

— 光辐射测量 —

光辐射实用

探测器

〔加〕W. 比尤迪著



机械工业出版社

73-7351
142

—光辐射测量—

光辐射实用探测器

〔加〕 W. 比尤迪 著

缪家鼎 译 邱锦来 校



机械工业出版社

DT37 106

本书是《光辐射测量》专集中的一册，研究的是光辐射实用探测器。书中提供了有关探测器的术语以及热探测器、光电探测器、半导体探测器的性能、特点和典型数据等有用信息。其中光辐射探测器的最终性能和如何使用是本书的重点。

Physical Detectors of Optical Radiation

W. Budde

ACADEMIC PRESS

1983

* * *

—光辐射测量—

光辐射实用探测器

[加] W·比尤迪 著

廖家鼎 译 邱锦来 校

*

责任编辑：林静贤

封面设计：王 伦

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一零）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $10 \frac{1}{8}$ · 字数 266 千字

1988年5月北京第一版·1988年5月北京第一次印刷

印数 40,001—41,450 · 定价：3.50 元

*

ISBN 7-111-00542-2/TH·88

译者的话

本书译自《光辐射测量》专集中的一册，专门研究光辐射实用探测器。目前光学仪器和光电仪器的现代化迫切需要各类探测器和光电技术的知识。而本书具有实用性强，对探测器的外特性叙述周详、全面的特点，故将其译出。相信不论是专业科技人员、大学生，还是研究生和教师只要认真阅读本书，将会获得正确选择和使用各类探测器的有价值的知识和信息。

本书的第七章是在沈德洪同志译文的基础上改写的。

本书特邀邱锦来高级工程师审校，对她的辛勤和有效的工作我表示真挚的感谢。

对本书译文中的错误和缺点，欢迎指正。

缪家鼎

1986.2.4 于杭州

目 录

第一章 绪论	1
参考文献	3
第二章 术语	4
2.1 有关探测器类型的术语	4
2.2 有关探测器工作的术语	7
2.3 探测器的分类	12
参考文献	14
第三章 探测器的性能	15
3.1 响应率	16
3.2 噪声和探测率	56
3.3 线性	65
3.4 时间量	83
参考文献	86
第四章 热探测器	90
4.1 热电偶和热电堆	96
4.2 测辐射热计和热敏电阻	111
4.3 热释电探测器	117
4.4 高莱气动探测器	127
4.5 绝对辐射计和量热计	128
参考文献	133
第五章 光电发射探测器	136
5.1 真空光电管	140
5.2 光电倍增管	152
5.3 充气光电管	200
参考文献	202
第六章 半导体探测器	205
6.1 光敏电阻	205
6.2 结型光电探测器	220
6.3 雪崩光电二极管	256

参考文献	263
第七章 探测器的附件	266
7.1 光谱匹配用滤光器	266
7.2 衰减器	276
7.3 斩光器和调制器	284
7.4 漫射器	293
7.5 用于辐亮度或亮度测量的附件	301
7.6 连续激光的测量	304
参考文献	306
附录A 有关探测器的汇编数据	310
A.1 线性范围	310
A.2 响应率的均匀性	311
A.3 响应率的温度系数	311
A.4 对表A.1的注释	311
A.5 对表A.2的注释	312
A.6 对表A.3的注释	314
附录B表	315

第一章 绪 论

光子探测器和热探测器常被应用在辐射度学中把辐射能转换成电信号。

本书的目的是为准备各种综合实验时必需测定某些光辐射或选定最佳探测器的科技人员提供有关光辐射探测器的重要工作条件和信息。本书对开发批量生产仪器（辐射度计、光度计、色度计）的工厂设计人员可能也有帮助。因而，重点放在辐射探测器的最终性能和如何使用它们，而不是放在解释它们为什么和怎样工作的。从这一观点出发决定优先提供已有商品出售的那些探测器的情况。只用很小的篇幅叙述把入射辐射通量转换成可度量的信号的过程。希望更好地了解这些过程的读者可参阅以下有价值的文献：Sommer (1968)、Hudson 和 Hudson (1975)、Keyes (1977)、Kingston (1978) 以及 Grum 和 Becherer (1979 第六章)。本书不是为希望设计探测器或利用改变设计改善现有探测器性能的人写的，而是为希望根据探测器性能、缺点和极限等有关知识合理地使用商品化的探测器的人写的。

第二章列举有关探测器和涉及探测器工作的最重要的术语以及国际照明委员会 (CIE) 所给出的定义 (1970)。还包括探测器的简单分类。第三章更详尽地讨论探测器最重要的性能（响应率、探测率、线性、时间常数）以及几种性能的测试方法。以后三章提供有关热探测器（第四章）、光电发射探测器（第五章）和半导体探测器（第六章）的特点和数据。第七章讨论光学附件，例如，为修正光谱响应曲线的滤光器、为获得期望角响应率分布的漫射器以及中性衰减器（减光器）等。

在各章和附录中给出了探测器性能和特点的典型数据。这些数据多半取自样本、技术规格表及制造厂的使用指南等。应强调

一点, 引用数据只用来说明一些观点、性能和特征, 而不是用来比较不同制造厂的产品。力图用这样的数据给读者以效应的数量概念, 质量上可达到或可利用的水平, 存在的缺点或误差源的大小, 以便考虑这些误差源, 并用适当的正确措施尽可能加以限制。因而, 利用一个制造厂名称或一个专有型号的数据并不意味着偏爱这一工厂或评论它的产品质量。同样, 忽略一制造厂名称不是故意的, 不应看作为相反的评价。为了选用供专门用途的探测器, 本书可给出探测器合适类型的一般指南, 但对于实际的规格, 应参阅半年一期的“Optoelectronics DATA Book”或“Annual Laser Focus Buyers Guide”等样本或汇编。这些汇编不仅提供最新产品的信息, 还提供现有制造厂名称。当然, 即使是制造厂的规格也仅仅是典型数据, 为获得专用探测器的实际数据常常不可避免地要进行有关性能的测定。

书中所述的“光辐射”限制在波长范围 $200 \sim 3000 \text{ nm}$, 即紫外(不包括真空紫外)、可见和红外辐射。辐射可能是未斩波的(按激光术语是连续波的)、斩波的或脉冲的。

波长范围的限制意味着所述探测器使用的测量方法的某些限制。这里没有详细讨论红外区使用的某些技术和措施, 因为在红外和远红外区遇到的困难对上述波长范围内的许多探测器来说是不存在的。因此将不讨论诸如外差探测或把探测器冷却到低温使用等先进技术。

对一个作者来说, 要避免延伸到他曾经做了开拓性工作的那些领域是很困难的。加拿大国家研究委员会物理分部从事基础研究、应用研究和主、副基准的标定。辐射测量、光度学和色度学是光学分部的主要任务, 各类探测器的定标、它们的光谱响应率、线性和角响应率等等是它的主要课题。我们将化较多的篇幅详细叙述与这些课题紧密联系的工作, 因此, 此书不可能满足所有的要求。对于这样过分强调一个方面而忽视另一方面的作法, 希读者谅解。

还要提一下, 我们将不时提供过去专门研究过而从未公布的

结果，这类图表将用“NRC 测定”标明。

参 考 文 献

- Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) (1970). "International Lighting Vocabulary," Publ. No. 17. CIE, Paris.
- Grum, F., and Becherer, R. J. (1979). "Optical Radiation Measurements," Vol. 1. Academic Press, New York.
- Hudson, R. D., and Hudson, J. W. (1975). "Infrared Detectors." Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pennsylvania.
- Keyes, R. J. (1977). "Optical and Infrared Detectors." Springer-Verlag, Berlin and New York.
- Kingston, R. H. (1978). "Detection of Optical and Infrared Radiation." Springer-Verlag, Berlin and New York.
- Semmer, A. H. (1968). "Photoemissive Materials: Preparation, Properties, Uses." Wiley, New York.

第二章 术 语

本章提出了有关辐射探测器、它们的工作和辐射-探测过程的术语。编写时努力遵守由CIE推荐的术语。但在编写过程中，CIE词目的新版还在准备中。许多现有的术语已经修改，并建议采用不同的表达方式，同时还推荐了很多新术语。按照这些推荐我们将尽力提供最新的术语和定义。然而读者应注意，这些术语和定义不是最终的，可能仍会变化。

除这些术语外，某些未被CIE考虑的术语也将在此处定义。由于它们涉及探测器的重要性能，因此是很有用的。

这些定义中的一部分已在本专集第一册辐射度学^① (Grum和Becherer, 1979)中提出过，在这里重复一下以表示完整性。

本章中CIE定义和有关的注解表示在引号内。但不是CIE定义的部分有附加的说明。有关探测器最重要性能的术语（响应率、探测率、线性和响应时间）将在第三章作更详尽的讨论。

2.1 有关探测器类型的术语

2.1.1 探测器（光辐射的）

“由入射光辐射引起可度量的物理效应的器件。”

这是涉及到任何可度量物理效应的非常一般的术语，这些效应可能是电信号（参阅下一定义）、温升（参阅“热探测器”）、气体加热膨胀（此过程应用于高莱管中）或量热计中采用的液体加热。

2.1.2 光电探测器

“一种利用辐射和物质的相互作用，导致光子吸收和从物质

① 本书与辐射度学是“光辐射测量”专集中的两本，辐射度学已在机械工业出版社出版，1986年。

的初始态释放电子（不包括由温度变化引起的电现象）的光辐射探测器。”

这类探测器大多用于光辐射的现场测量中，它包括光电发射探测器和半导体探测器。

2.1.3 光电发射管、光电管

“利用由光辐射引起电子发射的光电探测器。”

2.1.4 光电倍增管

“一种光电探测器，它包含阴极、阳极和由阴极和阳极间的二次发射电极（倍增极）构成的单级电子倍增器或多级电子倍增器。”

“注：某些情况下一般管壳内的分立倍增极被一连续配置的电子倍增器所替代。”

当然，光电倍增管中的光电效应和光电管中的光电效应相同。倍增极结构提供很多数量级的放大或增益。

2.1.5 光敏电阻、光导管

“利用光辐射作用下电阻率变化的光电探测器。”

2.1.6 光电池、光生伏打探测器

“吸收辐射产生电动势的光电探测器。”

2.1.7 光电二极管

“在两种半导体或半导体和金属之间的 $p-n$ 结附近吸收辐射产生对单向电流电阻变化的光电探测器。”

“注1：光电二极管大多与偏置电动势串联使用，但有些也可作为光生伏打探测器使用。”

“注2：有些被称为雪崩光电二极管的光电二极管可以和小于 Φ 击穿电压的偏置一起工作，使得从导带中激发的每个电子在输出端产生 $\sim$ 电子脉冲。”

当然，这一定义包括 $n-p$ 结二极管，也包括 $p-i-n$ 二极管。注1倾向于采用光电二极管光电导工作态。但是，将在以后说明（第六章），对精密和精确的光辐射测量事实上宁可采用光

① 原文为大于 (exceeding)，应为小于——译者注。

电二极管的光生伏打工作状态。

如不加偏置，光电二极管可作为光生伏打探测器使用；如加反向偏置，可作为光电导探测器使用，从而使此术语很难定义。本书推荐的分类和用法将在 2.3 节中提出。

2.1.8 光电三极管

“利用三个半导体区域的光电探测器，其中光电效应产生在双 $P-n$ 结附近 ($P-n-P$ 或 $n-P-n$)，它具有放大的性能。”

2.1.9 辐射的热探测器、热(辐射)探测器

“由吸收辐射的部分加热产生可度量的物理效应的光辐射探测器。”

应指出，初始效应是由于入射辐射引起的辐射吸收体的温升，再利用各种二次效应去测定此温升。

2.1.10 辐射热电偶

“一种辐射的热探测器，它采用一对热电结作为温度变化的传感器。”

2.1.11 (辐射) 热电堆

“一种辐射的热探测器，它利用一对以上的热电结作为温度变化的传感器。”

2.1.12 测辐射热计

“一种辐射的热探测器，其中吸收辐射的部分加热引起它的电阻变化。”

2.1.13 热释电探测器

“一种辐射的热探测器，它利用某些电介质材料的自发电极化与温度的关系。”

“注：这一定义也可扩展到包含那些寿命较长而非自发电极化的材料。”

2.1.14 非选择性量子探测器

“一种光辐射探测器，它的量子效率在整个被研究范围内与波长无关。”

必须区分一般意义上的“非选择性探测器”和非透选择性量子

探测器,前者在整个谱段内具有不变的光谱响应率 (A/W),而后者具有不变的量子效率(术语 2.2.9)。详情在 3.1 节中说明。

2.2 有关探测器工作的术语

2.2.1 探测器输入

“是用探测器来测量或探测的辐射度量或光度量。”

“注 1: 此量可能是辐射通量、辐照度、光子通量、光子照度、光通量、光照度或在给定的时间周期内这些量的积分值。”

“注 2: 如果采用光度量,建议把探测器校正到 $V(\lambda)$ 或 $V'(\lambda)$ 响应。”

光度量是用人眼的光谱响应函数光谱加权的辐射度量(参阅 3.1.3 节)。国际上,已接受 1931 和 1967 年由 CIE 推荐的对所谓 CIE 标准光度观察者的光谱响应函数。1931 年的数据对 2° 立体角有效,而 1967 年的数据对 10° 立体角有效。这些数据通常以相对数据给出,归一化在 555nm 上,对 555nm 的绝对值为 683lm/W 。这些相对数值在附录 B,表 1 中给出。如必须区分辐射度量和光度量,则分别用下标 e (对有关的能量)和 v (对目视的)标明。

2.2.2 探测器输出

“由一探测器响应探测器输入所得到的物理量,通常是电量。”

“注: 此量可能是电流、电压或电阻的变化。”

2.2.3 光电流

“由入射辐射引起的光电探测器的输出电流部分。”

“符号: I_{ph} ”

“注: 在光电倍增管中必须区别阴极光电流和阳极光电流。”

2.2.4 暗电流

“没有辐照时在光电探测器中流过的电流。”

“符号: I_0 ”

2.2.5 响应率 (灵敏度)

“探测器输出 (量 Y) 与探测器输入 (量 X) 的商。”

“符号: $S^\ominus$, $S = Y/X$ ”

“注1: 如无辐照时探测器的输出为 Y_0 , 测得的总输出为 Y_t , 那么由探测器输入(量 X)产生的探测器输出(量 Y)为 $Y = Y_t - Y_0$ 。”

注2: 如 X 代表辐射量, 采用术语辐射响应率 $S_r^\ominus$, 如 X 代表光量, 则采用术语光响应率 $S_v^\ominus$ 。利用术语光谱响应率 $S(\lambda)^\ominus$ 可得:

$$\begin{aligned} \text{辐射响应率 } S_r &= \frac{\int X_{e,\lambda} S(\lambda) d\lambda}{\int X_{e,\lambda} d\lambda} \\ &= \frac{\int x(\lambda)^\oplus S(\lambda) d\lambda}{\int x(\lambda) d\lambda} \\ \text{光响应率 } S_v &= \frac{\int X_{e,\lambda} S(\lambda) d\lambda / K_v}{\int X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} \\ &= \frac{\int x(\lambda)^\oplus S(\lambda) d\lambda / K_v}{\int x(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \end{aligned}$$

“注3: 响应率取决于相对光谱分布, 此外, 它可能还取决于入射辐射的偏振和方向、辐射的均匀性、探测器温度以及电路。如探测器的输出量和探测器输入量不成正比, 响应率还取决于探测器的输入量。”

2.2.6 光谱响应率

探测器输出(量 $dY(\lambda)$) 与波长 λ 处探测器输入(量 $dX_e(\lambda) = X_{e,\lambda}(\lambda) d(\lambda)$) 的商。

符号: $S(\lambda)^\oplus$, $S(\lambda) = dY(\lambda)/dX_e(\lambda)$

2.2.7 相对光谱响应率

在波长 λ 处的光谱响应率 $S(\lambda)^\oplus$ 与在参考波长 λ_0 处的光谱响应率 $S(\lambda_0)^\oplus$ 之比。

符号: $S(\lambda)_{rel}$, $S(\lambda)_{rel} = S(\lambda)/S(\lambda_0)$, $S(\lambda)_r$

注1: 有时用下式求出的平均值 $S_m^\oplus$ 代替 $S(\lambda_0)$ 是有用的

⊖⊖⊖⊖ 原文中为小写, 根据此书用大写表示绝对值, 小字表示相对值或归一化值的规定。把它们改为大写, 使全书符号统一——译者注。

⊕ 原文中用 $S(\lambda)$ 表示辐射量 $X_{e,\lambda}$ 的相对光谱分布值, 为了与光谱响应率 $S(\lambda)$ 区别开来, 改用 $x(\lambda)$ ——译者注。

⊕⊕⊕⊕ 应把小写改为大写——译者注。

$$S_n = \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} S(\lambda) d\lambda / (\lambda_n - \lambda_1) \approx \sum_{i=1}^{i=n} S(\lambda_i) \Delta\lambda_i / (\lambda_n - \lambda_1)$$

注2: 如探测器输出量不正比于探测器输入量, 在很多情况下有可能定义一个与探测器输出量无关的相对光谱响应率 (如对于等值的探测器输出)。对有限值 ΔX 和 ΔY 可得到

$$S(\lambda)_{rel} = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda_0)} = \frac{\Delta X(\lambda)}{\Delta X(\lambda_0)}$$

对 $\Delta Y(\lambda) = \Delta Y(\lambda_0)$ 的情况。

2.2.8 相对响应率

“用辐射 Z 照射探测器时的响应率 $S(Z)$ 与用参考辐射 N 照射探测器时的响应率 $S(N)$ 之比。”

“符号: $a(Z)$, $a(Z) = S(Z)/S(N) \ominus$ ”

“注1: 如已知相对光谱响应率 $S(\lambda)_{rel}$ 和相对光谱分布 $x(\lambda)_N$ 、 $x(\lambda)_Z$, 则可计算出相对响应率。

相对辐射响应率为

$$a_r(Z) = \left[\int x(\lambda)_Z S(\lambda)_{rel} d\lambda / \int x(\lambda)_Z d\lambda \right] \times \left[\int x(\lambda)_N d\lambda / \int x(\lambda)_N S(\lambda)_{rel} d\lambda \right]$$

相对光响应率:

$$a_v(Z) = \left[\int x(\lambda)_Z S(\lambda)_{rel} d\lambda / \int x(\lambda)_Z V(\lambda) d\lambda \right] \times \left[\int x(\lambda)_N V(\lambda) d\lambda / \int x(\lambda)_N S(\lambda)_{rel} d\lambda \right]^{**}$$

“注2: 如探测器输出不正比于探测器输入, 在很多情况下可能定义一个与探测器输出值无关的相对响应率 (如对于等值的探测器输出)。于是注1的等式也能成立, 可得

$$a(Z) = \frac{S(Z)}{S(N)} = \frac{X(N)}{X(Z)} \quad \text{对 } Y(N) = Y(Z) \text{ 的情况}^{**}$$

$\ominus$ 将小写改为大写——译者注。

“注3：相对响应率的倒数被称为光谱校正因子。”

2.2.9 量子效率

“贡献给探测器输出的单元事件数与入射光子数之比。”

“符号： η ”

“注1：对输出为电流的光电探测器，在给定波长上入射辐射的量子效率可以用下式从光谱响应率求出：

$$\eta(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{\lambda} \cdot \frac{hc}{q}$$

式中 $S(\lambda)$ ——光谱响应率；

λ ——波长；

h ——普朗克常数；

c ——电磁波在真空中的传播速度；

q ——单位电荷。”

“注2：如探测器输入是入射光子，称它为外量子效率；如输入是吸收的光子，称它为内量子效率。于是，外量子效率是作反射比校正的光谱吸收比和内量子效率的乘积。”

对此量 CIE 采用符号 K 。为避免与光效能混淆和遵守文献中常用的习惯，此处采用 η 。

所有术语 2.2.1-2.2.9 将在 3.1 节中作进一步的阐述。

2.2.10 响应时间：上升（下降）时间

“当稳态辐射瞬时地射向探测器，输出 Y 从其最大值的规定低百分比上升到高百分比所需的时间或从探测器上瞬时遮断辐射，输出从规定高百分比下降到低百分比所需的时间，辐照度需稳定。”

“通常定为 10%[90%]和 90%[10%]电平。”

“注：如输出随时间指数地上升[下降]，从起始值变化到最终值的 $(1 - 1/e)$ 所需的时间被称为时间常数。”

2.2.11 噪声等效探测器输入

“产生的探测器输出等于规定带宽内和规定频率上均方根噪

声输出的探测器输入值。”

“符号: P_N ”

“注1: 通常规定为 1Hz 带宽。除非另有规定, 此值是不言而喻的。”

“注2: 如探测器输入是辐射通量, 则噪声等效探测器输入称为噪声等效功率。”

“符号: NEP”

“如探测器输入是均匀的辐照度, 则称为噪声等效辐照度。符号: NEI”

2.2.12 探测率

“噪声等效探测器输入 P_N 的倒数”

“符号: D , $D = 1/P_N$ ”

2.2.13 归一化探测率

涉及到探测系统某些有关参数 (例如探测器的灵敏面积和测量带宽) 的探测器的归一化值 (通常利用灵敏面积和带宽的平方根)。

符号: D^*

$$D^* = D(A \cdot \Delta f)^{1/2} = \frac{1}{NEP}(A \cdot \Delta f)^{1/2}$$

式中 A 是探测器面积, Δf 是带宽。这意味着, 探测器的响应率和噪声在研究的频率范围内是与频率无关的。

注1: 应规定探测器输入的相对光谱分布和频率。

注2: 作为噪声等效辐照度 (NEI) 由下式给出

$$NEI = NEP A^{-1}$$

归一化的探测率为

$$D^* = NEI^{-1} A^{-1/2} (\Delta f)^{1/2}$$

2.2.14 线性

术语“线性”虽然是探测器的一个重要参数, 但在过去的 CIE 词汇中是没有定义过。然而在 CIE 技术报告草案“表征辐射计 (光度计) 性能的方法”中给出下列定义: