

短至 218.3 nm 的可调谐激光光源

杨香春 张新因 刘 晔

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文给出了 KDP 类晶体对不同波长的倍频以及和频相位匹配角的计算, 从计算结果选择最佳条件做了实验验证。用脉冲 Nd:YAG 激光得到了最短可调谐激光波长为 218.3 nm。

Tunable laser source at wavelength down to 218.3 nm

Yang Xiangchun, Zhang Xinan, Liu Ye

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: Calculation results on frequency doubling and frequency summing phase matching parameters for different wavelengths using KDP type crystals are given. Experimental verification was performed, and tunable wavelength down to 218.3 nm has been obtained.

为获得连续可调谐的紫外激光, 利用非线性效应进行频率转换是一种重要的方法。KDP 类晶体是比较成熟的晶体, 它易生长成大块光学均匀的晶体, 在紫外波段有良好的光学透过率, 能够承受高功率的紫外破坏, 有比较大的非线性系数。由于 KDP 类晶体室温倍频相匹配只允许到倍频波长为 $0.26 \mu\text{m}$ 左右, 为得更短波长, 很多文章报道采用其它倍频晶体, 如 $\text{KB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}^{[1,2]}$, $\text{LiOOH} \cdot \text{H}_2\text{O}^{[3]}$, $(\text{NH}_2)_2\text{CO}^{[4,5]}$ 等。

能否利用 KDP 类晶体获得更短波段的紫外光, 我们首先做了 KDP 类晶体各种条件的相匹配特性的计算。通过计算得到下列结果: (1) I 类倍频比 II 类倍频能够得到更短

波长; (2) 和频满足相位匹配条件的波长能比倍频的更短; (3) I 类和频比 II 类和频能够获得更短波长; (4) $1.06 \mu\text{m}$ 的和频比 $0.53 \mu\text{m}$ 的和频得到更短波长; (5) 三种晶体中 KDP 晶体满足相位匹配条件的波长又可比其它两种晶体的波长短。

KDP 类晶体是 42m 对称类型的负单轴晶体, 折射指数服从 $n_o > n_e$ 的关系, 根据指数匹配条件可有 I 类匹配 ($oo \rightarrow e$), II 类匹配 ($oe \rightarrow e$) 和 ($eo \rightarrow e$) 两种情况。共线相匹配公式如下:

(1) I 类倍频公式, $2K_1^o = K_2^e$, K 为波矢的幅值, 脚标 1, 2 分别为基波和谐波, o 和

收稿日期: 1985 年 6 月 26 日。

e 分别表示 o 光和 e 光。

$$\theta_m = \sin^{-1} \left[\frac{(n_3^o)^2}{(n_1^o)^2} \frac{(n_2^o)^2 - (n_1^o)^2}{(n_2^o)^2 - (n_2^e)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

(2) I 类和频公式, $K_1^o + K_2^o = K_3^o$ 。

$$\theta_m = \sin^{-1} \left[\frac{\left(\frac{n_3^o/\lambda_3}{n_1^o/\lambda_1 + n_2^o/\lambda_2} \right)^2 - 1}{\left(\frac{n_3^o}{n_3^e} \right)^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

(3) II 类倍频公式, $K_1^e + K_2^e = K_3^e$ 。

$$2 \left\{ \frac{(n_3^e)^2}{1 + \left[\left(\frac{n_2^e}{n_2^o} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \theta} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ = n_1^o \left\{ \frac{(n_1^e)^2}{1 + \left[\left(\frac{n_1^e}{n_1^o} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \theta} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

(4) II 类和频公式,

(a) $K_1^e + K_2^e = K_3^e$;

$$\frac{n_3^e}{\lambda_3} \left\{ \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{n_3^e}{n_3^o} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \theta} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ = \frac{n_1^o}{\lambda_1} \left\{ \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{n_1^o}{n_1^e} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \theta} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ + \frac{n_2^o}{\lambda_2} \quad (4)$$

(b) $K_1^o + K_2^o = K_3^o$;

$$\frac{n_3^o}{\lambda_3} \left\{ \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{n_3^o}{n_3^e} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \theta} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ = \frac{n_1^o}{\lambda_1} + \frac{n_2^o}{\lambda_2} \left\{ \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{n_2^o}{n_2^e} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \theta} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

常用 KDP 类几种晶体的色散方程为:

(1) KDP 晶体室温 (24.8°C) 色散方程^[6]:

$$(n_4^o)^2 = 2.259276 + \frac{0.01008956}{\lambda^2 - \frac{1}{77.26408}} \\ + \frac{0.03251305}{0.0025 - \frac{1}{\lambda^2}} \quad (6)$$

$$(n_4^e)^2 = 2.132668 + \frac{0.008637494}{\lambda^2 - \frac{1}{81.4263}} \\ + \frac{0.008069981}{0.0025 - \frac{1}{\lambda^2}} \quad (6)$$

(2) ADP 晶体室温色散方程^[7]:

$$(n_4^e)^2 = 2.302842 + \frac{0.011125165}{\lambda^2 - \frac{1}{75.450861}} \\ + \frac{0.03775616}{0.0025 - \frac{1}{\lambda^2}} \\ (n_4^o)^2 = 2.163510 + \frac{0.009616676}{\lambda^2 - \frac{1}{76.98751}} \\ + \frac{0.01479974}{0.0025 - \frac{1}{\lambda^2}} \quad (7)$$

(3) KD*P 晶体室温色散方程^[8,9]:

$$(n_4^o)^2 = 1.012233 + \frac{1.23137}{1.00 - \frac{0.83818 \times 10^{-2}}{\lambda^2}} \\ + \frac{0.2771624}{1.00 - \frac{15.00}{\lambda^2}} \\ (n_4^e)^2 = 0.933294 + \frac{1.193722}{1.00 - \frac{0.748195 \times 10^{-2}}{\lambda^2}} \\ + \frac{0.9423675}{1.00 - \frac{15.00}{\lambda^2}} \quad (8a)$$

$$(n_4^e)^2 = 1.661824 + \frac{0.585337}{1 - \frac{0.016017}{\lambda^2}} \\ + \frac{0.69122}{1 - \frac{30}{\lambda^2}} \\ (n_4^o)^2 = 1.687522 + \frac{0.447488}{1 - \frac{0.017039}{\lambda^2}} \\ + \frac{0.596216}{1 - \frac{30}{\lambda^2}} \quad (8b)$$

表 1 允许相匹配的最短波长

晶 体	类 型					
	倍 频		和 频			
	I 类	II 类	I 类($oo \rightarrow e$)		II 类($eo \rightarrow e$)	
			$\lambda_1=1.06 \mu\text{m}$	$\lambda_1=0.53 \mu\text{m}$	$\lambda_1=1.06 \mu\text{m}$	$\lambda_1=0.53 \mu\text{m}$
最 短 波 长 (μm)						
KDP	0.263	0.370	0.216	0.260	0.246	无解
ADP	0.266	0.375	0.228	0.263	0.258	无解
KD*P	0.267	0.375	0.232	0.267	0.266	无解
KD*P	0.255	0.425	0.202	0.255	0.291	无解

把(6)、(7)、(8a)和(8b)代到方程(1)~(5)中用计算机求解, 得出三种晶体两种匹配类型的倍频和频的相匹配角和波长关系曲线。对和频我们计算了可变波长与固定波长 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 两种情况的匹配曲线。对 KDP、ADP、KD*P 计算结果分别示于图 1、2 和 3 中, 对三种晶体不同类型匹配条件的倍频及和频所允许的最短波长列于表 1。

KD*P 的两组数据是根据 [8, 9] 两篇文献的数据计算的。从表 1 可知, 采用 $1.06 \mu\text{m}$ 激光 I 类和频的方法, 在室温条件下 KDP 晶体能把可调谐激光扩展到 $0.216 \mu\text{m}$, KD*P 晶体可得 $0.202 \mu\text{m}$ 。对此我们做了实验验证, 实验光路图如图 4 所示。脉

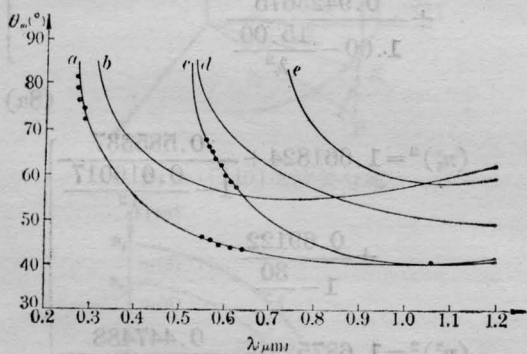


图 1 KDP 晶体相匹配角与入射波长的关系

- (a) $1.06 \mu\text{m}$ 激光与可调谐激光 I 类和频曲线;
- (b) $1.06 \mu\text{m}$ 激光与可调谐激光 II 类和频曲线;
- (c) I 类倍频曲线;
- (d) $0.53 \mu\text{m}$ 激光与可调谐激光的 I 类和频曲线;
- (e) II 类倍频曲线

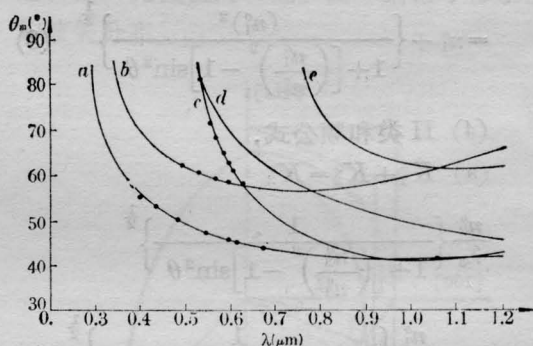


图 2 ADP 晶体相匹配角与入射波长的关系
(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 的含意与图 1 相同

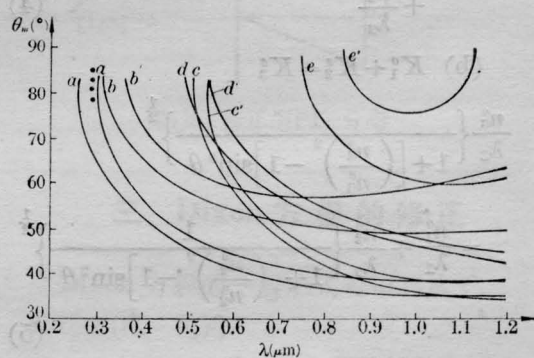


图 3 KD*P 晶体相匹配角与入射波长的关系
(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 的含意与图 1 相同, 是按 (8a) 公式计算的, 带撇的是按 (8b) 计算

冲 YAG 倍频绿光泵浦染料激光器。染料激光经过一块 KDP 晶体倍频, 得到紫外可调谐激光, 剩余的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光与可调谐倍频紫外激光在晶体中和频。KDP 和 KD*P 晶体都是按一类切割, $\varphi=45^\circ$, $\theta=90^\circ$, 尺寸

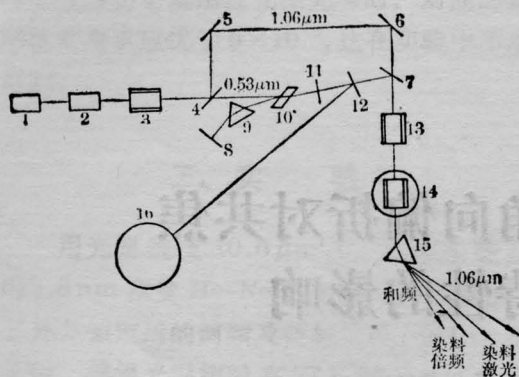


图4 实验装置光路图

1—YAG 振荡器; 2—YAG 放大器 3—KDP 倍频晶体; 4— 45° $1.06\ \mu\text{m}$ 与 $0.53\ \mu\text{m}$ 分光镜; 5、6— 45° $1.06\ \mu\text{m}$ 全反射镜; 7—光束复合镜 (45° $1.06\ \mu\text{m}$ 高透, 可见宽带全反); 8—染料激光全反射镜; 9—ZnF₂ 重火石玻璃布儒斯特角色散棱镜; 10—染料盒; 11—染料激光器输出镜; 12—取样分光板; 13—染料激光倍频晶体; 14—实验晶体; 15—石英色散棱镜; 16—单色仪

分别为 $20 \times 20 \times 34$ 、 $16 \times 16 \times 20$ 。在 90° 附近测量了相匹配角与波长的关系, 实验点列在图1和图3上, 图2的实验点取自文献[10]。从实验中得到 KDP 晶体角度为 80° 时, 与 $1.06\ \mu\text{m}$ 和频得到波长为 $0.2183\ \mu\text{m}$ 。按公式(2)计算, 在同样的晶体角度时和频波长为 $0.2207\ \mu\text{m}$, 两者相差 $2.4\ \text{nm}$ 。KD*P 晶体角度为 88° 时, 测得和频波长为 $0.2219\ \mu\text{m}$, 与按文献[9]计算值 $0.2313\ \mu\text{m}$ 相差 $9.4\ \text{nm}$, 与按文献[8]给出的数据计算值 0.1992

μm 相差 $22.7\ \text{nm}$ 。

$218.3\ \text{nm}$ 激光输出用 WJ-J1 激光能量计测量得到 $53\ \mu\text{J}$, 相对染料激光的转换效率近 0.5% 。预计还会做得更强些, 因为 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光有足够强的峰值功率。适当选择晶体长度对参量上转换在理论上可得到大于 100% 的能量转换效率^[10], 再加上实验中所使用的光束复合镜和反射镜都不是专门设计的, 光路元件很多对紫外波段的损耗是相当大的, 在我们的实验中都没有去掉这些损耗。

参考文献

- [1] R. Cook; *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**, 72.
- [2] K. Kato; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**, No. 11, 583.
- [3] F. B. Ounning, F. K. Tittel; *Opt. Commun.*, 1973, **7**, 181.
- [4] J. M. Haibout; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-15**, No. 10, 1176.
- [5] K. Kato; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, No. 8, 810.
- [6] F. M. Johnson, J. A. Buardo; *Laser Focus*, 1967, **3**, No. 6, 31.
- [7] F. Zernike; *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**, 210.
- [8] R. A. Baumgartner, R. L. Byer; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-15**, No. 6, 446.
- [9] G. C. Chosh; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, **QE-18**, No. 2, 143.
- [10] 杨香春等; 《激光》, 1981, **8**, No. 5, 1.

更正启事

本刊1986年第3期第173页上“硫双原子分子蒸气激光器获得蓝绿激光输出”一文中发生了串行现象, 右栏第一行应在第四行之下, 而整个右栏正文又应插在左栏倒数第二行至第三行之间。

这是由于我们工作中的不慎造成的, 特向作者和读者致歉。

编辑部