

激光诱导气相热化学光刻的阈值及速率变化特性*

李丁 邱明新

匡忠

(上海市激光技术研究所)

(西安电讯工程学院)

提要: 采用 Ar^+ 激光对 Ge 等半导体材料进行了光刻研究。实验发现存在两种阈值, 表面扫描光刻具有较低的阈值, 刻穿则要求更高的光强。刻蚀速率随着深度的增加而减小, 高掺杂半导体的光刻速率大于低掺杂样品。

Threshold and change characteristics of photolithographical rate in laser-induced gas-phase thermochemical photolithography

Li Ding, Qiu Mingxin

(Shanghai Institute of Laser Technology, Shanghai)

Kuang Zhong

(North-West Telecommunication Engineering Institute, Xian)

Abstract: Semiconductor materials such as Ge and InP etc, were investigated by the laser-induced chemical photolithography with argon ion laser. Two kinds of thresholds of light intensities were observed respectively for the scanning photolithography on the surface and the rapid penetrated etching. The former has a lower threshold and the latter higher depending on the melting point. There exists a complicated relation between the etching rate and the light intensity. The etching rate decreased with the increase of the etching depth. Semiconductor species with higher dopant concentration were etched faster than those with lower dopant concentration.

一、引言

激光诱导气相热化学光刻是利用高功率激光作为光刻光源, 对基片表面加热, 气室内的卤素气体在高温下与基底物质进行剧烈的热化学反应, 生成卤素化合物并瞬时, 气化而实现光刻, 光刻速率可以很高。Ehrlich 等人^[1]使用 Ar^+ 激光, 采用 Cl_2 和 HCl 作为

工作气体, 得到有关 Si 的一些光刻特性; A. W. Tucker 等人^[2]则在低压 Cl_2 环境下研究了 GaAs 基片的刻穿过程, 获得了 $30 \mu m/s$ 的刻蚀速率。我们用可见多线 Ar^+ 激光和 Cl_2 , 对 Ge 等半导体材料进行了光刻研究。

收稿日期: 1986年7月25日。

* 本课题为国家自然科学基金会资助项目。

二、实验装置

实验采用的 Ar^+ 激光输出功率可达 5 W。反应气室由不锈钢制成, 气室内垂直光束放置基片。气室前用一焦距为 3 cm 的透镜将激光束聚焦在基片表面上, 基片离窗口约 1 cm。气室抽真空至 10^{-3} Torr, 然后充入 Cl_2 。

Cl_2 吸收波长小于 500 nm 的光子可分解为 Cl 自由基。 Ar^+ 激光的主要谱线为 514.5 nm、496.5 nm、488.0 nm、476.5 nm 和 457.9 nm 等, 处在 Cl_2 分子 $1,3\Sigma_u^+ \leftarrow X'\Sigma_g^+$ 吸收谱的红翼和 $A^3\Pi_u \leftarrow X'\Sigma_g^+$ 弱吸收带区。另外, 在激光局部加热下, 也引起 Cl_2 的热分解, 本文条件下热分解是主要的。

使用的基片为 $n\text{-Ge}(111)$ 和 $p\text{-Ge}(111)$, 同时还对 GaAs、InP 和 Si 进行了类似的研究。基片经抛光, 光刻前表面经化学试剂充分清洗。

三、实验结果与分析

图 1 是 Ge 的光刻速率与光强的关系。虚线为表面光刻情形, 扫描速率为 $10 \mu\text{m/s}$; 实线为快速刻穿情形, 平均刻蚀速率由基片厚度除以刻穿所需时间来定义。两种光刻都是在 Cl_2 气压为 4 Torr 下进行的。表面光刻时选用两种掺杂浓度的 n 型基片作比较, 晶面都为 (111), 厚度均为 $320 \mu\text{m}$ 。一片为低掺杂, 电阻率 $\rho > 3 \Omega \cdot \text{cm}$; 另一片为高掺杂, 电阻率 $\rho \sim 0.3 \Omega \cdot \text{cm}$ 。快速刻穿则使用三种样品, 包括两块 $n(111)$ 的和一块 $p(111)$ 的, 电阻率分别为 $\rho < 0.8 \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $1.5 < \rho < 2.5 \Omega \cdot \text{cm}$ 和 $2.5 < \rho < 3.5 \Omega \cdot \text{cm}$, 样品厚度依次为 $150 \mu\text{m}$ 、 $190 \mu\text{m}$ 和 $245 \mu\text{m}$ 。

图 2 为 Ge 的刻线宽度与光强的关系, 扫描速度为 $10 \mu\text{m/s}$ 。与图 1 一起, 可反映出光刻的三维进程。

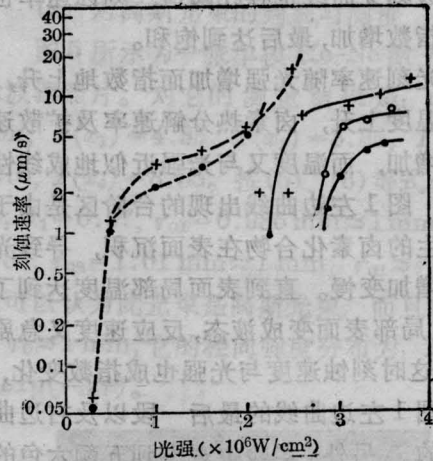


图 1 Ge 的光刻速率与光强的关系

Cl_2 气压: 4 Torr

.....表面光刻情形, 扫描速度: $10 \mu\text{m/s}$ 。

● 高阻 $n\text{-Ge}(111)$, $\rho > 3 \Omega \cdot \text{cm}$

+ 低阻 $n\text{-Ge}(111)$, $\rho \sim 0.3 \Omega \cdot \text{cm}$

— 快速刻穿情形

● $n\text{-Ge}(111)$, $2.5 < \rho < 3.5 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚 $245 \mu\text{m}$

○ $p\text{-Ge}(111)$, $1.5 < \rho < 2.5 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚 $190 \mu\text{m}$

+ $n\text{-Ge}(111)$, $\rho < 0.8 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚 $150 \mu\text{m}$

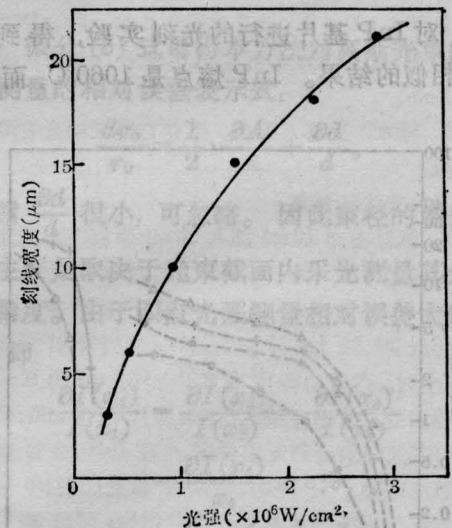


图 2 Ge 的刻线宽度与光强的关系

扫描速度 $10 \mu\text{m/s}$, Cl_2 气压: 4 Torr

如图 1 的虚线所给出的, 两种基片的表面光刻阈值是相近的, 约为 $2.5 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ 。随着光强增加, 刻蚀速率指数增加, 然后出现一个转折区, 形成一级平缓的台阶。光强再增加时, 刻蚀速率又随光强指数地增加。图

1 右边刻穿曲线也存在阈值, 刻蚀速率也随光强指数增加, 最后达到饱和。

光刻速率随光强增加而指数地上升, 是由于温度上升, 卤素热分解速率及扩散速率指数增加, 而温度又与光强近似地成线性关系^[3]。图 1 左边曲线出现的台阶区是由于大量产生的卤素化合物在表面沉积, 导致光刻速率增加变慢。直到表面局部温度达到了相变点, 局部表面变成液态, 反应速度又急剧上升。这时刻蚀速度与光强也成指数变化, 这就是图 1 左边曲线的最后一段以及右边曲线所示的。另外, 实验中观察到五颜六色的散射光, 这是由于大量气化的氯化物充塞在孔洞内引起的。它们对激光吸收和散射, 并使光斑质量变差, 随着孔洞加深, 影响越大, 因此平均刻蚀速率随深度增加而减小。从图 1 可看到厚的基片刻穿的阈值较高, 同一光强下快速刻穿的速率比表面光刻速率也低得多。

对 InP 基片进行的光刻实验, 得到与 Ge 相似的结果。InP 熔点是 1060°C, 而 Ge

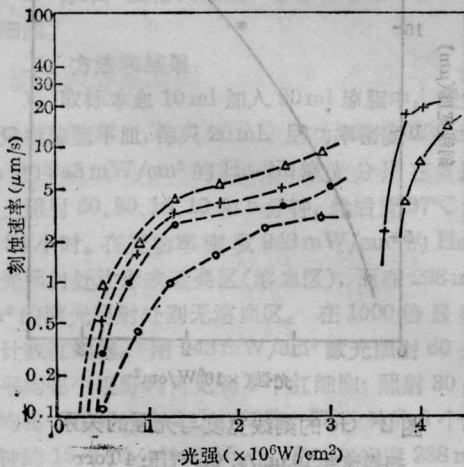


图 3 GaAs 的光刻速率与光强的关系

-表面光刻情形, 扫描速率 10 μm/s, Cl₂: 3 Torr。
 - 快速刻穿情形, Cl₂: 10 Torr。
 - △ n(100), ρ~10⁻³ Ω·cm; +n(111), ρ~10⁻⁴ Ω·cm;
 - n(100), ρ~1.4×10⁸ Ω·cm;
 - 本征(100), ρ~2×10⁷ Ω·cm。
- 基片厚度均为 500 μm

为 960°C, 在其他条件相同时, InP 刻穿需要的光强稍强。

图 3 为 GaAs 刻蚀速率曲线, 曲线的基本特征也与 Ge 的相似, 但台阶区比较长, 在激光光强大于 3×10⁶ W/cm² 时, 才表现出急剧上升的趋势, 高于 Ge 和 InP, 这是因为 GaAs 的熔点较高, 为 1237°C。

对 n-Si(111) 所作的光刻实验获得光刻阈值为 3×10⁶ W/cm², 与文献[1]所得的一致。图 4 为 n-Si(111) 的光刻照片。

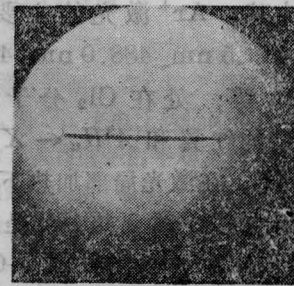


图 4 n-Si(111) 的表面光刻照片
Cl₂: 130 Torr, 光强: 3.1×10⁶ W/cm²
扫描速率: 10 μm/s, 线宽~10 μm

由不同掺杂浓度基片的表面光刻实验表明, 高掺杂基片的光刻速率大于低掺杂基片, 如图 1 中所示。图 3 中四种不同规格的 GaAs 基片的光刻速率的光强依赖关系, 也清楚地表明高掺杂基片的刻蚀速率大于低掺杂的, 本征 GaAs 的刻蚀速率最低。

图 3 给出了 GaAs 表面光刻时, (100) 面的刻蚀速率略高于(111)面, 这是由于(100)面原子密度比(111)面小, Cl 自由基容易扩散进半导体晶格。但在快速刻穿时, (111)面的光刻速率却大于(100)面, 经多次实验均得到同一结果, 目前尚无法解释。图 5 为一组光刻照片。

图 6 为通过快速刻穿实验得到的 Ge 和 InP 的光刻速率与气压的关系曲线。图中 InP 的刻蚀速率在 5~10 Torr 区域出现弯曲, 而 Ge 的气压曲线则没有这个现象。这可能是在气压升高过程中光刻与沉积双重过程竞争的结果, 对于较高气压和较低刻蚀速



图5 一组光刻照片

- (a) Ge的表面光刻照片。光强 $1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, Cl_2 气压 4 Torr, 扫描速率 $10 \mu\text{m/s}$, 线宽 $10 \mu\text{m}$;
- (b) Ge的光刻线剖面图。实验条件同(a), 剖面宽 $10 \mu\text{m}$;
- (c)、(d) 分别为 InP 快速刻穿的正反面孔洞照片。 Cl_2 气压 3 Torr, 光强 $3.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 正面孔径约为 $60 \mu\text{m}$, 反面孔径为 $25 \mu\text{m}$;
- (e) 为 GaAs 的光刻剖面照片。 Cl_2 气压: 3 Torr, 光强为 $3.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 曝光时间 5 分钟

率情形尤为明显。此处 Ge 的光刻速率高, 故未出现类似变化。在真空中的刻蚀速率明显

小于气相环境中的结果。例如, 用 $3.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 的激光束照射一块 InP 基片, 5 分钟未穿, 但在其他条件未变仅充入 1 Torr Cl_2 后, 1 分钟就刻穿了, 显示出热化学反应的增强作用。

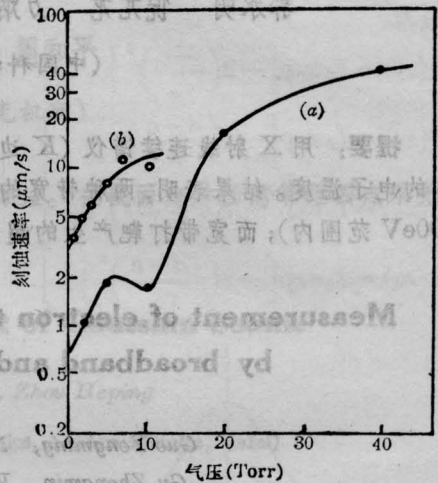


图6 Ge 和 InP 的光刻速率与气压的关系

- (a) InP 的气压曲线。光强 $2.8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 基片电阻率 $\rho \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 厚度 $400 \mu\text{m}$;
- (b) Ge 的气压曲线。光强 $2.8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 基片电阻率 $\rho \sim 3 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚度 $245 \mu\text{m}$

实验表明, 随着光强的增加, 卤化物重新沉积的现象比较严重。这一方面影响了光刻质量, 另一方面也给测试带来了困难, 有待于进一步改进。对于某些半导体, 例如 Ge, 表面的卤化物可用稀释盐酸清除掉。

对中国科学院上海有机化学所的史济良同志和中国科学院上海冶金所的林成鲁同志的支持帮助, 谨表谢意。

参考文献

- [1] D. J. Ehrlich *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, No. 12, 1018.
- [2] A. W. Tucker, M. Birnbaum; *IEEE Electron Device Letters*, 1983, **EDL-4**, 39.
- [3] S. A. Kokorowski *et al.*; "Proc. of the Materials Research Society Annual Meeting", Boston, Massachusetts, 1980, *Laser and Electron-Beam Solid Interaction and Materials Processing*, ed. by J. F. Gibbons *et al.* (North-Holland, New York, 1981), Vol. 1, p. 139.