

GaAs/GaAlAs 单量子阱光调制器电学行为

周 洁 封松林 卢励吾 孙景兰*

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家实验室, 北京, 100083)

摘要 利用导纳谱研究了 GaAs/GaAlAs 单量子阱光调制器的电学行为, 观察到了量子阱中电子或空穴子能带的“场致去局域化”的物理现象.

关键词 量子阱, 导纳谱, GaAs/GaAlAs, 子能带.

引言

用半导体量子阱超晶格结构材料 GaAs/GaAlAs 制备的光调制器具有阈值电流低、阈值电流对温度不敏感等优点, 因此可用来制备电吸收光调制器的光开关. 这类光调制器的结构有 GaAs/GaAlAs 单量子阱双异质结和 GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱等, 本文利用 20 K 温度下的变频导纳谱技术研究了分别限制单量子阱结构光调制器的电学行为, 这类行为尚未见有报道.

1 实验

1.1 样品结构

用 MOCVD 方法生长了分别限制 GaAs/GaAlAs 单量子阱结构材料, 量子阱宽度为 200 Å, 未经掺杂的量子阱两侧为 2000 Å 的未掺杂渐变折射率的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 的波导层, 其 Al 组分 x 从阱边的 0.2 线性地增大到限制层边处的 0.6, 限制层由铝组分 x 为 0.6 和厚度为 1.5 μm 的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层构成 (参见图 1), p 层与 n 层分别掺有杂质 In+Zn 与 Se, 其浓度分别为 10^{20} cm^{-3} 和 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 采用 AuZn 和 AuGeNi 合金化作为 p 层和 n 层的欧姆电极, 测试样品切成 $300 \times 200 (\mu\text{m})^2$ 的芯片, 然后将芯片烧结在铜的热沉上制成器件进行测量.

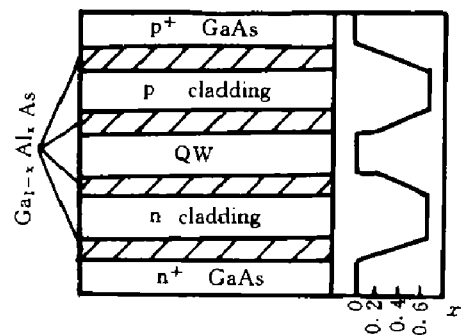


图 1 样品结构
Fig. 1 sample structure

* 中国科学技术大学研究生院

本文 1993 年 10 月 5 日收到, 修改稿 1993 年 11 月 22 日收到

1.2 测量

采用 4192A 型 LF 阻抗分析仪和 10 K 光学恒温器组成的测试系统对样品进行 20 K 温度下不同频率 (25 kHz~10 MHz) 导纳谱测量.

2 结果与讨论

在 200 Å 单量子阱结构的样品中, 当负偏压由零变为 15 V 时, 由 $C-V$ 测量得到的表现载流子浓度 n 约为 $4.0 \times 10^{16} \sim 5.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 在 20 K 温度下不同频率 ω 的 $C-V$ 曲线上 (参见图 2) 出现了数个明显的平台, 这些平台的出现似乎与频率无关. 相应地在 $G-V$ 曲线上出现了数个电导峰 (参见图 3), 但与电导峰相应的电导变化 ΔG 值却与频率密切相关, 当频率从 25 kHz 变化到 10 MHz 时, ΔG 值的变化竟高达 6 个数量级. 这类光调制器结构的样品实际上是 pin 管, 因此可将它看成是一个具有掺杂分布尾的 p-n 结, 其间有一个本征层 i 夹在 p 层和 n 层之间, 而量子阱在 i 区的中心. 当外加偏压时, 电压基本上降在 i 区, 随着外加偏压的增加, i 区的电场强度随之增加, 并分别向 n 区与 p 区耗尽, 至于不同偏压下各区耗尽层的大小则与各区的浓度有关. 如 i 区呈弱 p 型或弱 n 型, 分别形成 pp^-n 结或 pn^-n 结. 由于结处于反偏工作状态, 电场强度则采用耗尽层近似计算. 关于量子阱中的电场强度, 我们采用 $E_0/2$ 的数值 (其中 $E_0 = V/d_i$, d_i 为 i 区的宽度), 在外加偏压 10 V 的情况下, 相应场强约为 $1.2 \times 10^5 \text{ V/cm}$.

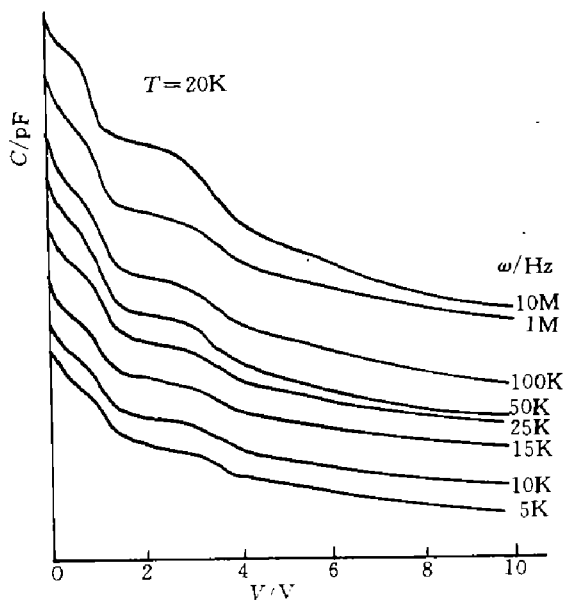


图 2 20 K 时不同频率下的 $C-V$ 曲线
Fig. 2 The $C-V$ curves for different frequency at 20 K

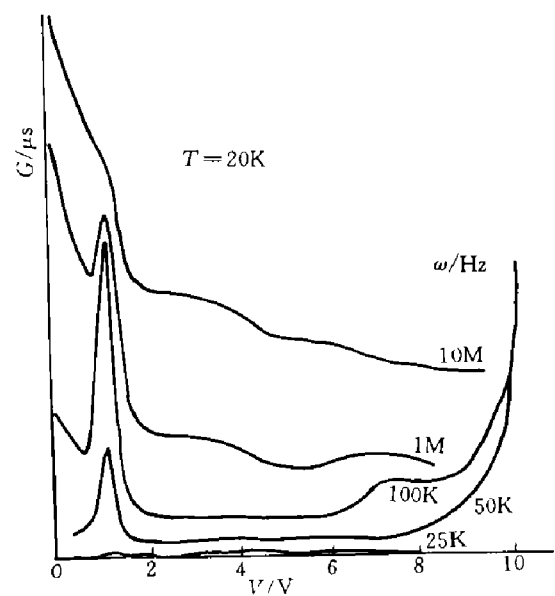


图 3 20 K 时不同频率下的 $G-V$ 曲线
Fig. 3 The $G-V$ curves for different frequency at 20 K

对于这种结构的样品, GaAs 带边 (导带底或价带顶) 为量子阱的阱底或阱顶, 而两侧的 GaAlAs 则应为此量子阱的势垒, 当 $x < 0.45$ 时, 量子阱的导带底为 GaAlAs 的 Γ

带, 当 $x > 0.45$ 时, 量子阱的导带底为 X 带. 由于组分 x 值是从 0.2 到 0.6 渐变的, 而 Γ 带的能量随 x 值的增加而增加, 即 $x=0.2$ 时的 Γ 带能量应为最低. 当 $x > 0.45$ 时, X 带的能量也随 x 值的增加而增加, 此时只要处于 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($x \geq 0.2$) 垒下的量子阱中的各个子能态都是局域态, 于是这些处于 GaAs 带底 (带顶) 以上 (以下) 的子能态都不会对空间电荷有贡献. 随着外加偏压的增加, 电场强度相应增加. 在电场中, 量子阱中的电子或轻、重空穴子带的电荷密度分布会发生偏移. 有效质量越大, 密度分布偏移越大, 造成子能态能量的升高 (电子) 或降低 (空穴)^[1], 导致这些原处于局域态的子能带逐渐成为扩展态, 于是对空间电荷就有贡献. 由于量子阱中的子能态是量子化的, 因此各子能态对空间电荷的贡献在 $C-V$ 曲线上呈现出台阶状变化. 电容台阶的出现意味着一个子能态对空间电荷贡献的结束, 两个相邻电容台阶间电容的变化意味着一个子能态对空间电荷的贡献过程, 此时相应地在 $G-V$ 曲线上出现峰, 从图 2、图 3 相应的电场范围可清楚地看到这些峰, 我们将此现象称为“场致去局域化”.

由于样品是 pin 结构, 因此电子的子能态或空穴的子能态都会对空间电荷有贡献, 这里就出现如何分辨的问题. 我们提出了一个粗浅的分辨方法, 即由 $C-V$ 数据, 采用耗尽层近似, 得到通常的表观载流子浓度分布图 (参见图 4), 由图可见有 4 个浓度峰. 我们知道, 这样处理数据的结果, 在 $C-V$ 平台区会使表观载流子浓度分布图上出现峰值, 如前所述, 这意味着一个子能态对空间电荷贡献的结束, 即对应于子能态从局域态成为扩展态的终态. 而在浓度 n 与结深 d 的关系图上, 两峰间对应的“谷”才是子能态从局域态到扩展态的转化过程, “谷”存在的电场范围与 $G-V$ 峰相应的电场范围是一致的. 这样我们可以从 $n-d$ 图上观察到 2 个大谷和 2 个小谷. 我们以谷的半宽度表示谷的大小, 得到 2 个大谷的半宽度几乎相同, 2 个小谷的半宽度也几乎相同. 我们推测, 由于空穴子带的有效质量要比电子子带的有效质量大, 估计 2 个大谷是由空穴子能带贡献的, 而 2 个小谷是由电子子能态贡献的, 由谷的半宽度的比值推测, 导带子能态可能是 L 带或 X 带. 因此, 在这种结构的样品中施加电场后, 似乎先是电子子能态的激发态的去局域化, 随着电场强度的增加, 依次为空穴的子能态、空穴的子能态, 然后又是电子子能态的去局域化.

对于 $G-V$ 曲线在不同频率下峰值 ΔG 的大小随频率增加而增大的这一实验现象, 我们的估计是: 在电场下子能态间的跃迁也是一个弛豫过程, 因此越接近共振跃迁频率, 则对空间电荷的贡献就越大, 相应地会对不同频率下的 $G-V$ 曲线具有明显的影响.

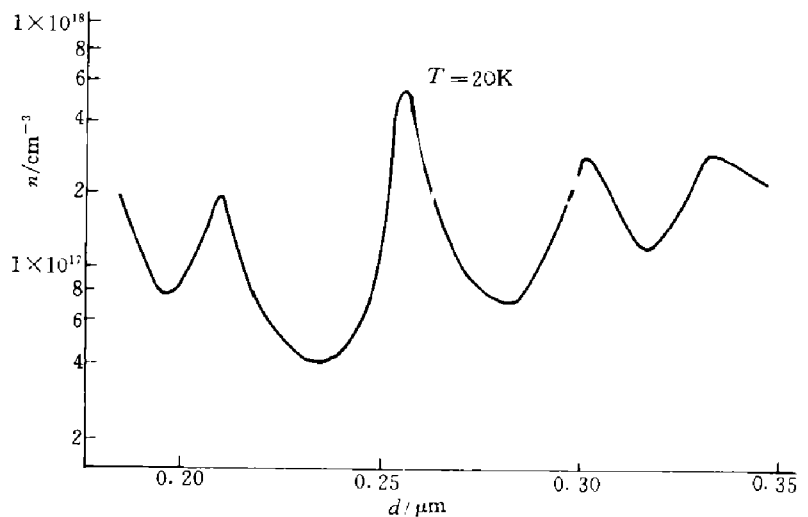


图 4 表观载流子浓度分布图
Fig. 4 The profile figure of apparent carrier concentration

对于 $G-V$ 曲线在不同频率下峰值 ΔG 的大小随频率增加而增大的这一实验现象, 我们的估计是: 在电场下子能态间的跃迁也是一个弛豫过程, 因此越接近共振跃迁频率, 则对空间电荷的贡献就越大, 相应地会对不同频率下的 $G-V$ 曲线具有明显的影响.

关于这一物理现象, 准备结合理论计算作进一步证实.

综上所述, 我们对 200 Å 的 GaAs/AlGaAs 单量子阱光调制器, 通过导纳谱技术观察到了量子阱中子能态的“场致去局域化”现象.

参考文献

- 1 夏建白, 黄昆. 物理学报, 1988, 37(1):1

ELECTRICAL BEHAVIOR OF LIGHT MODULATOR IN GaAs/GaAlAs SINGLE QUANTUM WELL STRUCTURE

Zhou Jie Feng Songlin Lu Liwu Sun Jinglan*

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

Abstract The electrical behavior of light modulator in GaAs/GaAlAs single quantum well was investigated by using admittance spectroscopy technique. The physical phenomenon of delocalization in the electron and hole subbands of quantum well under electric field was observed.

Key words quantum well, admittance spectroscopy, GaAs/GaAlAs, subband.

*Department of Physics, Graduate School, Chinese Academy of Sciences