

非对称耦合双阱 P-I-N 结构的光伏谱研究

徐士杰* 江德生 张耀辉 罗昌平 罗晋生*

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

摘要: 首次报道了 GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As/GaAs (50Å/40Å/100Å) 非对称耦合双阱 P-I-N 结构的室温光伏谱, 清楚地观察到双阱的轻、重空穴激子峰, 这些激子峰的能量位置与光荧光和光电流谱得到的数据吻合得很好, 而且光伏谱谱形非常类似于光电流谱, 呈现清晰的台阶状结构. 此外, 还观察到轻、重空穴激子跃迁对激发光偏振态的依赖, 并讨论了产生光伏谱的机制.

关键词: 光伏谱, 量子阱, GaAs/AlGaAs.

引言

最近, 非对称耦合双阱结构受到特别重视^[1~8], 我们研究小组曾在 GaAs/AlGaAs 非对称耦合双阱 P-I-N 结构上观察到电子非共振隧穿速率对激发光功率的异常依赖^[9], 电子的共振隧穿和 LO 声子辅助隧穿现象^[10], 以及由于空穴能级的共振耦合所引起的“阱内”和“阱间”跃迁的反交叉过程. 本文报道了 GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As/GaAs (50Å/40Å/100Å) 非对称耦合双阱 P-I-N 结构的室温光伏谱. 在测得的光伏谱中可清楚地看到来自于双阱的轻、重空穴激子峰, 这些激子峰的能量位置与我们用光电流和光荧光谱所得到的数据吻合得很好, 而且光伏谱谱形呈现清晰的台阶状结构. 此外, 我们还采用从样品侧面激发的方法, 观察到轻、重空穴激子跃迁对于激发光偏振状态的不同依赖关系. 最后, 根据测量结果讨论了产生光伏效应的机制.

1 实验

耦合双阱结构用分子束外延 (MBE) 生长在 Si-N⁺ 掺杂的 (100) 面 GaAs 衬底上. 非对称耦合双阱结构包括 200Å Al_{0.35}Ga_{0.65}As 层、100Å GaAs 量子阱、40Å Al_{0.35}Ga_{0.65}As

本文 1992 年 10 月 19 日收到, 修改稿 1993 年 2 月 12 日收到.

* 西安交通大学电子工程系, 陕西, 西安, 710049.

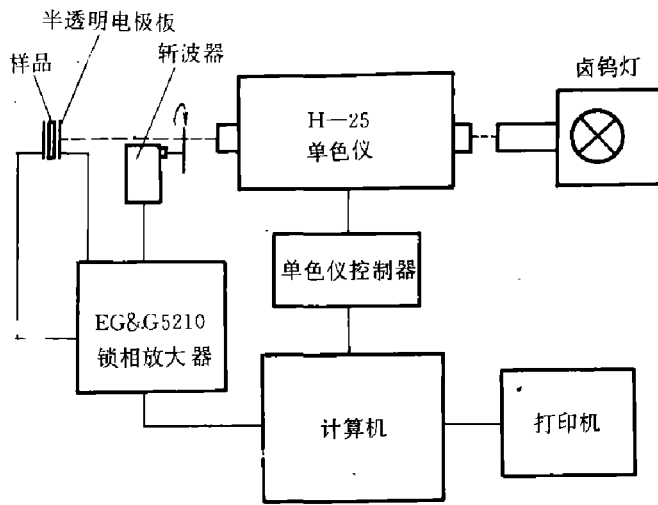


图 1 光伏谱的测量装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic spectroscopy measurement system

薄垒层, 50\AA GaAs 量子阱和 200\AA $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 层. 最后生长 Be-P^+ 掺杂 GaAs 上接触层, 构成一个 P-I-N 结构. I 区总厚度为 $0.84\ \mu\text{m}$.

光伏谱的测量采用电容耦合方式, 测量装置如图 1 所示. 测量温度为室温 (300 K). 单色仪驱动和数据采集都由计算机控制. 正面入射是指从单色仪中分出的光通过半透明电极片照在样品的 $\text{P}^+\text{-GaAs}$ 面, 侧面入射是指光直接照在样品的侧面. 两个电极板上感生的电信号经 EG&G Model 5210 锁相放大器放大后由计算机采集. 这种方法的光伏谱测量要比光电流谱简单, 样品无需制备成二极管.

2 结果与讨论

图 2 给出了测量得到的非对称耦合双阱 P-I-N 结构的光伏谱. 曲线 *a* 和 *b* 分别是激发光从样品正面和侧面激发所产生的光伏谱. 从谱上我们可以看到清楚的激子峰, 谱形呈

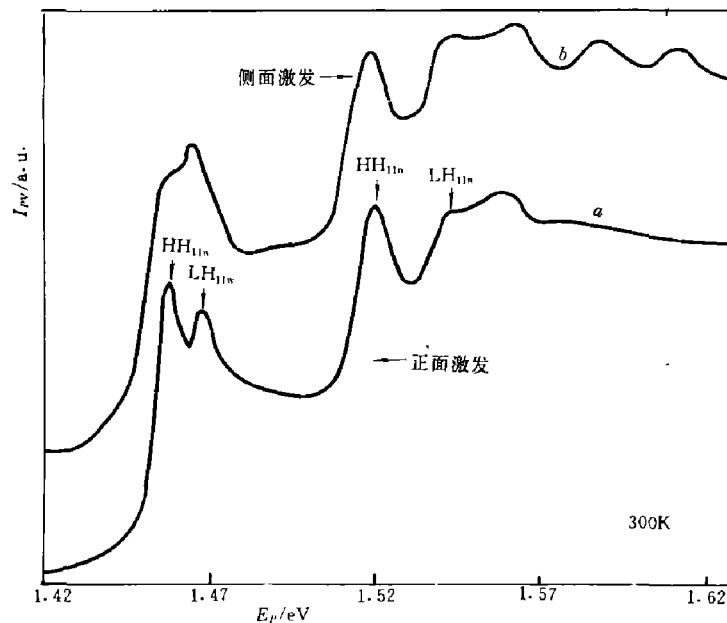


图 2 非对称耦合双阱 P-I-N 结构的光伏谱
Fig. 2 Photovoltaic spectra of asymmetric coupled double-quantum well P-I-N structure at room temperature

现台阶状结构. $HH_{11w(n)}$ ($LH_{11w(n)}$) 代表宽阱 (窄阱) 重空穴基态 (轻空穴基态) 到宽阱 (窄阱) 电子基态的跃迁. 侧面激发与正面激发相比, LH_{11w} 峰强度明显高于 HH_{11w} , 这是由于 LH_{11w} 和 HH_{11w} 对激发光偏振态的不同依赖性造成的:

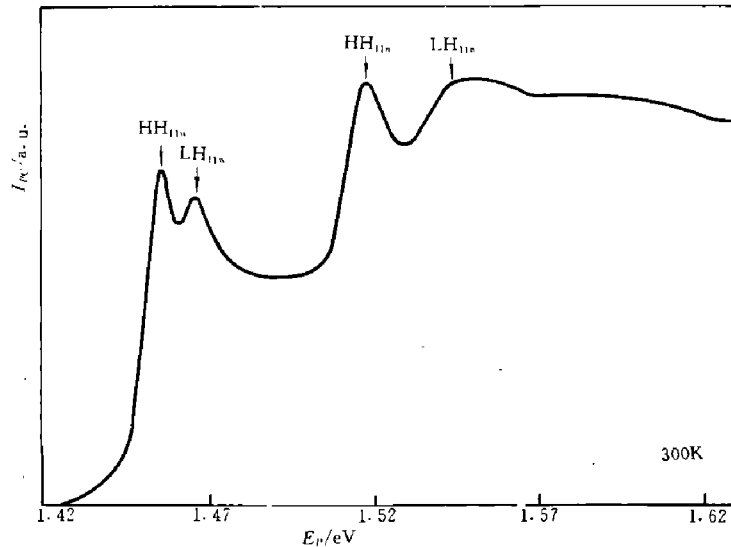


图 3 非对称耦合双阱 P-I-N 二极管在零偏压下的光电流谱
Fig. 3 Photocurrent spectra of asymmetric coupled double-quantum well P-I-N diode at zero-bias at room temperature

图 3 给出的是非对称耦合双阱 P-I-N 二极管的光电流谱. 光电流谱的谱结构与从正面激发产生的光伏谱的谱结构十分相似, 这表明我们的光伏谱测量是非常成功的. 另外, 我们还对样品进行了室温下的光荧光测量. 表 1 给出用这 3 种测量手段所得到有关跃迁峰的能量位置数据. 从表 1 的数据可以看出, 利用相对来说简单得多的光伏谱测量得到的结果与光电流和光荧光测量的结果吻合得相当好. 测量得到的室温光伏谱能反映出耦合双阱的能带结构和台阶状态密度分布, 这与样品的能带结构和产生机制是密切相关的.

表 1 样品的光伏、光电流和光荧光测量结果
Table 1 Measured results of photovoltaic, photocurrent and photoluminescence spectra

	HH_{11w} (eV)	LH_{11w} (eV)	HH_{11n} (eV)	LH_{11n} (eV)
光伏 (正面激发)	1.458	1.468	1.522	1.545
光伏 (侧面激发)	1.457	1.467	1.518	1.544
光电流	1.457	1.467	1.518	1.545
光荧光	1.456	1.464	1.517	—

现在我们来分析这种非对称耦合双阱 P-I-N 结构的光伏谱产生机制. 由于我们的结构是 P-I-N 结构, 因此在 I 区有一个内建势形成的电场. 这个内建电场的大小可以由公式

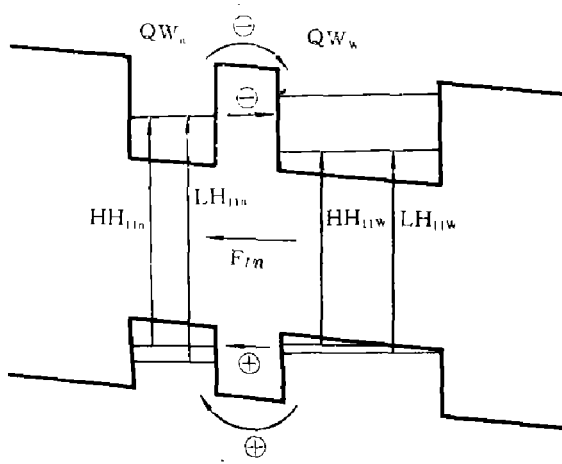


图4 有一个内建电场作用下的非对称耦合双阱的能带结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the energy-band structure of asymmetric coupled quantum well P-I-N structure

V_b/d_{in} 估算. V_b 取为 1.4 V, d_{in} 为 $0.84 \mu\text{m}$, 那么内建电场 F_{in} 大小为 $1.67 \times 10^4 \text{ V/cm}$. 在这一电场作用下, 宽阱和窄阱的重空穴基态接近于共振, 电子能态处于非共振状态^[9]. 图 4 给出非对称耦合双阱 P-I-N 结构的能带结构示意图, 垂直箭头标出 4 个允许的跃迁过程, 另外光生载流子的热发射和隧穿过程也示于图中.

原则上只要有光生载流子的阱间分离就能在量子阱的生长方向 (一般称为 Z 方向) 上产生光伏信号. 在我们的非对称耦合双阱结构中: 在低温条件下, 主要是光生电子空穴在相反方向上的隧穿造成电子和空穴的阱间分离^[11]; 在室温条件下, 除隧穿效应之外, 还有光生电子空穴的热发射造成电子和空穴的阱间分离. 当激发光的能量等于宽阱电子基态和重空穴基态的能量差时发生共振吸收, 此时仅在空阱内有光生电子-空穴对产生.

宽阱电子基态上的电子通过隧穿到窄阱的几率几乎为零, 这是因为宽阱基态上的电子受到内建电场的抑制 (注意, 内建电场方向是从宽阱指向窄阱方向), 而且宽阱电子基态能级远低于窄阱电子能态能级 (约 60 meV). 那么此时只有依赖空穴的隧穿才能造成电子和空穴的阱间分离. 尽管在同等条件下, 由于重空穴的有效质量大得多, 因此比电子的隧穿几率要小得多, 但对于我们的样品, 由于在内建电场作用下宽阱和窄阱的重空穴基态接近于共振状态, 因此空穴从宽阱到窄阱的隧穿几率有一个明显增加, 而且在较高的温度下空穴的隧穿会更有效^[6]. 当激发光能量上升到与 LH_{11w} 能量相等时, 共振吸收产生的空穴可以直接从宽阱轻空穴基态隧穿到窄阱重空穴基态, 也可以先弛豫到重空穴态, 然后再共振隧穿到窄阱. 当激发光能量进一步上升到与 HH_{11w} 或 LH_{11w} 能量相等时, 共振吸收产生的电子和空穴主要是依赖电子从窄阱到宽阱的隧穿来实现阱间分离. 窄阱电子基态上的电子有两个渠道隧穿到宽阱, 一是以发射声子方式隧穿到宽阱基态, 二是吸收声子通过宽阱第一激发态隧穿. 在 300 K 温度下, 吸收声子辅助隧穿可能会起重要作用. 热发射也是产生光伏信号的一个机制, 遗憾的是我们没有低温光伏谱数据, 不能区分隧穿和热发射哪一个是产生光伏效应的主导机制.

从图 2 可看出, 激发光从样品正面和侧面激发所得到的光伏谱存在明显的差别, 最主要的差别是 HH_{11w} 和 LH_{11w} 跃迁峰的相对强度显著不同. 正面激发时, 激发光的电场矢量垂直于 Z 方向, HH_{11w} 峰强度明显高于 LH_{11w} 峰强度; 侧面激发时, 激发光的电场矢量有一半平行于 Z 方向, 另一半垂直于 Z 方向 (激发光是圆偏振, 我们没有使用偏振片), LH_{11w} 峰强度反而高于 HH_{11w} 峰强度. 从我们的光伏谱谱形能清楚反映台阶状态密度分布和能带结构来看, 假定光伏信号正比于光学跃迁强度是合理的, 那么, 光伏谱对于激发光偏振状态的依赖显然是由光学跃迁强度随激发光偏振状态的变化所决定. 光学跃迁强度由带间跃迁矩阵元的平方、电子-空穴包络函数的交叠积分和联合态密度三者的乘积给出.

在布里渊区中心 ($k=0$) 附近, 当激发电场垂直于 Z 方向时, 重空穴 ($\vec{J}_z = \pm 3/2$) 和轻空穴 ($\vec{J}_z = \pm 1/2$) 子带到电子子带的带间跃迁矩阵元平方分别正比于 $3/4$ 和 $1/4$; 而激发电场平行于 Z 方向时, 重空穴和轻空穴的跃迁矩阵元平方则分别正比于 0 和 1 ^[8,11]. 我们的光伏谱测量结果基本上反映了轻、重空穴激子跃迁对于激发光偏振态的上述依赖关系, 但窄阱的 HH_{11w} 和 LH_{11w} 激子跃迁峰的相对强度随激发光偏振状态的变化却没有宽阱的强烈, 这是由于窄阱和宽阱之间的强耦合使得窄阱的 HH_{11n} 和 LH_{11n} 激子行为向宽阱的 HH_{22w} 和 LH_{22w} 激子行为靠拢的缘故. 也就是说, 我们必须将宽阱和窄阱看成一个整体^[5], 而不能将两个阱简单叠加.

3 结论

根据我们目前掌握的资料, 测得能清晰反映二维体系台阶状态密度分布和能带结构的非对称耦合双阱 P-I-N 结构的室温光伏谱尚属首次, 而且我们还观察到轻、重空穴激子峰对激发光偏振态的不同依赖关系. 这些结果表明利用相对简单的光伏谱来研究非对称耦合双阱 P-I-N 结构的光电性质是可行的.

参考文献

- 1 Sauer R, Thonke K, Tsang W T. *Phys. Rev. Lett.*, 1988,**61**:609
- 2 Livescu G, Fox A M, Miller D A B et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1989,**63**:438
- 3 Oberli D Y, Shah J, Damen T C et al. *Phys. Rev.*, 1989,**B40**:3028
- 4 Matsusue T, Tsuchiya M, Schulman J N et al. *Phys. Rev.*, 1990,**B42**:5719
- 5 Lee J, Vassel M O, Koteles E S et al. *Phys. Rev.*, 1989,**B39**:10133
- 6 Nido M, Alexander M G W, Rühle W W et al. *SPIE*, 1990,**1268**:177
- 7 Roskos H G, Nuss M C, Shah J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1992,**68**:2216
- 8 Schmitt-Rink S, Chemla D S, Miller D A B. *Advances in Physics*, 1989,**38**:89
- 9 Xu Shijie, Jiang Desheng, Li Guohua et al. *Superlattices Microstruct.*, 1993
- 10 Xu Shijie, Jiang Desheng, Li Guohua et al. 待发表
- 11 江德生, 刘大欣, 张耀辉等. *半导体学报*, 1992,**13**:333

PHOTOVOLTAIC SPECTRA OF AN ASYMMETRIC COUPLED QUANTUM WELL P-I-N STRUCTURE

XU SHIJIE*, JIANG DESHENG, ZHANG YAOHUI,
LUO CHANGPING, LUO JINSHENG*

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

Abstract: Photovoltaic spectra of a GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As/GaAs (50Å/40Å/100Å) asymmetric coupled quantum well P-I-N structure at room temperature are reported for the first time. The photovoltaic spectra clearly show the "step-like" shape and distinct excitonic peaks from the two quantum wells. The energy positions of these excitonic peaks are in agreement with that of the photocurrent and photoluminescence spectra. In addition, the polarization of the heavy- and light-holes excitonic transitions in the photovoltaic spectra has been observed. The mechanism yielding photovoltaic spectra is discussed in the paper.

Key words: photovoltaic spectroscopy, quantum well, GaAs/AlGaAs.

*Department of Electronic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China.