

空阴极氦-氪离子激光器的实验研究

殷立峰 窦任生 韩丽英

(清华大学物理教研组)

提要: 通过改革 HCD He-Kr 离子激光器的结构和电源, 激光输出特性获得了很好的改善。通过观察各种自发辐射谱线输出波形, 分析研究了激光输出波形的形成机理。实验结果指出, 阴极溅射是影响 He-Kr HCD 离子激光器激光输出波形和输出功率的主要原因之一。

Investigation of a hollow cathode He-Kr ion laser

Yin Lifeng, Dou Rensheng, Han Liying

(Teaching and Research Group of Physics, Qinghua University)

Abstract: Output performances of a hollow cathode He-Kr ion laser has been improved by modifying the laser structure and its power supply. The output waveforms of various spontaneous emission were observed and the formation mechanism of the laser output waveform was analyzed. The experimental results show that cathode sputtering is the main cause affecting laser output power and the waveform.

一、激光管结构和电源

为了实验的方便, 采用外腔式和筒型空阴极放电结构。玻璃封装的筒型空阴极放电管的结构如图 1 所示^[1], 阴极是一根内径 4 毫米、长 800 毫米的金属管 (1 号管是镍管, 2 号管是不锈钢管), 阳极是直径 1.5 毫米的钨杆, 阳极间距 60 毫米, 阳极与阴极间的距离是 10 毫米, 为了防止阴极外面出现辉光, 整个阴极套在一根玻璃管内。加散热器的外阴极结构的筒型空阴极放电管如图 2 所示, 外阴极也是内径 4 毫米、长 800 毫米的金属管 (3 号管是镍管, 4 号管是镍铜合金管)。阳

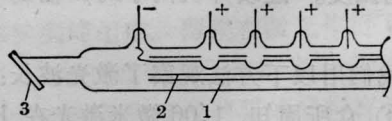


图 1 玻璃封装的筒型空阴极放电管的结构
1. 玻璃套管; 2. 阴极; 3. 布氏窗片

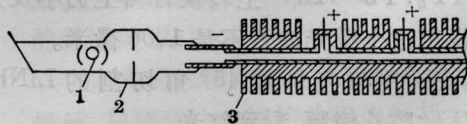


图 2 金属陶瓷封接的筒型空阴极放电管的结构

1. 防污挡圈; 2. 光阑; 3. 金属散热片

收稿日期: 1981年11月27日。

极是用金属陶瓷芯柱引出的，阳极阴极间的绝缘是利用一个陶瓷环。在阴极两端各钎焊上一段过渡的可伐管，可伐管与玻璃管封接在一起，两端的活动挡圈和光阑是为了防止布氏窗的污染。

由于HCD He-Kr离子激光器的放电电流相当大，因此在一些研究报导中常采用减少重复频率(例如12.5赫)的半波整流电源。但这种方式的准连续电源在合理的变压器额定功率下，峰值电流受变压器磁饱和效应的限制，一般只做到10安左右。同时这样大的脉冲占空比对减小激光管阴极功耗仍然显得不够有效。因此我们制作了利用可控硅和脉冲电路控制的准连续电源，脉宽为0.3~2毫秒可调，重复频率为12.5赫。输出脉冲波形近矩形，峰值电压最高达650伏左右，峰值电流可达30~50安。脉冲激励电源采用电容充电和火花隙放电方案，输出脉冲半宽度为10微秒左右，峰值电流可达80安左右。

二、激光谱线和输出特性

我们利用金属陶瓷封接的外阴极型结构在脉冲和准连续放电条件下都获得了4694埃、4318埃、4583埃波长激光的同时振荡。其中4694埃激光的输出功率大约比4318埃激光的输出功率大一个数量级，而4583埃激光的输出功率很小。在玻璃封接的筒型试验管中，在同样的实验条件下只获得了4694埃和4318埃波长激光的同时振荡。

在峰值为80安的脉冲放电时，激光峰值功率3号管是1400毫瓦，1号管只有500毫瓦；在峰值为25安的准连续放电时，3号管的激光输出峰值功率是108毫瓦，而1号管只有38毫瓦。

在最佳气压比条件下，3号管的阈值电流是4.8安，而1号管是7安。阈值电流随Kr分压的减少而降低，在Kr分压为 $2.8 \times$

10^{-2} 托时，3号管的阈值电流是2.4安。

当电源的脉冲宽度增加时，在同样的峰值电流下，3号管的激光输出峰值功率没有减小，而1号管的激光输出峰值功率减小了相当的数值。例如在25安峰值电流下，在脉宽为0.3毫秒时，1号管激光输出峰值功率是38毫瓦；当脉宽为0.8毫秒时，激光输出峰值功率降低到29毫瓦。3号管采用金属陶瓷封接的外阴极型结构改善了阴极的散热性能，获得了很好的实验效果。表1列出了两种结构的放电管所得结果的对比。

在不同的气压比条件下研究了激光振荡

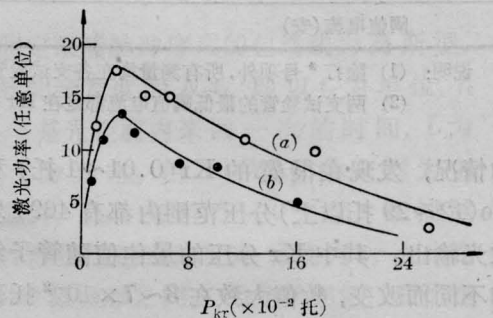


图3 3号管激光输出功率随Kr分压的变化 (a) $-P_{He} = 26$ 托; (b) $-P_{He} = 16$ 托

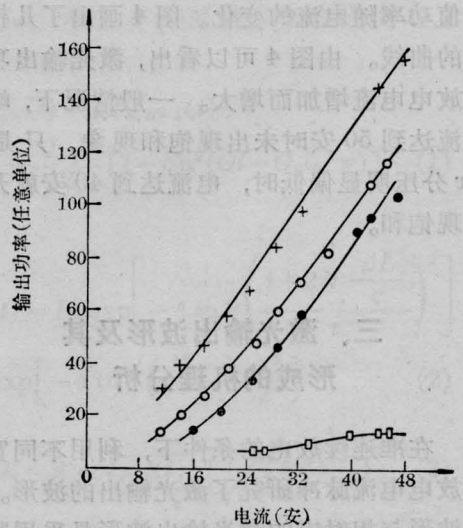


图4 1号管激光输出峰值功率随电流的变化

表1 1号与3号试验管结果比较

管 号		1	3
阴极有效长度(厘米)		80	80
阴极内径(毫米)		4	4
阴极材料		镍	镍
封装		玻璃	金属陶瓷
激光谱线波长 (埃)	脉冲放电	4694、4318、4583	4694、4318、4583
	准连续放电	4694、4318	4694、4318、4583
激光输出 峰值功率 (毫瓦)	脉冲放电峰值80安		1400
	准连续放电峰 值25安	脉宽0.3毫秒	108
		脉宽0.8毫秒	108
最低阈值电流*(安)		6	2.4
阈值电流(安)		7	4.8

说明: (1) 除打*号项外,所有测量均在各支试验管的近最佳Kr分压和29托He分压下进行的;

(2) 两支试验管的最低阈值电流都是在Kr分压低于最佳值的条件下测得的。

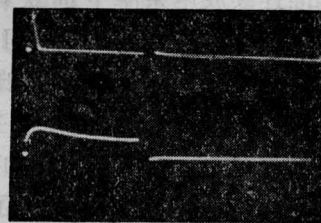
的情况,发现在很宽的Kr(0.01~1托)和He(12~29托以上)分压范围内都有4694埃激光输出。其中Kr分压的最佳值随管子结构不同而改变,数值大致在 $3\sim 7 \times 10^{-2}$ 托范围内。图3画出了激光输出峰值功率随Kr分压变化的典型曲线。

在不同的气压比条件下测量了激光输出峰值功率随电流的变化。图4画出了几根典型的曲线。由图4可以看出,激光输出功率随放电电流增加而增大。一般情况下,峰值电流达到50安时未出现饱和现象,只是在Kr分压明显偏低时,电流达到40安就开始出现饱和。

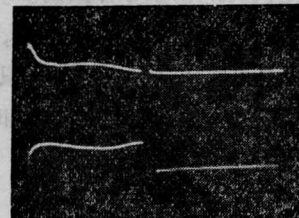
三、激光输出波形及其形成的机理分析

在准连续放电的条件下,利用不同宽度的放电电流脉冲研究了激光输出的波形。电流波形与相对应的激光输出波形是采用脉冲双踪示波器观测的。对于玻璃封接的1号和2号试验管,不管电流脉冲宽度多大(我们的

实验中电流脉冲宽度改变范围为0.3~2毫秒),都只在脉冲开始的0.2~0.3毫秒内有激光输出,并且在平均电流变大后,在同样的峰值电流下,激光输出的峰值功率减小了。而金属陶瓷封接的3号和4号试验管则在全部电流脉冲宽度范围内都有激光输出,但在最初0.2~0.3毫秒内有一个明显的尖峰,其数值远超过后面的激光输出数值。图5是两



(a)



(b)

图5 电流脉冲波形和相应的激光输出波形
脉宽为1.7毫秒;图中上为电流,下为激光输出;
(a)为1号和2号管;(b)为3号和4号管

种结构的试验管激光输出波形照片。

由于激光尖峰的延续时间长达 0.2~0.3 毫秒, 而与气体放电激励中脉冲激励(如放电击穿阶段、脉冲余辉阶段等)有关的过程的延续时间, 均为毫秒级到微秒的数量级, 因此上述激光的激励不是脉冲激励, 而是属于准连续过程。R. Solanki^[2] 等所用的准连续电源的电流脉冲宽度仅为 0.1 毫秒也说明了这一点。因此, 我们初步肯定目前的激光是准连续激励过程, 而观测到的激光特殊波形, 应当有其它的形成机理, 在脉冲的后半段时间内存在“猝灭”激光的因素。

在准连续放电条件下, 我们对 3 号试验管的自发辐射谱线输出波形进行了观测。在纯 He 放电时(压强 $P=25$ 托)观测 He 的主要特征谱(原子谱): 6678 埃、5876 埃、5016 埃、4438 埃、3889 埃等。谱线的输出波形与放电电流的波形是一致的。在纯 He 放电时没有找到 Ni 的特征谱线。

在 He-Kr 混合气体放电时, 除观察到大量 He 和 Kr 的特征谱线外, 还观察到 Ni 的下列谱线: 4866 埃、4787 埃、4714 埃、4402 埃。随着 Kr 分压增加和总气压降低, 这些谱线的辐射强度明显加强, 这是符合溅射规律的。

图 6 是利用脉冲双踪示波器拍下在 He 分压为 20 托、Kr 分压为 0.1 托时, KrII 4694 埃、4318 埃、Ni 4866 埃、4714 埃、4787 埃和 4402 埃、He 6678 埃、5876 埃、4438 埃和 5016 埃、3889 埃等自发辐射谱线的输出波形。对照图 5(b)和图 6(d)可以看出, KrII 4694 埃和 4318 埃谱线的激光振荡输出波形与自发辐射输出波形的特征是一致的, 都在脉冲起始 0.2~0.3 毫秒内有一个尖峰。由图其它照片可知, He 的一般自发辐射谱线输出波形与电流波形是一致的, 而 He 的两根以亚稳态为下能级的自发辐射谱线 5016 埃和 3889 埃的输出波形与 Ni 的有共同特征, 在开始 0.2~0.3 毫秒内较弱, 在这一时

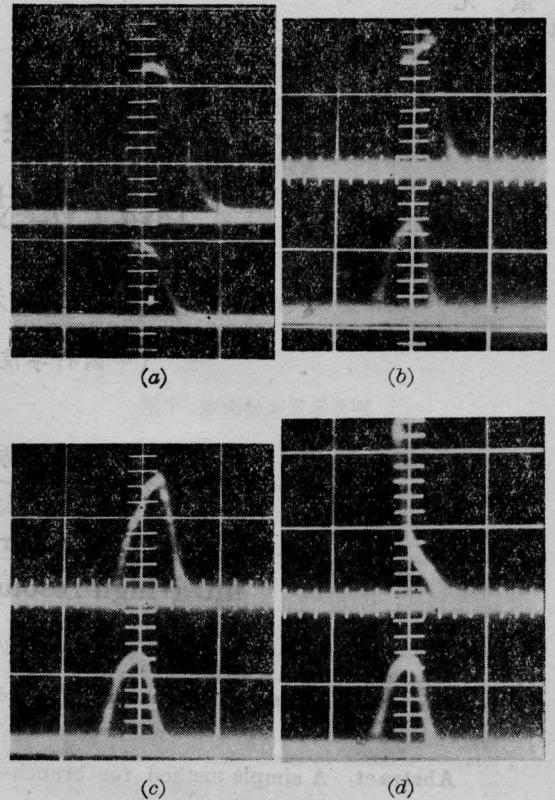
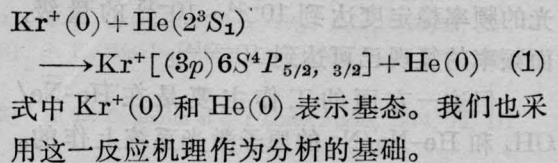


图 6 自发辐射谱线输出波形(时标 0.5 毫秒/格; 上面是谱线波形; 下面是电流波形)
(a)—He 5876 埃, 6678 埃, 4438 埃; (b)—Ni 4866 埃, 4714 埃, 4787 埃, 4402 埃; (c)—He 5016 埃, 3889 埃; (d)—KrII 4694 埃, 4318 埃,

间之后才达到较大的数值。

目前一般认为 HCD He-Kr 离子激光器上能级的激励是基态 Kr 离子与 He 的三重亚稳态之间的第二类碰撞:



由于 HCD He-Kr 离子激光器的放电电流密度比较大, 因此阴极溅射现象是不可避免的。由阴极溅射理论可知, 在空阴极放电时, 正离子轰击阴极使阴极金属材料大多数以原子态溅射出来, 它们很容易通过与其它粒子发生碰撞而被激发, 并使其它粒子“猝灭” (下转第 612 页)

将一些参数的数值(如 $U_1=220$ 伏, $\omega=314$, $B_m=1.55$ 韦伯/米²)代入到公式中去, 从而得到:

1. 平均充电电流

$$I_c = CU_c/T \quad (21)$$

2. 变压器的变压比

$$n = 3.214 \times 10^{-3} U_c \quad (22)$$

3. 变换器的输出即变压器的输入电流

$$I_2 = 3.214 \times 10^{-3} U_c I_c \quad (23)$$

4. 变换器的谐振电容

$$C_x = 9.306 \times 10^{-8} U_c I_c \quad (24)$$

5. 电抗器输入绕组的电感

$$L = 109/U_c I_c \quad (25)$$

6. 电抗器每一绕组的匝数

$$W = 4520/S_c$$

7. 电抗器铁芯中非磁性间隙的长度

可以根据 L 值查 $l_0=f(L)$ 曲线; 也可以用下式近似计算。

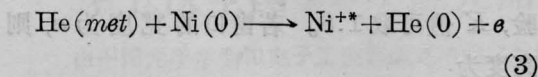
$$l_0 = 3.243 \times 10^{-3} I_2 W \quad (26)$$

l_0 的精确值在调谐时最后确定。

8. 电抗器输出绕组(即变压器初级绕组)的线径

(上接第 599 页)

灭”。以 Ni 为例, Ni 的激发态能级在 14 和 19.4 电子伏附近, Kr 离子基态电离能也是约 14 电子伏, He 的两个亚稳态能量分别为 19.8 和 20.7 电子伏, 所以下列两个反应:



可能具有相当大的反应截面。式中 Ni^{**} 表示 Ni^+ 的某一激发态; $\text{He}(met)$ 表示 He 的两个亚稳态。

实验中观察到 He 的自发辐射谱线输出波形与电流波形一致, 说明 He 原子的密度并没有受阴极溅射显著影响, Ni 的自发辐射谱线输出波形则说明在每一次放电脉冲中, 在 0.2~0.3 毫秒时间内 Ni 原子的相对密度

$$d_2 = 6.4 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{U_c I_c}{j}} \quad (27)$$

9. 电抗器输入绕组的线径

$$d_1 = 4.96 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{U_c I_c}{j}} \quad (28)$$

10. 电抗器铁芯窗口的高度

$$H = 53.3 U_c I_c / j S_c a \quad (29)$$

关于整流变压器的计算, 这里不作叙述, 因为在许多技术书籍中均可找到计算方法。这里只给出它的电气参数: 初级电压 220 伏, 初级电流等于 I_2 , 次级电压等于 $U_c/\sqrt{2}$ 。

公式(1)到(29)中各参数的单位, 统一说明如下:

C 和 C_x ——法拉; j ——安培/毫米²;

L ——亨利; S_c ——厘米²;

U_1 和 U_c ——伏特; T ——秒;

I_c 和 I_2 ——安培; d_1 , d_2 , H , a 和 l_0 ——毫米。

参 考 文 献

[1] И. В. Волков, В. М. Вакуленко; "Источники электропитания лазеров", 1976.
[2] 孙乃庚等;《激光》, 1978, 5, No. 2, 24.
[3] 邱关源主编;《电工基础》(上册), 1965年。

较小。由反应式(2)和(3)可看出, Ni 原子对激光产生“猝灭”, 因此, 在放电脉冲起始的 0.2~0.3 毫秒内, 激光输出将很强, 以后由于 Ni 原子的“猝灭”, 强度降低。

通过对自发辐射谱线输出波形的分析, 我们认为阴极溅射是造成激光“猝灭”的主要原因之一。由于阴极温度对阴极溅射的影响很大, 因而阴极散热的改善能够有效地减小阴极溅射从而改善激光输出波形, 提高激光输出功率。从表 1 可以看出, 金属陶瓷封接的外阴极型结构具有很大的优越性。

参 考 文 献

[1] N. K. Vuchkov et al., Opt. Commun., 1978, 27, No.1, 114.
[2] R. Solanki et al.; Appl. Phys. Lett., 1979, 35, No. 4, 317.