

GaAlAs/GaAs 量子阱行波 Mach-Zehnder 光调制器电极传输线的微波响应*

周剑英 李锡华 周小平 陈克坚 赵 旭 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 研制了利用直线法设计的基于 GaAs 衬底上的 Mach-Zehnder 行波光调制器。波导层使用了场诱折射率改变量较大的非对称多量子阱结构, 采用脊型波导, 并湿法刻蚀出台面以消除波导区以外的载流子引起的损耗。调制器电极微波特性测试结果表明频率响应在 2.5~20GHz 没有明显的起伏, 但在低频段响应下降很快, 另外微波损耗较大, 讨论了其原因和改进方法。

关键词: 调制器; 马赫-曾德尔; 多量子阱

PACC: 4280K; 4280S; 5270G EEACC: 1250

中图分类号: TN 36 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2003)11-1206-05

1 引言

光调制器是光纤通信系统中的重要器件, Mach-Zehnder(MZ)光调制器可推挽运行且具有控制频率啁啾的能力。而量子阱 MZ 调制器利用量子限制 Stark 效应(QCSE), 具有速度快、结构紧凑、驱动功率小等优点, 因此这方面的研究越来越受到重视。

国内在以半导体量子阱材料制作光调制器的研究中, 中国科学院半导体研究所在集总型 InGaAs/InAlAs 电吸收调制器^[1]和清华大学在 InGaAsP 调制器与 DFB 激光器集成^[2]方面均取得了较好的成果。随着互联网业务量的迅猛增长, 要求光调制器具有更高的带宽(40GHz 以上), 以提高系统的传输能力。为此人们提出了行波电极结构的调制器, 由于电极被设计成传输线, 不仅调制带宽高, 而且可以用较长的调制区长度以增加调制效率, 因而是一种很有效的光调制器结构, 目前国际上在这方面的研究工

作已经取得了很好的进展。

本文利用直线法设计了行波电极^[3], 并用 MOCVD 技术生长了 GaAlAs/GaAs 多量子阱 (QMW) 材料, 通过 X 射线双晶衍射分析了材料特性, 在此基础上, 用湿法腐蚀制作 Mach-Zehnder 量子阱光调制器, 最后用 HP8720D 网络分析仪对器件的 S 参数进行测试, 并对器件的微波特性进行了测量和分析。

2 材料生长和特性测量

2.1 材料生长

首先对使用的材料进行理论设计, 以获得尽可能大的场诱折射率改变量。衬底是半绝缘 GaAs, 首先在其上生长 0.2μm 的缓冲层; 接着生长 1.8μm 的 GaAlAs 下限制层, 在其中夹一 0.05μm 的 GaAlAs 重掺杂层; 然后生长 30 个周期的不掺杂的非对称耦合量子阱层; 最后生长 0.6μm 的 GaAlAs 上限制层。本材料由美国麻省州立大学用 MOCVD

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60277034)

周剑英 男, 1974 年出生, 博士研究生, 目前从事无源光波导器件的研究。

李锡华 男, 1962 年出生, 副教授, 目前主要从事集成光学器件和工艺的研究。

周小平 男, 1977 年出生, 硕士研究生, 目前从事无源光波导器件的研究。

2002-12-20 收到, 2003-05-16 定稿

©2003 中国电子学会

设备生长得到。

2.2 X 射线双晶衍射测量

X 射线双晶衍射是一种评价材料生长质量的有效手段。图 1(a)是材料的 X 射线衍射图。图上在 $0''$ 附近存在三个大的尖峰, 它们分别是 GaAs、GaAlAs 覆盖层和 MQW 零级衍射峰。在图中的右边还可以观察到一些很细小的尖峰, 它们是 MQW 的高次衍射峰。根据图上高次衍射峰的距离, 可由 Bragg 方程 $2d\sin\theta = L\lambda$ 推算出 MQW 的宽度周期。其中 d 为 MQW 的周期($d = \text{阱宽} + \text{垒宽}$), λ 为 X 射线波长, L 为衍射级数。X 射线双晶衍射的结果与我们的设计结果接近。测量得到 MQW 的周期为 25.8nm , 设计值为 23.2nm , 图 1(b)为设计的量子阱材料的势能模型图, 图中 $1\text{ML} = 0.293\text{nm}$ 。

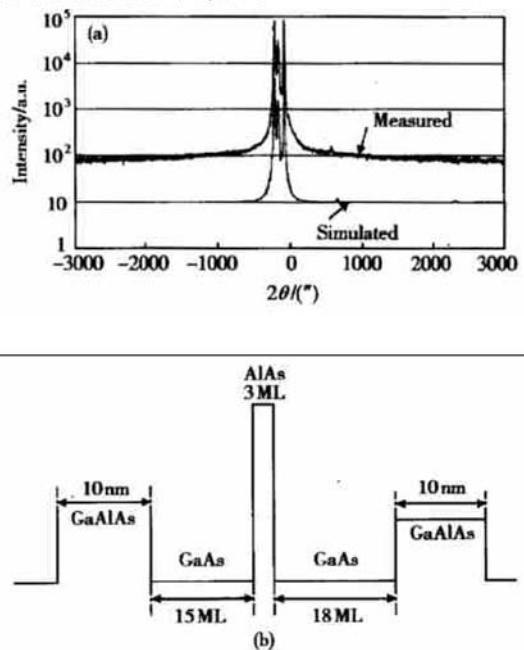


图 1 (a) MQW 材料的 X 射线衍射图; (b) 设计的非对称量子阱材料的势能图

Fig. 1 (a) XRD pattern of the MQW materials;
(b) Potential diagram of the designed MQW

3 Mach-Zehnder 干涉型调制器的制作和特性测试

3.1 器件制作

MZ 调制器采用脊型波导结构, 脊高 $0.6\mu\text{m}$ 。如图 2(a)所示, 干涉臂的波导宽度为 $3\mu\text{m}$; 为了减小

未耗尽载流子带来的损耗, 采用台面结构, 腐蚀掉不必要的外延层^[4], 台面高 $3.5\mu\text{m}$, 并在刻蚀区代之以绝缘体; 行波电极覆盖在脊波导和绝缘体上, 电极结构如图 2 所示, 电极上微波与光波的互作用区长度为 1mm 。

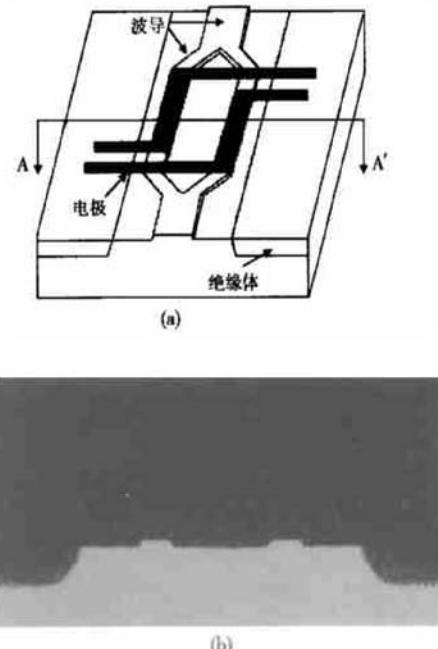


图 2 (a) Mach-Zehnder 调制器结构示意图; (b) 调制器 A-A' 波导截面图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of Mach-Zehnder modulator; (b) A-A' waveguide cross-section view of the modulator

3.2 静态特性

采用分布反馈(DFB)激光器的光源($1.3\mu\text{m}$), 测试了器件通光特性, 其近场光斑(见图 3)表明器件导光正常, 符合设计要求。

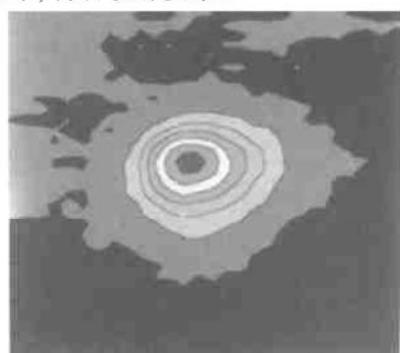


图 3 调制器输出波导的近场光斑图

Fig. 3 Near field optical pattern of the output waveguide

3.3 调制器电极微波频率特性

在调制器电极微波频率特性测试中, 没有耦合光波。本器件设计中考虑采用适当的重掺杂层厚度 d_3 和电导率以获得光波和微波有效折射率的匹配^[5], 见图 4。在折射率失配较小的情况下, 测量电极微波特性以据此由归一化增益方程模拟调制器的调制响应特性^[6]。由网络分析仪一端口送出的微波扫频电信号接到调制器一侧端口, 经行波电极传输的微波电信号接到网络分析仪的另一个端口, 见图 5。通过对 S 参数的测量就可以获得行波电极微波

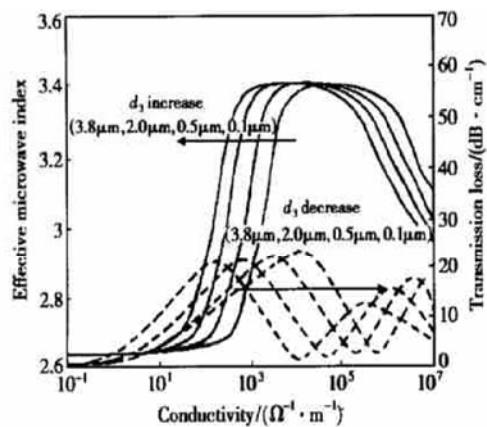


图 4 器件结构、微波有效折射率与重掺杂层厚度 d_3 及其电导率的关系

Fig. 4 Effect on microwave effective index of the thickness and conductivity of the heavy doped layer

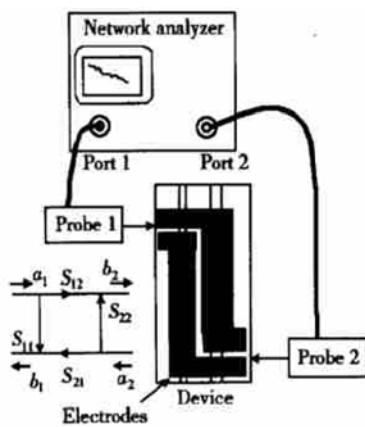


图 5 调制器电极微波特性测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of microwave properties measurement for modulator electrode

频率特性, 得到的 S_{12} 参数曲线就是光调制器电极的微波频率响应。图 6 是实测的特性曲线, 图中的曲线显示, 调制器电极在低频段性能很不稳定, 但在

2.5~20GHz 之间信号没有明显地衰减, 而且由于器件未进行更高频率的测试, 尚难确定其急剧下降点。

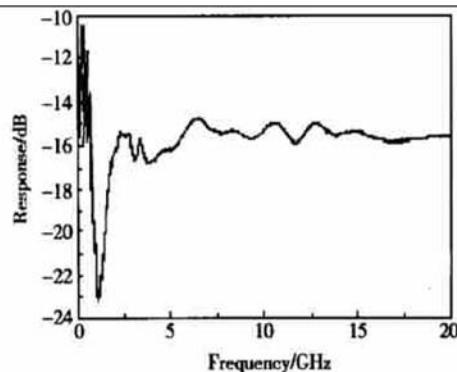


图 6 实验测得的调制器电极微波响应曲线

Fig. 6 Measured microwave response of the modulator electrode

4 讨论

4.1 调制器电极微波特性与其调制频率响应

在行波调制器中, 电极特性决定了调制器的主要性能指标。由调制器电极的微波特性, 据归一化增益方程(又称为调制缩减关系式)模拟调制器的调制频率响应。

电极 S 参数的测试结果表明, 该调制器电极的频率带宽是比较宽的, 但在 0~2.5GHz 之间的低频段特性比较差。

4.2 关于阻抗匹配

对行波调制器来说, 既要求调制信号与光波之间的速度匹配, 也要求信号源与调制器之间的阻抗匹配(通常为 50Ω)^[7~9]。若行波调制器的终端阻抗没有达到匹配, 在电极上就会形成驻波, 驻波模式与频率有关, 因此电极上的有效电压将会是一个与频率有关的函数^[10]。这一结果会改变调制效率, 造成调制响应的起伏, 最明显的特点是在微波频率较低时调制响应会突然下降。可以在馈电区利用渐变传输线匹配阻抗以改善性能, 但是阻抗渐变引起的反射将使损耗增加。在设计时也发现本器件难以实现阻抗匹配, 且由于在量子阱行波光调制器的设计中, 为了实现阻抗匹配而可以调节的参数较少, 特征阻抗小于 50Ω 带有一定的普遍性; 目前低阻抗行波调制器也得到了广泛地研究, 在调制响应测试实验中

使用小于 50Ω 的负载(接近或低于电极微波测试得出的调制器阻抗)端接, 可以获得较高的带宽^[6,11]; 由于使用量子阱材料调制器器件长度较体材料调制器减小很多, 而在较短的器件长度下, 这种失配可以极大地增加带宽, 并且较小的失配并不会使传输函数有明显的峰, 但在系统中还是要求阻抗不宜太小^[12]; 另外对阻抗 35Ω 左右的器件做 10Gb/s 数据传输性能和眼图测试也取得了较好的结果^[13]. 本器件的特征阻抗小于 50Ω . 可以看出, 电极微波损耗主要在直流到低频段, 但低频段响应的振荡下降又上升的原因尚有待进一步研究, 类似的结果还未见报道.

4.3 关于微波损耗

行波电极的微波损耗对调制带宽有较大的影响, 解决方法通常是加厚电极或减薄衬底. 本实验由于条件限制电极较薄, 而且衬底也很厚, 结果导致微波损耗相当大.

加厚行波电极是降低微波传输损耗的有效措施之一. 在常规的衬底上使用厚度为几个至十几微米的共面传输线电极, 这时厚电极强制导模以较高速率通过低介电材料, 频率较低时损耗小, 但在高频时损耗变大. 另一种方法是刻蚀掉共面电极和衬底间大部分不必要的部分, 使导模大部分经过空气, 然而该方法对有限的衬底材料适用; 最有效的方法是使用薄衬底, 在薄的衬底上制作共面传输线电极可以减小色散, 同时也可以抑制辐射损耗, 而且对大多数衬底材料适用, 尤其是化合物半导体材料. 利用增设牺牲层的方法可以剥离外延层并将只保留了外延波导层的芯片移置到新的衬底上, 从而制作出具有良好传输性能的传输线^[14], 该项研究工作本实验室也正在进行中^[15].

4.4 关于速度匹配(即微波有效折射率问题)

采用量子阱波导材料, 使用行波电吸收结构, 将使器件尺寸大大缩小, 器件长度与性能指标之间的矛盾得到部分解决, 由于器件变短, 工作频率进入毫米波甚至亚毫米波范围之后调制微波与光波之间的速度匹配已经不是主要矛盾, 带宽更主要受微波损耗的限制^[16].

5 总结

制备了工作于短波长的 GaAlAs/GaAs 量子阱

Mach-Zehnder 行波光调制器, 器件通光测试正常, 通过对 S 参数的测量, 电极的微波频率响应可达 20GHz 以上, 这说明了该量子阱材料行波 Mach-Zehnder 光调制器的研制结果基本达到了理论设计的要求, 但还存在一些问题有待进一步解决. 特别是器件在低频段的响应特性比较差, 微波损耗也比较大, 以上结果为进一步的研究工作打下了良好的基础. 另外在耦合封装条件成熟的情况下, 将进行耦合光波的调制频率响应试验, 以便获得器件的最终性能.

致谢 作者感谢美国麻省州立大学的张济志博士、香港科技大学刘凯梅教授所提供的量子阱材料, 感谢中国科学院半导体所的祝宁华教授、刘宇博士所进行的微波性能测试.

参考文献

- [1] Wang Jianhua, Jin Feng, Yu Qian, et al. InGaAs/InAlAs multiple quantum well electroabsorption modulator. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19(1): 43 (in Chinese) [王健华, 金峰, 余谦, 等. InGaAs/InAlAs 多量子阱电吸收光调制器. 半导体学报, 1998, 19(1): 43]
- [2] Luo Yi, Sun Changzheng, Wen Guopeng, et al. 2.5Gb/s $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DFB laser/electroabsorption modulator integrated device. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(5): 416 (in Chinese) [罗毅, 孙长征, 文国鹏, 等. 2.5Gb/s $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP 分布反馈激光器/电吸收调制器单片集成器件. 半导体学报, 1999, 20(5): 416]
- [3] Zhao Xu, Yang Jianyi, Wang Minghua. Microwave characteristics analysis of Mach-Zehnder GaAs/GaAlAs traveling-wave optical modulator. Journal of Microwave, 2000, 16(5): 522 (in Chinese) [赵旭, 杨建义, 王明华. Mach-Zehnder 型 GaAs/GaAlAs 行波光调制器的微波特性分析. 微波学报, 2000, 16(5): 522]
- [4] Khazaei H R, Berolo O, Wang W. Experimental analysis of microwave loss due to substrate carrier concentration in traveling-wave electro-optic modulators. SPIE, 1998, 3491: 90
- [5] Zhao X. Study of high-speed MQW traveling-wave optical modulator. Zhejiang University Doctoral Dissertation. 2001 (in Chinese) [赵旭. 高速量子阱行波光调制器的研究. 浙江大学博士论文, 2001]
- [6] Li G L, Sun C K, Pappert S A, et al. Ultrahigh-speed traveling-wave electroabsorption modulator-design and analysis. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1999, 47(7): 1177
- [7] Spickermann R, Sakamoto S R, Dagli N. GaAs/AlGaAs traveling wave electrooptic modulators. SPIE, 1997, 3006: 272
- [8] Spickermann R, Sakamoto S R, Dagli N. In traveling-wave

- modulators which velocity to match. IEEE/LEOS'96, 1996: 97
- [9] Rigrod W W, Kaminow I P. Wide-band microwave light modulation. IEEE Proc, 1963, 51(2): 137
- [10] Gopalakrishnan G K, Burns W K, McElhanon R W, et al. Performance and modeling of broadband LiNbO₃ traveling wave optical intensity modulators. J Lightwave Technol, 1994, 12 (10): 1807
- [11] Zhang S Z, Chiu Y J, Abraham P, et al. 25GHz polarization-insensitive electroabsorption modulators with traveling wave electrodes. IEEE Photonics Technol Lett, 1999, 11(2): 191
- [12] Irmischer S, Lewen R, Eriksson U. InP-InGaAsP high-speed traveling-wave electroabsorption modulators with integrated termination resistors. IEEE Photonics Technol Lett, 2002, 14 (7): 923
- [13] Chiu Y J, Chou H F, Kaman V, et al. High extinction ratio and saturation power traveling-wave electroabsorption modulator. IEEE Photonics Technol Lett, 2002, 14(6): 792
- [14] Frankel M Y, Voelker R H, Hilfiker J N. Coplanar transmission lines on thin substrates for high-speed low-loss propagation. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1994, 42(3): 396
- [15] Yang Jianyi, Wang Minghua, Jiang Xiaoqing. Selective etching of GaAs substrate. Journal of Optoelectronics • Laser, 1998, 9 (1): 51(in Chinese) [杨建义, 王明华, 江晓清. GaAs 衬底的选择性刻蚀. 光电子 • 激光, 1998, 9 (1): 51]
- [16] Liao H H, Mei X B, Loi K K, et al. Microwave structures for traveling-wave MQW electro-absorption modulators for wide band 1.3μm photonic links. SPIE, 1997, 3006: 291

Microwave Response of Electrode Transmission Line of GaAlAs/GaAs Quantum Wells Traveling-Wave Optical Modulator*

Zhou Jianying, Li Xihua, Zhou Xiaoping, Chen Kejian, Zhao Xu and Wang Minghua

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The Mach-Zehnder traveling-wave modulator designed by method of lines is fabricated on the substrate of semi-insulator GaAs. The optical waveguide layer adopts the asymmetric multiple quantum wells with larger change of field-induced reflective index. Ridge waveguide is used for the optical transmission, and a mesa is wet etching to reduce microwave loss for the unnecessary carriers. The properties of microwave frequency response are analyzed in the experimental results. The frequency response drops faster at lower frequency, and keeps no evident drop in the range of 2.5~20GHz. The bandwidth is more than 20GHz for the limitation of measurement. The microwave loss is relatively large. The reason is discussed and the way for improving is suggested.

Key words: modulator; Mach-Zehnder; MQW

PACC: 4280K; 4280S; 5270G **EEACC:** 1250

Article ID: 0253-4177(2003)11-1206-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60277034)

Zhou Jianying male, was born in 1974, PhD candidate. He is engaged in the research on optical waveguide device.

Li Xihua male, was born in 1962, associate professor. He is engaged in the research on optical device and process.

Zhou Xiaoping male, was born in 1977, MS candidate. He is engaged in the research on optical waveguide device.