

序 言

电子产品的正式固体化从开始到现在已经有近20年的历史了。在此期间，大部分的电子管和放电管业已由二极管、晶体管 and 可控硅所替代，指示灯和显示管领域长期不能适应固体化的要求而今也已实现了。

到目前为止，固体发光管的材料——化合物半导体的精制技术的急剧发展使固体发光管的大量生产有可能实现。

再者，在固体发光管中占有特殊地位的半导体莱塞最近的发展是令人注目的。

具有快速响应速度和高增益的雪崩光电二极管与在常温下能连续发振的半导体莱塞相结合，可望光通信时代的到来不是遥远的事了。

在这种情形下，《固体发光管及其应用》一书的问世确实是有意义的事情。

可是，因为时间仓促，又由于学识浅显和工作繁忙，存在着说理不透彻，内容的水平高低不统一等很多缺点。

今后，承蒙读者批评，使以完善。

这本小著的第1章由内丸承担；第2章和第3章、第6章的第2节由中村承担；第4章和第6章第1节由元治承担；第5章第一节由依田承担；第5章第2节由前原承担。全书完成后由内丸、中村作调整。

株式会社产报诸位对于我们的鼓励在此深表感谢。

著 者

1971年12月

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

洋为中用，古为今用。

前 言

自第一只可供实用的半导体发光器件问世以来，虽然只经过了短短几年的时间。但是，正是由于它本身具备有种种优点，故赢得了人们广泛的兴趣。世界各国竞相发展，以至到今天，半导体发光器件已成为一个数量可观、品种繁杂的固体器件的分支。

在毛主席无产阶级革命路线的光辉照耀下，随着我国电子工业的蓬勃发展，要求迅速发展固体发光器件已成了当务之急。为了适应这一发展的需要，同时作为向四机部于今年在南昌召开的发光器件攻关会议的一份献礼，我们特汇集和翻译了部分有关资料，出此资料汇编，以便给我们的生产、试制工作带来一点帮助。

这次出刊的资料汇编共分二册。汇编之一主要是汇集了国内有关杂志、刊物以及我厂自己编写的关于固体发光器件的文章。以发光二极管为重点，分列为材料工艺、器件与应用、附录三个部分。此外，也收集了一些关于萤光体发光和液晶显示的有关文章。汇编之二是翻译的日本最近新书《固体发光管及其应用》一书的全文。

由于我们理论水平不高，实践经验不足，加之时间匆促，汇编中的缺点和错误在所难免，希望广大读者批评指正。

编 者

1974.1



目 录

第一章 总 论	(1)
1.1 光和人类历史	(1)
1.2 光的本质	(2)
1.3 光的产生	(5)
1.4 与光有关的术语和单位	(8)
1.4.1 辐射通量和光通量	(8)
1.4.2 发光强度、亮度	(10)
1.4.3 照 度	(11)
1.4.4 单 位	(11)
第二章 固体发光原理	(13)
2.1 半导体晶体和能带结构	(13)
2.1.1 半导体性质	(13)
2.1.2 半导体晶体和活性杂质	(14)
2.1.3 半导体的能带结构	(17)
2.1.4 看作为波动时固体中的电子	(20)
2.2 PN 结和载流子的复合	(26)
2.2.1 PN 结	(26)
2.2.2 注入载流子的复合	(42)
第三章 固体发光材料	(50)
3.1 一般性质和能带结构	(50)
3.1.1 砷化镓 (GaAs)	(53)
3.1.2 磷化镓 (GaP)	(56)

3.1.3	磷砷化镓 ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$)	(58)
3.1.4	砷铝化镓 ($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$)	(60)
第四章	固体发光管	(61)
4.1	构造	(61)
4.1.1	发光二极管	(61)
4.1.2	固体显示装置	(69)
4.2	制法	(71)
4.2.1	半导体片状器件	(71)
4.2.2	组合	(78)
4.3	特性	(86)
4.3.1	固体灯	(86)
4.3.2	固体显示装置	(99)
第五章	发光二极管的应用	(102)
5.1	单体灯的应用	(102)
5.1.1	看作灯时的发光二极管的特征	(102)
5.1.2	单体灯的应用	(104)
5.1.3	光耦合器的特性	(115)
5.1.4	光耦合器的应用	(116)
5.1.5	发光二极管和受光管组合的光耦合器	(119)
5.2	数字显示管的应用	(129)
5.2.1	数码管驱动用集成电路的特性和使用 方法	(129)
5.2.2	应用举例	(145)
5.3	文字显示管的应用	(151)
5.3.1	文字显示管的显示方法	(151)
5.3.2	字母发生器的种类和特性	(155)
5.3.3	文字显示管和字母发生器的使用方法	(164)

第六章 半导体激光器和光电变换管.....	(170)
6.1 激光二极管.....	(170)
6.1.1 发生原理.....	(170)
6.1.2 构造和制作.....	(175)
6.1.3 特 性.....	(182)
6.2 光电变换器.....	(188)
6.2.1 光传导管.....	(188)
6.2.2 结型光二极管(除APD)	(194)
6.2.3 雪崩二极管(APD)	(211)

第一章 总 论

1.1 光和人类历史

人类在地球上占有万物之灵的地位，其重要的原因之一是据说在公元前25万年就知道了起火技术。火一产生立刻就贡献于日常生活，因此，人类能活动的时间、范围从受自然阳光的限制下获得解放而大幅度地扩大。

作为照明用的人工光，人类还利用它来传达情报，烽火、篝火就是一种发光信号。据说在公元前283年随着水运的发展，就用灯塔作为航标。还有“影画”、“走马灯”及“花炮”等，用今日的话来说就是“指示”。

可是在赖以用松明、蜡、油等燃烧作为光源的时代，这样的技术也受到极大的限制，因此进步很缓慢。由于电能转变为光能技术的诞生，电弧灯和电灯的发明，利用光的近代史就开始了。从此以后，随着电气、电工学的发展，产生了效率高、色调丰富、能控制的多种多样的光源，照明技术取得了革命性的进步。

一方面阴极射线管作为电 \rightarrow 光信号的变换装置的代表，光电管的发明使光 \rightarrow 电信号变换装置得以发展。透镜和滤光等光学系统的技术和胶卷等光记录技术的发展，电影、传真、电视产生了。进而产生了利用光的计算机输入装置的程序控制装置，在情报社会中完成了很大一部分的工作。

更进一步，最近正在继续发展的莱塞在利用光的方面取得了革命性的进展。因此，超大容量的光通讯、超高速的光计算

机和全息照相等实际应用也不再是遥远将来的话题了。光学和电子学相结合的所谓光电子学领域正在开发。

晶体管和二极管不只是代替单个的真空管，由于它是固体管子，因此具有高可靠性、小型等许多优点，它大大地促使电子学的发展。与之相同，代替易坏品的白炽灯和放电管的固体发光管的出现正使光电子学加速前进。

1.2 光的本质

光的本质是一个很难回答的问题。光的传播、干涉、衍射和偏振现象可以用波动说很好地解释。在1864年麦克斯韦提出了光是一电磁波的理论。

可是，在考虑光和物质粒子相互作用的场合里，光就成为具有粒子性质的问题了。例如，作为光电管的机理：光撞击金属板时，基于外部电效应的研究，金属中的电子吸收光的能量而飞出金属板。十分清楚，一个电子从光吸收到的能量的值是一定的。

这个一定值为 $h\nu$ 尔格，而 h (波尔曼兹常数) $= 6.624 \times 10^{-27}$ (尔格/秒)。 ν = 光的振动数(频率) = 赫兹。电子从光吸收的能量 $h\nu$ 不是分多少次、每次为 $\frac{1}{2}h\nu$ 或 $0.01h\nu$ 地吸收。电子只是每一次吸收一个 $h\nu$ 能量。如果电子吸收的能量在飞出金属板所需的能量之上，则飞出金属；如果在其以下，则飞不出去。暂且考虑在极弱的光撞击金属板的情况。由于金属板中的电子长时间地一点一点地吸收能量，认为飞出金属板好象是很自然的。飞出不飞出呢？即 $h\nu$ 只和光的频率有关，而在能飞出的时候，不管怎样弱的光撞击，也会迅速地飞出。光的强弱与一秒钟内飞出电子数的多少有关。这样就和实验的事实有矛

盾。

为了解决这个矛盾，必须认为光波中的能量，即一份一份的 $h\nu$ 凝集成一个一个的粒子（所谓光子）中。光线就是流动的光子。强光在一秒钟内流动的光子多些，弱光流过的光子少些。

在上述的例子中，根据光的粒子性，认为每个电子从光那里得到的能量就是一个光子的能量。因为光子所带的能量 $h\nu$ 是能交付的最小单位，在这以下的能量就不能被吸收。

到目前为止在电子从光子那里吸收能量的情况已经作了陈述，反过来电子的能量从高值变到低值时，相应于这差的能量以光的形式放出。发光管发光、固体管子的发光机构也取这样的形式。在这样的情况下，电子和光的能量的遣取以光子放出。而且电子能量从 E_2 变到 E_1 情况时，取 $E_2 > E_1$ 这时放出光的频率由式

$$E_2 - E_1 = h\nu \dots\dots\dots (1)$$

决定。这样的光子的发现是赖于布朗格、爱因斯坦等人之处。从粒子性的光认为具有波动性，从而可以看出，它和以前被认为是粒子的电子这样的微粒，在运动时具有波动性。多普勒、薛定格等总合这些为量子力学或称波动力学，从而完善了这门新的力学。

通常在考虑照明等问题时，把光认为是电磁波是没有什么妨碍的。在考虑固体发光时，必须用将在第二章中叙述的量子力学的原理。

电磁波能量的传播称为辐射，辐射在通过物质时一般不改变频率，速度则随着物质而改变。

可是，在真空中，不管怎样的频率的辐射，其速度一定是 $C = 2.9976 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$ ，在真空中的速度和频率、波长之间

的关系为

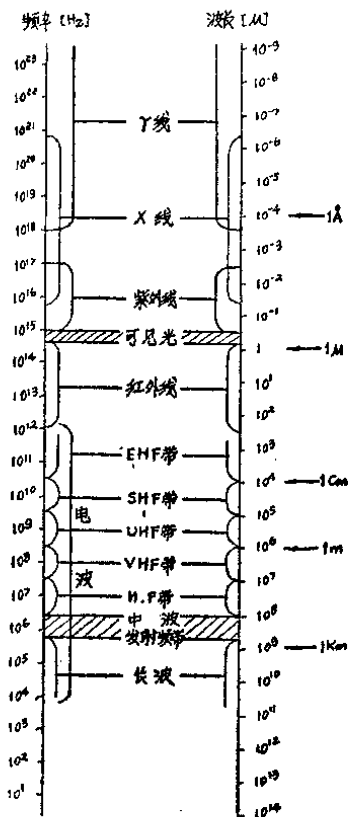


图1.1 辐射的分类

$$C = \lambda \nu \dots \dots \dots (2)$$

真空中的 C 、 λ 与空气中的 C 、 λ 差别极小，实用上认为两者相等。

辐射根据它的频率或波长划分为象图 1.1 那样的电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 线、宇宙线等。通常所谓的光就是指肉眼能感觉到的辐射。即对于波长为 $3800 \text{ \AA} \sim 7600 \text{ \AA}$ 的可见光范围。眼睛能感到的各种颜色的光，根据它们的波长范围，大致地列于表 1.1 中。

表 1.1 光的波长与颜色

波 长(\AA)	颜色
3,800~4,300	紫
4,300~4,600	蓝
4,600~4,900	青
4,900~5,700	绿
5,700~5,900	黄
5,900~6,500	橙
6,500~7,600	红

光的波长的单位有 \AA ； $\text{m}\mu$ ； μ 等。它们的关系为：

$$1 \text{ \AA} = 10^{-1} \text{ m}\mu = 10^{-4} \mu = 10^{-8} \text{ cm}.$$

1.3 光的产生

通常光伴随着两种东西产生，即温度辐射和发光。温度辐射就是物质在高温下辐射出热能。蜡、白炽灯就是人们所熟知的现象。温度辐射象图 1.2 一样在有关的波长范围内具有连续强度分布。随着温度上升，辐射强度最大处的波长向短波方向

移动，也就是颜色从红经过黄到近白色方面变化。对某一温度上，在所有波长上作为最大的温度辐射，是所谓黑体。这种辐射即是黑体辐射，黑色的物体对光和热即辐射有良好的吸收作用。众所周知，辐射是吸收的反过程，因此吸收好的黑体其辐射也最大。

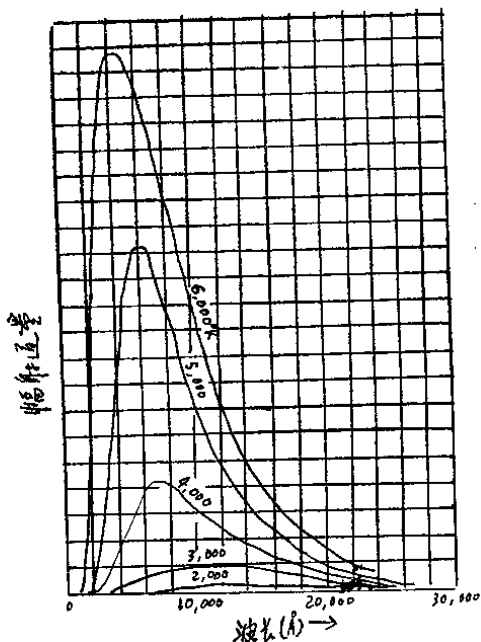


图1.2 黑体温度辐射

发光是除温度以外的原因产生可见光的现象的总称。发光就是其它任意的能量转换成光能的过程。由于激励的种类和物质的种类不同，它发出的光的波长范围也不同。种类非常之多。因此，根据通常激励的名称给以如下分类：

1、生物发光

萤火虫、发光细菌等的生物发光。

2、化学发光

由化学反应直接引起的发光，物的燃烧属于化学反应，由于这种反应引起的发光是热辐射。黄磷的氧化而自然发光就是这种例子。总之，它是由比这种物质所能适应的温度的热辐射显著地大而引起的发光。

3、辐射发光

由光、紫外线、X射线等激励引起的发光。X射线透过水银蒸气而发出的紫外线撞击萤光体，能高效率地变成可见光，色调得到改善。它已经用于萤光灯上。

4、阴极射线发光

由阴极射线（电子线）的撞击而发光的阴极射线管的萤光面就是应用的例子。

5、热发光

这是比与加热物同温度的热辐射还要强的发光。在氧化亚铝加热时，发出青色光线就是这种例子。

6、燃烧发光

碱金属和碱土金属，还有它的盐类，放在火焰中将发出金属特有的光。被用作焰色反应。

7、摩擦发光

摩擦晶体的一而使成碎片时而发出光。

8、电气发光

象白炽灯那样没有转换成热能这一过程而直接由电能变成光能。有：

(1) 气体或伴随气体放电而发光，如霓虹灯和各种放电灯。

(2) 加交流电场于掺入介质中的荧光体上而产生的发光。如电势发光板等。

(3) 在 GaP 和磷砷化镓这类半导体的 PN 结处流过电流时的发光。

等等的诸类发光。

以下各章叙述的是属于第(8)种的发光应用。

1.4 与光有关的术语和单位

1.4.1 辐射通量和光通量

因为光是辐射，所以这个量最好用一秒钟内通过某面积的能量来表示，就是所谓的辐射通量。单位是尔格/秒或瓦特。可是，对于这种通量能量的绝对值，在实际上不能表示眼睛所感觉到的光的强度。其原因是，眼睛对于光的灵敏度根据波长的不同而不同。因此，用象图1.3这样的相对可视度曲线来表示。在5550Å（黄绿色）感到最明亮。波长与灵敏度的关系表示为1，那末在4000Å（黄色）以下7000Å（红色）以上的波长几乎不能感觉了。

正因为有这样的灵敏度，故根据眼睛的视感来表示辐射通量，这就是所谓的光通量。它的单位是“流明”。1流明是一个怎样的量我们在以后再讲。波长 λ 的辐射通量为 $\phi_{\lambda}(w)$ ，则光通量 $F_{\lambda}(lm)$ 为

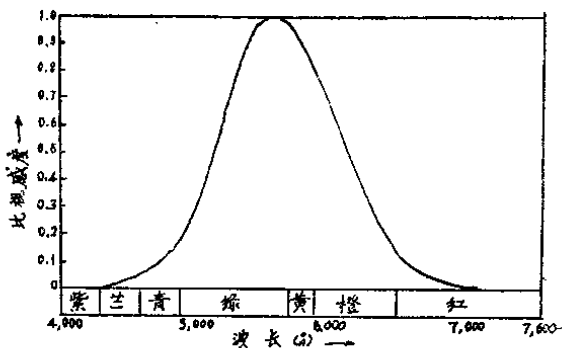


图1.3 相对可见度曲线

$$F_A = K_A \phi_A \dots \dots \dots (3)$$

K_A 就是所谓在辐射通量是1(w)、光通量(lm)时的辐射光通量。从相对可见度曲线上很清楚地知道 K_A 在5550 Å波长时得到最大值680(lm/w)。其它的值可相对于相对可见度曲线的纵轴上的值而求得。通常 K_A 的最大值680(lm/w)由 K_A 对于相对可见度曲线上任意一波长的纵轴上的值 $V(\lambda)$ 代表,则把(3)式写成:

$$F_A = K_m V(\lambda) \phi(\lambda) \dots \dots \dots (4)$$

因为这是对一种单色光波长而言的,对于波长范围分布很宽的热辐射来说,波长 λ 和 $\lambda + d\lambda$ 之间的辐射通量记作为 $\phi(\lambda)$ 。这个范围内的辐射通量,用眼睛能感觉到的全部光通量为

$$F = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda \dots \dots \dots (5)$$

1.4.2 发光强度、亮度

发光强度是表示光源的强度的量。对于眼睛的感觉来说某个光源可以看作为一个点，从这点光源向四周空间发散的光是均等的，那末用它来表示光源强度是很合适的。但是要用它来表示各方向上发出的光不相等的点光源来说就困难了。从光源向与中心成小立体角 $d\omega$ 中发射光通量为 dF 的光，那末光源在这一方向上的发光强度为

$$I = dF/d\omega \dots\dots\dots (6)$$

因为 $dF/d\omega$ 是每个单位立体角的发光通量密度，因此，所谓发光强度就是从光源发出的光通量在单位立体角内的密度。对于不均等点光源来说，这个值随着方向而变化，对均等点光源来说这个值是一定的。一点周围的全立体角是 4π 单位立体角，因此设发光强度为 I ，全通量为 F ，则

$$F = 4\pi I \dots\dots\dots (7)$$

发光强度单位是烛光。

在实际当中，光源并非点光源，而是有一定的大小，假如从距离光源十分远的地方看起来，可认为是点光源。

在这里，对同样发光强度的光源，从小面积上发出来，则眼睛看起来就感到光亮眩目。假如用透明玻璃做的电灯和用磨砂玻璃做的电灯比较起来就十分明显。这种亮的程度用亮度来表示。

从光源的某方向看，此方向上的发光强度与所看到的光源面积之比就是亮度。象图 1.4 那样，光源的面积为 S ，从与通过中心的法线倾角 α 的方向看时，其亮度为 B 。设 α 方向的光强度为 I ，从 α 方向看过去时它的截面积就是在 α 方向上的正投影，等于 $S\cos\alpha$ 。所以



图1.4

$$B = I/S \cos \alpha = (I/S) \sec \alpha \dots\dots\dots (8)$$

$\alpha = 0$ 即在法线方向上时 $B = I/S$ 。

亮度单位是烛光/厘米² (cd/cm²) 也就是熙提(sb)。

1.4.3 照 度

单位面积上承受的光通量就是光照面上的照度。被照面方面由于场所的不同而产生明暗的不同。为此以某点为中心取一个小面积 ds ，设照到 ds 面上的光通量为 dF ，则

$$E = dF/dS \dots\dots\dots (9)$$

单位是lm/cm²，即为勒克司。

1.4.4 单 位

在术语方面按光通量→发光强度→亮度的顺序下定义。单位由测定方法和标准之间的关系以及发光强度决定。

(1) 1 烛光 (cd)

在白金熔点2,402°K时，黑体辐射的亮度60sb = 60cd/cm²