

GaAs/GaAlAs 单量子阱电光 吸收和光调制

朱龙德 熊飞克 王启明

(中国科学院半导体研究所,北京)

陈正豪 谢苑林 顾世杰

(中国科学院物理研究所,北京)

1989年5月26日收到

制作并研究了 GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱台面条形单模波导电致吸收光调制器。量子阱宽度为 100 \AA , 长度为 $700\mu\text{m}$ 的器件, 当传输光波长为 8650 \AA 时, TE 偏振最大调制深度(开关比)为 29.7dB , 插入损耗吸收分量为 3dB ; TM 偏振最大调制深度为 28.5dB 。用 2V 电压幅度可以得到 15dB 的开关比。光电导谱的测量表明, 偏压从 $+0.5\text{V}$ 变到 -7V 时吸收边的红移为 600 \AA , 即量子阱中室温激子的共振吸收峰移动了 96 meV 。单阱高场条件下首次观察到了导带第二能级电子和价带第一能级空穴间激子的共振吸收线的出现, 增强和移动。

主题词 GaAs/GaAlAs 单量子阱, 单模脊形波导调制器, 量子限制斯塔克效应, 调制深度(开关比), 禁戒跃迁

一、引言

自从半导体材料量子阱和超晶格结构出现以来, 所发现的世人注目的物理现象之一是室温激子的存在^[1]。它是由于当阱的空间尺寸小于三维激子的玻耳直径($\sim 300\text{\AA}$)时激子结合能的增加而引起的^[2,3]。由于量子阱中能态密度的台阶状分布^[4], 加之室温激子的共振吸收峰的存在^[1-3], 量子阱和超晶格材料的室温吸收谱表现出很陡的吸收带边。在半导体材料中施加电场, 就会使吸收边展宽(Franz-Keldish 效应)^[5], 而量子阱材料中施加垂直于层面的电场就能使激子吸收边红移^[6], 此红移量很显著, 达 $20\text{ meV}/10^5\text{V/cm}^2$ ^[7]。被称为量子限制斯塔克效应的这个现象^[7,8]由两部分贡献组成, 即电场引起的量子能级的移动和激子束缚能的降低^[7,8], 而数量上前者是主要的。量子阱中这种室温激子的斯塔克效应有重要的器件应用前景, 包括电致吸收光调制器和光开关^[9,10], 以及自光电效应(SEED)器件, 如光双稳器件^[11]。为了提高传输模光场和电场的相互作用体积, 已发表的绝大部分工作是用多量子阱和超晶格材料做的^[9]。

GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱激光器具有阈电流低^[12], 阈电流对温度不敏感等优点^[13]。尽管对 GaAs/GaAlAs 单量子阱双异质结的电吸收和调制特性有简单报道^[14], 但对分别限制单量子阱结构调制器的详细研究尚未见报道。考虑到同样结构低阈值激光器

和光调制器集成的可能性^[10],也考虑到这种调制器在低损耗逻辑开关阵中应用的可能性,我们研究了 GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱结构光调制器的电致吸收特性和电光调制特性。

二、GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱光调制器的制作

用 MOCVD 方法生长了 GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱结构。量子阱宽度为 100 Å, 未掺杂量子阱夹在厚度各为 0.2 μm 的两个未掺杂渐变折射率波导层中间, 其铝组份从阱边的 0.2 线性地增大到限制层边处的 0.5, 限制层由两个铝组份和厚度分别是 0.5 和 1.5 μm 的 GaAlAs 层构成。这个结构满足高次模截止条件, 因此在垂直于层面的方向上只允许基横模存在。片子表面上沿着[011]方向腐蚀出宽度为 5 μm 的两个沟槽, 双沟之间形成的台面波导宽度为 2.5—4.0 μm。由于沟槽临界地腐蚀到离有源层 0.2 μm, 横向有效折射率的分布形成光限制, 沟成了基模台面光波导。波导形调制器的俯视显微照片示于图 1*。该调制器的横向二维基模特性由传输输出光近场像的单光斑分布得到了验证。片子解离成 700 μm 或 300 μm 的条, 再切成 300 μm 宽的芯片, P 面朝上烧结在台面铜热衬上, 热衬台面宽度与调制器长度比拟, 以便光的耦合输入和输出。由于 P 型限制层中掺杂的锌在生长过程中扩散, p-n 结移到量子阱边, 伏-安特性正向注入电压为 1.5V。器件反向击穿电压为 14V, 硬击穿, 击穿前暗电流小于测量灵敏度 1 μA 以内。

三、GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱光调制器的光电流谱随偏置电压的变化

调制器实际是 PIN 二极管。量子阱在 I 区耗尽层中, 一定的偏压对于量子阱中一定的电场强度。量子阱的吸收特性随电场的变化可以由 PIN 二极管的光电流谱随偏压的变化测量出来。高亮度碘钨灯发出的光用单光栅光谱仪分光, 经偏振器后用 ×40 物镜聚焦到波导调制器的介离端面上, 样品光电流讯号经锁相放大, 在 X-Y 记录仪上记录。负载电阻为 47Ω, 远小于样品反向动态电阻 ($\gg 10^6 \Omega$)。测量中牺牲分光分辨率(几十埃)来弥补了入射光强度的不足。

光电场平行 (TE) 和垂直 (TM) 于结平面的情况下光电流随外加偏压的变化示于图 2(a) 和 (b)。偏压在 +0.5V 到 -7V 范围内光生载流子收集效率为 1, 而且在所示的波长范围内光源光谱变化缓慢, 因此光电流谱直接反映样品的光吸收谱。由图可见, 吸收边是陡的, 光电导从峰值的 0.9 降至 0.1, 波长变化小于 200 Å, 此陡度至偏压 -7V 变化很小。吸收边上激子的共振吸收峰清楚。根据选择定则, TM 谱的吸收峰应由轻空穴激子 (CB 1-lh 1) 引起, TE 谱上吸收峰应由重、轻空穴的两种激子吸收造成。TM 谱的激子吸收峰比 TE 谱的更突出, 而且能量也偏高(尤其在 +0.5V 至 -1V 偏压下)。这和上述选择定则是吻合的。由于测量中光谱分辨率低, 而且测量结果是波导长度内的平均效果,

* 图 1 见图版 I.

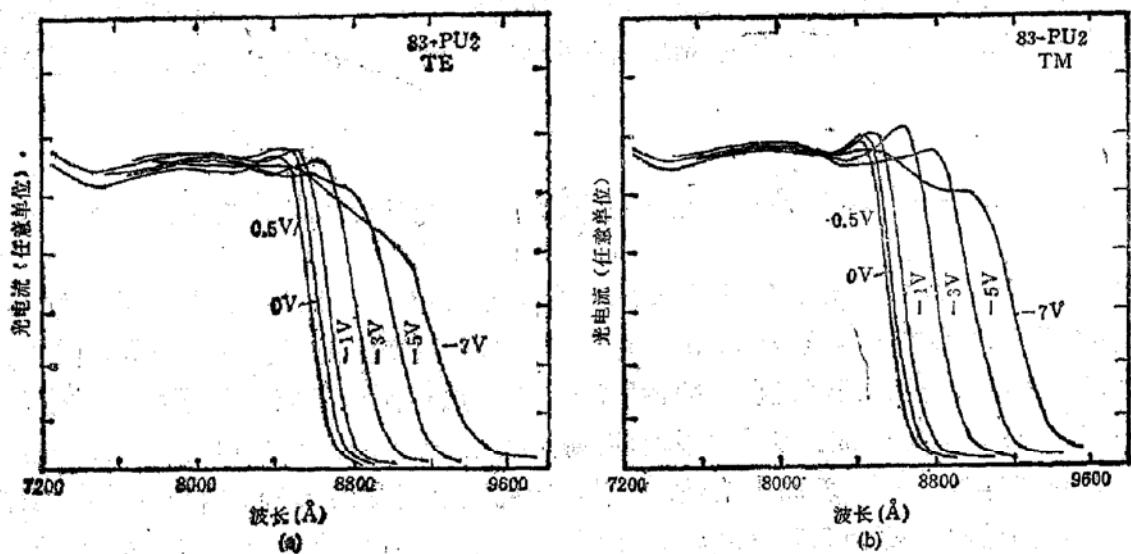


图 2 调制器 PIN 二极管光电流谱随偏置电压的变化

(a): TE 偏振 (b): TM 偏振

在图 2(a) 中重、轻空穴激子峰未分辨出来, 变成较宽的吸收峰。吸收边随电场的移动大, 偏压从 $+0.5\text{V}$ 变至 -7V 时移动 600\AA , 平均 84\AA/V 。吸收峰能量随偏压的移动如图 3,

吸收峰移动 96meV , 平均 13meV/V 。在低偏压下, TM 吸收峰能量较高, 移动率较大。值得注意的是, 由于内建场的存在, 偏压加到 $+0.5\text{V}$ 仍有峰的移动。后面将看到, 偏压加到 $+1.0\text{V}$ 才能使量子阱变成方阱, 吸收边停止移动。在光电导谱上, TE 偏振光电导比 TM 偏振强 20% , 但 TE 偏振吸收峰强度比 TM 随偏压下降得快, 即跃迁矩阵元电子、空穴波函数的重叠积分值随电场下降得更快。由图 2 可以确定, 100\AA 量子阱材料在 $+0.5\text{V}$ 至 -7V 范围内的调制器工作波段为 $8650-8950\text{\AA}$, 在这 300\AA 工作波段内消光比退化小于 5% , 开关电压幅度可用 2V 。

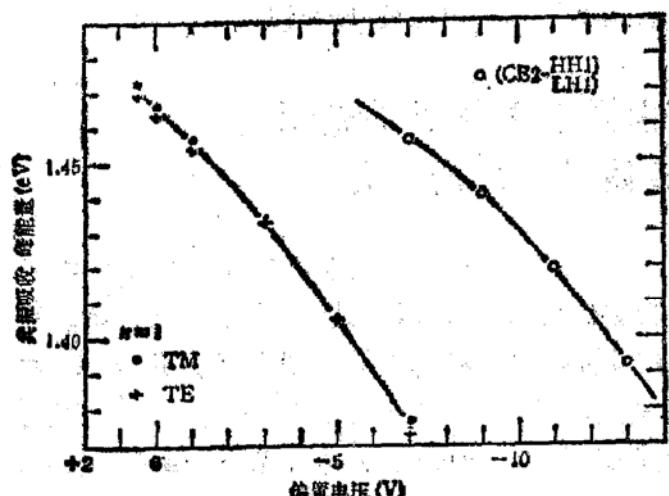


图 3 室温激子共振吸收峰能量随二极管偏置电压的变化

其中+: $(\text{CB}1-\frac{\text{hh}1}{\text{lh}1})$ 激子峰, ●: $(\text{CB}1-\text{lh}1)$ 激子峰,
○: $(\text{CB}2-\frac{\text{hh}1}{\text{lh}1})$ 激子峰。

调制器在更大偏压范围内的吸收边光电导谱示于图 4。偏压在 $+0.5\text{V}$ 至 -9V 时短波长边光电流基本不变, 正偏压大于 $+0.7\text{V}$ 时短波光电流下降, 这是因为光生载流子扫不出来, 收集效率下降引起的。负偏压大于 -10V 时短波光电流增加, 因为电场接近击穿场, 出现 P-N 结中微区击穿。在这张图上主要感兴趣的是, 负偏压大于 -5V 时另一个吸收峰的出现。这个吸收峰出现以后, 随着偏压的增大, 其强度增强, 其能量移动。该吸收峰能量随偏压的移动示于图 3。这个峰可以归结于导带第二个量子能级中的电子和

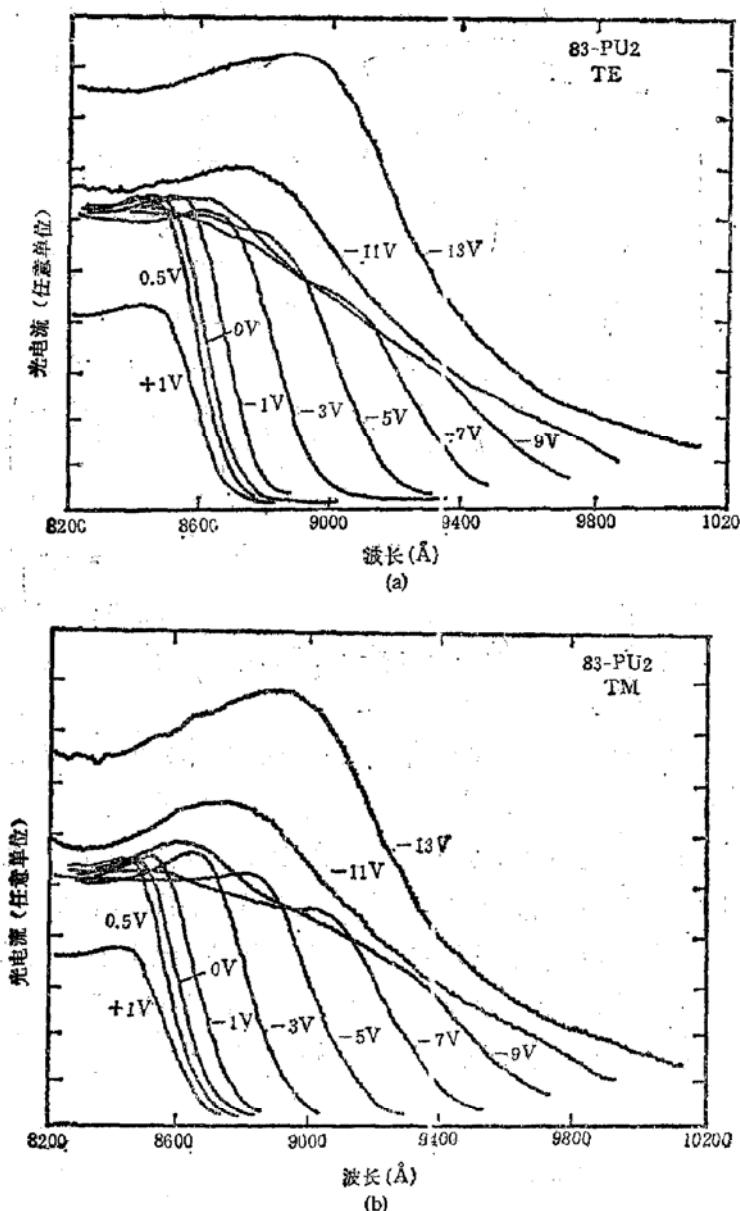


图4 调制器二极管偏压从+1V变至-13V时光电流谱随外加偏压的变化

(a): TE 偏振 (b): TM 偏振

价带第一个能级空穴形成的激子的共振吸收。这个跃迁在对称量子阱中是禁戒的。所以低偏压下基态激子的跃迁几率大，而随着电场加大，由于电子和空穴的空间分离增大，基态激子跃迁几率下降，而原来禁戒的不同宇称能态之间重叠积分值不再是零，而且随场增大，因为高能电子态的波函数随场变化相对不大，而三角阱中低能空穴波函数变化很大。这导致该吸收峰的出现和增强。我们相信，我们第一次清楚地看到了这个峰的出现、增强和移动。这恐怕是因为我们的样品(单阱)上可以加到很强的电场(-13V)之故。

四、电吸收光调制实验及器件的调制特性

分别限制结构具有较好的光限制特性，但是单量子阱结构毕竟光限制因子低，只有 $\Gamma = 0.03$ 。所以适当地加长调制器的长度，就能提高峰值吸收条件下传输模式光的电吸

收衰减,提高调制深度。另外,根据样品的电吸收谱,选择合适的光波长,就能使调制器开态损耗仍然低,而且可使调制电压和偏置电压降低。因为要测的调制器是单横模波导,最好用准直性好的大功率光源来提高实验的精确度。光调制实验装置示于图 5。

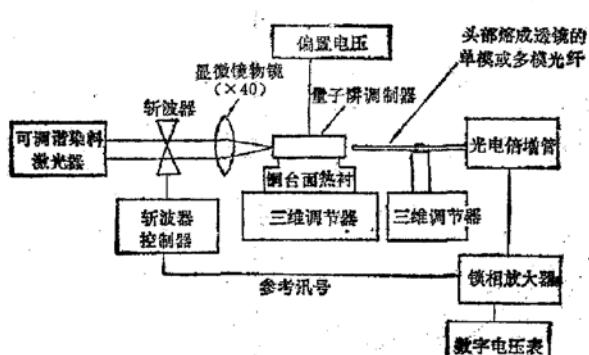


图 5 电致吸收光调制实验装置示意图

制器和光纤的输出耦合可以采用两种方法:一是把调制器当做激光器或发光管使用,二是在工作波长直流光传输条件下器件上加调制电压,测量调制了的输出光,使讯号最大,即利用器件本身的光调制特性进行耦合。

图 6 是长度为 $700\mu\text{m}$ 的单横模调制器,当光波长为 8550\AA , 8600\AA , 8650\AA 时 TE 和 TM 偏振状态下归一化透射(传输)功率与直流偏压的关系。由于 TM 和 TE 偏振状态下量子阱波导的吸收特性不同,测到的静态调制曲线对两种偏振光不同,表现在 TE 调制曲线随反偏压更快地下降,而且对 8550\AA 的光 TE 调制特性已经退化,因为所用的光波长已经是激子吸收边的极限波长, 8550\AA 的光对 TE 偏振来说已有很显著的插入吸收损耗。由调制曲线算得的最大调制度(开关比)随波长和偏振的变化列于表 1。可见,当光波长适当加长时,由于开态吸收降低,最大调制度提高。对 8650\AA 的光得到了 29.7

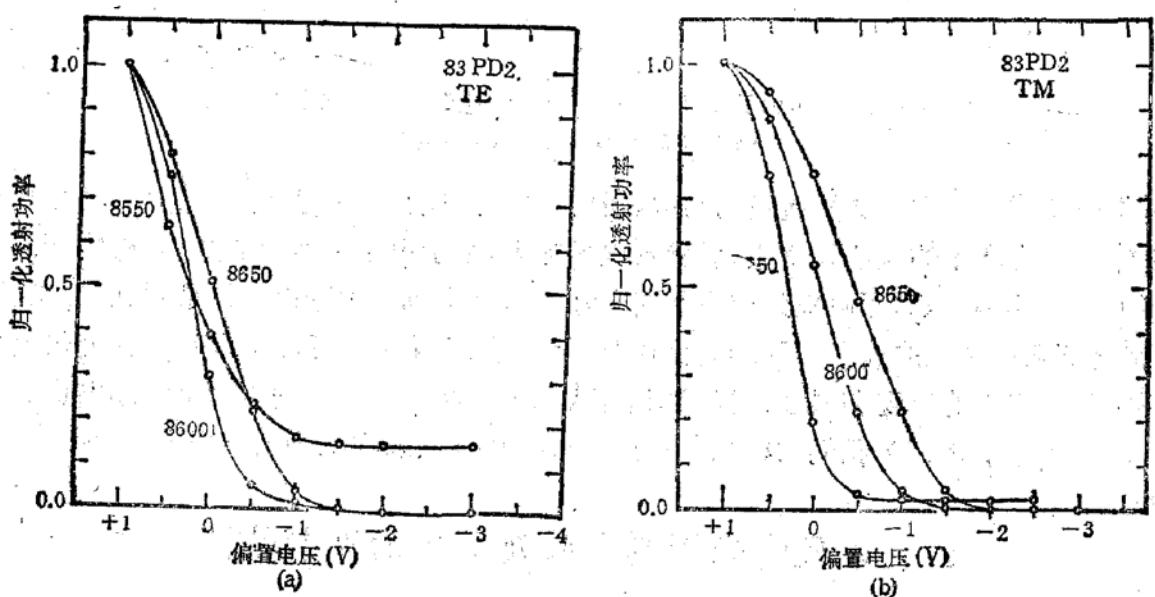


图 6 GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱结构单横模波导电光调制器的归一化透射功率和偏压的关系

(a): TE 偏振, (b): TM 偏振

表1 阵宽为 100\AA , 长度为 $700\mu\text{m}$ 的GaAs/GaAlAs分别限制单量子阱单横模波导调制器在不同偏振状态, 不同光波长下最大调制度(开关比)。

最大调制度 (dB)	波长 (\AA)			
		8550	8600	8650
偏振状态				
TM		18	26.3	28.5
TE		8.3	26.5	29.7

dB(TE) 和 28.5 dB(TM) 的开关比。从调制曲线也可以看到, 当光波长为 8600\AA 时用 2V 的偏压幅度可以得到大于 15dB 的调制度。对长度为 $300\mu\text{m}$ 的调制器, 当光波长为 8600\AA 时测到, TE 偏振开关比为 15dB, TM 偏振开关比为 22 dB。

调制器的极限插入损耗由开态吸收损耗和散射损耗决定。如果异质结的界面陡度是单个原子层量级, 而且波导的横向限制结构是完美的, 如采用反应离子束刻蚀技术制作台面波导, 则散射损耗极低, 极限插入损耗主要由开态吸收损耗决定。我们采用 T. H. Wood 的方法^[15], 由器件光电流和透射功率随偏压的变化数据, 得到光波长为 8650\AA 时 $\alpha_{\min}(+1\text{V})L = 0.7$, 由此确定的 TE 波开态模式吸收系数 $\alpha_{\min}(+1\text{V}) = 10\text{cm}^{-1}$, 而偏压为 -2V 时的吸收系数为 $\alpha_{ab}(-2\text{V}) = 75.8\text{cm}^{-1}$ 。由此得到长度为 $700\mu\text{m}$ 的该调制器 TE 波吸收插入损耗为 3dB。这些数据和实际测得的在这个偏值变化下 TE 波的调制度 20dB 是一致的。由上述分析可知, 尽管分别限制单量子阱材料的光限制因子较低, 但是由于量子阱吸收因量子限制斯塔克效应有数量级的变化, 只要正确地选择工作波长, 并在调制深度和插入损耗之间做折中而设计器件长度, 就能得到很低的插入损耗和很高的调制度。

调制器上加三角波, 并观察输出光波形, 可以得到直观的调制曲线, 如图 7*。三角波从 +1V 变到 -6V。由图可见, 波长越短, 开态(+1V)波形越尖, 因为波长更靠近吸收边。图 8* 是调制器的开关行为的示波器显示。图中上部是偏置方波电压, 下部是传输光讯号。光波长为 8550\AA , 偏压为零伏, 开关电压为 +1V--1V。可见可以实现完全的光开关。代替开关脉冲使用 $\pm 0.5\text{V}$ 峰值的正弦波, 得到了如图 9* 的模拟调制特性, 可见失真度较小。

五、结 论

研究了 GaAs/GaAlAs 分别限制单量子阱结构台面波导 PIN 二极管的室温电致光吸收特性和光调制特性。由于 100\AA 厚的量子阱处在 I 区零偏压耗尽层中, 零偏压内电场很大, 所以量子限制斯塔克效应的有意义的偏压范围为 +1V 到 -10V。由于室温激子吸收峰的存在以及量子阱的阶梯状能态密度分布, 吸收边陡。由共振吸收峰的位置, 强度以及器件的调制曲线可以判明, TM 偏振吸收峰由轻空穴激子吸收引起, TE 偏振吸收峰

* 图 7 见图版 I。

* 图 8, 9 见图版 II。

由重、轻空穴激子的吸收造成。光电导共振吸收峰强度随偏压的变化可由重、轻空穴激子波函数的重叠积分随电场的变化说明。由于是单阱，且没有外电场向量子阱的扩展过程，在上述偏压范围内吸收边的移动很大。偏压从+0.5V变到-7V时吸收边移动600Å，相应的共振吸收峰移动96meV。调制器的有效工作带宽为300Å。因为是单量子阱，可以加到高电场，我们首次观察到了量子阱第二能级电子和第一能级空穴形成的激子的共振吸收，它在-7V偏压下开始出现，然后随电场增强和移动。这表明了量子阱中波函数对称性的破坏而出现的原有选择定则的破坏。

量子阱宽度为100Å的GaAs/GaAlAs分别限制单量子阱结构台面波导单模调制器，当光波长为8650Å时TM偏振最大调制深度为28.5dB，TE偏振最大调制深度为29.7dB。TE偏振插入损耗吸收分量为3dB，这意味着当器件长度为200μm时可以小于1dB。调制器的工作电压范围为+1V到-7V。在合适的工作波长和偏置电压下用2V开关电压幅度可以得到大于15dB的开关比，说明合理地选择器件长度和工作波长，就能实现插入损耗和开关比的折中，就可得到高调制度、低插入损耗且低工作电压的电吸收光调制器。

GaAs/GaAlAs分别限制单量子阱台面波导结构是成功的激光器结构^[16]，现已证实它也可以用来做很好的电吸收光调制器和光开关，这预示着这种结构激光器、放大器、调制器和光开关的单片集成的前景，如光交换用光开关逻辑阵列等。

作者们衷心感谢王丽明同志在器件工艺工作中的协助。

参 考 文 献

- [1] T. Ishibashi, S. Tarucha, and H. Okamoto, Proc. Int. Symp. GaAs and related Compounds, Inst. Phys. Conf., No. 63, Japan, 1981, p 587.
- [2] S. W. Kirchoefer, N. Holonyak, K. Hess, D. A. Gulino, H. G. Drickamer, J. J. Coleman, and P. D. Dapkus, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 821 (1982).
- [3] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, D. J. Eilenberger, P. W. Smith, A. C. Gossard, and W. T. Tsang, *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 679 (1982).
- [4] R. Dingle, W. Wiegmann, and C. H. Henry, *Phys. Rev. Lett.*, **33**, 827 (1974).
- [5] L. V. Keldish, *Soviet Physics-JETP*, **7**, 788 (1958), W. Franz, *Z. Naturforsch.*, **13a**, 484 (1958).
- [6] T. H. Wood, C. A. Burrus, D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 16 (1984).
- [7] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, and T. C. Damen, *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 2173 (1984).
- [8] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood, and C. A. Burrus, *Phys. Rev.*, **B32**, 1043 (1985).
- [9] T. H. Wood, C. A. Burrus, D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 16 (1984).
- [10] S. Tarucha, and H. Okamoto, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 1 (1986).
- [11] 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).
- [12] K. Y. Lau, P. L. Derry, and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 88 (1988).
- [13] L. D. Zhu, B. Z. Zheng, and G. A. B. Peak, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-25**, 2007 (1989).
- [14] N. K. Dutta and N. A. Olsson, *Electron. Lett.*, **23**, 853 (1987).
- [15] T. H. Wood, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 1413 (1986).
- [16] L. D. Zhu, G. A. B. Peak, R. J. Davis, and J. M. Ballantyne, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-23**, 309 (1987).

GaAs/GaAlAs Single Quantum Well Electroabsorption and Light Modulation

Zhu Longde, Xiong Feike, Wang Qiming

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Chen Zhenghao, Xie Yuanlin, Gu Shijie

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

GaAs/GaAlAs graded barrier single quantum well single mode ridge waveguide electroabsorption modulators were fabricated and investigated. For a modulator with quantum well width of 100 Å and device length of 700 μm, the on/off ratio of 29.7 dB, absorption fraction of the insertion loss of 3 dB were obtained for TE polarized light with wavelength of 8650 Å. For TM polarization, the on/off ratio was 28.5 dB. Photocurrent spectra exhibited a red shift of 600 Å of the absorption edge by the bias voltage variation from +0.5V to -7V, corresponding shift of the exciton resonance peak is 96 meV. The appearance, enhancement and shift of a new exciton resonance absorption peak was observed for the first time in the single quantum well at high voltages, which may be attributed to the excitons composed of the electrons in the second quantum energy level and the holes in the first quantum energy levels.

Key words GaAs/GaAlAs single quantum well, single mode ridge waveguide modulator, quantum confined stark effect, modulation depth (or on/off ratio), prohibited transition