

GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As 短周期超晶格中的 自电光双稳和多稳态效应*

张耀辉 江德生 李 锋 吴荣汉

半导体超晶格国家重点实验室,中国科学院半导体研究所,北京 100083

周均铭 梅笑冰

中国科学院物理研究所分子束外延实验室,北京 100080

(1992年7月2日收到;1992年10月15日收到修改稿)

我们研究了 GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As(35 Å / 35 Å) 超晶格 p-i-n 二极管在超晶格光吸收边附近的室温光电流随电压的变化。Wannier 局域化导致的 -1h 和 -2h 激子跃迁产生两个光电流负微分电阻区。在由超晶格 p-i-n 二极管组成的 SEED 器件中实现了光电流(吸收)的双稳和三稳态跳变,特别是在无外偏压下也观测到了明显的光电流双稳跳变。

PACC: 7820J, 7135, 6865

1. 引言

半导体超晶格在电场下的 Wannier 局域化效应引起了人们广泛的兴趣^[1-6]。超晶格是由一系列能级简并的耦合量子阱组成,电子态的共振耦合使量子阱中的分立能级展宽成微带。当沿超晶格生长方向施加电场 F 时,超晶格的微带分裂成等能量间距为 eFd 的能态,称“stark 梯”。这些能态的波函数能扩展到几个超晶格周期范围,因而可以观测到波函数中心在不同量子阱中的电子态和空穴态之间的光跃迁,即“阱间跃迁”。若电子和空穴态波函数中心相距 n 个超晶格周期,光跃迁能量相对于实空间的竖直跃迁($n=0$)移动 $\pm neFd$ 。超晶格的这个特性已经在光电流谱^[1,4],光吸收谱^[3]中得到了证实。

当入射到超晶格中的光子能量 E 固定在超晶格吸收边附近时,如连续改变超晶格中的电场大小,光吸收系数在某些电场强度下共振增强,此时光子能量等于 Stark ladder 激子态的能量。电场 F 由

$$E = E_g^{0W} + neFd \text{ 或 } F = \frac{E - E_g^{0W}}{ned} \quad (1)$$

给出。 E_g^{0W} 是对应 $n=0$ 时竖直的光跃迁能量。因而,在光电流响应随电压变化的曲线上,由于“Stark ladder”激子态的共振吸收会出现多个峰,产生多个负微分电阻区。利用超晶格 p-i-n 二极管的这个特性,通过外接电路的反馈,能够实现自电光效应^[7]。特别是在超晶格的吸收边附近的光电流响应中存在多个负微分电阻区,可以通过选用适当

* 国家自然科学基金资助项目。

的反馈元件,来实现自电光多稳态跳变。

最近,我们利用国产分子束外延生长的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}(35 \text{ \AA}/35 \text{ \AA})$ 超晶格 p-i-n 二极管,通过光电流谱测量,在室温和低温下均观测到了十分明显的 Wannier-Stark 效应^[6,8]。本文报道了在 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}(35 \text{ \AA}/35 \text{ \AA})$ 超晶格 p-i-n 二极管的光电流响应随外加偏压变化的曲线中, $-1h$ 和 $-2h$ “Stark ladder” 激子跃迁导致的两个负微分电阻区。利用反向偏置并加上固定光照的硅光二极管作反馈负载,通过改变入射到超晶格二极管的光强度,实现了光电流自电光双稳和三稳态跳变。特别是在外接反馈电路中无外加偏压时,仅利用超晶格二极管的内建电压就能实现光电流的双稳态跳变。这表明 Wannier-Stark 效应在光电子器件领域有广泛的应用前景。

2. 实验

我们用作光电流双稳和多稳态测量的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}(35 \text{ \AA}/35 \text{ \AA})$ 超晶格 p-i-n 光二极管的具体结构见文献[6,8]。光电流双稳和多稳态测试装置的方框图如图 1 所示。入射到超晶格二极管上的光由染料激光器提供。反馈负载采用反向偏置的硅光二极管,用固定光强的光照射。从激光器出来的光经斩波器后,用分光镜分成两束,一束进入探测器,另一束入射到 p-i-n 超晶格二极管的光窗口上,产生的光电流经取样电阻后变成电压信号。硅探测器的信号和光电流取样信号进入双踪示波器,示波器用斩波器频率来触发。照在 p-i-n 超晶格二极管上的光强受到斩波器的调制,形成具有一定上升沿及下降沿的方波。入射光强的变化显示在硅探测器信号的上升沿和下降沿上。

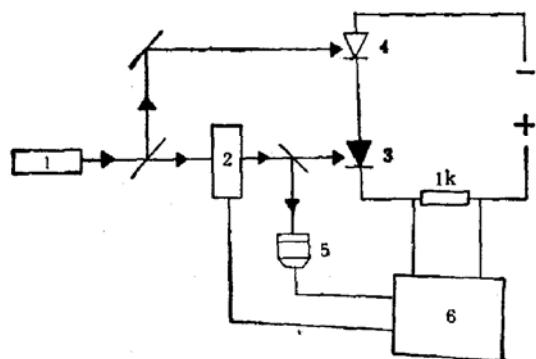


图 1 光电流双稳和多稳态测量装置
1.染料激光器 2.斩波器 3. p-i-n 超晶格二极管 4.硅光二极管 5.探测器 6.双踪示波器

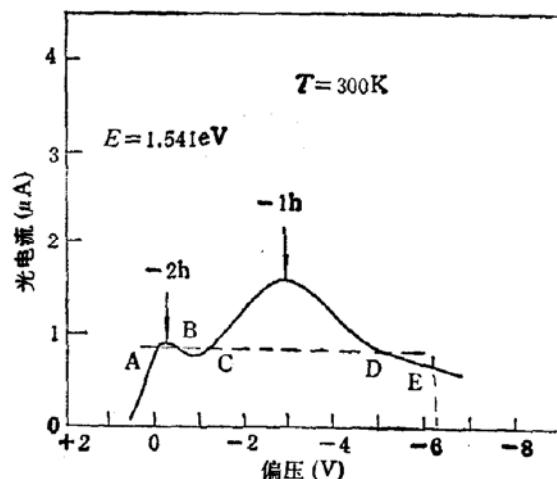


图 2 室温下在固定光波长 (8046 \AA) 固定光强下的光照下, 超晶格二极管的光电流响应随偏压的变化

3. 实验结果与讨论

图 2 是 $\text{GaAs}(35 \text{ \AA})/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}(35 \text{ \AA})$ 短周期超晶格 p-i-n 二极管在室温下, 入射光波长为 8046 \AA (1.541 eV) 时的光电流响应随外加偏压的变化, 入射光强固定在 mW 量级。图中虚线为反向偏置的硅光二极管的电流电压曲线, 交点 A.C.E 为稳定点, B.D 为不稳定点。系统只能处于 A.C.E 三个稳定状态。光电流响应中有两个峰分别位于 -0.4 V 和 -3.0 V 的偏压处(对应超晶格中的电场强度约为 $3.0 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 和 $6.0 \times 10^4 \text{ V/cm}$)。

V/cm)。因为在室温光电流谱中 0h 激子跃迁能量为 $1.580\text{eV}^{[6,8]}$, E_g^{DW} 约为 1.580eV , 由(1)式可知, 偏压为 -0.4V 处的峰对应 -2h 激子共振跃迁, -3.0V 处的峰对应 -1h 激子跃迁。由于这两个激子峰的存在, 二极管具有两个光电流负微分电阻区。其中 -1h 激子峰的负阻幅度大, 而 -2h 激子峰引起的负阻幅度小, 这与理论计算的结果相符合^[5,6], 因为 -2h 跃迁在 $3.0 \times 10^4\text{V}/\text{cm}$ 处的强度比 -1h 跃迁在 $6.0 \times 10^4\text{V}/\text{cm}$ 处要小。根据(1)式, 若减小入射光的波长, 即增加光子能量, -1h 和 -2h 激子共振跃迁将会发生在较小的电场强度处, 因而, 我们可以期望 -1h 和 -2h 激子跃迁度会增加很多^[6,8], 尤其是 -2h 激子跃迁强度增加的幅度会更大一些。这样光电流响应中的二个负微分电阻区的负阻幅度会增加, 而且低偏压下的负阻幅度会增加更多。由这里可以看出, 用光电流响应随偏压的变化来测量“stark ladder”激子跃迁要比光电流谱测量灵敏得多。室温下 -2h 激子峰在光电流谱中极难分辨, 甚至在 -3.0V 偏压下 -1h 激子跃迁都难以分辨。

我们将一个用固定光强光照的反偏的硅光二极管与超晶格二极管串联提供反馈, 当硅光二极管的电流为 0 时, 超晶格二极管上的偏压应为 $V_{ss} + V_D^{[9]}$, V_{ss} 为系统所加的外接负偏压, V_D 为超晶格二极管的内建电压。因而即使 V_{ss} 为 0, V_D 仍然大于 0.3V , 图 2 中虚线还可以与 -2h 激子跃迁引起的负阻区相交, 还可以观测到双稳态跳变。

图 3(a)、(b) 和 (c) 分别是入射光波长为 (a) 8053\AA , (b) 8029\AA 和 (c) 8015\AA , 反馈系统外接偏压为 -5.0V 时, 光电流随入射到超晶格二极管上光强变化图(见图版 I)。横轴为示波器的扫描时间。(a) 和 (b) 的上方曲线均为入射光强随时间的变化((c) 图中未画出入射光强随时间变化情形, 其曲线与 (a) 和 (b) 完全一样), 上升沿代表光强增加, 下降沿代表光强减小。(a) 和 (b) 及 (c) 图下方的曲线代表光电流随时间的变化, 反映了光电流随入射光强的变化。由于采用硅光二极管作为反馈负载, 当硅管上的负偏压超过 0.7V , 硅光二极管中的电流变化很小, 因而该系统的光电流上升跳变不明显。在图 3(a)、(b) 和 (c) 中, 光电流随入射光强的变化没有明显的上跳变。(光电流上升沿的过冲可能是由于电路中电容的充放电引起的)。在入射光强度变化的下降沿, 对于这三个波长的入射光的强度变化均存在明显的光电流的下跳变, 表明这个反馈系统有自电光双稳态特性。图 3(b), 入射光波长为 8029\AA , 在下降沿, 光电流除了在低光强处有一个明显的下跳变外, 在较高光强处, 光电流还有较小的下跳变, 可以看到与入射光强度下降的斜率明显不同。当入射光波长减小到 8015\AA 时, 在光电流强度变化的下降沿, 存在二个明显的下跳变, 表现出十分明显的三稳态特性。

当入射光波长减小时, 光电流响应随偏压变化的曲线中, -1h 和 -2h 激子共振跃迁将发生在较低电场强度处, 跃迁强度会显著增加(尤其是 -2h 激子跃迁)。在较高光强处的下跳变是 -2h 激子跃迁引起的光电流负微分电阻效应导致的。因而, 入射光波长变短时, -2h 激子跃迁引起的光电流下跳变增强, 使此自电光系统的三稳态特性变得更为明显。

图 4 是显示固定入射光波长为 8046\AA , 外加偏压不同时光电流随时间的变化(见图版 II)。右边是下降沿的放大图。(a)、(b)、(c) 和 (d) 分别对应外加偏压为 0V , -2.0V , -4.0V 和 -5.0V 。在右边的放大图上我们可以看到, 即使在零偏压下也存在明显的光电流下跳变。当外加偏压为 -4.0V 和 -5.0V 时, 除了在低入射光强处光电流有一个

很明显的下跳变外,在较高光强还有一个较小的下跳变。但是在外偏压为-2.0V 和 0V 时,光电流只在较高入射光强度处有一个下跳变,而且外偏压为 0V(a) 时发生跳变的光强度明显高于外偏压为-2.0V(b) 发生跳变的光强。

以上的这些现象可以用 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ 超晶格 p-i-n 二极管在入射光波长为 8046 \AA 时的光电流响应存在两个负微分电阻区来解释。当外加偏压为 0 和 -2.0V 时,负载线只能与低负偏压处的负阻区(由 $-2h$ 激子跃迁引起)有交点,光电流仅有一个下跳变。而当外加偏压为 -4.0V 和 -5.0V 时,负载线与两个负阻区均有交点,因此光电流有两个下跳变。不同偏压时光电流跳变时的入射光强不同是由发生正反馈的条件决定^④。

综上所述,在 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ 短周期超晶格 p-i-n 二极管的光电流响应曲线中,Wannier 局域化导致的 $-1h$ 和 $-2h$ 激子共振跃迁形成两个负微分电阻区,可利用来实现自电光双稳态及三稳态跳变。特别是一 $2h$ 激子共振发生在较低负偏压处,在无外偏压时仅利用超晶格二极管的内建电压就能够实现光学双稳态跳变,为制作无源的,全光型的光学双稳态器件提供了新的途径。

致谢: 作者感谢高文智、赵军和庄方捷在器件制备和测试方面提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] E. E. Mendez, F. Agullo-Rueda and J. M. Hong, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 2426(1988).
- [2] J. Bleuse, G. Bastard and P. Voisin, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 220(1988).
- [3] J. Bleuse, P. Voisin, M. Allovon and M. Quillec, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 2632(1988).
- [4] B. Pezeshki, D. Thomas and J. S. Harris, Jr. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2116(1990).
- [5] J. B. Xia and K. Huang, *J. Phys.: Condens. Matter*, **3**, 4639(1991).
- [6] Yaohui Zhang, Desheng Jiang, Feng Li, Junming Zhou and Xiaobing Mei, *J. Appl. Phys.*, **72**, 3209(1992).
- [7] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, T. H. Wood, C. A. Burrus, A. C. Gossard and W. Wiegmann, *IEEE J. Quantum. Electron.*, **QE21**, 1462(1985).
- [8] 张耀辉、江德生、李锋、周均铭、梅笑冰,半导体学报,13,316(1992).
- [9] Y. Tokuda, K. Kanamoto and N. Tsukada, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 166(1990).

Electro-Optical Bistability and Multistability Effects in GaAs/ Ga_{0.7}Al_{0.3}As Short-Period Superlattices

Zhang Yaohui Jiang Desheng Li Feng and Wu Ronghan

National Laboratory for Semiconductor Superlattices and microstructures, Institute of Semiconductors, Academia
Sinica, Beijing 100083

Zhou Junming and Mei Xiaobing

Laboratory for Molecule Beam Epitaxy (MBE), Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing 100080

(Received 2 July 1992; revised manuscript received 15 November 1992)

Abstract

We have studied bias-dependence of photocurrent response near GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As superlattice absorption edge in superlattice p-i-n diodes at room temperature. The -1h and -2h exciton transitions induced by Wannier localization produce two regions of negative differential photoconductivity. Photocurrent (absorption) electro-optical bistability and tristability have been realized in SEED devices composed of a superlattice p-i-n diode, and especially, obvious bi-stability transitions have been observed in unbiased SEED devices.

PACC: 7820J, 7135, 6865