

InGaAs/InAlAs 多量子阱电吸收光调制器*

王健华 金峰 俞谦 孙可 李德杰

(清华大学电子工程系 集成光电子学国家重点实验室 北京 100084)

蔡丽红 黄绮 周钧铭

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

王玉田 庄岩

(中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心 北京 100083)

摘要 用国产 MBE 设备生长出与 InP 衬底晶格匹配的 InGaAs/InAlAs 多量子阱材料, 并对材料的量子限制 Stark 效应及其与光偏振方向有关的各向异性电吸收特性进行研究. 用该种材料制作的脊波导结构电吸收调制器在 2.4V 驱动电压下实现了 20dB 以上消光比, 光 3dB 带宽达 3GHz.

PACC: 4280K, 4280S, 7865

1 引言

光调制器是光纤通信系统中的重要器件, 用半导体量子阱材料制作的电吸收型光强度调制器具有驱动电压小、调制速率高、频率啁啾小、易于和半导体激光器单片集成等优点^[1]. 多量子阱(MQW)电吸收型光调制器利用的是量子限制 Stark 效应(QCSE), 即当量子阱区存在垂直于阱壁方向的电场时, 它的吸收带边会发生红移^[2]. 在众多的半导体多量子阱材料中, 与 InP 衬底晶格匹配的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As MQW 材料具有独特的优点. 它的吸收带边在光通信所用的 1.55μm 附近; 其价带不连续小, 光生空穴泄放快, 比 InGaAsP 材料有更大的饱和吸收光强^[3]. 近年来在国际上得到广泛重视. 此外, 利用调制器的非线性调制特性可以产生超短光脉冲链, 并进而用于生成光孤子. 相比于其它一些生成光孤子的方

* 本课题为 863 高技术计划和国家自然科学基金资助项目

王健华 女, 1946 年出生, 副教授, 目前主要从事半导体光电子器件的材料特性评价及器件研制

金峰 男, 1970 年出生, 硕士研究生毕业, 目前在美国读博士

俞谦 男, 1972 年出生, 博士研究生

1996-12-06 收到, 1997-02-15 定稿

法,这种方法比较简单,而且有高度的灵活性与可靠性^[4,5]。

本研究利用国产分子束外延(MBE)设备生长出高质量 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ MQW 异质结构材料,并通过 X 射线双晶衍射及吸收光电流谱测量等手段,对材料特性进行深入研究,在此基础上制作出电吸收光调制器,并对器件性能进行测量与分析。

2 材料生长与特性测量

2.1 材料生长

本文所用 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ MQW 材料是在中国科学院物理研究所的国产 IV 型 MBE 设备上生长的,衬底为掺硫的 n 型 InP 衬底,外延层为 p-i-n 结构。在 InP 衬底上首先生长厚度为 200nm 的 n 型 ($N = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) InAlAs 下包层,然后是不掺杂的 12 个周期的 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ MQW 结构,阱宽和垒宽均为 8.5nm,接着是 1.5 μm 厚的 p 型 ($P = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) InAlAs 上包层,最后是 100nm 的 p 型高掺杂 ($P = 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) InGaAs 电极接触层。

2.2 X 射线双晶衍射测量

由于 InAs 与 GaAs (或 AlAs) 的晶格常数相差较大(约 7%), InGaAs 与 InAlAs 中 In 组分必须严格控制在与 InP 匹配的组分附近,因此对材料生长要求很高。X 射线双晶衍射提供了评价材料生长质量的有力手段。

图 1 为利用国家光电子工艺中心的日本 Rigaku SLX-1A X 射线双晶衍射仪测量的样品材料在 InP 衬底 (004) 晶面 Bragg 反射峰附近的 X 射线衍射图。图中横坐标为 2 倍 Bragg 角,纵坐标为衍射强度的对数。其中 No. 5 为 InP 衬底 (004) 晶面衍射峰; No. 3 和 No. 4 峰分别对应于 p^+-InGaAs 和 p^+-InAlAs 层; No. 6 为 MQW 零级峰; No. 7 和 No. 2 分别为 MQW $n = +1$ 和 $n = -1$ 的卫星峰; No. 1 为

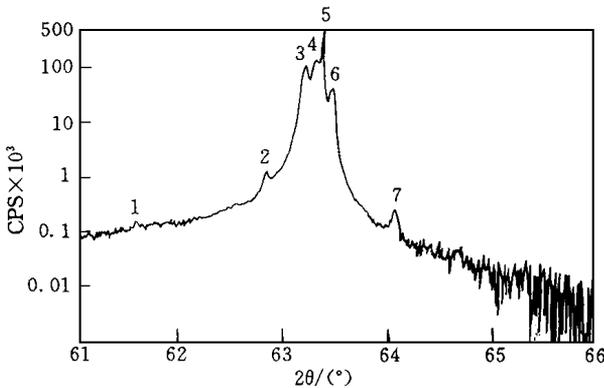


图 1 MQW 材料在 InP (004) 反射峰附近的 X 射线双晶衍射图

MQW $n = +3$ 的卫星峰。其中 $n = \pm 1$ 卫星峰关于零级峰完全对称。图中看不到 $n = \pm 2$ 卫星峰,是因为所设计量子阱材料的阱、垒宽度相同,致使 2 级卫星峰出现消光。

从 X 射线双晶衍射图上各衍射峰的位置,可推算出样品各层的晶格匹配情况与组分,计算结果如下:

表 1 样品各外延层晶格失配情况与对应 In 组分偏差

	$\Delta\theta$	ϵ	ϵ	In 组分偏差
MQW	0.048°	-1.4×10^{-3}	-7×10^{-4}	-0.01
P^+-InAlAs	-0.031°	8.8×10^{-4}	4×10^{-4}	+0.006
P^+-InGaAs	-0.080°	2.3×10^{-3}	1.2×10^{-3}	+0.017

表中 $\Delta\theta$ 为外延层 Bragg 角与 InP 衬底 (004) 晶面的 Bragg 角 θ_0 之差; ϵ 和 ϵ' 分别为外延层在垂直和平行外延层方向上的晶格失配度。可以看出, 外延层的晶格失配在 $1\sim 2\times 10^{-3}$, In 组分偏差为 $1\sim 2\%$ 。

由 Bragg 方程 $2D \sin\theta = L\lambda$, 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。利用 MQW $n = \pm 1$ 卫星峰与零级峰角距离 $\Delta\theta^{\pm 1}$, 可求出 MQW 的周期 D 。在 θ_0 附近对 θ 取差分有

$$D = \frac{\lambda}{2\cos\theta_0} \frac{\Delta L}{\Delta\theta} = \frac{0.519(\text{nm})}{\Delta\theta^{\pm 1}(\text{°})}$$

我们得到 $D = 17.0\text{nm}$, 所以阱、垒宽度为 8.5nm 。

由于材料用于制作波导型调制器, 因此量子阱层上面有很厚的 InAlAs 包层及用作欧姆接触的 InGaAs 层, 在如此厚包层的情况下, 仍清楚观察到 MQW 层的衍射峰及卫星峰, 甚至在卫星峰之间还能看到一些更加细小的 Pendellosung 条纹, 说明多量子阱生长的一致性、均匀性乃至界面平整性都很好^[6]。

2.3 吸收光电流谱测量

由于电吸收光调制器主要是利用多量子阱材料所具有的量子限制 Stark 效应, 因此材料在垂直于阱壁方向的电场作用下, 其吸收边是否会发生红移, 就成了判断材料结构设计是否合理及材料生长质量好坏的重要标志。

为了测量光吸收电流谱, 首先把材料制成宽接触二极管。然后将一束光从单色仪引出, 用 Glan-Talor 棱镜起偏后聚焦照射到二极管的解理腔面上。图 2 和图 3 分别为光场平行于 MQW 层 (TE 偏振) 和光场垂直于 MQW 层 (TM 偏振) 测得的光电流谱。

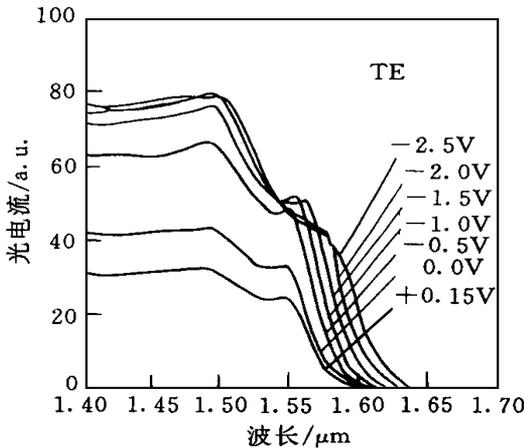


图 2 TE 偏振吸收光电流谱

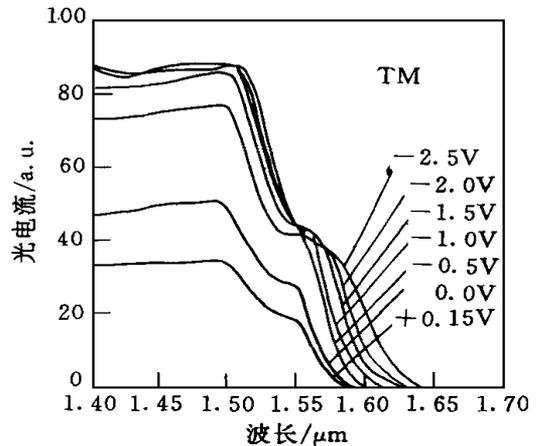


图 3 TM 偏振吸收光电流谱

可以清楚看到, 无论对于 TE 或 TM 偏振, 当外加电压由 $+0.15\text{V}$ 变至 -2.5V 时, 均可观察到明显的吸收边红移, 即量子限制 Stark 效应。同时我们也看到这一效应与入射光偏振态之间的关系: 对 TE 偏振, 当反向偏压较小时, 可观察到重空穴激子吸收峰, 而反向偏压加大后, MQW 区的强电场引起激子峰展宽, 使之难以分辨; 对 TM 偏振, 仅在没有偏压时对应于重空穴激子吸收的地方出现一个光电流平台, 无明显重空穴激子峰。

3 电吸收强度调制器的制作与特性测试

3.1 器件制作

电吸收强度调制器采用脊波导结构,如图 4 所示 脊顶宽度为 $3\mu\text{m}$,底部宽度为 $5\mu\text{m}$. 采用高脊或低脊波导结构,当脊的高度大于量子阱区、上包层和电极接触层之和时即称为高脊结构 为减小器件电容,p 电极层只留下三部分,即覆盖在脊波导上的条形电极、脊波导一侧的用于焊接的矩形电极,以及它们的连接部分. 其中矩形电极的典型尺寸为 $80 \times 130\mu\text{m}$,它与 n 型包层之间为 SiO_2 介质膜,厚度为 $1\mu\text{m}$;连接部分在脊两侧,宽各为 $5\mu\text{m}$,长度与脊波导相同,下面绝缘层设计为 $0.3\mu\text{m}$ 的 SiO_2 . 器件长度为 $150\sim 300\mu\text{m}$.

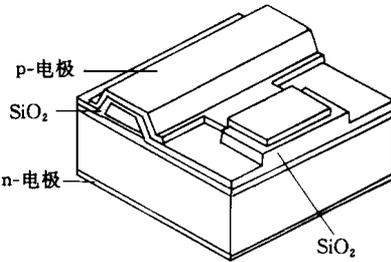


图 4 电吸收强度调制器结构示意图

3.2 静态特性

电吸收型光调制器的静态特性包括通过调制器后的近场光斑形状,静态调制特性,消光比,驱动电压及插入损耗等

在观察近场光斑时,采用分布反馈(DFB)半导体激光器为光源,光经尖锥光纤耦合到调制器脊波导中. 脊波导输出光用透镜成象在摄像机的靶面上,用显示器观察脊波导端面处光斑的形状,并用示波器取出一条经过光场中心的扫描线,监视光强变化. 图 5(见图版 D)为低脊结构调制器的输出光强随器件反向电压的变化. 由图中可以看到,当反向电压从 1.5V 变到 3.9V ,即驱动电压为 2.4V 时,光斑几乎完全消失(图中 V_m 为调制器上所加反向偏压,其中包括 1.5V 的反向偏置电压). 由对应的光强变化可得,消光比在 20dB 以上. 实验证明,采用高脊波导结构可提高对基模的限制能力,模斑形状更近于圆形,使与光纤的耦合效率提高,光纤-光纤的插入损耗可达 13.4dB . 而对低脊波导结构插入损耗通常都超过 20dB .

3.3 频率响应特性

在调制器的频率响应特性测试中,光源使用的是分布反馈式半导体激光器,激光波长为 $1.57\mu\text{m}$,出纤功率为 $1\sim 2\text{mW}$. 光经尖锥光纤耦合到器件的脊波导内. 调制信号是由网络分析仪一端口送出的微波扫描信号. 调制后的光信号再耦合进尖锥光纤,送到光探测器转化为电信号. 探测器输出的电信号再经前置放大器放大后输入网络分析仪另一端口,得到的 S_{12} 参数就是光调制器的频率响应. 系统中使用的微波传输线的特性阻抗为 50Ω . 器件长 $150\mu\text{m}$,电容值为 3pF . 一个 50Ω 的微波匹配电阻与调制器并联. 图 6 为实测的频率特性曲线与根据器件高频电路模型计算的频率特性曲线. 图中两条曲线均显示,调制器的 3dB 带宽

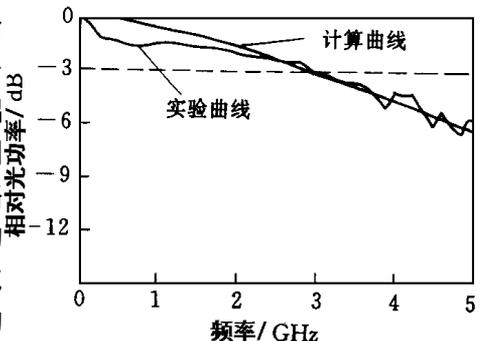


图 6 实测与根据器件高频电路模型计算的频率特性曲线

为 3GHz 计算曲线与实测曲线在低频端有较大差异,说明在低频段的电路模型与实际有差异。此外,调制器的插入损耗较高,使实测数据的稳定性降低,也是二者不能十分吻合的原因。

4 讨论

4.1 关于频率特性

调制器的工作频带宽度主要受限于器件的电容与电感。而脊波导结构器件的电容主要是 p 电极与 n 型衬底之间形成的电容。对于本器件实测的这一数值为 3.0pF,远远大于理论计算的结果。为寻找引起电容增大的原因,进行了一系列实验研究。实验结果证明,引起电容增大的原因主要为如下两方面:其一是矩形电极及其与条形电极连接部分下面的 SiO_2 绝缘层不纯导致其相对介电常数增大;其二是 SiO_2 绝缘层的实际厚度比设计值薄,尤其是在刻蚀脊顶 p 电极窗口时,由于 HF 酸的钻蚀使 SiO_2 绝缘层变薄。因此,改进 SiO_2 成膜工艺和 p 电极窗口刻蚀工艺是减小器件电容的主要方面。

电感主要来自封装中器件管座使用的 SMA 接头的内导体与 p 电极的连接。减小接头内导体与 p 电极间的距离,将有利于减小电感。

只要我们在上述两个方面加以改进,器件的工作频带将可达 10GHz 以上。

4.2 关于插入损耗

在研究中,器件的插入损耗最好达 13.4dB,它包括耦合损耗、端面反射损耗和波导传输损耗,其中两个端面的耦合损耗是最主要的。在光纤通信系统中为更好地发挥半导体电吸收强度调制器驱动电压低、调制频带宽和开关比大等优点,同时克服插入损耗大的缺点,最好的方法是将其与分布反馈激光器集成。另一条为单独使用调制器而采取的途径是在脊波导调制器上加一放大段,使其构成无损甚至带有增益的调制器,这也是目前国际上的发展趋势之一。

5 总结

生长出高质量 $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ 多量子阱材料,对其晶体质量及光学特性进行分析。研制出多量子阱电吸收光调制器,并对存在问题及改进措施进行分析。

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen *et al.*, Phys. Rev. B, 1985, 32: 1043
- [2] 司伟民,李德杰,王健华,等,通信学报,1992,13(4): 55
- [3] B. J. Hawdon, T. Tutken, A. Hangleiter *et al.*, Electron. Lett., 1993, 29: 705
- [4] M. Suzuki, H. Tanaka, K. U. Taka *et al.*, Electron. Lett., 1992, 29: 1007
- [5] E. Yamada, K. Wakita and M. Nakazawa, OFC '93, San Jose, U. S. A., 1993, MD7-1
- [6] M. A. Hiyariza, Jpn. J. Appl. Phys., 1983, 22: L609

InGaAs/InAlAs Multiple Quantum Well Electroabsorption Modulator

Wang Jianhua, Jin Feng, Yu Qian, Sun Ke and Li Dejie

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Cai Lihong, Huang Yi and Zhou Junming

(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Wang Yutian and Zhuang Yan

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 6 December 1996, revised manuscript received 15 February 1997

Abstract The InGaAs/InAlAs MQW materials lattice-matched to InP substrate were grown by Chinese-built molecular beam epitaxy (MBE) system. The Quantum Confined Stark Effect and anisotropic electroabsorption are studied. The ridge waveguide electroabsorption modulator has been fabricated. An optical 3dB bandwidth of 3GHz is obtained with a driving voltage of 2.4V for an extinction ratio of more than 20dB.

PACC: 4280K, 4280S, 7865

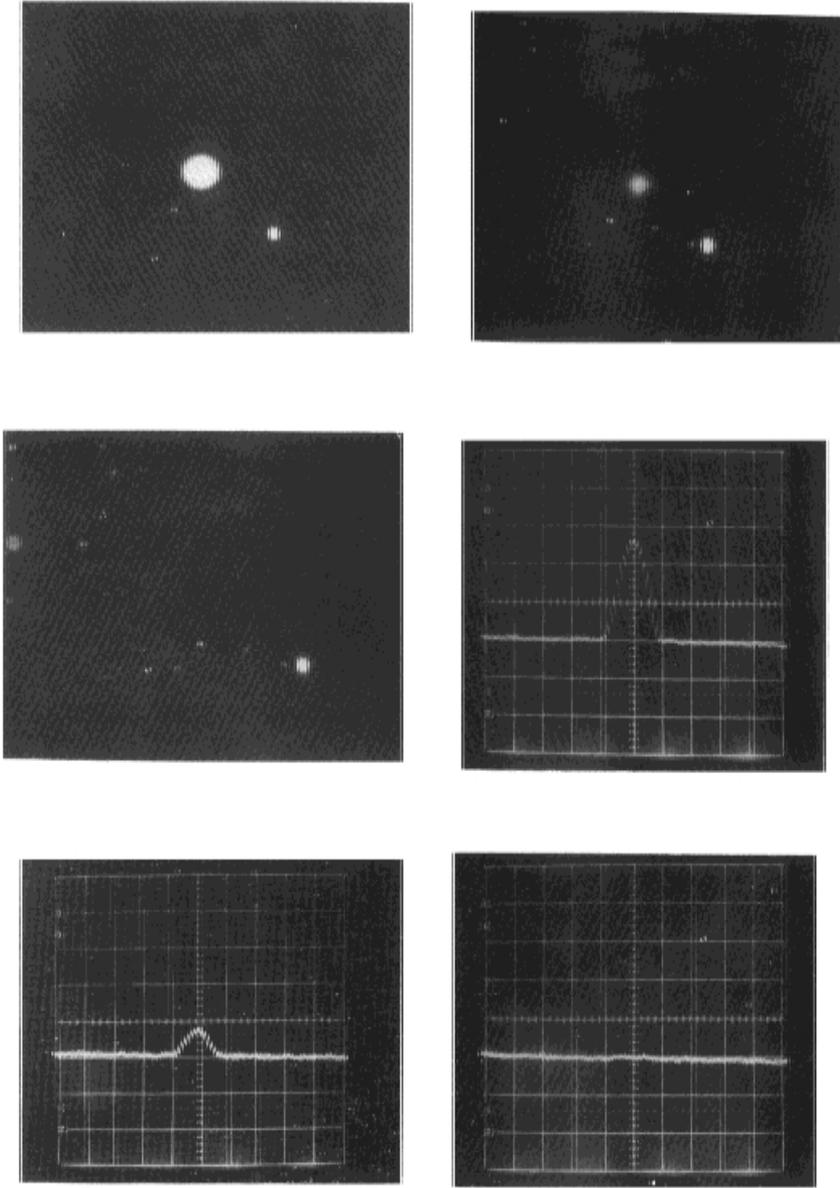


图 5 调制器输出光强随反向电压的变化