

# 多量子阱空间光调制器二维列阵\*

陈弘达 吴荣汉 高文智 陈志标 杜云

(国家集成光电子学联合实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 用 MBE 技术生长 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料, 研制出  $8 \times 8$  独立寻址反射型空间光调制器列阵, 对列阵的光反射谱、光电流谱、电场调制特性及电学特性进行了全面的测试, 并对列阵的均匀性进行了分析.

PACC: 7235, 7240, 7820J

## 1 引言

随着光信息处理与传输技术的迅速发展, 应用于光计算、光互连中的光学逻辑开关器件的研究工作越来越受到重视<sup>[1]</sup>. 半导体超晶格量子阱自电光效应器件(SEED-Self Electro-optic Effect Device)就是八十年代后期迅速发展起来的一种新颖的光电混合型光逻辑开关器件<sup>[2]</sup>. 对于超晶格量子阱材料, 由于电子和空穴被束缚在量子阱中, 激子束缚能较大, 在室温下激子仍不容易离化. 室温激子的存在使超晶格量子阱材料与体材料相比较, 其光学性质有很大的不同, 特别是在加外电场作用时, 光学性质会发生很大的改变, SEED 器件就是利用超晶格量子阱激子吸收在外电场作用下的非线性变化对入射光进行调制, 从而实现光调制、光开关功能<sup>[3,4]</sup>. 为了提高 SEED 器件的电场光调制特性, 九十年代以来, 国外出现了非对称法布里-珀罗腔(ASFP)结构的反射型多量子阱光调制器<sup>[5]</sup>, 利用量子限制 Stark 效应(QCSE)和 ASFP 结构获得了对比度为  $50 : 1$  光调制器<sup>[6]</sup>, 基于 Wannier-Stark 效应和 ASFP 结构的光调制器对比度可达  $100 : 1$  以上<sup>[7]</sup>, 器件光窗口已缩小到  $10 \times 10 \mu\text{m}$ , 开关时间为 ns 量级<sup>[8]</sup>, 单位面积开关能量为  $10 \text{fJ}/\mu\text{m}^2$ , 列阵规模可达  $128 \times 128$ , SEED 器件列阵已应用于自由空间光互连、光交换网络系统中<sup>[9]</sup>, 两态对比度为  $3 : 1$ , 光开关能量小于  $100 \text{fJ}$ , 每一通道的数据传输速率为  $155 \text{Mb/s}$ . SEED 光调制器具有体积小、速度快、能耗低、易于平面集成等特点, 在光交换、光互连等光信息领域具有重大应用前景.

本文报道我们研制的  $8 \times 8$  独立寻址反射型光调制器列阵的有关器件结构及设计、器件光学和电学特性测试以及列阵激子吸收峰与 ASFP 腔模式位置、列阵耐压特性及对比度等方面的均匀性分析.

\* 国家自然科学基金资助项目

陈弘达 男, 1960 年生, 博士生, 主要从事半导体光电子器件及集成研究

吴荣汉 男, 1938 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体光电子器件及物理研究

1996 年 4 月 18 日收到初稿, 1996 年 7 月 9 日收到修改稿

## 2 器件结构及制备

多量子阱材料采用分子束外延(MBE)技术生长,器件材料结构如图1所示。衬底为半绝缘GaAs,外延层依次为由n-Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As/AlAs组成的1/4波长多层介质层,形成具有高反射特性的分布布拉格反射器(DBR),n型AlGaAs缓冲层,非掺杂生长(即i型)GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As多量子阱层(对称量子阱),周期数为50~100,量子阱阱宽为10nm,垒宽为6nm~10nm,最上面是p型AlGaAs缓冲层和p<sup>+</sup>-GaAs层,构成pin结构。

器件工作时,光垂直于器件表面从p区入射,经过多量子阱i区时,一部分光被i区吸收,透射过i区的光被底部DBR高反射层反射,又经过多量子阱i区吸收后,到达器件表面,但由于顶部的GaAs与空气界面对光强的反射率为30%,光将在顶部GaAs/空气界面和底部DBR高反射层之间多次反射,构成一个非对称法布里-珀罗腔,分析表明<sup>[10]</sup>只有当从器件表面反射到空气中的光与ASFP腔中吸收又被底部DBR反射到空气中的光相位相反振幅相等时,两类光相互抵消,从而使反射的光最少,反射率接近为零,满足此条件的光波长为ASFP腔的模式波长。由于底部的DBR高反射层与顶部半导体/空气界面构成的ASFP腔,对入射光有很强的调制作用。当入射光波长与ASFP腔的模式位置重合时,将形成共振干涉,使光束在腔内多次往返,从而有效地增加了光与吸收区的作用长度。反射型SEED器件具有易于大规模平面集成,对入射光的利用率较高,易于改善开关时间,能够获得较高的对比度及具有较好的热学特性等优点,因此具有更大的实用性。图2为研制的8×8独立寻址反射型多量子阱光调制器列阵,垂直入射、反射光窗口面积为80×80μm,窗口间隔为400μm。列阵中每个器件均为独立电控寻址,器件之间相互隔离,列阵对角处有两个公共的n型电极,器件工作时加反向偏置电压。

P <sup>+</sup> -GaAs	10nm	$1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$	
P-Ga <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> As	240nm	$5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$	
i-Ga <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> As	60nm		
50 × i-GaAs	10nm		MQW
i-Ga <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> As	8nm		
i-Ga <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> As	50nm		
N-Ga <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> As	50nm	$5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$	
N-AlAs	72.5nm	$3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$	
20 × N-Ga <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> As	61nm	$3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$	DBR
N-AlAs	72.5nm	$3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$	
N-GaAs	1.0nm	$3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$	
SI-GaAs			Substrate

图1 反射型多量子阱光调制器结构图

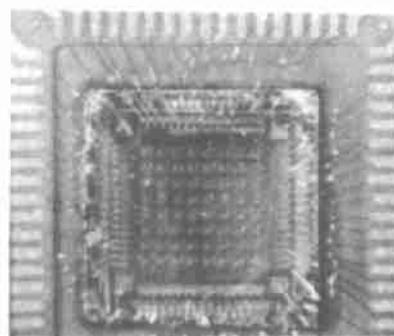


图2 8×8多量子阱光调制器列阵

## 3 列阵特性测试及其均匀性分析

为分析多量子阱光调制器列阵的光电特性,我们采用微区光反射谱和微区光电流谱方法研究材料及器件制备后的光学质量及电场调制特性,测量列阵的耐压特性、两态对比度研

究器件的光电性能。为确认材料生长均匀性,采用微区光反射谱方法,对在相同的生长条件下生长的DBR结构进行均匀性测定,测量结果如图3所示。从图中可以看到,材料生长具有良好的厚度均匀性,对两英寸MQW材料,其反射谱均匀小于1%。通过光反射谱还可确定

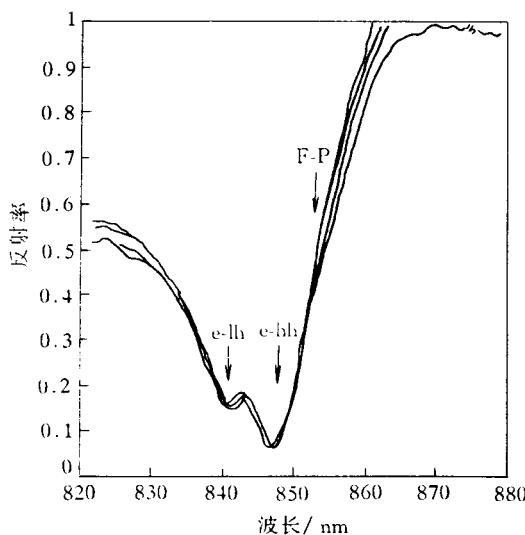


图3 光调制器列阵零偏压时的光反射谱

激子吸收峰和ASFP腔模式位置,从而确定器件的工作波长,选择合适的半导体激光器。图中的四条曲线分别是列阵四个角处器件单元在零电压条件下测量的光反射谱曲线,在所测波长范围(820~880nm),虽然此波段处于DBR高反射区域之内,但却不是整个波段器件都具有高反射特性,而是出现了很深的凹谷,这是由多量子阱激子吸收和ASFP腔模式共同作用的结果。在激子吸收峰波长区域多量子阱存在较高的激子吸收,致使反射率大大减小;而ASFP腔在谐振波长处使入射光在腔内多次往返,虽然ASFP腔模式位置在激子吸收峰长波边,单程吸收系数小,但由于模式对多程吸收的增强,增加了多量子阱的有效吸收长度,造成入射光的较大衰减。

从图3中可以看到,在波长为841nm和848nm处反射率出现两个极小值,分别为轻空穴激子吸收(e-lh)和重空穴激子吸收(e-hh)所致,ASFP腔模式(F-P)位置在854nm处。当器件工作时,外加的反向偏压会产生一个垂直于量子阱壁方向的电场,在电场的作用下,由于量子限制Stark效应,激子吸收峰红移(向长波方向移动),移动的距离与所加电场强度有关,激子吸收情况将会发生很大的改变,从而使反射特性发生很大的改变,零电压和加电压两种状态下,反射率会有很大的不同。反射率对比度定义为低电场和高电场两种状态下的反射率之比,

$$C_R = 10 \lg (R_{HI}/R_{LO}) \quad (\text{dB})$$

其中  $R_{HI}$  和  $R_{LO}$  分别为高、低两种状态下的反射率。

根据入射光的工作波长,反射型多量子阱SEED器件分为常关和常通两种工作模式。如果入射光的波长在零电场时的激子吸收峰附近,随着电场的增大,吸收系数减小,光生电流减小,反射光增大,即在零电场时反射光小,加电场后反射光增大,以这种入射光波长工作的SEED器件为常关工作模式。如果入射光波长在零电场时激子吸收峰的长波一侧(一般波长大于激子吸收峰7nm),在不加电场时就有一定的反射光,随着电场的增大,吸收系数增大,光生电流增大,反射光减小,以这种入射光波长工作的SEED器件为常通工作模式。对于常关工作的SEED器件,光生电流与偏置电压的关系曲线中将出现负阻区,利用这一特性可制成光双稳器件。而对于常通工作的SEED器件,由于电场调制吸收系数变化较大,因而更适合制成高对比度、低插入损耗的光调制器。

对于对称的量子阱结构,反射式光调制器电场调制特性的一个特点是,在电场的作用下,由于量子限制Stark效应,光反射特性曲线向长波方向移动,使加电场后的光反射特性曲线与零电场的光反射特性曲线相对位置发生变化,从而使某一波长处,两态反射率有很大

的差异。图4为A<sup>#</sup>列阵器件偏置电压分别为0V、5V、8V时的光反射谱曲线。当工作波长选择在不同的位置时，器件不仅两态对比度会有所不同，而且，器件会分别工作在常关和常通两种不同的工作模式。

多量子阱光调制器电场调制特性的另一特点是，由于ASFP腔模式的作用，当多量子阱激子吸收峰移动到与ASFP腔模式位置重合时，光在顶部半导体/空气界面和底部的DBR高反射层之间来回反射，表现为光反射谱中的两个极小值重合，反射率达到最小值。图5为B<sup>#</sup>列阵器件加0V、5V、8V电压时的光反射谱，在波长为853nm处，加8V电压时，反射率最小，这时0V和8V的两态对比度为10:1。

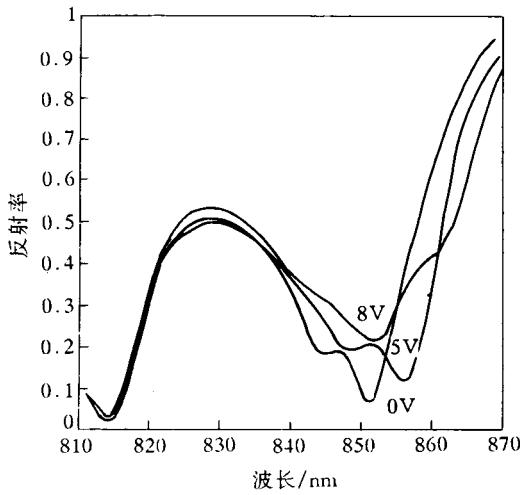


图4 A<sup>#</sup>列阵器件的光反射谱

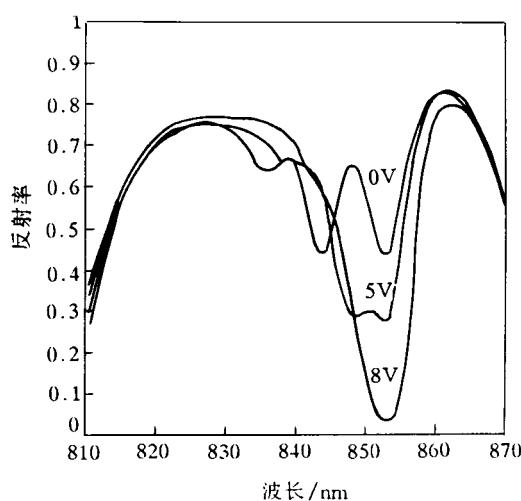


图5 B<sup>#</sup>列阵器件的光反射谱

事实上，多量子阱光调制器的反射光调制特性是由DBR、QCSE和ASFP三种物理效应共同作用的结果。在DBR高反射区确定以后，为提高器件的对比度，最有效的方法是减小低态反射率 $R_{LO}$ ，这就需要准确控制激子吸收峰和ASFP腔模式的相对位置。从对比度的定义可知，低态反射率越小，器件两态对比度就越大，光调制器的调制特性就越好。一般器件工作波长选择在ASFP腔模式位置附近。当作为光源的半导体激光器的工作波长确定以后，如果ASFP腔模式位置不均匀，会使列阵中一部分器件工作在模式位置，而另一部分器件在工作波长处偏离模式位置，这样，会影响整个列阵的性能。一般地，多量子阱光调制器列阵中各器件的激子吸收峰位置差异很小，主要是ASFP腔模式位置受材料生长条件的影响较大，材料生长厚度差异越大，模式位置越不均匀。这需要在材料生长过程中严格控制生长条件，使材料生长厚度完全一致，只有这样，才能制作出均匀性好性能一致的光调制器列阵。从图3测量的光反射谱来看，列阵四个角处的光反射曲线差异很小，整个列阵的激子吸收峰和ASFP腔模式位置都分别在同一波长处，因而制作的8×8多量子阱光调制器列阵的光电特性一致性良好。

我们测量了8×8多量子阱光调制器列阵的调制特性，光源用半导体激光器，入射光照射在光调制器列阵的各器件光窗口上，通过选择加在光调制器列阵上的电压寻址列阵上的器件，并改变器件上的电压实现对输出光信号的调制。图6为测试的器件调制特性，(测试条件：水平X轴：50μs/div；垂直方向，下面波形：5V/div，上面波形：10mV/div)，下面的波形

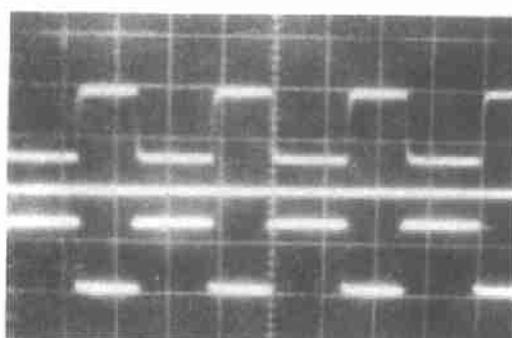


图 6 光调制器的调制特性

为电输入信号,上面的波形为被调制的输出光信号,结果表明,器件的两态对比度为 4 : 1。在我们研制的器件中,常关工作的器件两态对比度一般大于 2.5 : 1,最高可达 4 : 1;常通工作的器件两态对比度一般大于 3.5 : 1,最高可达 10 : 1。实际上,在器件应用中,一般两态对比度在 2 : 1~3 : 1 即可满足系统要求。

我们还对光调制器列阵器件的耐压特性做了全面测量,结果表明,在所测量的列阵器件中,耐压值大于 12V 的器件占 90.1%,大

于 6V 的占 95.2% ( $1\mu\text{A}$  档测量),在实际应用中,器件的工作电压一般为 5V。从测量的结果看,所研制的光调制器列阵无论是材料特性还是光电性能都具有良好的均匀性,造成个别器件耐压值偏低的原因是多方面的,为了提高列阵器件的耐压特性,应尽可能地降低多量子阱区本底浓度,严格控制材料生长过程,使材料尽可能地均匀一致,减少材料中的缺陷,在器件制备中严格控制和净化工艺过程。

## 4 结论

多量子阱光调制器列阵的光调制特性是 DBR 高反射特性、二维自由激子电吸收及电色散效应和非对称法布里-珀罗腔(ASFP)调制特性共同作用的结果。DBR 高反射层和多量子阱区的质量、材料生长厚度的均匀性、激子吸收峰与 ASFP 腔模式的相对位置以及制备工艺等诸因素都会对调制器的光调制特性有很大影响。我们在对各方面因素综合分析和计算的基础上,优化设计了 DBR 高反射层和多量子阱区结构,研制的  $8 \times 8$  独立寻址反射型空间光调制器列阵具有良好的光调制特性和电学性能,器件作为光学逻辑开关器件,在光互连、光交换系统中具有重大应用前景。该列阵已初步试用于微光学互连模块,应用结果将另文发表。

**致谢** 作者对国家集成光电子学联合实验室(半导体所区)有关人员在器件制作中所给予的帮助表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, Opt. Quantum Electron., 1990, **22**(6): S62~S98.
- [2] A. L. Lentine and D. A. B. Miller, IEEE J. Quantum Electron., 1993, **29**(2): 655~669.
- [3] A. L. Lentine, T. J. Cloonan and F. B. McCormick, Opt. Quantum Electron., 1992, **24**(6): S443~S464.
- [4] G. D. Boyd and G. Livescu, Opt. Quantum Electron., 1992, **24**(6): S147~S166.
- [5] S. Cheung and F. Jain, Appl. Phys. Lett., 1993, **63**(3): 296.
- [6] Li Chen, Kezhong Hu, R. M. Kapre et al., Appl. Phys. Lett., 1992, **60**(43): 422.
- [7] K-K. Law, R. H. Yan, L. A. Coldren et al., Appl. Phys. Lett., 1990, **57**(13): 1345.

- [8] F. B. McCormick, T. J. Cloonan *et al.*, *Appl. Opt.*, 1993, **32**(26): 5153~5171.  
[9] F. B. McCormick, T. J. Cloonan *et al.*, *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8): 1601~1618.  
[10] 吴荣汉,高文智,赵军,等,光子学报, 1995, **24**(5): 388~392.

## Multiple Quantum Well Spatial Light Modulator Array

Chen Hongda, Wu Ronghan, Gao Wenzhi, Chen Zhibiao and Du Yun

(*National Integrated Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Received 18 April 1996, revised manuscript received 9 July 1996

**Abstract**  $8 \times 8$  GaAs/AlGaAs multiple-quantum-well (MQW) reflectance spatial light modulator (SLM) arrays have been investigated and fabricated. The light reflectivity, photocurrent and other electrical characteristics are measured. The analysis is emphasized on the behavior of asymmetric F-P cavity (ASFP) effect and array uniformity of contrast ratio and electric properties etc.

**PACC:** 7135, 7240, 7820J