

# 紫外可调谐辐射的波长自动跟踪研究\*

陆祖康 洪 治 吴碧珍 范琦康 尤晨华

(浙江大学光仪系, 杭州 310027)

## 提 要

脉冲染料激光器的可见光波段辐射通过共线倍频和非共线混频实现紫外波段的连续可调谐输出。本文报道了一种闭环跟踪方法: 在调谐起始波长处, 将取样光束在垂直相位匹配方向分割成等光强的两部分, 然后在波长调谐时比较和平衡这两部分光强。对该方法在理论上作了分析并在实验中得到成功的验证。获得的自动跟踪效率大于90%。

关键词: 紫外可调谐, 波长自动跟踪。

## 一、引 言

获得波长尽可能短的可连续可调谐相干辐射一直是人们极为关注的课题。对可见光波段的相干辐射进行倍频和混频是获得高功率紫外波段连续可调谐的最有效的手段之一。新型紫外非线性晶体及新型固态可调谐相干光源的出现, 促进了对该领域的研究<sup>[1,2]</sup>。作者曾利用会聚的染料激光, 通过倍频以及将倍频光与 $1.064\mu\text{m}$ 光混频, 实现了短至 $200\text{nm}$ 的紫外波段可调谐相干辐射<sup>[3,4]</sup>。高效率波长自动跟踪仍为紫外波段扩展的关键技术, 它不仅对精密随动及自动控制系统提出相当高的要求, 而且选择波长跟踪的光学方案也是至关重要的。

通常, 波长自动跟踪有开环跟踪和闭环跟踪两种形式, 开环跟踪的典型例子是程序跟踪, 这种方法简便, 但对外界条件(如晶体更换或重新装夹, 扫描起始波长改变, 环境温度变化等)非常敏感, 易造成严重失谐现象。实现闭环控制的必要条件是建立起一个能反映相位匹配状态的反馈信号, 从而有可能对晶体的相位匹配作出自行校正。本文主要从理论上对一种被作者称为“分割光斑跟踪法”的闭环控制进行分析。

## 二、对“分割光斑跟踪法”的理论分析

图1(a)表示共线倍频时, 波长自动跟踪的光学示意图: 分束器 $BS_1$ 从倍频光输出中分出取样光束, 由滤光片 $F$ 滤去基频光后, 倍频信号光经透镜 $L$ 被分光器 $BS_2$ 在 $L$ 的焦平面处分割成两部分。图1(b)表示迎着光传播方向在 $BS_2$ 刃口处的光束末端视图, 直径为 $\psi$ 的圆表示光束的发散锥角, 垂线 $\overline{CD}$ 代表晶体方位角 $\phi$ 的方向, 它对失配不灵敏, 水平方向为匹配角 $\theta$ 方向, 晶体调至最佳状态时, 所有通过 $\overline{CD}$ 的光都被认为满足相位匹配条件, 如果 $BS_2$ 刃口与 $\overline{CD}$ 重合, 由光斑的对称性知,  $\overline{CD}$ 两侧对称部位的倍频效率是相同的,  $E_A =$

收稿日期: 1991年5月2日; 收到修改稿日期: 1991年6月17日

\* 该项研究由国家自然科学基金资助。

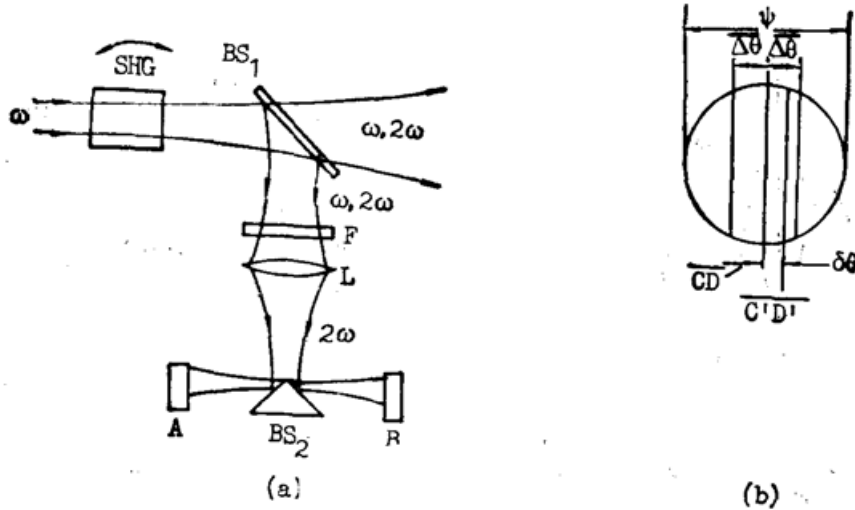


Fig. 1

(a) Optical system for wavelength auto-tracing in collinear SHG;

(b) End view of diverging rays at  $BS_2$ 

$E_B$ 。当晶体由于波长扫描而轻微失配时, 相位匹配线移至  $\overline{OD}$  线的左边或右边, 造成  $E_A \neq E_B$ 。因此, 可用  $E_B - E_A$  的符号和大小来控制晶体转动的方向和角度, 直至  $E_B, E_A$  重新平衡。在实际跟踪过程中, 用相对差  $\Delta$  作为反馈依据, 以便客观地评价角失配量的影响, 这里

$$\Delta = (E_B - E_A) / (E_B + E_A) \quad (1)$$

直观地了解“分割光斑跟踪法”工作原理可运用发散光束的平均角偏差<sup>[6]</sup>及三波耦合幅度方程的小信号解<sup>[7]</sup>加以简便的解释。但为了获得高效率的跟踪还须采用三波耦合幅度方程的严格解<sup>[7]</sup>加以分析。由于  $BS_2$  按置方法不同, 可形成远场分割及中、近场分割光斑两种情况。本文对这两种分割方式作如下分析:

### 1. 远场分割 ( $BS_2$ 放置在透镜 $L$ 的焦平面处)

假设入射光波为单色光, 光脉冲为矩形时间分布, 并将具有一定发散角  $\psi$  的入射光在非线性作用时按类球面波处理, 其强度分布为:

$$I(\theta) = I_b \exp\left[-\ln 2 \frac{\theta^2}{(\psi/2)^2}\right], \quad (2)$$

式中  $\psi$  为光束发散角的全功率半宽度 (FWHM), 以及

$$I_b = \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \psi\right)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta) d\theta = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} \psi} I, \quad (3)$$

其中  $I$  为入射光功率密度。

为了结合实验, 取下列参数为计算例子: 晶体为 I 类匹配 BBO 倍频晶体, 其切角  $\theta = 44^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ , 长度为 8.2 mm,  $\lambda^\omega = 563 \text{ nm}$ ,  $I_{563 \text{ nm}} = 28 \text{ MW/cm}^2$ , 光斑直径为 6.7 mm, 发散角  $\psi$  为 0.75 mrad, 大信号精确解的结果 (图 2~5) 表明:

(1) 角失配量  $\delta\theta$  的微小变化足以引起分割刃  $\overline{CD}$  两侧倍频光强分布的明显差异, 见图 2,  $\Delta$  与  $\delta\theta$  的定量关系由图 5 给出。

(2) 定义相对倍频效率  $\eta = \eta^{2\omega}(\delta\theta) / \eta^{2\omega}(\delta\theta = 0)$ , 它在频率跟踪时, 实际上表征着角失

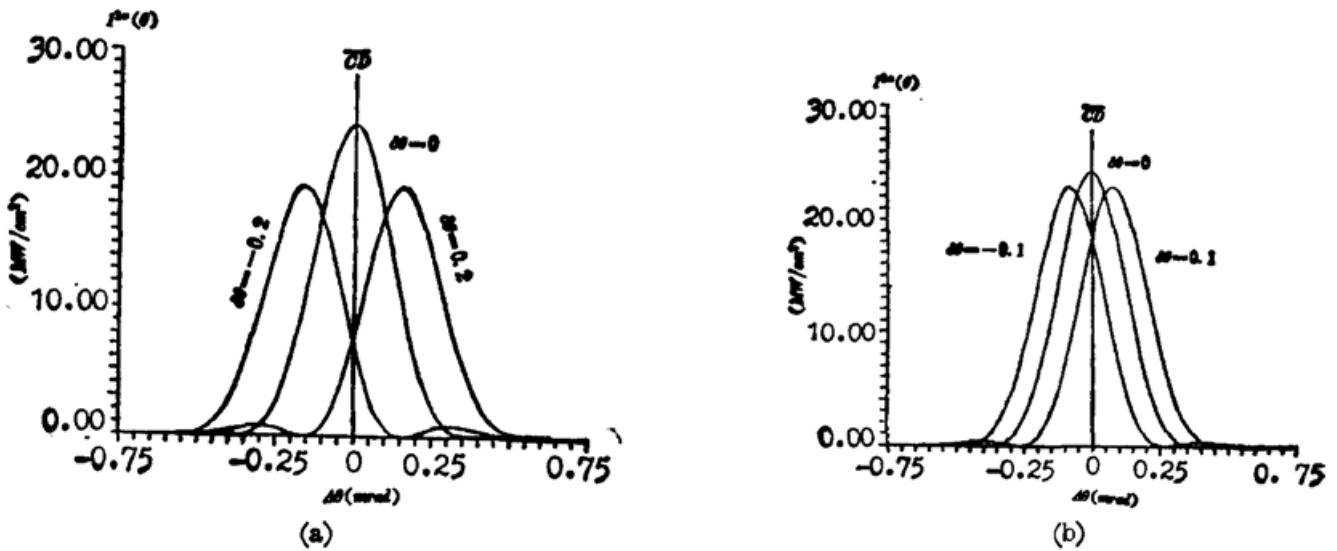


Fig. 2 The distribution of doubling light beam in different mismatching angle  $\delta\theta$ , in which  $\psi=0.75$  mrad

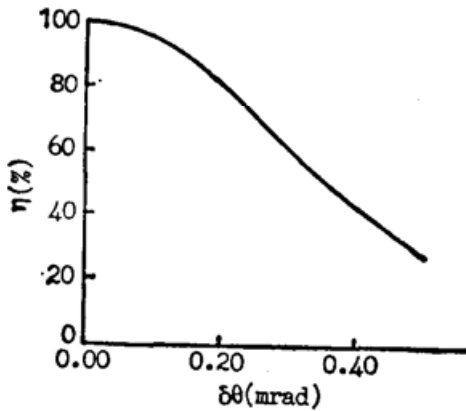


Fig. 3 The relation between relative doubling efficiency and crystal mismatching angle, in which  $\eta = \eta^{2\omega}(\delta\theta) / \eta^{2\omega}(\delta\theta=0)$

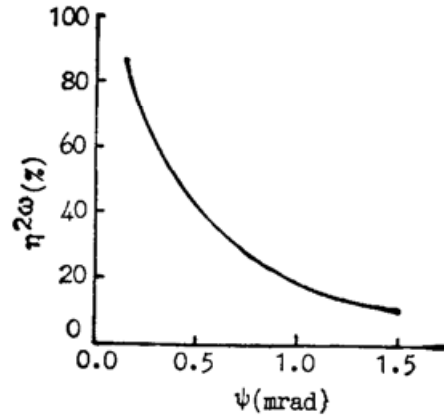


Fig. 4 Doubling efficiency vs light divergency at phase matching

谐导致的跟踪效率。因 3 表示了  $\eta$  和  $\delta\theta$  的关系, 即角失谐量和跟踪效率之间的关系, 从该

图中查出, 当  $\delta\theta$  为 0.1 和 0.05 mrad 时,  $\eta$  分别为 94% 和 98.7%。

(3) 不能过分地牺牲光束发散角  $\psi$  来追求高的跟踪灵敏度, 图 4 表示  $\delta\theta=0$  时,  $\eta^{2\omega}$  与  $\psi$  的关系, 如果  $\psi=0.5\sim 1$  mrad, 其相应的  $\eta^{2\omega}$  为  $\psi=0$  时的 40~20%。

### 2. 中、近场分割

由于  $L$  焦平面上的光斑太小, 以致有一定刃口宽度的  $BS_2$  不能有效地起分割光斑作用, 在实际应用中,  $BS_2$  只能放在光束的中、近场。近场分割计算时, 作如下近似处理: 设  $BS_2$  距晶体为  $l$ , 计算出每一

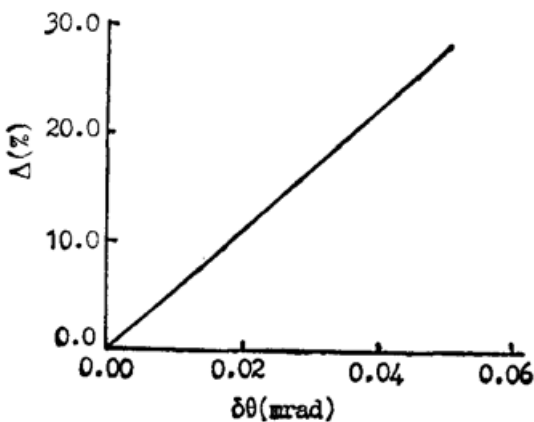


Fig. 5 The relation between  $\Delta$  and crystal mismatching angle, in which  $BS_2$  is placed in beam's far field

一个角方位  $\theta$  的二次谐波光束在  $BS_2$  刃口两侧的光能  $I_B(\theta)$ 、 $I_A(\theta)$ , 然后对整个发散角范围进行积分, 求出  $I_B$ 、 $I_A$ , 图 6 表示当  $l=40$  cm 时, 其失谐与  $\Delta$  远场分割相比(图 5)下降

28 倍, 即使如此, “分割光斑跟踪法”在近场分割时, 仍保持了足够高的跟踪灵敏度和效率。例如  $\Delta=2\%$  时, 由图 6 所示给出相应的  $\delta\theta$  值为  $0.1 \text{ mrad}$ , 再从图 3 查出, 此时的  $\eta$  为  $94\%$ 。

### 三、实验结果

#### 1. 实验装置

实验用的激光系统是由重复率为  $10 \text{ pps}$  的 YAG 激光器泵浦的脉冲染料激光器, 二次谐波脉冲能量为  $420 \text{ mJ}$ , 三次谐波能量为  $170 \text{ mJ}$ , 脉宽为  $15 \text{ ns}$ , 染料激光器在  $545\sim 580 \text{ nm}$  的可调谐波段中线宽为  $0.001 \text{ nm}$ , 脉宽  $10 \text{ ns}$ , 光斑直径  $6.7 \text{ mm}$ ,  $560 \text{ nm}$  的输出能量为  $E_{560} = 120 \text{ mJ}$ , 经偏振态转换后, 剩下  $E_{560 \text{ nm}} = 100 \text{ mJ}$ 。光束发散角为  $0.7 \text{ mrad}$ , 平均光功率密度  $I_{560 \text{ nm}} = 28.3 \text{ MW/cm}^2$ 。

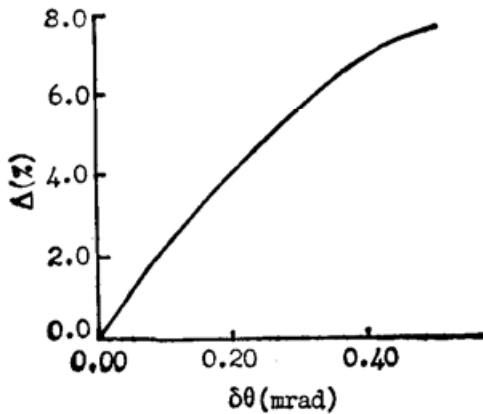


Fig. 6 The relation between  $\Delta$  and crystal mismatching angle, in which the distance from  $BS_2$  to SHG crystal  $l=40 \text{ cm}$

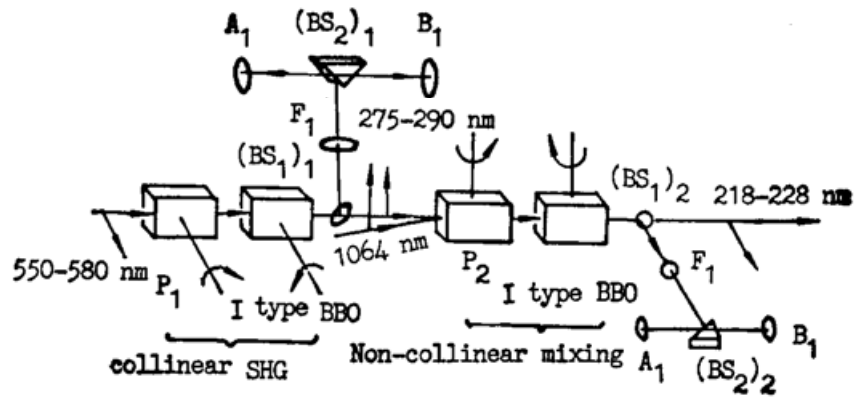


Fig. 7 Optical system of the U. V tunable radiation

紫外波段可调谐系统的光学布置如图 7 所示。光学补偿器  $P_1$ 、 $P_2$  的光学长度与对应的倍频、混频晶体的光学长度大致相等, 它们在晶体角度调谐时起补偿光束侧向位移的作用。

实验中, 采用 I 类匹配 BBO 晶体作倍频及混频, 倍频晶体长度为  $8.2 \text{ mm}$ , 混频晶体长度为  $7 \text{ mm}$ ,  $l$  在倍频及混频系统中分别为  $40 \text{ cm}$  和  $30 \text{ cm}$ , 参加混频的  $\omega_1 (1064 \text{ nm})$  光的功率密度为  $26 \text{ MW/cm}^2$ , 光束直径为  $7.2 \text{ mm}$ 。在混频系统中, 采用小夹角非共线混频, 为的是简化光的输入耦合问题, 染料倍频光 ( $\omega_2$ ) 及 YAG 基波光 ( $\omega_1$ ) 的夹角小于  $3^\circ$ 。

#### 2. 实验结果

波长调谐的准备阶段, 以  $\lambda=550 \text{ nm}$  为起始扫描波长, 转动倍频晶体, 使得  $E_A + E_B$  达到最大值, 然后调整  $BS_2$  刃口位置, 平衡  $E_B$  及  $E_A$ , 同时检查  $\Delta$  的随机起伏量, 若大多数情况下  $\Delta < 1\%$ , 表明染料激光器运转稳定可靠, 选择染料激光器的波长扫描速率为  $0.3 \text{ nm/min}$  进行重复扫描, 反复的实验表明:

(1) 在  $550\sim 570 \text{ nm}$  宽调谐范围内倍频跟踪效率稳定在  $97\sim 99\%$ , 这和理论计算的预期结果完全符合。

(2) 当调谐波段扩大至 35 nm 时, 波段两端染料激光光强过分减弱, 光束强度分布由于放大荧光辐射的干扰趋于不稳定, 此时全波段的跟踪效率下降至 92%。

(3) 一个重要的实验结果是混频跟踪效率并没有明显下降, 当染料激光器调谐范围为 15 nm 时, 混频跟踪效率仍保持在 97% 以上。

(4) 实验中还获得高功率紫外光输出, 221 nm 波长的光功率达 1.1 MW ( $E_{221 \text{ nm}} = 7.4 \text{ mJ/pulse}$ ), 200 nm 波长的光功率达 50 kW ( $E_{200 \text{ nm}} = 0.35 \text{ mJ/pulse}$ )。

### 3. 讨论

(1) 波长扫描速率对跟踪效率的影响。在取样周期(即激光脉冲发射周期)内, 若波长扫描速度太快, 造成波长失配会导致波长跟踪完全失败, 避免出现这种现象的必要条件是在取样周期内, 由波长变化造成的匹配角改变量应小于晶体的接受角, 若要求获得高的波长跟踪效率, 应注意选择更小的波长扫描速率。

(2) 非共线混频对“分割光斑跟踪法”的影响。从三波耦合的矢量图中可知, 当染料倍频光( $\omega_2$ )波长调谐时, 必将改变混频光  $\omega_3$  的波矢方向, 造成  $\omega_3$  光斑在  $BS_2$  分割平面上的侧向位移, 形成  $\Delta$  的系统误差, 因此在系统中必须尽可能减小参与混频的输入光束的夹角, 适当地减小  $l$  的长度以及确定合适的波长调谐范围。

## 四、结 论

(1) “分割光斑跟踪法”可成功地运用于紫外波段扩展的闭环控制。

(2) 为了使倍频及混频跟踪过程中有足够高的跟踪灵敏度, 必须使染料激光器输出光束保持一定的发散角, 但是计算及实验证明染料激光器固有的光束发散角(一般为  $0.5 \sim 1 \text{ mrad}$ )对该跟踪方法已经足够。

(3) 近场分割光束既有利于降低对系统的加工要求又便于操作, 此时仍保持了足够高的检测角失配量的灵敏度。

(4) 调谐范围取决于滤光片的带宽、晶体的调谐角范围及染料激光束的稳定性。

(5) 运用“分割光斑跟踪法”成功地在宽的调谐范围内实现波长调谐闭环控制, 跟踪效率大于 90%, 并获得了高效率紫外相干光辐射。

本工作得到了中国科学院福州物质结构研究所, 山东大学晶体研究所, 中国科学院上海光学精密机械研究所及复旦大学物理系的支持, 在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] H. J. M $\ddot{u}$ schenborn; *Appl. Phys.*, 1990, **B50**, No. 5 (May), 365.
- [2] K. Kato; *IEEE J. Q. E.*, 1986, **QE-22**, No. 7 (Jul), 1013.
- [3] C. You *et al.*; *Proc. ICOESE'90*, (China, Beijing), 394.
- [4] 尤晨华等;《中国激光》, 1989, **16**, No. 6 (Jun), 327.
- [5] You Chenhua *et al.*; *Chinese Physics*, 1987, **7**, No. 2 (Feb), 497.
- [6] A. Yariv; *Introduction to Optical Electronics*, (New York, Hott, Rinehart and Winston, 1976), 214.
- [7] 范琦康等编著;《非线性光学》, (江苏科技出版社, 南京, 1989), 48.

## Study on wavelength auto-tracing for generating UV tunable radiation\*

LU ZUKANG, HONG ZHI, WU BIZHENG, FAN QIKANG AND YOU CHENHUA  
(Department of Optical Eng. Zhejiang University, Zhejiang 310027)

(Received 2 May 1991; revised 17 June 1991)

### Abstract

Continuously tunable UV radiation is obtained by collinear doubling and non-collinear mixing from visible radiation of pulsed dye laser. A closed loop method, in which a sample light spot is separated into two equipower parts in the direction perpendicular to phase matching at beginning wavelength of tuning range, then the powers of two parts are compared and balanced in the tuning is reported. This method is analyzed theoretically and demonstrated successfully in our experiment. The auto-tracing efficiency is better than 90%.

**Key words:** UV tunable radiation; wavelength auto-tracing.

---

\* supported by National Natural Science Foundation.