

新颖的量子阱红外探测器

陈正豪

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

本文介绍了新型量子阱红外探测器的原理、特点、性能及其在实际应用中的重要价值,与 HgCdTe 红外探测器作了比较,同时还评述了国内外的发展现状。

利用分子束外延 (MBE) 技术,将不同组分和不同禁带宽度的半导体材料 A 和 B 交替沿垂直于表面的方向 (Z 方向) 外延生长在同类单晶衬底上,形成 B-A-B-A 型结构,每层厚度几十至几百埃。宽禁带材料 B 构成势垒,而窄禁带材料 A 则形成势阱。此种最新、最重要的半导体材料称为超晶格和多量子阱结构 (MQW) 材料,如 GaAs/AlGaAs, InGaAs/AlInAs 等。随着 MBE 技术的日趋成熟,对这种新型半导体材料的性能及应用研究也蓬勃开展起来。特别是由于量子阱中载流子的量子受限作用,使这种新型材料具有比相应的体材料更加优越的线性和非线性光学性质^[1],因而它在光学开关、光学调制、光相位共轭及光探测等方面有很大的应用潜力。这一点无疑将对光纤通信、大规模集成和遥感、遥测等技术的发展具有很重要的意义。本文所要介绍的量子阱红外探测器,就是 MQW 材料的一个极为重要的应用。

所谓量子阱红外探测器,就是利用 MQW 的阱材料中导带内子带间光跃迁对红外辐射的

量的下限为 120—300 GeV。

从目前的实验结果看,至少在大于 10^{-16} cm 的尺度上,标准模型正确地描写了电磁现象和弱现象。很多物理学家确信,必定存在有超出标准模型的新的物理,只不过它们要在更小的尺度上表现出来。预计新一代加速器和新一代的实验将会改进 $\sin^2\theta_w$ 和其它电弱数据的测量精度。如表 2 所示,至少可以提高一个量级。这些实验包括:高精度的 Z 和 W 的质量测量, e^+e^- 湮没中不对称性的测量,中微子-电子

强吸收,来探测红外辐射强度的一种新型、快速、灵敏的红外探测器^[2-4]。它有以下主要特点。

1. 灵活性大:可以在材料生长过程中控制生长参数而得到所需要的器件响应波长和带宽(占中心频率的 10—50%),尤其对于 8—14 μm 大气传输窗口,更容易实现。

2. 响应速度快:可实现皮秒 (10^{-12} s) 量级的高速度响应。

3. 量子效率高:MQW 材料具有多异质结构,构成多个可以充分利用的活性界面。

4. 结构相对简单:便于集成化,便于大面积二维列阵。

以上特点是其他类型的红外探测器(如:肖脱基势垒管、本征 Si 探测器、HgCdTe 探测器和其他窄带隙红外探测器)所没有或很难实现的。特别是量子阱红外探测器还具有材料均匀性好、稳定性好、重复性好以及质高价廉等明显优点。经过短短几年的发展过程,其性能已能与有几十年发展史的 HgCdTe (8—14 μm) 探测器相比较。前者的探测率 $D^* = 1 \times 10^{14}$

散射,原子中弱作用与电磁作用的干涉以及深度非弹性散射等。这些实验可以使这个理论及可能的扩充理论至少在 10^{-17} cm 尺度上是正确的。

不管未来会通向何方,电弱标准模型几乎肯定会存留下来。它仍会是原子核大小千分之一尺度之上的正确的定量的理论。

(丁亦兵根据 *Physics Today* 1989 年第 12 期第 22—31 页 编译)

$\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 当 $T = 77\text{K}$; 后者的 $D^* = 3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 当 $T = 77\text{K}$. 因此, 这种新型量子阱探测器的问世, 无疑将大大促进大规模集成、光学逻辑电路、光通信系统、红外成像技术等的发展。国际上专家们预言, 量子阱红外探测器必将对红外物理、红外光电子学及其应用领域带来革命性的进展。

一、量子阱材料导带内子带跃迁的红外吸收特性

量子阱电子态的波函数可以表示为原子晶格布洛赫波函数与包络波函数之乘积。后者来源于沿量子阱生长方向的量子尺寸限制效应和超周期性。由于这两种效应的存在, 体材料的每个布里渊区被划分成许多个微布里渊区。相应地, 每条能带也划分成若干子能带。当导带中的电子在子能带间发生光致跃迁时(必须注意, 只有当入射光场具有垂直于量子阱材料生长面的电场分量, 即 $E_{\perp} \approx 0$ 时, 才能激发此类跃迁), 布洛赫波函数保持不变, 只改变包络波函数。而通常所说的从导带到价带间的跃迁则发生在布洛赫态之间, 其包络波函数保持不变。1985年, 美国科学家 L. C. West^[5] 首先从实验上直接观察到了 GaAs/AlGaAs MQW 中这类新型的带间光跃迁, 并证实它具有很强的红外吸收性质(图1), 而且当入射光的波长与子能带间跃迁

能量相当时, 则会产生共振吸收增强效应(比同类体材料的吸收大 3—4 个数量级)。特别重要的是, 这类跃迁的波长范围可以从近红外(约 $5 \mu\text{m}$) 一直延伸到远红外, 而且灵活性很大。只要适当选择量子阱材料的阱宽和垒高, 并在生长过程中加以控制, 就可以将跃迁波长调到一个所需要的固定波长上。这一点对于大气传输窗口 ($8-14 \mu\text{m}$) 则尤其容易实现。此外, 由于这类子带间光跃迁是一个纯电子输运过程, 所以具有很快的弛豫时间(皮秒量级)。显然, 这种子带间共振吸收效应极利于制作快速、灵敏以及响应波段可以控制的红外探测器。

二、量子阱红外探测器原理及特性

量子阱红外探测器的工作原理简单地如图 2 所示。图 2(a), 中设阱材料的导带中有两个子能带, 即基态 E_1 和第一激发态 E_2 。在材料生长过程中利用掺杂 n 型半导体(如 Si), 使导带阱中基态上具有一定的二维电子密度。图 2(b) 表示, 在外加偏压 V_b 下, MQW 的能带结构发生倾斜。此时, 当入射辐射 $h\nu$ (具有与量子阱材料生长面相垂直的光场分量, 即 $E_{\perp} \approx 0$) 照到器件接收面上时, 处于导带内最低子带 E_1 上的电子就被相当能量的光子激发到第一激发态 E_2 上, 并隧穿过因倾斜而变薄的垒壁, 形成

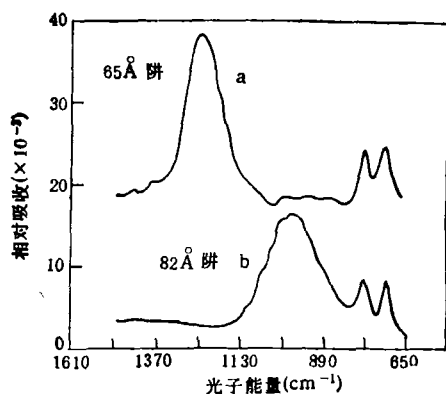


图1 L. C. West 用傅里叶光谱仪在入射角 $\theta = 73^\circ$ 和室温下, 测得的两个不同阱宽样品的吸收光谱

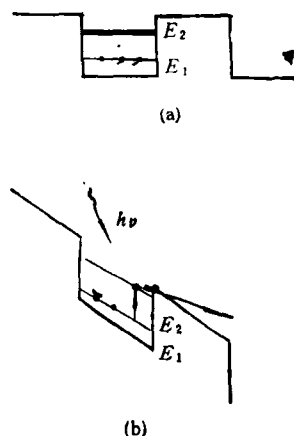


图2 量子阱红外探测器工作原理示意图

具有相当大自由程(通常有几千埃)的热电子。这些热电子在外场作用下被有效地收集起来,从而在匹配外电路中形成与人射光场强度成正比的电流或电压信号。

最近, B. F. Levine 及其合作者^[6]设计了一种导带内只装有一个最低子能带的 MQW 样品。他们观测到从这一最低子带直接到连续态的跃迁,证实这种跃迁仍具有很大的红外吸收特性,且吸收峰明显加宽。如果利用这种从子带到连续态的跃迁机制来制作红外探测器,则由于其不需要共振隧穿过程,因而可以把势垒层大大地加厚,从而明显地降低了器件的暗电流,并能使器件达到高的响应率和高探测率。

三、两种主要的器件结构机理

由于量子阱红外探测器所依据的基本物理效应是电子在导带内子带间的光跃迁性质,而这类带间跃迁的选择定则要求入射辐射具有垂直于 MQW 生长面的电场分量 ($E_{\perp} \neq 0$)。所以,如何使人射光的电场矢量具有尽可能大的 E_{\perp} 分量,则是提高带间跃迁几率,因而也是提高量子阱探测器响应率的最有效途径。这是设计器件结构所必需考虑的原则。下面介绍美国贝尔实验室所成功设计出的两种器件结构机制。

1. 楔形耦合式

用来制作探测器的多量子阱材料通常具有 50 个阱 (GaAs)-垒 ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) 周期结构,并在此周期结构的始端和末端分别外延生长出两个重掺杂层(通常掺 Si,使电子浓度 $n = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),作为器件电极的欧姆接触层。利用光刻和腐蚀技术,可将 MQW 结构刻蚀成 $200 \mu\text{m}$ 直径(或更小)的台面。刻蚀深度应达衬底上的第一个外延接触层,以便制作欧姆接触电极。图 3 示出楔形耦合式单元探测器结构原理。光信号由加工成 45° 的衬底楔形面耦合到具有多量子阱结构的 $200 \mu\text{m}$ 台面上,就会产生一定强度的垂直于材料生长面的光电场分量 E_{\perp} ,从而激发量子阱材料的子带间光跃迁,产

物理

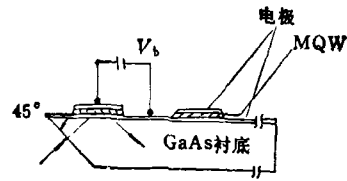


图 3 楔形耦合式探测器结构原理

生热电子流。在外加偏压 V_b 作用下,外电路中就形成正比于入射光的电流或电压信号。美国贝尔实验室采用如图 3 所示的结构和 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ MQW 材料。台面直径为 $200 \mu\text{m}$ 的单元探测器,在 77 K 下的电压响应率 $R_v = 30000 \text{ V/W}$ (负载电阻 $= 100 \text{ k}\Omega$),探测率

$$D^* = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W},$$

响应时间 $\leq 300 \text{ ps}$ 。若将台面直径减小到 $50 \mu\text{m}$,器件的响应时间估计可达 30 ps 。

2. 光栅耦合式

楔形耦合式对单元探测器的性能研制是简单方便的,但是由于受到狭窄的入射面的限制,它只适用于有限元的线阵研制。对于红外焦平面成像等重要应用所需要的多元面阵研制,则需采用光栅耦合式探测器,其结构原理如图 4 所示。所要求的 MQW 材料结构与楔形耦合式的相同。主要特点是在 MQW 结构表面用光刻法及选择腐蚀法制作出在器件中心波长附近有最大响应值的闪耀光栅,使其满足光栅方程

$$n \sin \theta_m - \sin \theta_i = m\lambda/a,$$

其中 n 为量子阱材料的折射率, m 为所需要考虑的衍射级次(通常考虑 ± 1 级), θ_i 和 θ_m 分别为入射角和衍射角, λ 为器件的响应波长, a 则为所需要刻制的光栅周期。闪耀光栅制好后,

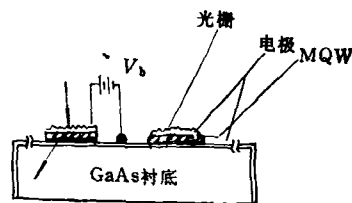


图 4 光栅耦合式探测器结构原理

再利用光刻腐蚀法作成直径约为 $200 \mu\text{m}$ (或更小)的单元台面(或列阵),如图 4 所示。最后,在

光栅上接触层镀上环状电极(留出通光口),在下接触层也镀上电极。当入射光照到器件敏感面上后,由于光栅衍射而产生一定强度的 E_{\perp} 光场分量,从而激发带间光跃迁。其他过程则与楔形耦合式的相同。美国贝尔实验室采用该结构已成功地制作出单元和面阵探测器,所达指标与楔形耦合式相当。

以上介绍的只是两种已经实验成功的较为成熟的量子阱器件结构。实际上,只要是能将待测入射辐射有效耦合(即尽量产生大的 E_{\perp} 光场分量)到器件的敏感面上的结构,并在工艺上可能实施的,都具有试验价值。

四、应用前景及国内外发展现状

自从 1985 年美国科学家首次直接观测到多量子阱材料的子带间红外吸收以来,有关的基础和应用研究就成为一个极引人注目的前沿课题蓬勃地开展起来了。其中最重要也最受国际科技界重视的,就是研制快速、高灵敏量子阱红外探测器。走在最前沿的是美国,其次是法国、联邦德国和日本等。除了在本文引言中所介绍的量子阱红外探测器的特点之外,与 HgCdTe 探测器相比,它还有若干明显而重要的优越性。首先, GaAs/AlGaAs 系量子阱材料的 MBE 生长技术和处理过程比 HgCdTe 系列的材料更成熟,这使得 GaAs 系列的量子阱探测器很容易与 GaAs 场效应晶体管、电荷耦合器件等实现单片集成而使高速度信号处理电子学系统增加了实际可能。其次, GaAs 衬底材料比起 HgCdTe 衬底材料来,既大又便宜,而且质量更好。成熟的 GaAs MBE 技术可以提供相当均匀的、重复性能好的、组分可以控制的大于 3 英寸的片基。GaAs 系列材料的热稳定性也比 HgCdTe 要好。由于有了上述各种优点,用窄带多量子阱材料可制成高速、灵敏的光学外差器件,甚至

还有可能实现在单片上集成红外光谱仪。更具有重要意义的是制作成红外探测器的大面积焦平面二维像素阵列。据估计,可实现 10^3 阵列($50 \mu\text{m}$ 光敏面),而消耗功率仅 100 mW。很显然,这在军事上和民用上都是极有价值的。

中国科学院物理研究所是我国 MBE 技术的发源地。从 1976 年开始于今已有 14 年的 MBE 技术经验。1986 年他们研制出的 50 周期 100 \AA GaAs/ 100 \AA AlGaAs 超晶格多量子阱结构,荧光峰线宽 3.2 meV,被美国科学家认为在当时是国际前十名。1989 年,中国科学院物理研究所开始研究 GaAs/AlGaAs MQW 材料的子带间光跃迁性能^[7,8]。实验结果表明,他们的有关材料性能与国际上同类材料相当。最近,中国科学院物理研究所借鉴国际上已有的器件结构,与华北光电技术所合作,研制成功 $10.6 \mu\text{m}$ 量子阱红外探测器,其电流响应率 $R_A=5 \text{ A/W}$ 。他们正在改进材料结构和器件工艺以降低暗电流,提高探测率。与此同时,他们还首次提出了光栅耦合表面波激发式结构,理论计算表明,此种新结构与通常使用的闪耀光栅结构相比,将使探测器的响应率增加 2—3 个数量级^[1]。笔者获悉,国内其他单位如中国科学院上海技术物理研究所和中国科学院上海冶金研究所等也正在积极筹备研制量子阱红外探测器。

- [1] D. S. Chemla, *J. Luminescence*, **30**(1985), 502.
- [2] D. D. Coon et al., *J. Appl. Phys.*, **60**(1986), 2636.
- [3] B. F. Levine et al., *Appl. Phys. Lett.*, **50**(1987), 1192.
- [4] G. Hasnain et al., *Appl. Phys. Lett.*, **54**(1989), 2515.
- [5] L. C. West and S. J. Eglash, *Appl. Phys. Lett.*, **46**(1985), 1156.
- [6] B. F. Levine et al., *Appl. Phys. Lett.*, **54**(1989), 2704.
- [7] Chen Zhenghao et al., *Chinese Phys. Lett.*, **7**(1990), 319.
- [8] 潘少华等,量子电子学, **7**(1990), 3.

1) Cui Dafu et al., *Infrared Phys.*, to be published.