

电子波在量子阱势垒上方的局域和束缚

——一种法布里-珀罗电子滤波器

徐士杰 刘 剑 郑厚植

(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 最近, 电子态在量子阱势垒上方的局域和束缚已为实验证实. 这是电子的波动性和干涉效应的一种直接实验验证. 试图介绍这种所谓“正能量”束缚态的形成机制, 以引起我国学者注意.

关键词 电子态, 量子阱, 局域化, 束缚态

量子力学诞生不久, Newmann 等^[1]提出了一个惊人的设想, 一些振荡型势结构能够支持能量在势垒上方的束缚态, 这些束缚态也就是在能量连续区的空间限制态, 它们是通过电子波的衍射干涉形成的. 尽管后来有人建议这种特别的势结构可以在某些原子和分子系统中找到, 但这种特殊的势函数仍然被看成是纯数学的特例, 直到分立化的电子态在半导体量子阱结构中观察到^[2,3]以后, 才有人提出利用半导体超晶格可以建造这种能支持所谓“正能量”束缚态的势结构. 最近, 贝尔实验室的一些科学家^[4,5]首次在特别设计的半导体量子阱结构中观察到如此的束缚态, 这不但具有物理学上的重要意义, 而且将进一步促进电子学和光子学之间相似性的研究, 为开发和利用电子的波动本质开辟了一条道路. 下面我们将介绍这种特殊束缚态的形成机制, 以及与法布里-珀罗光学滤波器中光波共振态形成机制之相似之处.

1 电子态在量子阱势垒上方的局域化机制

首先让我们来考虑一个有厚垒的窄量子阱结构, 如图 1(a) 所示. 设计阱宽和垒高, 使量子阱内仅有一个束缚能级 E_1 , 在能量高于势垒的地方, 仅有散射态 (scattering state), 这些散射态的波函数是扩展的. 在某些特定能量

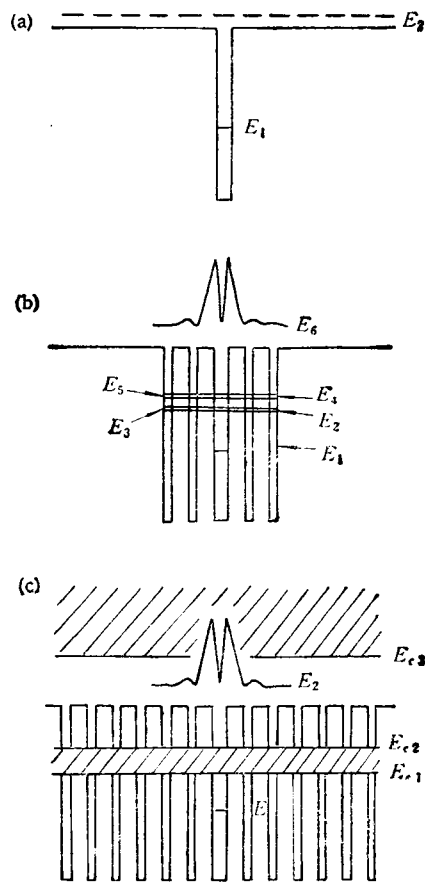


图 1 导带结构示意图

(a) 参考量子阱; (b) 两个周期为 $\lambda/4$ 的垒堆夹住一个量子阱的复合量子阱; (c) 六个周期为 $\lambda/4$ 的垒堆夹住一个量子阱的复合量子阱

处, 比如阱宽是这些能量相应德布罗意半波长的整数倍时, 我们可以看到散射态在量子阱区

上方表现出所谓传播共振 (transmission resonance) 现象, 也就是说, 电子在这些能量的阱区上方存在几率是增高的, 但波函数并不像阱区限制态那样在全区是指指数衰减的, 而是类似于平面波那样是扩展的. 然而, 如果我们使用厚度等于 $m\lambda/4$ 的垒堆“夹住”量子阱[图 1(b)–(c)], 那么就可以使上述那些特定散射态局域在量子阱上方. 这里 λ 是那些特定能量散射态电子的德布罗意波长, m 是一个奇整数. 波长为 λ 的电子波在两个 $\lambda/4$ 厚的垒堆之间来回反射, 反射波之间的相互干扰就导致在量子阱势垒上方准束缚态的形成, 如图 1(b) 所示. 这种强烈窄化的电子波传播共振机制与用一个法布里-珀罗光学滤波器获得尖锐的光波共振机制是相似的, 在法布里-珀罗光学滤波器中是使用高反射的 $\lambda/4$ 波片来获得光波共振的. 因此, Capasso 等人使用了法布里-珀罗电子滤波器的概念.

在量子阱上方电子态的局域化程度随着垒堆周期数的增加而增加, 即使在只有两个周期垒堆的结构中, 波函数已相当局域化了. 在有足够周期数的超晶格垒堆结构中, 在低温下超晶格垒堆就变成布拉格反射器, 局域化态就变成了束缚态, 如图 1(c) 所示. 同时, 由于超晶格中的强耦合作用, 在超晶格垒下方和上方均有微带 (miniband) 出现, 微带隙 (minigap) 形成, 束缚态 E_2 也可以理解成在超晶格微带隙中的一个深能级, 这个深能级显然是由于在一个周期超晶格中引入一个“人工缺陷”[在图 1(c) 中的中心阱]引起的.

2 实验例证

Capasso 等人^[4,5]设计并用分子束外延 (MBE) 方法生长了 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 材料系统的法布里-珀罗电子滤波器结构, 用红外吸收光谱观察到了电子态在量子阱势垒上方的局域和束缚. 为了实验上的比较, 他们先生长一个参考样品, 这个参考样品是由 20 个周期的 32Å 厚 GaInAs 阱材料层和 150Å 厚

AlInAs 垒材料层组成, 其中阱材料在生长过程中掺 Si (大约 $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$). 掺 Si 的目的是为了提供光吸收所需的载流子. 在这样的多量子阱结构中, 各阱之间由于厚垒的阻隔而耦合很弱, 因此各量子阱基本上是独立的, 其单个阱的能带结构如图 1(a) 所示. 阱宽 32Å 垒高 $\Delta E_c = 0.5\text{eV}$ 的量子阱内仅有一个束缚能级 $E_1 = 204\text{meV}$, 势垒上方是扩展态. 阱宽一定, 我们就可以求出那些波函数在量子阱区上方具有传播共振特征电子态的能量, 这些特定态的能量满足下面的公式:

$$k_w L_w = n\pi, \quad (1)$$

式中 L_w 是阱宽, $k_w = \sqrt{2m_w^*(E)E}/\hbar$ 是阱材料的电子波数, $k_w = 2\pi/\lambda$, λ 是能量 E 所对应的电子德布罗意波长, E 是能量, $m_w^*(E)$ 是与能量有关的有效质量, n 是整数. (1) 式就是我们在上一节中所讨论的阱宽是那些具有传播共振特征电子态相应德布罗意半波长的整数倍的具体化.

从(1)式可以求出 32Å 宽 InGaAs 量子阱势垒上方第一个具有传播共振特征电子态能量 $E_2 = 560\text{meV}$, 这个能量显然高于量子阱 0.5eV (500meV) 的势垒高度. 为了使 E_2 态成为一个局域化态, 需要设计周期宽度等于 E_2 能量相应德布罗意波长 $1/4$ 的超晶格来对它进行限制. 超晶格阱宽 d_w 和垒宽 d_b 分别满足下面的公式:

$$k_w d_w = m\pi/2, \quad (2)$$

$$k_b d_b = m\pi/2, \quad (3)$$

这里 $k_b = \sqrt{2m_b^*(E_2)(E_2 - \Delta E_c)}/\hbar$ 是垒材料在能量 E_2 处的波数, m 是奇整数. 由于(1)式和(2)式中的 k_w 完全相同 (当然也可用不同的材料, 那样两者的 k_w 将不同), 我们立即可以得到 $d_w = L_w/2 = 16\text{Å}$. 利用(3)式可以求出 $d_b = 39\text{Å}$. 图 1(b) 和 (c) 分别是由两个周期和六个周期为 $\lambda/4$ 厚超晶格加在 32Å InGaAs 量子阱两侧的能带结构. 图 2 给出的是参考样品及有一个周期为 $\lambda/4$ 厚超晶格限制层和有两个周期为 $\lambda/4$ 厚超晶格限制层样品的室温吸收谱. 从图 2 可以看出, 参考样品的吸收峰在

300meV 处,其半高宽 (FWHM) 约为 50meV, 而有 $\lambda/4$ 厚超晶格限制层的两个样品的吸收峰峰值在 350meV, 这与理论预计的 $E_2 - E_1 = 346\text{meV}$ 吻合得非常好, 而且随着限制层超晶格周期数的增加,吸收峰位置保持不动,但其半高宽明显减小. 有两个和六个周期 $\lambda/4$ 厚限制层样品的吸收峰的半高宽已降至约 20meV. 在 10K 温度下,这两个样品吸收峰的半高宽约为 10meV. 这些特征也是和理论预计相符合的. 图 3 给出了理论计算结果. 实验和理论的高度

一致,清楚地证明了电子态在这些特别设计的量子阱结构中局域和束缚于势垒上方.

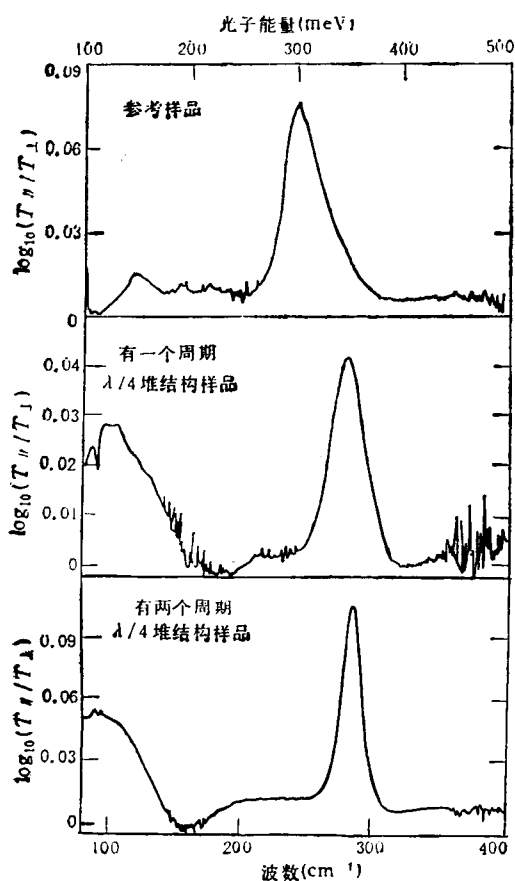


图 2 参考样品及有一个周期和两个周期为 $\lambda/4$ 的垒堆样品的室温吸收谱

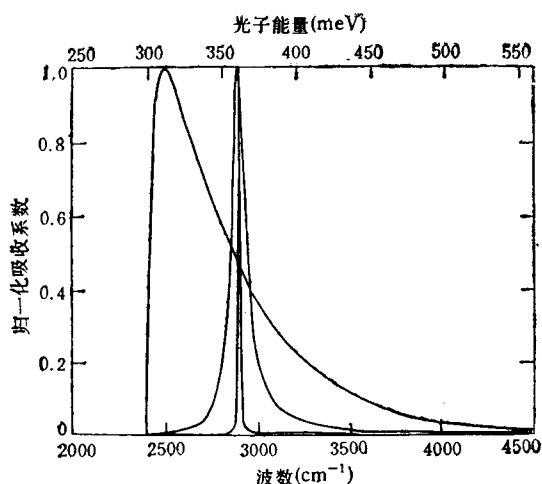


图 3 理论计算出的参考样品及有一个和两个周期为 $\lambda/4$ 的垒堆样品的归一化吸收系数

用类似于光学上法布里-珀罗光学滤波器的机制获得了电子态在量子阱势垒上方的局域和束缚,这不仅具有重大的物理意义,而且显然有着重要的应用价值^[6,7]. 我们相信,这一重要的研究工作的突破将促进电子波动本质的研究利用,致使越来越多的光学概念应用于量子化电子器件的设计和制造上.

参 考 文 献

- [1] J. Von Neumann and E. Wigner, *Phys. Z.*, **30** (1929), 465.
- [2] L. Esaki and L. L. Chang, *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974), 495.
- [3] R. Dingle, W. Wiegmann and C. H. Henry, *Phys. Rev. Lett.*, **33**(1974), 827.
- [4] F. Capasso et al., *Nature*, **358**(1992), 565.
- [5] C. Sirtori et al., *Appl. Phys. Lett.*, **61**(1992), 898.
- [6] M. Zahler et al., *Appl. Phys. Lett.*, **61**(1992), 949.
- [7] G.N. Henderson et al., *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993), 1432.