

半导体微结构物理效应及其应用讲座

第三讲 半导体的激子效应 及其在光电子器件中的应用*

江 德 生[†]

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

摘 要 人们对半导体中的电子空穴对在库仑相互作用下形成的激子态及其有关的物理性质进行了深入研究. 激子效应对半导体中的光吸收、发光、激光和光学非线性作用等物理过程具有重要影响,并在半导体光电子器件的研究和开发中得到了重要的应用. 与半导体体材料相比,在量子化的低维电子结构中,激子的束缚能要大得多,激子效应增强,而且在较高温度或在电场作用下更稳定. 这对制作利用激子效应的光电子器件非常有利. 近年来量子阱、量子点等低维结构研究获得飞速的进展,已大大促进了激子效应在新型半导体光源和半导体非线性光电子器件领域的应用.

关键词 半导体 激子 光电子器件

Excitonic effects in semiconductors and their applications in opto-electronic devices

JIANG De-Sheng[†]

(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The excitons in semiconductors formed by electron - hole pairs bound by Coulombic interaction have been well investigated. The excitonic effects have a great influence on physical processes such as optical absorption, luminescence, lasing, and optical non - linearity, and have significant applications in semiconductor opto-electronic devices. In quantized electronic low-dimensional structures the excitons have much larger binding energies than in bulk materials, showing stronger excitonic effects and being more stable at high temperatures or under high electric field conditions. They are very beneficial to the fabrication of opto-electronic devices with improved performance. The progress obtained recently in investigations on quantum wells, quantum dots and other low-dimensional structures have greatly promoted the applications of excitonic effects in many new semiconductor light sources and non-linear opto-electronic devices.

Keywords Semiconductor, exciton, opto-electronic device

1 引言

激子是固体中的一种基本的元激发,是由库仑相互作用互相束缚着的电子-空穴对,它在研究绝缘

体和半导体的物理问题和光电性质时具有重要的意义. 在固体物理的研究发展史中,布洛赫首先用单电

* 国家自然科学基金(批准号 60276003)资助项目

2004-10-12 收到初稿,2004-12-27 修回

† Email: dsjiang@red.semi.ac.cn

子作为独立运动的量子来描述解释固体的导电性. 1931年,前苏联的弗伦克尔考虑电子和空穴的相互作用,提出激子的概念.之后,激子物理的研究取得了系统而深入的进展.激子效应在半导体的物理过程和光电器件领域有许多重要的应用,特别是近年来高科技的薄膜生长技术,如分子束外延和金属有机化合物化学气相沉积等发展很快,多层薄膜系统的生长精度可达到原子尺度,已开发出很多新型的低维量子结构器件,使激子效应在半导体光电器件的设计、制作和物性研究中得到了更多更重要的应用.下面将对半导体和低维结构中的激子效应及其对光电性质的影响进行简要的介绍,并重点通过一些实际例子讨论它在光电子器件包括半导体光源(如发光二极管,激光器等)及光学非线性和双稳态器件(如光调制器、光开关等)等方面的应用.

2 半导体体材料和低维量子结构中的激子效应

半导体发生光吸收和光发射跃迁时,激子效应对吸收和发光常常起着重要的作用.例如,在半导体吸收光谱中,本征的带间吸收过程是指半导体吸收一个光子后,在导带和价带同时产生一对自由的电子和空穴.但实际上除了在吸收带边以上产生连续谱吸收区以外,还可以观测到存在着分立的吸收谱线,这些谱线是由激子吸收引起的,其能谱结构与氢原子的吸收谱线非常类似.激子谱线的产生是由于当固体吸收光子时,电子虽已从价带激发到导带,但仍因库仑作用而和价带中留下的空穴联系在一起,形成了激子态.自由激子作为一个整体可以在半导体中运动.这种因静电库仑作用而束缚在一起的电子空穴对是一种电中性的、非导电性的电子激发态.

与氢原子一样,激子也具有相应的基态和激发态,但其能量状态与固体中的介电效应和电子空穴的有效质量有关.实际上,固体中的激子态可用类氢模型加以描述,并按此模型很好地估算出激子在带边下方分立能级的能态和电离能.如固体的介电常数为 ϵ , 电子和空穴的有效质量分别为 m_e 和 m_h , 则激子电离能(或激子束缚能)为 $E = (\mu/\epsilon^2) \times 13.6 \text{ eV}$, 式中 μ 为激子的折合质量, $1/\mu = 1/m_e^* + 1/m_h^*$, 13.6 eV 是氢原子的电离能.考虑到半导体中电子空穴有效质量一般比真空质量小,

又存在较大的介电常数,所以半导体中激子的电离能一般远小于氢原子的电离能.激子的空间扩展范围可以用激子的等效玻尔半径描述: $a^* = (m_0/\mu)\epsilon a^H$, 式中 m_0 为电子质量, a^H 为氢原子的玻尔半径.总的来说,宽禁带的半导体材料,激子束缚能较大,而激子玻尔半径则比较小.而禁带较窄的材料,其激子电离能较小,激子玻尔半径则较大.以 GaAs 为例,激子电离能不大, $E \sim 4 \text{ meV}$, 而激子玻尔半径与晶格常数 a 相比则大得多,约为 13 nm . 这种半径比固体晶格常数 a 大得多的激子一般称为汪尼尔激子,其示意图见图 1.

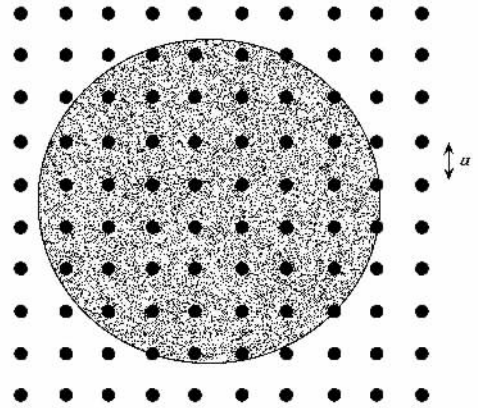


图 1 汪尼尔激子空间扩展范围大小的示意图(图中阴影部分). 固体晶格常数为 a

激子效应对半导体中的物理过程和光学性质具有重要的影响.激子的吸收和复合直接影响半导体的光吸收和发光,而且,作为固体中的一种元激发,其状态与母体材料的电子能带性质和外场的作用紧密相关.此外,自由激子在半导体中可以受到杂质或缺陷中心在空间上的束缚,形成所谓的束缚激子.其吸收谱线能量位置略低于自由激子的吸收谱线.激子在电中性缺陷上的束缚过程大致可分为两种,它可以是一个自由激子整体地受到缺陷中心的束缚,也可以是一个电荷(电子或空穴)首先被缺陷的近程势所束缚,使缺陷中心荷电,然后再通过库仑相互作用(远程势)束缚一个电荷相反的空穴或电子,形成束缚激子.束缚激子在半导体发光中有非常重要的地位.在间接带半导体材料中,由于动量选择定则的限制,材料的发光通常是很弱的,但如存在束缚激子,其波函数在空间上是局域化的,因而发光跃迁的动量选择定则大大放松,无须声子参与就可能具有很大的发光跃迁几率.这样,间接带材料的发光效率将大大增强.例如,在间接带 III-V 族半导体材料磷化镓(GaP)中,通过掺入 V 族氮原

子(或同时掺入能形成施主受主对的锌和氧),发光就可大大增强,其原因就是因为氮在晶格中代替磷位,是一种电中性的替位式等电子杂质.这种杂质中心由于其电负性与主晶格原子不同,原子尺寸不同等原因,在晶格中会产生作用距离较短的近程势,并使激子束缚在其位置附近形成束缚激子.实验上,在掺氮的 GaP 中已观测到单个氮原子以及成对氮原子所引起的很强的束缚激子发光.现在,这类掺杂方法已成为制造 GaP 和 GaAsP 等可见光发光二极管的基本工艺.

激子是由库仑作用结合在一起的电子空穴对,其稳定性取决于温度、电场、载流子浓度等因素.当样品温度较高时,激子谱线由于声子散射等原因而变宽.而当 kT (k 是玻尔兹曼常数)值接近或大于激子电离能时,激子会因热激发而发生分解.所以,在许多半导体材料中,只有低温下才能观测到清晰的激子发光,而当温度升高后,激子谱线会展宽,激子发光强度降低,以至发生淬灭.另外,在电场的作用下,电子和空穴分别向相反方向运动,因而当半导体处于电场作用下时,激子效应也将减弱,甚至由于电场离化而失效.而当样品中载流子浓度很大时,由于自由电荷对库仑场的屏蔽作用,激子也可能分解.这些影响激子稳定性的物理因素在光电器件应用中,可以作为对激子效应和相关的光学性质进行可控调制的有效手段.但对发光和激光器件来说,特别是对一些需要在室温下大浓度注入条件工作的器件来说,将产生一些不利的影响,使激子效应的应用受到限制.总的来说,当激子束缚能较大时,激子相对比较稳定.如在宽禁带半导体材料(如 II-VI 族化合物材料和氮化物)以及下面要更详细讨论的半导体量子阱等低维结构中,激子束缚能一般比较大,即使在室温下,激子束缚能也比 kT 大许多,吸收光谱中能看到明显的激子吸收,激子效应不易淬灭,甚至已实现了以激子复合效应为主的激光器件.

我们注意到,在近年来迅速发展的半导体低维量子结构,如量子阱、量子线、量子点中,激子效应明显地比体材料中具有更重要的作用.如上所说,在许多典型的半导体体材料中,只有在低温下才能观测到清晰的激子效应.而在低维结构中,由于量子限制效应,激子束缚能增大,在室温下也能观测到很强的激子效应.图 2 画出了半导体 GaAs 体材料和 InGaAs/InAlAs 量子阱在不同温度下的光吸收谱,图中由于半导体的禁带宽度随温度上升而减小,吸收边随温度上升向低能方向移动.图 2(a)是

GaAs 体材料的吸收光谱,只有在 90K 和 21K 两条低温吸收曲线中才看到吸收边附近的激子峰.图 2(b)是 InGaAs/InAlAs 量子阱的吸收曲线,其形状反映了量子阱的台阶形态密度的特点.从量子阱吸收曲线中可看到基态和激发态激子引起的多个锐吸收峰.特别是在室温 300K 下,在吸收边处仍能清晰地分辨出两个激子引起的吸收峰,分别对应于重空穴激子和轻空穴激子基态跃迁.同时,我们还注意到,在体材料中,非本征发光峰通常在光致发光光谱中占主要地位,而在半导体低维结构材料中,例如在 GaAs 量子阱的发光和吸收光谱中,则总以自由激子发光和吸收为主.而且即使是在室温下,激子跃迁比导带和价带之间的“带-带跃迁”过程更占优势.黄昆的分析^[1]清晰地阐明了,由于量子阱激子吸收的二维性,以及势阱中激子波函数受到压缩而使库仑作用增强,使得量子阱单位长度的吸收大大增强.分析表明,在量子阱中,载流子受到生长方向(z 方向)的量子限制作用,准连续分布的能态呈现量子化,波函数的分布受到压缩.体材料中激子波函数的分布形状大致是球形的,而在理想的量子阱中,激子将变成二维激子,其吸收将大大增加.实际上,当阱宽很小时,激子的分布形状将被压缩成圆盘形,而且库仑作用增大,其波函数在 xy 方向的半

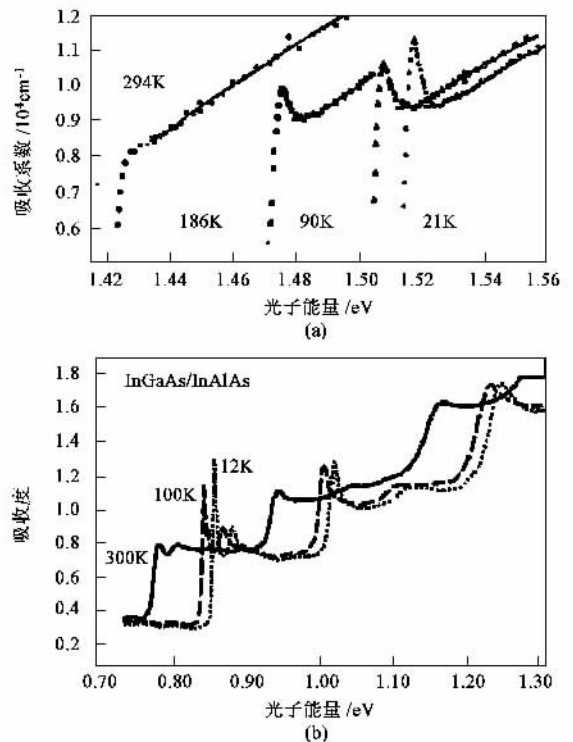


图 2 (a) GaAs 体材料 (b) InGaAs/InAlAs 量子阱在不同温度下的光吸收谱

径范围也会比球的半径小,激子的束缚能将明显增大.计算表明,当势阱宽度 L 远小于三维激子的玻尔半径 a^* ($L/a^* \ll 1$) 时,即在理想的二维量子阱中,激子的束缚能将增大为三维激子的束缚能的 4 倍,而等效玻尔半径则为体材料中的一半.按黄昆估算,和三维情况相比,当光在垂直于量子阱平面方向传播时,激子跃迁引起的单位长度的吸收可增加达 30—40 倍.这说明激子的二维特性和由此导致的激子波函数扩展范围的压缩,使激子跃迁强度迅速增加.此外,在量子阱中,由于激子束缚能增大,激子吸收谱线与连续谱跃迁带的能量间隔将增大,激子产生热离化的温度升高,因而在室温时将更容易观测到激子的存在.由于这些原因,激子效应在二维体系中更强更稳定,在光学跃迁过程中,比体材料情况中起着重要得多的作用.在更低维度的低维结构材料中,如一维的量子线和零维的量子点中,由于量子限制效应所起的作用更大,激子效应的加强还会变得更加突出.

下面我们将通过一些实际例子讨论激子效应在光电子器件中的应用.

3 激子效应在发光和激光器件中的应用

激子效应是许多光电材料发光机制的基础.在低温和室温下测量的激子光谱被广泛地用于材料的结构性质和光学性质的分析,特别是用于对半导体发光和激光器件质量和性能的分析,因而在器件材料的结构设计、制备和鉴定中,具有重要的意义.在一些发光二极管和特殊发光器件的实际应用中,激子发光是一种重要的发光机制,特别是在一些间接带半导体材料和低维结构半导体材料制成的发光二极管中,激子发光跃迁被证明往往起着关键性的作用.例如用氮化物材料可制成蓝绿光和紫外光发光二极管.众所周知,氮化物及其合金中一般缺陷浓度是很大的,但发光效率却很高,原因是受到局域化的激子有很高的复合几率,使得载流子在到达非辐射复合中心之前,就通过激子复合对发光作出贡献.人们认为,InGaN/GaN 量子阱之所以发光效率很高,与 InGaN 中存在着组分分凝,甚至形成了量子点,激子发光得到加强有关.在许多其他纳米晶体材料和量子点材料的发光中,激子发光都起着很重要的作用.此外,在光通信和量子光学发展中具有特殊重要意义的单光子源器件,已实现的光发射就主要是激子发光^[2].目前实现的单光子源器件的工作原理,主要是对单个量子点如 GaAs/InGaAs 量子

点进行微区激发,并对所得发光光谱加以滤波,以获得由单激子发光产生的尖锐谱线,实现单光子发射.一般商用的发光二极管,特别是半导体激光器,往往主要在室温下工作,并需要在二极管 p-n 结区进行大的正向电流注入,因而材料中的自由载流子浓度很大.自由载流子对激子的屏蔽作用很强,导致激子趋向不稳定.可以证明,在体材料中,当自由载流子浓度 n 接近 $5 \times 10^{-2} a^{* -3}$ 时 (a^* 为玻尔半径),电子空穴对之间的库仑作用将受到屏蔽,激子呈不稳定,系统将逐渐演变为简并的电子空穴等离子体 (EHP).在这样的条件下,发光机制中激子发光所占的比重将减小.特别是对半导体激光二极管来说,实现激射的重要条件之一是发生粒子数反转,注入载流子浓度必须很大,因而通常的半导体激光器中,激射时的发光机制大多不是激子复合发光,而主要是电子空穴等离子体发光.此外,器件的工作温度也对激射机制有影响.在离子性相对较强的化合物半导体材料中,电子和声子互作用很强.在温度不是很低时,激子很容易因为和纵光学声子发生非弹性散射,使谱线展宽,并在温度更高时分解为自由的电子和空穴,使材料失去激子吸收和发光的特征.因此,在室温工作条件下,受激发射就更难是激子机制了.

如前所说,在半导体低维系统(如常见的二维量子阱)中,情况可能会有所不同.随着激子束缚能的增大,激子跃迁几率大大增加.虽然最近的实验结果表明,在宽禁带的 InGaN/GaN 量子阱中,因存在较强的自发极化和压电极化效应,阱内有很强的内建电场,在激射阈值附近时,激子态与电子空穴等离子体相比变得很不稳定,最终激射是由于电子空穴等离子体所产生,而不是激子发光引起的^[3].但在离子性更强的宽禁带 II-VI 族化合物中,人们却成功地观测到了激子引起的受激发射.如在 II-VI 族 ZnCdSe/CdSe 量子阱系统中,激子束缚能可高达 40meV,超过了光学声子能量 (31meV).因此,在室温下,激子态仍很稳定,激子谱线仍很锐,量子阱的吸收表现出激子吸收的特征.图 3 画出 ZnCdSe/CdSe 量子阱的发光光谱,在室温下其发光峰仍具有激子发光的特征.

美国布朗大学 Nurmikko 小组首先发现^[4],在 ZnCdSe/CdSe 量子阱二极管器件中,在很大的温度范围,蓝绿色波长的激光发射令人惊异地具有激子性质,而不是电子空穴等离子体发光.他们发现,在绝对温度为 10°K. 的低温时,量子阱二极管实现

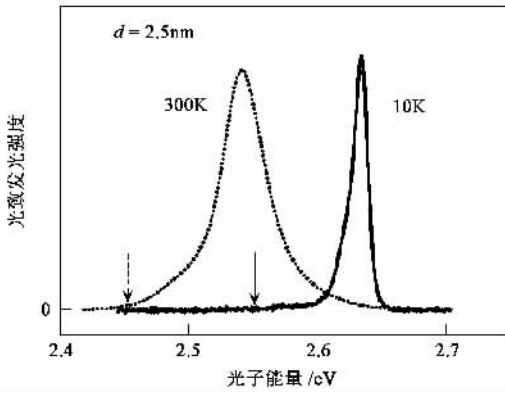


图3 阱宽为2.5nm的ZnCdSe/CdSe量子阱在10K和300K温度下的激子发光谱(图中左右两个箭头分别示出在两个温度下ZnCdSe体材料的禁带宽度位置)

激光发射的阈值注入强度最大只有约 $7.3 \times 10^{11} / \text{cm}^2$, 比通常的电子空穴等离子体阈值注入强度 $5.7 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 小一个数量级. 而且当样品温度升高到 240°K 时, 实现激射的最小注入强度还仍不太大, 比 $5.7 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 小. 他们还证明, 在激射工作条件下, 多电子-空穴系统仍保持激子系统性质, 激子吸收和发射的波长位置固定在量子阱基态重空穴激子跃迁能量处, 基本不随激发强度而变. 在这种激光器中实现激子激射的原因, 除了激子束缚能大, 激子跃迁几率高以外, 很重要的一点是在较低的电子空穴对密度下实现了激射所需的激子增益机制. 在此体系中, 粒子数反转是基于非均匀系统的相空间填充, 因而比一般体材料所需的浓度低得多.^[4]

实际上, 对于非量子阱的 II-VI 族宽禁带半导体(如 ZnSe, ZnO)激光器件, 由于体材料的激子束缚能很大(如 ZnSe 的激子束缚能约为 20 meV), 也已实现了激子性的受激发射, 不过, 激射机制与量子阱结构有所不同. 据报道, 实验上在 ZnSe 厚外延层中就已观测到激子性的光抽运受激发射^[5]. 产生激射时, 激子的密度也并不特别高, 其激射机制已被证明是与非弹性的激子-激子散射过程有关, 而不是电子空穴等离子体发光. 在非弹性的激子-激子散射过程中, 一个激子分解成自由的电子和空穴, 另一个激子则复合发光. 但是, 据报道, 在体材料 ZnSe 中, 出现激射的温度仅局限于低温液氮温度, 而且, 激子共振吸收的特征没有像二维系统中那么明显.

4 激子效应在光学非线性器件和双稳器件中的应用

在制作半导体光学非线性元件和光学双稳器

件, 如调制器、电光开关、参量放大器、四波混频器等器件时, 广泛地应用了半导体和低维量子结构中的激子效应. 采用量子阱结构可以使人们对能带结构进行人工剪裁, 并在室温下获得较强的激子效应, 这不仅可以大大提高材料的光学非线性特性, 而且有可能使器件在室温工作, 并得到快速效应. 我们知道, 各种光学调制器用途很多, 可用来对激光束进行信息编码, 并在光网络中实现开关功能等, 这在光通信中是非常重要的, 也广泛用于其他光学信息处理系统. 半导体调制器可分为全光型和混合型两类. 全光型的器件一般开关阈值较高, 而混合型的器件有较低的开关阈值和较好的工作稳定性. 半导体调制器的优点是速度快、体积小、功耗低, 并可与其他光电子器件集成. 目前常用的半导体非线性调制器件中, 有些是用半导体体材料做的, 更多的则采用了量子阱材料结构以使其性能得到提高. 进行调制的物理机制大多是利用外电场产生的“电致吸收”效应, 以及光照引起的“光折变”效应, 即光致折射率变化的效应等. 在与激子态发生共振或近共振时, 激子吸收对外界作用非常敏感, 器件的光学非线性响应大大增强. 因而, 激子效应在一些光学非线性器件中非常重要. 我们知道, 在体材料中, 对激子吸收起电场调制作用的主要是所谓的弗兰茨-凯尔迪希(Franz-Keldish)效应, 这种效应是基于在电场作用下电子和空穴的波函数发生相对移动和变化, 使半导体带边附近的光吸收受到调制. 在电场作用下, 激子吸收峰变宽, 并比较容易地被电离分解, 使光吸收发生明显变化, 同时还在光子能量低于半导体禁带宽度处导致光吸收, 产生所谓的吸收带尾. 在量子阱材料中, 对激子吸收发生的电场调制作用的则主要是靠量子限制的斯塔克效应(quantum-confined Stark effect, 通常简称 QCSE)^[6]和汪尼尔局域化(Wannier localization)效应. 量子限制的斯塔克效应的主要原因是, 当在垂直于量子阱平面方向加上电场时, 由于外电场使量子阱的能带发生倾斜, 使电子空穴在阱中的空间分布互相偏离, 并使两者之间基态跃迁能量降低, 导致光吸收峰波长红移, 光吸收强度减小, 其作用很灵敏, 调制的动态范围较大. 通常在 GaAs/AlGaAs 量子阱中, 由于量子阱的激子束缚能比体材料中大(约为 8—10 meV), 激子在电场作用下不易因产生电离而分解, 电离的阈值电场强度要比在体材料中大得多, 在室温下仍容易观测到激子的电场调制效应. 而且由于量子阱和超晶格结构的厚度很小(几个纳米到几

十纳米厚),一般在样品结构两端只需加很小电压就能产生很大的电场强度和得到很强的调制效应,因此用量子阱超晶格结构来制作电光调制器具有很大的优越性.同样地,汪尼尔局域化效应也能使超晶格材料的带边光学吸收到电场的强烈调制,但主要产生的电致变化效果则是吸收边的蓝移,这里就不详细讨论了.用二维量子阱制作的自光电效应(self electro-optic effect device, SEED)器件是半导体电光调制器的一个典型的例子.自光电效应器件是一种光学双稳态器件,一般由 p-i-n 二极管光学调制器组成,并与一个反馈电路结合起来使用.二极管中的 i 区为量子阱结构,其中激子的光吸收到电场的调制.当加反向偏压的二极管受光照时产生光生电流,而光生电流产生后,由于流过适当的电路,使得二极管两端的电压降发生变化,因而使量子阱区的电场强度发生变化,对二极管的光吸收和光电流又反过来发生影响.当这样形成的反馈是一种正反馈时,此器件将成为一个光学双稳器件,可通过光照使器件的状态发生翻转,起开关作用.用 GaAs/GaAlAs 多量子阱器件(30—100 个阱)制作的自光电效应 SEED 器件工作电压为 5—10 V 范围.其开关速度可以很快,基本上取决于对 SEED 的 P-N 结电容充电的速度,已报道的开关速度可达到 40GHz 以上.用 SEED 器件和 C-MOS 器件构成的阵列在光互连系统中已得到应用.

半导体电光调制器被广泛用于光通信中对激光束进行信息加载调制.这类调制器一般是施加反向偏压的 p-i-n 结,其中 i 区是量子阱.调制器根据光束的传播方向可做成波导型和透射型两种.在波导型调制器中,光束平行于量子阱平面传播,光程较长;在透射型调制器中,光束垂直于量子阱平面传播.波导型调制器的示意图如图 4 所示.在工作时,量子阱纵向加上电调制信号 $V(t)$,在侧面方向入射激光束.当激光束通过调制器时,利用量子阱中激子吸收的电场调制效应,可使输出的激光束受到有效的调制.这类调制器具有体积小、调制速度快、驱动电压低、便于集成等优点.阿尔卡特公司有一种电吸收调制器就是采用这类机制制成的,它和一个半导体分布反馈激光器集成在一起,产生的激光调制频率可达 40GHz.工作时驱动电压较低,为 2.8V.由于采用了波导结构,插入损耗比较小,应用比较方便.

通过器件结构的精心设计,利用激子效应的半导体光学调制器已具有很多种类.半导体光学调制

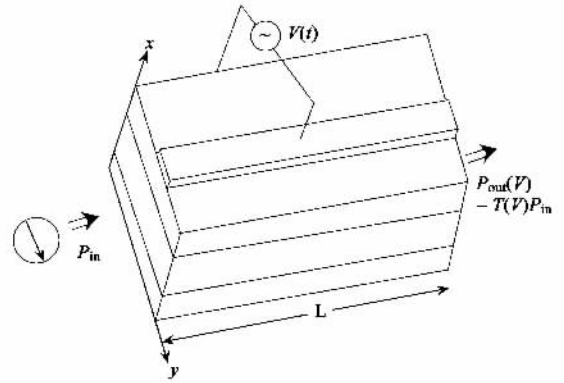


图4 波导型电光调制器的示意图.图中 InGaAs/InAlAs 量子阱平面(用阴影层表示)位于 yz 平面内,入射光 (P_{in})沿 z 方向进入调制器,顺着脊形波导方向传播,经距离 L 后出射.调制电压 $V(t)$ 加在垂直于量子阱平面的 x 方向上.出射光强为 $P_{out}(V) = T(V)P_{in}$.

器除了可以做成透射型,用来直接对通过的光束进行调制,也可以做成反射型或折射型的,使光的反射或位相受到调制.有的反射型光学调制器与非对称的法布里-珀罗腔集成在一起,通过共振加强调制效应,更适合做成阵列.有的双量子阱结构调制器件已被用在波分复用的光通信网络中,在不同波长的通道之间切换所传输的数据^[8].利用半导体半绝缘多量子阱的光折变效应,可做成空间光调制器、光学开关、高速图像相关器等器件,用于光信息处理和光计算技术领域.

此外,掺入半导体量子点的玻璃材料具有共振增强的三阶非线性光学效应,也已用于制作光学非线性器件.玻璃材料中的掺杂体为半导体微晶颗粒,尺寸小于 10nm,而玻璃基体则作为透明的色散介质使用.这种玻璃也叫量子点玻璃^[9],已应用于制作非线性超快光子学器件,得到的响应时间很快,约为 10^{-11} s.由于玻璃可拉成光纤,能与波导制备技术相容,因此倍受重视.这类材料的强非线性光学效应可归因于纳米粒子的量子限制效应.介质因光吸收产生的电子-空穴对,以激子形式被局域在量子点内,引起了材料非线性光学效应的增强.1983年, Jain 和 Lind 首先研究了掺杂 CdS_xSe_{1-x} 半导体微晶玻璃的非线性光学性能,发现这类玻璃表现出共振增强的三阶光学非线性,并可通过调节 S 和 Se 的比例控制介质的禁带宽度,调节产生共振增强的光波长范围.现在,量子点玻璃已成为全光开关器件的最佳候选材料之一.

参 考 文 献

- [1] 黄昆. 物理, 1986, 15(6) 329 [Huang K. Wuli (Physics), 1986, 15(6) 329(in Chinese)]
- [2] Yuan Z L, Kardynal B E, Stevenson R M *et al.* Science, 2002, 295 :102
- [3] Schwarz U T, Sturm E, Wegscheider W *et al.* Appl. Phys. Lett., 2004, 85 :1475
- [4] Ding J, Jeon H, Ishihara T *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 11 :1707
- [5] Newbury P R, Shahzad K, Cammack D A. Appl. Phys. Lett., 1991, 58 :1065
- [6] Miller D A B *et al.* Phys. Rev. B. 1985, 32 :1043
- [7] Zhang Yaohui, Jiang Desheng, Li Feng *et al.* J. Appl. Phys., 1992, 72 :3209
- [8] Su M Y, Carter S G, Sherwin M S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2002, 81 :1564
- [9] 江德生, 李国华, 韩和相等. 半导体学报, 2001, 22 :997 [Jiang D S, Li G H, Han H X *et al.* Chinese J. Semicond., 2002, 81 :1564 (in Chinese)]

· 物理新闻和动态 ·

将简并性气体添加在光学晶格上

控制一个宏观物体(如行星或者网球)进行运动的力是很复杂的,那么控制处于极冷温度下的原子运动的力就变得更为复杂.在这个范围内,相邻原子间还以波的形式相互交迭.如果原子是玻色子,它们将凝聚在单一的量子态上,形成玻色-爱因斯坦凝聚.若原子是费米子,它们将遵守泡利不相容原理,也就是说,原子将占据在不同的量子态上.它们将一个接一个地去填充一切可能的低量子态(有时两个原子自旋不同时可占据在一个量子态上),直到全部原子都填充完为止.

最近位于苏黎士的ETH实验室的物理学家们在这方面开展了独特的研究,他们不仅制作了简并性费米气体,而且将这些原子装填到一个人造的三维光学晶格的十字形空隙内.这个步骤是利用有很好导航功能的激光束产生的电场来实现的.不断地调节外部磁场,使得处于特定状态的成对原子间具有各种不同大小的相互作用(这种作用可称为Feshbach共振).研究者之一的Esslinger博士认为,他们所具有的研究能力可以将原子妥善地安放在晶格的脚手架上,并控制原子间按需要的强度进行相互作用.这一整套实验技巧对于研究各种固体理论,特别是去解释实际物理世界中的高温超导体的机理将非常有用.

(云中客 摘自 Physical Review Letters, 4 March 2005)

· 招生招聘 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy, New York, U. S. A.

July, 2005

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy

Areas of research: Terahertz Imaging and spectroscopy, Terascale Electronics and photonics, Nano-Particles Physics, Bio-physics, Origins of Life, Astronomy, Elementary Particles Physics. Teaching, research assistantships, and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email : gradphysics@rpi.edu