

自集成透镜 InGaAsP/InP DH LED 及其离子束铣技术

肖德元 郭康瑾 付新定 徐少华 方红丽 张坚萍 陈启琦 陈瑞璋
(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050)

提 要

本文报道在国内首次采用离子束铣技术研制自集成透镜 InGaAsP/InP DH LED 的实验结果。采用烘烤正性光致抗蚀剂来形成球状掩膜适合于离子束铣, 且重复性很好。为了获得光洁的刻蚀表面, 刻蚀条件均已最优化。

关键词: 自集成透镜, 发光二极管, 光纤通信。

一、引 言

高速、高辐射 $1.3 \mu\text{m}$ GaInAsP/InP DH LED 在中短距离光纤通信系统中, 受到人们的普遍关注。自集成透镜的研制, 对于提高正面发光二极管的外量子效率、频率响应特性非常重要, 尤其以与光纤的耦合效率为甚^[1~3]。人们最早采用化学腐蚀法^[4]研制出自集成透镜, 之后发展起离子束铣 (IBM)^[5]、光电化学腐蚀^[6] (PEC) 和质量输运法^[7]。化学腐蚀法易于研制 InP 球透镜, 但透镜曲率太小, 光电化学腐蚀和质量输运虽然可以研制出高质量的透镜, 但光电化学腐蚀设备复杂, 质量输运法需要经过多次光刻腐蚀, 且形成光洁需经过 800 至 880°C 长时间的高温处理, 不适应制作自集成透镜。本文详细报道采用离子束铣技术, 即利用 Ar^+ 束轰击靶材料而产生的物理溅射, 研制 InP 球透镜实验结果, 及其在 LED 中的应用。由于刻蚀速率的选择性, 改变离子束入射角可以方便地调节透镜曲率, 通过刻蚀条件最优化, 得到光洁刻蚀表面, 具有推广应用价值。这是国内首次采用离子束铣技术制成 InP 球透镜。

二、器 件 结 构

带自集成透镜 InGaAsP/InP DH LED 结构如图 1 所示, 在掺 S(100) 晶向 InP 衬底上依次生长 Te 掺杂 InP 缓冲层, Zn 掺杂 GaInAsP 有源层、Zn 掺杂 InP 限制层和 GaInAsP 接触层, 上述四层平面外延片, 经清洗后, P 面生长 SiO_2 介质掩膜, 光刻直径为 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 圆形窗口进行 Zn 扩散以降低接触电阻, P 面蒸 AuZn 欧姆接触做好以后, 再对 n 型衬底减薄, 抛光、清洗, 光刻出直径约 $100 \mu\text{m}$ 的 AZ-1350 正性光致抗蚀剂作为离子束刻蚀掩膜。透镜刻好以后, 经清洗, n 面蒸 AuGeNi 做欧姆接触电极。在 N_2 气氛中于 450°C

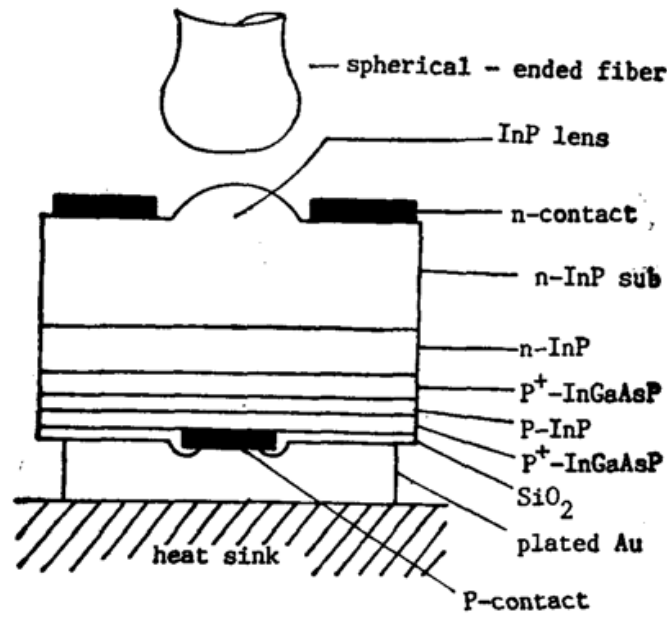


Fig. 1 Schematic illustration of InGaAsP/InP DH LED coupled to spherical-ended fiber. The InP lens can significantly improve the light coupling efficiency

合金化, 经初测的芯片倒装在 Cu 热沉管座上, 焊上电极形成单管, 经老化筛选, 最后与球状末端光纤耦合封装在一起。

三、实验方法

离子束铣形成 InP 球透镜主要包括两部分: 掩膜准备和离子束铣, 如图 2 所示, 两者均适合于批量加工。

1. 球状 AZ-1350 光致抗蚀剂掩膜的制备

减薄、抛光后的 GaInAsP/InP 四层外延片, 经三氯乙烯、丙酮清洗后, 在 InP 衬底抛光面上涂上厚约 $3.2\ \mu\text{m}$ 的 AZ-1350 正胶, 采用光刻技术, 刻出符合器件设计要求的圆图形, 然后在高于光刻胶的玻璃软化温度下进行烘烤。由于光刻胶的表面张力效应, 球状外形也就形成了, 然后就可用来进行离子铣。

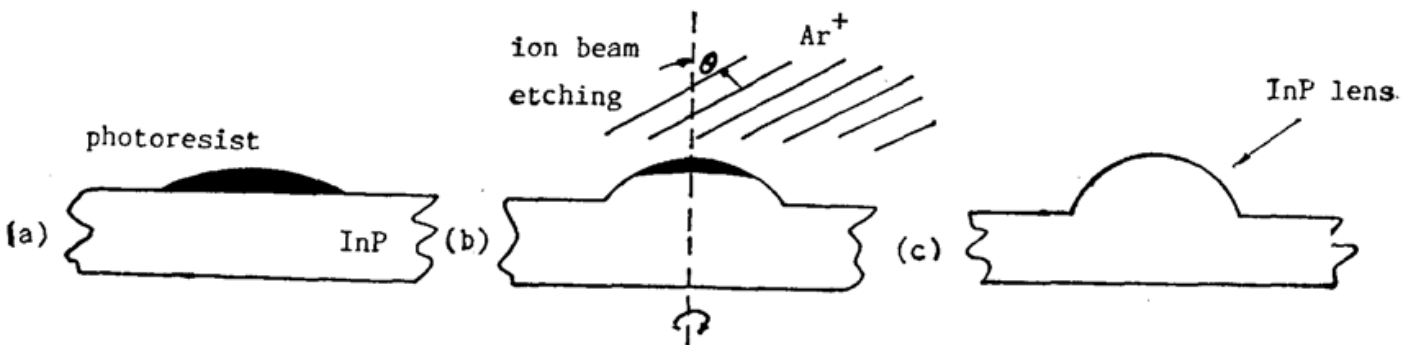


Fig. 2 Sequence of processes for InP lens formation

- (a) mask formation by patterning and baking a photoresist;
- (b) Ar ion-beam etching until complete removal of the mask;
- (c) completed InP lens

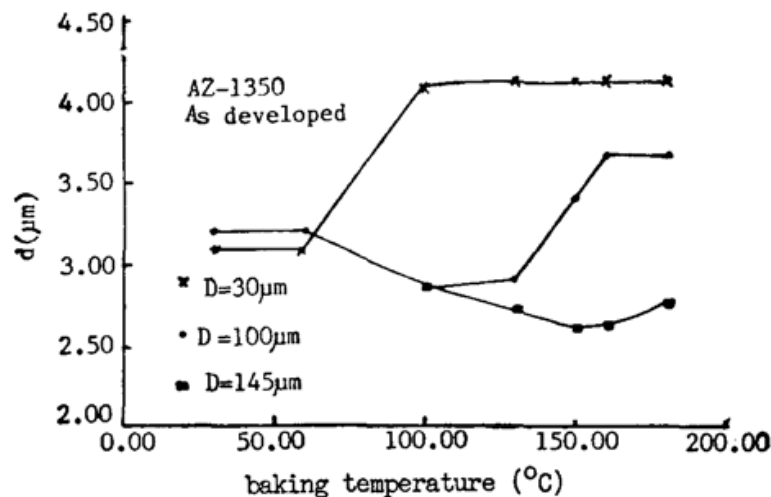
2. Ar 离子束铣

将具有球形 AZ-1350 正胶图形的 InP 外延片, 用本所自行研制的离子束铣装置进行刻蚀转移。离子束有效束径为 $\phi 100 \text{ mm}$, 离子能量 $300 \sim 1000 \text{ eV}$ 连续可调, 速流稳定性 $\leq \pm 2\% \text{ hr}$, 刻蚀最佳条件为离子能量 1000 eV , 束流密度 0.57 mA/cm^2 , Ar 离子束入射角 60° , 刻蚀时靶转动, 待全部光刻胶被刻蚀完备, 即停止刻蚀。采用 alpha-step 100 台阶仪进行扫描测量, 得到透镜表面形状曲线。

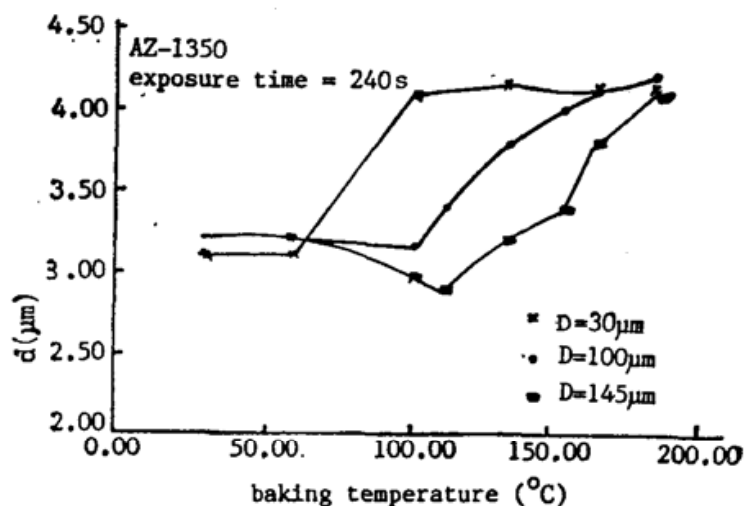
四、实验结果及讨论

1. AZ-1350 光致抗蚀剂表面形状的控制

制备光致抗蚀剂掩膜最主要的过程是产生球状表面的烘烤工艺。图 3 给出不同温度、不同条件下烘烤光刻胶时其表面形状的示意图。在刚刚高于光刻胶的玻璃软化温度下烘烤时, 在中央产生一个凹坑, 中央厚度小于烘烤前光刻胶厚度 d_0 , 由于温度的不断增加, 光刻胶的粘性不断地下降, 理论上证明, 由于表面张力效应形成的稳定的几何形状一定是球状。我们用 alpha-step-100 台阶仪测量也证实了这一点。



(a) Baking characteristics of positive acting photoresist disk with various values of diameter D



(b) Baking characteristics of positive acting photoresist disk with various values of diameter D and exposure prior to baking

Fig. 3

图 3(a) 给出光刻胶中央厚度 d 随烘烤温度变化的关系曲线。烘烤前光刻胶厚度为 $3.2 \mu\text{m}$, 图形小时, 形成凸球所需烘烤温度也低, 从实验结果可以看出, 直径超过 $100 \mu\text{m}$ 已经不能形成凸球。图 3(b) 给出三组与图 3(a) 类似的曲线, 不同的是在烘烤以前, 光刻胶在光刻机上曝光 240 sec。由于曝光的缘故, 随着温度的增加, 光刻胶中央从凹坑向凸球转变将变得很容易, 形成凸球的最大孔径增加到 $150 \mu\text{m}$, 这种效应可以认为是光刻胶在曝光时由于其重量减轻使它的粘性降低, 造成光刻胶表面张力增大的缘故。

实验中发现负胶同样可以形成凸球表面, 但烘烤温度范围很窄, 这是由于负胶的蒸发限制了它的最高烘烤温度。因此, 在这种场合使用正胶更合适。实验中还曾使用过 AZ-1450 正胶, 其结果与 AZ-1350 没有太大区别。

2. 刻蚀条件最优化及透镜曲率的控制

实验测量了本系统在离子束能量为 1000eV , 束流密度为 0.57mA/cm^2 , 不同入射角 θ 下, 光刻胶和 (100) 晶向 InP 的刻蚀速率, 图 4 给出了实测结果。

图 5 给出上述条件下 InP 与光刻胶刻蚀速率的比率 k 与倾斜角的依赖关系。当倾斜角增加时, 刻蚀速率比率 k 单调下降, 它的大小决定了透镜的曲率。表面刻蚀形貌是确定透

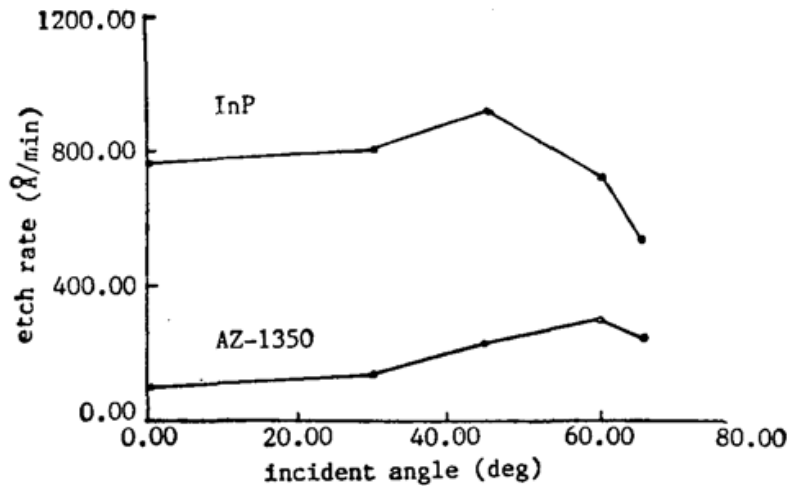


Fig. 4 Ar ion-beam etch rates of InP and positive-acting photoresist as a function of ion incident angle. The ion current density is 0.57mA/cm^2 , the ion energy is 1000eV

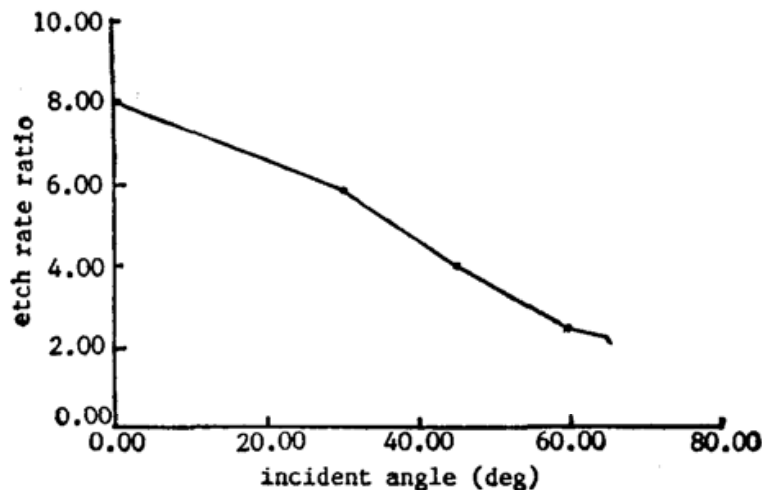


Fig. 5 Ratio of each rate for InP over that for photoresist as a function of ion incident angle

镜特性的重要因素, 导致刻蚀表面不光洁是由于刻蚀再淀积效应, 即溅射下来的靶以及靶坐材料原子的重新淀积。由于 Ar 离子束对钛溅射速率极低, 因此, 我们选用金属钛作靶座。在入射角大于 60° 时, 表面形貌的退化受到抑制, 实验还发现, 刻蚀前抛光面的光洁度直接影响刻蚀表面质量。实验中, 我们得到光洁似镜的刻蚀表面。图 6 是透镜表面的 SEM 表面形貌照片。

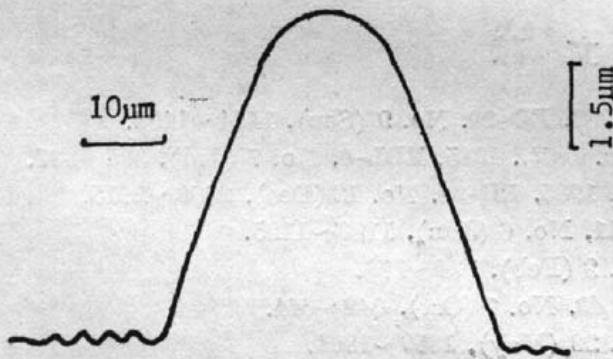


Fig. 6 Scanning electron micrographs shows lensed surface of completed LED chips

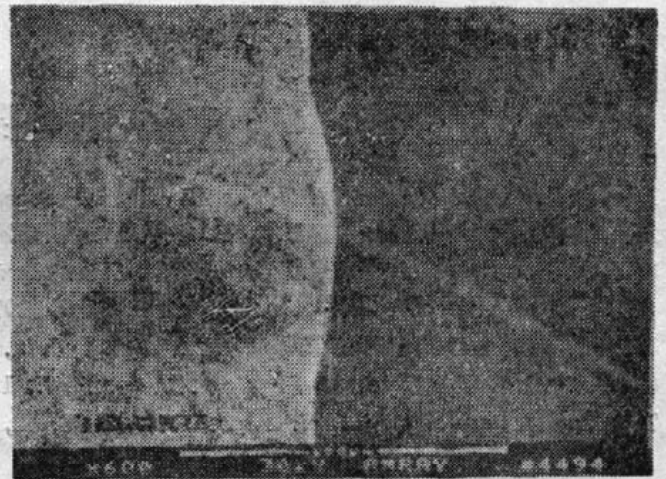
3. 球透镜形状的验证

图 7(a) 为采用 alpha-step-100 台阶仪测量所得到的 InP 透镜表面形状曲线, 根据 x, y 轴的比例关系, 证明它为球状的, 其半径由下式给出:

$$R = \left[h^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right]^{1/2} + h/2$$



(a) Surface pro-file of a InP lens obtained by alpha-step 100 stylus measurement. It is clear that a spherical lens is formed by IBM technique



(b) SEM photograph shows a InP lens cross section

Fig. 7

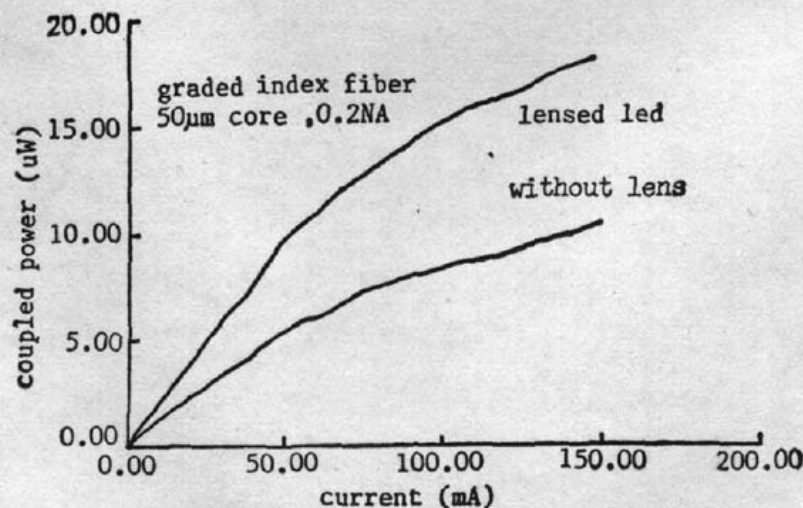


Fig. 8 Coupled power versus current characteristics of a lensed LED and a flat surface LED

其中 D 是发光窗口直径, h 是透镜的高度, 实验得到 R 为 $100\sim 300\ \mu\text{m}$ 的球透镜。

图 7(b) 是管芯的剖面 SEM 照片, 可以看到透镜表面确实为球状。

4. 集成透镜 LED 特性

集成透镜 LED 其单管功率较之平面型 LED 有明显提高, 这是由于透镜提高了器件的外量子效率。集成透镜 LED 光束发射角一般比平面型 LED 小 40° 左右, 图 8 给出同一外延片上制作的两种 LED 与光纤耦合后的 $P-I$ 特性曲线, 可以看到, 集成透镜 LED 其入纤功率明显比平面型 LED 高, 此外, 其频率响应特性也得到改善, 透镜 LED 较之平面型提高约 20%, -3dB 调制带宽达 425 MHz。

五、结 论

自集成透镜 LED, 较之平面型 LED, 在发光外量子效率、频率响应, 特别是与光纤的耦合功率方面, 得到较大改善。通过刻蚀条件最优化, 得到了非常光洁的刻蚀表面。如果刻蚀过程中不断改变离子束入射角度, 还可以得椭球形状刻蚀表面, 这在光波器件中具有应用价值。这种离子束铣形成球透镜技术还可以应用到正面发光激光器和探测器中。采用离子束铣技术研制柱面微透镜正在进行中。

参 考 文 献

- [1] O. Wada *et al.*; *IEEE Trans Electron. Devices.*, 1982, **ED-29**, No. 9 (Sep), 1454~1458.
- [2] W. C. King *et al.*; *IEEE Trans. Electron. Devices. Lett.*, 1985, **EDL-6**, No. 7 (Jul), 335~337.
- [3] A. Suzuki *et al.*; *IEEE Trans. Electron. Devices.*, 1985, **ED-32**, No. 12 (Dec), 2609~2615.
- [4] Zh. I. Alferov *et al.*; *Sov. Phys. Semicond.*, 1977, **11**, No. 6 (Jun), 1123~1125.
- [5] O. Wada *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 2 (Feb), 174~176.
- [6] F. W. Ostermayer *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**, No. 7 (Oct), 642~644.
- [7] Z. L. Liao *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**, No. 22, (May), 1859~1861.

A novel integral lensed InGaAsP/InP DH LED and ion-beam milling technique

XIAO DEYUAN, GUO KANGJIN, FU XINDING, XU SHAOHUA, FANG HONGLI,
ZHANG JIANPING, CHENG QIYU AND CHENG RUIZHANY
(*Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200050*)

(Received 2 May 1990; revised 1 June 1990)

Abstract

We report the results of fabrication of integral lensed GaInAsP LED by using ion-beam milling technique firstly in China. Baking a positive acting photoresist layer was found to facilitate a very reproducible method of forming a spherical mask suitable for ion-beam milling. Characteristics of Ar ion-beam milling of InP and mask was studied, and milling parameters are optimized for obtaining optically smooth etched surfaces.

Key words: integral lense, light emitting diode, optical communication.