

第 1 章 光电器件概论

1.1 光电器件简介

随着光电子技术的快速发展,光电器件已经广泛应用于社会的各个领域。从大规模通信系统到 AI 计算,从先进制造到智能家居及自动驾驶,先进光电器件的大规模使用不仅提升了各类产品性能,还促进了各类产业的高速发展。新一代光电器件技术的加速创新,为未来世界经济的发展提供了强劲的动力。

光电器件是结合光子技术和电子技术而制造的有特定功能的设备。与电信号比较,作为玻色子的光信号,其传输速度为光速,更易实现低损耗、高并行的信息承载传输功能。光电器件利用光与物质的相互作用原理,在实现光电协同控制的条件下,完成信息的产生、控制和检测任务。光电器件种类繁多,按照功能可以划分为光发射器件、光探测器件、光传输器件、光控制器件及光显示器件。

光发射器件能够为光电协同应用提供光源。根据不同的使用目的,光发射器件可以选用发光二极管(light emitting diode,LED)或者激光二极管(laser diode,LD),其中 LD 能够产生单一波长、同相位高指向性光源;光电二极管(photodiode)是常见的光探测器件,其主体为施加了偏压的双元件 PN 结或者 PIN 结,能够把入射的光信号转换为电信号;传统的光传输器件为波导和光纤,波导和光纤能够按照特定通道高效传输光信号;光控制器包括连接器、隔离器、分路器、调制器及光开关等。图 1.1.1 为一个由典型的光电器件组成的简易光通信系统示意图。

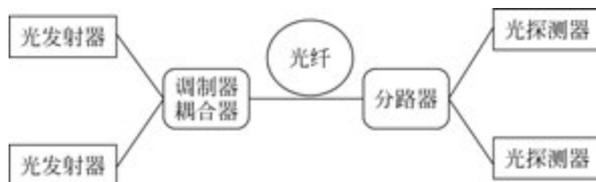


图 1.1.1 简易光通信系统示意图

在光通信领域中,按照是否使用外部电源标准,光电器件又分为有源器件和无源器件,其中有源器件主要用来实现光电信号转换,而无源器件则用以实现光信号传输。将特性光电器件封装组合以完成某一类特定功能的一体化模块被称为光模块。

设计合理、性能优异的光电器件是光电系统可以正常工作的保证。下一代光电器件在朝着低功耗、低损耗、低时延、高带宽、高灵敏度、可集成的方向发展。光电器件的构成原理包含光学以及半导体中光子与电子相互作用的相关知识。本章第2节将对相关物理基础知识进行具体介绍。

1.2 光电器件的物理基础

1.2.1 光谱与光子能量

在科学发展的早期阶段,电磁学和光学是两门研究对象和研究方法大相径庭的学问。其中,电磁学注重于研究带电物质之间或磁体之间的相互作用理论。1831年,法拉第意识到电磁相互作用中“场”的存在,并引入“场线”来描述不可见的电磁场。这一个突破性的发现将电磁学带入全新的发展阶段。从此,关于电磁场的规律相继被发现,而且这些规律被归纳为电磁场理论。

著名的高斯定理可以表述为,电场线会起源或终止于电荷,而磁场线为闭合曲线。安培环路定理则表述为,磁场线会环绕在电流的周围。法拉第电磁感应定律和麦克斯韦的位移电流方程揭示了变化的电场和磁场的场线会相互环绕的规律。图1.2.1为相互环绕的电磁场示意图。

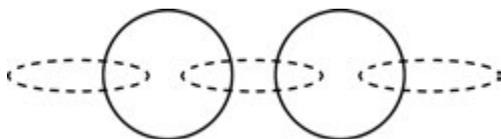


图 1.2.1 相互环绕的电磁场示意图

电磁学的研究对象是看不到、摸不着的电磁场,使用场线作为辅助工具可以使得电磁场可视化是极为有效的研究方法。然而,进一步掌握描述电磁场规律的数学表达形式是一件具有挑战的事情。物理学家和数学家共同发明了一套“向量场微分”语言符号,用于建立电磁场规律的方程。使用向量场的微分运算符号、散度和旋度以及电荷密度 ρ 和电流密度 \mathbf{j} 等概念,电磁场的理论被总结为著名的麦克斯韦方程组,微分形式如下。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (1.2.1)$$

其中, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, ϵ 为物质的介电常数; $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, μ 为物质的磁导率。介电常数和磁导率反映了物质对电磁场的作用。

1801 年,托马斯·杨通过在挡板上挖细缝,然后让通过细缝的光线继而通过挡板的双缝到达挡板后面的屏幕进行了著名的杨氏双缝实验。如果光是一种粒子,那么屏幕上应该出现两条光条纹。然而,实验结果是在屏幕上看到了明暗相间的干涉条纹,从而证明了光是以波动的形式传播的。图 1.2.2 所示为杨氏双缝实验示意图。

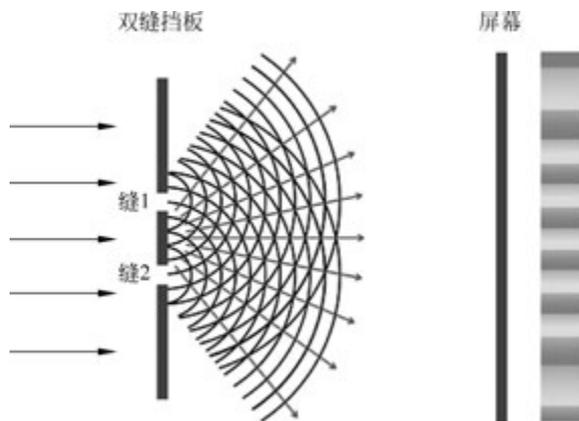


图 1.2.2 杨氏双缝实验示意图

自杨氏双缝实验证明了光的波动性后,关于光的波动方程一直缺失。麦克斯韦方程组, [式(1.2.1)] 不仅为光的波动理论提供了缺失已久的波动方程,而且揭示了光的本质为电磁波。电磁学和光学得到了统一。在为真空中的电磁场建立方程时,设电荷密度 $\rho=0$, 电流密度 $\mathbf{J}=\mathbf{0}$, 方程组中的两个旋度方程显示电场的旋度和磁场的旋度相互耦合。真空中的麦克斯韦方程组为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (1.2.2)$$

将微分方程组(1.2.2)进行升阶,进一步将电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{B} 解耦合,得到电磁场的波动方程。电磁场的波动方程为

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

方程组(1.2.3)表示电磁场的每一个分量都是以波的形式存在于空间中的。其中,波速 $c = \epsilon_0 \mu_0^{-\frac{1}{2}}$, 数值上与真空中的光速是相等的。真空电容率和磁导率不仅表征了电磁相互作用的强度,也决定了光的传播速度,这是物理学发展史上的重大发现。图 1.2.3 为沿 z 轴正方向传播的平面电磁波场分量示意图。其中,电磁波为横波,在传播过程中电场和磁场相互垂直并同相振动。

自电磁场的波动方程建立以来,人们开始求解各种条件下不同频率电磁波的解。电磁波按照波长或频率顺序排列构成电磁波谱,已知的电磁波谱涵盖了从低频的长无线电波到高频的 γ 射线。其中,可见光所对应的电磁波谱区间被称为光谱。图 1.2.4 为目前在经济

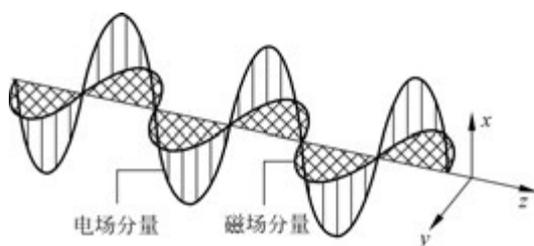


图 1.2.3 平面电磁波场分量示意图

生活中已经得到广泛认知和应用的电磁波波谱图。

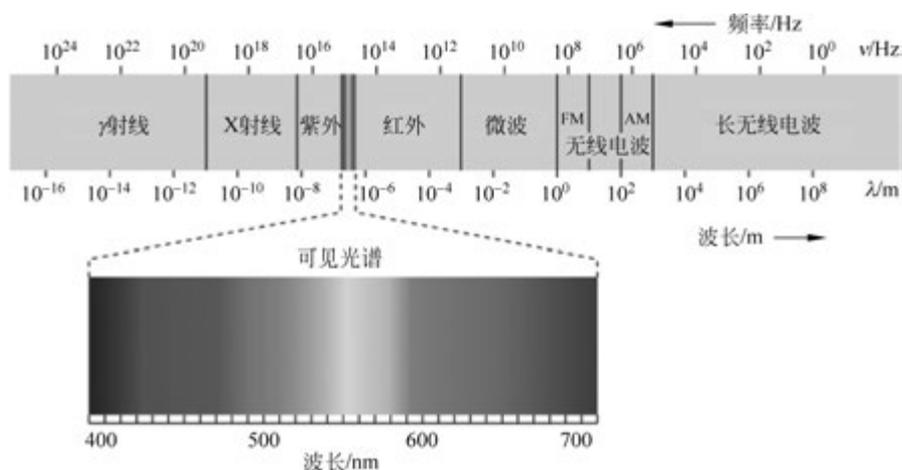


图 1.2.4 电磁波波谱图

图 1.2.4 展示了频率范围由 $1 \sim 10^{24}$ Hz, 对应波长由 $10^8 \sim 10^{-16}$ m 的电磁波谱。根据频率和波长不同, 不同区间内的电磁波展示出不同的物理特性和用途。其中, 波长在 $400 \sim 700$ nm 范围内的电磁波为可见光。人眼根据不同的波长将这些电磁波识别为不同颜色的光。波长接近 400 nm 显示为紫色, 波长接近 700 nm 显示为红色。在光谱上, 可见光区域外附近的电磁波又被命名为紫外线和红外线。比紫外光波长更短、频率更高的电磁波还可以分为 X 射线和 γ 射线。而比红外线波长更长、频率更低的电磁波则被划分为微波、无线电波以及长无线电波。

在经济生活中, 不同频率和波长范围的电磁波都有各自不同的用途。其中, 光通信系统的建立展示了光谱应用的一个典型案例。20 世纪 70 年代以来, 光纤通信技术的发展为现代高密度、大容量通信系统的建立提供了坚实的基础。在电磁波谱中, 波长为 $1\,260 \sim 1\,675$ nm 的电磁波被用来作为光纤通信系统中的信号载体。这段波谱被划分为 6 个波段, 按照波长由小至大分别为 O 波段、E 波段、S 波段、C 波段、L 波段和 U 波段。

O 波段代表原始波段(original band), 其意义为早期的光通信波段。O 波段光波长范围为 $1\,260 \sim 1\,360$ nm, 其主要应用于无源光网络(passive optical network, PON)和高速以太网传输。由于 O 波段在光纤中传播色散低, 使用该波段可以实现高速光通信。E 波段表示拓展波段(extended band)。E 波段光波长范围为 $1\,360 \sim 1\,460$ nm。早期光纤中的氢氧根离子对 E 波段具有强吸收效应, 所以 E 波段在光纤通信中的应用一直受到限制。S 波段

表示短波段(short band)。S 波段光波长范围为 1 460~1 530 nm。大量的 PON 系统使用 S 波段作为其下行波长。航天、航空和海事行业常将其用于卫星通信和雷达测距。C 波段为常规波段(conventional band)。C 波段光波长范围为 1 530~1 565 nm,是波分复用(wavelength division multiplexing,WDM)应用中最常用的光波长传输波段。由于其色散较低,可以在更远的距离上实现更高的数据速率。L 波段为长波波段(long band)。U 波段为超长波波段(ultralong band)。L 波段适用于长途和海底光缆系统,而 U 波段则主要用于网络监控。图 1.2.5 为光通信波段的光谱图。除上述标准波段外,还存在一个 850 nm 波段,用于与垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser,VCSEL)相结合的多模光纤通信系统。

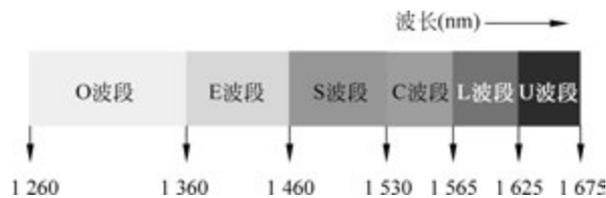


图 1.2.5 光通信波段光谱图

光谱应用技术的进步离不开高效率光源的开发。人类在对物体发光规律的探索过程中,逐渐建立了光与物质相互作用理论。1900 年,普朗克在研究黑体辐射现象时,提出了光量子概念。他认为,在物体对外电磁辐射(发光)过程中,所释放的电磁能量不是连续的,而只能是某一个量子化能量数值的整数倍。携带单位量子化能量的粒子被称为光子。光子的能量与频率成正比,表达式为

$$E = h\nu \quad (1.2.4)$$

其中, h 为普朗克常量, ν 为光子的频率。而频率为 ν 的电磁波则是由大量的这类光子构成的。普朗克常量为 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 或者表达为 $h = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ 。如果采用波长来计算光子能量,式(1.2.5)表达为

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2.5)$$

其中, c 为真空中的光速; λ 为真空中对应电磁波的波长。为换算方便,计算出普朗克常数与光速的乘积为 $hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$ 。这个数值表示波长为 1 nm 的电磁波所对应的光子能量为 1240 eV。由电磁波谱图 1.2.4 可知,如此高能量的光子构成的电磁波属于 X 射线。

光子的能量与其频率成正比,而光子的频率则由发光物体的内部结构所决定。根据麦克斯韦方程组可知,电磁波与带电物体存在强烈的作用。事实上,电磁波为物质电磁相互作用的传播媒介。带电物体的内部结构决定了其所辐射的电磁波,即光子的能量。

在原子的内部,电子不能与原子核保持任意距离,它们只能以特定的空间分布存在于原子核周围,这个特定的空间分布对应于能级。不同的能级具有不同的能量。在原子核周围的电子则按照能量由小到大排布在不同的能级上。量子力学能够描述电子从一个能级移动到另一个能级的过程。一个电子从它所在的能级分布上消失,然后在它新分布的能级上出现。该过程被称为量子能级跃迁,这在宏观世界中没有类似的现象。

在分子、原子的内部,电子在不同能级之间发生跃迁时,其变化的能量被转换为光子。

当电子由高能级跃迁至低能级时,会减少自身能量而发射光子。与此对应,当电子由低能级跃迁至高能级时,则吸收光子以获得能量。图 1.2.6 为电子跃迁吸收和发射光子示意图。

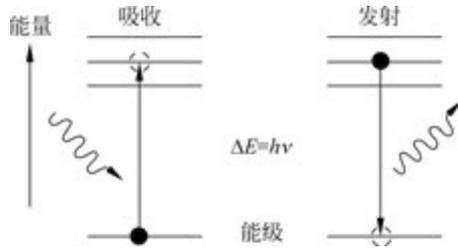


图 1.2.6 电子跃迁吸收和发射光子示意图

在电子跃迁发射光子和吸收光子的过程中,都需要遵守能量守恒定律 $\Delta E = h\nu$ 。光子的能量等于电子在两个能级之间的能量差。每一种元素都有一套独特的能级,因此,它吸收和发射光的频率就像一种指纹,可以通过该频率识别出特定的元素。原子和分子的这种特性产生了光谱学,光谱学是一门致力于通过原子和分子发射或吸收的辐射来研究和识别它们的科学。表 1.2.1 为典型的跃迁类型与辐射电磁波波长对应表。

表 1.2.1 典型的跃迁类型与辐射电磁波波长对应表

跃迁类型	辐射电磁波波长	跃迁类型	辐射电磁波波长
原子核能级	60 cm~300 m(无线电波)	外层价电子能级	200~760 nm(紫外、可见光)
分子转动能级	3 mm~30 cm(微波)	内层电子	0.01~10 nm(X 射线)
分子振动能级	2.5~50 μm (中红外光)		

原子、分子内部的价电子能级跃迁所释放的光子频率对应于可见光;而 X 射线则由原子内部壳层电子跃迁产生; γ 射线的辐射来自原子核内部的过程;红外光由分子振动的能级变化产生,而分子转动能级以及电子自旋能级的改变则产生微波。

电磁波的频率与物质的内部能带结构紧密相关。光源技术的进步得益于人类对物质内部能带结构和能带调控方法的认知。其中,半导体材料本身具有的窄带隙特性以及后续发展起来的掺杂手段,为光与电子相互作用提供了新的平台,进而促进了更丰富的光吸收和发射现象的产生。

1.2.2 半导体物理基础

在单一原子中,受限的电子在原子核周围形成分立的量子能级。当大量的原子排列形成晶体结构组成物质时,原子中的电子能级会被拓展变宽,从而形成能带。能带的形成可以由量子隧道效应和叠加原理给出解释。晶体中紧密排列的原子为电子提供了活动空间,根据隧道效应,电子可以由一个原子的能级空间跳跃到附近另一个原子的相同能级上;从叠加原理的角度理解,电子不再从属于单独的原子,而是被所有的原子所共享。新的电子的波函数应该是所有可能位置波函数的叠加,式(1.2.6)给出了符合叠加原理的晶体中电子波函数近似表达。图 1.2.7 形象地展示了电子在晶体中隧穿移动

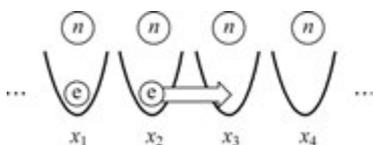


图 1.2.7 电子在晶体中隧穿移动示意图

根据隧道效应,电子可以由一个原子的能级空间跳跃到附近另一个原子的相同能级上;从叠加原理的角度理解,电子不再从属于单独的原子,而是被所有的原子所共享。新的电子的波函数应该是所有可能位置波函数的叠加,式(1.2.6)给出了符合叠加原理的晶体中电子波函数近似表达。图 1.2.7 形象地展示了电子在晶体中隧穿移动

的图像。

$$\phi_{n,k}(x,t) = [e^{ikx_1} \phi_n(x-x_1) + e^{ikx_2} \phi_n(x-x_2) + e^{ikx_3} \phi_n(x-x_3) + \dots] e^{i\omega t} \quad (1.2.6)$$

其中, $\phi_n(x)$ 为一个原子内部能级为 n 的电子波函数。在晶体中, 原子之间的间距是相等的。式(1.2.6)为固体物理中著名的布洛赫波函数按照空间周期进行傅里叶展开的形式。该波函数表示电子的状态为行波, 其波数为 k , 角频率为 ω 。不同的 k 和 ω 的组合表示不同频率的电子以不同的波长在晶体中运动。 k 和 ω 的关系被称为色散关系, 是描述物质中电子的输运性质的重要物理关系。根据泡利不相容原理, 每一个电子的状态应稍有不同, 从而导致每一个能级 n 被拓宽而形成一个对应的能带。图 1.2.8 为原子能级和晶体能带对应图。

能带可以视为紧密排列原子的能级的拓展, 每一个能带内部都包含了海量密集的能级。晶体中的电子数量也是巨大的, 电子在能带中按照泡利不相容原理由小到大填充能带中的能级。能带和能带之间存在的间隙为带隙, 带隙内部不存在电子能级。

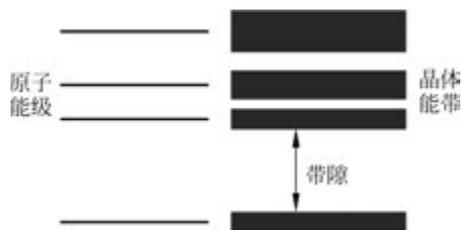


图 1.2.8 原子能级和晶体能带对应图

能带是否被填满决定了物质的特性。在一个被填满的能带中, 电子占据所有的位置, 因此电子在能带中是不能产生移动的。如果材料中的能带被电子占满, 材料表现为绝缘体。同理, 拥有未被填满的能带的材料构成金属。因为能带中存在足够的空位, 金属中的电子可以响应外部电场的作用产生电流。能带间的带隙在影响材料导电性方面也起到了关键作用。原则上, 能带中的电子可以吸收外来的电磁波获得能量, 从而跃迁至高一级的空能带, 成为可自由移动电子。在固体物理中, 被填满的能量最高的能带称为价带。价带上方的空能带称为导带。当电子由价带跃迁至导带后, 物质的导电性质就可以发生改变。但是, 绝缘体中的能带间隙都比较大, 需要高能光子才能实现这一跃迁。例如, 钻石晶体的带隙约为 5.5 eV, 而可见光中能量最高的紫光光子的能量只有 3.1 eV, 可知能量不足, 可见光无法被钻石所吸收, 所以钻石对可见光是透明的。

半导体和绝缘体一样, 上层能带都是被填满的。只是对于半导体, 其价带和导带间的能带间隙很小。只要很少的能量就可以改变半导体内部电子的状态, 从而改变半导体的导电性。硅晶体的带隙只有 1.1 eV, 硅晶体中的电子容易被热效应或者外来光子激发, 从而改变自身的导电性。

半导体具有窄带隙并不是其得到广泛应用的原因。通过沉积或者溅射等手段对其进行掺杂来获得的高度可塑性才是半导体产业的根基。在半导体的内部, 价带上的电子被激发后, 会在原价带位置上形成带正电的空穴。导带的自由电子和价带的空穴是半导体中导电的基本粒子, 也称为载流子。值得注意的是, 电子的运动是电子处于导带状态下移动的结果, 而空穴的运动是电子处于价带状态下移动的结果。在单纯的半导体材料中, 自由电子和空穴的数量都很少, 导致载流子密度很小。但是, 通过掺杂少量的其他元素, 载流子密度能够得到极大的改变。

载流子浓度控制是制造各种光电器件的核心技术。为增加载流子浓度, 人们在半导体中掺杂各种 III、V 族元素。例如, 在半导体中掺杂第 V 族元素, 如 P、As、Sb 等, 可以增加自

由电子的密度形成 N 型半导体；而掺杂第 III 族元素，如 Al、Ga、In 等，则可以增加空穴的密度形成 P 型半导体。通常，人们将 P 型半导体和 N 型半导体结合形成 PN 结。PN 结具有单向导电特性，几乎是一切半导体器件的基础。

图 1.2.9 为 PN 结的形成过程。当 P 型半导体和 N 型半导体结合后，由于扩散效应，P 型半导体中的空穴和 N 型半导体中的电子分别向对方区域扩散。扩散过程如图 1.2.9(a) 所示。这个扩散过程不能持续发生。P 型半导体和 N 型半导体原本都是电中性的，电子到达 P 型半导体区域，导致 P 型半导体开始呈带负电状态。相对应地，N 型半导体区域由于空穴的出现而呈带正电状态。电荷的产生导致 PN 结的内部产生一个电场，阻止扩散进一步发生。在这个扩散过程中，处于导带的电子与价带的空穴发生复合，从而形成一个既没有空穴也没有电子的区域。这个区域的厚度通常在微米量级甚至更薄，称为耗尽层。图 1.2.9(b) 为达到扩散平衡状态的 PN 结结构。值得注意的是，在 PN 结结构中，P 型半导体区域具有导电性，N 型半导体区域也具有导电性，而耗尽层则是绝缘层。如果需要通过 PN 结结构导通电流，则需要施加外部电场抵消耗尽层内部的电场来消除耗尽层的影响。这个过程表现为 PN 结最重要的单向导电性。

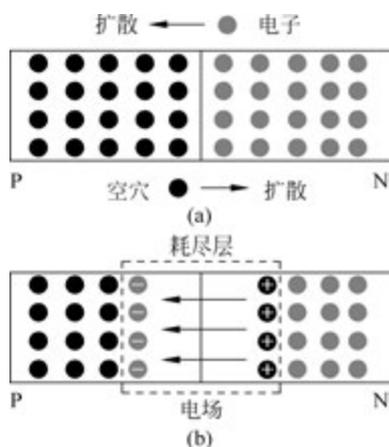


图 1.2.9 PN 结的形成过程

(a) 扩散过程；(b) 达到扩散平衡状态的 PN 结结构

在 PN 结两端外部施加电压，对 P 型半导体区域施加正电压而对 N 型半导体区域施加负电压。如图 1.2.10(a) 所示，外部电源所施加的电场与耗尽层内部载流子扩散而形成的电场相反。于是耗尽层得到大幅削弱。更多的空穴和电子都会进入耗尽层，在耗尽层复合，而产生导通电流。如果将外部电源方向反接，如图 1.2.10(b) 所示，对 N 型半导体区域施加正电压而对 P 型半导体区域施加负电压。在外电场帮助下，耗尽层内部的电场得到加强。载流子无法进入耗尽层，此时，PN 结不能导电。这就是 PN 结具有单向导电性的原因。在电子电路中，常见的二极管就是一个 PN 结结构。

在 PN 结的基础上，晶体管的发明促进了当今超大规模集成电路的实现。在集成电路芯片中，场效应晶体管作为电压控制开关应用是最为广泛的。使用 N 型半导体沟道实现导通的场效应晶体管是 N 型金属氧化物半导体 (N-metal-oxide-semiconductor, NMOS) 管。场效应晶体管有 3 个引脚，分别为源极、漏极和栅极。源极和漏极之间存在电流导通，而栅

极起到开关的作用。而使用 P 型半导体做导电沟道的场效应晶体管被称为 P 型金属氧化物半导体(P-metal-oxide-semiconductor, PMOS)管。图 1.2.11(a)和(b)分别为 NMOS 和 PMOS 结构示意图。

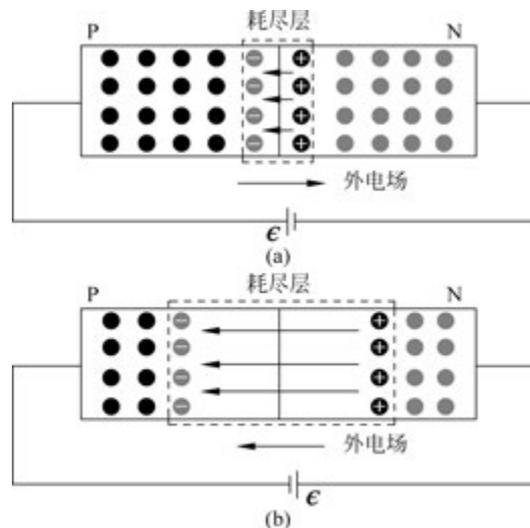


图 1.2.10 PN 结单向导电性

(a) PN 结导通；(b) PN 结不导通

图 1.2.11(a)为 NMOS 场效应晶体管结构示意图。其中,需要以 P 型半导体材料做衬底,在衬底上开窗形成两个 N 型半导体材料的井。源极和漏极接在两个 N 型掺杂区。在源极和漏极之间连接栅极,栅极与衬底之间需要加一层二氧化硅绝缘层,以保证没有电流通过栅极流入衬底。在使用过程中,P 型衬底连接低电位,而栅极接高电位。此时,P 型衬底中的电子会被吸引至栅极下方,与源极和漏极连接形成电子导电沟道。当栅极是低电位时,源极和漏极之间不存在导电通道。由此可知,对于 NMOS 场效应晶体管,当栅极连接高电位时,源极和漏极连通,而当栅极连接低电位时,源极和漏极断开,实现电压控制开关功能。值得注意的是,由于 PN 结的存在,开关过程中并不存在通过衬底的电流。因此,场效应晶体管能够以非常低的能耗实现电压开关功能,低能耗特性对于现代集成电路芯片具有重要意义。

图 1.2.11(b)为 PMOS 场效应晶体管结构示意图。与 NMOS 管不同的是,PMOS 场效应晶体管以 N 型半导体为衬底,源极和漏极连接 P 型半导体。N 型衬底连接高电位而栅极连接低电位以实现 PN 结的反向截止。当栅极连接低电位时,空穴会被吸引至源极与漏极之间,从而形成导通沟道。于是,PMOS 场效应晶体管实现在低电位导通、高电位断开的功能。

在实际的集成芯片中,NOMS 和 PMOS 这两种场效应晶体管被联合使用以实现逻辑运算。使用这两种场效应晶体管的技术称为互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)。在现代半导体工艺中, MOS 场效应晶体管正朝着小尺寸、低功耗的方向发展。目前,半导体工艺所使用的“5 nm 或 3 nm 工艺”是指 MOS 管的栅极宽度为 5 nm 或者 3 nm。

除集成芯片外,PN 结还用于光伏发电、光电传感器和照明等。当电磁波传播到物质中

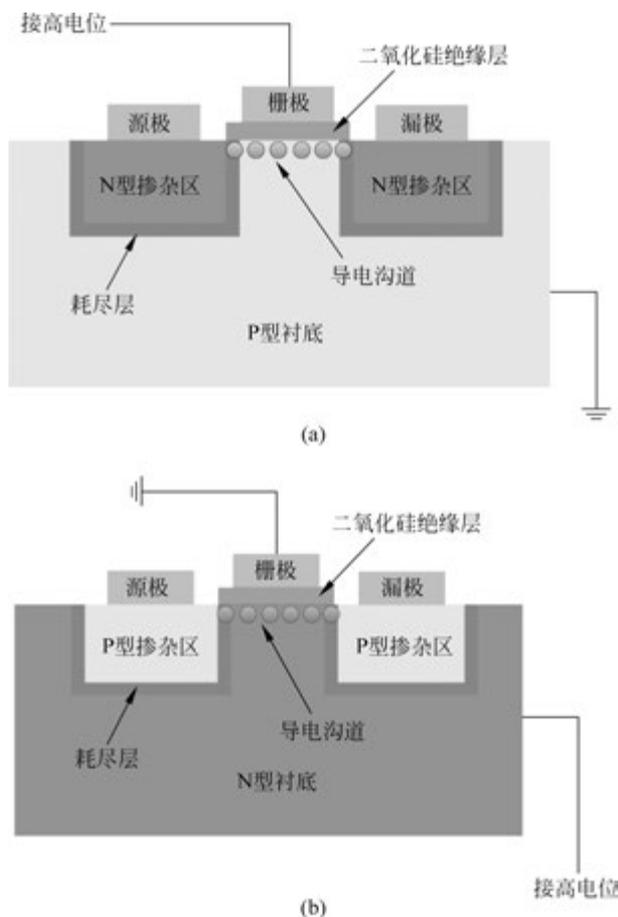


图 1.2.11 NMOS 和 PMOS 场效应晶体管结构示意图

(a) NMOS; (b) PMOS

时,如果物质为金属,则电磁波会被反射。如果物质为绝缘体,因为电磁波光子的能量小于带隙,电磁波不与绝缘体内的电子发生反应,所以可以穿过绝缘体。而当电磁波穿过 PN 结时,电磁波可以被耗尽层中的电子吸收,从而将电子由价带激发到导带。这个过程产生一个

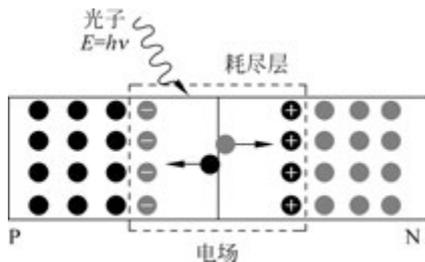


图 1.2.12 PN 结内部光电子激发过程

导带的自由电子和一个价带的空穴。由于耗尽层的内部存在电场,产生的电子被拉向 N 型半导体区域而产生的空穴被拉向 P 型半导体区域。值得注意的是,耗尽层内部的电场起到将正负电荷分开的作用。图 1.2.12 为 PN 结内部光电子激发过程。

光伏发电利用的就是 PN 结内部的光电子激发过程。将硅材料做成 P 层和 N 层的薄膜后,在其顶部和底部加上电极,形成发电板以收集太阳光激发的电荷。由于可见光光子的能量大于硅材料电子能带的间隙,在激发电子跃迁的过程中,电子和空穴会获得较大能量。然而,这些能量不能全部转换为电能。在电子和空穴流出发电板之前,与晶格之间发生碰撞,电子