

AgGaS₂ 晶体 II 类非共线相位匹配 CO₂ 激光参量上转换

钟 鸣 韩 凯

(西南技术物理研究所, 成都 610015)

提 要

本文报道了 AgGaS₂ 晶体 II 类非共线相位匹配 Q 开关 Nd:YAG 激光泵浦 CO₂ 激光参量上转换研究结果, 用迭代法计算了相位失配因子 $\Delta K=0$ 时的最佳非共线夹角。当泵浦功率密度为 6 MW/cm^2 和晶体长度为 4.7 mm 时, 功率转换效率达 16.1% , 并且首次采用硅雪崩光电二极管接收和频信号。

关键词: 参量上转换, 相位匹配, 非线性光学。

一、引 言

利用参量上转换探测红外激光辐射, 由于无须低温冷却, 因而受到人们的重视。Itabe 等首次报道了一台脉冲 $10.6 \mu\text{m}$ CO₂ 激光雷达的实用探测装置^[1], 用于探测几公里外的大气溶胶的雷达后向散射信号, 估计其探测灵敏度比直接探测高两个数量级。AgGaS₂ 晶体透明波段从 $0.5 \mu\text{m} \sim 12.5 \mu\text{m}$, 属于 $\bar{4}2m$ 点群, 具有较大的非线性系数 ($d_{36} = 18 \times 10^{-12} \pm 30\% \text{ m/V}$)^[2] 和损伤阈值 (20 MW/cm^2)^[3], 是近红外波段理想的非线性光学材料之一。Itabe 等讨论了红外波段 AgGaS₂ 晶体最佳的 Sellmeier 方程系数。^[4] Andreev 曾采用 II 类非共线相位匹配方式在 AgGaS₂ 晶体中进行了 $10.6 \mu\text{m}$ 激光参量上转换, 获得了 9% 的功率转换效率^[5]。

本文报道了 CO₂ 激光在 AgGaS₂ 晶体中采用 II 类非共线相位匹配参量上转换成近红外辐射的研究结果。用迭代法计算了非共线入射夹角 α 与波矢差 ΔK 的关系, 确定了使 $\Delta K=0$ 的最佳入射夹角, 并进行了实验验证, 获得了 16.1% 的功率转换效率, 接近理论值 23.3% 。

二、最佳非共线入射夹角的计算

从三波相互作用耦合波方程出发, 假设泵浦光的耗散可以忽略不计, 并假设晶体在信号光频率 ω_{ir} 及和频光频率 ω_{up} 处吸收损耗为 0, 则功率转换效率为^[6]

$$\eta = \frac{P_{up}(l)}{P_{ir}(0)} = \frac{\omega_{up}}{\omega_{ir}} g^2 \left[\frac{\sin(\sqrt{(\Delta K)^2 + g^2} \cdot \frac{l}{2})}{\sqrt{(\Delta K)^2 + g^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$g^2 = \frac{2 \nu_{ir} \omega_{up} d_{eff}^2}{n_{ir} \cdot n_p \cdot n_{up}} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{3/2} I_p,$$

$$\Delta K = |\Delta \mathbf{K}| = |\mathbf{K}_{up} - \mathbf{K}_{ir} - \mathbf{K}_p|,$$

式中 I_p 为泵浦光功率密度, 下标 ir, p, up 分别代表红外信号, 泵浦光及和频信号。

分析(1)式可知, 波矢差 ΔK 为 0 是获得高转换效率的重要条件。当 $\Delta K = 0$ 时, 其转换效率为:

$$\eta = \frac{\omega_{up}}{\omega_{ir}} \sin^2 \frac{g \cdot l}{2} \quad (2)$$

在非共线的相位匹配过程中, 红外信号光波矢与泵浦光波矢有一非共线入射夹角 α , 图 1 为 $e+o \rightarrow e$ II 类非共线相位匹配示意图。由图可得:

$$\Delta K = (\mathbf{K}_{up} - \mathbf{K}_p - \mathbf{K}_{ir}) \cdot \mathbf{Z}$$

$$= K_{up} - [K_p \cos \beta + K_{ir} \cos(\alpha - \beta)], \quad (3)$$

$$K_{up} = \{ [\sin^2(\theta_p + \beta) / (n_{up}^e K'_{up})^2 + [\cos^2(\theta_p + \beta) / (n_{up}^o K'_{up})^2] \}^{-1/2}, \quad (4)$$

$$K_{ir} = \{ [\sin^2(\theta_p + \alpha) / (n_{ir}^e K'_{ir})^2 + [\cos^2(\theta_p + \alpha) / (n_{ir}^o K'_{ir})^2] \}^{-1/2}, \quad (5)$$

$$K_p = n_p^o K'_p, \quad (6)$$

$$\beta = \sin^{-1} [K_{ir} \sin \alpha / (K_{ir}^2 + K_p^2 + 2K_{ir} K_p \cos \alpha)^{1/2}], \quad (7)$$

式中 $K' = 2\pi/\lambda$, θ_p 是晶体光轴与泵浦光波矢的夹角, α 是泵浦光波矢与红外信号光波矢的夹角, 而 β 则是和频光波矢与泵浦光波矢的夹角。

由(3)~(7)式可知, ΔK 可以表达为变量 θ_p 和 α 的函数, 我们利用计算机采用叠代法求 ΔK 最小时的 θ_p 和 α 值。首先给定一 θ_p 值, 然后给定一 α 值, 代入(3)~(7)式计算 ΔK , 给 α 一小改变, 重复上述过程。然后再改变 θ_p , 重复整个过程。当 ΔK 最小时的 θ_p 和 α 分别定义为相位匹配角和最佳入射角, 其计算结果为:

相位匹配角 $\theta_p^i = 38.7^\circ$, 最佳入射角 $\alpha^i = 0.68^\circ$ 时, $\Delta K = 0.0000$ 。因为在实际中, 两光束的耦合很难完全调准, 实际上大都处于非共线的状态, 因此上述计算就更具有实际意义。图 2 为 $\theta_p = 38.7^\circ$ 时 ΔK 随 α 变化的曲线。可知 α 在 $0^\circ \sim 1^\circ$ 的范围内, ΔK 均小于

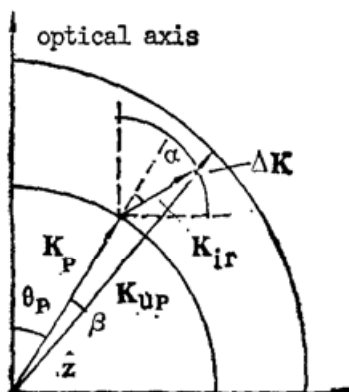


Fig. 1 Phase matching

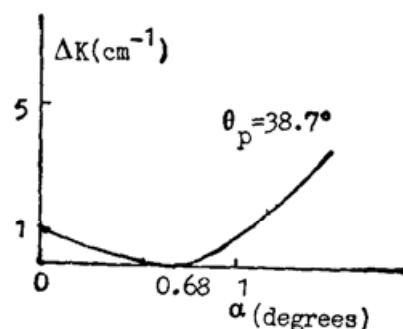


Fig. 2 Minimization of ΔK for $\theta_p = 38.7^\circ$

1.0 cm^{-1} , 远小于 g 值, 从而在一定条件下, 功率转换效率确可由 (2) 式表示。

三、实验装置及结果

实验装置如图 3 所示。1——染料调 Q, 偏振输出的 Nd:YAG 激光器 (重复频率 0.5 Hz, 脉宽 7 ns); 2——镀金反射面; 3——稳频偏振的 CW CO₂ 激光器; 4——小孔光阑; 5——AgGaS₂ 非线性晶体 ($l=0.47 \text{ cm}$); 6——偏振棱镜、闪耀光栅及干涉滤光片组成的滤光元件; 7——SPD-052 硅雪崩光电二

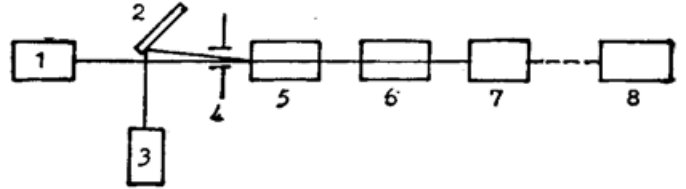


Fig.3 Schematic diagram of the apparatus

极管; 8——示波器。以偏振, 稳频的 CW CO₂ 激光作为红外信号源 ($P(20)$ 支, $10.591 \mu\text{m}$, e 光), 染料调 Q 偏振 Nd:YAG 激光作为泵浦源 (0.5 Hz , $1.064 \mu\text{m}$, o 光), 在 AgGaS₂ 晶体中进行三频非线性相互作用, 产生 $\lambda_3 = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) = 0.967 \mu\text{m}$ 的和频信号 (e 光)。经由偏振棱镜, 闪耀光栅, 干涉滤光片组成的滤光元件滤除泵浦光后, 首次采用 SPD-052 硅雪崩光电二极管代替光电倍增管接收和频信号, 降低了接收元件的使用电压, 减小了体积, 增加了防震性能, 朝实用化方向前进了一步。

实验结果:

1. 相位匹配角和最佳入射角

晶体抛光面法线与晶体光轴所成夹角 38° , 红外信号与泵浦光的非共线夹角通过调节图 3 中 2——镀金反射面和 3——CO₂ 激光器来控制。相位匹配角与最佳入射角的理论值是 $\theta_p^i = 38.7^\circ$, $\alpha^i = 0.68^\circ$, 我们测得的实验值为 $\theta_p^e = 38.8^\circ (\pm 0.1^\circ)$, $\alpha^e = 0.5^\circ (\pm 0.1^\circ)$ 。

2. 转换效率

为避免晶体的光学损伤, 我们限制泵浦光功率密度在 6 MW/cm^2 以下, 按 (2) 式计算其理论转换效率为 23.3%。

转换效率的测量是通过直接测量入射到晶体表面的红外信号功率和间接测量输出的和频信号功率, 间接测量由图 3 中 6——泵浦光滤除元件, 7——SPD-052 硅雪崩光电二极管, 8——示波器所组成的经过 $1.06 \mu\text{m}$ 间接定标的测量系统完成, 测得功率转换效率为 16.1%。

实验转换效率低于理论值的原因: (1) 晶体光学质量不均匀, (2) 泵浦光模式不好, 发散角大 (3.5 mrad), (3) 晶体的吸收系数不为零, AgGaS₂ 晶体在 $0.967 \mu\text{m}$ 和频光处, $1.064 \mu\text{m}$ 泵浦光处和 $10.6 \mu\text{m}$ 红外信号光处吸收系数分别为 2.7 cm^{-1} , 2.5 cm^{-1} 和 1.8 cm^{-1} [3]。

实验所用的 AgGaS₂ 晶体由斯坦福大学 R. L. Byer 教授所提供, 作者表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Toshikazu Itake, Jack L. Bufton; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 13 (Jul), 2381.
- [2] G. D. Boyd, H. Kasper *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1971, **7**, No. 12 (Dec), 563.
- [3] P. J. Kupecek, C. A. Schwartz *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1974, **QE-10**, No. 7 (Jul), 546.
- [4] T. Itabe, J. L. Bufton; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 16 (Sep), 3044.
- [5] S. A. Andreev, I. N. Matveev *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1977, **7**, No. 3 (Mar), 366.
- [6] S. A. Andreev, N. P. Adreeva *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1980, **10**, No. 9 (Sep), 1157.

A noncollinear type II phase-matching parametric upconversion of CO₂ laser in AgGaS₂ crystal

ZHONG MING AND HAN KAI

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610015)

(Received 28 March 1991; revised 24 June 1991)

Abstract

The investigation of noncollinear type II phase-matching parametric upconversion of CO₂ laser in a silver thiogallate (AgGaS₂) crystal pumped with a Q-switched Nd:YAG laser is reported. The computer calculation of optimizing noncollinear angle at which the phase mismatch ΔK is equal to zero is performed. The conversion efficiency was found to be 16.1% for the pump laser of 6 MW/cm² power density in a crystal of 4.7 mm long, and the converted radiation was first detected by using a Si avalanche photodiode SPD-052.

Key words: parametric upconversion; phase-matching; nonlinear optics.