

# 光 电 管

金 圣 经

(中国科学院长春物理研究所)

光电管是利用光电子发射效应制成的一种光电变换器件,从1930年开始实现了实用化。此后,随着各种光电阴极的开发和稳定性的改善,目前已在分光光度计、比色计、浓度计、自动生体分析器、公害测量仪等方面获得广泛应用。

本文概述光电管的结构和工作原理及特性,并给出光电管的各种型号以及使用的注意事项。

## 一、光电管的结构和工作原理

### 1. 光电管的形状及电极结构

光电管按外形和电极结构的不同可分为多种类型。

从外形上,按接受入射光的位置(方向)可分为:侧面受光(side on)型和顶部受光(head on)型。

从电极结构上,按阴极(光电面)的类型分为:半透明型(透过型):它是把光电面蒸镀在玻璃管壳内壁上,属于管壁型结构。这种结构,可使阳极的设计容易,在低阳极电压下也能得

到高的灵敏度。不透明型(反射型):又可分为管壁型和板极型(把光电面蒸镀在管内金属板上)。按阳极的类型分为棒状、圆锥状、板状、圆盘状、盒状、圆柱体状、网格状、框状。图1表示光电管的形状和两种电极结构。

### 2. 光电管的工作原理

光电管由光电阴极和阳极构成,实质上它就是一个二极管。光照射光电阴极而发射电子,电子在阳极电场的作用下形成了光电流。

在光电管内充进气体,利用气体的电离作用放大电流,即为充气光电管。所充气体一般为电离电位低的惰性气体(如氖、氩和氦气),以保护阴极的性能。

在充气光电管内,当阴极发出的光电子向阳极运动时,就与气体分子发生碰撞,使气体电离成电子和正离子。电子在电场的作用下,加入光电子行进的行列,再次使气体分子电离,这种连锁反应的结果产生一种雪崩过程,使光电管的有效电流增加。正离子在电场的作用下向阴极运动,构成离子电流。同时正离子还会碰撞阴极产生二次电子发射,因此它比一般真空光电管的电流大10倍以上。图2是充气光电管示意图。

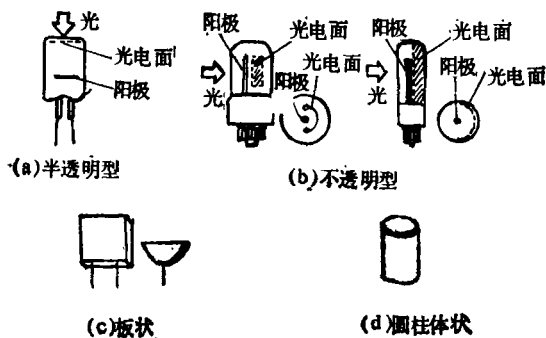


图 1

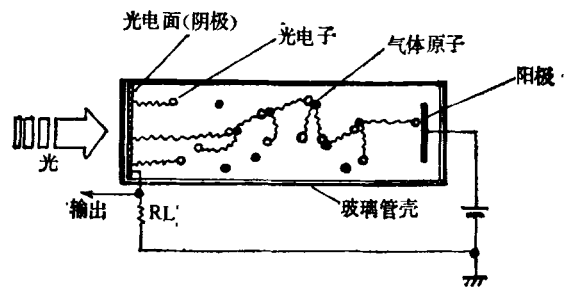


图 2

## 二、光电管的特性

### 1. 分光灵敏度

入射光激励光电面内的电子,使光电面发射光电子,发射的光电子数量正比于入射光子数,其比值视入射光的波长而异。这种特性叫做分光灵敏度。

对光电管的分光灵敏度来说,长波波段决定于光电面材料,短波波段决定于入射光窗口材料。纯金属材料的逸出功都很大,因此极限波长  $\lambda_0$  落在可见区或紫外区。为了减少逸出功,通常在基体金属表面上覆盖一层正离子的单分子层,以增大吸附作用。

根据元素周期表可知,金属元素中 Cs 的逸出功最小。下面介绍几种常用的光阴极材料。

(1) Ag-O-Cs 光阴极(又称 S-1 光阴极)的逸出功最小,约 0.72eV,其极限波长  $\lambda_0$  为 12000 Å,在近红外区有一个峰值,广泛用于红外探测器件上。

(2) Sb-Cs (Cs<sub>3</sub>Sb) 是最一般的光阴极。在 3000—4200 Å 范围内有最大的光谱灵敏度,极限波长  $\lambda_0$  为 7200 Å,多用于紫外至可见光区域。

(3) Na-K-Sb-Cs 称为多碱(金属)光电阴极,其灵敏度范围比 Sb-Cs 更宽,多用于近红外区域。

(4) Cs-Te, Cs-I 光电阴极称为太阳盲(solar blind),只对紫外敏感,特别是 Cs-I 对 2000 Å 以上的波长灵敏度为零。

(5) GaAs (Cs) 光电阴极,其光谱灵敏度范围比多碱光电阴极更宽,特别是在长波波段也具有高的灵敏度。

(6) Bi-Ag-O-Cs 光阴极,灵敏度较高,而且它的光谱响应和人眼的光谱灵敏度曲线(即视觉函数曲线)相似,因此可用于光度学和摄像管中。图 3 给出几种光电面材料的分光灵敏度。

常用的入射光窗口材料有:(1) 硼硅玻璃(也称为 kover glass)。它能通过从 300nm 到近

红外光;(2) 透紫外(UV)玻璃。它能通过从 185nm 到近红外光;(3) 石英玻璃。它的紫外透过率优于透紫外玻璃,能通过从 160nm 到近红外光;(4) MgF<sub>2</sub>(氟化镁)。它的紫外透过率优于石英玻璃,能通过从 115nm 到红外光。

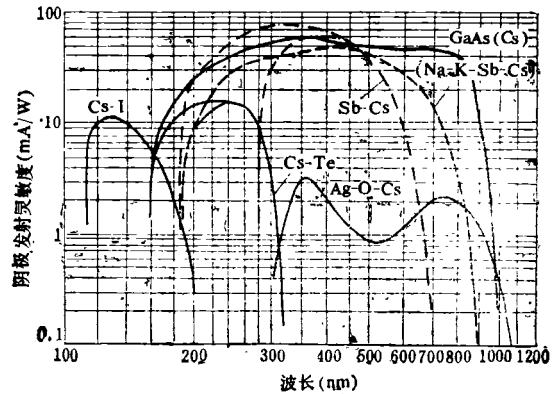


图 3

### 2. 灵敏度

光电管灵敏度一般有量子效率(%)、阴极发射灵敏度(A/W)、阴极流明灵敏度(A/lm)三种。

(1) 量子效率: 光电阴极入射一个光电子时,发射的光电子数的比率。

$$\text{量子效率} = \frac{\text{由光阴极发射的光子数}}{\text{入射光子数}} \times 100(\%)$$

(2) 阴极发射灵敏度: 入射光强度(用 W 表示)和发射的电子数(用光电面中流过的电流 A 表示)的比率。

$$\text{发射灵敏度} = \frac{\text{电流(A)}}{\text{光的强度(W)}}$$

(3) 阴极流明灵敏度: 发射的电子数(用流过光电面的电流 A 表示)和入射光光通量(用 lm 表示)的比率。

$$\text{阴极流明灵敏度} = \frac{\text{电流(A)}}{\text{光通量(lm)}}$$

由于灵敏度随波长变化改变,所以测量时必须保持入射光中波长能量分布不变。可用色温一定的钨丝灯(2856K)作为光源,来测量流明灵敏度。对测量紫外光的光电管,则用发射

表1 光电管分类表(日本浜松公司)

光电阴极种类 分光灵敏度特性 (nm)			Cs-Te		Sb-Cs		多碱 Na-K-Sb-Cs		GaAs(Cs)	Ag-O-Cs
			185—320	160—320	300—650	185—650	300—850	185—850	160—910	300—1100
人射光窗口材料			紫外玻璃	石英玻璃	硼硅玻璃	紫外玻璃	硼硅玻璃	紫外玻璃	石英玻璃	硼硅玻璃
管子外径(φ)										
真空·充气										
侧面受光型	18	真空			PV13	R491		R518 R518-02*		PV11
		充气			PG14A R250					
	18 顶部阴极	真空			PV16	R370				
	19	充气			90AG					
	30 (GT型)	真空			1P39			R520 R314	R807	R321
		充气			4409					6953
	30 顶部阴极	真空						R1287*		
30 顶部阳极	真空				935					
顶部受光型	21 以下	真空	R1107 (9.5φ) R1384 (21φ)	R765 (14φ)	R414 (9.5φ)	R840 (14φ) R727 (21φ)		R645 (21φ) R1360 (21φ)		
		真空						R330-02		
	28 以上	真空					PV52 (51φ)	R847 (30φ)		
	特殊型	真空				R1193U -02 R1328U -02	R1193U -03 R1328U -03			R1193U -01 R1328U -01

\* R518-02: 185~930nm R1287: 185~950nm.

表2 几种常见的国产光电管特性

特 性	型 号	GD-5	GD-6	GD-7
光谱范围 (Å)		2000—6000	6000—11000	3000—8500
最佳灵敏度波长 (Å)		3800—4200	8000±1000	4500
最小阴极灵敏度 (μA/lm)		30	10	45
阳极工作电压 (V)		30	30	100
阳极暗电流 (A)		3×10 <sup>-11</sup>	8×10 <sup>-11</sup>	8×10 <sup>-10</sup>
环境温度(°C)		5—35	5—35	≤40

表3 光电管特性\*

型 号	特 点	分 光 灵 敏 度 特 性 (nm)	最 高 灵 敏 度 波 长 (nm)	入 射 光 窗 口 材 料	光 电 阴 极 面		阴 极 形 状
					材 料	类 型	
PV11	近红外区	300—1100	730	硼硅玻璃	Ag-O-Cs	不透明	圆锥形
PV13	可见光	300—650	400	硼硅玻璃	Sb-Cs	不透明	棒形
R491	紫外—可见光	185—650	340	紫外玻璃	Sb-Cs	不透明	棒形
R518	宽频带	185—850	400	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	不透明	棒形
R518-02	增强 R518 的红外灵敏度	185—930	400	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	不透明	棒形
PV16	可见光	300—650	400	硼硅玻璃	Sb-Cs	不透明	圆锥形
R370	紫外—可见光	185—650	340	紫外玻璃	Sb-Cs	不透明	圆锥形
R321	近红外光	300—1100	730	硼硅玻璃	Ag-O-Cs	不透明	圆锥形
1P39	可见光	300—650	400	硼硅玻璃	Sb-Cs	不透明	棒形
R520	宽频带	185—850	330	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	不透明	棒形
R314	宽频带	185—850	330	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	不透明	板形
R807	宽频带,平坦的分光灵敏度	160—910	300—800	石英玻璃	GaAs(Cs)	不透明	盒形
935	紫外—可见光,普通用	185—650	340	紫外玻璃	Sb-Cs	不透明	棒形
R1287	宽频带,红光灵敏度增强	185—950	375	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	不透明	棒形
R414	超小型,低电压	300—650	400	硼硅玻璃	Sb-Cs	不透明	圆柱形
R1107	紫外光,低电压	185—320	240	紫外玻璃	Cs-Tc	不透明	圆柱形
R840	小型,低电压	185—650	340	紫外玻璃	Sb-Cs	不透明	圆柱形
R765	紫外光,低电压	160—320	220	石英玻璃	Cs-Tc	不透明	圆柱形
R1187	紫外光,低电压	115—200	130	MgF <sub>2</sub>	Cs-I	不透明	圆柱形
R727	一般可见光,低电压	185—650	340	紫外玻璃	Sb-Cs	不透明	板形
R1360	宽频带,物理测光	185—850	420	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	不透明	圆柱形
R1384	紫外光,物理测光	185—320	240	紫外玻璃	Cs-Tc	不透明	圆柱形
R645	宽频带,低电压	185—850	420	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	半透明	圆盘形
R488-02	一般可见光	185—650	340	紫外玻璃	Sb-Cs	不透明	圆柱形
R330-02	宽频带,物理测光	185—850	420	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	半透明	圆柱形
R847	宽频带,物理测光	185—850	420	紫外玻璃	Na-K-Sb-Cs	半透明	圆柱形
PV52	可见光—近红外光,物理测光	300—850	420	硼硅玻璃	Na-K-Sb-Cs	半透明	圆盘形

\* (1) 阴极平均电流: 以 1s 为间隔,照射全光电面。

(2) 流明灵敏度: 在指定阴极电压下, 2856K 标准钨丝灯为光源, 负载电阻 1M $\Omega$ 、入射光通量 0.1lm。

(3) 发射灵敏度对应于最高灵敏度波长。

(4) 饱和度: 对 90V 和 25V 阳极电压的阴极电流比。

(日本松下公司)

绝对最大额定值					特 性 (25°C)							备 注
阴极电压 (Vdc)	阴极峰值电流 ( $\mu\text{A}$ )	平均阴极电流密度 ( $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ )	平均阴极电流 ( $\mu\text{A}$ )	环境温度 (°C)	阴极电压 (Vdc)	流明灵敏度 ( $\mu\text{A}/\text{lm}$ )	发射灵敏度 ( $\text{mA}/\text{W}$ )	暗电流 max (A)	推荐工作电压 (Vdc)	饱和度 min (%)	电极间静电电容 (PF)	
250	6	0.05	2	50	90	25	2	$5 \times 10^{-9}$	40	75	11	$\phi 18$ , 侧面受光形真空光电管
250	6	0.05	2	50	90	80	59	$0.5 \times 10^{-9}$	40	75	0.95	$\phi 18$ , 侧面受光形真空光电管
250	6	0.05	2	50	90	80	59	$0.5 \times 10^{-9}$	40	75	0.96	$\phi 18$ , 侧面受光形真空光电管
250	2	0.01	0.5	50	90	80	40	$0.5 \times 10^{-9}$	40	75	0.98	$\phi 18$ , 侧面受光形真空光电管
250	2	0.01	0.5	50	90	120	40	$30 \times 10^{-12}$	40	75	0.98	$\phi 18$ , 侧面受光形真空光电管
250	6	0.05	2	50	90	80	51	$0.5 \times 10^{-9}$	40	75	1.64	$\phi 18$ , 侧面受光形真空光电管
250	6	0.05	2	50	90	60	51	$0.5 \times 10^{-9}$	40	75	1.64	$\phi 18$ , 侧面受光形真空光电管
250	9	0.05	3	50	90	25	2	$5 \times 10^{-9}$	50	75	2.9	$\phi 30$ , 侧面受光形真空光电管
250	20	0.05	5	50	90	80	59	$0.5 \times 10^{-9}$	60	75	1.7	$\phi 30$ , 侧面受光形真空光电管
250	5	0.01	1	50	90	80	40	$50 \times 10^{-12}$	60	75	1.65	$\phi 30$ , 侧面受光形真空光电管
250	1	0.005	0.1	50	90	150	64	$10 \times 10^{-12}$	50	75	3	$\phi 30$ , 侧面受光形真空光电管
15	0.25	0.0015	0.075	50	5	500	62	$1 \times 10^{-12}$	5	90	3	$\phi 30$ , 侧面受光形真空光电管
250	30	0.05	10	50	90	80	59	$10 \times 10^{-12}$	50	75	2.1	$\phi 30$ , 侧面受光形真空光电管
100	8	0.005	2	50	35	120	55	$15 \times 10^{-12}$	40	80	1.9	$\phi 30$ , 侧面受光形真空光电管
100	1	0.05	0.3	50	15	50	47	$50 \times 10^{-12}$	15	85	2	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	0.5	0.05	0.15	50	15	15mA/W	28	$5 \times 10^{-12}$	15	85	2	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	2	0.05	0.5	50	15	80	51	$5 \times 10^{-12}$	15	85	2.4	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	1.2	0.05	0.4	50	15	20mA/W	28	$1 \times 10^{-12}$	15	85	2.4	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	1	0.005	0.1	50	15	10mA/W	12	$1 \times 10^{-12}$	15	85	2.4	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	6	0.05	2	50	15	110	70	$5 \times 10^{-12}$	15	85	2	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	2	0.01	0.5	50	15	80	40	$5 \times 10^{-12}$	15	85	2	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	2	0.05	0.4	50	15	15mA/W	28	$1 \times 10^{-12}$	15	85	2	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	1	0.005	0.25	50	15	150	50	$1 \times 10^{-12}$	15	85	3	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	6	0.05	2	50	15	85	59	$5 \times 10^{-12}$	15	85	2	$\phi 21$ , 顶部受光形真空光电管
100	1	0.005	0.075	50	15	150	64	$1 \times 10^{-12}$	15	85	8	$\phi 25$ , 顶部受光形真空光电管
100	2	0.005	0.6	50	15	150	64	$1 \times 10^{-12}$	15	85	4.4	$\phi 30$ , 顶部受光形真空光电管
250	9	0.005	3	50	90	150	64	$80 \times 10^{-12}$	90	75	9.8	$\phi 30$ , 顶部受光形真空光电管

表 4 充气光电管特性\*

型号	分光灵敏度特性 (nm)	最高灵敏度波长 (nm)	光电阴极面		阴极形状	绝对最大额定值					特性 (25°C)				备注
			材料	类型		阳极电压 (Vdc)	阴极峰值电流 (μA)	平均阴极电流密度 (μA/mm <sup>2</sup> )	平均阴极电流 (μA)	环境温度 (°C)	阴极电压 (Vdc)	流明灵敏度 (μA/lm)	气体放大率 max	暗电流 max (A)	
PG12	300—1100	750	Ag-O-Cs	不透明	圆锥形	90	6	0.05	2	50	90	125	10	100×10 <sup>-9</sup>	φ18 侧面受光型
PG14A	300—650	400	Sb-Cs		棒形	90	6	0.05	2	50	90	200	8	100×10 <sup>-9</sup>	φ18 侧面受光型
R250	300—650	400	Sb-Cs		棒形	80	6	0.05	2	50	75	300	8	0.5×10 <sup>-9</sup>	φ18 侧面受光型
90AG	300—650	400	Sb-Cs		圆锥形	90	6	0.05	2	50	90	150	8	100×10 <sup>-9</sup>	φ19 侧面受光型
6953	300—1100	730	Ag-O-Cs		板形	90	9	0.05	3	50	90	150	10	2×10 <sup>-9</sup>	φ30 侧面受光型
4409	300—650	400	Sb-Cs		板形	100	10	0.05	3	50	90	200	8	2×10 <sup>-9</sup>	φ30 侧面受光型

\* (1) 2856K 标准钨丝灯, 负载电阻 1MΩ, 入射光束 0.05lm (测量流明灵敏度时)。

(2) 阳极电压 90V 和 25V 时的阴极电流比(测量气体放大率时)。

表 5 特殊光电管\*(双板光电管)

型号	分光灵敏度波长 (nm)	最高灵敏度波长 (nm)	光电阴极材料	阴极形状	绝对最大额定值					特性 (25°C)				备注
					阳极电压 (Vdc)	阴极电流峰值 (A)	入射光能量密度 (W/mm <sup>2</sup> )	平均阴极电流 (μA)	环境温度 (°C)	阳极电压 (Vdc)	流明灵敏度 (μA/lm)	暗电流 max (A)	建立时间 typ (ns)	
R1193U-01	300—1100	750	Ag-O-Cs	网格	2500	1	0.125	50	75	250	15	50×10 <sup>-9</sup>	0.3	φ63 (亮径) 顶部受光型
R1193U-02	185—650	340	Sb-Cs	网格	2500	1	0.125	50	75	250	40	50×10 <sup>-9</sup>	0.3	
R1193U-03	300—850	400	Na-K-Sb-Cs	网格	2500	1	0.125	50	75	250	60	50×10 <sup>-9</sup>	0.3	
R1328U-01	300—1100	750	Ag-O-Cs	网格	2000	0.3	0.125	5	75	250	15	100×10 <sup>-9</sup>	0.06	
R1328U-02	185—650	340	Sb-Cs	网格	2000	0.3	0.125	5	75	250	40	100×10 <sup>-9</sup>	0.06	
R1228U-03	300—850	400	Na-K-Sb-Cs	网格	2000	0.3	0.125	5	75	250	60	100×10 <sup>-9</sup>	0.06	φ30 (亮径) 顶部受光型

\* (1) 用于观测持续时间 0.1μs, 亚 PS 高速激光脉冲和光学脉冲, 输入脉冲的上升时间受测量系统的影响大, 所以测量时用专用金属壳部件, 输出用同轴 N 型连接器与示波器连接。

(2) 阴极峰值电流脉冲宽度小于 50ns。

(3) 入射光通量为 0.1lm, 2856K 标准钨丝灯, 负载电阻 1MΩ (测量流明灵敏度时)。

灵敏度表示。

即使是同一只光电管，由于入射光的位置不同，其灵敏度也有偏差。为此，先让入射光经乳白玻璃之后再入射到光电阴极或设计一种装置，使入射光的位置不摇晃，以便减少其偏差。

### 3. 伏安特性

#### (1) 真空光电管伏安特性

在低压时，阳极电压和阴极电流之间的关系呈线性增长。当阳极电压高到一定数值时，阴极电流达到饱和状态，与此相应的电压叫做饱和电压。饱和电压的大小与光电管的结构和电极的相互位置有关。饱和电压一般为 50—90V，也有 3—15V 的低电压。饱和电压还与管的工作条件有关，它随照射光强的增大而增高，随照射光波长的增加而降低。

阳极所加的电压，应使光电管工作在饱和区域内并有大的线性范围。阳极电压也受负载电阻的影响，降低电压容易出现磁滞现象，电压过高，则寿命受影响，所以对阳极电压应有一定的限制。图 4 表示真空光电管的伏安特性。

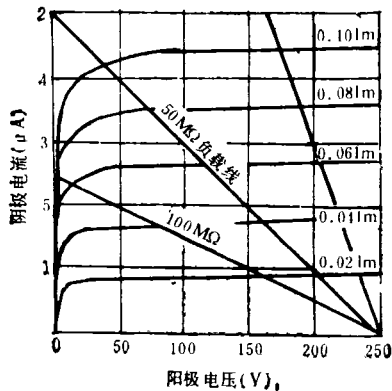


图 4

#### (2) 充气光电管伏安特性

在光电管内，当阳极电压很低时，光电子能量较小，它与气体碰撞后不仅不能使气体分子电离，反而会被弹性地返回来，这时光电流很小；当阳极电压增高，由于光电子的碰撞发生电离作用，电流剧增，直到气体从非自持放电变成自持放电。由非自持放电刚刚转变成自持放电

物理

时的阳极电压称为着火电压。自持放电后管内出现电子浪和离子浪。这时阴极电流与光强和阳极电压无关，仅取决于外电路的限流电阻。

着火电压随光强的增加而降低。管内气压在 0.1—0.8 mmHg 时，可以得到最大的灵敏度和最大的气体电离几率。对于照度不大的充气光电管，工作电压比黑暗时的着火电压小 20—25%，而工作在很低光通量时，工作电压可以选择接近着火电压。图 5 表示充气光电管的伏安特性。

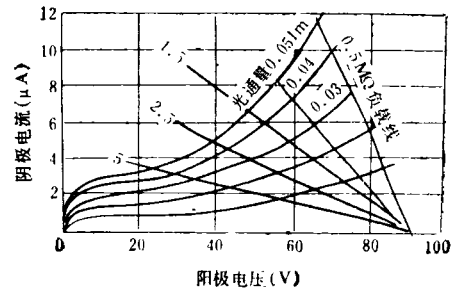


图 5

### 4. 光电管的直线性

真空光电管，在适当的阳极电压下得到与入射光成正比的无畸变的稳定输出。充气光电管，在入射光通量小时，输出与入射的光通量几乎成正比，但随入射光量的增大，输出偏离线性变化。因此，适当选择入射光量和负载电阻，使它工作在畸变较小的区域。图 6、图 7 分别为真空光电管和充气光电管的输入-输出特性曲线。

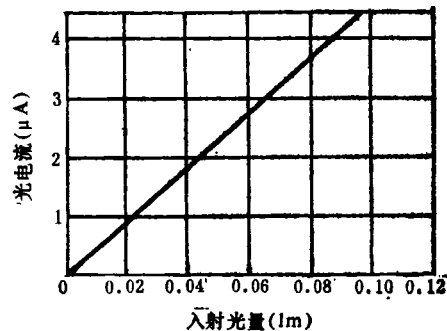


图 6 真空光电管输入-输出特性

### 5. 光电管的频率特性

真空光电管的响应速度取决于光电管的工

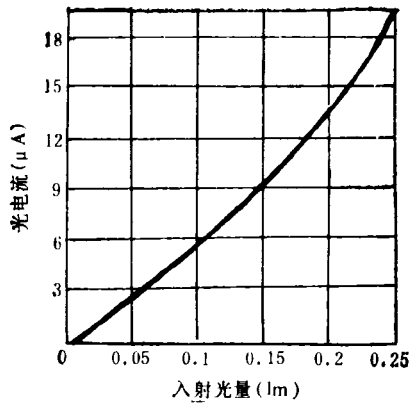


图7 充气光电管输入-输出特性

作电压、形状、电极间的静电电容、负载电阻等。特别是阴极和阳极的间隔窄,工作电压高时,能得到高速响应。由于光电发射的瞬时性,真空光电管在交变的光学信号下工作,可达到很高的频率,如1000MHz;而充气光电管,由于气体的迁移率小,光电子的二次发射达到平衡需要一定的时间,气体分子电离也不是瞬时的,这导致充气光电管有一定的惰性。它明显地受到管子的结构和充入气体的电压的影响,通常在20kHz时下降3dB。图8表示充气光电管的频率特性。

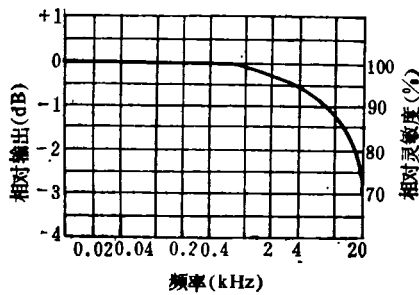


图8

## 6. 光电管的噪音

光电管的主要噪音有:散粒效应噪音(肖脱基噪音)、颤噪噪音和暗电流。

(1) 散粒效应噪音:是由光电面发射电子的几率过程引起的噪音。就整个光电管噪音而言它可以忽略。

(2) 颤噪噪音:由于管内电极的振动使灵

敏度不稳定而引起的噪音。

(3) 暗电流:在黑暗中,流过阳极和阴极之间的电流。主要由光电面的热电子发射和电极间的漏电流引起。

但是,通常负载电阻的热噪音和放大器的噪音等外界噪音比管子本身的噪音大。

## 7. 温度特性

随着环境温度的变化,其灵敏度有些改变,特别是当环境温度升高时,不仅灵敏度下降,而且由于光电面的热电子发射引起暗电流增加,信噪比(S/N)显著下降。

灵敏度、暗电流随温度变化,不仅与光阴极种类有关,而且也与入射光波的波长有关。

环境温度的上升,影响光电管分光灵敏度特性。通常,Sb-Cs和多碱光电面等温度上升时,有红光灵敏度增加的倾向。图9、图10分

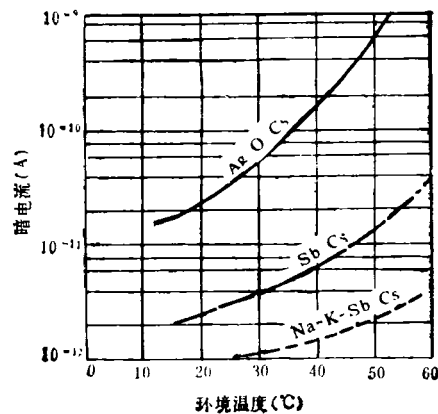


图9 暗电流的温度特性

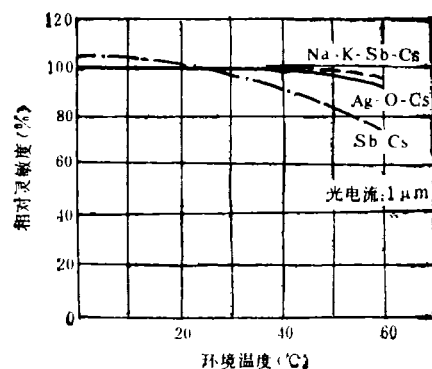


图10 灵敏度的温度特性  
(入射光:2865K钨丝灯)

(下转封三)