

一种设计新颖的脉冲光泵远红外激光器

潘承志 藏建明 后其国 刘秀云 唐桂萍

(电子工业部12研究所)

提要: 设计了一台宽带输出、高光束质量、栅网耦合、腔长可调的远红外激光器, 得到了 CH_3OH 的 $205.3\ \mu\text{m}$ 、 $163.9\ \mu\text{m}$ 、 $65.1\ \mu\text{m}$ 、 $233\ \mu\text{m}$ 和 HCOOH 中的 $309.23\ \mu\text{m}$ 等5条脉冲 FIR 谱线振荡输出。

A newly designed pulsed and optically-pumped FIR laser

Pan Chengzhi, Zhan Jianming, Hou Qiguo, Liu Xiuyun, Tang Guiying

(Beijing Research Institute of Vacuum Electron Devices)

Abstract: A pulsed and optically-pumped FIR laser with a mesh coupling and a stable cavity has been designed. Its cavity length can be adjusted. 5 FIR laser lines at $205.3\ \mu\text{m}$, $163.9\ \mu\text{m}$, $65.1\ \mu\text{m}$, and $233\ \mu\text{m}$ emitted from CH_3OH and $309.23\ \mu\text{m}$ from HCOOH have been obtained.

一、设计考虑

1. 腔长的选择

实验发现^[1], 在较强的泵浦能量下, 远红外输出随管长的增加而增加。但为了进行腔调谐, 腔长受到自由光谱范围的限制(它是相邻光谱极大值的间距)。

为避免出现两个或多个标准具的模式, 必须选择腔的自由光谱区大于或等于激光带宽, 即

$$d \leq \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda}$$

远红外激光带宽 $\Delta\gamma$ 一般为 50 MHz, 代入上式求得 $d \leq 3\ \text{m}$, 因此我们取 FIR 管长为 3

m。

2. 管径的选择

远红外激光管的管径越粗, 在一定的泵浦功率密度下, 会使远红外输出功率增大。但随着管径的增大, 瓶颈效应越来越严重, 这是由于振动下激光能级很难扩散到管壁消激发。因此, 管径典型数值取 $1\sim 4\ \text{cm}$, 我们取管径为 $3.6\ \text{cm}$ 。

3. 远红外窗的选择

由于金属栅网不具有密封性, 必须选择一种材料密封气体。为了得到宽带 FIR 输出和将泵浦 IR 光和 FIR 光束进行有效地分离, 又要求这种材料在 $50\sim 500\ \mu\text{m}$ 范围内具有良好的透射(或反射)性能, 在 $9\sim 11\ \mu\text{m}$

收稿日期: 1984年12月24日。

范围内具有很高的反射(或透射)性能。理论和实验证明,石英单晶在 CO_2 激光的 $9R$ 、 $9P$ 支具有良好的反射特性^[2], 在远红外波段很宽的范围内具有良好的透过特性。因此我们选取了石英单晶作为我们的远红外窗。

4. 栅网常数 g 的选择

一个金属网反射器栅和条栅的性质紧密相关, 如果它的栅网常数 g 小于波长 λ , 假定是一个垂直入射的平面波, 则两者不再是衍射光栅。在各种衍射级次中, 在 $g < \lambda$ 情况下只有零级透过, 并保留零级反射波。在离栅网的距离大于 $g/2\pi$ 时, 这些波是平面波。

条栅的透射系数 τ 和反射系数 T 强烈地依赖于极化, 在长波长 ($g/\lambda \rightarrow 0$) 情况下, 当条的取向垂直于线极化入射波的电矢量时, 该栅网是完全透明的, 即 $|\tau^2| = 1$ 。在这种取向下称之谓容性条栅。对于另一种取向, 即条平行于电矢量, 栅的作用如同一个半透明的反射器, $|\tau^2| < 1$, 于是称之为感性条栅^[3]。金属网具有方形几何结构对称性, 因此它的光学性质与极化无关^[4], 可以把它看作两个交叉的条栅的迭加。因此, 一个任意取向的金属网的光学性质与具有相同尺寸 g 、 a (如图 1 所示) 的感性条栅的性质是相同的。对于条栅, Lamb 理论给出了透射率^[5], 当 $\lambda \gg g$ 时, 有:

$$T = \left(\frac{2g}{\lambda} \ln \sin \frac{\pi a}{g} \right)^2$$

与条栅的情况不同, 对于二维栅网尚无完备的理论, 对于非极化的辐射来说这种栅网和

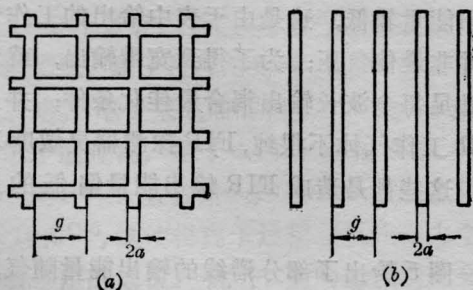


图 1
a. 网格 b. 条栅

一维栅对于平行极化的辐射具有相同的行为。因此上式同样被看作栅网的透射系数。

理论和实验都证明了栅网作为 FIR 输出耦合时对波长具有选择性。我们所用栅网的 $a:g$ 一般为 1:10。当取 $g = 50 \mu\text{m}$, 在 $50 \mu\text{m} < \lambda < 200 \mu\text{m}$ 时能得到较好的输出耦合。随着波长的增长, 如当 $\lambda = 500 \mu\text{m}$ 时, 由上式得 $T = 5\%$, 此时远离最佳输出耦合。因为光泵气体分子介质的增益系数都很高, 输出耦合 T 在 10~60% 之间。通过对 g 为 50 μm 和 100 μm 的 Ni 网进行理论和实验比较, 最终选取 $g = 100 \mu\text{m}$ 的 Ni 网作为输入、输出端, 测得 $g = 100 \mu\text{m}$ Ni 网对 CO_2 激光的透过率为 70%。

二、实 验

1. 激光器装置

结构图见图 2, 它由两部分组成: 光栅调谐 TEA- CO_2 泵源激光器和网耦合稳定腔远红外激光器。

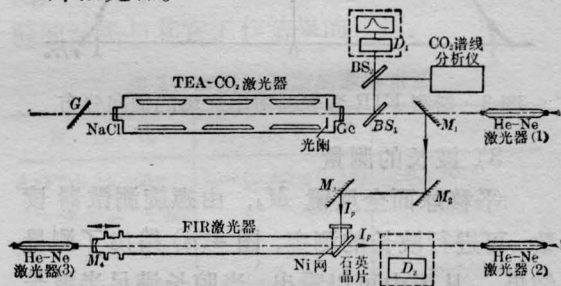


图 2 新型远红外激光装置

泵浦激光器为电容火花阵列紫外光预电离 CO_2 激光器。旋转光栅转台, 可分别得到由 CO_2 的 $9R40-9R4$ 、 $9P4-9P44$ 、 $10R44-10R4$ 和 $10P4-10P44$ 四个支带内的 82 条谱线。

远红外管长 3m, 内径 $\phi 36\text{mm}$, 用金属 Ni 网作为输入、输出耦合器, 石英晶片将 IR 光和 FIR 光有效地分离。管的另一端用 R 为 6m 的球面镀金全反镜密封, 与栅网构成平凹稳定腔。He-Ne 管 (1) 对 TEA- CO_2 激光器准直, He-Ne 管 (2) 对远红外激光管准

直, He-Ne 管(3)对整个系统准直、对中。远红外激光能量由 NJ-J1 型激光微能量计测量。

2. 实验结果与讨论

1) 泵浦光束的改进

为了得到高质量的 FIR 光束, 对 FIR 激光管要求均匀泵浦。我们在 CO₂ 激光管内加 $\phi 30\text{ mm}$ 的光阑, 输出能量可为原来的 80% 左右, 测得激光模式为 TEM₁₀ 模, 光强降为 $1/e^2$ 时的发散半角为 3 mrad。

2) 远红外激光束质量

由于采用均匀泵浦, 栅网耦合输入输出, 大大地改善了 FIR 光束质量, 得到了近似高斯分布的场强横向分布(示于图 3), 测得光强降为 $1/e^2$ 时的发散半角 $\alpha \leq 15\text{ mrad}$ 。

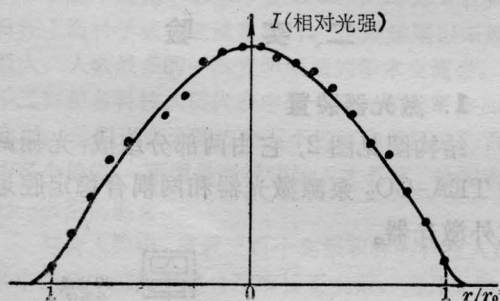


图 3 新型 FIR 激光器输出光场的横向分布

3) 波长的测量

平移球面全反射镜 M_4 , 由螺旋测微器读数, 可进行波长的测定, 图 4(a) 给出了测量结果。从图中可以看出, 当腔长满足半波长整数倍时, FIR 输出在原有很强输出的背景上凸出一小鼓包。这是由于干涉仪自由光谱范围与 FIR 谱线的线宽相当(图 4(b)), 因此总有 1~2 个纵模落在此线宽内。强度起伏 $\Delta I/I_0$ 为 5~10%。

4) 利用新装置对远红外激光辐射特性的研究

利用图 2 所示的远红外装置, 我们对 D₂O、CH₃F、CH₃OH 和 HCOOH 从 65.1~496 μm 的 20 多条谱线进行了研究。事实上, 这种装置可得到由 CO₂ 9R 和 9P 支泵浦

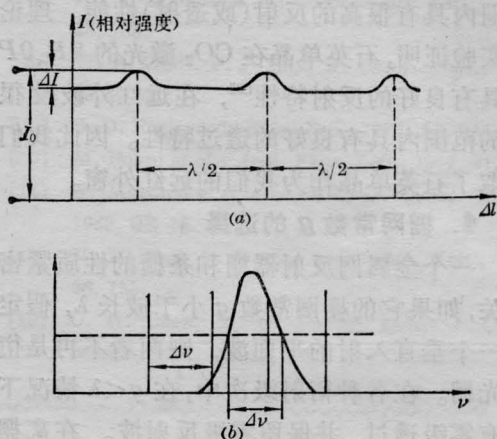


图 4

- (a) 调谐腔长测得的 FIR 输出;
(b) 自由光谱范围与 FIR 谱线的线宽相当

的所有远红外谱线, 这是因为石英单晶对 9R 和 9P 支谱线具有良好的反射性能。表 1 给出了这些谱线的泵浦线, 远红外跃迁的上、下能态, FIR 辐射波长, 泵浦能量, 输出能量, 工作气压, 失谐量和阈值泵浦能量。从表 1 中看出, 使用 g 为 50 μm 的栅网作为输出耦合器, 在 $\lambda < 200\ \mu\text{m}$ 时 FIR 输出大于 g 为 100 μm 时的耦合输出。但是当 $\lambda > 200\ \mu\text{m}$ 时, FIR 输出就远远小于 g 为 100 μm 时的耦合输出, 这是因为此时 $g = 100\ \mu\text{m}$ 的栅网更接近最佳耦合输出。当我们使 CH₃F 辐射的 261.8 μm 和 384 μm 工作在最佳气压时(分别为 5 Torr 和 6 Torr), 输出能量分别增加 3 倍和 5 倍。因此, 用 CH₃F 作为增益介质在本实验条件下预计可以得到几个毫焦耳的最大 FIR 输出能量。表 1 中给出的 FIR 输出能量较低, 这是由于表中给出的工作气压并非最佳气压; 为了得到宽带输出, 就难以满足每个波长输出耦合最佳化条件; 并且 FIR 工作气体不很纯, FIR 探测器灵敏度不够, 这些都是造成 FIR 输出能量偏低的原因。

图 5 给出了部分谱线的输出能量随气压的变化关系。可以看出, 一般气体工作物质的最佳工作气压为 1~4 Torr, D₂O 的工作

表 1

栅网常数	工作物质	CO ₂ 泵浦线	FIR 跃迁	FIR 波长 (μm)	泵浦能量 (J)	FIR 能量 (mJ)	工作气压 (Torr)	失谐量 (cm ⁻¹)	阈值能量 (J)
50 μm	D ₂ O	9R12	9 ₂₃ →9 ₁₉	114	5.6	0.41	2.5	-0.023	
		9R22	4 ₀ →4 ₋₂	385	5.8	0.08	1.7	-0.0108	
		9P32	5 ₅₁₅₀ →4 ₄₁₄₀	66	3.9	0.19	3.8	0.04	
		9P30	10 ₋₉ →9 ₋₉	99	4.4	0.05	2.1	0.034	
	CH ₃ F	9R34	R(27)	214.8	1.8	0.12	2	-0.165	
		9R24	R(22)	261.8	6.5	0.12	2	-0.404	
		9R16	R(18)	320.1	6.8	0.05	2	-0.659	
		9R10	R(15)	384	6.3	0.02	2	-0.889	
100 μm	D ₂ O	9R12	9 ₂₃ →9 ₁₉	114	5.4	0.30	3.3	-0.023	1.05
		9R22	4 ₀ →4 ₋₂	385	5.1	0.17	1.3	-0.0108	0.35
		9P32	5 ₅₁₅₀ →4 ₄₁₄₀	66	5.3	0.14	3.3	0.04	2.28
		9P30	10 ₋₉ →9 ₋₉	99	3.5	0.08	1.7	0.034	
	CH ₃ F	9R34	R(27)	214.8	1.8	0.23	2	-0.165	0.28
		9R30	R(25)	231	3.9	0.22	2	-0.251	
		9R28	R(24)	241	4.9	0.73	2	-0.298	1.32
		9R26	R(23)	250.6	5.8	0.55	2	-0.350	1.58
		9R24	R(22)	261.8	6.1	0.19	2	-0.404	
		9R22	R(21)	275.1	6.5	0.30	2	-0.463	
		9R20	R(20)	288.2	6.5	0.12	2	-0.524	
		9R18	R(19)	303.4	6.7	0.05	2	-0.590	
		9R16	R(18)	320.1	6.8	0.16	2	-0.659	
		9R14	R(17)	339.5	6.5	0.11	2	-0.732	
	9R10	R(15)	384	6.3	0.04	2	-0.889		
	9P20	Q(12)	496.1	4.6	0.01	2	-0.006		
	CH ₃ OH	9P18	9(024) ^a → 10(024) ¹	205.3	5.3	0.17	1.7	0.01	1.23
		9P12	13(025) ⁰ → 14(025) ^{1x}	163.9	5.4	0.20	0.8	-0.0177	1.75
		9R18		65.1	5.3	0.03	1.5		
		9R10		233	4.4	0.14	2.5		
	HCOOH	9R24	^a R _{0.1} (31)	418.51	4.2	0.04	0.4		
		9R6		394.2	5.1	0.08	1.7		
		9R4		309.23	2.3	0.05	1.7		

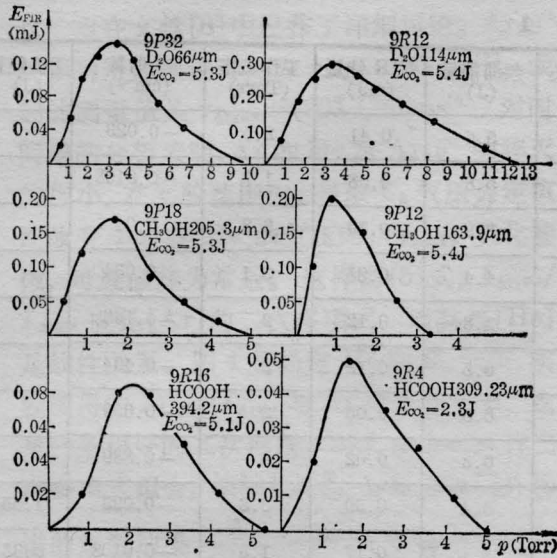


图5 FIR 输出能量随气压的变化

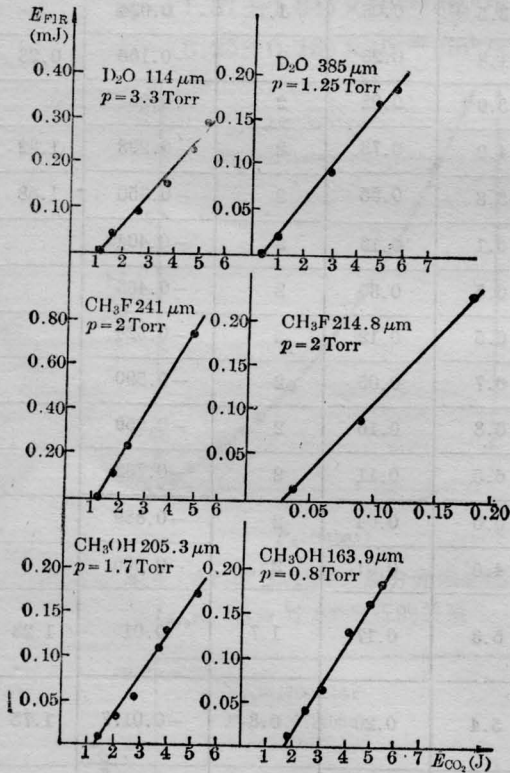


图6 FIR 输出能量随泵浦能量的变化

气压范围比 CH_3OH 、 HCOOH 宽得多。我们将 D_2O 的最佳工作气压与腔长 2 m, 小孔耦合的远红外管^[6]的最佳工作气压进行比较, 当腔长增加 1/3, 最佳工作气压同时降低约 1/3。这说明产生最大输出的气压依赖于管长, 管子越长, 最佳工作气压也越低。

图 6 给出了部分谱线的输出能量随泵浦能量的变化关系。可以看出这些谱线输出都未达到饱和, 可望通过增加泵浦能量得到大能量的 FIR 输出。

由实验测得的阈值泵浦能量 (见图 6 和表 1) 可以看出, 随着泵浦吸收失谐量的增大, 阈值泵浦能量也逐渐增加。这可解释为泵浦激光场和气体分子强烈的近共振相互作用, 不仅发生类激光行为, 而且可以发生类 Raman 行为, 这些过程又和 A. C. Stark 漂移联系在一起, 当失谐量越大, 就需要更强的电场强度将简并的能级拉得越开。Raman 过程往往比激光过程更有意义, 这主要是因为每个被吸收的 IR 光子产生一个 Raman 光子, 而激光发射则只限于一半的受激分子。并且强场近共振相互作用产生的 A. C. Stark 漂移还可进行 FIR 调谐。

参 考 文 献

- [1] G. Taylor et al.; *Infrared Physics*, 1978, 18, No. 5, 501.
- [2] Optical Society of America, *Handbook of Optics*, 7~19.
- [3] N. Marcuvits; *Waveguide Handbook* MIT, Red. Lab. Series (McGraw-Hill, New York 1951), Vol. 10.
- [4] R. Ullich et al.; *Infrared Physics*, 1967, 7, 39.
- [5] K. F. Renl, L. Genzel; *Appl. Opt.*, 1962, 1, No. 5, 643.
- [6] 秦毅等;《激光与红外》, 1984, No. 3, 73.