

閃爍輻射測量儀 及其在地质普查和勘探中的应用

А. Л. 雅庫鮑維奇 著

馬 正 鄭 作 賓 譯

中國工業出版社

目 录

一、序言	2
二、閃爍計數器中用的螢光体	3
(一) 对記錄各种射綫的螢光体的要求	4
(二) 几种主要螢光体的特点	10
三、光电倍加管	14
(一) 光电倍加管工作原理及其参数	14
(二) 光电倍加管的电源	19
四、閃爍計數器在各项勘探放射性測量中的应用	21
五、普查勘探用的閃爍輻射仪器	36
(一) ЛАС型室内分析裝置	37
(二) АСГ-38 型航空地球物理綜合裝置	41
(三) СГ-42 型野外輻射仪	51
六、閃爍伽伐測量仪器的校准特性	53
七、結束語	56

一、序 言

現時，在普查和勘探放射性矿床及某些其他矿床中，广泛地应用勘探地球物理放射性测量方法。

战后几年来，苏联工业部門已經設計并大批地生产出各种主要根据电离原理研究放射性射綫的輻射仪器；作为这些仪器的 α 、 β 和 γ 射綫接受器的，或是电离室，或是带电粒子和 γ 量子計数器。

在实际普查中，装有自行放电的充气 γ 量子計数器（通常称为盖革-繆勒計数管）的伽瑪輻射仪，得到了广泛应用。

但是这种探测仪器目前已不能滿足普查和勘探工作的飞跃发展的要求。它們的主要缺点是記錄 γ 射綫效率低（約1%）^①以及分析 γ 量子能量的可能性有限。

因此，根据螢光物质受到核粒子轟击而发生的閃光——閃爍現象，来测量放射性射綫的閃爍法，对于勘探放射性測量已具有特殊的意义。

現在的閃爍計数器是由螢光体和光电倍增管組成，在螢光体中被吸收的带电粒子或 γ 量子激发而发生閃光，光电倍增管将这些微弱的瞬时閃光（閃爍現象）記錄下来，并把它們轉变为电流脉冲。

閃爍計数器的意义与日俱增，这是因为它記錄各种核子射綫的效率很高，特別是分辨 γ 射綫的能力强，并且还能分析所吸收的射綫能量。

①計数器的效率系指被計数器記錄的粒子数与打到計数器接受表面上的粒子总数之比而言。

二、閃爍計數器中用的螢光體

物質具有一定光譜成分的超過熱輻射的自發輻射叫做發光。單質或複雜化合物的氣體和蒸汽、液態純質以及有機和無機化合物的溶液，都能發光，一些固態有機晶體以及由微量重金屬混合物活化的所謂晶體磷（無機晶體），則能發出強烈的光^①。

螢光物質可以在光、倫琴射線以及各種核子射線（ α 、 β 、 γ 及中子射線）作用下，被激發發光。

發光不遵守熱輻射定律；與熱輻射不同，發光強度是隨溫度增高而減弱。螢光體的溫度對發光光譜影響不大。

選擇用於閃爍計數器的螢光體時，首先根據螢光體把計數器記錄的射線能量轉變為發光光能的效率來評價其質量。

螢光體內的吸收能量為 E ，放射出的平均能量為 P 的光子的數目 h 為

$$h = \frac{E}{P} \cdot K, \quad (1)$$

式中 K 是把記錄的射線能量轉變為閃光的係數。

實際轉變為光能的部分能量，表示螢光體的物理效率，發光現象發出的光能與激發能之間的比，表示螢光體的技术效率。

物理效率高，但對於自發輻射閃光來說透明度低的螢光體，技术效率不大，因此不宜用於閃爍計數器。

用於正比閃爍計數器內的螢光體，其效率應不因所記錄

① 為簡便起見，以下所有做為核子射線計數器閃爍體的螢光物質均稱為螢光體。

的粒子能量而变化，并使螢光体放射出的光量（光量輸出）与被吸收的粒子能量成正比。然而，这一点只有当閃光現象被視电离率低的粒子（如能量 β 粒子）激发而产生时方成为可能；不少螢光体（特别是有机螢光体）轉变能量的效率，随激发射綫的視电离率增长而降低。例如，在吸收能量为5兆电子伏的 α 粒子时，从蒽晶体內发射出的光子比完全吸收同样能量的电子时发射出的光子少到1/10。

使閃爍計数器有效工作的要点是：螢光体內的发光光譜与光电倍增管的光譜灵敏度相吻合，常用的光电倍增管（阴极由鎋铯制成，管泡是普通玻璃）的光譜灵敏度介于3800—7000 Å 范围内。

目前，采用許多有机和无机晶体以及螢光液体和塑料做螢光—閃爍体。

最常用的无机螢光体是用鉍活化的硷金属碘化物[NaI(Tl), CsI(Tl)]，用銀或銅活化的硫化鋅、硫化鋇以及鈣和鋇的鎢酸盐。

閃爍計数器內，还广泛应用蒽、萘、苣的有机晶体。

在目前所研究的各种液态螢光体中，以溶液 P ——溶于二甲苯或甲苯中的联三苯效率为最高。

溶于多本乙烯、多甲基敗脂酸树脂或其他透明塑料中的螢光物质固溶体也应用方便，其效率不亚于液态螢光体。

（一）对記錄各种射线的螢光体的要求

1. 記錄 r 射綫的螢光体

螢光体在 r 射綫照射下，只有一部分射入螢光体的 r 量子形成二次电子，产生閃光。对于垂直射到螢光体表面上的单能 r 量子流，这一部分 r 量子（ f ）可以計算出来，即

$$f = 1 - e^{-\mu d} \quad (2)$$

式中 d —— 螢光体厚度；

μ —— 螢光体对于該能量 γ 量子的吸收系数。

如所周知，在 γ 射綫与物体互相作用的过程中，二次电子是靠 γ 量子被光电吸收、康普頓散射、电子偶的形成而产生的。

因此，式(2)中的总吸收系数等于三个吸收系数的总和：

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_K + \mu_{\pi} \quad (3)$$

系数 μ_{ϕ} 、 μ_K 、 μ_{π} 之值与被吸收的 γ 量子的能量、螢光体密度和螢光体的組成元素的原子序数及原子量有关。

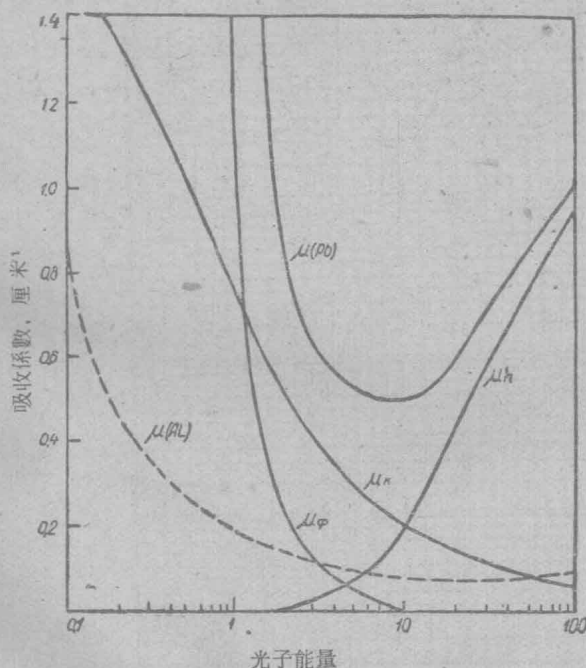


图 1 輕元素(鋁)和重元素(鉛)的吸收系数与入射的射綫能量的关系

螢光體內在吸收 γ 射綫过程中所产生的二次电子以及这些不同能量的电子数量，与吸收过程的特点及与之相应的吸收系数值有关。

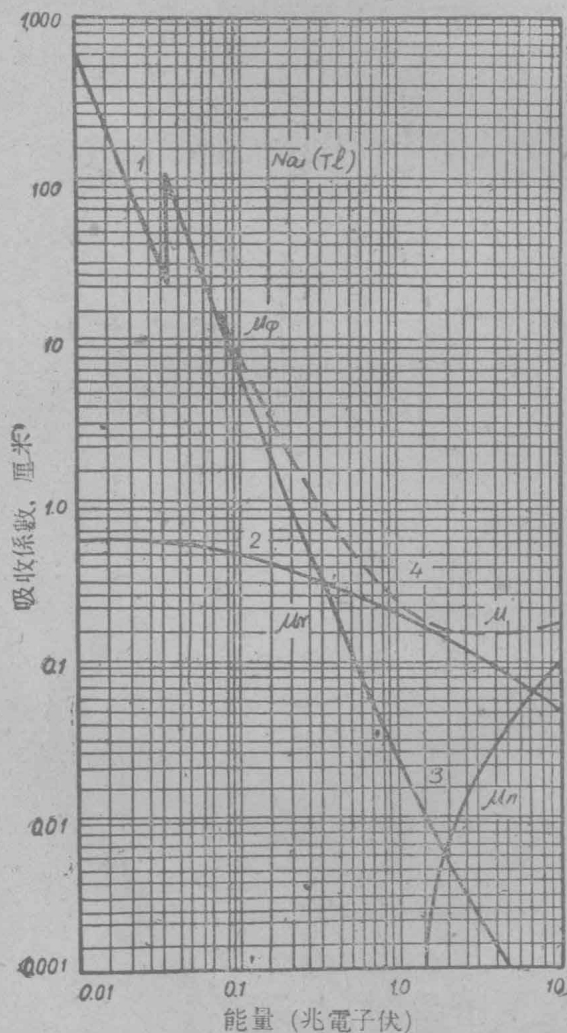


图 2 NaI(Tl) 晶体的吸收系数与入射的射线能量的关系

图 1 所示, 是輕元素 (鋁) 和重元素 (鉛) 的吸收系数与入射的射綫能量的关系, 图 2 所示, 是 NaI(Tl) 晶体的吸收系数与入射的射綫能量的关系。

螢光体在单色 γ 射綫照射下閃光强度的分布曲綫特性, 主要取决于螢光体的体积及其中高原子序数元素的存在。由原子序数不高的元素組成的薄螢光体, 对散射射綫的吸收数量不大, 在这种螢光体内閃光强度的分布呈单調曲綫, 与康普頓电子按能量的連續分布相符。如果螢光体内元素的原子序数高, 則能产生能量与吸收的 γ 量子能量近似的大量二次光电子。这群电子在螢光体内引起的閃光强度相同, 并在閃光分布曲綫上呈一个明显的峯。图 3 表明了这种情况, 图上是 NaI(Tl) 晶体在 Co^{60} 的 γ 射綫照射下所产生的閃光强度的分布曲綫。由图 3 看出, 相当于 1.17 和 1.33 兆电子伏 γ 量子能量的光电峯, 分辨得极清楚。

如果射到螢光体上的 γ 量子为 n 个, 在厚度为 d 的螢光体内所产生的光电子数 (n_{Φ}) 等于

$$n_{\Phi} = n \frac{\mu_{\Phi}}{\mu} (1 - e^{-\mu d}) \quad (4)$$

螢光体体积愈大, 螢光体吸收散射射綫的 γ 量子数目也愈多。如果螢光体的体积能够吸收掉全部散射射綫, 閃光强度在螢光体内便不再受吸收机构的制約; 全部入射的該能量的 γ 量子的閃光强度亦将相同。对于这种螢光体, 閃光强度分布曲綫具有一个峯, 它与入射的該 γ 量子的能量相符。

綜上所述, 用以測定光譜的 γ 量子閃爍計数器, 应用体积大且原子序数高的螢光体为最适合。

对 γ 量子計数器中采用螢光-閃爍体的其他要求, 要看計数器的主要用途及应用条件而定。

例如，装制分辨能力强的计数器时，最好采用光衰减时间不长的有机晶体、液体或塑料。荧光液体和塑料，还适用于射线接受器接受面大的 γ 量子计数器；使用时应注意，其物理效率要比现有的晶体磷的效率低几倍。

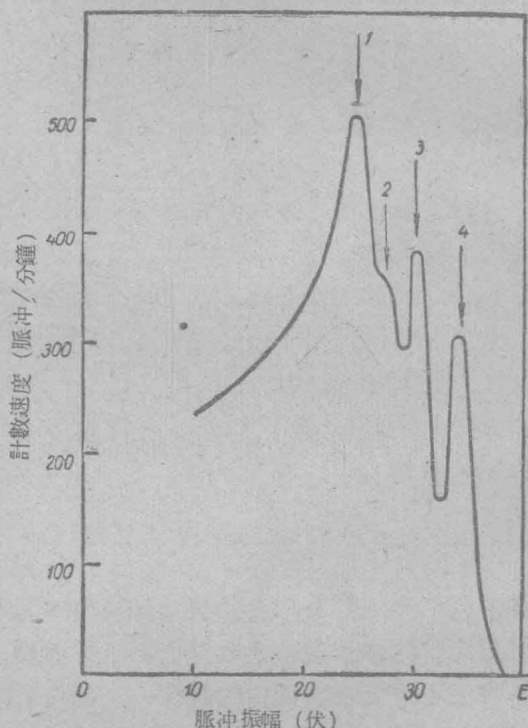


图 3 NaI(Tl)晶体在 Co^{60} 的 γ 射线照射下产生的闪光强度分布曲线

2. 记录 β 射线的荧光体

记录 β 粒子可以采用效率高且与吸收的能量无关的无机晶体，也可以采用分辨 β 粒子能力很强的有机荧光体（液体

或固体)。用 β 閃爍計数器来記錄 β 粒子能量由100至150千电子伏的軟 β 射綫，尤为适合。

在螢光体厚 0.1克/厘米^2 的条件下,这种 β 閃爍計数器实际上能100%地記錄能量不超越上述范围的 β 射綫，并且对于伴同的 γ 射綫灵敏性不高。应当指出，在上述 β 粒子能量范围内，有机晶体的閃光强度与被吸收的能量之間为非直綫性关系；所以閃爍 β 分光計采用无机晶体最好。通常，閃爍分光計記錄 β 光譜的精度低于磁力分光計的精度，但它記錄 β 射綫的效率高，可以用来研究强度微弱的放射体。

3. 記錄 α 射綫的螢光体

由于 α 粒子能量只有几个兆电子伏，能被 $3-5\text{毫克/厘米}^2$ 厚的螢光层全部吸收掉，所以 α 粒子只用薄螢光屏記錄。螢光层不能过厚，否則会使計数器对伴同的 β 和 γ 射綫的灵敏性增加，并使計数器記錄底数脉冲的数量增多。

通常采用硫化鋅螢光屏或碘化銻晶体記錄 α 粒子。它們轉变重帶电粒子能量的效率远远超过有机螢光体。

α 閃爍計数器为开口式計数器，因此在螢光屏与 α 粒子源中間不放置任何吸收 α 粒子的屏壁；在使用粉状螢光屏时，这种屏壁可以是胶結在一起的螢光物质粉末。

4. 記錄中子射綫的螢光体

与帶电粒子不同，中子不与原子的外壳电子互相作用，而是与原子核互相作用。

常常使用含有呈化合或混合形式的輕元素——鋰或硼的螢光体記錄慢中子。当这些元素的原子核吸收中子时，产生帶电粒子，激发螢光体閃光。厚1厘米的(LiI)晶体能記錄50%射到晶体上的热中子。含硼的螢光体效率也很高，因为 B^{10} 的原子具有較大的热中子捕获截面(对于能量 0.025

电子伏的中子约为 4000×10^{-24} 厘米²)。

螢光体内含有的硼原子不应使螢光熄灭；溶于联三苯、二甲苯和其他标准发光液体内的硼胶体，可以满足这个要求。

上述溶液的光衰减时间不长（约 10^{-8} 秒），记录热中子的效率很高，并且记录 γ 射线的效率也不大（为记录中子效率的 $1/50$ ）。

通常，采用液态或固态含氢螢光体记录快中子。在记录中子时，在蒽晶体内可見到强度很大的閃光，在蒽、联三苯和其他有机螢光体内，閃光則很弱。这种螢光体与中子探测器一样，其缺点是对 γ 射线的记录效率很高，因此只有在中子放射体的 γ 射线底数不大或底数 γ 量子能量不大的场合下才适用。

中子能谱，可以根据螢光体内中子吸收过程中所产生的反冲质子的光谱来测定。但是解释所获得的结果很难，因为在解释时必须考虑到中子与质子互相作用的有效截面及反冲质子因能量而异的角度分布。

（二）几种主要螢光体的特点

碘 化 鈉

用鉈^①活化的单晶体碘化鈉，是一种记录 γ 射线最好的螢光閃爍体。它的密度大， $\rho = 3.67$ 克/厘米³。晶体全部重量的85%是碘（碘的原子序数 $Z = 53$ ）。

碘化鈉的物理效率可达8%。对于 γ 量子以及电子、质

① 促活剂的含量不超过0.1—1%。

子和 α 粒子来講，閃光的强度在頗大範圍內与晶体所吸收的上述粒子的能量成正比^①。

碘化鈉的吸收光譜是在紫外綫部分，发光輻射光譜的平均波長为4100 Å，譜的半值寬度为850±100 Å。

由于碘化鈉晶体对自发輻射的透明度很高，所以使用时，厚度可以很大。在室溫下，NaI (Tl) 晶体內的光衰减時間为0.25微秒。将晶体加热，閃光的延續時間便縮短，而光量輸出減少得更甚；晶体的溫度每升高1°C，閃光的光量輸出平均減少0.5—1%。

碘化鈉与水份的亲合力极强，一經水解便混浊，因此应当把晶体表面涂一层油或把晶体放在有干燥剂的容器內保存，不使与四周空气接触。把碘化鈉晶体放在密封的璃玻瓶內保存最好，但这样却限制了晶体对穿透能力弱的射綫的記錄，因为这种射綫会被保护层吸收。

碘 化 鉀

碘化鉀比碘化鈉为好，它的吸水性不强，并容易結成大晶体。但碘化鉀的效率不高（約2%），且鉀具有天然放射性，使閃光現象底数增高。因此碘化鉀被广泛用做螢光閃爍体的可能性就受到了限制。

碘 化 鉍

用鉈活化的碘化鉍是一种很好的螢光閃爍体。

晶体磷的效率約6%，受晶体吸收的能量（甚至对 α 粒

① 正比关系对于 γ 粒子能量是由4兆电子伏开始，对于电子能量是由1兆电子伏开始。

子來說)的影响不大。

碘化銻的螢光是光譜中的藍色部分，对自发輻射发光的透明度高。晶体的密度大，平均原子序数也很高 ($Z=54$)，因此可以有效地用来記錄 γ 射綫。晶体中閃光的延續時間約为10微秒。碘化銻无吸水性，这是有別于碘化鈉的优点。碘化銻晶体的成本較高，所以很少被应用。

碘 化 鋰

用鈹活化的碘化鋰，密度 $\rho=4.067$ 克/厘米³，效率約为1%，它的螢光在光譜中的藍-綠色部分，閃光的延續時間約为1微秒。

碘化鋰具有吸水性，无磷光。主要用以記錄热中子。

硫 化 鋅

用銀或銅活化的硫化鋅效率极高(約为百分之几十)，同时物理效率与被吸收的能量无关。硫化鋅的螢光光譜是在藍-綠色部分($=4000-6000 \text{ \AA}$)，强度峯約为5200 和 4500 $\text{\AA}$ 。

制造足够大的硫化鋅晶体，相当复杂，因此螢光体通常都使用細碎晶体粉末： ZnS(Ag) 晶粉厚度在80毫克/厘米²以內时，对自发輻射閃光透明， ZnS(Cu) 晶粉厚度在200毫克/厘米²以內时，对自发輻射閃光透明。

在上述厚度范围内，螢光体对 γ 和 β 射綫的記錄效率极低，因此主要用来記錄重帶电粒子。硫化鋅記錄 α 粒子的效率高，且来自 β 和 γ 射綫的底数不大，是一种記錄 α 射綫的最好螢光体。

用氧化鋅可以制成良好的 α 計数器螢光体。把这种螢光体牢牢地(不致脫落)在玻璃衬垫上涂一层，虽然其效率較

低 (1.4%)，但光屏受到微能的 α 粒子轟击时，能产生相当强的閃光。

蒽

蒽是現有有机晶体中效率最高的一种有机螢光体，物理效率約为 4 %。蒽晶体的記錄效率随溫度降低而增高，这是因为晶体內的溫度熄灭減少；晶体的溫度达 -70°C 时，蒽的效率可达 6 %。

蒽晶体內发光光譜的峯是在 $4450 \text{ \AA}$ 部分。蒽晶体对于自发輻射透明。发光光譜随溫度升高而移入波长較长的部分，在此部分內，蒽晶体的透明度最大。蒽晶体的光衰减時間不超过 2×10^{-8} 秒。

蒽晶体的密度 $\rho = 1.25 \text{ 克/厘米}^3$ 。

萘

萘是最先被应用在閃爍計数器內的一种有机晶体，其物理效率約为 1 %。萘晶体的溫度降至 -70°C 时，效率增高一倍。萘的光衰减時間較长——約为 8×10^{-8} 秒。

发光光譜在紫外綫部分，峯約为 $3450 \text{ \AA}$ 。在此光譜部分內，現有的光电倍增管灵敏度普遍降低，因此应用萘螢光体的閃爍計数器效率不高。

加入少量混合物——蒽之后 (0.1% 左右)，晶体的发光光譜移入波长較长的光譜部分，这种混合物晶体的效率較蒽晶体的效率高 40—50%。

蒾

当要求閃爍計数器具有强的分辨能力时，多采用蒾晶体

做螢光体，因为蕙的光衰减時間非常短促（不超过 7×10^{-9} 秒）。

蕙的物理效率較蒾的效率低一半左右，約为 $2 \times 8\%$ ，发光光譜是从3750至4700 Å 部分，峯为4100 Å。与蒾一样，蕙的光量輸出也取决于被吸收的能量，重带电粒子的光量輸出低于同等能量的电子的光量輸出。光量輸出在頗大程度上与蕙晶体上所沾染的熄灭杂质的污染有关。

三、光电倍增管

（一）光电倍增管工作原理及其参数

光电倍增管^①是一合成的真空仪器，由具有外光电效应的光电管和电子倍加器組成。

多級光电倍增管的概要构造和作用原理示于图4。

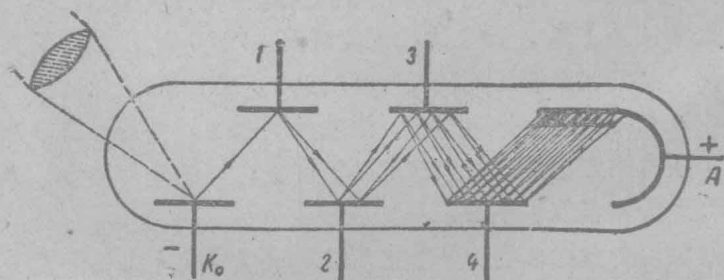


图4 光电倍增管的构造和作用原理

与一般光电管相同，在光电倍增管内有一光电阴极 (K_0)，当光子打到光电阴极上时，从光电阴极内击出光

①光电倍增管为苏联工程师П.А.庫別茨基于1930年所发明。

电子。

从光电阴极击出的电子射到放射体 (I) 的表面上, 放射体的二次放射系数 (σ) 大于一。此时, 在次级电极集聚极电路中产生比原电流增大 σ 倍的电流。如果用二次放射来接受被連續多倍放大的电子流, 那么当联级为 n 个时, 全部放大则为

$$K = \sigma^n \quad (5)$$

图 4 内, 虚线表示射到光电阴极 K_0 上的光子射线方向, 箭头表示依次被放射体放大的电子运动方向。

每个尾随的放射体对于前一个放射体均具有正电位, 字母 A 表示歛集被放大的电子流的集聚极 (光电倍加管的阳极)。

现有的电子静电聚焦多级光电倍加管, 具有 10—12 个放射体时, 放大系数 K 约为 10^6 。

应用于閃爍記数器时, 光电倍加管的参数, 例如光电阴极的光谱特性曲线、电子倍加器的积分灵敏度、放大系数以及暗电流 (或底数) 等, 具有重要意义。

大部分閃爍計数器所应用的光电倍加管, 其阴极是用半透明的銻-铯制成的, 光谱灵敏度的范围介于 3800—7000 Å^①。

光电倍加管的积分灵敏度, 通常以安培流明为单位进行計量。在稳定的状态下, 光电倍加管输出端的电流不超过几毫安。与电源联通的光电倍加管受到强烈的光流照射后, 会使仪器损坏。

①用紫外玻璃 (玻璃内含微量氧化铁) 制成的光电倍加管。管泡, 可使光电倍加管的灵敏度延伸到紫外线部分至 2400 Å。

光电倍加管的特点是放大系数与电源电压有很大关系。图 5 是静电聚焦光电倍加管的这种典型曲线。

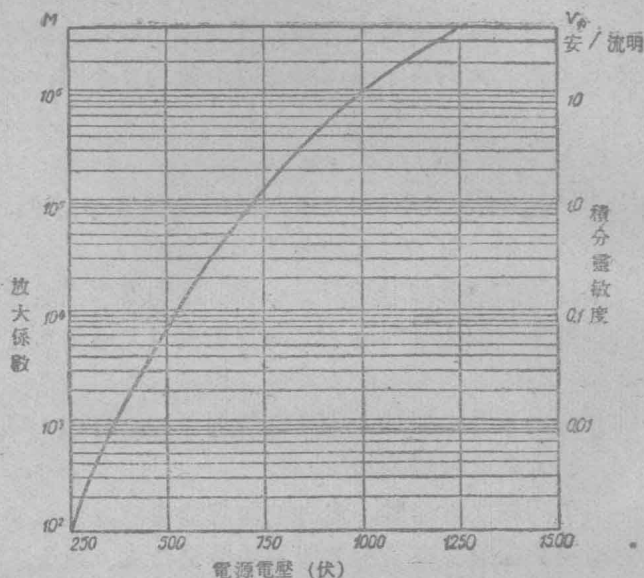


图 5 光电倍加管放大系数与电源电压的关系

图上横坐标轴表示放射体的总电压，纵坐标轴表示放大系数 (M)，以对数比例尺计算。

光电倍加管的重要特点，是输出端的电流与光电阴极的照度为直线性关系，这种关系是经过实验（误差不大于 3%）在光通量由 10^{-18} 至 10^{-4} 流明范围内测定出的（输出电流在几毫安范围内）。

光特性曲线的直线性，并不说明被光电阴极放射出的每个单独光电子在光电倍加管内都恰好被放大到同等倍数。光电倍加管的二次放射系数 (σ) 和总的放大系数 (M) 是统