

Ag₃AsS₃ 单晶中 10.6 微米讯号的上转换

杨经国 王和恩 冉瑞江 黄英秀 罗好

(四川大学物理系)

提要: 报告了淡红银矿(Ag₃AsS₃)单晶中 10.6 微米讯号上转换实验。使用未调 Q 红宝石激光作泵源,在 0.2 千瓦/厘米² 泵光功率密度下获得的最大功率转换系数为 1.6×10^{-5} (量子转换系数 $\sim 1 \times 10^{-6}$)。测量了位相匹配曲线及转换系数随泵光功率密度的变化曲线,最佳位相匹配角是 $26^\circ 30' \pm 10'$ 。对实验结果进行了讨论。

Parametric up-conversion of 10.6 μm radiation in proustite

Yang Jingguo Wang Heen Ran Ruijiang Huang Yingxiu Luo Yu

(Department of Physics, Sichuan University)

Abstract: Investigation on up-conversion of 10.6 μm radiation in proustite is reported. Under phase-matched conditions and pumped with a free-running pulsed ruby laser ($\lambda_p = 0.6943 \mu\text{m}$) ($W_p = 0.2 \text{ kW/cm}^2$) the maximum power conversion efficiency is 1.6×10^{-5} . The optimum phase-matching angle is $26^\circ 30' \pm 10'$ and the curves $\eta(Q)$ and $\eta(W_p)$ were measured. The results are discussed.

非线性光混频为红外探测提供了一种新颖方法,这就是先将红外讯号与另一可见的(或近红外)激光通过非线性晶体产生和频(频率向上转换),和频讯号位于可见光区(或近红外区)。

上转换探测方法首先由 Amstrong 和 Bloembergen 提出^[1],此后许多作者先后在 KDP^[2]、ADP^[3]、LiNbO₃^[4] 以及 LiIO₃^[5] 等晶体中实现了红外上转换。淡红银矿单晶由于具有十分宽广的透光范围(0.6~13 微米)以及相当高的非线性系数($d_{22} = 4.3 \times 10^{-8}$ 厘米/达因^{1/2})而受到重视。Warner 首先于 1968 年在淡红银矿单晶中实现了 10.6 微米辐射的上转换^[6],他使用未调 Q 红宝石激光作本机振荡器,获得了 0.6516 微米的上转换

讯号。早期工作一般采用未调 Q 红宝石激光作泵源,也有作者用 YAG 激光^[7]、He-Ne 激光^[8] 作泵源在淡红银矿单晶中实现了红外上转换。在这些工作条件下,量子转换率不超过 10^{-6} 。近年来一些作者采用超短脉冲泵浦,获得了高达 10.7% 的量子转换率^[9]。我们使用贵阳地化所生长的淡红银矿单晶,以未调 Q 红宝石激光作泵源,获得了 CO₂ 激光的 10.6 微米辐射上转换讯号输出。

一、上转换系统工作特性

一个红外上转换探测系统至少需具备以下条件: ① 优质的红外非线性晶体,它有较

收稿日期: 1981 年 3 月 9 日。

宽的透光范围,以便让红外讯号、泵浦激光以及上转换讯号通过;它较高的非线性系数,并可实现位相匹配以获得高转换率。② 波长位于可见光区(或近红外)的泵浦激光器。③ 良好的偏振系统及晶体转动装置,用以实现位相匹配。④、良好的滤色及探测系统,以便从强烈的泵浦背景中探测出上转换讯号。

红外讯号(圆频率为 ω_{ir})、泵光(ω_p)以及上转换讯号(ω_s)三波的相互作用决定了一个上转换系统的工作特性,由三波的能量、动量守恒关系决定了它们的频率及位相。三波互作用的能量、动量关系为:

$$\omega_{ir} + \omega_p = \omega_s \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{ir} + \mathbf{K}_p = \mathbf{K}_s \quad (2)$$

这里 \mathbf{K}_{ir} 、 \mathbf{K}_p 及 \mathbf{K}_s 分别为红外讯号、泵光及上转换讯号波矢量。

由(1)式并注意到 $\omega = 2\pi c/\lambda$, 则得

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{ir}\lambda_p}{\lambda_{ir} + \lambda_p} \quad (3)$$

当 $\lambda_{ir} = 10.6$ 微米, $\lambda_p = 0.6943$ 微米时, $\lambda_s = 0.6516$ 微米。即当用 0.6943 微米的红宝石激光泵浦时,上转换讯号波长为 0.6516 微米。

由(2)式并注意到 $\mathbf{K} = n\omega/c$, 若三波共线,则(2)式化为:

$$\frac{n_{ir}}{\lambda_{ir}} + \frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} \quad (4)$$

当令 ω_p 为寻常光(即 o 光), ω_{ir} 也为寻常光、 ω_s 为非常光(即 e 光)时,即在“ $oo-e$ ”匹配下,(4)式又可写为:

$$\frac{n_{ir}^o}{\lambda_{ir}} + \frac{n_p^o}{\lambda_p} = \frac{n_s^e(\theta)}{\lambda_s} \quad (4)'$$

其中 n_{ir}^o 、 n_p^o 分别为红外讯号及泵浦讯号在晶体中的 o 光折射率; $n_s^e(\theta)$ 表示上转换讯号在与晶轴成 θ 角方向上的 e 光折射率。 $n_s^e(\theta)$ 可由下式^[10]算出:

$$n_s^e(\theta) = \frac{n_s^o n_s^e}{\{(n_s^o)^2 \sin^2 \theta + (n_s^e)^2 \cos^2 \theta\}^{1/2}} \quad (5)$$

这里 n_s^o 、 n_s^e 分别为上转换讯号在晶体中的 o 光主折射率及 e 光主折射率。

方程(4)'及(5)中各折射率值均可由 Sellmeire 色散方程^[10]求出:

$$n_o^2 = 9.220 + \frac{0.4434}{\lambda^2 - 0.1264} - \frac{1733}{1000 - \lambda^2} \quad (6)$$

$$n_e^2 = 7.007 + \frac{0.3230}{\lambda^2 - 0.1192} - \frac{660}{1000 - \lambda^2} \quad (7)$$

由(6)、(7)式算出 n_{ir}^o 、 n_p^o 、 n_s^o 及 n_s^e 为:

$$\begin{aligned} n_{ir}^o &= 2.70, & n_p^o &= 2.96, \\ n_s^o &= 3.00, & n_s^e &= 2.72. \end{aligned}$$

将以上各值代入(5)、(4)'即可解出位相匹配角:

$$\theta = 24^\circ 56' \quad (8)$$

它表示,为获得动量匹配(即动量守恒)需使入射波矢(即 \mathbf{K}_p 、 \mathbf{K}_{ir})在晶体内与光轴夹角为 θ , 对正入射,也即外角为 θ 。

实际工作中较难完全实现三波共线,在接近共线的情况下,匹配角 θ 将稍有偏离,可以由 $\Delta\mathbf{K}$ ($\Delta\mathbf{K} = \mathbf{K}_{ir} + \mathbf{K}_p - \mathbf{K}_s$) 的最小化计算^[11], 确定出与(8)式所得之 θ 角之偏离。本实验实际采用的位相匹配方案如图 1 所示。

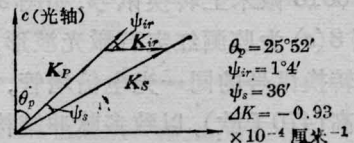


图 1 动量匹配矢量图

二、实验装置及实验结果

图 2 表示实验装置方框图。未调 Q 红宝石激光由 0.6943 微米窄带滤色片衰减氙灯光后由格兰棱镜起偏, CO_2 激光的 10.6 微米辐射经 Ge 板反射后与红宝石激光经混光器混合, 然后进入淡红银矿晶体(晶体长 $l = 1$ 厘米), 由晶体产生的 0.6516 微米和频讯号、剩余 10.6 微米讯号和 0.6943 微米激光

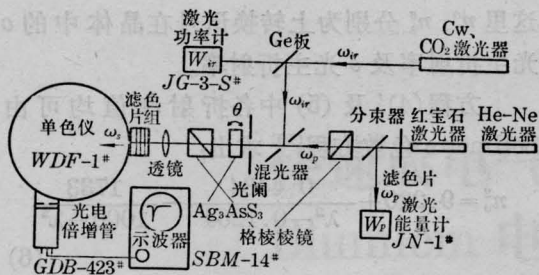
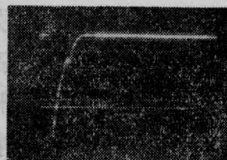


图2 上转换实验装置方框图

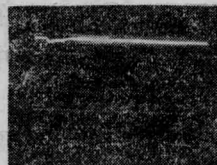
一起进入检偏格棱镜，隔去 10.6 微米辐射，衰减 0.6943 微米讯号（正交格棱镜对讯号衰减量 $\sim 10^3$ ）；残留的 0.6943 微米讯号及上转换讯号进入中心波长为 0.6516 微米的窄带滤色片组（共五片组成，每片中心波长约为 0.6516 微米 ± 10 埃，带宽 30 埃，每片 0.6516 微米透光率 $\sim 50\%$ ，五片对 0.6516 微米总透光率实测为 0.095，而对 0.6943 微米总衰减量 $> 10^{10}$ ），使本振讯号受到有效抑制。最后，0.6516 微米的上转换讯号经单色仪到达光电倍增管并由示波器显示。使用激光功率计、能量计分别监测 10.6 微米讯号功率及 0.6943 微米泵浦能量，以进行定量测试。所用晶体通光法线与光轴夹角为 $26^\circ \pm 10'$ ，晶体方位转动精度 $2'/格$ 。

通过调整位相匹配角，获得了信噪比很高的 0.6516 微米上转换讯号，如图 3 照片所示。图 3(c) 为监测红宝石激光波形，使用了测量上转换讯号的同一光电倍增管，由于负载电阻高（470 千欧），以致多脉冲结构已被延展成一片；图 3(b) 为未加入 10.6 微米讯号时，由光电倍增管探测到红宝石激光的波形，即为未加讯号的系统总背景；图 3(a) 为在图 3(b) 的基础上，同时加入 10.6 微米讯号得到的波形，它是由 10.6 微米讯号与红宝石激光 0.6943 微米波混频的结果，由滤色片及单色仪转鼓读数，可确认它是 0.6516 微米的上转换讯号。由图可见，信噪比十分高，现象重复性良好。实验条件是： $W_p = 0.2$ 千瓦/厘米²， $W_{ir} = 5$ 瓦， $\theta = 26^\circ 30' \pm 10'$ 。

测量了上转换效率 η （量子转换率）。输



(a) 0.6516 微米上转换讯号



(b) 背景波形
(未加 CO₂ 激光时)



(c) 0.6943 微米红宝石激光波形

图 3

(时标：1 毫秒/格；Y：0.5 伏/格)

入的 10.6 微米辐射功率在光阑后实测为 5 瓦，输出的 0.6516 微米上转换讯号的功率大小是使用 0.6328 微米的 He-Ne 激光讯号进行间接定标的，标定结果近似为 30 微瓦/伏，从图 3(a) 可见，讯号幅值约为 5.3×0.5 伏，表示讯号功率约为 80 微瓦。标定过程如下：令 1 毫瓦 He-Ne 激光束通入系统，在起偏镜后实测为 0.5 毫瓦，通过检偏格棱镜后衰减为 0.5×10^{-3} 毫瓦，经透镜会聚入狭缝，其宽度同上转换实验条件一致，单色仪转鼓指示 0.6328 微米处，经光电倍增管并进入示波器，测量通光与遮光时的电压幅度差为 0.18 伏，即表示系统灵敏度为 0.5 微瓦/0.18 伏或为 2.78 微瓦/伏。对于 0.6516 微米讯号，由于受到滤色片组的衰减作用，灵敏度需除以透光率因子，即为 $2.78 \text{ 微瓦/伏} \div 0.095 = 29.3 \sim 30 \text{ 微瓦/伏}$ 。从而可计算 η 为

$$\eta = \frac{W_s \lambda_s}{W_{ir} \lambda_{ir}} \sim 0.98 \times 10^{-6}$$

相应的功率转换率为 $W_s/W_{ir} \sim 1.6 \times 10^{-5}$ 。

测量了 η 随位相匹配角变化的曲线

$\eta(\theta)$ 如图 4 所示。最佳位相匹配角为

$$\theta_m = 26^\circ 30' \pm 10',$$

半宽度 $\sim 30'$ 。

测量了 η 随泵光功率密度 W_p 变化的曲线如图 5 所示，近于线性关系。由图 3(a) 与 3(c) 的相似可以很好地说明这一线性关系，但图 5 曲线为实测结果。

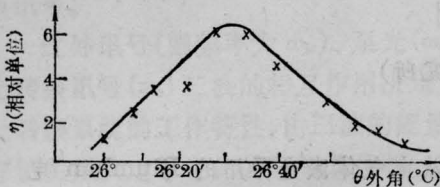


图 4 $\eta(\theta)$ 实验曲线

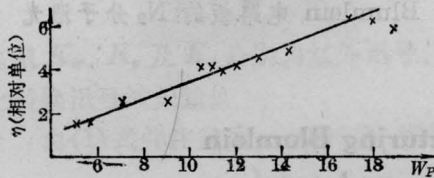


图 5 $\eta(W_p)$ 实验曲线

目前上转换探测尚未实用化，主要障碍在于转换率较低。文献[9, 12]中采用超短脉冲泵浦大大提高了转换率，但探测上存在不少困难，看来红外上转换探测的实用化还有待于进一步的研究工作，特别是非线性系数

更高的优质红外材料研制工作的进展。

曾试验使用脉冲 CO_2 激光与红宝石激光进行同步泵浦，以期产生 0.6516 微米和频激光输出，目前尚未获得结果。

实验工作受到周晋一副教授指导，刘新民同志参与了部分实验，晶体加工承吕梅同志大力协助，谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] J. A. Armstrong *et al.*; *Phys. Rev.*, 1962, **127**, 1918~1939.
- [2] F. M. Tohnson, J. A. Duardo; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1966, **QE-2**, 296.
- [3] N. I. Adams, P. B. Schoefer; *Proc. IEEE*, 1963, **51**, 1366~1367.
- [4] J. E. Midwinter, J. Warner; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, 519~523.
- [5] J. R. Gurski; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**, 273.
- [6] J. Warner; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **12**, 222~224.
- [7] A. J. Alcock, A. C. Walker; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**, 467.
- [8] E. K. Pfitzer *et al.*; *Opt. Commun.*, 1971, **3**, 277.
- [9] D. N. Nirogosyan; *Sov. J. Q. E.*, 1975, **5**, No. 11, 1378~1379.
- [10] F. T. 阿雷克, E. O. 舒尔茨-杜波依斯主编; 《非线性光学和材料》，激光手册，四分册。
- [11] R. F. Lucy; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, 1329.
- [12] P. G. Krywkov *et al.*; *Sov. J. Q. E.*, 1975, **5**, No. 10, 1236~1239.

(上接第 36 页)

参 考 文 献

- [1] S. R. Rockwood; *Laser Induced Processes in Molecules*, Ed. by K. L. Kompa, S. D. Smith, 1978, 2.
- [2] W. Ruderman; *Laser Focus*, 1979, **15**, No. 5, 68.
- [3] J. D. Shipman, Jr.; *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **40**, 39. R. W. Waynat *et al.*; *Proc. IEEE*, 1971, **59**,

679. I. N. Knyazev *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **11**, 805.
- [4] 北京光电技术研究所氮分子激光器研制组; 《激光与光学》, 1977, No. 2, 22.
- [5] 广东省 701 所 302 组; 《激光》, 1978, **5**, No. 2, 33.
- [6] 金耀根等; 《激光》, 1979, No. 2, 26.
- [7] 热压胶合 Blumlein 传输线制备工艺及配方技术资料 (中国科学院化学研究所内部资料), 1979.