gamma_0^2 + (\Delta k/2)^2} \cdot l)]^2 \sqrt{(\Delta k_m)^2 - \Delta k^2} d(\Delta k). \quad (11)$$

246 nm 和 280 nm 与 $1.064 \mu\text{m}$ 混频的匹配角 θ_m 分别为 54.8° 和 48.7° 。BBO 晶体的 $d_{11} = 4.1d_{36}$ (KDP) $= 1.79 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。根据(9)式求得的 $\chi_{\text{eff}} = 2d_{\text{eff}}^I$ 分别为 $2.1 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 和 $2.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。由(3)式求得的 Γ_0^2 分别为 2.29 和 2.67。由(10)式求得的 Δk_m 分别为 27.2 cm^{-1} 和 26.7 cm^{-1} 。将这些数值代入(12)式, 求得的 $\bar{\eta}$ 值分别为 15.4% 和 23.3%。这与实验测得的数值基本相符。

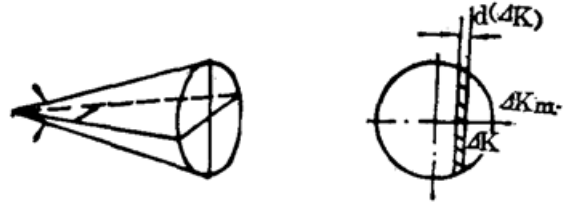


Fig. 3 Distribution of k of conical beam

研究生叶建华参加了部分实验工作。福建物构所提供了优质 BBO 晶体, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. Kuhl *et al.*; *Opt. Commun.* 1976, **7**, 256.
- [2] E. S. Young *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, 109.
- [3] K. Kato; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**, 1013.
- [4] 范琦康等;《非线性光学》, (江苏科技出版社和电子工业出版社出版, 1989年10月)。

Generation of UV radiation of 196~228 nm with BBO crystal*

FAN QIKANG, LU ZUKANG, WU BIZHENG AND HONG ZHI
(Dept. of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 1 July 1991; revised 19 August 1991)

Abstract

This paper reports the generation of tunable radiation ranging from 196 to 228 nm by frequency-mixing with BBO crystal. The quantum conversion efficiencies of generation of radiation at 200 and 222 nm are 12% and 23% respectively, which are coincident with theoretical calculation values.

Key words: tunable UV radiation, BBO crystal.

* This work is supported by National Natural Science Foundation.