

GUANGDIAN FASHE CIJI DIANZI FASHE YU
GUANGDIAN BEIZENGGUAN

光电发射、次级电子发射 与光电倍增管



周荣楣 编著



电子科技大学出版社

GUANGDIAN FASHE CIJI DIANZI FASHE YU
GUANGDIAN BEIZENGGUAN

光电发射、次级电子发射 与光电倍增管



周荣楣 编著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光电发射、次级电子发射与光电倍增管 / 周荣楣编著.
—成都: 电子科技大学出版社, 2015.4

ISBN 978-7-5647-2879-3

I. ①光… II. ①周… III. ①电子发射—光电倍增管
IV. ①TN152

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 048808 号



光电发射、次级电子发射与光电倍增管

周荣楣 编著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产
业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 罗 雅
责任编辑: 罗 雅
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸: 146 mm × 208 mm 印张 7.75 字数 226 千字
版 次: 2015 年 4 月第一版
印 次: 2015 年 4 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-2879-3
定 价: 28.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

序言

XUYAN

光电倍增管是一种对微弱光信号极其敏感的真空电子器件，它能够将微弱的光信号转换成电信号并加以不失真的放大，从而实现对光信号的探测。自 1935 年美国科学家 Iams 等人研发出第一只光电倍增管以来，世界各国对光电倍增管展开了大量深入的研究与开发，适用于多领域各种类型的光电倍增管也相继问世。

我国第一只光电倍增管诞生于 1958 年，经过 50 多年的发展，光电倍增管从理论基础到制备工艺，已经形成了完整的学科体系，是真空电子器件应用技术领域的一个重要分支。如今，国产光电倍增管已广泛应用于航天、航空、核辐射探测、核潜艇、石油探井、光学测量仪器、医疗设备等诸多军用民用领域。

随着光电倍增管的快速发展，企业技术人员渴望能有一本系统介绍光电倍增管的理论及其制备技术的书籍，用以提高自身专业水平，为研发工作奠定坚实的技术基础；高等院校学生希望通过对光电倍增管的系统学习，开阔视野，丰富知识，拓宽自身的择业范围；广大光电倍增管用户期望能有一本较有针对性的书籍可供参考，通过对光电倍增管相关参数及性能的了解，能够更好地选择自身所需的产品。

周荣楣教授现任南京三乐电子信息产业集团有限公司技术专家，从事光电倍增管研制开发工作近 50 年，对光电管、光电倍增管、

图像增强管开发设计以及关键工艺等方面有精深的研究，曾亲自指导过数十名学生完成有关光电倍增管方面的课题研究，承担过十多项国家光电器件新品项目的研发并多次获奖，发表论文 20 余篇。在近 50 年的研发生涯中，他经常深入生产一线，指导光电倍增管生产，解决生产技术和工艺难题，积累了丰富的经验。周荣楣理论造诣深厚，实践经验丰富，科研作风严谨，谦虚好敬业。他将自己毕生所学、所感，归纳整理，写成了这本《光电发射、次级电子发射与光电倍增管》，目的是希望能有更多的人认识光电倍增管的重要，从事光电倍增管的研究，为我国光电倍增管产业的发展做出更大的贡献。

我个人认为这是一本理论与实践紧密结合的著作，专业性、针对性及适用性很强。对于承担光电倍增管研究的技术人员，该书给他们提供必要的理论知识；对于生产操作人员，它能帮助他们从理论上去分析和解决生产中的工艺问题；对于高等院校学生而言，该书向他们详细地展示了光电倍增管设计和制备的全貌，是一本理论与实践相结合的教材；而对于广大用户而言，它又是一本光电倍增管的选择使用指南，具体而又全面。全书理论阐述严谨，条理清晰，重点突出，层次分明，深入浅出，易学易懂。该书的出版为中国真空电子器件行业增添了一本很有价值的参考书籍，我有幸并十分愿意将该书推荐给广大读者。

南京三乐电子信息产业集团有限公司总经理
高级经济师

孙伟彪

2014 年 9 月

前言

QIANYAN

随着光电子学及其应用事业的发展，我国真空光敏器件研制工作取得了巨大的成就，其中光电倍增管的发展与应用尤为引人注目。目前该器件的应用已渗透到国民经济的各个领域。为了满足研制光电倍增管的科技人员和使用光电倍增管的专业人士及刚刚涉足于本专业的高等院校学生的需要，作者将五十年来研制光电器件的点滴知识作一简要的汇编，将书定名为《光电发射、次级发射与光电倍增管》。

本书内容主要介绍光电发射、次级发射及光电倍增管的工作原理和特性。除引进国外较新的技术外，作者根据自己的理论功底与实践经验，对光电倍增管结构设计、光电特性、关键工艺作了理论上和实践上的补充。力求对于这方面的读者能起到一点有益的参考价值，在光电子学应用与发展中起到抛砖引玉的作用。由于作者学识浅陋，书中谬误之处在所难免，敬请读者不吝指正。

本书的出版得益于由南京三乐电子信息产业集团领导营造的一种尊重知识、尊重人才的氛围，为广大科研人员提供了一个施展才能的平台，在此，作者深表感谢。同时对电子科技大学物理电子学院的杨宏春副院长为本书的出版给予的帮助表示衷心的感谢。最后，对为本书做过文字校对、章节编排和电脑绘图的张芳、张佳敏、张潘桢等同仁的辛勤劳动深表谢意！

目录

MULU

第一章 光电倍增管的工作原理	1
1.1 基本原理	2
1.2 光电发射	3
1.2.1 金属的光电发射	5
1.2.2 碱金属薄膜的吸附与选择性光电效应	11
1.2.3 光电发射的体积效应与表面效应	14
1.2.4 半导体阴极的优异性	22
1.2.5 半导体的种类、表面能带与外加速场的影响	23
1.2.6 半导体的光学吸收	27
1.2.7 半导体的光电发射	28
1.2.8 复杂阴极的光电发射	32
1.3 次级电子发射（倍增极）	64
1.3.1 金属的次级电子发射	66
1.3.2 介质的次级电子发射	68
1.3.3 半导体的次级发射	69
1.3.4 不正常的次级发射	80
1.3.5 合金次级发射极	80

1.3.6	次级发射极的特性比较	88
1.4	光电倍增管中电子的聚焦	89
1.5	光电倍增管的结构及其分类	92
1.5.1	光窗与光电阴极	92
1.5.2	电子光学输入系统的设计	93
第二章	光电倍增管的主要结构特点	96
2.1	光窗与光电阴极的设计	97
2.1.1	光窗的材料	101
2.1.2	光电阴极的类型	103
2.2	电子光学输入系统	104
2.3	电子倍增系统	108
2.3.1	倍增系统的结构形式	109
2.3.2	倍增极材料的选择	124
2.3.3	倍增系统级数的确定	129
2.3.4	几种实用的分压电路	133
2.4	阳极输出系统	135
2.5	光电倍增管的整管结构形式	136
第三章	电子倍增器	137
3.1	电子倍增器的结构及其工作原理	138
3.2	倍增极次级发射体的材料与激活	138
3.3	倍增器的倍增极种类	139
3.4	级数的确定	139
3.5	分压器的设计	141
3.6	参数及测试方法	141
3.6.1	参数定义	141
3.6.2	测试方法	142

3.7	主要参数与基本特征	143
3.8	检测效率的计算	144
第四章	光电倍增管的主要参量和特性	147
4.1	光电倍增管的参量制	148
4.2	静态参量和特性	150
4.2.1	阳极光照灵敏度	153
4.2.2	电流增益和增益特性	153
4.2.3	暗电流	155
4.2.4	暗电流等效光通量	158
4.2.5	伏安特性	158
4.2.6	光电特性和线性电流	159
4.2.7	稳定性和稳态电流	160
4.2.8	滞后性	161
4.2.9	光敏性	162
4.2.10	阴极均匀性	162
4.3	动态参量和特性	163
4.3.1	脉冲光源	163
4.3.2	坪特性曲线	163
4.3.3	积分曲线和微分曲线	164
4.3.4	信号脉冲幅度	166
4.3.5	脉冲幅度分辨率	166
4.3.6	噪声	167
第五章	光电倍增管的制造工艺	172
5.1	光电倍增管的制造工艺	173
5.1.1	一般玻壳制造工艺	173
5.1.2	特殊玻壳制造工艺	174

5.1.3	金属陶瓷封接管壳的制造	174
5.2	零件的特殊处理	175
5.3	镀膜工艺	175
5.4	集成装配(装架)	176
5.5	封口	177
5.6	光电阴极的制造	178
5.6.1	碱金属的制备	178
5.6.2	真空要求	179
5.6.3	金属蒸发技术	180
5.7	光电倍增管的排气激活	180
5.8	次级发射体的制造	183
5.8.1	铜-铍合金次级发射体的制造工艺	184
5.8.2	银-镁合金次级发射体的制造工艺	184
5.9	铜-铍合金次级电子发射极激活机理的探讨	185
5.9.1	铜铍合金激活机理	185
5.9.2	结论	189
5.10	测试	189
第六章	光电倍增管的应用领域	191
6.1	光谱学	192
6.1.1	利用光吸收原理	192
6.1.2	利用发光原理	192
6.2	质量光谱学与固体表面分析	193
6.3	环境监测	193
6.3.1	尘埃粒子计数器	193
6.3.2	浊度计	194
6.3.3	其他	194
6.4	生物技术	194

6.4.1	细胞分类	194
6.4.2	荧光计	194
6.5	医疗应用	195
6.5.1	γ 相机	195
6.5.2	正电子 CT	195
6.5.3	液体闪烁计数	195
6.5.4	临床检查	196
6.5.5	X 光时间计	196
6.6	射线测定	196
6.6.1	区域检测仪	196
6.6.2	射线测量仪	197
6.7	资源调查	197
6.7.1	石油测井应用	197
6.7.2	地质状况调查	197
6.8	工业计测	197
6.8.1	厚度计	197
6.8.2	液位计、料位计	198
6.8.3	半导体检查系统	198
6.9	高能物理	198
6.9.1	加速器实验	198
6.9.2	中微子、正电子衰变实验、宇宙线检测	199
6.10	宇宙	200
6.10.1	天体 X 线探测	200
6.10.2	恒星及星际尘埃散乱光的测定	200
6.11	摄影印刷	200
6.12	离子体	201

第七章 光电倍增管的发展趋势	202
7.1 高灵敏度、高分辨率的光电倍增管	203
7.2 特殊功能的光电倍增管	204
7.3 特殊外壳的光电倍增管	205
7.4 微通道板光电倍增管	206
7.4.1 构造	206
7.4.2 微通道板光电倍增管的基本特性	208
7.4.3 加有控制极的微通道板光电倍增管	219
7.4.4 多阳极微通道板光电倍增管	221
7.5 位置探测型光电倍增管	224
7.5.1 栅网型倍增极的位置探测型光电倍增管	225
7.5.2 细网型倍增极的光电倍增管	230
7.6 展望	235
参考文献	236

第一章

光电倍增管的工作原理



1.1 基本原理

光电倍增管是一种光敏电真空器件，这种器件可把紫外、可见、红外的辐射能转变成电信号并加以放大。它之所以能把辐射能变成电信号并放大，主要是因为采用了两种形式的电子发射：即光电发射和次级电子发射。

该器件具有一个光电阴极、若干个聚焦极、若干个倍增极以及一个阳极。电子光学输入系统由一个光电阴极、若干个聚焦极组成。光电阴极是受到光辐射照射时能发射光电子的光敏薄层。倍增极是受到初级电子轰击时能发射次级电子且次级发射系数大于 1 的活性电极。所有倍增极按一定的几何位置排列而构成的整体称为倍增系统。倍增系统还包括一个阳极输出系统，后者由末级倍增极和阳极组成，如图 1-1 所示。

当入射光辐射透过光窗照射光电阴极时，由于光电发射效应，光电阴极就发射出光电子。光电子的数目与入射辐射的强度成正比。

一般来说，在光电倍增管中，利用电场和磁场使电子聚焦。所以光电子在电子光学输入系统电场的作用下，沿着一定的轨迹运动，

最后落在第一倍增极 D_1 上。由于次级发射效应， D_1 就发射出次级电子。因为倍增系统各个倍增极的电位是逐级升高的，所以 D_1 发射出

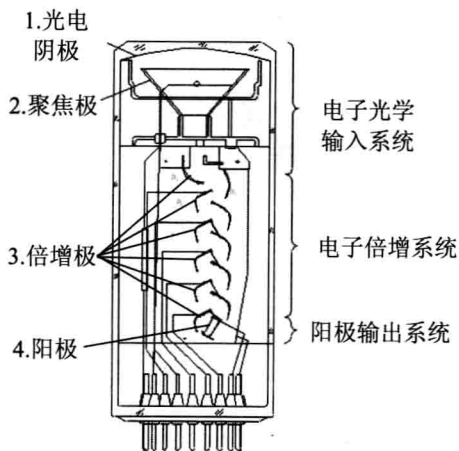


图 1-1 光电倍增管结构示意图

1—光电阴极 2—聚焦极 3—倍增极 4—阳极

的次级电子随之落在 D_2 上。由于同样的效应， D_2 将发射出更多的次级电子，这些电子接着又落在 D_3 上，如此连续进行，逐级倍增。结果可在末级倍增极形成大量的次级电子，这些次级电子最后为阳极收集，构成可观的输出电流。

1.2 光电发射

根据量子理论，光是一种有一定频率的电磁波，它的传播和吸收不是连续的，而是一份一份的，这一份额叫做光量子或称为光子。每个光子都有一定的能量，其值 $\varepsilon = h\nu$ ，其中 ν 表示辐射频率， h 是普朗克常数，等于 $6.25 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

当光照射到置于真空中的某些半导体和金属表面时，这些表面就可能发射出电子，这种现象叫做光电发射（或称为外光电效应）。

从固体产生的光电发射，有以下三个互相衔接的过程：

① 入射的光子被材料吸收，光子把能量传递给电子；

② 被激励的电子向固体表面扩散；

③ 电子克服固体表面的势垒向真空中发射出来。电子为了克服势垒所需的能量叫做逸出功。

材料的发射性能用量子效率 K 表征，它等于光电子数与光子数之比。量子效率越高，光电发射前两个过程的效率就越高，材料的逸出功就越低。某些复杂的半导体，即所谓有效光电阴极，就具有这种性能。

为了解释半导体光电发射机理，采用能带模型比较方便。根据能带理论，在固体晶格中的电子能带由价带和禁带组成。在研究半导体光电发射时，最值得注意的是两种能带：最高充满带（价带）和第一自由带（导带）。这两个能带由禁带加以分隔，如图 1-2 所示。

当温度为绝对零度和不吸收光子的情况下，价带填满了电子，这时导带处于空缺状态。当温度升高时，部分电子跃迁到导带，价带失去电子形成空穴，这样价带也可导电。当温度大于绝对零度时，

部分电子就可能从半导体中发射出来，这种现象叫热电子发射。

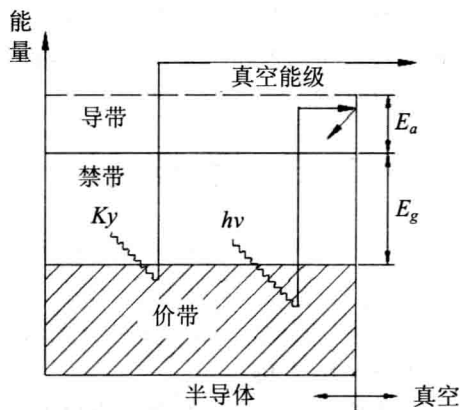


图 1-2 半导体光电发射能级图

当光子打在半导体上，辐射能就被价带中的电子吸收，如果光子的能量大于禁带宽度 E_g ，则价带中的电子就可能跃迁到导带。这时受激电子可能有两种状态：一种是受激电子的能量低于真空能级（光电导性）；另一种是受激电子的能量大于真空能级（光电发射）。为了克服势垒，受激电子的能量应等于电子亲和力 E_a 。这样看来，要能产生光电发射，光子的能量必须大于 $E_g + E_a$ 。 $E_g + E_a$ 之值就决定了半导体光电发射的红限 λ_{zt} 。

当光子的能量大于 $E_g + E_a$ 时，电子就可从更低的能级激励出来，量子效率就提高了。当光子能量很大时，电子就从很深的地方激励出来，结果电子的逸出几率反而降低。因而对一定的材料来说，光子的能量有一最佳值（意味着辐射波长有一最佳值），在这种最佳值情况下，量子效率 K 最大。

外光电效应服从以下规律：

① 当辐射波长一定时，光电流（单位时间内发射的光电子数）正比于入射光强（单位时间内照射在表面上的光子数）即斯托列多

夫定律。

② 入射光的光频越高，则光电子的最大动能就越大，即爱因斯坦定律。对半导体来说有

$$\left(\frac{1}{2}mv^2 \right)_{\text{最大}} = h\nu - (E_g + E_a)$$

式中： m 和 v 分别为光电子的质量和速度。

③ 只有当光频 $\nu \geq \nu_{\text{临界}}$ 时，才会产生光电发射。临界频率 $\nu_{\text{临界}}$ 及其相应的波长 $\lambda_{\text{临界}} = c/\nu_{\text{临界}}$ 叫做红限，它表示光电阴极灵敏度的长波阈。

④ 光电效应实际上是无惰性的，对已应用的光电发射材料来说，从光子的吸收到光电子的产生，时间滞后一般小于 10^{-12} s。

1.2.1 金属的光电发射

根据玻尔 (Bohr) 原子理论，电子在原子中的能量是不连续的，它们位于不连续的能级上。金属内的电子是按费米—狄勒 (Fermi-Dirac) 统计学分布的。索默菲 (Sommerfeld) 与福勒 (Fowler) 等又发展了金属的电子理论，并且应用于光电发射上。

(一) 金属的光电发射

从费米分布可知，金属中电子的能量要比作热运动电子的动能大，金属表面有位垒阻挡，故不能逸出。解释电子动能的最简类型曾为索默菲所讨论，他假定自由电子的运动对于晶格电位的变化没有影响。首先，在单原子中，当与带正电荷的质子接近时，电位愈来愈正。尽管如此，根据量子论，电子不能无限地接近质子，而必须位于一定的能级上。如果原子中具有很多电子，各个电子距离质子有着一定的距离。在原子的晶格中，一个原子周围的电位分布将因邻近原子的存在而变形，可以设想其降至较平区域的最小值。

在自由电子中电子的动能分布可用直角坐标系表示，以 P_x ， P_y ， P_z 各代表 x ， y ， z 方向的动量。坐标系统可分为若干单元孔室，