

高效率 $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ 自泵浦相位共轭器

王威礼 郑英俊 王德煌 张合义 让庆澜

(北京大学物理系, 北京, 100871)

沈德忠 童小林

(北京人工晶体研究所, 北京, 100018)

报道对 $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ 最佳二波耦合和全内反射的自泵浦相位共轭的设计考虑, 两种考虑的主要根据是利用最大电光系数 r_{42} 和优化几何配置, 展示了相位共轭的一系列特性, 并成功地把这些非线性光学效应从 514.5 nm 扩展到 632.8 nm .

关键词: 相位共轭, 二波耦合, 铌酸钾 (KNbO_3).

1 引言

由于光诱导折射率变化的光折变效应可在室温和毫瓦量级的连续激光功率下实现, 因此在光学信息处理, 光逻辑运算和光学通讯等方面具有广泛的潜在应用前景^[1]. 人们对光折变材料的光放大和相位共轭光学的应用研究一直颇为重视, 传统的相位共轭光是通过简并四波混频实现的^[2], 用一对相干的泵浦光实现共轭光. 而自泵浦相位共轭只需要一束光便可产生反射的相位共轭光^[3], 因而受到极大关注.

KNbO_3 是一种性能优良的光折变晶体材料, 具有高频性能好和电光系数大等优点, 在二波耦合中可以获得很高的增益和放大, 但长期以来未能实现自泵浦相位共轭. 1989年美国休斯公司利用北京人工晶体研究所生长的单畴 KNbO_3 晶体, 在温度高于 62°C 条件下, 用 514.5 nm 的 Ar^+ 激光器光源和两个附加反射镜组成的外环腔实现了自泵浦相位共轭^[4], 在温度为 124°C 时达到最佳相位共轭反射率为 26%. 我们在室温下获得 $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ 外环腔自泵浦相位共轭反射率为 30~35%.

本文首次报道实现室温下异形切割 $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ 的自泵浦相位共轭, 在异形切割过程中充分考虑 KNbO_3 晶体的最大电光系数 r_{42} 和光栅矢量 K , 相对于光轴 c 的最佳取向. 采用内环腔并利用相邻两界面的内反射, 以获得高效率的自泵浦相位共轭器, 在激光波长为 514.5 nm 时反射率达 60% 以上, 激光波长 632.8 nm 时亦可达 40% 以上.

2 理论分析与设计原理

室温下 KNbO_3 晶体具有 2mm 点群对称性, 属于正交晶系, 电光系数张量为

本文 1990 年 8 月 27 日收到, 修改稿 1990 年 11 月 14 日收到.

$$r = \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

其中不为零的电光系数为 $r_{13}=28$, $r_{42}=380$, $r_{51}=105$, $r_{23}=1.3$, $r_{33}=64 \times 10^{-12} \text{ m/V}$. 由此可见, 根据电光系数各向异性的特点, 通过合理设计和实验配置, 利用最大的电光系数 r_{42} 是达到最佳二波耦合增益放大或高效率自泵浦相位共轭反射率的关键.

2.1 最佳二波耦合

光折变电光晶体材料的波耦合和光束能量转移过程主要取决于材料的固有特性(电光系数 r_{ij} 及掺杂浓度 N)和外部实验配置条件(晶体内相干光束间夹角 2θ , 光栅矢量 K_g 与光轴 C 的夹角 β 及两相干光束光强之比 r). 二波耦合中表征图象放大或能量转移的重要参数是增益 G , 它与指数增益系数 Γ 满足^[5]

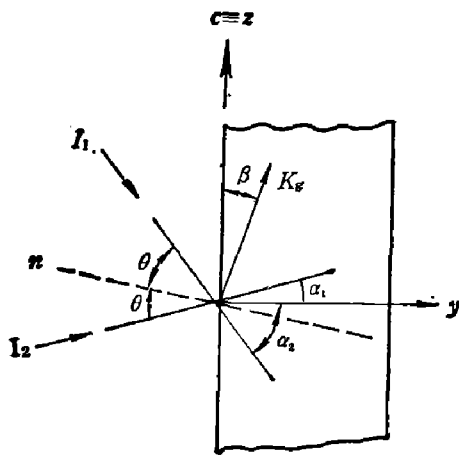
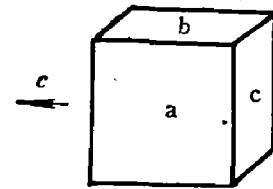


图1 二波耦合在光折变电光晶体中的实验配置图

Fig. 1 Experimental and geometrical configuration of two-wave coupling in photorefractive electro-optical crystals

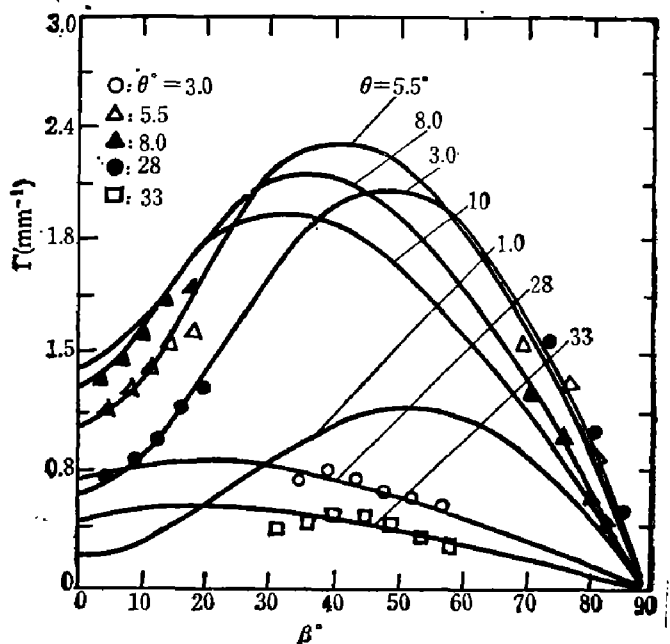


图2 指数增益系数与外部配置角度的关系 (光束为非寻常光, $N=1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $T=300\text{K}$)

Fig. 2 Exponential gain coefficient as a function of externally controlled angle (the light beams are of extraordinary polarization)

$$G = \exp(\Gamma L_{eff}), \tag{1}$$

式中 L_{eff} 是相干作用长度. 若两入射光束的单位偏振矢量分别为 \hat{e}_1 和 \hat{e}_2 , 它们在晶体内的入射角分别为 α_1 和 α_2 (参见图 1), 此时指数增益系数 Γ 为^[6]

$$\Gamma = \frac{\omega}{2nc} \times \frac{E r_{eff}}{\cos \theta}, \tag{2}$$

这里 $2\theta = \alpha_1 + \alpha_2$ 是光束 I_1 和 I_2 在晶体内的夹角, $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ 是光的圆频率, c 是光速, n 是晶体材料的本底折射率, E 是两束相干光在晶体内诱导的空间电荷电场, 并有

$$E = \frac{K_B T}{e} \frac{K_g}{1 + \left(\frac{K_g}{K_0}\right)^2} \hat{e}_1 \cdot \hat{e}_2. \tag{3}$$

式(3)中 $K_B T$ 是热能, e 是载流子电荷, 光栅矢量 K_g 的值满足

$$K_g = |K_1 - K_2| = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin \theta,$$

K_0 是表征材料特性的常数量, 仅与掺杂浓度 N 等参数有关, 即

$$K_0 = \left(\frac{N e^2}{\epsilon \epsilon_0 K_B T}\right)^{1/2}. \tag{4}$$

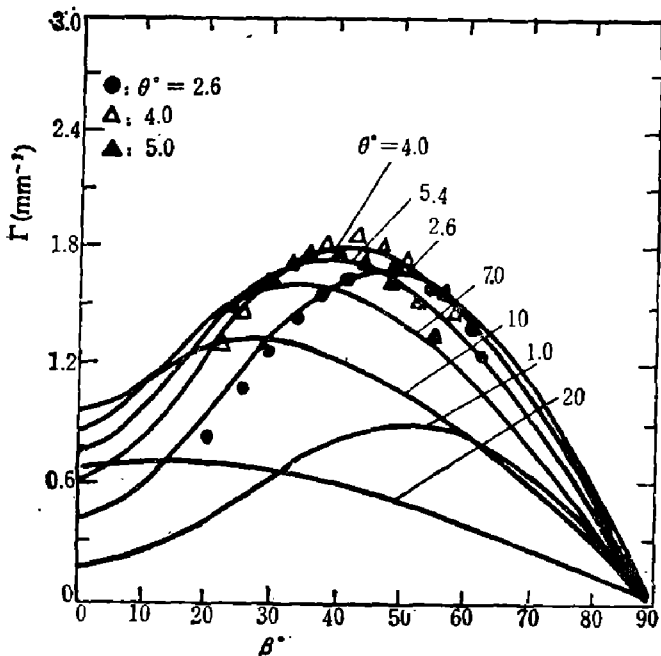
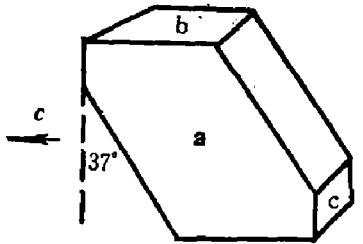


图 3 指数增益系数与外部配置角度的关系

(光束为非寻常光, $N = 1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $T = 300 \text{ K}$)

Fig. 3 Exponential gain coefficient as a function of externally controlled angle (the light beams are of extraordinary polarization)

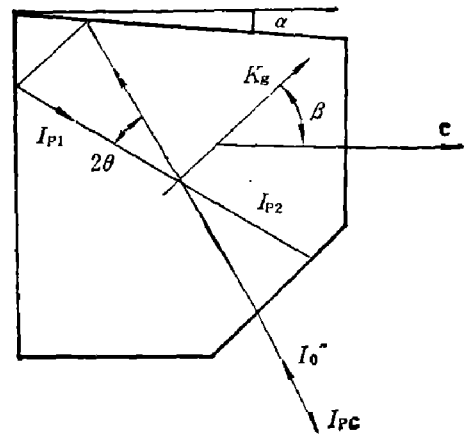


图 4 KNbO₃:Fe 异形切割自泵浦相位共轲器

Fig. 4 Total-internally reflective self-pumped phase conjugator using specially cut KNbO₃:Fe

式(4)中 ϵ_0 是真空介电常数, $\epsilon = K_g \cdot \epsilon \cdot K_g$ 是在 K_g 方向的有效介电常数. 有效电光系数 r_{eff} 取决于线性电光系数张量元 r_{ij} , 两相干光束的夹角 2θ 和光栅矢量 K_g 相对于光轴 C 的取向角为 β . 为了最大限度地利用最大线性电光系数 r_{42} , 可使两束光的偏振方向在入射平面内, 此时有效电光系数为^[7]

$$r_{eff} = \frac{1}{2} [n_2^4 r_{23} (\cos 2\theta - \cos 2\beta) + 4n_2^2 n_3^2 r_{42} \sin^2 \beta + n_3^4 r_{33} (\cos 2\theta + \cos 2\beta)] \cos \beta. \quad (5)$$

理论计算曲线如图 2 所示, 最佳二波耦合条件为 $\theta_M \approx 4 \sim 8^\circ$ 和 $\beta_M \approx 45^\circ$. 由于受表面反射限制, 一般切割得到的规则样品很难在实验中同时满足以上条件: 当两束光从 b 面(010)入射时只能达到 $\beta < 30^\circ$; 两束光从 c 面(001)入射时只能达到 $\beta > 60^\circ$; 而当一束光从 b 面另一束光从 c 面入射时, 由于光束折射的限制, 两束光在晶体内的夹角 $2\theta > 50^\circ$. 因此, 按一定的角度进行特殊切割可以解决上述矛盾. 图 3 给出入射面与出射面和光轴 C 的夹角为 53° 时耦合增益系数 I 的理论曲线, 实验上可获得满足最佳耦合条件的测量结果.

2.2 内腔式自泵浦相位共轲器

内腔式自泵浦相位共轲器利用立体角^[8]或相邻晶面的内反射^[9], 减少了界面损耗, 降低了阈值, 提高了相位共轲的反射效率, 但后者由光束反射形成的一个作用区优于前者由扇形散射形成的两个作用区^[10]. 晶体经过特殊的异形切割(参看图 4), 取顶角为 $(\pi/2 - \alpha)$, 近正入射的光束进入晶体后, 经顶角两相邻界面的内反射形成一个作用区. 当两光束的夹角满足 $2\theta = 2\alpha$ 时, 可获得最大相位共轲反射效率.

3 实验结果与分析讨论

自泵浦相位共轲器的实验样品是掺杂浓度 $N = 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体. 实验装置如图 5 所示: 用波长为 514.5 nm 的 Ar^+ 激光器或波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作光源, 经空间滤波器的准直光束经分束片后射入可转动平台上的样品, 共轲反射光经分束片反射后用光电接收元件和功率计测量并记录, 即由 D_1 和 D_2 测量 I_0 和 I'_{pc} , 自泵浦相位共轲反射率 R 为

$$R = \frac{I'_{pc}}{I_0} = \frac{1}{1 - r_0} \cdot \frac{I'_{pc}}{I_0}, \quad (6)$$

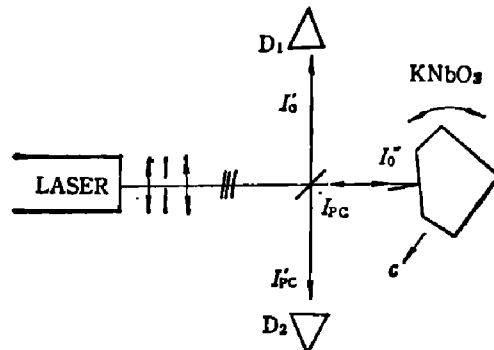


图 5 $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ 自泵浦相位共轲实验装置

Fig. 5 Experimental arrangement used to demonstrate phase conjugation in the $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ self-pumped phase conjugator

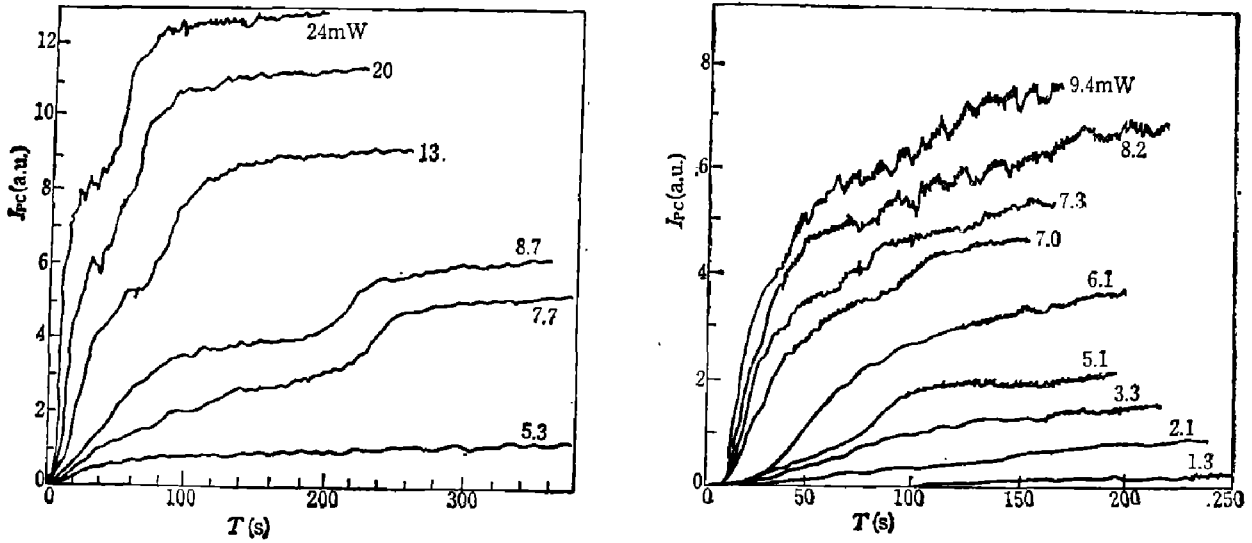


图 6 (a) 514.5 nm 和 (b) 632.8 nm 激光波长下自泵浦相位共轭光强随时间的变化关系
 Fig. 6 Self-pumped phase conjugate wave intensity as a function of response time at (a) 514.5 nm and (b) 632.8 nm laser beam

其中 r_0 是分束片的反射率。

图 6(a) 和 (b) 分别给出在 514.5 nm 和 632.8 nm 激光波长和不同入射光功率条件下, 其自泵浦相位共轭反射光随时间变化的过程, 由于异形切割 KNbO₃ 晶体自泵浦相位共轭波的建立实质上是一个简并四波混频过程, 泵浦光束 I_{p1} 是入射光束在晶体内部经过内反射形成的, 相对方向传播的泵浦光束 I_{p2} 是入射光束在晶体内部向 +C 轴方向的扇形散射造成的, 入射光束能量逐渐转移使 I_{p2} 增强, 随着入射光功率 I 的增加, I_{p2} 的建立过程亦随之缩短, 最终获得稳定的共轭反射信号和反射率。

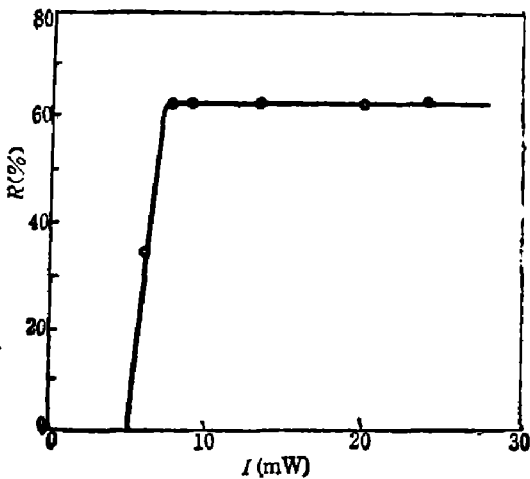


图 7 KNbO₃:Fe 自泵浦相位共轭反射率与泵浦光强的关系

Fig. 7 KNbO₃:Fe self-pumped phase conjugate wave reflectivity vs pumping intensity

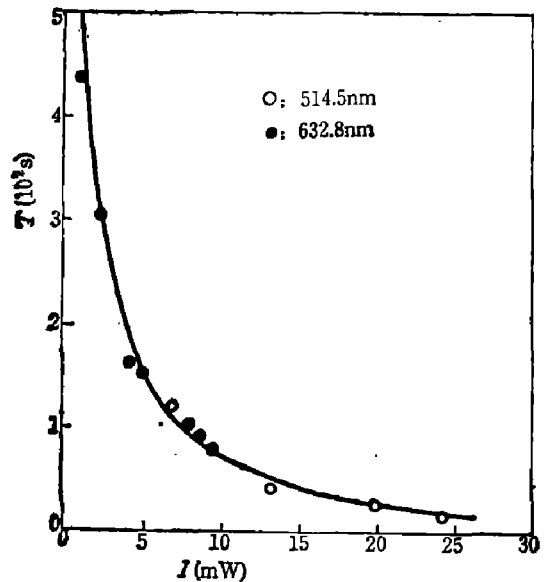


图 8 KNbO₃:Fe 相位共轭光建立时间与光强的关系

Fig. 8 Intensity dependence of conjugate wave set-up time for KNbO₃:Fe

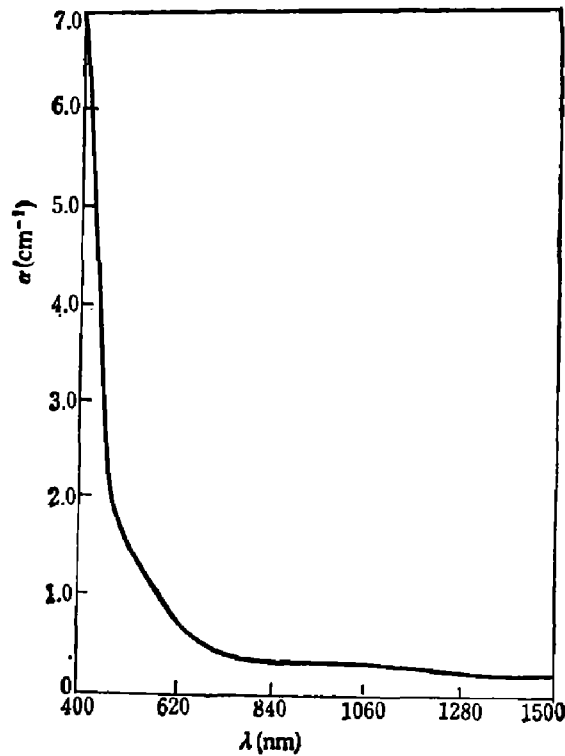


图9 KNbO₃:Fe 室温时吸收系数与波长的关系

Fig. 9 Absorption coefficient of KNbO₃:Fe vs wavelength at room temperature

图7给出室温下514.5 nm激光波长自泵浦相位共轭反射率 R 与入射光功率 I 关系的实验结果,可看到存在着一个阈值功率.当 $I < 7 \text{ mW}$ 时,可能由于扇形散射太弱,难以建立和获得相位共轭信号;而当 $I > 7 \text{ mW}$ 时,可获得恒定的相位共轭光反射率 $R \approx 60\%$.规定自泵浦相位共轭信号达到饱和稳定值90%为建立时间 T ,实验得到 T 与 I 的关系如图8所示. T 与 I 的乘积均为常量,514.5 nm和632.8 nm激光具有相同的常量值,即 $I \times T = 0.7 \text{ W} \cdot \text{s}$.随着入射光向长波方向的延伸,由于偏离Fe离子的吸收峰,导致吸收系数 α 和激发载流子数目的减少.图9为KNbO₃:Fe的室温吸收光谱.随工作波长增加,光致折射率变化效应减弱,造成632.8 nm激光自泵浦相位共轭的反射率减少到 $\sim 40\%$.

致谢:在本工作中,北京大学物理系何雪华,刘越和陈尔立等同志曾给予很大帮助,并做了大量工作,作者在此表示深切的谢意。

参 考 文 献

- 1 Anderson D Z. *Opt. Lett.*, 1986; **11**: 45
- 2 Gunter P et al. *Opt. Commun.*, 1985; **55**: 210
- 3 Macdonald E R, Feinberg J. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983; **73**: 543
- 4 Rytz D, Zhong S D. *Appl. Phys. Lett.*, 1989; **54**: 2625
- 5 Gunter P. *Phys. Rep.*, 1982; **93**: 201
- 6 Feinberg J et al. *Appl. Phys.*, 1980; **51**: 1297
- 7 Fainman Y et al. *Opt. Eng.*, 1986; **25**: 228
- 8 Feinberg J. *Opt. Lett.*, 1982; **7**: 406
- 9 Cronin-Golomb M, Brandle C D. *Opt. Lett.*, 1989; **14**: 462
- 10 Medrano O et al., *J. Appl. Phys.*, 1988; **64**: 4668

HIGH EFFICIENCY $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ SELF-PUMPED PHASE CONJUGATOR

WANG WEILI, ZHENG YINJUN, WANG DEHANG,
ZHANG HEYI, RANG QINGLIAN

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

SHEN DEZHONG, TONG XIAOLIN

(Research Institute of Synthetic Crystal, Beijing 100000, China)

The design and consideration of an optical coherent two-wave coupling and a self-pumped phase conjugator using totally internal reflection in the photorefractive $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ are reported. The exceptionally large value of the electro-optical coefficient r_{42} and an optimized geometrical configuration are considered for both cases. The nature of phase conjugation of the retroreflected beam is demonstrated. Nonlinear optical effects are extended successfully from wavelengths 514.5 nm to 632.8 nm.

Key words: phase conjugation, two-wave coupling, potassium niobate (KNbO_3).