

磁調制光电倍加管的超光度計*

G. O. 斯屈克尔**

(匈牙利科学院精密量测与仪器制造研究所)

一. 序言和一般概念

1.1 問題的提出

在应用物理和物理化学方面，弱光的量测逐渐占有重要的地位。愈来愈多的材料的物理性質和化学性質是間接或直接采用光学方法测定的。純科学的發展、它在技术上的应用以及工業上的需要不断地推动着量测弱光的方法，要求它变得更加灵敏和稳定可靠。由于采用磷光体和閃爍晶体作为能量轉換器的X射綫定量量测和核子輻射的量测广泛地被使用，这一問題的重要性愈益增加。弱光量测方法的灵敏度数量級如果有相当大的增加，就可以在工業上安全地应用放射性同位素，而不致像目前那样被認為只是实验室的一种方法。

我們的目的是想在以前的研究基础上，利用光电倍加管的磁調制原理發展一种新的灵敏度很高的光度計，以应工業上的需要。比較各种原理和实验記錄为的是証明这种新的量测方法的成就。

1.2 各种已有的探測元件的比較

許多文献^[1-5]中有不少关于光电轉換器的数据。

为了工業上的用途，我們把电子管放大器标准化，即在輸入阻抗为1兆欧姆时，無噪音的最低輸入訊号定为50微伏。假定放大器是理想的，阻抗匹配不导致能量損耗，我們从上述文献所采用的数据算出了产生“标准輸出訊号”所需要的光 (L_{min})。这些数据彙集于表1。

表1. 各种光电轉換器設計数据的比較

探 測 元 件	效 率	平 均 阻 抗 欧 姆	最 小 的 光 輸 入 流明/50微伏/1兆欧姆
a. 温差电元件	0.1 微伏/微瓦	1	$3 \cdot 10^{-4}$
b. 阻擋層式光電池	$6 \cdot 10^2$ 微安/流明	$5 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
c. 真空光电管	40 微安/流明	10^8	$1.2 \cdot 10^{-6}$
d. 光电倍加管	$20 \cdot 10^{16}$ 微安/流明	10^6	$2.5 \cdot 10^{-12}$
e. S_6 光敏电阻	$3 \cdot 10^{13}$ 微安/流明	10^6	$1.7 \cdot 10^{-8}$
f. 光电晶体管	$3 \cdot 10^6$ 微安/流明	10^4	$1.3 \cdot 10^{-10}$

* 1957年5月13日收到。本文是作者于1957年4月在中国科学院应用物理研究所所作的报告，并将同时在匈牙利物理学报中刊出。

** 作者曾参加1957年4月在北京举行的匈牙利电子学仪器展覽会，并訪問我国科学界。

这个表格表明,线性的温差电元件(a)具有相当低的灵敏度,只有在中等辐射强度才能作为标准。阻擋層式光電池(b)需要細致的匹配才能得到上列的标准輸出,除非所加的阻抗等于零,否則它会失去线性。真空光电管(c)和光电倍加管(d)由于它們的灵敏度很高,和标准輸入匹配恰当,在很大範圍内有極好的线性,因此是很理想的元件。半导体型探测器如光敏电阻(e)和光电晶体管(f)的灵敏範圍使它們对于某些应用特别有用(开关、控制、通訊),例如在不要求有广大範圍的线性的时候或者当对紅外線灵敏是不可缺少的要求的时候。今后新的技术無疑地会使它們的高灵敏度也应用到量測上,不过目前它們在强度範圍大的光度术上用处还很有限。

对于近代光探测器的主要特性的簡單分析表明,真空光电管和光电倍加管最适用于 § 1.1 的目的。如果能避免太大的过载及因而引起的疲劳,它們在短期(几天或几周)内的稳定性是很满意的。最近發現,它們对光强的灵敏度和对光譜的灵敏度在長時間内有相当大的变异⁽⁶⁾,因此需要定期地加以校准。虽然如此,在量測光强的比率时,它們的线性还是保证了高度的准确度,而这种量測是最常遇到的。

因此,真空光电管和光电倍加管在弱光流比率的精确測定方面几乎是唯一可用的东西。

1.3 真空光电管和光电倍加管的量測範圍

为了研究这两种光电轉換器在应用上的情况和範圍,我們假定放大器的輸入特性就和 § 1.2 所选定的相同。要滿足工業上的要求——包括記錄和工業控制——我們需要:

- (1) 交流放大;
- (2) 約 1 兆欧姆的輸入阻抗;
- (3) 輸入訊号的範圍: 10 微伏——1 伏(5 級)。

根据商業上的管子对藍色区域的平均灵敏度数据,我們在圖 1 彙集了一些設計数值。可以看出,在数量級为 12 的範圍内,光电管和光电倍加管正好彼此互相补充。(應該再強調一下,我們所定的下限是由工業上的苛刻要求所决定的,不适用于設備特殊的實驗室条件,在實驗室里自然可以用低得多的輸入訊号及較高的輸入阻抗。)圖 1 表明,光电管在工業上可以用到 10^{-6} — 10^{-7} 流明。由于光电倍加管的放大系数約为 10^6 ,假定可以用同样的方法得到交流輸出訊号,那末光电倍加管的下限將在 10^{-12} — 10^{-13} 流明的範圍内。后文將指出,这是很容易达到的。

但是在 10^{-10} 流明以下就必须考虑到辐射能量的不連續性,甚至在可見光的情形也是如此。我們看下面的橫軸, 10^{-10} 流明大約相当于 $3 \cdot 10^5$ 光子/秒,新式的光电陰極的光子/电子效率約为 0.03,这么多的光子使陰極产生約 $9 \cdot 10^3$ 个电子,所得的脉冲速率也約为 9000 脉冲/秒(參看圖中左边的縱坐标)。很清楚,輸出訊号会因此有一个統計性的变化,因而为連續讀数造成另一个下限。

如果在电子数为 n 时容許的最大無規誤差为

$$\frac{\sqrt{n}}{n} \leq 0.01,$$

我們就必须选 $n > 10^4$ 。根据圖 2,这个条件在 $3 \cdot 10^{-9}$ 和 $2 \cdot 10^{-11}$ 流明之間是可以得到滿足的,只要我們适当地選擇整个系統的時間常数,最普通的是記錄或指示仪器本身的时间

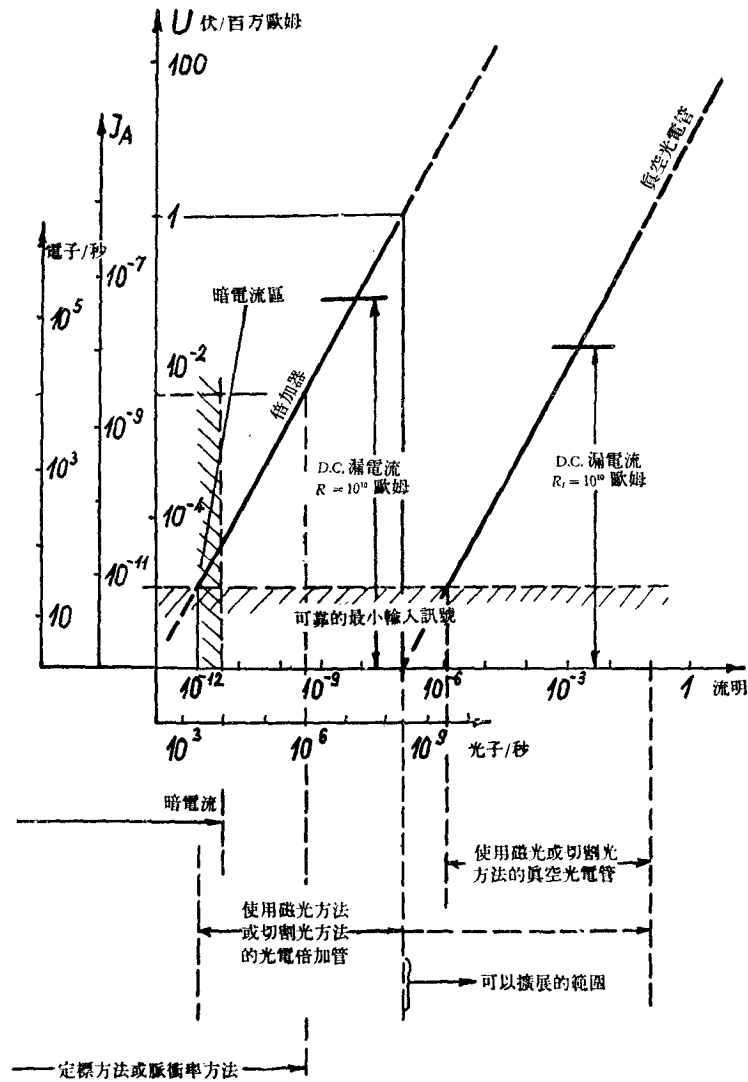


圖 1. 光电管和光电倍加管的使用範圍

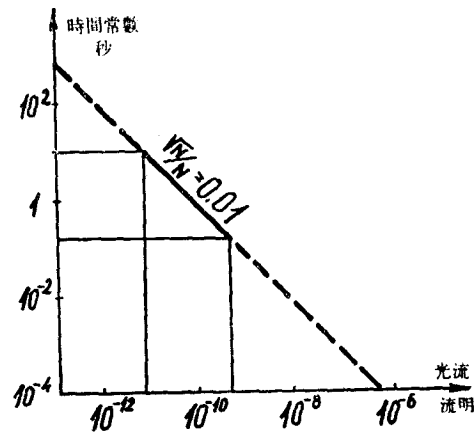


圖 2. 恒定的無規誤差綫

常数。如果我們把讀数的准确度規定为滿格讀数的百分数,那末对相当于 10^{-10} 流明的滿格偏轉,一秒的时间常数將保證滿格的准确度为1%,有用讀数可达 $5 \cdot 10^{-12}$ 流明。

圖1还表明有兩種寄生电流影响我們选择量測方法,这就是通常用的兩種膠木插座的^[7]外部漏電和熟知的光電倍加管的內部暗电流。从这些电流的大小可以很明显地看出,直流的量測方法不能应用在要求直接讀数的工業上。因此,必須把連續光源的訊号在光电管或光电倍加管的輸出綫路上轉換成交流或脉冲电压。达到这个目的的一个熟知的方法是用轉盤或振動鏡切割光綫。这种不停地运动着的机械裝置的缺点是很明显的。此外,在量測X射綫或核子射綫时,在光电陰極和磷光体或閃爍体之間插进这类裝置会使光照的立体角减小相当多,因而失散許多光。

在 10^{-2} 和 10^{-6} 流明的範圍內,直流放大或切割光的麻煩方法被1948年H. P. Kalmus和作者所提出^[8]的用于低亮度光度术上的光电流磁調制法(簡称“磁光原理”)所代替。这篇文章將揭示一个在光电管內部把直流轉換成交流的新方法,这个方法已經表明可以很有成效地应用在工業生产上。应用磁光原理的仪器在我国和美国正在普遍地生产^[9]。

虽然把同样的原理应用于光电倍加管的方法已于1952年由上述作者們根据基本实验在專利样本說明書上发表过,但那时对于光电倍加管的磁調制并没有詳細加以研究。作为發明者之一的作者得到他在匈牙利科学院精密量測和仪器制造研究所的同事們的帮助,現在完成了較澈底的分析,本文就是所得的实验結果。研究的結果表明, 10^{-6} 到 10^{-11} 流明的間隙——对近代工業仪表很重要的一个範圍——現在可以用一个不十分精細的探測設備来量測,而不必用以前的机械式的切割光的方法或其他的麻煩方法。为了比較上述各种方法的使用範圍,我們把它們列在圖1的下半部。

二. 磁光方法的簡短回顧

依照上述文献[8]所闡明的原理,把交流磁場加在光电管的兩個电極之間,因而使光电子周期性地离开它們的正常路程(圖3和4),这种方法是調制电極間电流的一种最方便的方法,这里不需引用控制电極或类似的东西。調制后的交流光电流的頻率为調制用电流的頻率的二倍,这对于抑制电容所引起的杂散电压很有利,因为漏电流沒有經過調制,交流部分显然就严格地与光电流成正比。

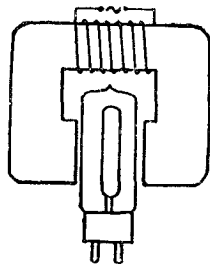


圖3. 磁調制光电管的設計圖

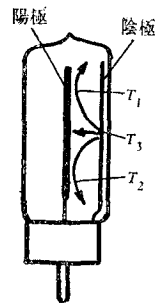


圖4. 依照圖3調制的光电管內的电子路徑

T_1, T_2 : 磁通量值最大时的电子偏轉;

T_3 : 磁通量为零时的电子路徑

已經指出^[6]，負載電阻的噪音限制了光電管有用的靈敏度，其極限決定於下列公式：

$$L_{\min} = 4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{S} \left[\frac{\Delta f}{R} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ 流明.}$$

根據這個公式，在理想的實驗條件下，如果輸入電阻為 10^9 歐姆，我們可以得靈敏度的極限

$$L_{\min} = 10^{-10} \text{ 流明.}$$

這是指訊號-噪音比等於 1 的情形；如該比率等於 100，則得 10^{-8} 流明。不過如果我們遵照第一節中所規定的工業上可靠裝置的苛刻要求，那麼依照上式可得出

$$L_{\min} = \frac{3E_{s\min}}{R \cdot S}.$$

在 $E_{s\min} = 10^{-5}$ 伏， $R = 10^6$ 歐姆； $S = 30$ 微安/流明時，我們得到實用上所能達到的靈敏度極限

$$L_{\min} = 10^{-6} \text{ 流明.}$$

商業製造的儀器果然已經達到這樣的靈敏度。用一個簡單的轉鈕開關可以將靈敏度按十進位減小 4 個數量級。加上一個連續的減弱器可以使得這個儀器的量測伸縮性更大些。

圖 5 和圖 6 各表示匈牙利制的磁調製光度計的線路方塊圖和儀器照片。磁調製光電管裝

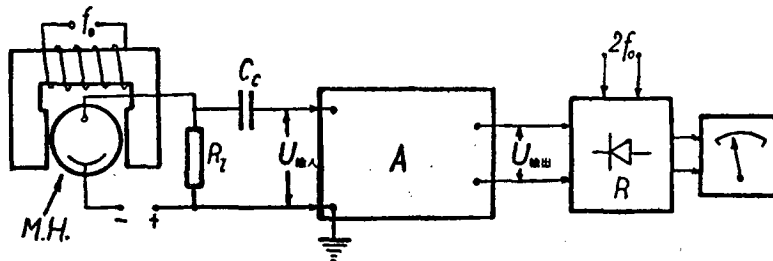


圖 5. 使用真空光電管的磁光裝置方塊圖

M. H.: 量測頭 A: 放大器 R: 相敏整流器

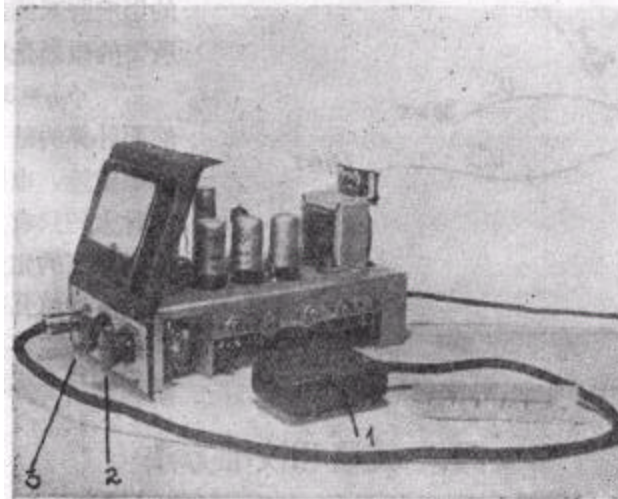


圖 6. 工業上的光電管(取掉蓋子)磁光裝置

1: 量測器 2: 十進位轉鈕 3: 連續的增益控制

在量测器里面,通过软电缆和放大器连接。

在 10^{-2} 到 10^{-6} 流明范围内使用这个仪器所得的良好结果说明,用光电倍加管——最好用同样的不十分精细的放大器——可以把灵敏度的极限扩大几个数量级。

三. 光电倍加管的磁调制法

市场上能买到的光电倍加管的形状不外是圆型的[图 7(a)]或直线型的[图 7(b)].对上述两种形状的光电倍加管最有效的调制方法是將磁場加在平行于电极母线的方向,即

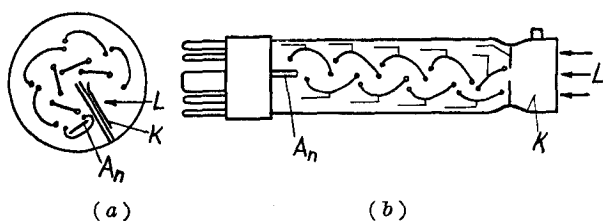


圖 7.

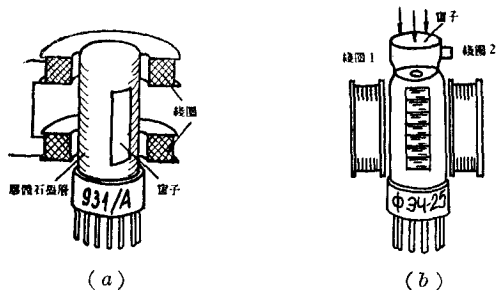


圖 8. 用以调制圆型和线型光电倍加管的线圈装置

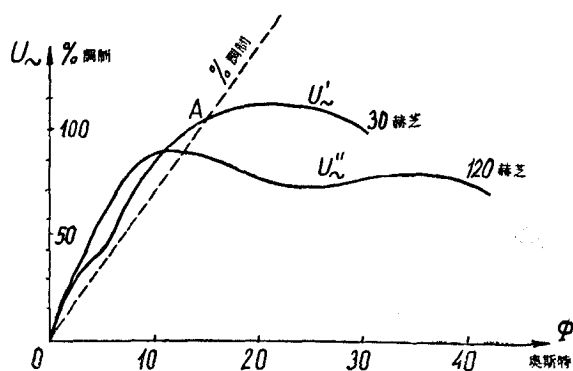


圖 9. 调制百分率和输出电压随调制用磁通量改变的情况

垂直于图 7 的平面。图 8 表示线圈的装置。观察调制随磁通量的增加而改变的情形,我们得到图 9 的曲线,它和画在同一图上的简单光电管的特性曲线有类似的特性。曲线的上升部分表示调制百分比随电流的增加而单值地上升,在“A”点达到 100% 的调制。在此以后——类似射频变频器的互传导——“基本”频率(在我们的情形是第二谐波)的振幅开始因电流的增加而减低。由于所用放大器有高度的选择性能,所以最后的输出只相当于第二谐波和较高的偶次谐波。

如取这些曲线的平顶作为工作点,这时激发线圈的电流变化的影响将减到最小。调制 100% 所需的磁通量密度约为

$$\phi_{eff} = 36 \text{ 奥斯特.}$$

然而计算的结果表明,由于镍极的顺磁性,电极间的场强在全调制时大约只有 19 奥斯特。在相同光照下的定量量测表明,交流电的有效值几乎等于未调制的直流电流的三分之一。这是 100% 调制的熟知的判据。

四. 线路和校准方法

两种各装了调制线圈的光电倍加管放在不透光的铜套内,线路的连接如图 10 所示。图 11 表示应用圆型倍加器的整套设备的照片。倍加管的分位器由普通的稳定高压电源

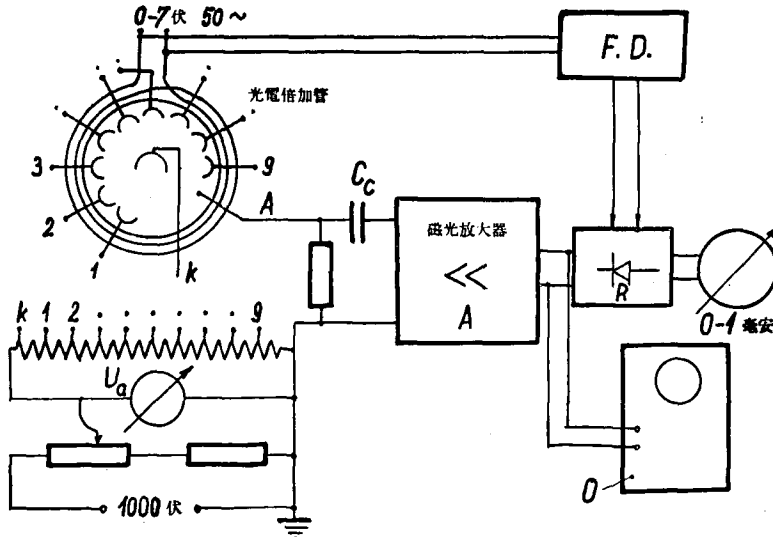


圖 10. 調制的光電倍加管和有關線路的方塊圖

A: 放大器 R: 相敏整流器
 F. D.: 頻率加倍器 O: 示波器 C_c: 耦合電容器

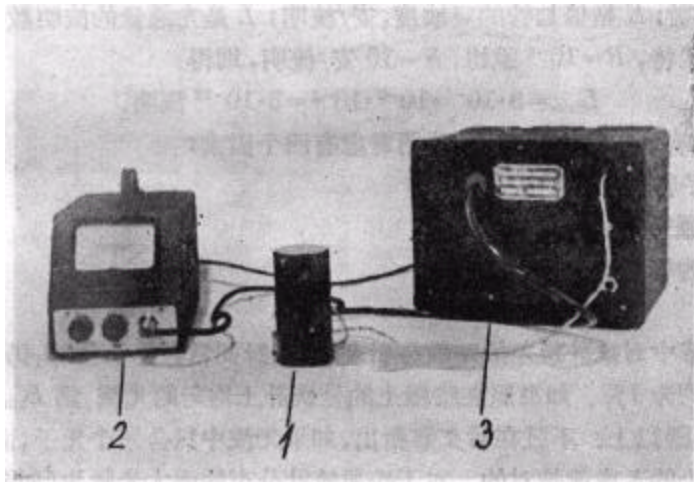


圖 11. 實驗性的超光度計照片

1: 量測器 2: 磁光放大器 3: 高壓電源和調制電源

供电, 交流部分通过一个电容使与最后一个次级电极上的负载电阻耦合而成为通常调制光电管所用的“磁光”放大器的输入, 用示波器观察在不同程度的调制和光照下的波形。位相灵敏的整流方法把有效频带宽度减至 1 周/秒左右, 以便减低噪音和哼声的扰乱。

在校准时, 我们的量测根据的是商品样本 RCA 931-A 型光电倍加管的直流输出的数值, 用高灵敏度的镜式电流计量测。如果要把标准光强分得再细一点, 就用固定不变的中性滤光片和 Zeiss-Pulfrich 光度计上精确而可以连续改变的光阑, 如图 12 所示。这个办法保证在试验任何一个十进分位内的线性时重复量测的准确度可达到 ±0.5%。

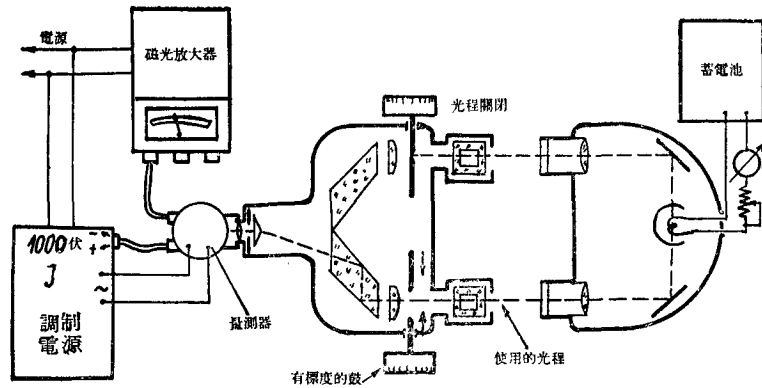


圖 12. 試驗線性的裝置圖

五. 理論計算的灵敏度 and 訊号-噪音比

在光电倍加管的最后一个次級電極的載阻上, 訊号的交流电压可以用下列公式表示:

$$E_s = \frac{1}{3} R \cdot S \cdot L,$$

R 是載阻的欧姆数; S 是倍加管的灵敏度, 安/流明; L 是光通量的流明数. 保守一点, 我們令 $E_s = 10^{-5}$ 伏特, $R = 10^{-6}$ 欧姆, $S = 10$ 安/流明, 則得

$$L_{\min} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-1} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ 流明.}$$

檢查可能影响量測的誤差来源, 我們考虑有四个因素:

- 光的光子特性;
- R_i 的热騷动;
- 漏电流的統計变异;
- 暗电流.

a) 在第一节中对統計誤差的一般分析表明, 当时間常数为 1 秒时, 仍可讀到 $2 \cdot 10^{-12}$ 流明, 統計誤差約为 1%. 如果照在陰極上的是統計上均匀的光流, 則 L_{\min} 的計算值正好在統計誤差的極限以上. 不过在后文將指出, 如果光流中只含單个光子, 而光子的分布又是統計性的, 以上的考虑就是对的. 对于按照統計分布的强大光脉冲 (如閃爍晶体), 統計誤差就很大, 因此上述考虑必須加以修正.

b) 根据經典公式, 載阻在室溫下的热騷动和 1 周/秒的頻寬产生一个接近 10^{-7} 伏的無規噪音, 約为有用訊号的 0.2%. 这个数值落在所要求的准确度以內.

c) 傳导性的漏电流——它的絕對值大約是訊号电流的 10000 倍——易产生噪音, 因而造成干扰. 它的起伏决定于下列公式:

$$\bar{v}_n^2 = 3 \cdot 18 \cdot 10^{-10} I_{lk} \Delta f,$$

\bar{v}_n 是这一噪音的根均方值; I_{lk} 是漏电流的平均安培数; Δf 是放大系統的頻率范围(周/秒), 从这里我們得到在輸入电阻 R_i 上产生的噪音电压

$$\bar{v}_n = 5.5 \cdot 10^{-10} (I_{lk} \Delta f)^{\frac{1}{2}} R_i.$$

令 $I_{ik}=10^{-7}$ 安, $R_i=10^6$ 欧姆, $\Delta f=1$, 我們得

$$\bar{u}_n=1.6 \cdot 10^{-7} \text{ 伏.}$$

这个起伏电压只有交流讯号电压的 0.2%, 所以可以忽视不计, 虽然直流漏电流本身很大. 如果我们用讯号-噪音比表示, 对光的直流部分和漏电流的直流部分我們得

$$\left(\frac{u_s}{u_n}\right)_{dc} \propto \frac{10^{-5}}{10^{-1}} = 10^{-4};$$

对于交流部分

$$\left(\frac{u_s}{u_n}\right)_{ac} \propto \frac{10^{-5}}{10^{-7}} = 10^2$$

增加了 6 个数量级.

d) 暗电流和抑制暗电流的方法. 光电倍加管的暗电流在科学文献和上述的 RCA 目录里都可以找到, 如果条件和我们的完全相同(用切割光的方法量测, 频宽 1 周/秒), 则在室温下它相当于 $7 \cdot 10^{-12}$ 流明的阴极光照. 这样大的暗电流限制了量测的下限, 对准确到 1% 的要求, 量测下限就要比暗电流本身大 100 倍才行, 亦即为 $7 \cdot 10^{-10}$ 流明. 这个数值比统计误差所规定的下限大 2 个数量级. 重要的是, 我们要消除有用灵敏度的这种损失而不采取熟知而麻烦的在液体空气里冷却光电倍加管的方法(冷却同时还减低灵敏度 1 个数量级). 解决的途径是在光电倍加管的外面加一静电屏, 这是 Z. S. Náráy^[12-15] 在匈牙利科学院中央物理研究所仔细研究过的方法. 我们应用他的研究结果, 在光电倍加管外部涂以胶体石墨并使它和阴极电位相连. 暗电流降低了很多, 以致它对 10^{-12} 流明不起干扰作用. 这和 Náráy 的数据(文献见前)符合得很好. 依照这个方法降低暗电流 100 倍是很容易作到的.

六. 实验结果

在根据已讨论过的方块图(图 10) 安排的实验装置中, 有一个圆型的光电倍加管(侧面开窗的 RCA 931-A) 或线型的光电倍加管(顶端开窗的 электрозавод—莫斯科 ФЭУ-25-M), 两个 500 匝的激发电圈, 内直径都约为 25 毫米, 一个单独电源供给它们频率为 50 周/秒的激发电流, 强度可以从 0 变到 1 安培(装置如图 11). 高压电源用单向整流器和适当的滤波器, 可以从 700 伏变到 1100 伏. 用一个满格灵敏度为 500 微伏、附有十进转钮和连续减弱器的标准磁光 4 级放大器作为真空管电压表. 相敏整流器控制在 100 周/秒. 仪器输出为直流的 0—1 毫安表, 其时间常数约为 0.5 秒. 量测时用一个 6 伏/5 安的白炽灯, 电源由蓄电池通过变阻器供给. 用中性滤光片和 Zeiss-Pulfrich 的有刻度的可变光阑减弱光. 检查波形的示波器与放大器的最后一级的输出连接.

我们用这个装置测定系统的主要特性和初级变数的函数关系.

(1) 调制特性 第三节中讨论的曲线(图 9) 与我们所期望的符合得很好. 当电极间的磁场接近 20 奥斯特时, 调制达到饱和, 从这点起调制开始表现过度, 第二谐波也开始减小. 在这点上相应于调制频率为 30 周/秒的曲线形状是相当合乎规律的. 曲线 2 (相应于调制频率 150 周/秒) 则有第二次的上升, 这不知是因为什么. 实用上使用频率 50 周/秒时, 没有这种反常现象.

调制用的线圈上的电流和调制的光电流的波形示于图 13. 不同的图相应于不同程

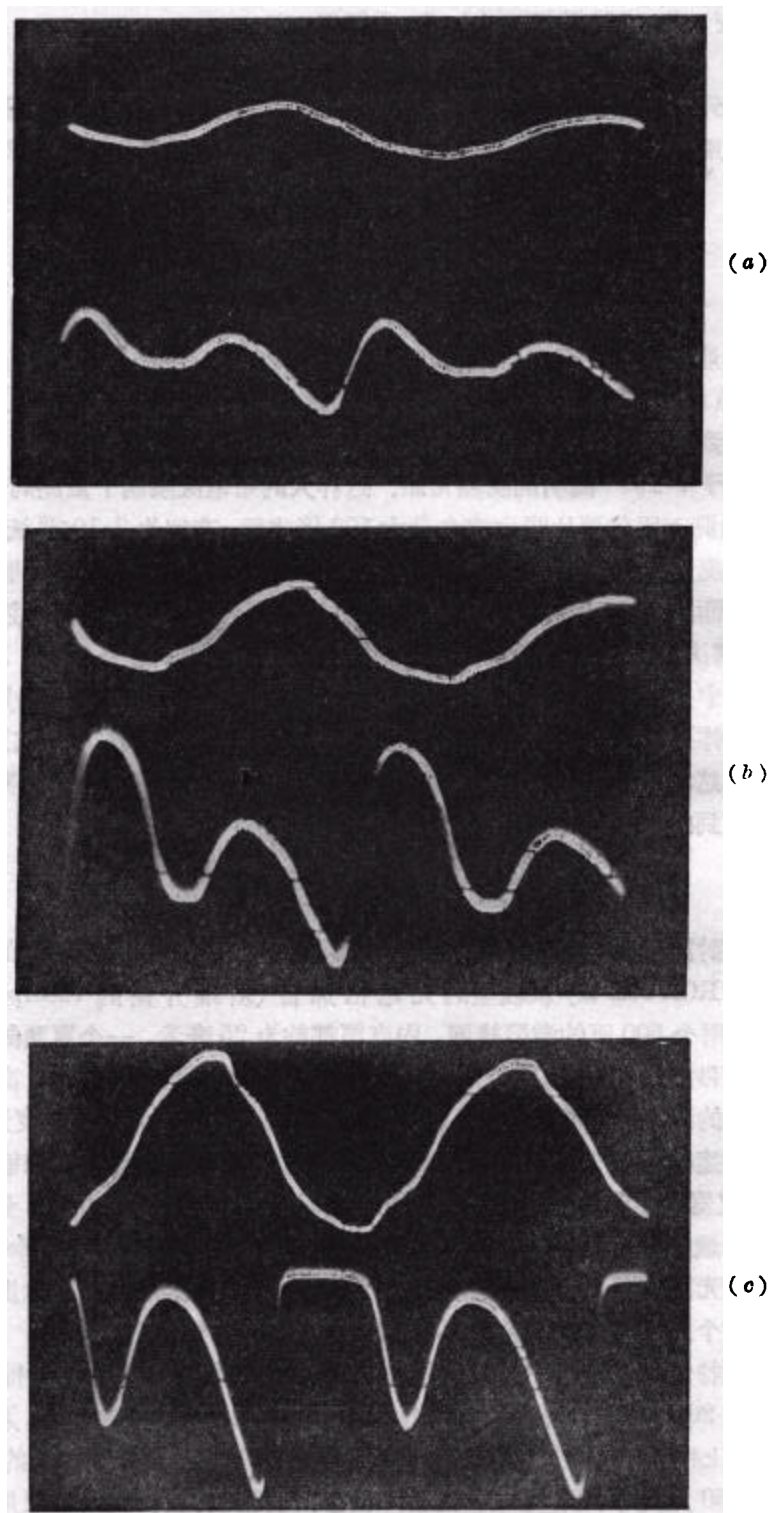


圖 13. 激發電流和調制的光電流的真實波形

a: 約 30% 的調制 b: 約 100% 的調制 c: 強烈的過度調制

度的调制, 它们是借助于一个常用的电子开关同时从阴极射线管的屏上拍摄的。这些曲线清楚地表明, 在调制用频率的每一周期内, 光电流被抑制了二次, 结果得到了二倍的频率。示波图还表明, 场强不大的时候, 调制决不是对称的, 而有一个很强的基频。这显然是由于磁场对光电倍加管的电子光学系统有非对称的作用而引起的。当线圈的方位是正确的而调制接近 100% 时, 这种不对称性会减小。

(2) 对阳极电压的依赖 图 14 的曲线 1 把输出信号表示为阳极总电压的函数。虽

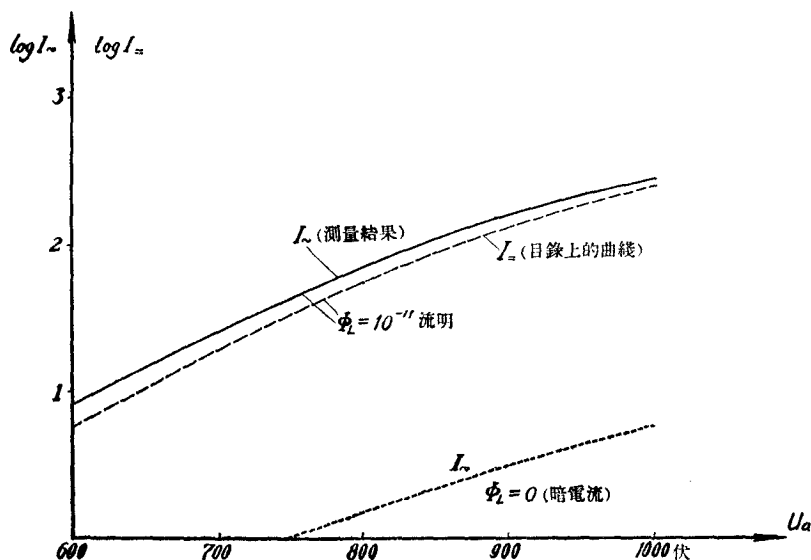


图 14. 直流阳极电流和已调制的阴极电流随总阳极电压改变的情况。量测曲线和商品目录上取下的曲线的纵坐标标度是任意选择的, 以便比较

然光照和纵坐标的标度各用了不同的任意值, 寻常的对数纵坐标的标度还是可以使我们把这曲线和熟悉的目录曲线 2 作直接的比较。这些曲线基本上是平行的, 这证明磁调制不影响倍加管的电子光学性质, 因而完全与切割入射光的情形等价。曲线 3 表示没有外加屏蔽电位, 也没有光照时暗电流随阳极电位增加的情形。这一曲线的特性表明暗电流遵守的电子光学规律和阴极受光时完全一样。这一伪信号是完全由空间电流产生的, 这不仅可以由暗电流的对数特性间接地加以证实, 而且也可以由强大的永磁铁接近倍加管时会完全消除掉暗电流这一事实加以证实。

(3) 漏电流 用直流电流计可以测出传导漏电流为 10^{-7} 安培, 不管它的正负方向如何。这相当于 10^{10} 欧姆的漏电阻, 和本文第二节中引证的文献相符合。

(4) 灵敏度, 线性, 统计变异 根据前述方法用合适的中性滤光片减弱光源而校准光电倍加管以后, 我们检查了未调制和调制后的倍加管的线性。图 15 的曲线示出直流电流计的读数随线性光阑的增减而改变的情况。100% 的数值相当于 $5 \cdot 10^{-7}$ 流明。用调制方法时光强只是这个数的百分之一, 最初得到的结果和直流的曲线有很大的偏离, 如曲线 2 所示。经过了繁复研究以后, 我们才找出偏离的原因是由于在调制用磁场和相控制整流器之间有一个相移。激发电圈的自感应引起了这种相移。激发电圈的自感应比以前用在小型光电管上的小线圈的自感应大得很多, L. Bánsághy^[20] 曾详细研究过这种效应, 经

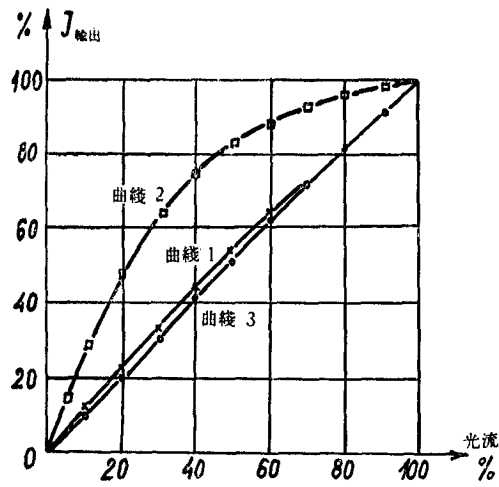


圖 15. 在 10 倍变化以內的綫性

橫軸：可變光閘的讀數；縱軸：電流讀數；
 曲綫 1：從直流電流計所得的讀數；
 曲綫 2：修正位相以前的超光度計讀數；
 曲綫 3：修正位相以後的讀數

過適當的位相修正以後，可以消滅這種效應，結果得到滿意得多的曲綫 3，它與曲綫 1 的最大偏差不超過 2%。考慮到這兩條曲綫是在很不同的光強下量測的，因此沒有進一步地研究余下的非綫性問題，特別是因為磁調制所得的綫性還更好一些。

至於 L_{\min} 的絕對值，我們的量測完全符合於理論（第五節）。當完全黑暗時，磁光放大器示出一個錯誤的偏轉，約相當於 $5 \cdot 10^{-12}$ 流明。應用上述 Náray 的暗電流抑制方法以後，這個偏轉就消失了。把儀器的滿格靈敏度保持在 $5 \cdot 10^{-11}$ 流明是很容易的，並且可以有一個良好的訊號-噪音比。可以用阻尼時間為 10 秒的指針型 100 微安表測出有 10% 起伏的 10^{-13} 流明（6 電子/秒）的光強。零點的穩定程度達 1%，這證明熱騷動和其他噪音在這樣的強度下

還不起干擾作用。對光強的靈敏度可以很方便地用放大器的十進位轉鈕加以改變而不影響零點。

七. X 射綫和核子輻射的量測

剛才描述的方法很適宜於和一種適當的能量轉換器（如磷光體、閃爍晶體）連用，它比游離室或脈沖技術更便於量測、記錄或控制弱的輻射。當輻射強到 G.M. 管或閃爍計數器不能連續計數，而對小體積游離室而言則還太弱，以致它無法測出時，上述方法就特別有用。

靈敏度的極限因素還是統計上的誤差。很容易看出，在這種情形下應該考慮的不是到達陰極的光子總數而是從晶體或磷光體發出的閃爍總數。所以到達光電陰極的總光量比連續光所需的要大出一個倍數，考慮了閃爍體的量子效率和自吸收，這個倍數約等於閃爍體的光子產額。時間常數為 1 秒時，要保證起伏為 1%，需要 10000 次的閃爍，這些閃爍所產生的總光流可以高達 10^{-8} 流明。

對於很弱的軟 β 輻射的情形 (P^{32})，10000 個粒子到達蒽晶體將產生每秒約 5000 次的閃爍，每一次閃爍發出 6000 個光子。晶體的自吸收和安裝晶體的幾何形狀將造成很大的損耗：在產生的 $30 \cdot 10^6$ 個光子中約有 $2 \cdot 10^5$ 個光子到達陰極，這約相當於 10^{-10} 流明的光流。然而，統計起伏將不像“連續”光的起伏那樣等於

$$\frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^5} = 0.00225,$$

而是只等於

$$\frac{\sqrt{N}}{N} \sim \frac{70}{5000} \sim 0.014,$$

n 是每秒的光子数; N 是每秒的閃爍次数。

很明显,在無規則的光脉冲的情形,例如在閃爍的情形,無規則起伏所需要的光是連續光所需要的 k 倍,这里 k 是到陰極的每一光脉冲的平均光子数。

八. 結 論

理論上指出,把磁光原理应用于光电倍加管,可以制造出一个工業上用的不十分精細的測微光度計,量測極弱的光。实用上要求較低的輸入阻抗和較保守的輸入訊号强度,这个要求可以結合着一个令人滿意的訊号-噪音比而不用机械切割光的办法。抑制暗电流用的外加屏蔽的方法可以把灵敏度的下限延伸到最低的光强,这个下限只因光流的不連續性而受到限制。

实验研究肯定了这些假設,使我們能制造出一个坚固而簡單的超光度計,具有固有的电学的稳定性。它的有用灵敏度的極限約为 10^{-12} 流明,相当于 24 吋望远鏡聚集的 14 級的星光。应用这一新仪器作閃爍晶体实验所得的数据說明它可以作为核子輻射的定量探测器。这个仪器在使用时有許多优点,例如:零点很穩定,不受漏电的影响,不必用冷却方法消除暗电流。使用交流放大可以保証很方便地轉換量測范围,并且在需要記錄或控制时能够进一步放大訊号。我們正在研究如何把新的超光度計用于分光光度計、天文和其他的弱光光度术以及 X 射綫和核子輻射的間接測定。

作者感謝 M. Farkas-Jahnke 夫人在这問題上作了許多实验工作并提供了一些很有意义的建議。还感謝 F. Svab 先生帮助設計和建立了所需的实验裝置。

参 考 文 献

- [1] Strong, J., Procedures in experimental physics, Chapter 10, New York, Prentice-Hall, 1939
- [2] Hardy, A. C., Perrin, F. H., The principles of optics, Chapters 12, 13, New York, McGraw-Hill, 1932.
- [3] Zworykin, V. K., Wilson, E. D., Photocells and their applications, Chapter 12, New York, Wiley, 1932.
- [4] Görlich, Paul, Die lichtelektrischen Zellen, Leipzig, Akademische Verlagsges, 1951.
- [5] Görlich, P., Die Anwendung der Photozellen, Leipzig, Akademische Verlagsges, 1954.
- [6] Foitzik, L., Zschaack, H., Zeitliche Veränderungen der absoluten und spektralen Empfindlichkeit von Photozellen und Photoelementen, *Exper. Techn. Phys.* **4**, 3 (1956), 111—123.
- [7] RCA Tube Handbook HB-3, Vol. 1—2, Harrison, N. J., RCA.
- [8] Kalmus, H. P., Striker, G. O., A new radiation meter. *Rev. Scient. Instr.* **19**, 2 (1948), 79—82.
- [9] 見匈牙利 ORION-EMG 仪器样本中“Magnephot” Model 2211, 或見美国芝加哥 WELCH Scientific Co. 仪器样本中“Densichron” Model 3831.
- [10] Kalmus, H. P., Striker, G. O., 美国專利 2, 605, 428 “Device for the amplification of minute space currents” 及其他專利。
- [11] Schottky, W., Spontaneous current fluctuations in various conductors. *Ann. d. Phys.* **57** (1918), 541.
- [12] Náray Zsolt, Determination of cathode sensitivity distribution of photomultipliers. *Acta Phys. Hung.* **4** (1955), 255.
- [13] Náray Zsolt, *Magyar Fiz. F.* **3** (1955), 1.
- [14] Náray Zsolt, On the reduction of the dark current in photomultipliers. *Acta Phys. Hung.* **5** (1955), 159.
- [15] Náray Zsolt, On the reduction of the dark current of photomultipliers. *J. Scient. Instr.* **33** (1956), 476—478 and *M. Fiz. F.* **3** (1955), 515—528.
- [16] Bánsághy László, On the linearity of phase-sensitive rectifier circuits. 匈牙利出版(匈牙利文)。

ULTRAPHOTOMETER USING MAGNETICALLY MODULATED PHOTOMULTIPLIER

G. O. STRIKER

(Institute for Measurement and Instrumentation of the Hungarian Academy of Sciences)

ABSTRACT

Theoretical considerations indicate that by applying the Magnephot principle to photomultipliers, a simple and rugged industrial microphotometer may be built in the range of extremely low light intensities. The requirements for a low input impedance and a conservative input signal level can be successfully combined with a satisfactory signal-to-noise ratio without the use of mechanical light chopping. The external-shield method of dark current suppression may be usefully employed to extend the sensitivity limit to lowest light values, limited only by the discontinuous nature of the light flux.

Experimental investigation confirmed these assumptions and led to the construction of a sturdy and simple ultra-photometer of inherent electrical stability. The limit of useful sensitivity is around 10^{-12} Lumen, corresponding to the light collected by a 24" telescope from a star of the 14th order. Experiments with scintillating crystals yielded data about the use of the new instrument as a quantitative sensing device for nuclear radiation. The experimental instrument gave satisfactory performance as to zero stability, independence from leakage currents and the exclusion of dark current without cooling. The use of a.c. amplification assured convenient range-switching and the possibility to amplify the signal further for registration or control purposes. The new ultra-photometer will now be investigated in conjunction with spectrophotometry, astronomic and other low-level photometry as well as the indirect measurement of X-ray and nuclear radiation.