

光泵NH₃远红外激光器样品管长度优化研究*

林貽堃 邹钜佳
(无线电电子学系)

摘 要

对光泵NH₃远红外激光器的最佳样品管长度进行了理论和实验的研究。通过实验观察到,光泵远红外激光器的样品管必有一个最佳长度。与实验相比发现,三能级模型理论作为OPFIRL工程设计是不够准确的。有些因子,如折光系数 η ,不能粗糙地假定它是个常数。

关键词 光泵远红外激光, 远红外激光, 亚毫米波激光, 激光

1 引 言

光泵远红外激光,迄今十多年来一直是远红外亚毫米波研究和应用方面比较实用廉价的信号源。但它的效率低,一般只有千分之几量级。光泵远红外激光过程,是泵浦激光与远红外信号通过受激的分子系统进行能量交换的过程。因而容易误认为在一定泵浦功率的作用下,激光器的样品管长度越长越好。泵浦功率一般是远大于远红外激光功率,当泵浦功率很大时,样品管长些对能量交换有好处,输出远红外功率就大些。文献[1]假定激光器的工作气体是CH₃F,光学系统是无损耗的理想系统,泵浦激光是发散角为零度的理想平面波。应用迭代法,计算激光器中远红外激光在样品管内处处的功率密度和泵浦激光的功率密度值。由于泵浦功率在样品管内不断地被工作气体吸收,它沿着光轴方向不断衰减;而远红外信号功率,因泵浦一远红外能量交换而增长。当泵浦功率减少到低于阈值功率时,余下的样品管内的气体分子就不是激活的了,远红外信号不但不再被放大,反而因为气体系统对远红外信号的自吸收效应的作用逐渐减弱。

本文以NH₃分子气体作为工作物质,实验验证上述理论工作,并研究光泵NH₃分子气体远红外激光器的最佳样品管的长度。结果与理论曲线相比较, I_s随样品管长度的改变规律是相同的。但由于理论模型作了一些假设,因而理论只能是近似可行的。

2 理论计算简介

NH₃分子是对称陀螺分子,属于C_{3v}点群,具有4个基模振动 $\nu_1(A1)$, $\nu_2(A2)$, $\nu_3(E)$, $\nu_4(E)$,其中 ν_1 和 ν_2 是全对称非简并模, ν_3 和 ν_4 是二度简并模。振动模都具有一系列振-转能级。本文作为例子的NH₃分子系统三能级模型,泵浦跃迁和远红外跃迁电

本文1989年1月10日收到

• 国家自然科学基金资助项目

偶极矩分别为: $\mu_p = 0.188$ Debye, $\mu_s = 1.021$ Debye. 泵浦和远红外的工作 波长为: $\lambda_p = 10.3\mu\text{m}$, $\lambda_{\text{FIR}} = 281\mu\text{m}$.

Willenberg 等人^[2]总结文献工作得到NH₃分子在各能级的弛豫时间和各能级间跃迁的弛豫时间为: 分子处于能级 1: $T_1 = 6.8 \times 10^{-8} \times P^{-1}$ 秒; 分子处于能级 2, 3: $T_2 = T_3 = 3.9 \times 10^{-8} \times P^{-1}$ 秒; 能级间跃迁: $T_{ij} = T_1$.

远红外信号通过激活的NH₃分子系统时, 被放大、泵浦信号被吸收的增益系数为

$$G_s = -2N_V |\mu_s|^2 \omega_s I_m(P_{32}) / \epsilon_0 \eta c \hbar B_s \tag{1}$$

$$G_p = 2N_V |\mu_p|^2 \omega_p I_m(P_{13}) / \epsilon_0 \eta c \hbar B_p \tag{2}$$

其中 $B_s, B_p, x, y, N_V, \mu_s, \mu_p$ 的意义见文献[1]. P 为工作气体压强值以Torr计算.

通过解三能级系统的密度矩阵方程, 求得 P_{ij} 的虚部后, 应用(1)和(2)理论计算而得的结果, 再采用迭代运算而获得 I_s 和 I_p 沿样品管理论分布曲线. 从这曲线可见, 泵浦功率总是沿着样品管光轴方向不断衰减, 而远红外信号功率, 沿着光轴方向不断地被放大, 达到一极大值后沿光轴有一定衰减. I_s - Z 曲线从放大到衰减有一转折点, 其座标为 $Z = Z_{opt}$. 在样品管内 $Z = Z_{opt}$ 处, I_s 具有最佳值, Z_{opt} 称为样品管的最佳长度. 观察点座标 $Z > Z_{opt}$ 后, 样品管内远红外信号强度 I_s 的衰减是很缓慢的. 这情况与文献[1]中图 5 结果相似. 如果远红外激光的频率 ν_s 比较接近NH₃分子的振动激发态的转动跃迁频率 ν_{33} , 则分子系统对远红外信号有一定的自吸收作用. 但这作用并不很大, 在 $Z > Z_{opt}$ 部份, 远红外信号衰减很少. 这是因为在振动激发态, 分子的布居数很少, 因而自吸收系数很小. 如果光泵浦激光过程属于V型跃迁, 远红外激光频率与振动基态的转动跃迁频率相近, 这情况下, 自吸收现象就比较显著. 在三能级系统中, NH₃分子受激发射过程, 属于倒V型跃迁, 所以系统对远红外信号的自吸收现象较弱.

3 光泵远红外激光器样品最优长度的实验验证

3.1 实验系统装置

上述理论计算, 为了使计算不至于过份复杂繁琐, 作了三能级系统的假设. 这假设虽然与实际系统不同, 这样便导致理论与实验结果有较大的差距. 对实际的 OPFIRL 系统, 三能级系统或六能级系统模型, 显然都是不完善的. 其理论结果只能预见最佳样品管长的存在, 不能满足设计的要求. 因此理论尚需经过实验数据予以修正.

实验装置的示意图如图 1. 样品管采用内径为5cm的硬质玻管, 总长度为2m. 在样品管内安放一个远红外热释电探测器, 它在样品

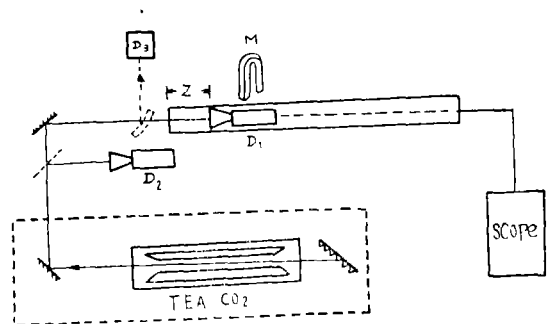


图 1 测量OPFIRL的最佳样品管长度实验装置图
Fig. 1 Experimental setup for the measurement of optimum length of the sample tube of OPFIRL

管内的位置可采用一个强的磁铁控制使它沿着管轴向前后移动。探测器的入口处安装一圆锥天线以提高探测器的效率。天线的入口端装一块2~3mm厚的聚四氟乙烯塑料片,以滤去红外泵浦信号,保证探测器只接收到远红外信号。这样探测器的读数便正比于管长为OPFIRL的输入端口至探测器天线聚四氟乙烯窗口面距离的激光器的输出功率。应用磁铁移动探测器的位置,所获得一组数据,相当于各种不同样品管长的光泵远红外激光器的输出功率。如果取去聚四氟乙烯窗口换上硒化锌窗,便可通过红外激光信号而隔离远红外激光信号。这时探测器的输出读数便正比于样品管相应各处的红外泵浦信号的强度分布。TEA CO₂激光器的单脉冲输出能量为1~3J。脉冲的持续时间约为100ns。在样品管的输入端测得红外激光光斑为3×3cm²。采用能量计来测量泵浦信号,用热释电探测器和记忆示波器来观测远红外信号强度与波形。

3.2 实验结果和分析

实验所得在三种不同条件下的样品管内各点所测得的红外和远红外信号强度的数据组成曲线如图2和图3所示。

理论和实验的结果都表明,光泵远红外激光器的管长存在一个最佳值。或者说样品管内远红外激光的功率密度分布在 $Z = Z_{opt}$ 处具有一个最大值。对于泵浦功率密度在样品管内的变化也都是按指数规律衰减。远红外激光信号功率密度最大值处,泵浦功率密度衰减达到了阈值。这些结果理论和实验是一致的。但是理论与实验结果相比较,增长或衰减的速度以及 Z_{opt} 的数值,理论实验差距较大。例如,当工作气体压强 $P = 6\text{ Torr}$, $I_{p0} = 0.6\text{ MW/cm}^2$ 时,理论求得的 $Z_{opt} = 20\text{ cm}$,而实验求得的 $Z_{opt} = 120\text{ cm}$,两者相差6倍。

4 三能级系统光泵远红外激光理论模型的修正

上述结果说明,我们提出的三能级系统模型有它合理的一面。理论预见OPFIRL的样品管的长度存在一个最佳值 Z_{opt} 。这已被实验证实。理论的出发点几个假设具有不合理的地方,导致理论和实验结果不能相符。

为了简化计算的工作,我们对系统模型作了一些不太合理的假设:

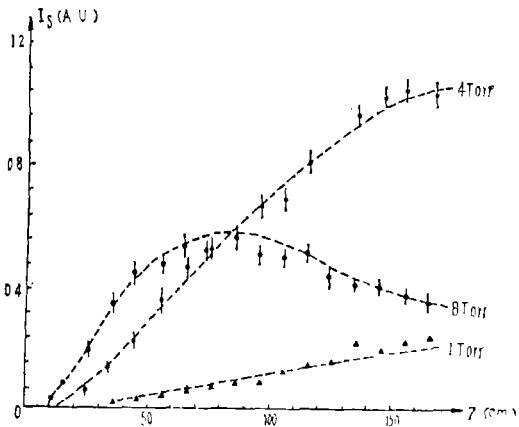


图2 用实验求得的样品管最佳长度
Fig. 2 Experimental determination of optimum length of sample tube

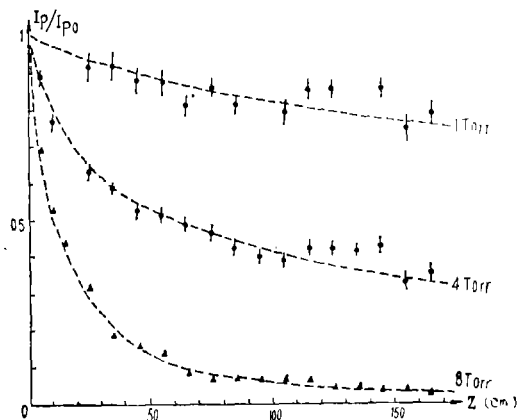


图3 沿样品管求得的 I_p/I_{p0} 实验值
Fig. 3 Experimental measurement of I_p/I_{p0} along the sample tube

①假设系统诸能级中只有三个。这样起作用就把大部份的自吸收效应忽视了。

②假定光学系统是理想无损耗系统。这假定导致 $I_s - Z$ 曲线在 $Z = Z_{opt}$ 以后衰减过份缓慢。

③假定 $\eta = 1$ 而且是个常数, $\eta = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$ 是 NH₃ 分子系统在激光器工作过程中对红外光和远红外信号的折光系数, 显然, 当激光器工作气体压强很小时, $\epsilon \approx \epsilon_0$ 是合理的, P 较大时误差就不可忽视了, P 值越大则理论与实验的偏差也越大。显然, η 应当是大于 1 的值, 而且应当是气压 P 和信号频率—红外或远红外频率的函数。它也应当是 NH₃ 气体系统受激活程度的函数。

从这些分析可见, 如果要求对理论进行全面完整的修正, 难度相当大。作为第一步, 本文采用增加系数法对理论进行修正, 尽量使理论计算与实验曲线逼近。当然这些修正也应当是在物理原理分析的基础上进行的。上述第①和②的假设的实质是: 三能级系统之外的各能级对红外泵浦信号和远红外信号不起自吸收作用。而激光器的光学系统也不存在损耗。这可以在公式(1)和(2)的右边加一衰减修正项, 修正因子的大小可以采用计算实验拟合方法多次试算求得。同样对 η 的修正, 可以在 η 前面加一大于 1 的因子。这样经过修正后的增益系数关系式(1)和(2)便成为以下两式

$$G_s = -[2N_v |\mu_s|^2 \omega_s I_m(P_{32}) + A_s] / B\epsilon_0 \eta C h B_s \quad (3)$$

$$G_p = [2N_v |\mu_p|^2 \omega_p I_m(P_{13}) - A_p] / B\epsilon_0 \eta C h B_p \quad (4)$$

这里仍然令 $\eta \approx 1$ 。其中 B , A_s 和 A_p 都应正比于工作气体压强 P 。 P 越大, 则 B , A_s 和 A_p 应越大。 A_s 和 A_p 反映分子系统中, 处在三能级系统之外其它能级中的分子, 对远红外信号和泵浦功率的吸收。这些数值应正比于工作气体压强 P 。文章对 $P = 1 \dots 8$ Torr 情况进行理论实验拟合结果如表 1 所示。

表 1 在不同的工作气体压强下
B, A 和 A_s 的经验值

Tab.1 The empirical value of B, A and A_s under various operating gas pressure

P(Torr)	B = β × P	β	A _s = α _s × P	α _s
1	1.66	1.66	0	0
2	2.22	1.11	0	0
4	4.54	1.13	0	0
6	7.14	1.19	0.1	0.016
8	9.09	1.13	1.2	0.15

拟合的结果如图 4。从图可见, 这种修正方法, 从物理原理来考察有它合理的一面, 但肯定是不够准确的。 η 与 P 的关系认为是正比关系, 显然也有问题, 所以这结果只当 P 较大时才适用。总的来看修正项 A_p 是不重要的, 修正项 A_s , 在压强 P 不够大

的情况下也不重要。说明这两修正项与 P 也是非线性关系。本文的工作中规定了，泵浦频率 ν_p 和远红外信号频率 ν_{FIR} 不变。这规定实际上人为地忽视了 B 和 A_s 的频率特性。

5 讨论

①应用理论计算研究OPFIRL的最佳激光器工作参数，是一种有效的方法。采用三能级系统理论模型使理论计算大为简化。考虑到的能级数越多则计算越准确越能反映实际情况。但是困难在于能级越多则计算越繁琐冗长。

②应用三能级系统模型的假设所得理论，可以定性地揭示OPFIRL具有最佳样品管长度。但由于模型过于简单，不能作为工程设计之用。要达到工程设计要求，则需要进行深入的理论研究。

③从式(3)和(4)可见， $\eta = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$ 对 G_s 和 G_p 的计算是个重要的因子，它与其它激光器的工作参数的关系，值得进一步深入研究。

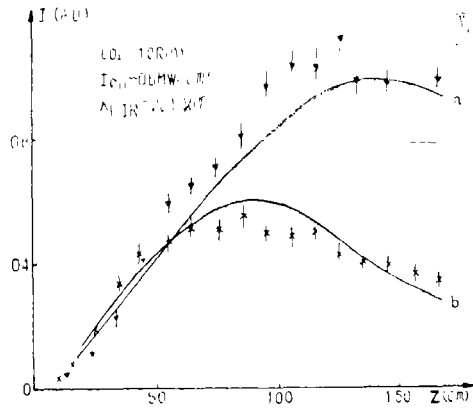


图4 修正后的理论结果与实验的比较
Fig.4 Comparison of corrected theoretical calculation with experimental data

a. $p=6$ Torr, $B=7.14$, $A_s=0.1m^{-1}$
b. $p=8$ Torr, $B=9.09$, $A_s=1.2m^{-1}$

参 考 文 献

[1] Lin Yikun et al., *Int.J.IR-MMW*, 8 (1987),673
 [2] Willenberg G D et al., *IEEE J.Quantum Electronics*,QE-18,(1983),2060
 [3] 林贻堃等, 中山大学学报(自然科学版), 28(1989), 4, 1
 [4] Richard H Pantell, Havold E.Puthoff, *Fundamentals of Qauantum Electronics*, John Wiley & Sans, INC, New York, 1969
 [5] Nishi Y et al., *Iut.J.IR-MMW*, 8 (1987),1453

Study of the Optimum Length of the Sample Tube for Optically Pumped NH₃ FIR Lasers

Lin Yikun* Zou Jujia

Abstract

The optically pumped NH₃ FIR laser (OPFIRL) was studied theoretically and experimentally for the optimum length of the sample tube of the laser system. It was found experimentally that, for optimum operation of an OPFIRL, there exists an optimum length of sample tube under certain pumping density and operating gas pressure. Comparing with the experimental results, we found that the theory with 3-level model is not accurate enough for engineering design of OPFIRL. Some parameters such as refractive index, cannot be considered to be a constant.

Keywords optically pumped FIR laser, far-infrared laser, submillimeter waves, laser

* Department of Radio and Electronics