

光互连用 8×8 多量子阱空间光调制器

吴荣汉 陈志标 陈弘达 高文智

(国家光电子工艺中心, 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

曹明翠 万安君 刘中林 李洪谱

(华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 制作了光互连用 8×8 多量子阱空间光调制器, 测量了其耐压特性、模式均匀性、对比度和插入损耗等。使用 Dammann 光栅分束器将半导体激光束分成等光强的 64 路并将其照射到多量子阱空间光调制器上, 测量了其调制特性。

关键词 量子阱, 空间光调制器, 光互连

1 引 言

互连网络在数据交换和高性能计算机处理器互连上是必不可少的, 而近年来用光开关代替互连网中的电开关得到了很多研究。光互连与电互连相比, 具有高带宽、并行性、高互连密度、低时钟歪斜、无串扰等优点。从而将在并行处理系统、宽带通讯交换系统中发挥重要作用。光互连中的光开关元件可有多种, 但由于二维平面列阵空间光调制器(SLM)能充分发挥光并行传输的优点, 得到很快的发展^[1-3]。本文讨论的多量子阱空间光调制器件(MQW SLMs), 利用量子限制 Stark 效应, 即量子阱在外加垂直于阱壁的电场时激子吸收峰红移而引起吸收系数变化的物理机理制作光调制器件, MQW SLMs 器件由于其开关速度快(取决于对 MQW SLMs 电容充电所需的时间, 一般可在 ns 量级), 易于二维平面集成, 工作电压低(一般在 5~15 V 左右)等特点, 得到很快的发展。我们制作了 8×8 MQW SLMs 列阵, 测量了它的耐压值, ASFP 模式位置和调制特性。

2 器件结构和制备

MQW SLMs 器件一般为一个 $P-i-N$ 型二极管结构, 其中 i 区为多量子阱区, N 区有由 AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As $\lambda/4$ 波厚的 DBR 组成的高反射层(其反射率在器件的工作波长区大于 90% 以上)。器件工作时加反向偏压, 光垂直于器件平面从 P 区入射, 经过 i 区的多量子阱吸收后, 被底部的 DBR 高反层反射, 又经 i 区吸收后沿入射光相反的方向反射出去。事实上上面的情形仅仅适合于器件顶部镀了减反膜的情况。当顶部是 GaAs 和空气的界面(顶部光强的反射率为 30%)或者顶部加了 AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As $\lambda/4$ 波厚的 DBR 使顶部反射率增高时, 光将在顶

	P^+ -GaAs	10 nm	
2×	P -Ga _{0.9} Al _{0.1} As	61 nm	MQW
	n -AlAs	72.5 nm	
	P -Ga _{0.7} Al _{0.3} As	264.2 nm	
50×	i -Ga _{0.7} Al _{0.3} As	60 nm	DBR
	i -Ga _{0.7} Al _{0.3} As	8 nm	
	i -GaAs	10 nm	
	i -Ga _{0.7} Al _{0.3} As	8 nm	
	i -Ga _{0.7} Al _{0.3} As	40 nm	
20×	N -Ga _{0.7} Al _{0.3} As	50 nm	DBR
	N -AlAs	122.5 nm	
	N -Ga _{0.9} Al _{0.1} As	61 nm	
	N -AlAs	72.5 nm	
	N -GaAs	1.8 μm	
	Si-GaAs substrate		

图 1 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the structure of the device

部和底部的 DBR 高反层之间来回反射, 形成一个非对称的法布里-珀罗腔 (ASFP), ASFP 使入射光多次经过多量子阱区, 等效于增大吸收长度。分析表明只有工作在 ASFP 模式位置器件才能获得很好的调制特性^[4]。当入射光的波长在激子吸收峰附近时, 为常关工作。此时随着所加电压的增大吸收系数减小, 反射的光增大; 当入射光的波长在激子峰偏长波方向时, 为常通工作。此时随着所加电压的增大吸收系数增大, 反射的光减小。由于常通型器件加电压和不加电压的吸收系数变化之比大于常关型器件, 常通型器件一般可以做到高态反射率与低态反射率之比 (R_{HI}/R_{LI}) 即对比度和插入损耗 (定义为 $10\log R_{HI}$) 两者都得到优化, 因而调制器一般做成常通形式^[5,6]。我们设计的常通型器件的结构如图 1 所示。其设计细节参考文献[4]。材料由 MBE 设备生长。

制作列阵时必须将器件刻至 N 型 DBR 以便将每一个器件之间进行电隔离, 另外为了在 N 型 DBR 上布电极引线, 应该在 N 型 DBR 上用绝缘物质进行绝缘, 我们采用的绝缘物质为聚酰亚胺。8×8 MQW SLMs 列阵制备的工艺流程如下:

- 1) P 面蒸 Cr-Au;
- 2) 腐蚀至 N 型 DBR 层, 形成器件台面和电极压焊点, 使 8×8 MQW SLMs 各器件之间以及电极之间形成电隔离;
- 3) 甩聚酰亚胺;
- 4) 固化聚酰亚胺, 光刻, 露出 P 面电极接触点和压焊电极接触点, 固化聚酰亚胺;
- 5) P 面蒸 Cr-Au;
- 6) 光刻 Cr-Au, 露出光窗口并形成电极图形;
- 7) 解理、压焊、装片。

最后制成的 8×8 MQW SLMs 列阵如图 2 所示。我们制作的 MQW SLMs 器件没有单独引出 N 面电极, 所有每两个 MQW SLMs 器件之间形成两个背靠背的二极管, 工作时一个管子加正向电压, 另外一个管子加反向电压。这样可以减化工艺条件。

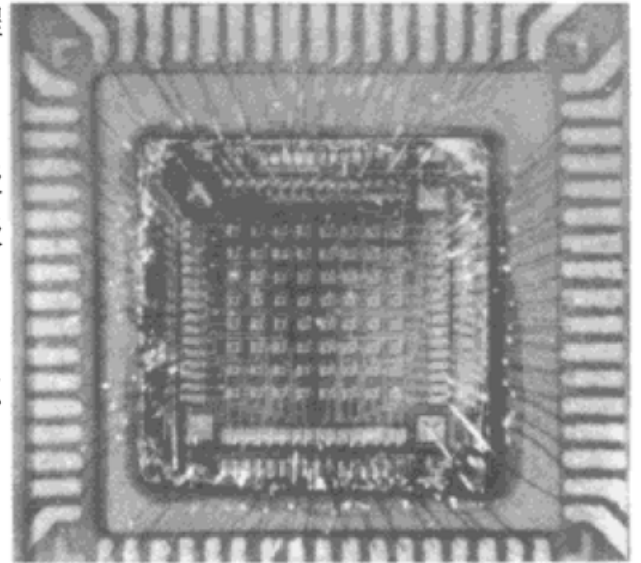


图 2 8×8 MQW SLMs 列阵照片

Fig. 2 Photograph of an 8×8 MQW SLMs array

3 8×8 MQW SLMs 列阵特性测试

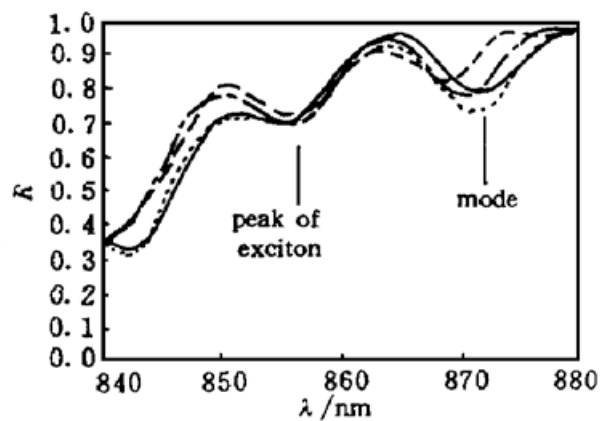
8×8 MQW SLMs 列阵特性包括 ASFP 腔模式位置的均匀性、耐压特性和器件的对比度以及插入损耗等。模式位置的均匀性将直接影响器件的对比度, 因为对于常通型调制器件所使用的半导体激光器的工作波长总是选择在模式位置, 只有工作在模式位置器件才能获得高的

对比度和低的插入损耗, 如果模式不均匀, 将只能使一部分器件工作在模式位置而另外的器件将偏离模式位置, 从而使其对比度下降。耐压值的高低将决定器件的反偏电压的最高值。对比度以及插入损耗直接影响探测器的设计和探测效率。我们制作的 8×8 MQW SLMs 列阵的耐压值如表 1 所示。从表 1 可知器件的耐压值分布不均匀, 有的高达 25 V, 而有的很低, 耐压值大于等于 8 V 的大约占 60%, 大于等于 6 V 的大约为 80%。耐压值分布不均匀主要是由于 i 区量子阱本底载流子浓度不均匀造成的。 PN 结的击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿两种^[7,8], 一般击穿电压 $4\epsilon_g/e \approx 5.6$ V 以下时为齐纳击穿^[8] (ϵ_g 为禁带宽度, e 为电子电量), 大于 $4\epsilon_g/e$ 为雪崩击穿。表 1 中所示击穿既有雪崩击穿, 又有齐纳击穿。由于齐纳击穿一般发生在 i 区本底载流子浓度较高时, 而且雪崩击穿电压也随 i 区载流子浓度的增高而下降^[7], 为了提高器件的耐压值, 应降低 i 区量子阱的本底载流子浓度。

表 1 8×8 MQW SLMs 列阵耐压分布Table 1 Breakdown voltage distribution of an 8×8 MQW SLMs array

breakdown voltage/V	column	1	2	3	4	5	6	7	8
row 1	1	8	25	6	8	6	8	6	12
row 2	2	6	10	6	6	10	6	0	4
row 3	3	8	25	1	25	8	8	25	12
row 4	4	6	25	25	10	25	8	12	14
row 5	5	8	25	25	25	10	10	10	12
row 6	6	10	1	25	25	14	1	6	8
row 7	7	8	25	6	4	2	14	2	6
row 8	8	12	6	25	6	8	25	20	6

通过测量器件反射谱的方法可得知器件的激子峰和模式的位置。图 3 为 8×8 器件对角单元的反射谱。激子峰大约在 860 nm, 而模式位置大约在 868.5 ~ 871.4 nm 之间, 模式差别不是很大, 器件在模式位置处的高态反射率也基本相同, 约为 80%, 插入损耗为 1 dB。一般在模式和激子峰位置都会由于吸收的增强而出现一个凹谷, 但模式的位置在片子不同测量点一般会有差异, 而对于激子峰来说整个片子的差异很小。模式的差异是由生长时厚度的偏差造成的, 通过测量生长片的反射谱, 我们发现片子中间约 1 cm^2 内模式基本相同, 生长厚度差异很小, 边缘位置模式的移动达 2~3 nm/mm, 中间与最边上模式差别达 20 nm。要获得模式很均匀的列阵, 应取生长片中间部分制作器件。

图 3 8×8 列阵对角单元反射谱Fig. 3 Reflection spectra of diagonal cells of an 8×8 MQW SLMs array

8×8 MQW SLMs 列阵电调制特性的测试使用如图 4 所示的光路。由于 8×8 MQW SLMs 列阵每个器件之间的间距只有 $400 \mu\text{m}$, 光窗口的大小只有 $80 \mu\text{m}$ (光斑直径必须小于此值)。为了产生间距如此小的 64 个光斑点阵并将其聚焦到每个 MQW SLMs 器件的窗口上面,

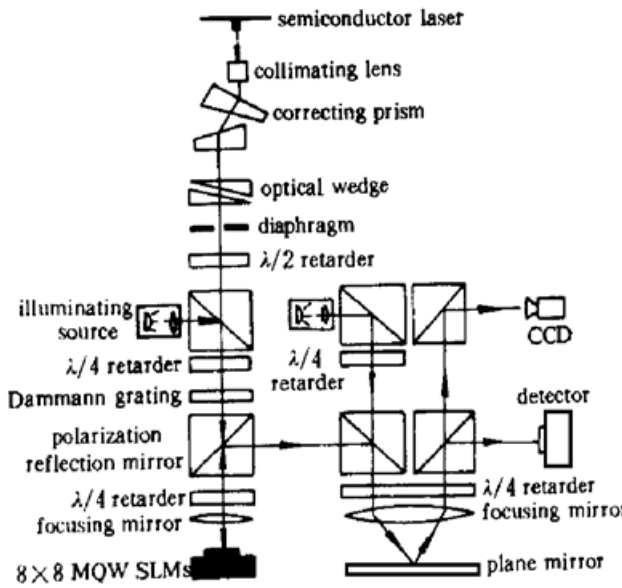


图 4 8×8 MQW SLMs 调制特性测试光路图
 Fig. 4 Optical implementation for the measurement of modulation characteristics of 8×8 MQW SLMs

我们采用 8×8 的 Dammann 光栅, 将半导体激光器准直后的一束光分成 64 路并用透镜聚焦到 MQW SLMs 器件的窗口上。在图 4 中, 准直透镜将半导体激光器发出的发散光准直为平行光, 纠正棱镜将椭圆光斑变为圆形光斑, 光楔可使光束平移。准直后的激光经 8×8 Dammann 光栅分束后, 透过偏振光反射镜和 λ/4 波片, 经透镜聚焦到 8×8 MQW SLMs 上。经调制器调制后反射的光再经过 λ/4 波片时, 偏振方向将旋转 90°, 原来能透过偏振光反射镜的光不能透过, 被反射至下一级光路。在图 4 中, 平面反射镜的位置本应放置 8×8 列阵探测器, 但由于找不到合适的列阵型探测器, 只好用单个的 Ge 探测器来代替。照明光源可用来照亮调制器光窗口, 如果没有照明光源, CCD 摄像机只能看到光斑点阵, 照明光源可使我们很清楚地观察到光斑是否对准了调制

器的光窗口。在调整光路时, 首先必须调整激光器准直系统, 得到很好的准直光, 然后在调制器位置也放上平面反射镜, 调整平面镜和透镜位置, 直到 CCD 能看到十分清楚的光斑点阵, 最后才放上 8×8 调制器列阵, 调整调制器与透镜的距离和俯仰, 直到光斑清楚地照到调制器光窗口上。图 5 为光斑打到调制器窗口上的照片, 中间部分可清楚地看到调制器的光窗口, 边缘由于照明较弱而难以看清。从中间部分可知, 光斑点阵准确地照到了调制器光窗口上面。由于光斑点阵与光窗口的对准精度必须达到十几微米的量级, 对整个系统的稳定性要求特别高。为此我们特别制作了带有方形滑槽的钢制光具座。绝大部分元件固定在圆筒形的钢管中, 钢管再固定在方型基座上, 其相对位置在固定前可以微调以补偿元件轴心的偏离。方型基座可在方型槽内滑动, 基座与槽的相对位置固定好后, 槽内再放置磁铁牢牢吸住圆筒形的钢管。采取这样的措施后, 整个系统运行非常稳定。

为了测量 MQW SLMs 的调制特性, MQW SLMs 上应加上反偏的电调制信号, 然后探测被调制的光信号。由于我们没有找到合适的列阵型光探测器, 同时也是因为还没有设计出一整套 64 路信号的产生和接收处理的电路, 只能对 8×8 MQW SLMs 单个器件分别进行测试。不失一般性, 图 6 给出了 8×8 MQW SLMs 中两个器件的光调制特性。上面的为调制光信号波形, 下面的为输入调制电压。由图可知反偏电压高时, 反射光信号减小, 为常通型器件。半导体激光器发出的光波长大约在 870 nm, 此波长大约在调制器的模式位置, 调制器激子峰在 860 nm。反偏电压为零时, 在 870 nm 处吸收系数比较小, 反射光信号强; 反偏电压增大时, 激子峰往长波方向移动, 870 nm 处吸收系数增大, 反射光信号因而减小。器件高低态反射光信号之比即对比度分别

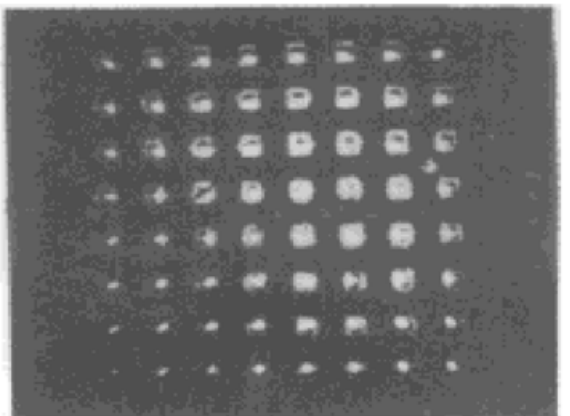


图 5 8×8 光斑点阵与 8×8 列阵窗口的对准

Fig. 5 Alignment of an 8×8 optical spots array and 8×8 array windows

约为 3 和 2, 对比度较低主要是因为模式偏离激子峰较远, 使得加反偏电压时吸收系数在模式位置依然较小, 低态反射率比较高。

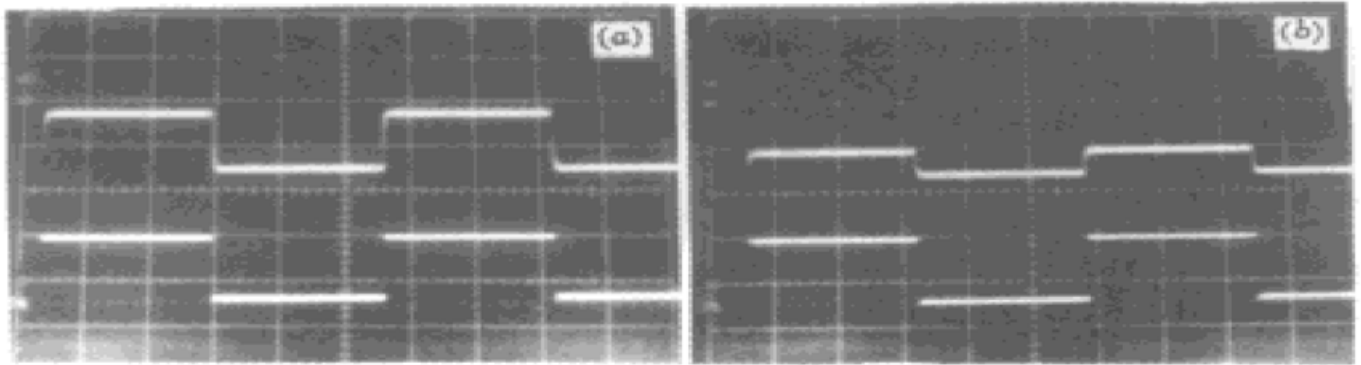


图 6 8×8 MQW SLMs 调制特性

(a) 器件之一调制特性; (b) 器件之二调制特性(上: 调制光信号 5 mV/div, 下: 输入调制电压 5 V/div)
(图中光输出信号为零的位置在示波器刻度的正中间位置, 横坐标为 0.2 ms/div)

Fig. 6 Modulation characteristics of (a) one and (b) another 8×8 MQW SLMs

Top: modulated optical signal (5 mV/div); Bottom: input modulating voltage (5 V/div)

(Position of the zero optical output signal lies just in the middle of the scale of the oscilloscope.
horizontal coordinate: 0.2 ms/div)

4 讨 论

列阵型调制器用于光互连与用分立的多个激光器构成的光互连相比具有集成化、可靠性高等明显的优点。与列阵型发光器件如 LED 或 LD 相比不易损坏, 寿命长。因而列阵型光调制器用于光互连, 这几年来发展很快。我们制作了可用于光互连的常通型 8×8 MQW SLMs 光调制器, 模式差别不是很大, 器件基本都可正常工作, 部分器件耐压值偏低, 我们认为是材料生长时 i 区本底载流子浓度不均匀所致。通过改进材料的生长质量, 提高生长片的厚度均匀性和掺杂均匀性, 并加强后工艺制作, 可提高器件的成品率。另外, 要获得高的对比度和低的插入损耗还必须调整好模式与激子峰的间距。由于在生长材料时不可避免地存在厚度的偏差, 使得设计的模式位置与实际值总有一些偏离, 为此必须寻求后工艺的解决办法, 比如镀膜或湿法腐蚀可使腔长分别增加或减小, 从而增大或减小模式。光路设计也是一个很重要的问题, 以前系统中的光学元件放在隔振平台上, 前后左右都可以动, 很不稳定, 光路调试也十分困难。本实验中光学元件只在方形槽中滑动, 光路调整后元件用磁铁固定, 系统非常稳定。本实验中的光路可用来完成 64 路, 256 路 (16×16) 光信号传输实验。另外, 我们正在考虑用 MQW SLMs 本身作为列阵型光探测器使用, 由于 MQW SLMs 本身既是一个光探测器又是一个光调制器, 因而在原理上是可行的, 但需要对器件的结构进行重新设计, 以便兼顾调制器和探测器两者的性能。

参 考 文 献

- 1 D. A. B. Miller, J. E. Henry, A. C. Gossard *et al.*. Integrated quantum well self-electro-optic effect device: 2×2 array of optically bistable switches. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(13): 821~ 823
- 2 I. Bar-Joseph, G. Sucha, D. A. B. Miller *et al.*. Self-electro-optic effect device and modulation converter with InGaAs/InP multiple quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(1): 51~ 53

- 3 Frederick B. McCormick, Tom J. Cloonan, Anthony L. Lentine *et al.*. Five-stage free-space optical switching network with field-effect transistor self-electro-optic-effect-device smart-pixels arrays. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8) : 1601~ 1618
- 4 Chen Zhibiao, Gao Wenzhi, Chen Hongda *et al.*. Modulation characteristics analysis of asymmetric Fabry-Perot cavity and GaAs/AlGaAs modulator with high contrast ratio. *Chinese J. Semiconductors* (半导体学报), 1996, **17**(12) : 891~ 897 (in Chinese)
- 5 K.-K. Law, M. Whitehead, J. L. Merz *et al.*. Simultaneous achievement of low insertion loss, high contrast and low operating voltage in asymmetric Fabry-Perot reflection modulator. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(20) : 1863~ 1865
- 6 Kezhong Hu, Li Chen, Anupam Madhukar *et al.*. High contrast ratio asymmetric Fabry-Perot reflection light modulator based on GaAs/AlGaAs multiple quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(9) : 1108 ~ 1110
- 7 W. T. Tsang, translated by Du Baoxun. Semiconductor Optical Detectors. Beijing : Electrical Industry Press, 1992. 220 (in Chinese)
- 8 Ye Liangxiu. Semiconductor Physics, vol. 2. Beijing : High Education Press, 1988. 719 (in Chinese)

8×8 Multiple Quantum Well Spatial Light Modulators for Optical Interconnection

Wu Ronghan Chen Zhibiao Chen Hongda Gao Wenzhi

*(National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Cao Mingcui Wan Anjun Liu Zhongling Li Hongpu

(National Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wu Han 430074)

Abstract 8×8 multiple quantum well spatial light modulators (MQW SLMs) are designed and their breakdown voltage, ASFP mode, contrast ratio and insertion loss are measured. An optical interconnection pattern is implemented in which 8×8 optical beams are generated from a semiconductor laser by using a Dammann grating and are routed to the 64 windows of 8×8 SLMs. Through this architecture, modulation characteristics of 8×8 SLMs can be measured.

Key words MQW, SLM, optical interconnection