

磷化镓棱镜耦合器的研究

黄章勇

(北京邮电学院)

提要: 国外有过用 GaP 棱镜耦合器的报导,但未给出棱镜的结构参数。我们采用国内的 GaP 单晶设计制作了光波导棱镜耦合器。文中详述了其设计考虑,并用它成功地把光耦合入并耦合出钛扩散 LiNbO₃ 平面波导,观察了 m 线。

Investigation on GaP prism couplers

Huang Zhangyong

(Beijing Institute of Post and Telecommunication)

Abstract: Reports on the use of GaP prism coupler have been published abroad, but details of its structure parameters have not been given. We designed and fabricated prism couplers with GaP crystal in our country. Light beam was successfully coupled into and out of a Ti diffused LiNbO₃ planar optical waveguide and the m line was observed.

一、前 言

在光波导技术中,将光束有效地耦合入并耦合出薄膜是在导波光学实验和器件中的一个重要问题。棱镜耦合器是导波光学实验中最常用的一种耦合器。

用于钛扩散铌酸锂波导的棱镜耦合器,最常用的是金红石棱镜。国内近年来亦有采用锗酸铋棱镜的报导^[1]。在国外有使用磷化镓棱镜耦合器的报导^[2],我们采用国内的磷化镓单晶设计制作了棱镜耦合器,用它成功地把激光束耦合入并耦合出钛扩散铌酸锂平面波导。GaP 晶体的物理特性见文献 [6]。

二、磷化镓棱镜耦合器 的设计考虑

1. 棱镜的角度选择

棱镜耦合器如图 1 所示。棱镜中光波的相速度必须和波导中导模的相速度相匹配,这个条件数学上能够写为^[3]

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)n_p \sin \theta = \beta_n \quad (1)$$

式中 λ 是自由空间波长; n_p 是棱镜折射率; θ 是棱镜中入射光束和薄膜表面法线的夹角; β_n 是薄膜中特定模式的传播常数。改变 θ 角能够激励薄膜中的不同模式。在输出耦合时,不同模式是利用它们从薄膜射出的角度

收稿日期: 1981 年 5 月 27 日。

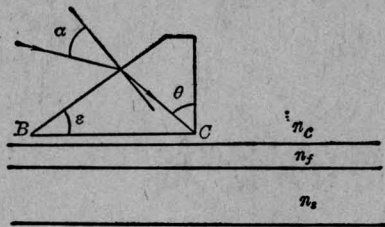


图1 棱镜耦合器示意图

来辨认。由相位匹配条件(1)可推导出导波模式等效折射率的表达式为^[3]

$$N = \beta/K = \sin \alpha \cos \epsilon + (n_p^2 - \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin \epsilon \quad (2)$$

这里 ϵ 是棱镜的底锐角; α 是入射光与棱镜斜边法线的夹角。由(2)式可看出 n_p 和角 ϵ 是棱镜的关键参数。我们所用的材料是 N 型 GaP 单晶, 杂质浓度为 $\sim 10^{16}$ 厘米⁻³, 对波长 6328 Å 的折射率等于 3.31^[4]。

如果令 α 从 $-\frac{\pi}{2}$ 到 $\frac{\pi}{2}$ 变化, 则可由(2)式计算得不同 ϵ 角的 N 值上下限。计算结果如图 2 所示。若薄膜折射率为 n_f , 基片折射率是 n_s , 则所有导模的等效折射率应满足 $n_s < N < n_f$ 。因此为激发薄膜波导的所有模式, 要求棱镜能激发的导模等效折射率 N 复盖 $n_s \sim n_f$ 范围。对于钛扩散铌酸锂波导, 基

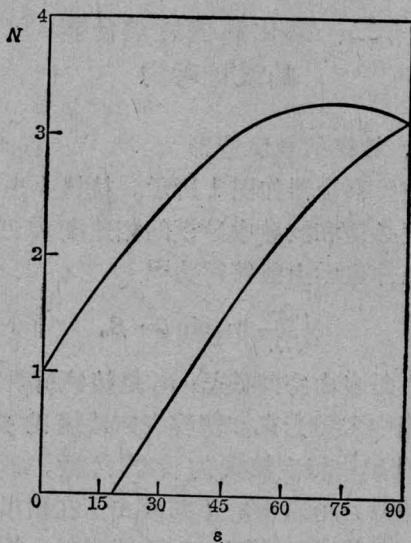


图2 GaP 棱镜可测 N 值的上下限和 ϵ 角的关系曲线

片折射率 $n_o = 2.295$ 、 $n_e = 2.203$ 。波导表面折射率分别取典型值为 2.305 和 2.213, 则磷化铍棱镜的 N 值必须复盖 2.203~2.213、2.295~2.305 由图 2 的曲线可知 ϵ 的取值范围是 $26^\circ < \epsilon < 60^\circ$ 。

波导导模的耦合角范围由下式决定:

$$\begin{aligned} \sin^{-1} \left\{ n_p \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_f}{n_p} \right) - \epsilon \right] \right\} > \alpha \\ > \sin^{-1} \left\{ n_p \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_s}{n_p} \right) - \epsilon \right] \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

由(3)式计算求得了钛扩散 LiNbO₃ 平面波导的导模的耦合角和 ϵ 的对应关系, 计算时取典型值 $\Delta n = 0.01$, 计算结果列于表 1。在棱镜耦合器转动时, 为保证耦合点在导模的耦合角范围稳定在直角棱边, 要求耦合角 $\alpha > 0$ ^[3]。由表 1 知道 ϵ 角的候选范围是 $26^\circ < \epsilon < 41.7^\circ$ 。

表 1 和不同的 ϵ 角对应的导模耦合角范围

ϵ (度)	$\alpha (n_s = n_e = 2.203)$	$\alpha (n_s = n_o = 2.295)$
30	41.968~42.988	52.650~53.942
35	22.807~23.388	30.789~31.709
39	9.055~9.599	16.410~17.239
40	5.448~6.260	12.998~13.815
41	1.508~2.937	9.627~10.435
41.7	0	
43.9	<0	0

表 2 GaP 棱镜入射面反射系数

α (度)	R_p	R_s
42	0.185	0.384
23	0.250	0.315
16	0.280	0.307
10	0.283	0.294
6	0.287	0.291
0	0.287	0.287

利用反射系数公式^[5]计算了垂直于入射面的线偏振光的反射系数 R_s 和平行于入射

面的线偏振光的反射系数 R_p , 表 2 列出一组入射角的 R_p 和 R_s 。为在波导均匀激发 TE 模和 TM 模, 选择 ϵ 角使得在相应的耦合角范围两种偏振光的反射系数大致相等。同时选择棱镜的角度时应避开 30° 、 45° 、 60° 、 90° 或其它 360° 的整分数角^[3]。故我们取 ϵ 角为 39° , 另一底角稍大于 90° 取 91° 。

2. 光轴的取向

对于双折射晶体, 光轴必须和 ϵ 角的棱边平行。GaP 材料属于立方点群 $\bar{4}3m$ 的晶体, 当电场不存在时, 折射率椭球是半径为 n 的圆球, 是各向同性晶体^[5]。故可不考虑光轴的取向。我们取单晶的 $\langle 111 \rangle$ 晶向和 ϵ 角棱边平行, 这是因为当激光束沿 $\langle 111 \rangle$ 照射时, 透射光通过单晶后发散, 在出射面呈三角形。为避免光束通过棱镜后发散而避开该晶向。此外 GaP 单晶一般沿 $\langle 111 \rangle$ 晶向生长, 取该晶向可使切割加工方便, 节省材料。

3. 尺寸选择

为使耦合点在测角仪转动时有好的稳定性, 确定棱镜尺寸时应使得从入射面到耦合点的光程小于 5 毫米 (在 $\alpha=0$ 时测量)^[3]。

综上所述, 我们设计的棱镜如图 3 所示。

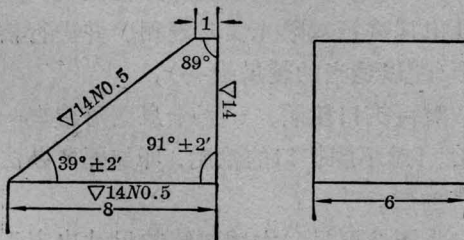


图 3 GaP 棱镜加工图

技术要求: 1. $\sigma \leq 5'$; 2. 39° 角棱与 $\langle 111 \rangle$ 平行;
3. 91° 角棱不准倒棱, 保持尖锐

三、实验和耦合器特性

实验装置如图 4 所示, 用 GaP 棱镜耦合器把激光束耦合入并耦合出 Ti 扩散 LiNbO₃ 平面波导, 观察了平面波导的 m 线; 图 5 是

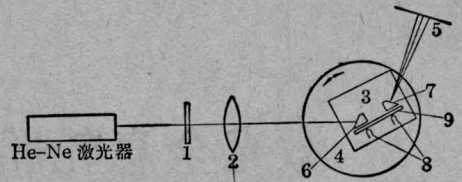


图 4 实验装置示意图

1—偏振片; 2—透镜; 3—X-Y 微动台; 4—测角仪; 5—观察屏; 6—输入棱镜; 7—输出棱镜; 8—夹钳; 9—LiNbO₃ 平面波导

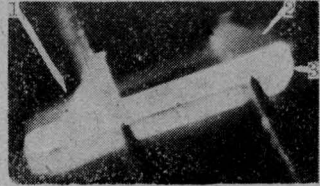


图 5 夹持在 LiNbO₃ 基片上的输入输出棱镜处于工作状态时的照片

1—输入棱镜; 2—输出棱镜; 3—LiNbO₃ 基片

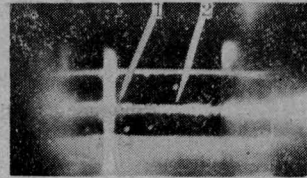


图 6 光在波导内传播的照片

1—输入耦合点; 2—光迹

夹持在 Ti 扩散 LiNbO₃ 波导上的处于工作状态的 GaP 输入输出棱镜的照片; 图 6 是 GaP 棱镜激发的平面波导光在波导内传播的照片; 图 7 是双模平面波导的 m 线照片, 照片有亮点的线是导波主模的 m 线。

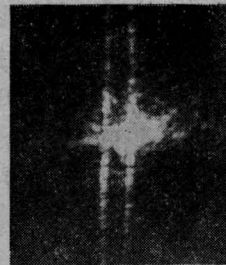


图 7 双模平面波导的 m 线照片

GaP 晶体的光透过波长范围是 $0.6 \sim 4.5$ 微米, 在这一波长范围, 2 毫米厚的样品 (下转第 221 页)

试比较 $\text{PrP}_5\text{O}_{14}$ 和 $\text{LiPrP}_4\text{O}_{12}$, $\text{PrP}_5\text{O}_{14}$ 在可见光区有宽的吸收带(从 440~490 毫微米), 呈现三个峰(集中在 447、472、483 毫微米), 位于绿蓝区域, 非常适合闪光灯泵浦。而 $\text{LiPrP}_4\text{O}_{12}$ 吸收在 443、465、478 毫微米。吸收谱形状非常相似, 只是波长略有位移。由荧光光谱看, $\text{PrP}_5\text{O}_{14}$ 在室温下可见区有丰富的谱线, 参见表 6 和图 4(a)。分别在 520~540、606~608、633~641、717 毫微米形成带, 与此类似的 $\text{LiPrP}_4\text{O}_{12}$ 在 518.7~533.7、604~606.5、635~638.5、721.2 毫微米存在对应的谱线(图 4(b)), 只是波长略有位移而已。

表 6 $\text{PrP}_5\text{O}_{14}$ 和 $\text{LiPrP}_4\text{O}_{12}$ 的吸收谱和荧光谱

	$\text{PrP}_5\text{O}_{14}$	$\text{LiPrP}_4\text{O}_{12}$
吸收峰值 (毫微米)	447 基态 \rightarrow $^3\text{P}_3$ 472 基态 \rightarrow $^3\text{I}_6$, $^3\text{P}_1$ 483 基态 \rightarrow 荧光态 $^3\text{P}_6$	443 465 478
荧光峰值 (毫微米)	522.5, 530, 544 606, 608.7 $^3\text{P}_0 \rightarrow$ 不同 $^3\text{H}_6$ 633.7, 636.2, 641.5 $^3\text{P}_0 \rightarrow$ 各 $^3\text{F}_2$ 717.5 $^3\text{P}_0 \rightarrow$ $^3\text{F}_3$	518.7, 521.2; 535.8, 533.7 604, 606.5; 635, 638.5 721.2

(上接第 229 页)

透过率为 10%^[6]。

GaP 晶体在光波长是 6328 Å 时折射率是 3.31, 高于金红石($n_0=2.584$, $n_e=2.872$)和锆酸铋($n=2.536$), 这就使 GaP 棱镜耦合器适用的波导衬底折射率选择范围宽, 尺寸相同的棱镜 GaP 棱镜耦合器的耦合点稳定性好。

本文在吴彝尊副教授指导下完成。北京有色金属研究院的邓志杰同志为本实验提供了 GaP 晶体。棱镜加工得到北京第三光学仪器厂杜成钧同志的帮助, 在此致以谢意。

据报导^[4]用 Coumarin 2 染料激光器泵浦 $\text{PrP}_5\text{O}_{14}$, 442~449 毫微米带的发射证明是有效的。由于 $\text{LiPrP}_4\text{O}_{12}$ 与 $\text{PrP}_5\text{O}_{14}$ 的吸收和荧光性质相类似, 又因为四磷酸盐基质更优于五磷酸盐, 阳离子 $\text{Pr}^{3+} \sim \text{Pr}^{3+}$ 距离更大, 偶极跃迁的相互作用可以进一步受到抑制, 可期待四磷酸铈在可见区获得受激发射的希望是很大的。我们研制成的 $\text{LiPr}_{0.7}\text{La}_{0.3}\text{P}_4\text{O}_{12}$ 单晶加工成样品, 将着手进行激光发射的实验工作。统观其它稀土四磷酸盐类, 如 $\text{LiHoP}_4\text{O}_{12}$ 、 $\text{LiEuP}_4\text{O}_{12}$ 也存在同样的希望。

参加本工作的还有金继华、施振华同志。晶体性能由邓佩珍、胡新元、乐月琴、陈丽娜、林荷等同志, 以及北京化学所、上海原子核所的同同志协助测试。吴光照同志在光谱的测试和讨论方面给予许多帮助, 特此感谢。

参 考 文 献

- [1] Sh. N. Gifeisman *et al.*; *Opt. Spectrosc.* (USSR), 1978, **44**, No. 1, 120.
- [2] 袁刚等; 《硅酸盐学报》, 1981, **9**, No. 1, 25~30.
- [3] 谢燕燕等; 《激光》, 1981, **8**, No. 3, 7.
- [4] M. Szymanski *et al.*; *Appl. Phys.*, 1979, **19** No. 3, 345~351.

参 考 文 献

- [1] 曹泽煌, 宋桂莲, 李天国; 《压电与声光》, 1980, No. 2, 94.
- [2] J. Noba *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**, No. 1, 19~21.
- [3] E. Ulrich, R. Torge; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 12, 2901~2908.
- [4] R. W. Dixon; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, No. 13, 5149~5153.
- [5] 母国光, 冷元战编; 《光学》, 人民教育出版社, 1978年9月1版, p. 436.
- [6] 日本产业技术振兴协会新材料技术委员编, 化合物半导体デバイス付 III-V 族化合物半导体基础データ集, p. 327.