

用辐射测量法研究Cu II 激光振荡的增益特性

薛焕然

张耀宁 龚志伟 丘军林

(华东工学院)

(华中工学院激光研究所)

本文在自行设计的全金属铜空心阴极激光器上获得了Cu II 740.4nm ($6S^3D_3 - 5P^3P_2^0$)谱线的激光振荡。为了研究最佳的激光运行条件,用辐射测量方法测量了该谱线在不同的激发条件下的增益特性。对测量结果进行了讨论,得出结论:在He-Ar-Cu放电、He:Ar为4:1时,Cu II 740.4nm谱线增益最大。所得结论和实际的激光输出特性基本一致。

Gain characters of Cu II laser oscillation studied

with radiation measurement

Xue Huanran

(East China Institute of Technology)

Zhang Yaoning, Gong Zhiwei and Qiu Junlin

(Institute of Laser, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract

The laser oscillation of Cu II 740.4nm ($6S^3D_3 - 5P^3P_2^0$) line is obtained with the full metal copper hollow cathode laser designed by the authors. To study optimum condition of laser operation, gain characteristic of the line is measured with radiation measurement under a variety of exciting condition. Measuring results are discussed. The authors come to the conclusion that gain of Cu II 740.4nm is maximum when He:Ar equals 4:1 in the case of He-Ar-Cu discharge. The conclusion is in good agree with practical laser output characteristic.

铜离子激光器以其众多的激光谱线而引起了人们广泛兴趣。十多年来,人们已在近红外、可见光和紫外波段发现了近60条Cu II 激光谱线。我们在自制的全金属槽型空心阴极铜离子激光器上获得了Cu II 780.8nm和740.4nm两条激光振荡。为研究激光运行的最佳条件,我们用辐射测量法研究了不同激发条件下,Cu II 740.4nm激光振荡的增益特性。

一、辐射测量法测增益的物理基础

假定所研究的谱线上能级为j能级，下能级为k能级，统计权重分别是 g_j 和 g_k ，自发辐射几率为 A_{jk} ，线型函数为 $g_{jk}(v, v_0)$ ，反转粒子数是 Δn_{jk} ，谱线中心波长为 λ_{jk} ，则谱线的增益系数 G_{jk} 可表示为：

$$G_{jk} = \Delta n_{jk} \frac{\lambda_{jk}^2}{8\pi} A_{jk} g_{jk}(v, v_0) \quad (1)$$

自发辐射几率 A_{jk} 和吸收振子强度 f_{ki} 有下列关系：

$$A_{jk} = \frac{g_k 2\pi e^2 v_{jk}^2}{g_j \epsilon_0 m_e c^3} f_{ki} \quad (2)$$

在铜离子激光器中，谱线占优的增宽机制是Doppler增宽，所以又有：

$$G_{jk} = \left(n_j - \frac{g_j}{g_k} n_k \right) \frac{g_k e^2 f_{ki}}{g_j 2\epsilon_0 m_e c} \cdot \frac{1}{\Delta v_D} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{4 \ln 2 (v - v_0)^2}{\Delta v_D^2} \right) \quad (3)$$

式中， n_j 和 n_k 分别是上、下能级的粒子数密度， Δv_D 是Doppler线宽。

令 $v = v_0$ ，得到谱线中心的增益系数：

$$G_{jk} = \left(\frac{n_j}{g_j} - \frac{n_k}{g_k} \right) \frac{e^2 \lambda_{jk}}{4\epsilon_0 m_e c} \sqrt{\frac{m_e c^3}{2KT\pi}} g_k f_{ki} \quad (4)$$

从上式可见，为求出增益系数 G_{jk} ，先要求得上、下能级的粒子数密度，而粒子数密度可以由辐射功率测量得到。自发辐射功率 Φ_{jk} 可表示为：

$$\Phi_{jk} = N_j A_{jk} h \nu_{jk} \quad (5)$$

将 A_{jk} 与 f_{ki} 的关系式代入上式，并令 $n_j = N_j/V$ (V 为发射等离子体体积)，则有

$$\Phi_{jk} = N_j h \nu_{jk} \frac{g_k 2\pi e^2 v_{jk}^2}{g_j \epsilon_0 m_e c^3} f_{ki} = \frac{n_j 2\pi e^2 h V}{g_j m_e \epsilon_0 \lambda_{jk}^3} g_k f_{ki} \quad (6)$$

所以有：

$$\frac{n_j}{g_j} = \frac{\Phi_{jk} \lambda_{jk}^3 m_e \epsilon_0}{g_k f_{ki} 2\pi e^2 h V} \quad (7)$$

因为自发辐射是各向同性的，所以可得：

$$\Phi_{jk} = 4\pi I_{jk} \quad (8)$$

式中， I_{jk} 为辐射强度。如果我们在某一固定方向测量辐射功率，则此辐射功率为：

$$\Phi_{jk m} = \Omega I_{jk} \quad (9)$$

(9)式中 Ω 是测量系统接收元件对待测发射等离子体所张立体角。由(8)、(9)式：

$$\Phi_{jk} = \frac{4\pi}{\Omega} \Phi_{jk m} \quad (10)$$

由于等离子体对谱线有吸收，因此对辐射测量的结果应加以修正。考虑吸收后，辐射功率为：

$$\Phi_{jk}^a = \frac{e_v}{k_v} (1 + e^{-k_v l}) \quad (11)$$

式中， e_v 为谱线发射系数， k_v 为吸收系数， l 为放电长度。因为 $e_v/l = \Phi_{jk}$ ，所以又

有:

$$\Phi_{ik} = \frac{k_v l}{1 - e^{-k_v l}} \Phi_{ik}^a \quad (12)$$

因此,对测量得到的辐射功率修正的系数是 $\frac{k_v l}{1 - e^{-k_v l}}$ 。实际上,当 $k_v l < 0.05$ 时,修正因子为 1.025,相对误差不超过 2.5%,可以不作修正。

二、测量增益的实验装置

我们所用的实验装置如图 1 所示。实验装置分为放电管和接收系统两部分。放电管是管壳材料为不锈钢的全金属放电管,阴极长 30cm,内有 $\phi 6\text{mm}$ 的通孔通水冷却,表面开有 $1.5 \times 4.5\text{mm}$ 的矩型槽,电极材料为高导无氧铜,电极间距 5mm。接收系统由光阑、透镜、紫外可见光单色仪、光电倍增管和 X-Y 记录仪组成,光阑用来限制等离子体对单色仪狭缝的张角,有 1200 线对/mm 的平面光栅紫外可见光单色仪实现分光,其出射光信号通过光电倍增管放大,再馈入 X-Y 记录仪,而后输出电压信号,该电压信号与光谱辐射功率成正比。在我们关心的红光波段,光电倍增管在线性范围工作。

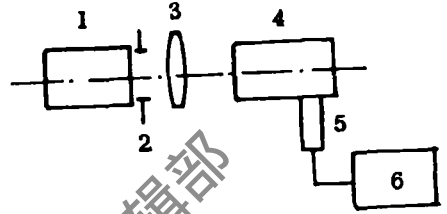


图 1 实验装置图。

1. 全金属放电管; 2. 光阑;
3. 透镜; 4. 紫外-可见光单色仪;
5. 光电倍增管; 6. X-Y 记录仪

在实验期间,我们对接收系统的光谱灵敏度作了标定。标定步骤是:

1. 以色温为 2800K 的钨带灯作标准光源,确定钨带的光谱辐射亮度 $L_{\lambda, \text{钨}}(\lambda, T)$, 它可由

Planck 定律和光谱发射率 $\epsilon_{\lambda, \text{钨}}$ 导出。钨带灯所配置的晶体管直流稳流器电流稳定度小于 $\pm 0.01\%/min$ 。

2. 根据 $V_i(\lambda) \propto L_{\lambda, \text{钨}}(\lambda, T) E_i(\lambda)$ 确定接收系统的相对光谱灵敏度。此处, $V_i(\lambda)$ 为 X-Y 记录仪上的电压信号值, $E_i(\lambda)$ 是包括单色仪和光电倍增管在内的接收系统相对光谱灵敏度。

3. 在上述相对光谱灵敏度测量范围内的一个特定波长上补充测量绝对光谱灵敏度,以得到接受系统在该范围内的绝对光谱灵敏度。我们利用单色性好的 He-Ne 激光器作辐射源,测量 632.8nm 谱线的绝对光谱灵敏度。

每次测量开始和结束时,均用 SER·N^o 210 绝对

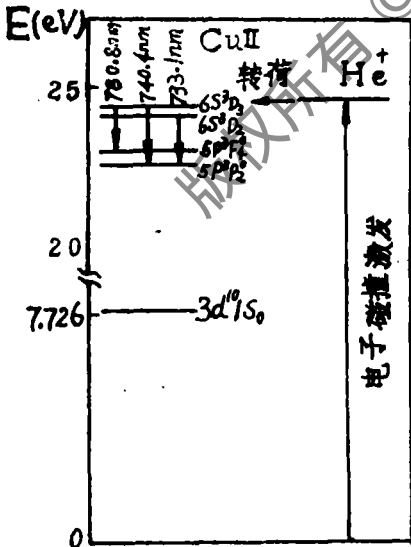


图 2 Cu II 740.4nm 谱线能级图

对辐射计测量 632.8nm 谱线的辐射功率,在测量工作期间,器件稳定度和测量重复性均很好。

三、能级粒子数密度的决定

740.4nm谱线的能级结构如图2所示。通过分别测量以Cu I 6S³D₃和5P³P₂⁰为上能级的谱线自发辐射功率,就可以确定上、下能级的粒子数密度。对于上激光能级,我们选取以6S³D₃为上能级各谱线中最强的780.8nm谱线作辐射测量,该谱线吸收系数很小,其测量值为2.415。考虑下激光能级,以Cu I 5P³P₂⁰为上能级的自发辐射谱线,如827.8nm(5P³P₂⁰—5S³D₃)等处在近红外谱段,在所用单色仪工作波段之外,我们采用吸收测量的方法决定下能级粒子数密度。

在Doppler增宽占优的条件下,谱线中心的吸收系数 k_{ν} 与下能级的粒子数 N 有如下关系^[1],

$$N = 8.64 \times 10^{13} \left(\frac{k_{\nu 0}}{\lambda f_{11}} \right) \left(\frac{T}{m_{e+}} \right)^{1/2} [1/m^3] \quad (13)$$

式中, T 在放电温度, m_{e+} 为铜原子量。

k_{ν} 可利用McConkey^[1]方法求出。根据图3可以推出下列关系:

$$\frac{\Phi_R}{\Phi_D} = R \frac{\int_{\Omega} \int_0^l \left[\frac{Wh}{(a+x)^2} + \frac{2\theta_1 w + 2\theta_2 h}{a+x} + 4\theta_1 \theta_2 \right] e^{-\omega^2 x} e^{-k_{\nu 0} x} dx d\Omega}{\int_{\Omega} \int_0^l \left[\frac{Wh}{(a+x)^2} + \frac{2\theta_1 w + 2\theta_2 h}{a+x} + 4\theta_1 \theta_2 \right] e^{-\omega^2 x} dx d\Omega} \quad (14)$$

式中, R 是反射镜对某一波长辐射的反射率, Φ_R 和 Φ_D 分别是反射镜引入光路前、后测得的该波长的辐射功率, l 是放电长度, w 、 h 分别是单色仪狭缝的宽和高, ω 为参变量, $\omega = \frac{2(\nu - \nu_0)}{\Delta\nu_D} \sqrt{\ln 2}$, θ_1 、 θ_2 分别是

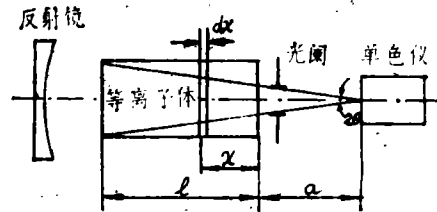


图3 测量 $k_{\nu 0}$ 的光路图

等离子体对单色仪狭缝在高和宽方向所张夹角。用实验方法测定 R ,由辐射测量结果决定 Φ_R/Φ_D ,则可由式(14)用数值方法求解 $k_{\nu 0}$,从而确定 N 。

在与740.4nm谱线共下能级的各谱线中,我们选取733.1nm谱线来决定Cu I 5P³P₂⁰能级的粒子数。从发射光谱分析可知,与733.1nm谱线共上能级6S³D₂的各谱线自发辐射均很弱,而且与740.4nm谱线共下能级的其它谱线自发辐射也较弱。因此,Cu I 5P³P₂⁰能级密度主要由740.4nm谱线的自发辐射决定,并且5P³P₂⁰的集居数远大于6S³D₂能级的集居数,733.1nm谱线吸收测量能较准确地反映740.4nm谱线下能级Cu I 5P³P₂⁰粒子数集居情况。

由辐射测量确定粒子数还需知道振子强度 f_{11} 值,根据辐射强度比,可从已知的且共上能级的跃迁谱线 f_{11} 值推知未知的谱线 f_{11} 值。即从(6)式可推得:

$$f_{11} = g_i f_{ii} \left(\frac{\lambda_{ik}}{\lambda_{ii}} \right)^3 \frac{\Phi_{ik}}{\Phi_{ii}} \frac{1}{g_k} \quad (15)$$

式中, Φ_{11} 为振子强度值 f_{11} 已知的谱线的辐射强度, λ_{11} 为该谱线波长。我们测得 733.1nm 谱线的 f_{11} 值为 0.521。对于放电温度 T 值, 许多研究者测得在 1000~1500K 之间 [2,3], 我们取为 1250K, 这样引起的误差不超过 10%。至此, 就可以由 (7)、(13) 式确定 Cu II 740.4nm 谱线上、下能级的粒子数密度。图 4 是不同激发条件下 Cu II $6S^3D_3$ 、 $5P^3P_2^0$ 能级的 n/g 值。

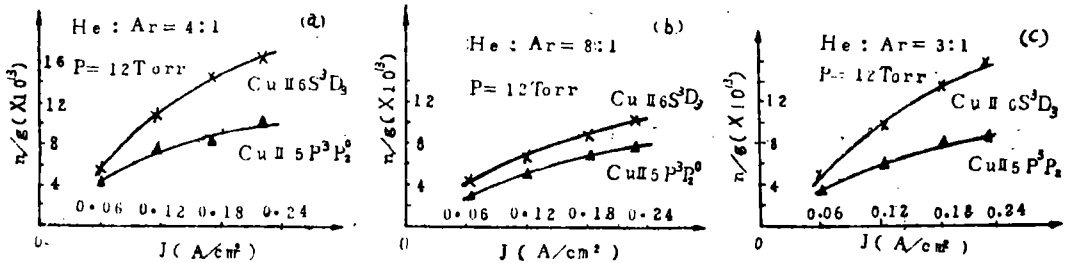


图 4 Cu II 740.4nm 谱线上、下能级的 n/g 值

四、增益特性

在求得各能级粒子数密度后, 由 (4) 式就能得到 Cu II 740.4nm 谱线中心的增益系数。

(1) 在 He-Ar-Cu 和 He-Ne-Cu 放电中谱线的增益 (见图 5)。

(2) 不同气体混合比下谱线的增益 (见图 6)。

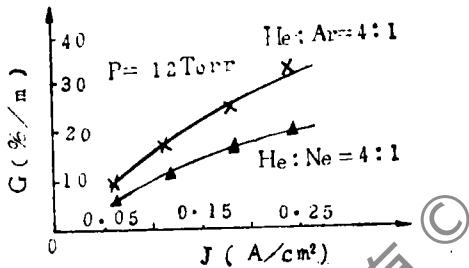


图 5 Cu II 740.4nm 谱线在不同混合气体下的增益特性曲线

从上面的增益特性曲线, 可以得到下述结论:

1. 在大电流密度 ($j > 0.1 \text{ A/cm}^2$) 情况下, 增益与电流密度呈线性关系。这一现象也为其他研究者所观察到 [4]。

2. He-Ar-Cu 放电时谱线增益高于 He-Ne-Cu 放电时谱线的增益。这是因为 Cu II 740.4nm 谱线上能级 $6S^3D_3$ 是通过缓冲气体离子 He^+ 与铜原子之间的转荷反应 $\text{He}^+ + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ (6S^3D_3) + \text{He} + \Delta E$ 而有选择地集居的, Ar 对铜的溅射率高于 Ne 对铜的溅射率, 结果铜原子密度较大, 反转集居数增加, 从而 He-Ar-Cu 放电时谱线增益较高。

3. 气体混合比影响增益, 这对 He-Ar-Cu 放电比 He-Ne-Cu 放电更明显。利用这一结论可为寻找最佳的激光运行参数提供依据。从上面的曲线看, 当 He:Ar 或 He:Ne 为 4:1 时增益最大, 这与激光运行时, 气体最佳混合比的实验结果基本吻合。

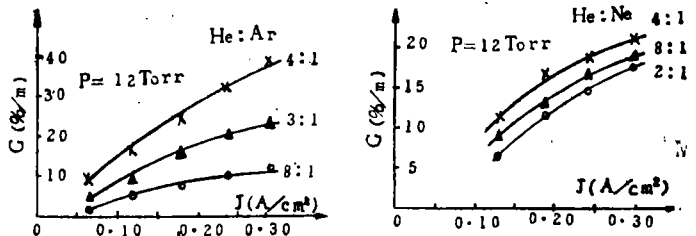


图 6 Cu II 740.4nm 谱线在不同气体混合比下的增益特性曲线

4. 若根据激光运行时的阈值电流密度, 采用外推法, 可以求得谱线阈值条件下的小信号

增益系数。在He:Ar为4:1时, Cu I 740.4nm谱线激光阈值电流为1.9A, 由此推得其阈值条件下的小信号增益系数约为8.5%/m。

参 考 文 献

- [1] John W. McConkey, J. O. S. A., 1969, Vol. 59, No. 10, P. 1262~1266.
- [2] P. H. M. Vaessen et al., Phys. Lett., 1978, Vol. 68A, No. 2, P. 204~206.
- [3] B. E. Warner et al., IEEE. J. Q. E., 1978, QE-14, No. 8, P. 568~570.
- [4] H. J. Eichler et al., Opt. Comm., 1980, Vol. 34, No. 2, P. 228~230.

收稿日期: 1987年8月10日。

•中国科学院科学基金资助课题。本文曾在第八届全国激光学术报告会 (1986.9西安) 上宣读。

• 简 讯 •

成电研制的彩扩机滤色镜通过鉴定

大型彩色扩印机硬膜长方形前置滤色镜和圆形切光片一套(品红色、青色和黄色共六种), 由成都电讯工程学院光电子技术系研制成功。该成果于1987年12月8日通过局级鉴定。所研制的滤色镜耐磨、耐高温, 经四川省彩色摄影中心等四家的柯达大型彩扩机上长期使用表明, 滤色镜性能稳定、膜层完好, 与进口滤色镜扩印出的彩照相比无差异, 其光谱透射特性达到进口滤镜的水平, 扭转了滤色镜依靠进口的局面。

(成光 供稿)