

guangdian bei zeng guan

光电倍增管

陈成杰 徐正卜 著

原子能出版社



光电倍增管

陈成杰 著
徐正卜

原子能出版社

光 电 倍 增 管

陈成杰 著
徐正卜

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 $\frac{1}{32}$ ·印张6.125·字数133 千字插页1

1988年5月北京第一版·1988年5月北京第一次印刷

印数1—2500册

统一书号: 15175·865 定价: 1.95元

ISBN 7-5022-0010-X/TP·1

内 容 提 要

本书简要地回顾了光电倍增管的发展历史，阐述了它的工作原理和各类参数特性，介绍了一些典型应用，推荐了一些选择和使用的管子方法。本书可供使用和研制光电倍增管的技术人员阅读，也可供中、高等院校有关专业师生参考。

目 录

前言	1
第一章 概 论	2
第一节 光电倍增管的发展简史	4
第二节 光电倍增管与半导体光敏器件的比较	9
第二章 光电倍增管的工作原理和组成	12
第一节 外光电效应和光阴极	13
第二节 窗材料和光阴极代号	25
第三节 输入电子光学系统	32
第四节 二次电子发射和实用发射体	35
第五节 倍增系统结构	41
第六节 阳极结构	49
第三章 光电倍增管的参数和特性	52
第一节 光电倍增管的基本参数	54
第二节 光电倍增管的应用参数和特性	66
第三节 光电倍增管的运行特性	99
第四章 光电倍增管的应用	112
第一节 闪烁计数技术	112
第二节 在医学和环境监测中的应用	126
第三节 光度测量和光谱分析	137
第四节 在光点扫描装置中的应用	143

第五节	激光探测	148
第六节	光子计数	154
第五章	光电倍增管的选择和使用	161
第一节	怎样选择光电倍增管	161
第二节	高压电源和分压器	166
第三节	输出电路	174
第四节	光电倍增管使用中的几个问题	179
附表一	北京核仪器厂光电倍增管产品主要技术参 数表	插页一
附表二	国营华东电子管厂光电倍增管产品主要技 术参数表	插页二
附表三	北京核仪器厂光电倍增管产品的管脚接线 表	187
附表四	光电倍增管分压器设置参考表	189
参考文献		190

前 言

从世界上第一支光电倍增管问世至今还只有五十年的历史，然而，作为光电器件的一个重要分支，它已经历了飞跃发展时期，步入广泛应用阶段。今天，光电倍增管拥有数以百计的品种，跻身于光探测器的前列。它的应用不再限于传统的核辐射闪烁计数领域，而已深入到色度测量，密度测量，光度测量，光谱测量，热释光测量，生物发光测量，光子计数，时间测量和气体分析等领域中。光电倍增管不再只是核物理学家的“掌上明珠”，而已成了许多新学科、新技术探索者身边的“奇妙眼睛”。在大量的重要仪器设备中，光电倍增管往往作为关键器件而显示其特殊的价值。但是，多年来国内出版的有关光电倍增管的书籍屈指可数，而且其中涉及光电倍增管应用的内容更为稀少。为此，我们编写了这本书，旨在为广大读者系统介绍一些光电倍增管的基本知识。本书着眼于光电倍增管的应用，侧重于介绍它的参数特性，期望能为光电倍增管的使用者提供一些初步的实用知识。限于篇幅，我们对参数或公式力求简明阐述其物理概念，一般不作严格的定义或数学推导。对一些数据来源也不给出繁琐的索引。由于我们水平所限，书中难免有错误不当之处，敬请读者指正。

著者

第一章 概 论

光电倍增管是探测紫外辐射、可见光和近红外辐射的一种电真空器件。顾名思义，它将接收到的光辐射变成电子流，然后经倍增放大，输出一个较大的电信号。执行光电变换的部分是光电阴极，简称光阴极。进行倍增放大的部分是倍增系统。倍增系统通常由几个到十几个倍增极和一个阳极组成。倍增极有时也称为打拿极，或二次发射极。当光辐射入射到光阴极上时，光阴极吸收光子以后发射出一些光电子。这些电子打到第一倍增极上，从那里激发出几倍于入射电子数目的二次电子，完成一次倍增。这些二次电子进一步打到第二倍增极上，产生更多的二次电子，完成二次倍增。这样，经过多次倍增以后，电子数目可增加 10^8 倍。最后，倍增后的电子流由阳极收集，从阳极输出的电信号由后续仪器观察或记录。

基于这种倍增作用，光电倍增管在微光探测领域占有极其重要的地位。倍增过程的低噪声特性使光电倍增管成为一种理想的低噪声放大器；通常，其增益为 $10^3 \sim 10^8$ ，而且调节外加电压就可以方便地改变其增益。一般情况下，光电倍增管可以很好地适应后续电子学设备的要求而无需附加放大器。光电倍增管具有很快的时间响应，上升时间一般为几十 ns 到 1 ns。因此，它又是一种很好的宽频带放大器。光电倍增管还有许多其它光电器件不能与之匹敌的优异特

性。由于这些特性，光电倍增管在天文、地理、地质、物理、化学、医学、考古学和生物学等领域中获得越来越广泛的应用，在科学研究、军事技术和工农业生产中起着日益重要的作用。

目前，在国外从事光电倍增管研制和生产的不下几十个，其中包括美国 RCA、英国 Thorn EMI、荷兰 Philips 等一些大型电子工业企业以及象日本滨松 (HTV) 这样的新兴中小型企业。RCA 以技术先进著称，该公司生产的光电倍增管以环形聚焦侧窗管和直线聚焦端窗管为主。产品型号有近百种，其中包括第一倍增极为 GaP、单电子分辨率可达 40% 的 8850，以及不透明 GaAs 阴极、积分灵敏度高达 $1025\mu\text{A}/\text{lm}$ 的 C31034 等。EMI 公司是欧洲最大的光电倍增管研制企业，七十年代末加入 Thorn 集团后更名为 Thorn EMI。该企业擅长端窗式百叶窗结构的管型，历来以暗电流小和半透明阴极质量好著称，如为人们熟知的 9635、9789 和 9558 等管型。近十余年来，该企业发展了一系列快速光电倍增管和铋铷铯阴极的管子，产品型号达百余种。Philips 公司和法国 RTC 公司、英国 Mullard 公司及联邦德国 Valvo 公司被称为“西欧四公司”。该集团历来以研制快速光电倍增管见长，如为人们熟知的 XP2262B、XP 2020、XP2230 和 XP2041 等管型。滨松公司的主要产品与 RCA 公司的相似，以光度和光谱测量用的侧窗管为主，近几年发展较快。产品中，不透明多碱阴极水平较高，如 R1477 的阴极积分灵敏度达到 $375\mu\text{A}/\text{lm}$ 。

五十年代开始，我国开始研制光电倍增管。近三十年来，我国已经发展了几十种管型，基本上形成了我国光电倍

增管产品系列，满足了国内绝大部分科研、生产单位的需要，其中不少产品的质量已经达到国外同类管型的水平。国内研制光电倍增管的单位有五六个，其中规模较大的是北京核仪器厂（原北京 261 厂）和华东电子管厂。它们是国产管子的主要供应基地，其主要产品目录见附表一和附表二。

第一节 光电倍增管的发展简史

光电倍增管是本世纪三十年代诞生的一种新型探测器件。虽然，提出用二次发射原理作信号放大的思想比较早，但是从第一个光电倍增管问世至今，总共才有五十年的历史。由于早期研究的严格保密，要考证谁是世界上第一个光电倍增管的发明者并非易事。苏联和美国都声称在 1934 年获得了成功。但是公诸于世的报道却要晚一些。1935 年，RCA 的艾姆斯 (H.E. Iams) 和萨尔斯伯克 (B. Salzberg) 报道了一个增益为 8 的单级光电倍增管。1936 年 1 月，苏联的库别茨基 (Л. А. Кубецикий) 撰文描述了一支多级光电倍增管，其增益超过 10^3 。同年，RCA 的兹渥里金 (Zworykin)、摩顿 (Morton) 和马尔忒 (Malter) 等宣布研制成功一个电磁聚焦的多级光电倍增管。三年后，兹渥里金和拉克曼 (J. A. Rajchman) 研制成了一支环形静电聚焦光电倍增管。不久以后，该管被命名为 RCA931 型光电倍增管。这是世界上第一种投入商品生产的光电倍增管，它是目前一系列侧窗管的先驱。几十年来，虽然经过多次修改和发展，但是 931 型光电倍增管的基本结构及其命名却一直袭用至今，为人们所熟知。

光电倍增管在天文学和分光光度学方面获得了早期的应

用。第二次世界大战期间，作为当时最好的“白”噪声源，光电倍增管被大量用于抗雷达跟踪装置。四十年代，光电倍增管“插足”于闪烁计数。光电倍增管和闪烁体的结合，不仅使闪烁计数技术获得了重大进展，而且给光电倍增管本身的发展增添了强大的推动力。从1948年7月在美国罗彻斯特大学召开首届闪烁计数器会议开始，到1974年第十四届会议为止，在历届会议上，各国学者发表了许多有关光电倍增管的研制报告和论文，我们可以清楚地看到，在此期间，光电倍增管的结构型式、阴极和倍增极材料、光电倍增管的参数和特性得到了充分的研究。

早在1930年，科勒和坎贝尔就已经发现了第一个实用的光阴极（银氧铯）。但是，这种阴极的短波区量子效率太低，暗发射太大，以致它的应用远不如后来发现的几种阴极那样广泛。

1936年，格利希（Görich）发现了铯铯阴极。其可见光区的量子效率远远超过银氧铯。铯铯阴极的问世不仅使光电倍增管获得广泛的实际应用，而且导致了一系列其它实用碱铯化合物阴极的出现。四十年代，除了少数几个近红外区应用的光电倍增管采用银氧铯阴极以外，几乎所有的光电倍增管均采用铯铯阴极。在光电倍增管的发展史上，四十年代被称为铯铯阴极的年代。此后，萨默（Sommer）发现了另外两种重要的光阴极：多碱（ $\text{Na}_2\text{KSb}:\text{Cs}$ ）阴极（1955年）和双碱（ K_2CsSb ）阴极（1963年）。多碱阴极在可见光区和近红外区有高的量子效率和低的暗发射电流。它逐步广泛地被用于光谱、光度测量，电视以及军事侦察仪器中。双碱阴极在蓝光区有很高的量子效率，而且具有比铯铯阴极小得

多的暗发射电流，在多数闪烁计数应用中，它是最理想的。七十年代，或许可称为双碱阴极的年代。在此期间，除了少数几种以外，光电倍增管中大多数铯铷阴极逐步被双碱阴极所取代。高温双碱光阴极在高温下的暗发射电流比其它阴极的低得多，也更稳定，主要用于石油测井技术中。在深达5km的地层，它能承受高达170℃的环境温度而有效地工作。

1965年，希尔 (Scheer) 和范拉尔 (Van Laar) 发现Ⅲ-V族化合物GaAs是极好的光电发射体。这种材料，通常被称为负电子亲和能材料。所谓亲和能，它是指受激电子从导带逸出到真空能级所需的能量。在传统的发射体中，电子亲和能通常是正的，就是说，到达导带的受激电子中，只有那些能量大于电子亲和能的电子才能逸出到真空中，完成光电发射；那些能量小于亲和能的电子就不能逸出。因此，其量子效率较低。经过适当处理的p型半导体表面，其表面层能级向下歪曲，导致电子亲和能成为负值。就是说，到达导带的受激电子，即使没有剩余的能量，也能逸出，因此有高的量子效率。负电子亲和能材料的研制成功，是研究光电发射机理的一大进展。从紫外到近红外，GaAs阴极的量子效率比经典阴极的高得多，而且在很宽的谱区内，各处相近。这一宝贵的“全色”特性，在分光光度测量中具有特殊意义。Ⅲ-V族化合物阴极的积分灵敏度高达 $1000\mu\text{A}/\text{lm}$ 。它曾经引起了大批光电器件工作者的研究兴趣，展示过诱人的应用前景。但是，由于这种化合物必须是单晶半导体，制造工艺相当复杂，因此它在实际应用中的进展比较缓慢。近20年来，世界上能够提供这类器件产品的企业为数不

多,而且所能提供的仅限于不透明反射式阴极的器件,量子效率一般不超过20%。由于这类器件制造困难,成本高,因此,除了某些特殊需要以外,Ⅲ-V族化合物阴极的器件迄今为止尚未得到广泛应用。

通常,良好的光电发射体往往也是良好的二次发射材料。事实上,银氧铯化合物既是最早的实用光阴极材料也是最早的实用二次发射体材料。随着碱锑化合物阴极的出现,倍增极材料也大多是碱锑化合物了。银镁合金和铜铍合金算是例外。虽然,从紫外到近红外谱区,它们并不是良好的光电发射体,但仍然是一种良好的倍增极材料。它们在大电流或者在高温环境下工作时具有高稳定特性,因此得以在碱锑化合物的“一统天下”中“割据”一些地盘。

1968年,西蒙(R.E.Simon)和威廉姆斯(Williams)报道了Ⅲ-V族化合物GaP作为二次发射体的成就。在较高电压下,GaP的二次发射系数比通常材料的高得多。早在六十年代,测得GaP的二次发射系数高达100以上。现在,用GaP作为倍增极的光电倍增管可以分辨单电子、双电子甚至多达8个电子的事件。不过,如同GaAs作为光阴极一样,由于其成本高,采用GaP作倍增极材料的管型为数很少。

某些碱锑化合物阴极显示了很好的实用价值。在通常的极间电压下,双碱($K_2CsSb:O$)发射体的二次发射系数可与GaP的媲美,其单电子分辨率可达到70%左右。这种发射体的制造工艺比GaP的简单得多。它在改善统计特性、光子计数和低能粒子分辨等方面有显著的优越性。多碱($Na_2-KSb:Cs$)和锑铷铯化合物也都具有很好的二次发射能

力。它们与相应的阴极一起获得了实际应用。

单通道管和微通道板也是很好的二次电子倍增器。与上述分离式的二次发射体不同，单通道管和微通道板是整体结构的连续倍增器。它们没有宽广的极间空间，以致电子倍增过程的渡越时间大大减小，因而有很好的时间特性。现在，微通道板光电倍增管的上升时间可以小于 0.3ns 。

七十年代以后，光电倍增管已经发展到一个比较成熟的阶段。研究和应用密切结合成了新时期的发展特点。七十年代末，为了探测大气或海洋中的宇宙射线，Thorn EMI 公司研制成大型“牛眼”管。这种光电倍增管的玻璃外壳呈球形，颇象牛眼，因此而得名。通常，这类管子在一个很大的空间中排成阵列使用。例如，在美国某地 600m 深处的盐矿水中进行质子裂变实验时，一次使用这类管子 2000 支。为了改善管子的能量分辨率，RCA 公司研制成“茶杯”形第一倍增极的光电倍增管。它和 NaI(Tl) 晶体组合，对 ^{137}Cs 的分辨率达到 6.7% 。为了适应 γ 照相机应用，一些方形或六角形外壳的光电倍增管出现了。这类管子最适合蜂窝状排列，可以大大减小“死区”。在高能物理研究中，为了探测高能粒子的能量和径迹，要求光电倍增管具有快的时间响应、高的效率和低的噪声。经过电子计算机辅助设计，快速光电倍增管的时间特性可接近分布参数的极限。噪声特性接近于光阴极热发射的噪声极限。液闪技术的发展促进了光电倍增管量子效率的进一步提高和本底的降低。表面分析等新技术的应用，加速了光电倍增管性能的进一步改进。

目前，光电倍增管尚未建立国际标准，也没有一个有关的国际组织着手这一工作，但是有关使用方便的要求，使得

世界各国生产的光电倍增管正在逐步趋向通用。各企业之间，已经有越来越多的产品可以直接互换使用。

第二节 光电倍增管与半导体光敏器件的比较

现在，对从紫外、可见光到近红外光的探测，有二类光敏器件可供选择。一类是真空光电器件，另一类是半导体器件。半导体光电器件在某些方面有一定优点，但是在较多方面，它明显地不及真空光电器件。下面对光电倍增管和半导体光敏器件进行简略比较。

在 200~900nm 谱区，光电倍增管有很好的响应，量子效率高，硅光电管则相当差；但是在波长大于 1100nm 的近红外区，情况恰好相反：硅光电管有极好的响应，而光电倍增管则很差。光电倍增管特别适合与闪烁晶体组合作闪烁计数用。它们不仅能记录闪烁强度（计数数目）和闪烁的能量（幅度），而且能探测粒子到达的时间。即使在近红外区，尽管硅光电管的量子效率比光电倍增管高得多，但是在某些场合，人们仍然选用光电倍增管。例如，在监测环境污染时，常需测量大气中 NO_x 的浓度。取样获得的 NO_x 混合气体的样品，在反应室里与 O_3 发生化学反应，产生峰值为 1200nm 的红外辐射。尽管在 850nm 处的辐射电平已经很低，而且光电倍增管的响应几近截止，但是人们宁愿选用 S-20 阴极的光电倍增管，而不用硅光电管。这是因为光电倍增管的高增益和低噪声，实际上提供了更好的信噪比。

光电倍增管的时间响应通常比半导体光电器件快得多。负载阻抗为 50 Ω 时，快速光电倍增管的上升时间可达 1~2ns。

硅光电管的固有上升时间为 $10\sim 20\text{ns}$ 。考虑到分布电容和为获得好的信噪比所必需的高阻负载，硅光电管的实际上升时间长达几十 μs 。硅雪崩光电管的上升时间可能短到 2ns ，但其增益很低（约150），灵敏面积不大（一般为 0.5mm^2 ）。

光电倍增管的外径尺寸从 10mm 到 500mm 已成系列。有效阴极面积最小的只有 0.1cm^2 ；最大的超过 2000cm^2 。使用有限数目的光电倍增管，可组成大面积的探测矩阵。硅光电管的灵敏面积通常不超过 1cm^2 ，一般只适用于点光源，或者可以用于透镜聚焦的场合。

高温双碱阴极光电倍增管可以在 170°C 环境温度下工作；硅光电管却不允许超过 80°C 。室温时，一个直径 51mm (2in) 的双碱阴极光电倍增管的阴极暗电流约为 10^{-16}A ；而普通硅光电管的暗电流却高达 10^{-7}A 。

测量很弱光时，探测器的灵敏阈（即探测极限）取决于信噪比。用光电倍增管探测波长为 400nm 的谱线强度时，能探测的最小信号功率约为 $2\times 10^{-17}\text{W}$ （假定信噪比等于1）。硅光电管在波长 1060nm 处能探测的最小功率大于 $2\times 10^{-13}\text{W}$ 。前者的探测灵敏阈比后者低四个数量级。所以，虽然硅光电管常被用作 Nd:YAG 激光（辐射波长 1060nm ）的接收器，进行测距和跟踪，但是，这种应用通常限于距离较近或信号较强的场合。在远距离人造卫星激光测距仪中，人们将 Nd:YAG 激光倍频到 532nm ，用光电倍增管探测。虽然，倍频使激光功率损失一些，但是光电倍增管很低的探测灵敏阈和好的时间特性，使得在测距精度和测程方面，光电倍增管都比硅光电管好得多。

光电倍增管的增益可以从 10^3 （甚至更低）到 10^8 连续

调节。一般的硅光电管没有增益；硅雪崩光电管的增益也不过150左右。

在光较弱时，光电倍增管有很好的稳定性；但是当光很强时，硅光电管就比光电倍增管稳定得多。

综上所述，硅光电管具有体积小，成本低，红外（波长大于1100nm）响应好及对强光工作稳定等特点。它很适合在红外聚束光如激光测距和跟踪，烟雾报警器和光纤通信等场合应用。但是在紫外到近红外的宽广谱区，光电倍增管至今仍然是最合适的光探测器。