

CO₂激光可调谐边带的获得及特性测量*

韩健德 杨维纲 徐绍华 王明吉
(大连理工大学物理系)

吴桂林 滕永杰 初世超
(大连理工大学激光教研室)

提 要

采用由 CdTe 晶体构成的微波行波调制器,实现了用可调谐微波对 CO₂ 激光的高频电光幅度调制,在 CO₂ 激光各输出支线的两侧可产生 4.4 GHz 范围内连续调谐且频率可直读的边带。对边带特性进行了测量,结果与理论预期符合得较好。

关键词: 电光调制; 边带。

用具有电光效应的 CdTe 晶体将可调谐微波与稳频 CO₂ 激光混频,产生 CO₂ 激光的可调谐边带,这是一种获得中红外区(波长 10 μm 左右)可调谐相干光源的有效方法。这种光源的不仅调谐范围宽,而且频率纯度高,此外,尚有频率可直读的独特优点。通过查表^[1]得到稳频 CO₂ 激光输出谱线的中心频率 f_L ; 再用微波频率计以很高精度测得微波频率 f_M , 则边带的频率 f_{SB} 可简单地由 $f_{SB} = f_L \pm f_M$ 精确确定,大大便利了光谱工作。

本文将报道被动稳频的 CO₂ 激光与在 8~12.4 GHz 范围内、连续调谐的微波、在由 CdTe 晶体构成的宽带行波调制器中混频来获得可调谐边带。对边带功率及其与微波功率、激光功率和微波频率的关系进行了测量,客观地评价了此行波调制器及边带光源系统的性能。

一、行波调制器的原理及结构

在本工作中,行波调制器是获得边带的关键器件,其物理基础是 CdTe 晶体的电光效应^[2,3]。CdTe 属于 $\bar{4}3m$ 晶体,为使电光效应最强,晶体的切割方式以及微波及 CO₂ 激光线偏振方向和传播方向应满足如图 1 所示的关系。线偏振的 CO₂ 激光通过晶体后,其在晶体新折射率主轴 x' 、 y' 上的两个偏振分量将产生位相差(Γ),最大位相差为^[3,4]

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{\max} &= \left(\frac{2\pi}{\lambda_L} \right) n_0^3 \gamma_{41} E_M L_M \operatorname{sinc} \left(\frac{\omega_M L_M}{2u} \right), \\ \frac{1}{u} &= \frac{1}{v_L} - \frac{1}{v_M}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $n_0^3 \gamma_{41}$ ($= 10 \times 10^{-11}$ m/V) 为 CdTe 晶体电光系数, λ_L 为 CO₂ 激光在真空中波长, E_M

收稿日期: 1989年5月17日; 收到修改稿日期: 1989年7月17日

* 本工作得到了国家自然科学基金的资助。

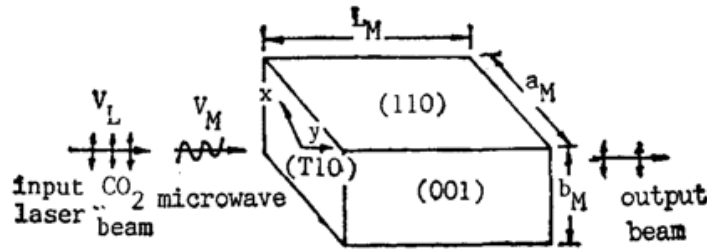


Fig. 1 Theory of electrooptic modulation

为微波电场峰值, ω_M 为微波角频率, L_M 为晶体长度, u 为反映激光速度 v_L 与微波相速度 v_M 匹配状况的参量。在晶体出射面处的合成光, 除作为载波的 CO₂ 激光外, 尚有各阶频率的边带光。与入射光偏振方向一致的主要成分是载波; 而与载波偏振方向垂直的主要频率成分是第一阶边带光, 其频率 f_{SB} 及对应的功率 P_{SB} 分别为

$$\left. \begin{aligned} f_{SB} &= f_L \pm f_M, \\ P_{SB} &\doteq \frac{P_L}{16} \Gamma_{\max}^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 P_L 为载波功率。若将 CdTe 晶体填充在一段截面宽为 a_M 、高为 b_M 的矩形波导中, 则 (3) 式可写成更为具体的形式^[6]

$$P_{SB} = \left(\frac{\pi}{\lambda_L} n_0^3 \gamma_{41} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\omega_M L_M}{2u} \right) \eta_0 P_M P_L L_M^2 / \left[a_M b_M \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{\lambda_M}{2a_M} \right)^2} \right], \quad (4)$$

式中 $\eta_0 (= 120 \pi \Omega)$ 为无色散波的真空波阻抗, $\epsilon_r (= 10)$ 为 CdTe 在微波频率下的相对介电常数, λ_M 为真空中的微波波长。定义行波调制器的载波功率 P_L 向边带功率 P_{SB} 的转换效率为

$$\eta_{TW} = P_{SB} / P_L \quad (5)$$

行波调制器的结构如图 2 所示。截面尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 长度 L_M 为 15 mm 的 CdTe 晶体装在内表面镀银的铜质矩形波导段中。在 CdTe 晶体的两侧是截面尺寸均为 $2.55 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的白宝石 (Al_2O_3 , $\epsilon_r = 9.5$)。用白宝石代替部分 CdTe 晶体来填充波导段, 既节约昂贵的 CdTe 晶体材料, 又可通过选择合适的白宝石长度来辅助实现晶体填充波导段与相邻渐变式双脊波导的阻抗匹配, 减小对入射微波的反射。经过对调制器整体驻波比测量确定的最佳白宝石长度为 20.5 mm 。H 面弯波导窄边上内径为 3 mm 的截止圆波导, 既保证了聚焦 CO₂ 激光顺利通过 CdTe 晶体, 又能防止微波漏泄。入射微波传输到末端后, 被匹配负载完全吸收。

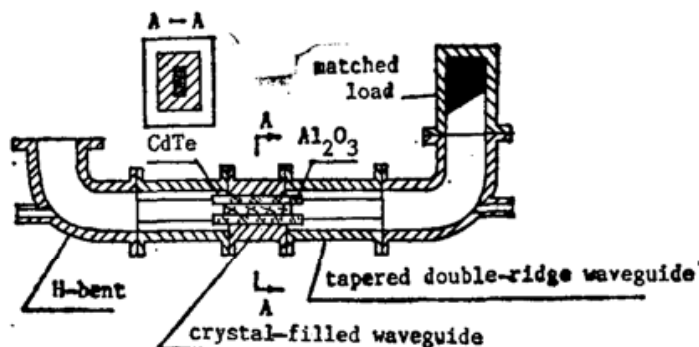


Fig. 2 Structure of travelling-wave electrooptic modulator

二、实 验

1. 边带的检出及其调谐性质的观测

图 3 是边带产生和检测系统的示意图。被动稳频的光栅选支 CO_2 激光器提供近于 10 W 的线偏振光输出, 经聚焦通过行波调制器。QH1350 微波扫频源与行波管放大器联合, 在 8~12.4 GHz 范围内提供功率近于 30 W 的连续调谐微波输出, 并可通过扫频源内部或外部方波调制其幅度, 使微波源进行间歇振荡, 其频率由扫频源上直接读出, 功率由微波功率计监测。在图 3 中边带检测系统部分, 为有效地抑制载波, 同时又尽量不损失边带, 使用了对偏振方向相互垂直的两束光有不同衰减的四镜反射式红外起偏器^[7], 光路的反射折选又加强了其对载波的衰减作用。使用装有 150 l/mm、闪耀波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 光栅的单色仪来选出单个边带并观察它的调谐特征。边带信号用液氮冷却的 HgCdTe 光伏探测器接收, 再经 OSC 9500 锁相放大器消除噪声干扰, 最后用 $x-y$ 记录仪记录。

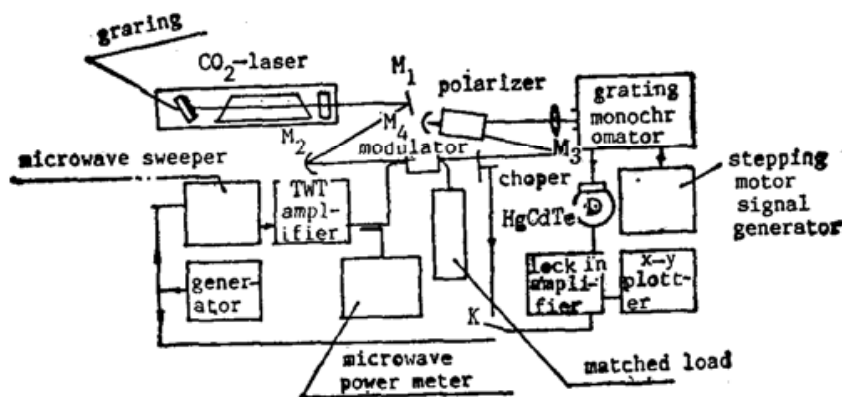


Fig. 3 Block diagram of the experiment

在实验中, 起偏器后剩余载波的光强仍超过边带光强两个量级, 经光栅衍射后, 剩余载波的第一次极大仍强于边带, 而且二者的位置几乎相同。因此, 为从载波干扰中检出边带, 我

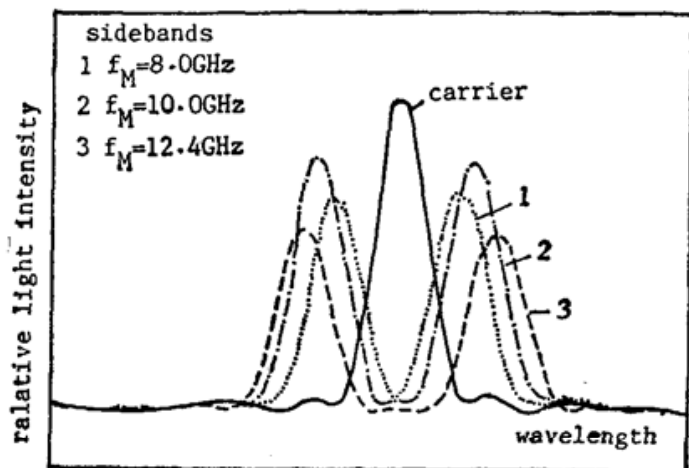


Fig. 4 Tunable features of sidebands

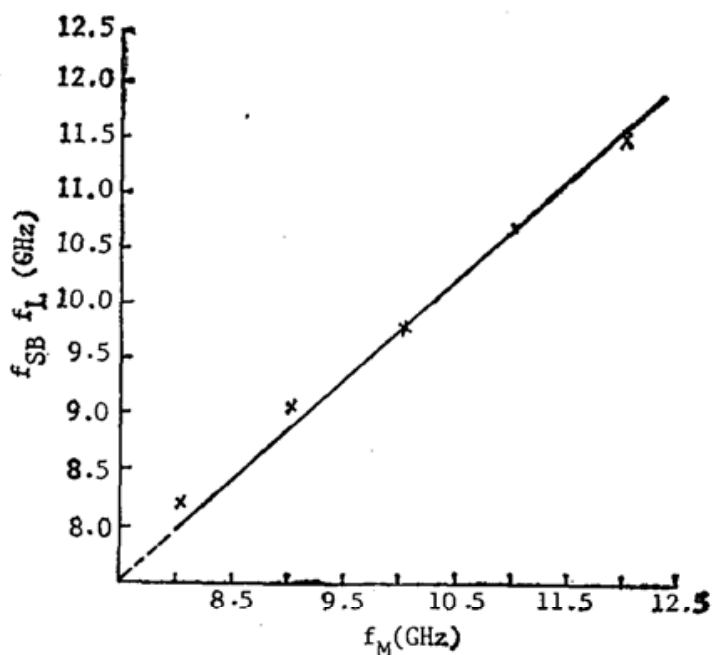


Fig. 5 Experimental relationship between frequencies of sideband and microwave

们对微波源的输出进行外方波调幅,因而边带也被同样调制,再以此外方波作为锁相放大器的参考信号,便可有效地抑制载波,从而检出边带信号。图 4 是记录到的对应于 CO₂ 激光的 10.6 μm 带 P(18) 支线的边带。从图 4 清楚地显示出边带波长(频率)随微波频率变化而相应变化的调谐特征。对 CO₂ 激光 10.6 μm 带的 P(16) 及 P(00) 支线也记录到类似曲线,证明边带调谐亦可对 CO₂ 激光的其它支线实现。图 5 给出了边带频率及微波频率的实验关系,在误差范围内与理论公式(2)符合得很好,验证了边带频率的直读性。

2. 边带功率的测量

为消除载波对边带功率测量的影响,测出淹没在载波中的较弱的边带的功率,作者采用了比较两束光相对光强的方法。测量装置由图 3 中检测部分略作更动得到,如图 6。去掉了单色仪,将 HgCdTe 探测器置于起偏器后直接探测两个边带,从而消除了单色仪衍射等损耗对边带的影响。用标定透过率 T 的固定衰减片 A 衰减起偏器后未经微波调制的 CO₂ 激光,经斩波器调制,得到与边带信号周期相同,光强亦在同一量级的交变参考光。采用 HgCdTe 探测器与锁相放大器结合,分别测量参考光与边带的相对强度,并进行比较,从而由参考光的功率推知边带的功率。在测量参考光强度时,光路 2 给 HgCdTe 探测器提供了一个直流光信号,使其光强与伴随着边带的剩余载波相当,以保证参考光与边带光强度的比较在 HgCdTe 探测器的同一直流工作点上进行。设在起偏器后未经微波调制的 CO₂ 激光的实测功率为 P'_L ,其经过斩波器与固定衰减片 A 后引起锁相放大器输出为 P_1 ,边带引起的相应输出为 P_2 ,则单位功率激光与单位功率微波相互作用下,单个边带的实际转换效率反映到起偏器后之值 η'_{TW} 为

$$\eta'_{TW} = \frac{P'_L T}{2P_L P_M} \left(\frac{P_2}{P_1} \right), \quad (6)$$

微波频率 $f_M = 10.0$ GHz 时,实测结果为 $\eta'_{TW} = 0.43$ ($\mu\text{W}/\text{W} \cdot \text{W}$) 多次测量中, η'_{TW} 的最大相对偏差为 10%,重复性较好。

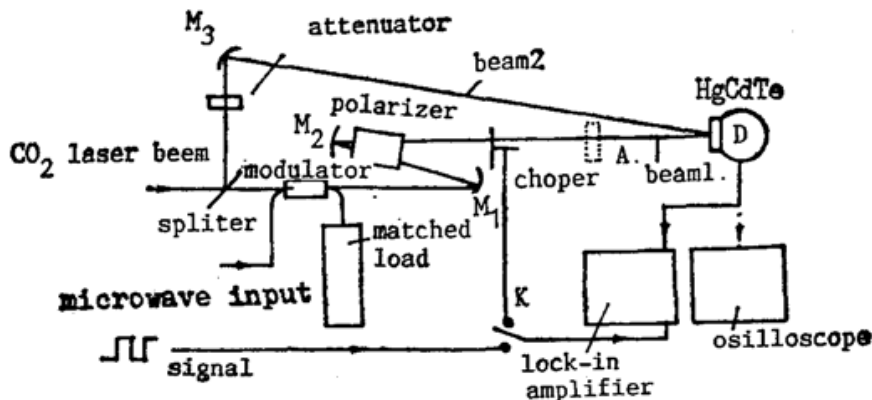


Fig. 6 Schematic diagram for measuring power of sideband

由于 P_L 是在调制器出光口处测得,其值可能会小于 CdTe 晶体中的真实值,因此由公式(6)推得的上述 η'_{TW} 结果可能会比其真实值偏大。起偏器对边带的透过率实测为 43%,由此求得在调制器后,起偏前,1 W 激光与 1 W 微波作用时产生的边带功率为 $1.0 \mu\text{W}$,这与理论值($1.17 \mu\text{W}$)符合得很好。

3. 边带功率与激光功率、微波功率以及微波频率的关系

仍采用图 6 测量装置。遮挡光路 2,直接以锁相放大器的输出反映边带功率相对值,分别测量了边带相对功率 P'_{SB} 与激光功率 P_L ,微波功率 P_M 以及微波频率 f_M 的关系。如图

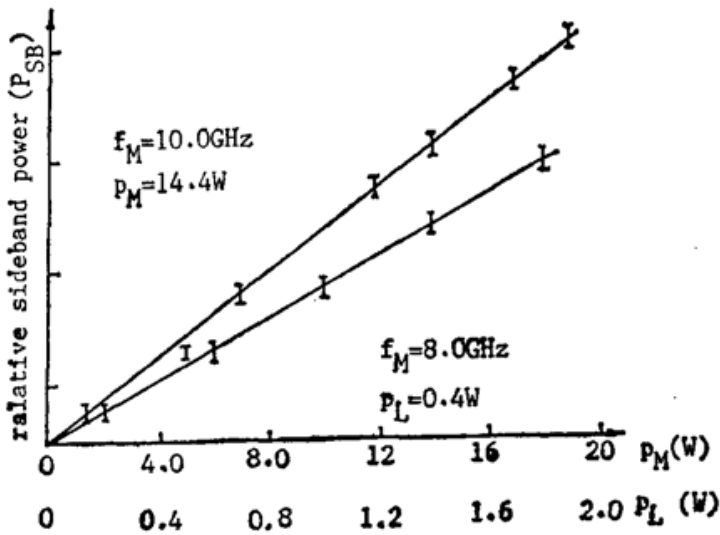


Fig. 7 Variation of sideband power with CO_2 laser power and microwave power

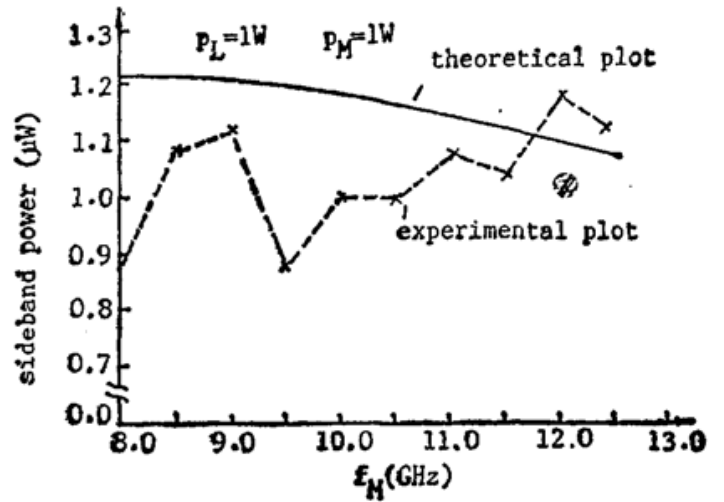


Fig. 8 Variation of sideband power with microwave frequency

7 所示,边带功率与激光功率及微波功率均成正比,与理论公式(4)相符。为便于将实际边带转换效率与理论期望值比较,利用前面对应于 $f_M = 10.0 \text{ GHz}$ 微波频率时边带功率的测量结果,将之与实测 $P'_{SB} - f_M$ 关系结合,直接给出在 P_L 及 P_M 均为 1 W 情况下调制器产生的边带功率 P_{SB} 与 f_M 的关系,如图 8 所示。由图 8 可见:实际边带的功率比较接近理论值。作者认为,这是由于白宝石的相对介电常数比 CdTe 晶体的略小;且 CdTe 晶体与白宝石之间、以及它们与波导壁间不可避免的存在着缝隙,均会减小晶体的有效介电常数,从而使实现激光与微波速度匹配的微波频率比理论值高,导致了实验曲线与理论曲线的变化趋势有所不同;由于微波功率的测量是通过一个定向耦合器分功率进行的,此耦合器的耦合比与微波频率有关;耦合出的微波功率的传输是由波导过渡到同轴线后进入微波功率计的,此传轴线的衰减系数也与微波频率有关。因此,在实验中所测得的不同微波频率下的微波功率有一定起伏,最终造成图 8 中实验曲线随微波频率变化有较明显起伏。

三、结 论

本文实现了用 $8.0 \sim 12.4 \text{ GHz}$ 微波对 CO_2 激光的高频电光幅度调制,产生了可在 CO_2 激光各支线两侧 4.4 GHz 范围内连续调谐且频率可直读的边带。实测了边带的一些特性,均与理论符合较好。根据实测结果(图 7、图 8),充分利用现有激光系统及微波系统可提供的功率,在整个调谐范围内可获得 0.1 mW 以上边带。

参 考 文 献

- [1] Charles Freed, Lee C. Bradley et al.; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **EQ-16**, No. 11 (Nov), 1195~1206.
- [2] A. Yariv; *«Introduction to Optical Electronics»*, (Holt, Rinehart and Winston, U. S. A., 1976), 245~270; 427~430.
- [3] S. Namba; *J. O. S. A.*, 1961, **51**, No. 1 (Jan), 76~79.
- [4] I. P. Kaminow, J. Liu; *Proc. IEEE*, 1963, **51**, No. 1 (Jan), 132~136.
- [5] N. Mcavoy et al.; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 2 (Feb), 473~474.

- [6] G. Magerl, W. Schupita *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 8 (Aug), 1214~1219.
[7] J. Thomas Cox, G. Hass; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 11 (Jun), 1657~1658.

Obtaining and measuring tunable sidebands of a CO₂ laser

HAN JIANDE, YANG WEIGANG, XU SHAOHUA AND WANG MINGJI

(*Department of Physics, Dalian University of Technology*)

WU GUILIN, TENG YONGJIE AND CHU SHICHAO

(*Section of Laser, Dalian University of Technology*)

(Received 17 May 1989; revised 17 July 1989)

Abstract

By using a travelling—wave electrooptic modulator containing a CdTe crystal to mix tunable microwave and a CO₂ laser output, directly readable frequency sidebands are obtained which are tunable on either side of CO₂ laser lines over 4.4GHz regions. Measurements show that the characteristics of the sidebands are in good agreement with that predicted by corresponding theory.

Key words: electrooptic modulation; sideband.