

GaAs/GaAlAs 量子限制 Stark 效应及 自电光双稳现象的实验研究*

吴荣汉 段海龙 曾一平 王启明 林世鸣
孔梅影 张权生 江德生 谢茂海

(中国科学院半导体研究所, 北京)

1989 年 9 月 26 日收到

我们研制了 GaAs/GaAlAs 多量子阱 pin 结构的 SEED 器件。分析了器件的光电流光谱、光电流-电压特性。对于如何实现器件光学双稳态工作的有关问题进行了讨论。

主题词 光双稳, 多量子阱器件, 自电光效应

一、引言

量子限制 Stark 效应研究在外加电场作用下, 超晶格量子阱中的量子化能级(包括二维自由激子)的能量及跃迁几率的变化。研究这种效应不但具有深刻的物理意义, 而且在半导体光电子器件方面, 具有重要的应用前景(例如光双稳, 光开关, 光相位及幅度调制, 激光波长调谐等)。目前, 由于光通讯及光信息处理实际应用需要, 对 GaAs/GaAlAs 及 GaInAsP/InP 超晶格量子阱的 Stark 效应的研究十分活跃, 并取得重大进展^[1-3]。

自电光效应 (Self Electro-optic Effect) 指的是利用量子限制 Stark 效应以及器件(或组件)的适当组合设计, 使这种电场效应在光的作用下得以增强, 形成正反馈。当这种正反馈达到一定强度时, 输出信号(透射光、反射光等)相对于输入光信号而言, 形成开关和双稳输出。这种器件的开关、双稳作用具有电光混合的特点, 集光接收及调制器为一体的功能。其组合方式灵活多样, 功耗极小, 时间也可以很快。因此, 应用前景广阔^[4]。

本文主要讨论利用光电流谱研究量子限制 Stark 效应及基于自电光效应的电光双稳、开关现象的有关问题, 并给出实验结果。

二、样品及实验条件

光电流谱测量装置如图 1 所示, 实验所用样品为本所制备的 GaAs/GaAlAs 多量子阱 pin 结构。多量子阱 i 层不掺杂; 其导电类型由剩余杂质决定。器件结构示意如图 2 所示。阱宽一般为 80—120 Å 左右, 势垒宽度约为 60—100 Å。量子阱数为 40—60, 铝含量一般为 0.2—0.4。因此量子阱总厚度不大于 0.6 μm(不含势垒宽度)。在波长 7500—8700 Å 范围, 光吸收长度 $\gtrsim 1 \mu\text{m}$, 对给定的人射光, 可以认为在量子阱中, 光吸收是均匀

* 国家自然科学基金资助项目。

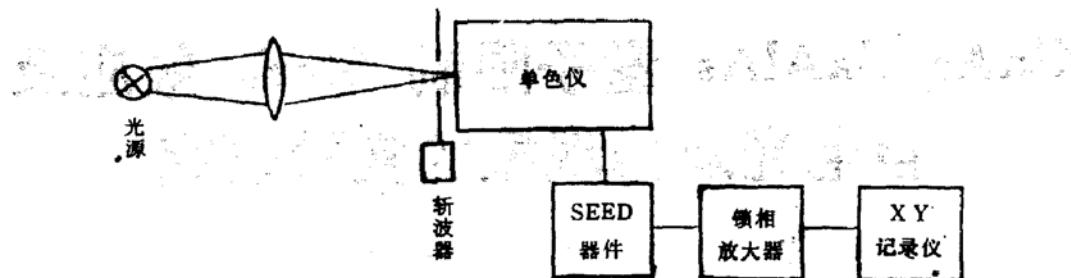


图 1 室温光电流谱测量装置

的，激发载流子是均匀的。采用国产分子束外延系统生长的 i 层，其剩余杂质浓度为 10^{15} cm^{-3} 范围。空间电荷区宽度在亚微米至微米范围。光电流主要来源于空间电荷区激发载流子。因此，在这种情况下，一般而言，反向偏置光电流光谱可以比较直接地反映多量子阱结区的吸收过程及其电场效应。对于我们所用的样品，在给定的 GaAs 量子阱远离激子吸收峰的短波波长范围的均匀激发下，载流子总是局限在量子阱区域。忽略扩散电流，简单的分析可以得到光电流 J 与反向偏置电压 V 的关系近似为表 1。

表 1

空间电荷区	电 场	弱场 $v \ll v_{th}$	强场 $v \leq v_{th}$
$d < W$		J 正比于 V	J 正比于 \sqrt{V}
$d \geq W$		J 正比于 \sqrt{V}	J 与电压无关

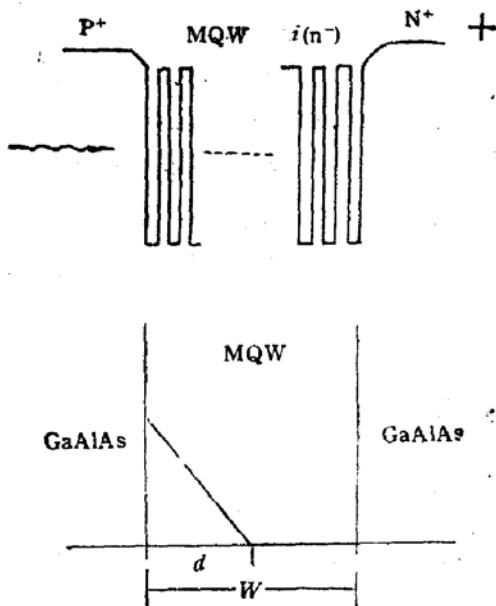


图 2 器件结构示意图

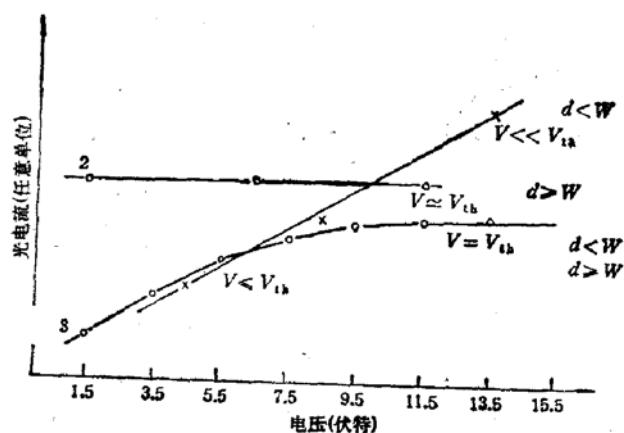


图 3 均匀激发恒定吸收条件下光电流-反向电压曲线

其中， v 为 i 区空间电荷层载流子漂移速度； v_{th} 为载流子热运动速度； d 为空间电荷区宽度； W 为量子阱及量子势垒总厚度。因此，可以根据 $J-V$ 曲线，研究空间电荷区在量子

阱范围的扩展情况。图3给出三个不同样片的J-V曲线。样片1在所加电压范围内,空间电荷区d随电压的增加而增加,但始终满足 $d < W$ (低于击穿电压范围),所以J正比于V。样品2的空间电荷区已延伸出量子阱区,J与V无关。样品3介乎1与2之间,即随偏压的增加,由 $d < W$ 过渡到 $d \geq W$ 。因此,由J随V变化的关系可对器件i区结构及电场分布情况提供有用的信息。

三、量子阱能级光跃迁的电场效应

图4给出不同反向偏置下的轻重空穴激子吸收区的典型光电流谱。

1. 对应 $n = 1, \Delta n = 0$ 的HH1—CB1跃迁,随电场增加向长波移动,并且跃迁强度降低。
2. 对应 $n = 2, \Delta n = 0$ 的HH2—CB2跃迁,随电场增加向短波移动,跃迁强度降低。
3. 对应 $n = 1, \Delta n = -1$ 的HH2—CB1跃迁,随电场增加,稍向长波移动,但跃迁强度明显增加。
4. 对应 $n = 2, \Delta n = -1$ 的LH1(HH1)—CB2跃迁,随电场增加稍向短波移动,但跃迁强度明显增加。

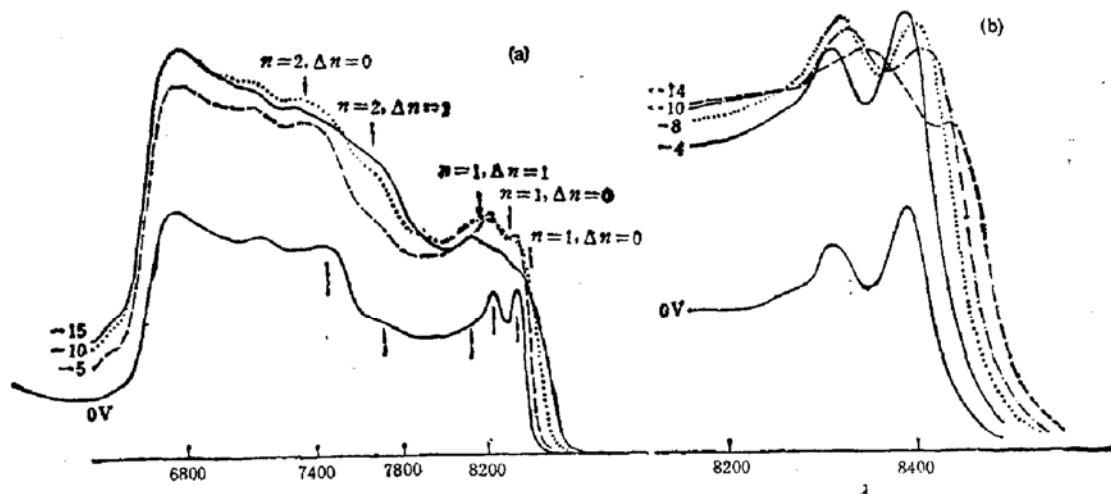


图4 室温光电流光谱
(a) $9000\text{ \AA} > \lambda > 6600\text{ \AA}$; (b) 轻、重空穴激子吸收峰光电流谱放大

这些实验结果与夏建白、黄昆^[3]的理论分析定性地一致。并且,由此可以看到本所生长的大周期数的材料具有较好的结构完态性和均匀性。

在实际的电光型器件应用中,最感兴趣的是最低量子能级的轻、重空穴激子吸收区的电场行为,下节将重点讨论这一点。

四、自电光效应和光电双稳

将MQW pin结构的器件置于光电流可以引起电场正反馈的外线路中(如串接电阻、光二极管、恒流源等),则将引起自电光效应,导致光电开关、双稳作用。测试为如图5,

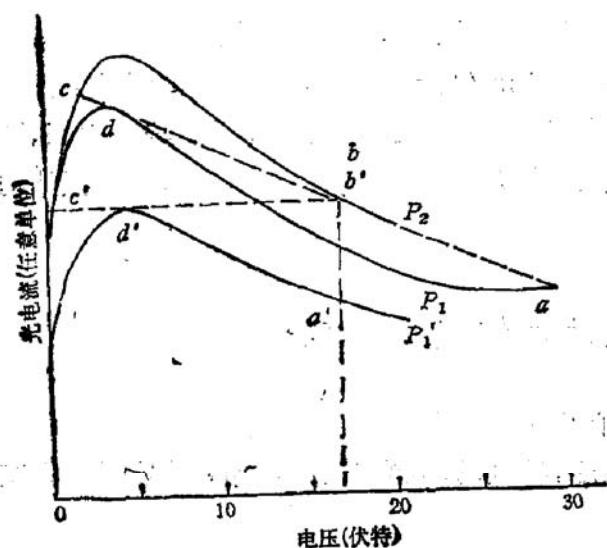


图 5 自电光效应引起光双稳作用的示意图
(负载为光二极管或电阻)

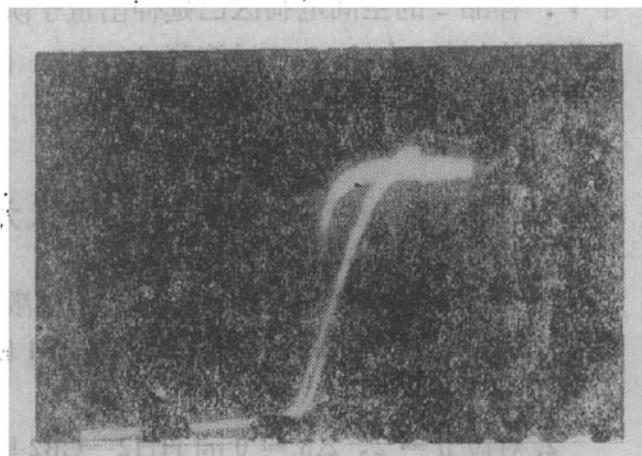


图 6 SEED 器件光电流双稳曲线(硅光二极管负载)
x 坐标输入光强 y 坐标光电流输出

所示。所选取的样品，具有图 3 所示的 3 型特性。结合图 4，对于入射波长位于高偏置时的基态激子吸收峰 ($n = 1$) 的短波侧的条件下，可以得到具有正负斜率的光电流-偏置电压特性，如图 5 曲线所示。在一定的偏置电压范围内，随着光强的增加，光电流也增加，并引起分配于 MQW pin 器件的电压的降低，导致吸收的增加，光电流进一步增加，以至分配于 pin 上的电压进一步降低，直至入射光波长与外电路限制的激子吸收最强点重合为止。在图 5 中对应两个不同入射光的区域内 ($P_2 > P_1$)，当光强由 P_1 增加到 P_2 ，器件工作点将从 b 跳到 c，相应地光电流有一跳增；在光强减小时，工作点将从 c 移至 d，随着光电流进一步减小，直到入射光减小到 P_1 ，工作点从 d 跳到 a，相应光电流有一跳减。 $a'b'c'd'$ 组成光电双稳所特有的迴滞环。在实际测量中，为避免将较高的反向偏压加在自电光器件 (SEED) 上而引起电击穿。电路负载采用一定光照下的光二极管，其负载线如图 5 的直角折线所示。此时，器件的反向偏置电压可大为降低，双稳环由 $a'b'c'd'$ 构成。实测结果如图 6 所示，其中在 $c'd'$ 段的“通态”，由于负载光二极管相当于恒流源，所以通态输出是恒定的。

值得说明的是，自电光效应引起的光电流双稳具有逆时针迴滞特点，而透射光输出光双稳具有顺时针迴滞特点，关于入射光引起的透射光输出双稳的实验结果，我们将于近期内另文发表。

总之，我们成功地研制出 GaAs/GaAlAs 多量子阱 pin 结构的 SEED 器件，本文主要讨论了这种器件的光电特性及光电双稳开关作用。光电流谱测量表明，为实现器件光双稳工作，基态激子在一定偏置范围内具有明显的红移和跃迁强度的降低以及 d 由小于 W 变为大于 W 是实现器件光双稳工作的关键。

作者深深感谢半导体研究所分子束外延组、七室工艺组、光双稳组有关同志在工作中的帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Bur-

- rus. *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 2173(1984).
[2] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus. *Phys. Rev.*, **32**, 1043(1985).
[3] I. Bar-Joseph, G. Sucha, D. A. B. Miller, D. S. Chemla, B. I. Miller and V. Koren. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 51(1988).
[4] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, T. H. Wood, C. A. Burrus, A. C. Gossard and W. Wiegmann, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-21**, 1462(1985).
[5] 夏建白, 黄昆, 物理学报, **37**, 1(1988).

Experimental Investigation on GaAs/GaAlAs Quantum Confined Stark Effect and Self Electro-optic Bistabe Effect

Wu Ronghan, Duan Hailong, Zeng Yiping, Wang Qiming, Lin Shiming, Kong Meiyang, Zhang Quansheng, Jiang Desheng and Xie Maohai

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica Beijing, China)

Abstract

A GaAs/GaAlAs Self Electro-optic Effect Device (SEED) with MQW pin structure has been fabricated. The measurement and analysis of the photocurrent spectrum, photocurrent-voltage Characteristics and photocurrent bistability are given. A discussion on the realization of its bistability is also concerned.

Key words Optical Bistability, MQW device, Self Electro-optic Effect