

掩蔽与选择性热氧化 GaAs-GaAlAs 多层结构中的应力和光弹性效应

刘弘度 冯哲川 郭长志
(北京大学物理系)

提 要

本文计算了掩蔽与选择性热氧化 GaAs-GaAlAs 多层结构中的应力与光弹性效应。提出介质洛埃镜干涉法,直接观测了 GaAs 上掩蔽生长热氧化膜引起的应力-光弹性效应的折射率分布,测量结果在定性和数量级上与理论计算一致。本文也扼要介绍了应力和光弹性效应对半导体激光器特性的影响及应用于集成光学的可能性。

一、引 言

关于半导体激光器与集成光学中的光弹性光波导,近年来已发表了若干研究工作^[1~5]。最近我们提出 GaAs-GaAlAs 多层结构的掩蔽与选择性热氧化(MSTO)技术^[6],并应用于半导体激光器和无源光波导,本文的目的是进一步研究这种多层结构中的应力和光弹性效应问题。

本文的 MSTO 多层结构是在通常的 GaAs-GaAlAs 双异质结外延片上再掩蔽生长热氧化 Ga₂O₃ 层而形成的,其中存在两种类型的应力:一类是热应变弯曲产生的层内平面切向应力,其数量级为 10⁷~10⁸ dyn/cm²^[7];另一类来自氧化膜条形窗口或条形氧化膜边缘与衬底的相互作用,本文的计算表明这类应力高达 10⁹ dyn/cm² 数量级。因此,为了研究具有 MSTO 结构的 GaAs-GaAlAs 双异质结激光器有源区的应力与光弹性效应以及条形光弹性光波导,可以只考虑后一类窗口应力的作用。在这种情况下,我们的问题可进一步简化为只考虑 GaAs 及其自生长热氧化膜的两层结构,因为 Ga₂O₃ 的热胀系数及杨氏模量^[8]与 GaAs 及 GaAlAs 均相差甚远。

二、应力与光弹性效应分析

1. 氧化膜条形窗口及条形氧化膜的应力场

在 GaAs 衬底上生长 Ga₂O₃ 氧化膜,膜层内应力 σ 满足^[9]

$$\sigma t = \frac{Ed^3}{6R(1-\nu)}, \quad (1)$$

式中 t 为氧化膜厚度, d 为衬底厚度, R 为热应变弯曲半径,立方晶系的 GaAs 等效为各向

同性材料后有^[1]泊松比 $\nu=0.23$, 杨氏模量 $E=12.0 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ 。当衬底具有固有弯曲半径 R_0 时, (1) 式中的 $\frac{1}{R}$ 应代之以 $\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right)$ ^[7]。本文采用牛顿环方法测量氧化前后的样品弯曲曲率半径 R_0 和 R , 测得在 $490^\circ \sim 495^\circ\text{C}$ 温度下热氧化 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 厚 Ga_2O_3 膜的内应力为

$$\sigma = (6.2 \pm 0.3) \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2. \quad (2)$$

同时, GaAs 衬底上生长 Ga_2O_3 膜后因热应变而凸起, 说明 σ 为压应力。

当氧化膜上开有条形窗口或仅生长条形氧化膜时, 由图 1 可见氧化膜边缘受衬底的作用力基本上是平行于表面的切向压应力, 大小为 σt 。由于氧化层很薄, BC 段所受压应力可等效为作用在 BC 段中点的集中作用力 (大小为每单位长度 $\sigma t = G$), 并且此切向压应力对氧化膜边缘下方的影响与它在半空间平面上的作用效果相同。这样一来, 我们的问题的边界条件与文献[1]相同, 因而有相同形式的解。作以上近似所带来的误差, 估计小于 20%。

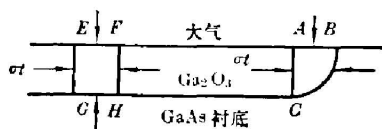


图 1 氧化层内应力分析

Fig. 1 Stress analysis in the oxide film

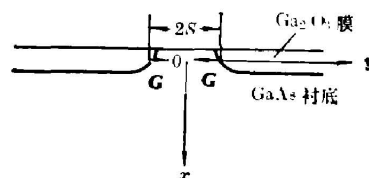


图 2 一对相向集中力作用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a couple of linear force acting along the opposite directions

图 2 表示氧化膜条形窗口的情况。应用文献[1]中的(9)~(12)式, 可得窗口下方任一点 $A(x, y)$ 的应力为

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{2G}{\pi} x^2 \left\{ \frac{y-S}{[x^2+(y-S)^2]^2} - \frac{y+S}{[x^2+(y+S)^2]^2} \right\}, \\ \sigma_{yy} = \frac{2G}{\pi} \left\{ \frac{(y-S)^3}{[x^2+(y-S)^2]^2} - \frac{(y+S)^3}{[x^2+(y+S)^2]^2} \right\}, \\ \sigma_{zz} = \frac{2G}{\pi} \nu \left\{ \frac{y-S}{x^2+(y-S)^2} - \frac{y+S}{x^2+(y+S)^2} \right\}, \\ \sigma_{xy} = \frac{2G}{\pi} x \left\{ \frac{(y-S)^2}{[x^2+(y-S)^2]^2} - \frac{(y+S)^2}{[x^2+(y+S)^2]^2} \right\}, \\ \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0. \end{cases}$$

其中 ν 为泊松比, $2S$ 为条形窗口宽度。令

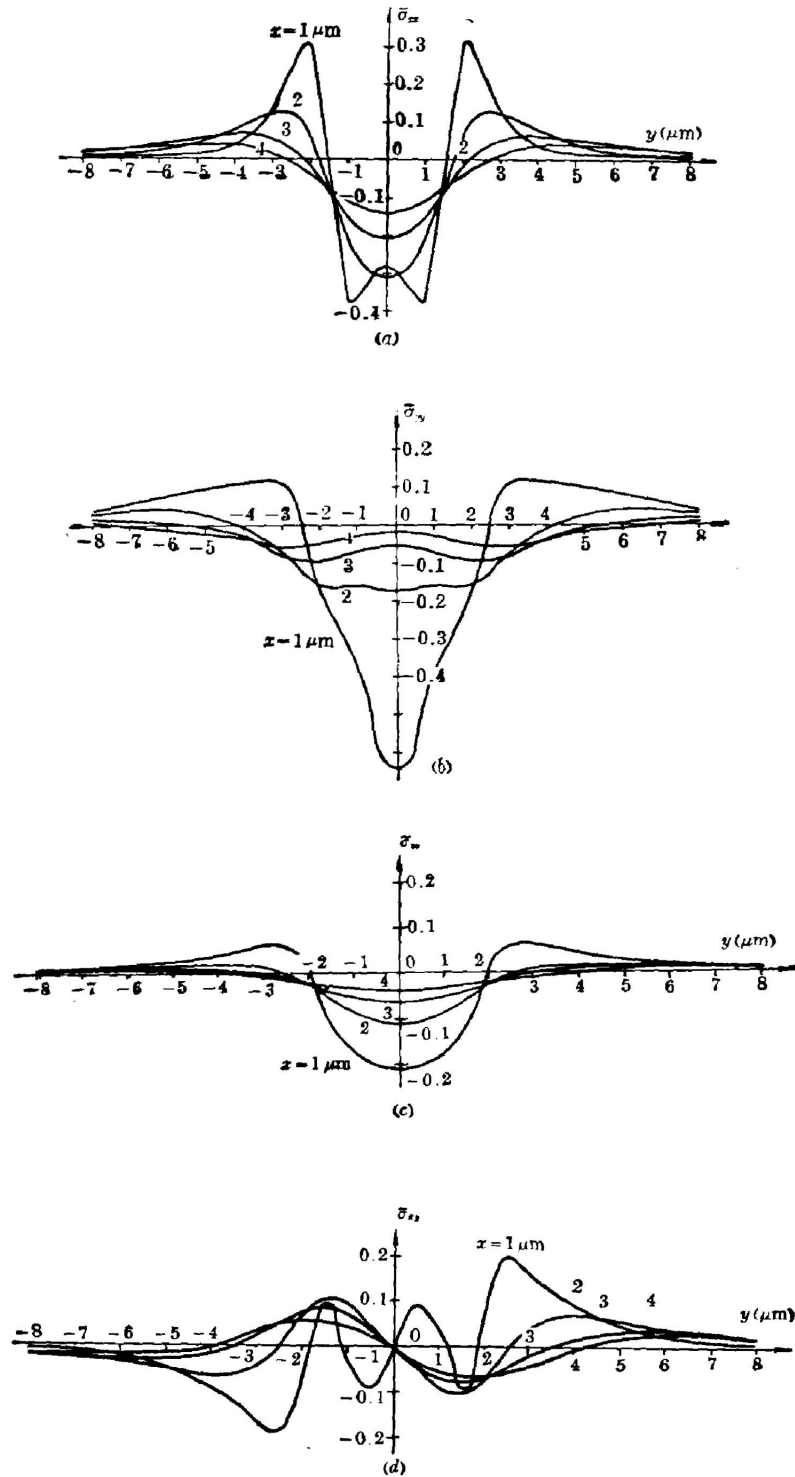
$$\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{\pi}{2G} \sigma_{ij}. \quad (4)$$

计算了 $\tilde{\sigma}_{ij} \sim x, y, S$ 的分布曲线。图 3 给出 $2S=3 \mu\text{m}$ 的典型分布曲线, 由此及(2)式给出的 σ 数值, 可估算窗口下方中心区域应力 σ_{ij} 约为 10^9 dyn/cm^2 的数量级。

若我们生长条形 Ga_2O_3 膜(如图 4 所示), 切向力作用方向便与图 2 的情况相反, 这时只需将(3)式中的 G 改为 $-G$ 即可。

2. 氧化膜条形窗口及条形氧化膜的光弹性效应

图 3 所示的应力分布将在条形窗口下方形成一定的光弹性效应折射率分布。应用文献

图3 条形窗口下方的应力分布($2S=3\mu\text{m}$)Fig. 3 Stress profiles under stripe window of GaAs oxide film ($2S=3\mu\text{m}$)

[1]的(11)、(12)、(17)和(18)式,可以得到

$$\Delta\epsilon_{xx} = -\frac{2(1+\nu)G\epsilon_x^2}{\pi E} \left\{ (y+S) \cdot \frac{[\nu P_{12} - (1-\nu)P_{11}]x^2 + [\nu P_{11} - (1-\nu)P_{12}](y+S)^2}{[x^2 + (y+S)^2]^2} \right. \\ \left. - (y-S) \cdot \frac{[\nu P_{12} - (1-\nu)P_{11}]x^2 + [\nu P_{11} - (1-\nu)P_{12}](y-S)^2}{[x^2 + (y-S)^2]^2} \right\}, \quad (5)$$

$$\Delta\epsilon_{yy} = -\frac{2(1+\nu)G\epsilon_y^2}{\pi E} \left\{ (y+S) \right. \\ \times \frac{\left[\nu \left(\frac{P_{11}+P_{12}}{2} + P_{44} \right) - (1-\nu)P_{12} \right] x^2 + \left[\nu P_{12} - (1-\nu) \left(\frac{P_{11}+P_{12}}{2} + P_{44} \right) \right] (y+S)^2}{[x^2 + (y+S)^2]^2} \\ \left. - (y-S) \right. \\ \times \frac{\left[\nu \left(\frac{P_{11}+P_{12}}{2} + P_{44} \right) - (1-\nu)P_{12} \right] x^2 + \left[\nu P_{12} - (1-\nu) \left(\frac{P_{11}+P_{12}}{2} + P_{44} \right) \right] (y-S)^2}{[x^2 + (y-S)^2]^2} \left. \right\}, \quad (6)$$

式中 P_{ij} 为 GaAs 的光弹性常数, 在 $\lambda=1.15\mu\text{m}$ 处, 有 $P_{11}=-0.165$, $P_{12}=-0.140$, $P_{44}=-0.072^{[10]}$ 。由此, 求出折射率的相对变化为

$$\begin{cases} \frac{\Delta n_{xx}}{n} = \frac{\Delta\epsilon_{xx}}{2\epsilon_x} = \frac{(1+\nu)G\epsilon}{\pi E} \Delta\tilde{\epsilon}_{xx} = 0.422 \times 10^{-11} G \Delta\tilde{\epsilon}_{xx}, \\ \frac{\Delta n_{yy}}{n} = \frac{\Delta\epsilon_{yy}}{2\epsilon_y} = \frac{(1+\nu)G\epsilon}{\pi E} \Delta\tilde{\epsilon}_{yy} = 0.422 \times 10^{-11} G \Delta\tilde{\epsilon}_{yy}, \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\Delta\tilde{\epsilon}_{xx} = -\left\{ \frac{(y+S)[9.34x^2 + 6.84(y+S)^2]}{[x^2 + (y+S)^2]^2} - \frac{(y-S)[9.34x^2 + 6.84(y-S)^2]}{[x^2 + (y-S)^2]^2} \right\} \\ \times 10^9 (\text{cm}^{-1}), \quad (8)$$

$$\Delta\tilde{\epsilon}_{yy} = -\left\{ \frac{(y+S)[5.44x^2 + 13.9(y+S)^2]}{[x^2 + (y+S)^2]^2} - \frac{(y-S)[5.44x^2 + 13.9(y-S)^2]}{[x^2 + (y-S)^2]^2} \right\} \\ \times 10^9 (\text{cm}^{-1}). \quad (9)$$



图4 条形氧化膜及应力示意图
Fig. 4 Schematic diagram of stripe-geometry oxide film and its stresses

利用以上结果, 计算了不同条宽情况下以深度 x 为参数的 $\Delta\tilde{\epsilon}_{xx}$ 和 $\Delta\tilde{\epsilon}_{yy}$ 随 y 的变化曲线, 图5给出 $2S=3\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$ 的两个例子。由计算结果可以判定, 当 $2S$ 小于 $10\mu\text{m}$ 时, 深度 $x=2\sim 4\mu\text{m}$ (通常 DH 激光器有源层所在的深度), 氧化膜条形窗口的应力场将形成侧向 (y 方向) 的散焦折射率分布; TE 与 TM 模的光弹性效应相近, 但在窄条宽 (如 $2S=3\mu\text{m}$) 时 TM 模的散焦作用大于 TE 模。

对于条形氧化膜, 其光弹性效应折射率分布为 $-\Delta\tilde{\epsilon}_{xx}$ 和 $-\Delta\tilde{\epsilon}_{yy}$ 。应用同样的理论方法, 可求出光弹性效应对介电常数非对角元素的影响, 结果为

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_{xy} = -\frac{4(1+\nu)G}{\pi E} \epsilon_x \epsilon_y P_{44} \left\{ \frac{x(y+S)^2}{[x^2 + (y+S)^2]^2} - \frac{x(y-S)^2}{[x^2 + (y-S)^2]^2} \right\}, \\ \Delta\epsilon_{yz} = \Delta\epsilon_{xz} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

其中仅 $\Delta\epsilon_{xy} \neq 0$ 。这一结果对于研究 MSTO 结构半导体激光器的偏振特性是有用的^[11]。

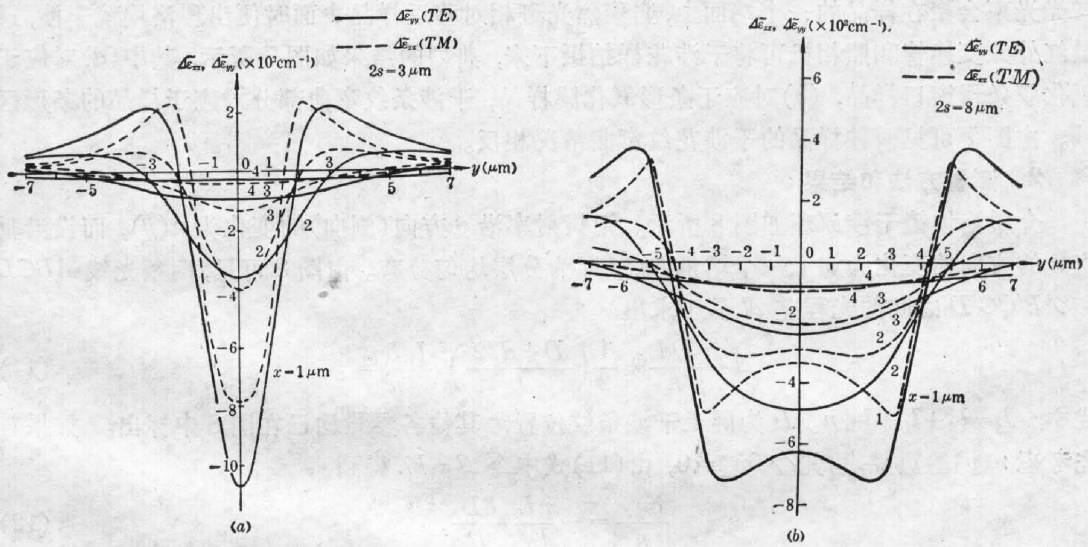


图 5 氧化膜条形窗口的光弹性效应
Fig. 5 Photoelastic effects of stripe window of oxide film

三、实验测量

1. 介质洛埃镜干涉测量装置^[12]

测量装置如图 6 所示,它与端面耦合的光波导观测系统相似。波长为 $1.15 \mu\text{m}$ 的 He-Ne

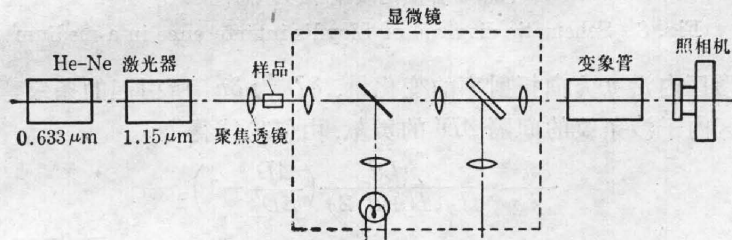


图 6 介质洛埃镜干涉测量装置
Fig. 6 Experimental arrangement of Lloyd's mirror interference in a medium

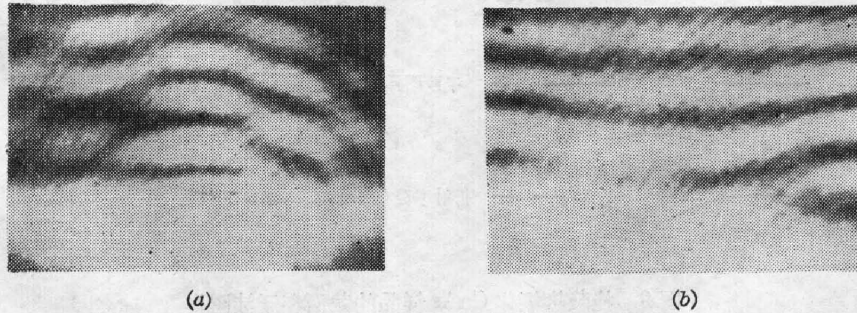


图 7

激光光束会聚在样品的一个端面上,当聚焦光斑相对移近样品表面时便出现洛埃镜干涉,通过红外象变换管和照相机可将干涉花样拍摄下来,典型的结果如图 7 所示,其中(a)对应于氧化膜条形窗口样品,(b)对应于条形氧化膜样品,干涉条纹弯曲部分对应于样品的条形区域。由图 7 可见两种样品的干涉花纹弯曲情况相反。

2. 测量方法和结果

介质洛埃镜干涉原理如图 8 所示。记折射率沿 y 方向(侧向)的变化为 $n(y)$, 而设沿垂直 x 的方向的变化为加上一个增量 δn_{\perp} , 即为分层均匀分布。由图 8 可见,两条光线 $ABCD$ 和 $AB'QC'D$ 之间的光程差 Δl 易于求出

$$\Delta l = \frac{Dd}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{D+d/2}{L} \right)^2 \frac{l_B \delta n_{\perp}}{n^2} \quad (11)$$

式中: $L=l_A+l_C+l_B/n$, D 为屏上干涉条纹位置, 其他各参量均已在图 8 中标出。如果首先考虑 $n(y)$ 的贡献,可先令 $\delta n_{\perp}=0$, 由(11)式中令 $\Delta l=k\lambda$ 得到

$$\frac{\delta n_{\perp}}{n} = -\frac{nL}{l_B} \frac{\delta D}{D} \quad (12)$$

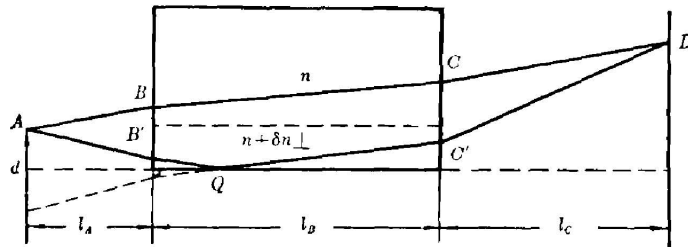


图 8 介质洛埃镜干涉示意图

Fig. 8 Schematic diagram of Lloyd's interference in a medium

式中 δn_{\perp} 为条形区内沿 y 方向折射率的变化量, δD 为 δn_{\perp} 所引起的条纹弯曲量。现在考虑 δn_{\perp} 对条形区内干涉条纹的间隔 $\Delta D'$ 的贡献,由(11)式得

$$\frac{\delta n_{\perp}}{n} = \frac{nLd}{l_B(D+d/2)} \left(\frac{\Delta D'}{\Delta D} - 1 \right) \quad (13)$$

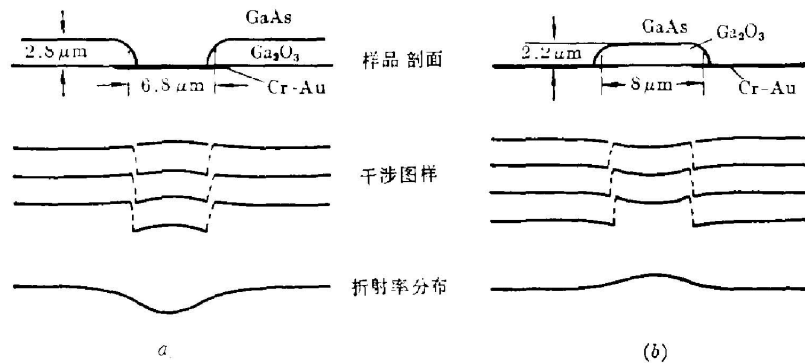


图 9 掩蔽热氧化 GaAs 样品的截面和干涉图样

Fig. 9 Cross-sections and interference patterns of masked thermal oxidized GaAs samples.

式中 ΔD 为样品条形区域以外干涉条纹的间距。因此, 如果参数 L 、 d 和 D 为已知, 由干涉图样求出 ΔD 、 δD 和 $\Delta D'$, 则(12)和(13)式给出 y 方向和 x 方向的折射率相对变化 $\delta n_y/n$ 和 $\delta n_x/n$ 。利用移动图 6 中聚焦透镜造成图 8 所示点光源 A 三点线性移动, 便可确定 L 、 d 和 D , 从而完成干涉测量^[19]。

实验用样品的剖面、对应的干涉条纹和折射率侧向分布示意地画在图 9 中。干涉条纹的弯曲部分对应于样品的条形区域, 而图示的条纹相对移动是由于光从 GaAs 与 Cr-Au 膜界面反射有相位跃变。由实验估算的相对折射率变化值列于表 1, 作为比较也列入理论计算结果, 可见二者在数量级上是相符合的。

表 1

相对折射率变化	条形窗口(宽 $6.8 \mu\text{m}$) 样品		条形氧化膜(宽 $8 \mu\text{m}$) 样品	
	实验值	理论值*	实验值	理论值*
$\frac{\delta n_{11}}{n}$	4×10^{-3} 6×10^{-3}	3.3×10^{-3}	4×10^{-3} 7.6×10^{-3}	2.9×10^{-3}
$\frac{\delta n_x}{n}$	1.1×10^{-3} 3×10^{-3}	2×10^{-3}	0.3×10^{-3} 1.4×10^{-3}	2×10^{-3}

* 理论值的选取: 对 $\frac{\delta n_{11}}{n}$, 理论值取自深度 $x=1.9 \mu\text{m}$ 处 $y=0$ 和 $4 \mu\text{m}$ 的计算数值; 对 $\frac{\delta n_x}{n}$, 理论值取自 $y=0$ 处 $x=1.9$ 和 $3.4 \mu\text{m}$ 的计算数值

四、讨 论

本文的实验与理论分析结果, 证实在 GaAs 上进行掩蔽热氧化可以在 GaAs 体内引入一定的折射率分布, 具体的分布既取决于条形氧化膜或氧化膜开了条形窗口, 也取决于深度(即与样品表面氧化层中点的距离)。光弹性效应的折射率分布的估测结果与理论计算定性地和在数量级上相符合, 如进一步改进实验调节精度和数据分析方法, 介质洛埃镜干涉法有可能用以研究渐变折射率分布的介质光波导, 这对于集成光学研究是一个有兴趣的课题。

利用本文的结果, 可以说明具有 MSTO 结构的 GaAs-GaAlAs 条形 DH 激光器^[6]的一些特性。例如, 由于 MSTO 激光器具有氧化膜条形窗口, 有源区中存在由光弹性效应引起的侧向自建反波导折射率分布, 预计沿这一方向激光光束的腰部应保持在腔镜面以内^[18], 并且腔内的光场分布将有所扩展。本文对比观测了条宽相近的 MSTO 结构和质子轰击结构的 GaAs-GaAlAs DH 激光器的近场光斑, 的确发现前者的光斑明显地大于后者; 另一方面, 校正显微镜系统在近红外区的色差后, 测量 MSTO 激光器的束腰, 发现其位置在镜面后 $10 \mu\text{m}$ 左右, 保持虚腰的特性。此外, 还发现 MSTO 激光器同时输出强度相近、相位无关的 TE 和 TM 模, 这可以解释为有源区受到单轴性应力作用的结果, 详细的研究见另一篇文章的报导^[14]。

利用 MSTO 结构在 GaAs 层内引入折射率的侧向分布, 有可能用来形成光波导和集成光学器件, 类似于文献[2]~[5]报导的工作, 但在技术上具有若干新的优点^[6]。

作者对陈妮兮、李惠兰和贾丽敏同志在光刻、蒸发技术方面给予的协助, 谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] P. A. Kirkby, P. R. Selway *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**, No. 7 (Jul), 4567.
- [2] L. D. Westbrook, P. N. Robson *et al.*; *Electron. Lett.*, 1979, **15**, No. 3 (Feb), 99.
- [3] L. D. Westbrook, P. J. Fiddymant *et al.*; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, No. 5 (Feb), 169.
- [4] T. M. Benson, T. Murotani *et al.*; «*Proc. 1st European Conf. on Integrated Optics, U. K., Sept. 1981*», 79.
- [5] T. M. Benson, T. Murotani *et al.*; «*Proc. 7th ECOC, Copenhagen, Sept. 1981*», Paper 9. 4.
- [6] Hong-Du Liu, Bei Zhang *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, No. 7 (Apr), 557.
- [7] 冯哲川, 刘弘度; «*半导体学报*», 待发表。
- [8] 刘弘度, 陈妮芬等; «*半导体学报*», 待发表。
- [9] R. J. Jacodine, W. A. Schlegel; *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**, No. 6 (May), 2429.
- [10] R. W. Dixon; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, No. 12 (Nov), 5149.
- [11] J. McKenna, J. A. Morrison; *Bell. Syst. Tech. J.*, 1968, **47**, No. 9 (Nov), 1933.
- [12] Hong-Du Liu, Zhe-chuan Feng; *Electron. Lett.*, 1982, **18**, No. 6 (Mar), 251.
- [13] P. A. Kirkby, A. R. Goodwin *et al.*; *IEEE, J. Q. E.*, 1977, **QE-13**, No. 8 (Aug), 705.
- [14] 刘弘度, 冯哲川; «*激光*», 待发表。

The stresses and photoelastic effects in GaAs-GaAlAs multilayer wafers with masked and selective thermal oxidation structure

LIU HONGDU FENG ZHECHUAN AND GUO CHANGZI

(*Department of Physics, Beijing University*)

(Received 21 January 1982, revised 7 September 1982)

Abstract

In this paper, the stresses and photoelastic effects are calculated in GaAs-GaAlAs multilayer wafers with masked and selective thermal oxidation structure. Authors also propose a new method of Lloyd's mirror interference in a medium for determining directly the refractive index variations caused by the photoelastic effect. The estimated values of index variation from our experiments agree with the theoretical ones within an order of magnitude. The above study would be valuable in the field of semiconductor lasers and integrated optics.