



上海出版资金项目
Shanghai Publishing House

点亮21世纪

天野浩的蓝光LED世界

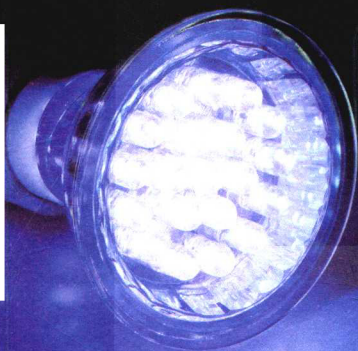
天野浩 福田大展 著
方祖鸿 方明生 译

天野浩 福田大展
天野先生的
「青色LEDの世界」

Philosopher's Stone Series



当代科普名著系列



“21世纪”已经成为人
时代的标语。不过,蓝
光LED中的氮化镓晶体的巨大潜能还
远未被开发出来。

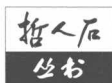
——天野浩



上海科技教育出版社



上海出版基金项目
Shanghai Publishing Funds



Philosopher's Stone Series

当代科普名著系列

点亮21世纪

天野浩的蓝光LED世界

天野浩 福田大展 著
方祖鸿 方明生 译



上海科技教育出版社

《AMANO SENSEI NO 「AOIRO LED NO SEKAI」 HIKARU GENRI
KARA SAISENTAN OUYOU GIJYUTSU MADE》

© HIROSHI AMANO · HIRONOBU FUKUDA 2015

All rights reserved.

Original Japanese edition published by KODANSHA LTD.

Publication rights for Simplified Chinese character edition arranged
with KODANSHA LTD. through KODANSHA BEIJING CULTURE LTD.
Beijing, China.

本书由日本讲谈社正式授权,版权所有,未经书面同意,不得以任何方式作
全面或局部翻印、仿制或转载。

图版/さくら工芸社

责任编辑 王乔琦 匡志强
装帧设计 汤世梁

哲人石丛书

点亮 21 世纪

——天野浩的蓝光 LED 世界

天野浩 福田大展 著
方祖鸿 方明生 译

上海科技教育出版社有限公司出版发行
(上海市柳州路 218 号 邮政编码 200235)

网址: www.ewen.co www.sste.com

各地新华书店经销 上海商务联西印刷有限公司印刷

ISBN 978-7-5428-6879-4/N · 1044

图字 09-2018-139 号

开本 635×965 1/16 印张 9.25 插页 4 字数 120 000

2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

定价:30.00 元

图书在版编目(CIP)数据

点亮21世纪:天野浩的蓝光LED世界/(日)天野浩,(日)福田大展
著;方祖鸿,方明生译. —上海:上海科技教育出版社,2018.11

(哲人石丛书.当代科普名著系列)

ISBN 978-7-5428-6879-4

I. ①点… II. ①天… ②福… ③方… ④方… III. ①发光二
极管—照明—普及读物 IV. ①TN383-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第258231号

蓝光LED被誉为“爱迪生之后的第二次照明革命”，但要想制作这种新型照明工具，就要用到半导体氮化镓。这种大功率半导体材料能够显著降低能源消耗，它的出现使得全色照明成为可能，全世界都关注着这种材料在其他各个领域的应用前景。蓝光LED、氮化镓材料中蕴含着无与伦比的应用潜力。可以说，氮化镓在21世纪的广泛应用才刚刚拉开序幕。本书是2014年诺贝尔物理学奖得主天野浩的力作，深入浅出地向各界读者介绍了蓝光LED技术的基本原理以及这一研究的前沿领域。

天野浩,1960年生于日本静冈县。名古屋大学教授、工学博士。1983年毕业于名古屋大学工学部,1988年完成名古屋大学工学部博士课程,留校任教。后任名城大学理工学部教授、名古屋大学教授。从本科毕业研究起,进入赤崎研究室,长期执着地投入蓝光LED的半导体材料的研究。因成功研发了蓝光LED,与赤崎勇、中村修二同获2014年诺贝尔物理学奖。

福田大展,1983年生于日本福井县,科学读物撰稿人、日本科学未来馆科学交流员。曾在日本东北大学金属材料研究所参与太阳能电池用优质硅晶体的研发。东北大学理学研究科研究生毕业,物理学硕士。后任中日新闻(东京新闻)记者,曾做过浜冈核电站及日本各地地震防灾问题的采访。

前言

LED 的核心是半导体晶体

“你们保护了我们蒙古的传统文化”——前些日子,蒙古的教育科学部部长访问我的研究室时说了这样的话。这是怎么回事?据说,蒙古现在仍有很多人过着游牧生活,他们说:“我们想保持这样的传统生活,但一到晚上没有电灯,孩子们就没法学习了”,蒙古的许多牧民对此颇为烦恼,但现在,蒙古包内可以使用 LED 与太阳能电池组合而成的灯笼,蒙古的教育科学部部长对此十分高兴。

在自己不知道的地方,LED 技术如此普及,令人十分高兴。同时也使我更感到,要让更多的人能够用上 LED,必须将它做得更加便宜。

大家找一下自己周围发光的物品,也许有很多 LED。现在,在我们的生活里有很多 LED,比如家里、工作场所的照明,街上看到的交通信号灯,车站的电子告示板都使用了 LED。使用了 LED,这些发光体都比以前更亮了。

在其他方面,如智能手机的液晶显示屏的背灯,能除臭的空气净化器中的光触媒技术等最新的电器产品中也使用了 LED。LED 不仅用于实用照明,圣诞节的彩灯、东京天空树的饰灯等慰藉人们心灵的装饰照明也用到了这项技术。LED 能以较少的能量获得较亮的光,为节省

能源作出了贡献,所以在各个领域迅速得到广泛应用。

仔细观察一下 LED 内部,发光的中心部分安装着“晶体”。晶体是原子或分子按一定规则整齐排列而成的物质。

下雪的冬日,观察空中飘下、落在毛衣上的雪花,也许会看到这雪花是呈六角形的。水分子按自然规则整齐地排列,呈现出几何学形式上的美丽结构。雪的晶体就是物质世界种种晶体中的一种。

蓝光 LED 中有氮(N)与镓(Ga)的原子按规则整齐地排列成的“氮化镓(GaN)”晶体。但在 20 世纪 80 年代以前,很难稳定地获得能控制 LED 的电气性能的高纯度晶体,很多研究者都放弃了研究。而现在,我们已经能够稳定地制备出高纯度的氮化镓结晶,这一突破是制造出蓝光 LED 的关键。

氮化镓除了做成 LED,还有其他的用处

2014 年诺贝尔物理学奖颁给了发明蓝光 LED 的三位研究者。“LED 照亮 21 世纪”成为了人类照明史上划时代的标语。不过,技术本身并没有到达顶点,内置于蓝光 LED 中的氮化镓晶体所蕴含的巨大潜能还远未开发出来。

LED 中的晶体用的是半导体,这种半导体材料的机理是发光的关键所在。在此,简单地回顾一下半导体的历史。最早的半导体是锗(Ge),接着是硅(Si),此后,开发出了砷化镓(GaAs)、磷化镓(GaP)等材料。这四种半导体的出现顺序正好与后文要详细阐述的“能带隙”由小到大的顺序相同。能带隙大的晶体,原子间的结合力强,只有在高温下才能制成。过去这样的晶体是无法制成的,随着晶体成长技术的进步,我们也渐渐能制成能带隙大、高纯度的晶体了。

从本科毕业论文开始,我就一直在研究氮化镓,这种材料最大的特点就是能带隙很宽。能带隙越宽,越能耐高电压,越能生成波长短的光。利用这样的特性,氮化镓不仅可用于 LED,还可用于各种电器,如冰箱、空调压缩机中使用的大功率半导体,能发出波长很短的深紫外线

的发光二极管、激光器,可利用太阳光中迄今为止未被利用的波长光的氮化镓太阳能电池等。

氮化镓能在解决能源、水源等问题上发挥作用

我现在正在考虑将氮化镓应用于以下几个领域。

一个是“水源问题”。根据联合国儿童基金会的调查,地球上喝不到洁净水的人口有 6.6 亿。另外,不能得到厕所、洗澡用水的人口竟有 24 亿。我希望为这些人提供用深紫外线 LED 杀灭细菌和病毒的水净化装置。现在,使用干电池、太阳能电池就能启动的水净化装置马上就要进入应用阶段了。下一步要解决的是如何降低成本及量化生产的技术问题。

另一个是“能源问题”。日本现在的 GDP 已经不太增长了,电力消费最多是持平,也可能会下降,但世界范围里,中国、印度等 GDP 迅速增长的国家需要更多电力。

根据国际能源机构的调查,到 2020 年左右,世界上的电力供应将赶不上 GDP 的增长。也就是说,世界上的电力会不够用。在这种情况下能发挥作用的是用氮化镓制造的大功率半导体。

氮化镓半导体与现在广泛使用的硅半导体相比,电流通过时的损耗可降低到原来的 1/10。名古屋大学做过这样的统计计算:LED 照明带来的节能效果加上大功率半导体带来的电力损耗的降低,可节省日本总电力消费的 16%。福岛第一核电站事故之前,核电提供的电力占日本电力供应的 30%。这就是说,LED 技术可以节省核电发电量的一半多。

出现电力供应不足的 2020 年,正好是要开东京奥运会的那一年。我们想在那时拿出一套十分高效的运用“LED 照明+大功率半导体”的综合系统。这套高效节能的系统将对世界产生一种示范作用。氮化镓晶体开拓的未来究竟如何?我想通过这本书与读者们一起作一番想象、思索。

前言 / 1

第1章 从原子层面分析LED发光原理 / 1

第2章 挑战蓝光LED的关键:制作高品质晶体 / 27

第3章 世界最初的蓝光LED:迎来固体照明的新时代 / 59

第4章 氮化镓开拓的21世纪 / 93

后 记 / 121

参考文献 / 125

第 1 章

从原子层面分析 LED 发光原理

在谈论蓝光 LED 之前,我想先讨论三个基本问题:一、LED 是用什么材料做成的?二、LED 为什么会发光?三、蓝光 LED 的制作为何很困难?

LED 是用什么材料做成的?

什么是半导体?

先让我们来考察一下 LED 是用什么材料做成的。

世界上的物质,按导电能力可大致分为三种:容易导电的“导体”、不能导电的“绝缘体”、导电能力介于导体与绝缘体之间的“半导体”。导体是金、银、铜、铝等金属,绝缘体是玻璃、橡胶、塑料等物质,而 LED 中的晶体是半导体。

图 1.1 所示为各种材料的对电流流动的阻碍程度——电阻率的大小。电阻率的值越小,电流越容易通过;电阻率的值越大,电流越难以通过。虽没有一个明确的界限,但一般来说,导体是电阻率小的物质,绝缘体是电阻率大的物质,半导体则是电阻率处于两者之间的物质。

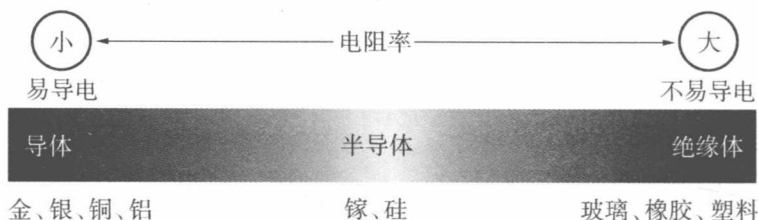


图 1.1 导体、半导体、绝缘体的电阻率

当温度变化时,半导体会显示出很有趣的性质。如果是导体的话,随着温度的升高,电阻相应地增大,电流流动受阻。电流其实是“自由运动的电子”。在按规则原子整齐排列的晶体中,电子可以像障碍跑时穿越网状障碍物一样向前运动。导体材料温度升高后,由于晶体的原子激烈振动,使得电子难以穿越障碍前行,电阻率就增大了。半导体却与之相反,随着温度升高,电阻率反而降低,电子流动会一下子变得非常通畅。(图 1.2)

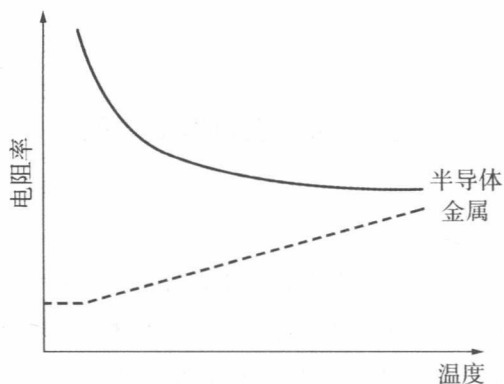


图 1.2 半导体电阻率—温度特性

电子只进入“预先确定的房间”

为什么半导体温度上升后会让电的流动更容易呢?我们要了解 LED 的性质,就需要考察一下这个问题。电流本质上是“自由电子的运动”,那么我们先来考察一下电子的性质。我们都知道,原子是由质子与中子构成的原子核及其周围的电子构成的。

说到这里,冒昧问一下各位:生活得自由自在吗?还是生活在各种制约之中,勉强行事呢?你如果是上班族,每天都会受到公司里的各种规定限制,做事碍手碍脚的,但基本的行动自由还是有的吧?而原子核周围的电子,在能量上只能各自进入“预先确定的房间”。

这个“预先确定的房间”称为“轨道”,是“电子能够存在的空间”,更准确地说是“电子存在的概率较高的空间”。

轨道有几种类型,“s 轨道”呈球形,“p 轨道”呈 8 字形,“d 轨道”呈四叶红花草形。几种轨道的结集称为“电子层”。图 1.3 表示能量高低与轨道之间的关系。电子从能量低的轨道开始按顺序填充,一根轨道中可有两个电子。例如,K 层有 1 根 s 轨道,L 层有 1 根 s 轨道和 3

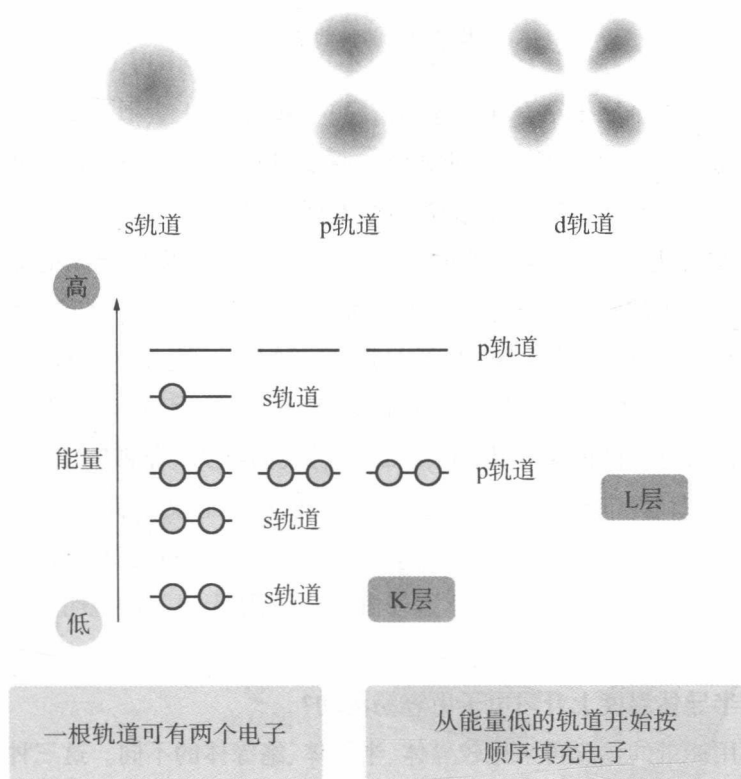


图 1.3 能量的高低与轨道的关系

根 p 轨道, M 层有 1 根 s 轨道、3 根 p 轨道、5 根 d 轨道。

先来看填满电子且能量最高的轨道(图 1.4)。如果只有 1 个原子, 一根轨道上是有电子的, 而上面的轨道则没有。

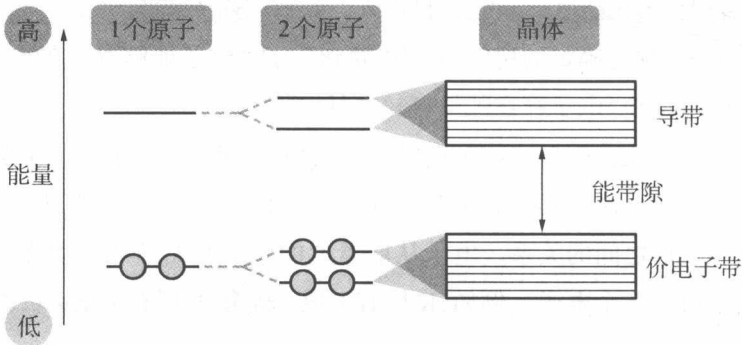


图 1.4 晶体的能带

再看 2 个原子结合在一起的情况。各轨道看上去似乎是以相同的能量重叠在一起, 但实际并非如此。原子与原子靠得很近, 能量相同的轨道会互相影响, 各轨道的能量就会有所不同。

那么, 原子 3 个、4 个地增加上去, 有很多原子集聚起来的晶体是什么样子的呢? 会有充满电子的轨道和未充满电子的轨道。大量的轨道集聚, 会产生能量上的高低差异, 形成“带”。这种“带”称为“能量带”(后文简称为“能带”)。而充满电子的能带称为“价电子带”, 在它上面没有电子的能带称为“传导带”(后文简称为“导带”)。另外, 在价电子带和导带之间的能量差叫作“能带隙”(后文简称为“带隙”)。抱歉, 这一段文章里出现的概念太多了。这些概念对理解 LED 的机制很重要, 请各位读者尽量理解这些概念, 以便跟上以下的说明。

为何半导体温度上升后电子更容易流动?

用能带的概念再来比较导体、半导体、绝缘体的不同。这三种物质的区别与“电子充满的程度”及“带隙的大小”有关。

如图 1.5 所示的三种能带。电子从能量低的位置开始, 按顺序填

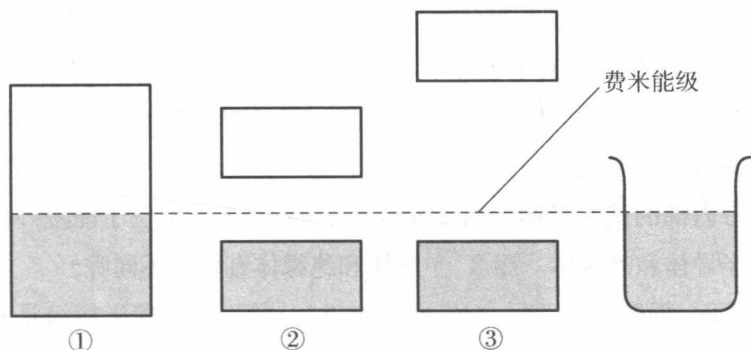


图 1.5 在三个能带中填充电子

充,没有能带的地方就没有电子。

电子的填充,就像往水槽里注水一样。按照图 1.5 所示,①电子填充到了能带的中间部分,而②和③则分别为充满电子的能带与没有电子的“空”的能带。

这里将能带看作水槽而将电子看作水,试着将图 1.5 倾斜过来看。大家也可想象着将水槽倾斜过来时的情形。这样就产生了图 1.6 的状况。水槽①的上方有空隙,水可以移动。但水槽②和③中充满着水,没有空隙,水不能移动。“倾斜”在这里就比喻为连接电池,施加电压。

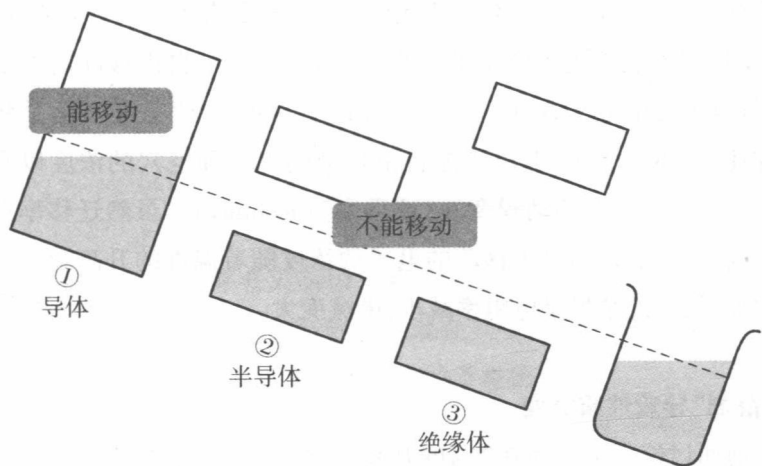


图 1.6 在三个能带中填充电子并倾斜

即,给①加了电压,电子能自由运动,就有了电流;而②和③中,电子无法自由运动,因此没有电流。

往水槽中注水后水面的高度,即显示电子可以填充到何种程度的能量,称为“费米能级”(Fermi level)。这种费米能级,如①显示的,位于能带内部的就是导体。而②和③显示的,费米能级位于能带外面的就是半导体和绝缘体。那么,半导体和绝缘体有什么不同呢?

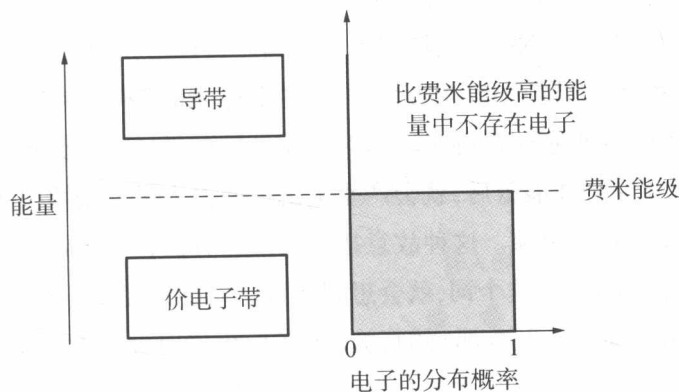
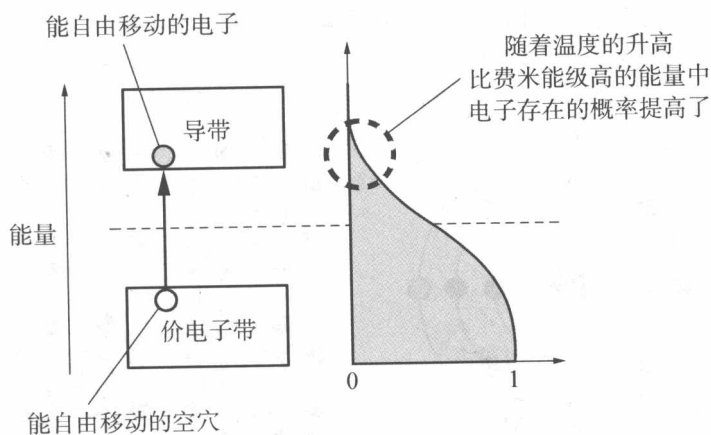
下面,再稍详细说明一下“费米能级”。前面说过费米能级是显示电子可以填充到何种程度的能量。即,在比费米能级低的能量中电子是能够存在的,而在比费米能级高的能量中电子是无法存在的。这种现象,在最冷的温度——“绝对零度(-273°C)”的状态下是存在的,但不是在这种温度下就不一定了。

电子的分布概率,就是在一定的能量中,电子能够存在的概率。“0”即电子无法存在,越接近“1”,电子存在的可能性就越高。在绝对零度的情况下,电子分布概率如图 1.7a 所示,以费米能级为界线,“0”和“1”就非常清晰地被区分开来。也就是说,比费米能级高的能量中,电子是无法存在的。

半导体的温度升高后,电子在比费米能级高的能量中可能存在的概率提高(图 1.7b)。价电子带中的电子接受热能后,可以移动(激励)至比费米能级更高能量的导带。于是,导带中自由移动的电子增加,价电子带中电子移动后产生了带正电的穴——“空穴”(后文将对此详述)。电流大小,取决于能自由移动的电子和空穴的浓度以及表示电子及空穴易于移动程度的“迁移率”(mobility)。虽然迁移率在温度升高后会减低,但自由移动的电子的浓度随着温度的升高会以指数式增加,最终的结果是电阻率减小,电流变大。

“兴奋剂”导致性质突变

前面讨论了半导体在“温度升高后会产生电流”的性质。下面我们讨论半导体非常“神经过敏”的另一个有趣性质。

(a) 绝对零度 (-273°C) 的情况

(b) 温度上升后的情况

图 1.7 半导体的电阻—温度特性

诸位读者中也许有人会因一堆衣架中混入了不同衣架而耿耿于怀。即便只有一个不同种类的衣架混在其中,也会变得心神不定。同样,半导体也有这种情况,“对不纯物非常敏感”。

要说敏感到什么程度,可以是一亿分之一的微量不纯物混入,半导