

利用微光摄像研究笛形空心 阴极放电的一些结果*

王欲知 韦琮
(成都电讯工程学院)

提 要

用目前国际上最灵敏的一种微光摄像机——电子倍增硅靶微光摄像机对笛形空心阴极放电的着火过程进行了观察研究；对光发展的机理提出了理论解释；判明了放电的发展存在两个阶段，即阳极与阴极管外空间的自持暗放电阶段和放电通过小孔进入阴极管内的阶段。对应于这两个阶段，存在两个 r 过程，即小孔周围金属表面上的 r 过程和阴极内表面上的 r 过程。根据上述结果，对目前流行的笛形空心阴极的几何参数设计准则进行了讨论。

一、引 言

通过观察放电过程中的微发光现象以研究放电机理，国外早已有所报道^[1-3]。但到目前为止，主要的观察工具都是多级像增强器。但因工艺技术上的限制，像增强器的尺寸都较小，且荧光屏亮度亦过低，观察起来很不方便。七十年代初，国外出现了一种新型微光摄像管——硅靶电子倍增摄像管(SEM)，比之老式的氯化钾摄像管，它具有灵敏度高、抗强光性能好等一系列优点。因此，由它装成的微光摄像机很快被应用于现代尖端科研上，如美国阿波罗登月计划中的阿波罗 XV 上，就采用了这种微光摄像机，对月球暗的一面进行摄像。微光摄像机比起像增强器来，具有屏幕大、便于多人观察和拍照、能通过调整对比度、灰度等取得最佳的图像等优点，因此，应用于研究气体放电现象，可以预期必能取得一些有用结果。

笛形空心阴极放电是白光激光器的一种主要放电形式，但目前对它的研究还是很不够的，因此，特选它做为微光观察的第一个对象。本文就是报道关于这方面研究的一些结果。

二、实验装置

本实验采用 WS-II 型微光摄像机。该机所用摄像管为硅靶电子倍增摄像管，并多加

* 中国科学院科学基金资助课题。
1985年2月7日收到。

了一级像增强器,可摄取的景物照度范围是 10^{-3} — 10lx ,分辨率为 400 行. 图 1 为实验用笛形空心阴极放电管的照片. 所用外串电阻范围是 10 — $60\text{M}\Omega$. 实验装置如图 2 所示. 所

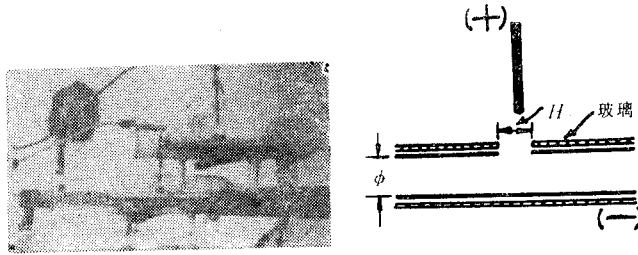


图 1 实验用笛型空心阴极放电管

采用的标准压强系统是国产 6301 型膨胀系统(国家标准),如图 3 所示. 系统上安装了阴

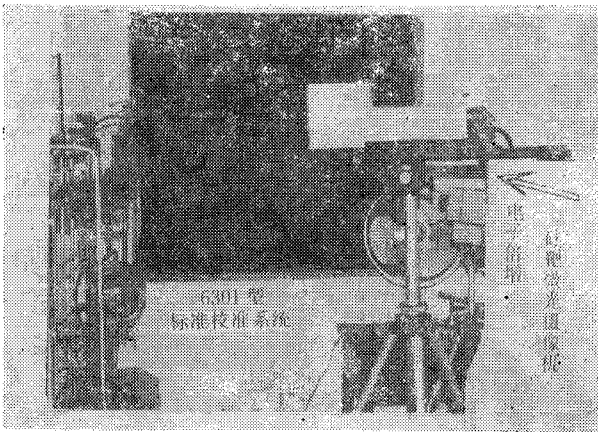


图 2 实验装置

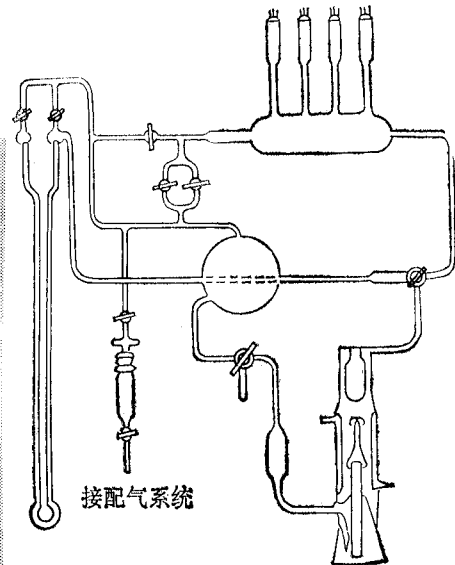


图 3 6301 型膨胀校准系统

极尺寸不同的三种放电管. 观察了每支放电管在不同阳极—阴极间距离(阳极杆下端到阴极孔中心的距离)下的放电特性. 改变电极间距是用火头将支承阳极杆的玻璃支管烧软然后拉长或缩短的办法.

三、实验结果

实验的压强范围为 10^{-1} — 50 托. 实验用气体分别为 He, Ne, Ar, Kr, Xe, N_2 .

1. He 为工作气体时的实验现象

(1) $P = 4$ 托 在此压强下,在暗放电初期直到气体被击穿前,未观察到微弱发光现象. 当外电压增高到某一值时,管内突然出现较强的光(暗室中,肉眼能观察到). 显然,这应对着气体被击穿.

(2) $P = 8$ 托 在此压强下,当外电压增高到 350V 时,监视屏幕上显示出阳极杆

下端出现很微弱的光,且有闪动. 闪动数次后,放电管内突然出现较强的光.

(3) $P = 11.7$ 托 此时观察到了稳定的微弱发光现象. 并且还观察到了随着外电压的增高,放电过程所对应的光发展现象. 即从阴、阳极空间出现极微弱发光到负辉光通过阴极孔进入阴极管内,直到空心阴极效应出现的过程,如图 4 所示. 图 4(a) 给出放电时(所用微光摄像机所能摄下的)最初的光现象. 此现象表明,在放电初期,首先在阳极杆

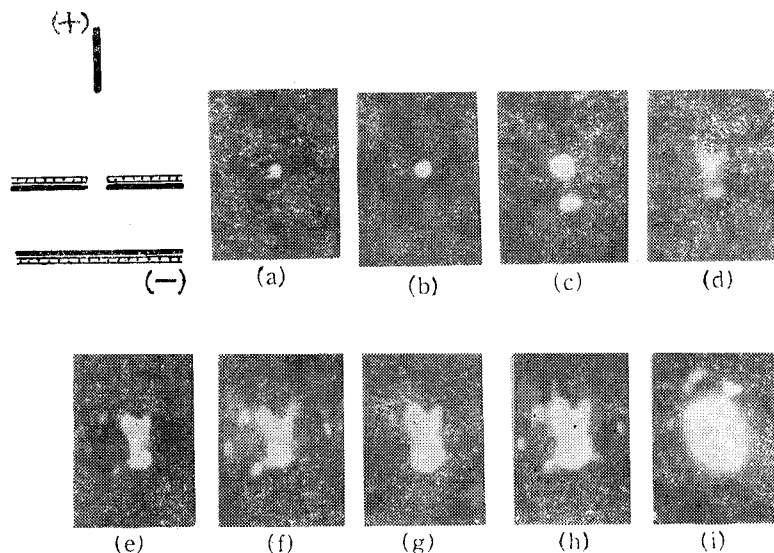


图 4 对应于不同外电压的光现象

下端出现微光. 值得强调的是,此光极弱,凭肉眼是观察不到的. 图 4(b) 表明,随着外电压的增高,先前出现的微光变得稍强一些,并且向四周有很小的扩展. 再继续增高外电压即出现图 4(c) 所示情形. 由图可见,除了光变得比图 4(b) 所示情况稍强一些,以及向四周扩展的区域稍大一些外,在阳极杆下端(命名为微光 1 区)的微光向四周扩展的同时,阴极孔上部空间区域(命名为微光 2 区)也出现微弱发光. 并且,此时在微光 1 区与微光 2 区之间还出现更微弱的光通道. 图 4(d) 到图 4(h) 给出随着外电压的继续增高,微光 1 区与微光 2 区逐渐扩大,并且它们之间的光通道也渐渐变亮,最后直到微光 1 区与微光 2 区连通的图景. 当上述两微光区域连通时,阴极管内部立即出现负辉光. 此时,放电电流剧增,放电管两端的电压降猛跌. 图 4(i) 给出了此现象.

(4) $P = 16.5$ 托 此时,当外电压增高到某一值时,在阳极杆下端出现微光闪动,闪动频率很低. 闪到某次时,阳极杆下端的微光点逐渐扩展,最后在阳极杆与阴极孔之间出现光通道,放电电流剧增,电压猛跌.

(5) P 为 23—50 托 在此范围内进行实验表明,当外电压增高到某一定值时,在阳极杆下端与阴极孔之间出现很微弱的光闪动. 有时闪动几次后,突然熄灭;有时闪动几次后,阴极管内或阳极杆与阴极孔之间突然出现负辉光. 这时,也就对应着气体的突然被击穿.

2. 其他气体

对 Ne, Ar, Kr, Xe, N_2 等气体所作实验表明,观察到的现象与 He 为工作气体时大

同小异. 此处略去具体结果.

四、笛形空心阴极放电的光发展现象的机理解释

藤井宽一^[4]出于白光激光器研制的需要, 对笛形空心阴极放电的光发展现象及其机理作了研究并给出了解释. 他认为放电时, 空心阴极管内的负辉光, 是由管外空间的负辉光随着放电电流的增大而通过阴极孔进入管内的. 并且, 在负辉光由管外进入管内的过程中, 下述三个因素起了主要作用. (1) 电力线在阴极孔边缘密集; (2) 空间电荷场的作用; (3) 二次电子撞出系数 γ 的增大.

以上三个因素的作用, 的确是存在的. 但它们如何起作用, 藤井的解释是不甚清楚的, 特别是关于负辉光进入阴极内的机理, 很难令人满意. 实际上, 根据我们从微光摄像机观察到的现象, 从暗放电初期到阴极管内出现负辉光的过程, 我们认为大致经历了如下两个阶段:

(1) 从阳极杆下端出现很微弱发光到阴极管外空间的自持暗放电过程, 称为第一阶段.

(2) 在阴极管外的一定区域(图 5 中的阴影区), 笛形空心阴极结构所形成的电场分布, 对在第一阶段中产生的正离子起着汇聚透镜的作用, 使它们中的一部分由阴极管外空间进入(汇聚到)阴极孔内(此处, 需要说明的是, 上述透镜仅为广义上的汇聚透镜, 是在把整个阴极孔当作一个汇聚点的意义上而言的). 上述正离子一俟进入阴极管内, 阴极管

内孔附近区域的电场分布又对它们起着扩散透镜的作用, 使它们在阴极管内散开, 在阴极管内也形成正空间电荷的堆积. 其中的一部分正离子轰击阴极管内表面, 产生二次电子. 二次电子在正空间电荷场作用下作加速运动, 并且在管内沿径向的运动呈现为来回振荡的形式. 在此过程中, 这些二次电子碰撞分子, 产生激发、电离效应, 使管内产生发光现象. 于是就发生了所谓的负辉光通过阴极孔进入到阴极管内的现象. 称上述过程为第二阶段.

在第二阶段中产生的正离子、亚稳原子和光子又轰击阴极内表面并产生新的二次电子. 在此过程中, 在阴极管内, 光子和亚稳原子的二次电子释放作用比它们在第一阶段中所起的作用大很多. 因而, 此时的二次电子撞出系数 γ 应比第一阶段中的为大. 阴极管内, 新产生的二次电子同样在正空间电荷场的作用下作加速运动且沿径向来回振荡, 使“激发、电离效应”进行得很剧烈. 如此

相互促进, 便产生了空心阴极效应.

在上述两个阶段中, 就 γ 过程来看, 显然有两个不同的 γ 过程起着作用. 设: (1) 阴极孔边缘区域金属表面上进行的为第一 γ 过程; (2) 阴极管内金属表面上进行的为第二 γ 过程. 就它们在光发展现象中所起的作用看, 在放电过程中的“第一阶段”, “第一 γ 过程”起主要作用. 随着暗放电电流的增加, “第二 γ 过程”逐渐参予进来, 最后导致“第二阶段”发生. 放电由“第一阶段”转入“第二阶段”, 在光的发展现象上就体现为所谓的光通过阴

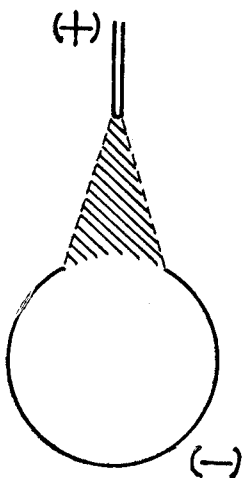


图 5

极孔由管外进入管内。由以上讨论,可以知道,阴极管内的负辉光并不是阴极管外空间的负辉光随着放电电流的增加而通过阴极孔进入管内的^[4]。我们还可以认为,阴极管内的负辉光完全可以不依赖于阴极管外的负辉光而独立存在,亦即他们之间没有依存关系。只要能提供一个“第二 γ 过程”的触发装置,就可以独立地在阴极管内得到负辉光。因此,本文认为,藤井对笛形空心阴极放电中阴极管内负辉光的形成机理的解释是值得商榷的。实际上,在本文的放电管结构下,上述“第一阶段”中产生的正离子就是“第二 γ 过程”的触发因子。最后,本文还认为,对放电由“第一阶段”转入“第二阶段”起决定作用的是“第二 γ 过程”,此 γ 过程的加入导致了放电电流剧增,阴极管内出现负辉光。

五、对笛形空心阴极放电管某些几何参数设计的讨论

藤井根据他自己对光发展现象机理的理解,在文献[5]中提出了最小阴极孔径的设计准则。认为要使负辉光能进入阴极管内,最小阴极孔径应由下式

$$H_{\min} = 2d_K = [2 \times 0.82 / (A \cdot p)] \ln(1 + 1/\gamma) \quad (1)$$

确定(见图 6)。

姑且不论将平板电极系统的理论用于笛形空心阴极放电是否合理,由上面光发展现象的讨论,显然应该认为,(1)式的成立是有问题的。为证实这个论点,我们特设计了下述实验。

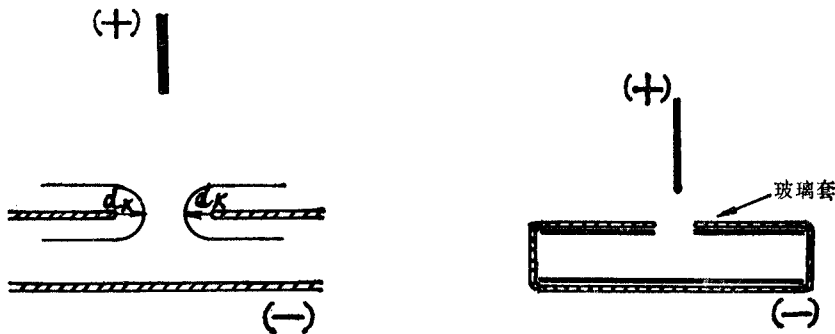


图 6

图 7

将阴极管的两个端口也用玻璃封住,只露出阴极孔,如图 7 所示。这样,当阴极管内表面参予放电时,其放电路径是唯一确定的,即只能通过小孔进入阴极管内。用 N_2 所作的实验表明,当 $P = 0.1$ 托时,着火电压 $V_s = 1.5\text{kV}$ 。当外加电压高于或等于 V_s 时,阴极管内出现负辉光,此时维持电压 $V = 360\text{V}$ 。将 $P = 0.1$ 托代入(1)式,算得 $H_{\min} = 4.6\text{cm}$ 。而实验所用的阴极孔径 $H = 1.75\text{cm}$ 。由此可知,若按藤井的设计准则,一定会预言放电不能进入管内。用其他气体所作的类似实验也同样证实了(1)式是不正确的。由此,我们认为,(1)式不能作为笛形空心阴极放电管阴极孔径的设计准则。而此设计准则不符合实际的根源却在他对光发展现象的理解上。实际上,藤井在考虑自持过程时,只考虑了处于阴极孔圆周上的金属表面的 γ 过程,没有考虑阴极内表面的 γ 过程的作用。然而事实上,阴极孔上的 γ 过程只是“第一 γ 过程”。在放电的一定阶段,内表面的 γ 过程即“第

二 γ 过程”，要参予放电的发展，两个 γ 过程相互促进，导致了着火和管内出现负辉光。

在文献[5]中，藤井还讨论了阴极管内径的设计。与阴极孔径的设计一样，他引用平板型电极系统的结论，得出：

$$\phi_{\min} = 2d_K = [2 \times 0.82 / (A \cdot p)] \ln(1 + 1/\gamma). \quad (2)$$

我们所作的实验也证实了用上式计算所得结果误差很大，不符合实际情况。

至于阴极孔径 H 、管径 ϕ 的设计究竟应遵循怎样的设计准则，尚需作进一步的研究。

以上，仅就笛形空心阴极结构的放电现象进行了讨论。我们认为，各种类型的气体放电，皆有其对应的微光过程。将微光摄像手段用于对这些过程的研究，定会有所收益。今后，在此领域内，我们将展开进一步的研究工作。

本课题承蒙中国科学院科学基金委员会的充分资助，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] K. H. Wagner, *Z. Phys.* (Germany), **204** (1967), 177.
- [2] K. H. Wagner, *CRI VI Conf. Int. Phenomenes d'Ionisation dans les Gas*, (Paris, S. E. R. M. A.), 2(1963), pp. 309—311.
- [3] J. Kappitz, *Z. Naturforsch. A* (Germany), **26a** (1971), 700.
- [4] Kan-Ichi Fujii, *Jpn. J. Appl. Phys.* **13** (1974), 571.
- [5] Kan-Ichi Fujii, *IEEE J. of QE*, Vol. **QE-15** (1979), 35.

SOME RESULTS OF THE RESEARCH ON THE FLUTE-TYPE HOLLOW CATHODE DISCHARGE USING A LOW-LIGHT LEVEL TV CAMERA*

Wang Yuzhi Wei Cong

(Chengdu Institute of Radio Engineering)

The breakdown processes of the flute-type hollow cathode discharge was observed by a low-light level TV camera of the SEM (Silicon Electron Multiplication) type, the most sensitive one of low-light level cameras of modern industry. An explanation for the mechanism of light developmen was presented. The light development was divided into two stages, i.e., the stage (1st stage) of self-sustained dark discharge developed in the space between the anode bar and the outer-side of the flute tube, and the stage (2nd stage) of entering of discharge through the hole into the flute tube. Corresponding to the two stages, there are two γ -processes, one existing at the metal surface around the hble and the other at the inner surface of the cathode. According to the above results, a discussion on the current principle of the design of geometrical parameters of the flute type was given.

* Projects supported by the Science Fund of the Chinese Academy of Sciences.