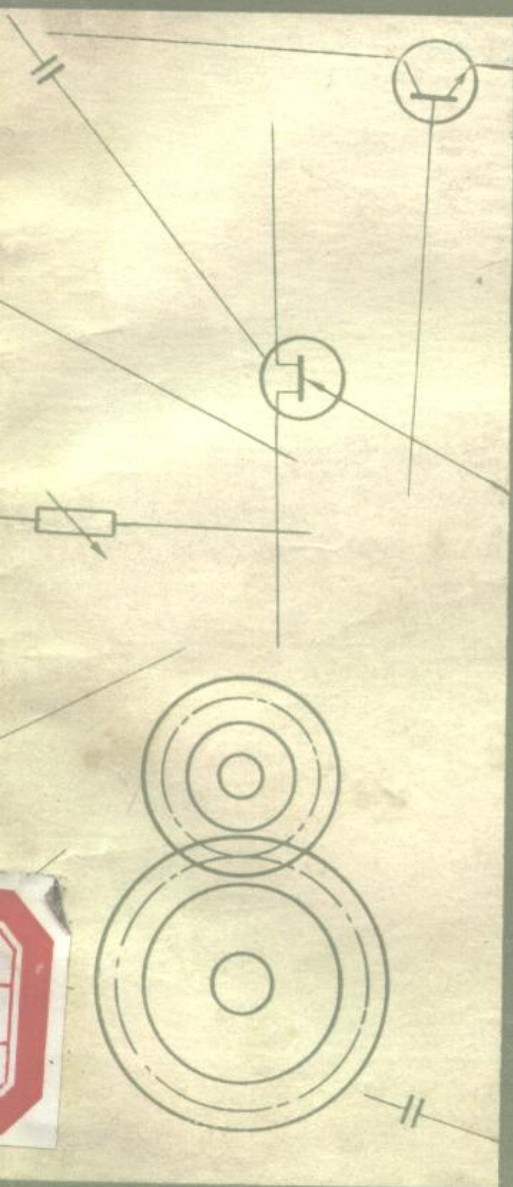


义表元件丛书



半导体光电器件

72.75-1
119

仪 表 元 件 丛 书

半 导 体 光 电 器 件

田等先 龚全宝 张幼平 陈若良 编著



机 械 工 业 出 版 社

1110366

本书主要介绍几种半导体光电器件如光敏电阻器、光电池、光敏管的工作原理、基本特性和制造工艺，还以一定篇幅介绍这些光电器件的性能测试和应用。对国外在半导体光电器件的研制、生产方面的一些新发展也略有介绍。

本书可供从事各类半导体光电器件的研制和生产、使用的工程技术人员和工人阅读，对大专院校有关专业师生也有参考价值。

仪表元件丛书
半导体光电器件

田等先 龚全宝 张幼平 陈若良 编著

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张11⁵/₈·字数267千字

1982年11月重庆第一版·1982年11月重庆第一次印刷

印数 0,001—7,200·定价1.20元

科技新书目：34—75

统一书号：15033·5235

出版者的话

仪器仪表是实现四个现代化必不可少的技术装备，而仪器仪表元件（简称仪表元件）是仪器仪表中具有独立功能的最基本的单元，它是仪器仪表的基础，能完成信号的检测、传递、转换、放大、贮存、运算、控制和显示等功能。仪表元件的品种和质量直接影响着仪器仪表的性能。

目前，仪器仪表已广泛应用于国民经济各部门。为了适应仪器仪表工业发展的需要，进一步做好仪表元件基础知识的普及工作，在国家仪器仪表工业总局的直接关怀下，我们编辑出版了这套《仪表元件丛书》。

本丛书预定为十一分册，分别为《热敏电阻器》、《集成电路在仪器仪表中的应用》、《半导体光电器件》、《宝石支承》、《仪表齿轮》、《金刚石压头》、《数据采集系统中的放大器》、《磁电转换元件》、《自动平衡仪表放大器》、《自动平衡仪表电机》、《集成运算放大器》等，将陆续出版。

本丛书以介绍各类仪表元件的结构原理、特性、设计计算为主，对制造工艺、性能测试和应用知识也作了简单的阐述。在写法上，力求通俗易懂，深入浅出。从基础概念出发，对仪表元件的有关问题进行论述。

值此《仪表元件丛书》出版之际，我们向为丛书的编写做了大量组织、指导工作的沈阳仪器仪表工艺研究所的领导及从事具体工作的王崇光、董世章等同志表示深切的谢意，并向大力支持丛书编写的各有关单位领导及编者，表示衷心的感谢。

目 录

出版者的话

第一章 光与半导体基础知识	1
第一节 光源及其度量	1
一、光源	1
二、辐射度量	10
三、光度量	12
第二节 半导体基础知识	18
一、能带理论	20
二、费米能级	27
三、非平衡载流子的复合与陷阱	32
四、载流子的运动	39
五、半导体中的光吸收	47
第二章 光敏电阻器	51
第一节 光敏电阻器的作用原理	51
一、光电导体的基本导电机理	52
二、光电导体的灵敏度	55
三、光电导的弛豫	58
四、光电导的光谱分布	63
五、两种复合中心的理论	67
第二节 光敏电阻器的基本特性	72
一、灵敏度	72
二、光照特性	75
三、伏-安特性	79

四、光谱响应	81
五、温度特性	83
六、频率特性	85
七、稳定性与寿命	91
第三节 光敏电阻器的制造	92
一、制造工艺的一般介绍	93
二、工艺讨论	104
第三章 光 电 池	125
第一节 p-n 结 光 电 池	125
一、p-n 结 原 理	125
二、p-n 结的光电转换过程	130
三、电流的产生与收集	136
四、光电池中的漂移场	141
五、实用光电池的特性	144
六、硅光电池的制作工艺	149
第二节 异质结光电池	184
一、异质结的能带结构	185
二、异质结的电流输运机理	188
三、硫化镉光电池	195
四、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs}$ 光电池	204
五、硒光电池	207
第三节 金属-半导体 光 电 池	209
一、肖特基势垒机理	210
二、金属-半导体光电池的 光 电转换过程	213
三、金属-半导体光电池的主要特性	215
第四节 非晶态硅光电池	216
一、非晶态导电机理讨论	218
二、非晶硅光电池机理	219
三、非晶硅光电池的结构与特性	221

第四章 光敏管	225
第一节 光敏二极管	225
一、光敏二极管的结构与原理	225
二、光敏二极管的电性能	227
三、光敏二极管的探测性能	235
四、光敏二极管的分类	244
第二节 光敏三极管	253
一、光敏三极管的结构与原理	253
二、光敏三极管特性	258
第三节 光敏场效应晶体管	262
一、光敏场效应晶体管的结构与原理	262
二、光敏场效应晶体管的主要特性	264
第四节 光控可控硅	268
第五节 光敏管的制造工艺	273
一、工艺概况	273
二、光敏管的一般制造工艺	276
三、光敏管的几种特殊工艺	279
第五章 光电器件的测试	288
第一节 光照特性的测试	288
一、测试设备	288
二、测试方法	292
三、误差分析	295
第二节 光谱特性的测试	300
一、测试设备	300
二、测试方法	304
三、误差分析	307
第三节 频率特性的测试	309
一、转盘法测频率特性	309
二、响应时间的测试	310

三、前历效应的测试	314
第六章 光电器件的应用	315
第一节 概况	315
一、应用原理	315
二、基本电路	320
第二节 硒光电池的应用	322
一、照度计	323
二、亮度计	325
三、比色计	326
第三节 硅光电池的应用	328
一、能源	330
二、光电迹寻器	333
三、色选机	336
四、日照时数计	340
第四节 光敏电阻器的应用	341
一、外测曝光表	341
二、内测曝光表与电子快门	343
三、八十万倍电子显微镜自动曝光装置	347
四、BJ-2型病人监护仪	350
五、SZ-5型数字磁带机	352
第五节 光敏管的应用	354
一、SZGB-11型光电转速传感器	355
二、快速数显天平	357
三、光度计	360
四、光控闪光灯与继电器	361
参考文献	363

第一章 光与半导体基础知识

在介绍光电器件的原理、特性、参数与测试方法时，离不开光源性质与光照条件。只有在特定光源与光照条件下，才能讨论和评价光电器件。为此，本章的第一部分将简要地介绍光的性质、辐射度量、光度量及其单位。

本章的第二部分是理解本书所介绍的光电器件工作原理而必备的半导体基础知识。至于更深入和全面的半导体基本知识，读者可参考其它有关的著作。

第一节 光源及其度量

一、光源

可见光是人的视觉器官所能感觉到的电磁波。图 1-1 示出了波长从 10^{-10} 微米到 10^5 千米之间的电磁波谱。其中只有波长从约 0.38 微米到 0.78 微米范围内的电磁波，才能引起人眼感光细胞的直接感觉。这一段波谱称为可见光区域。为了清楚起见，在图 1-1 中，分别将紫外、可见光和红外部分放大示出。

光和其它电磁辐射一样，具有波动性和微粒性。它们的速度、频率与波长的关系如下：

$$c = \nu \lambda \quad (1-1)$$

式中 c ——光在真空中的传播速度 ($c = 299792.8 \pm 0.4$ 公里/秒，一般近似记为每秒 30 万公里)；

ν ——光的频率；

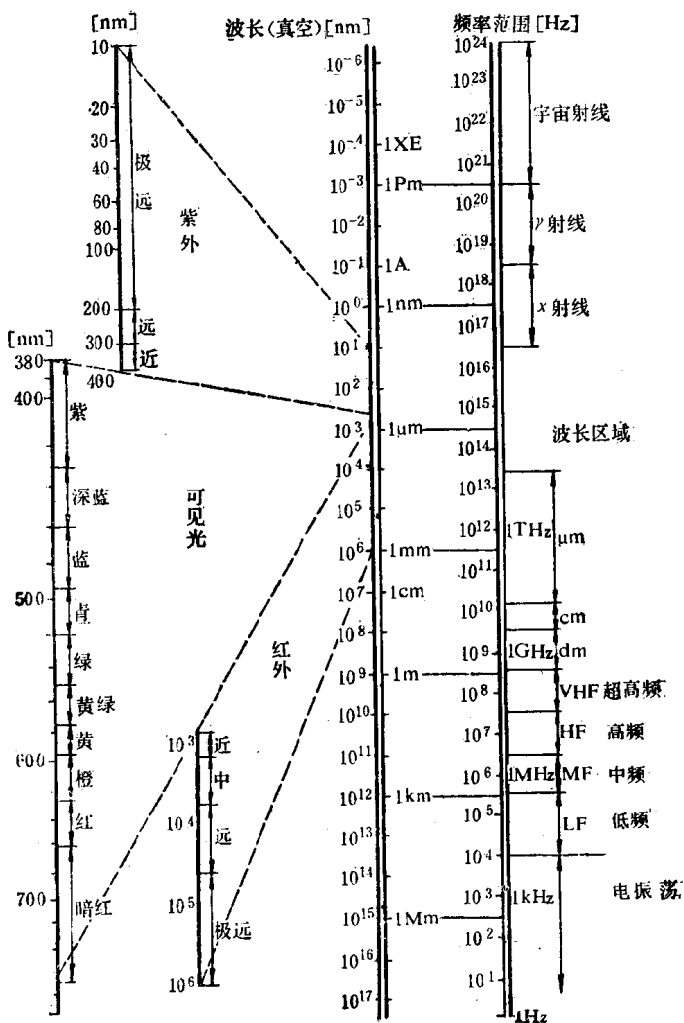


图 1-1 电磁波谱

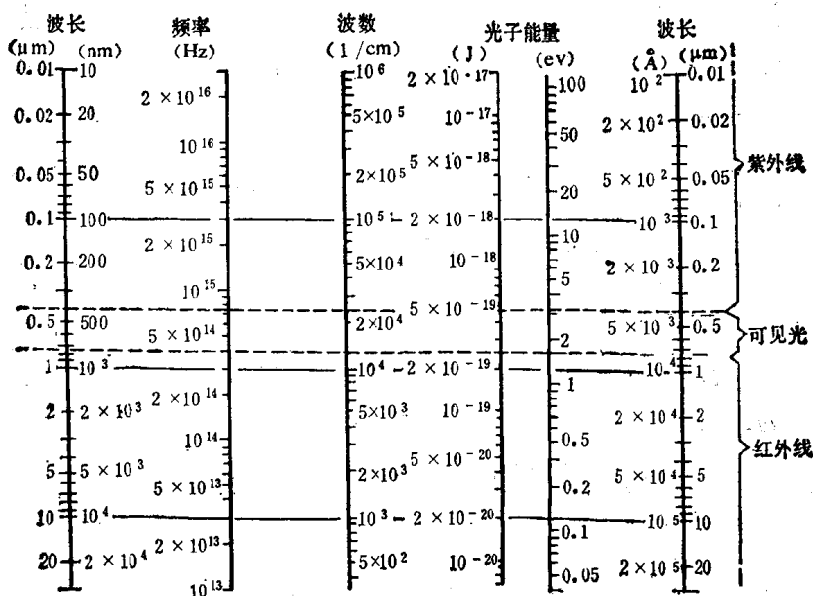


图 1-2 辐射转换图

λ ——光的波长。

单个光子的能量 E 由下式给出:

$$E = h\nu \quad (1-2)$$

式中 h ——普朗克常数, $h = (6.623773 \pm 0.000180) \times 10^{-27}$ 尔格·秒。

图 1-2 为辐射转换图^[1]。从图中可迅速查出辐射量之间的转换关系。图中两边绘有微米标尺, 便于从两端横向穿过其它标尺, 以进行精确读数。

本书在具体介绍测试光电器件所用的光源时, 涉及到黑体辐射与色温的概念, 故先对这两个概念作简单介绍。

通过加热而辐射出能量的物体叫做热辐射体。能在任何

温度下全部吸收任何波长的辐射的物体称绝对黑体，简称黑体。黑体辐射的总能量正比于它的绝对温度的四次方，这就是斯蒂芬—玻尔兹曼定律：

$$P = \sigma T^4 \quad (1-3)$$

式中 P ——每平方厘米的辐射表面所辐射的功率 (瓦)；

T ——黑体的绝对温度 (K)；

σ ——辐射常数，其数值为 5.6697×10^{-12} 瓦/厘米²·度⁴。

普朗克分布定律给出了黑体能量的光谱分布，其表达式为：

$$P_\lambda = \frac{3.7405 \times 10^{-12} \times \lambda^{-5}}{\exp(1.4389/\lambda T) - 1} \quad (\text{瓦/厘米}^2 \cdot 100\text{埃}) \quad (1-4)$$

式中 P_λ ——平方厘米辐射表面，当中心波长为 $\lambda(\text{cm})$ 时，在 100 埃的波带内所辐射的能量；

T ——黑体的绝对温度 (K)。

在不同温度下，黑体辐射能量按波长分布曲线如图 1-3 所示。反过来，由黑体的能量分布曲线可以求出黑体的温度。

绝对黑体与热辐射体在可见光区域具有相同形状的光谱能量分布时的温度，称为该热辐射体的色温。在此温度下，该辐射体的辐射色调与绝对黑体的辐射色调相同。对于辐射选择性很大的物体，它的辐射不可能和任何温度的黑体的分布接近，因而色温的概念对这些物体便失去意义。不过在一些实际应用中，为方便起见，还是采用色温来表示光源的颜色。显然，这只是一种近似。在色度学中，色温的定义要广义得多。

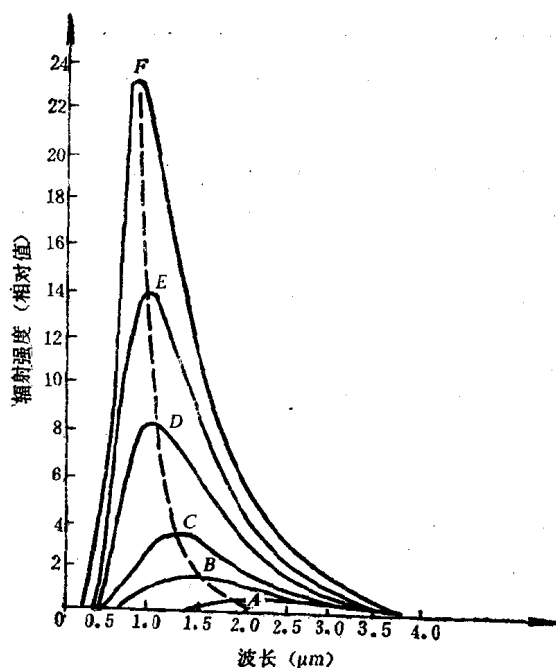


图 1-3 黑体的辐射能量按波长分布

A=1500K B=2150K C=2500K D=2870K E=3300K
F=3655K

因为不同的光源有不同的色温，所以它们的光谱能量分布也不同。由国际电工学会（IEC）推荐的五种色温的标准光源是：〔2〕

- 标准光源A，代表色温 2855.6K 的全辐射体；
- 标准光源B，代表校正色温为 4874K 的直射阳光；
- 标准光源C，代表校正色温为 6774K 的白昼光；
- 标准光源D，代表校正色温为 6504K 的白昼光；
- 标准光源E，代表校正色温为 5455K 的白昼光。

标准光源又分为三级:

一级标准: 由严密规范所产生的标准光源, 并通过它而建立了光的单位。现有的国际标准是以铂凝固温度下的全辐射体而确定的。

二级标准: 恒定的复制光源, 其发光强度(或光通量, 或照度)可用一级标准来作比较而直接或间接地予以确定。

工作标准: 按一定规则使用的光源, 应经常用二级标准进行校正。

在光敏器件的测量中, 标准光源A常采用色温为2855.6K的钨丝灯。钨丝灯有很多实用的优点: 操作和校准简单、光源相对稳定、寿命长和有宽广的辐射光谱波段, 并在一定范围内其光强与环境温度、大气压力等条件无关。在一般测量中, 有时为了增加光源的寿命和稳定性, 可降低一些钨丝灯色温, 如降至2700K。当然, 相对于标准光源来说, 降低色温会引起一些误差。

通常标准灯泡外形有圆柱形、球形、正圆锥形和斜圆锥形等多种。我国标准灯泡多用圆形结构, 它们的型号及特性列于表1-1。

对于同一规格的光源灯, 虽有相似的光谱能量分布曲线, 但由于制造工艺的不一致, 严格地说, 其光谱分布曲线也是有差异的。作为测量光源, 必须知道每只光源灯精确的实际光谱分布曲线。

太阳光的色温约为5900K, 它的光谱能量分布和标准光源A的光谱能量分布有很大差别。如图1-4所示, 太阳光谱的峰值约在0.46微米, 蓝光部分较丰富, 而钨丝灯泡却有很强的红外辐射。温度接近太阳色温的黑体, 其辐射光谱与太

表 1-1 国产标准灯泡的特性

型 号	额定色温度 (K)	电 压 参考值 (V)	电 流 参考值 (A)	光 强 度 $\pm 12\%$ (Cd)	类 型
BDQ-1	2859	2	1	1.2	充 气
BDQ-2	2859	6	1.5	12	充 气
BDQ-3	2859	36	1.6	90	充 气
BDQ-4	2356	11	3.6	30	真 空
BDQ-5	2045	11	5.3	15	真 空
BDQ-6	2356	27	5.2	100	真 空
BDQ-7	2859	92	2.9	450	充 气
BDQ-8	2859	100	6.3	1100	充 气

阳光谱非常类似，但在工厂实验室要得到如此高温的黑体是很困难的。如果用钨丝灯来检验阳光电池，由于它的色温低于 3400K，即使加上含硫酸铜的溶液滤光器滤去部分红外线，对检验太阳电池而言，仍旧缺乏足够的蓝光。所以，采用钨灯来检验太阳电池必然与实际使用条件有较大的差异。

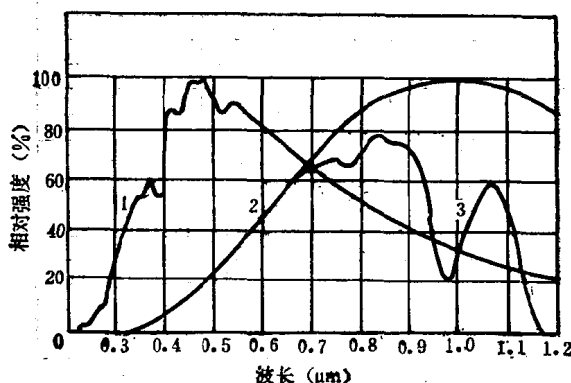


图 1-4 外层空间太阳光与色温为 2856K 的钨丝灯光的光谱比较

1—太阳光 2—钨丝灯光 3—通过 3 厘米厚硫酸铜溶液滤光器的钨丝灯光

为了鉴定用于外层空间的太阳能电池，必须采用光谱特性与外层空间的太阳光谱相似的光源。

有时，人们用炭弧来检验太阳能电池，它的光谱分布与钨丝灯相比，更近于太阳的光谱分布。然而，这种光源蓝色辐射太强，而红光部分显得不足。而且炭弧还存在着一个最大的问题，就是不稳定。

汞弧灯在 300 个大气压下，光谱分布开始接近于太阳的光谱分布。可是，很难得到这种压强下工作的汞弧灯。

氙弧灯光谱的可见光部分具有比较均匀的强度。然而，它在 0.83 微米和 0.88 微米处出现大的峰值，这将影响太阳

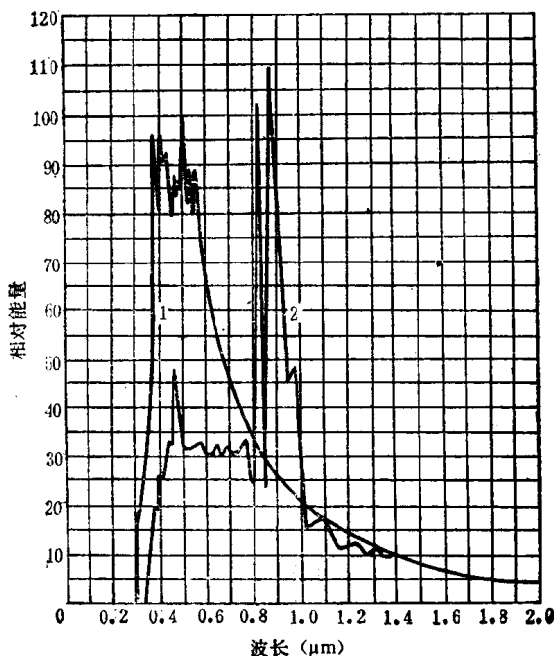


图 1-5 炭弧与氙弧灯的光谱分布

1—炭弧 2—氙弧灯

能电池的测量。炭弧和氙弧灯的光谱分布示于图 1-5。

为了模拟外层空间的太阳光谱,较准确地测定阳光电池,看来,必须用多个光源进行组合。用其中一个光源得到蓝色部分,而另一个光源用以保证光谱的红色部分。这种组合光源的蓝光部分通常由氙弧灯供给,它同时配有滤光器以减弱红光中二个峰值的影响。光谱的红色部分则取自 2800K 的钨丝灯,它同样配有适当的滤光器,与氙弧灯供给的蓝光部分相配合。如图 1-6 所示,这种组合光源与外层空间的太阳光谱极为接近。

组合光源比较复杂,给生产上带来一定的困难。一般太阳能电池的测试,不一定非用这种光源不可。如果直接利用

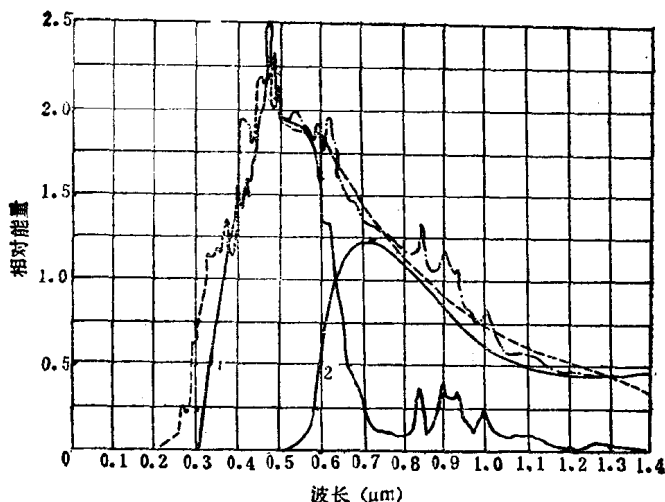


图 1-6 氙弧灯和钨丝灯模拟器的光谱分布与外层空间的太阳光谱分布的比较

— — 模拟器 (钨丝灯与氙弧灯之和)
 约翰逊 (Johnson) 的太阳光谱曲线 (空气质量 = 0)
 1—氙弧灯 = 55.8 mW/cm^2 2—钨丝灯 = 86.6 mW/cm^2