

离子刻蚀技术现状与未来发展

任延同

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 目前国内外出现的几种离子刻蚀技术——等离子体刻蚀、反应离子束刻蚀、离子束铣、聚焦离子束刻蚀等分别作了详细介绍,并指出今后离子刻蚀技术的发展方向。

关键词 离子刻蚀技术 等离子体刻蚀 反应离子刻蚀 离子束铣 聚焦离子刻蚀

1 引言

自1948年发明晶体管,随后出现集成电路,直到整个六十年代的二十年里,半导体器件光刻工艺中对各种材料均采用不同的试剂进行腐蚀,惯称湿法腐蚀。然而,当器件集成度进入中规模,结构尺寸小于 $10\mu\text{m}$ 时,惯用的湿法腐蚀由于毛细现象和各向同性的腐蚀性就难以保证精度和重复性,迫切需要寻找新的途径。虽然人们早已认识到原子和游离基具有远强于分子的化学活性,但一直没有应用到固体材料的腐蚀技术上。直到六十年代人们才发现氧等离子体可用于去除残留碳化物,并成功地用于等离子体去胶工艺中。随后很快发展了半导体器件工艺中的干法刻蚀技术。自七十年代初,以辉光放电产生的气体等离子体进行腐蚀加工,至今二十多年,经历了多样化的发展过程,使技术不断得到完善和创新。

干法刻蚀是一个惯称,它指的是在低气压下与等离子体有关的腐蚀方法。而其它一些技术,如汽相腐蚀、激光诱导腐蚀,以及无掩膜的聚焦离子束腐蚀等,虽然亦有别于“湿法腐蚀”,但已自成体系,一般不列入干法刻蚀中。经过二十多年的发展,出现过多种干法刻蚀形式,它们各有各的时代背景,也各有所长。表1列出的曾经得到较多应用的、具有一定普遍性的形式,其中:

- (1) 屏蔽筒式——直到目前仍是等离子体去胶机的基本结构形式;
- (2) 下游式——属纯游离基的化学腐蚀;

(3) 平行板式——带低能离子轰击的游离基腐蚀;
 (4) 反应离子式——兼有离子轰击和游离基腐蚀,是目前实验室和生产中应用最多的结构;

- (5) 磁控反应离子式——比反应离子刻蚀有更高的腐蚀速率;
 (6) 三级式——可分别控制离子能量和离子密度;
 (7) 离子束铣——对所有材料,包括铁磁和陶瓷材料均能腐蚀;
 (8) 反应离子束——可调整离子入射角度,独立控制离子能量和离子密度;
 (9) 化学辅助离子束——可调节腐蚀过程中的游离基腐蚀和离子轰击腐蚀成分。

按腐蚀原理来分,(1)、(2)、(3)可统称为等离子刻蚀,主要是化学反应过程;(4)、(5)、(6)属反应离子刻蚀,是物理-化学反应过程;(7)、(8)、(9)属离子束腐蚀,除了离子束铣是纯物理过程外,其余为物理-化学反应过程。

Table 1 Feature of normal ion-etching technology

Principle of erosion	plasma erosion(PE)			reaction ion-etching(RE)			ion beam etching(IBE)		
erosion mode	shield rub	lower reaches	parallel plant	reaction ion	reaction ion controlled by magnetic	three pole	ion milling	reaction ion beam	ion beam aided by chemical
date of appear	70	75	72	74	76	84	75	78	81
acting principle	chemical	chemical	chemical	chemical-physical	chemical-physical	chemical-physical	physical	chemical-physical	chemical-physical
power of ion eV	0	0	10 ~ 100	50 ~ 700	50 ~ 700	50 ~ 700	200 ~ 2000	100 ~ 1500	30 ~ 1500
reaction partical	middle	middle	mid., lower power	mid., high high	mid., high power	mid., high power	high power	mid., high power	mid., high power
controlled by neutral particle	independent	independent	mid-independent	mid-independent	mid-independent	mid-independent		mid-independent	independent
controlling ion beam flow	-	-	mid-independent	mid-independent	mid-independent	mid-independent	independent	independent	independent
controlling ion energy	-	-	mid-independent	mid-independent	mid-independent	mid-independent	independent	independent	independent
selectivity	best	best	good	middle	middle	middle	low	high	high
profile of section	isotropic	isotropic	anisotropy	anisotropy	anisotropy	anisotropy	suputer erosion	oriented erosion	oriented erosion
controllable of section working	low	low	low	mid.	mid.	mid.	low	high	high
pressure Torr	1 ~ 10 ⁻¹	1 ~ 10 ⁻¹	10 ¹ ~ 10 ⁻²	10 ⁻¹ ~ 10 ⁻³	10 ⁻² ~ 10 ⁻⁴	10 ⁻¹ ~ 10 ⁻³	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻⁵	10 ⁻³ ~ 10 ⁻⁵	10 ⁻³ ~ 10 ⁻⁵
width of etching(μm)	5	5	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.01

2 离子刻蚀技术的重大应用领域

微细加工技术中, 干法刻蚀是当前制作最微细结构的技术之一。最大的应用领域首推微电子学, 其次是光电子学和微光学元件的制作, 其它如微机械和超导等方面亦有一定的应用。

干法刻蚀技术的出现是由于集成电路制作工艺的需要, 其发展亦是伴随集成电路的不断微细化的和高集成化而完善更新。目前已成为生产中不可缺少的关键技术。

光电子学和微光学元件的制作起步晚于微电子学。在微结构制作上直到八十年代初才引入干法刻蚀技术, 但其应用发展较快。由于超晶格量子结构的出现, 结构的微细程度远超过微电子的要求, 在技术难度上也有较大差异。微电子器件(主要是 VLSI)主要要求大面积的腐蚀均匀性和较高的刻蚀速率, 以满足大批量生产的要求, 而对光电子器件和微光学元件, 除了微细度要求更高外, 还要求侧壁垂直度、腐蚀面的平整光滑、镜面腐蚀、倾角腐蚀、多样化的选择腐蚀、无损伤的表面腐蚀等项要求。这些不同的要求都直接影响到器件的特性。

以下就目前的几种离子刻蚀技术作一介绍。

3 等离子体刻蚀

等离子体刻蚀的基本原理是: 腐蚀气体分子在高频电场作用下发生电离形成等离子体, 其电离反应式一般可写为



式中 A_2 表示电离气体, A^+ 为正离子, e 为电子, A 为化学性质很活泼的自由基, 自由基和被刻蚀材料之间的化学反应对材料产生腐蚀作用, 反应生成挥发性极强的气体被抽走。

等离子体刻蚀与湿法腐蚀相比最大的优点是可使刻蚀具有强方向性。

刻蚀二元光学元件时, 由于存在着腐蚀窗口, 刻蚀光致抗蚀剂层的速率比基片材料的速率要小得多。通常制作光刻全息图是在玻璃或其它基底上淀积一层透明介质薄膜或金属薄膜作为基片, 由于光致抗蚀剂中浮雕全息图的连续厚度分布不存在腐蚀窗口, 而且基片上淀积的薄膜厚仅约 $1\mu\text{m}$, 若沿用刻蚀二元图形的工艺在 $V_p \ll V_s$ (V_p 为光致抗蚀剂的刻蚀速率, V_s 为基片材料的刻蚀速率。)条件下刻蚀这种厚度连续变化的图形, 将会使薄膜中生成的沟槽形状产生严重失真。因此, 为了使光致抗蚀剂中的浮雕能保真地传递到薄膜中, 必须适当地控制蚀速比 V_s/V_p 。

设浮雕图案的厚度分布为 $d_p(x)$, 薄膜中的沟槽分布为 $d_s(x)$, 则有如下关系:

$$d_s(x) = (V_s/V_p) d_p(x) \quad (2)$$

(1) 若 $(V_s/V_p) = 1$, 则 $d_s(x) = d_p(x)$, 薄膜中沟槽的深度分布与光致抗蚀剂中浮雕的厚度分布完全一致;

(2) 若 $(V_s/V_p) > 1$, $d_s(x) > d_p(x)$, 薄膜中生成的浮雕图样的调制深度将增加。但是, 当

$V_s \gg V_p$ 时, 调制深度将超过薄膜厚度, 从而产生的图形将严重失真;

(3) 若 $(V_s/V_p) < 1$, $d_s(x) < d_p(x)$, 薄膜中生成的浮雕图样的调制深度将减少。

因此, 在没有腐蚀窗口的条件下, 为了刻蚀具有连续厚度分布的浮雕图案(如光刻全息图), 利用腐蚀剂对光致抗蚀剂和薄膜材料的刻蚀速率不同控制合适的蚀速比是一个关键, 而且选择不同的蚀速比还可以得到不同的调制深度。

4 反应离子刻蚀

反应离子刻蚀(RIE)是利用高频电场下气体辉光放电产生的离子轰击的物理效应和活性粒子的化学效应相结合来实现加工目的的一种技术。一般来说, 它具有较高的刻蚀速率, 良好的方向性的选择性, 能刻蚀精细结构的图形。

在进行反应离子刻蚀时, 需注入适当的刻蚀气体, 与基底材料化合生成挥发性和准挥发性的化合物, 一般地说, 对 I 族化合物半导体材料和 Al 等 III 族元素材料, 反应气体多以 Cl_2 为主, 对 Si 及其化合物, 反应气体以氟化物为主。

在刻蚀过程中发生的化学反应, 可分为离子诱发和离子增强两种, 其机理正如字面所理解的, 一般地说, 离子增强反应, 掩膜将受到一个由自发反应速率所确定的钻蚀, 而离子诱发的则没有。如果在刻蚀气体中引入一些能提供交合的粒子添加剂混合试剂的作用, 则既能与刻蚀剂粒子在材料表面上结合产生挥发性产物, 也能作为形成钝化膜的预制体。实验表明, 当用 Cl_2 等离子体刻蚀硅时, 会发生钻蚀, 但加入 C_2F_6 时, 钻蚀程度会减少, 当 C_2F_6 达到一定浓度时, 侧面刻蚀实际上不存在; 又如当 SF_6 刻蚀 Si 时, 加入适量的氧气, 会产生垂直侧壁形状, 而没有侧面刻蚀。

控制刻蚀完成, 检测刻蚀终点的方法有:

- 发射光谱法对等离子体中刻蚀剂粒子浓度进行检测;
- 红外吸收光谱测刃技术;
- 激光诱导荧光光谱技术;
- 质谱分析技术。

完成刻蚀后, 需将作为掩膜的光刻膜去除。过去, 用热硫酸或有机溶剂去除, 现在则几乎被气体等离子法所取代, 一般采用氧气等离子体去除。

5 离子束铣

离子束铣(Ion Milling)是近年来发展较快的一种离子剥离技术。该技术主要利用携带能量的离子轰击靶材料所产生的物理溅射刻蚀效应, 具有刻蚀分辨率及刻蚀速率高、无侧向钻蚀、图形边缘清晰、工艺参数可控、费用低廉、可刻蚀的材料种类繁多、环境污染小等优点。目前该技术已成功地应用于微电子器件、微光学器件和微光电子器件的研制和生产过程中。

离子刻蚀速率表示如下^[15]:

$$dh(\theta)/dt = R(\theta)/\cos(\theta) = R(\theta)[1 + \tan^2(\theta)]^{1/2} \quad (3)$$

当离子束入射的角度较大时,材料表面反射的离子束也增多。因此,随着角度 θ 的增大,越来越小的离子渗入到材料的有效表面。为保证离子的有效渗入,定义临界角 θ_c 。离子束的溅射场与靶材料的原子数 Z 有关,材料的原子数 Z 越高,刻蚀速率越高;反之则越低。对于低 Z 材料,如石英、硅、铝和部分玻璃,临界角是 60° 或 70° ;对于高 Z 材料,象 CdTe 和金,临界角接近 0° ;如图 2 所示,刻蚀速率随入射角的变化如图 3 所示。

对于与集成光电子器件匹配的集成微光学元件来说,除了微细度的

要求更高外,还有侧壁垂直度、腐蚀面的光滑平整性、镜面腐蚀、倾角腐蚀、多样化的选择腐蚀、无损伤的表面腐蚀等项要求。采用离子束铣技术可制作出较好地满足上述各项要求的集成微光学元件。利用带反应性的离子束实现对游离基的化学作用和离子轰击的物理作用的可控性,以及离子入射角度的可调性,在光电子器件上得到广泛应用,并成为重要的工艺手段。

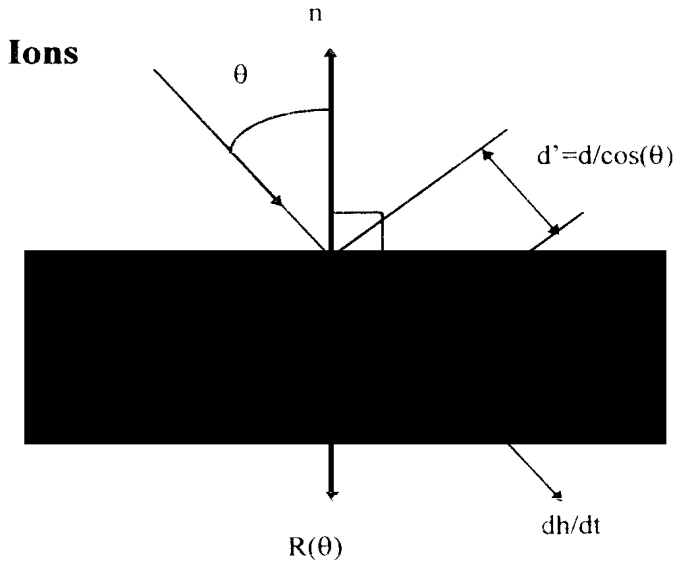


Fig. 1 Schematic of ion milling

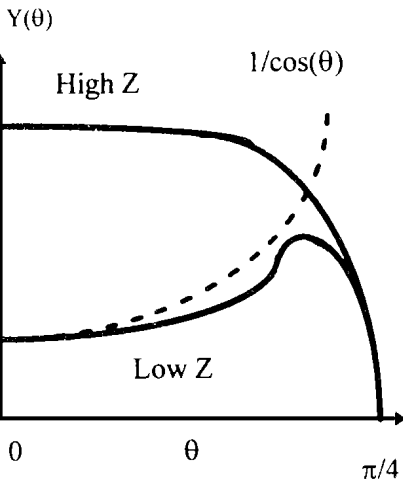


Fig. 2 Relation between typical sputter field and low Z material

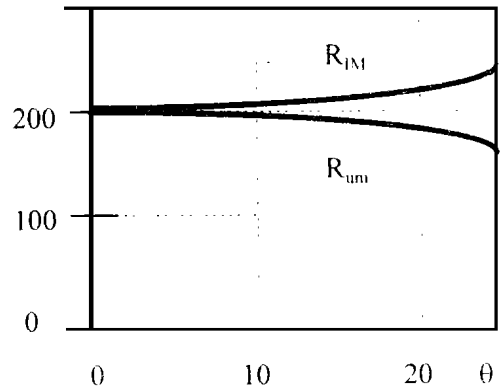


Fig. 3 Relationship for etching rate between incident angle and material with high Z

6 聚焦离子束刻蚀

亚微米聚焦离子束(FIB)微细加工包括FIB物理溅射刻蚀(简称溅射刻蚀)、FIB化学增强刻蚀、FIB淀积、FIB注入等方面。其中最容易实现的是物理溅射刻蚀,它可应用于光刻模板的

修理、多层电路的剖面观察、集成光电子器件中光学元件的微细加工。其它几种 FIB 加工都各有独特的优点,但都要配合其它工序:例如 FIB 化学增强刻蚀的速率比物理溅射刻蚀速率快近 10 倍,而且可以得到规则的形状和很大的宽深比,但需要在样品表面附近充入 0.1~1Pa 的活性气体;FIB 淀积则要在样品表面附近充入金属有机化合物蒸气;FIB 光刻的速率很高,且邻近效应很小,但是要有后续工序(如硅化腐蚀)配合;FIB 注入则需要很高的离子能量(如 50keV)^[8]。

自从聚焦离子束于 1973 年首次用于制作微细结构以来^[3],它已发展成为半导体制作技术中的一个可靠工具。然而,那时的离子由常规的等离子体源产生,相应的聚焦流密度很低,导致刻蚀速率较慢。于是从七十年代末人们开始研制液态金属离子源(LMIS),采用低熔点的纯金属如 Ga、In 或易熔合金 AuSiBe 等,产生的电流在 100nm 直径面积上仅 100pA^[4]。气体离子源的开发由于工作条件的不稳定而被长期忽视,然而最近的研究表明,它可产生较高的使用电流密度。这一提高是由于枪头的改进,在一个规则的 W 形枪头上作一个小的凸起作为场发射器。目前,用作离子源的纯净气体有 H₂、He 和 Ne,聚焦离子束电流密度可达 100A/cm²,产生的斑点直径小于 10nm。表 2 是几种离子源的比较。

d_v —— 离子束直径, nm;

ΔE —— 传递能量, eV;

I_Ω —— 角电流密度, $\mu\text{A}/\text{sr}$;

β —— 亮度, $\beta = I_\Omega / (\pi d_v^2 / 4)$;

β_s —— 光谱亮度, $\beta_s = \beta / \Delta E$

Table 2 Comparison of several plasma source

	d_v [nm]	ΔE [eV]	I_Ω [$\mu\text{A}/\text{sr}$]	β [$\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$]	β_s [$\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{eV})$]
plasma source	5×10^4	5×10^{-3}	3×10^{-3}	10^2	10
LMIS	50	5	20	10^6	10^5
GFIS	1	1	0.1	10^7	10^7
improved GFIS (supertip)	1	1	35	5×10^9	5×10^9

其中, d_v 由成像系统决定,它限制了焦点的大小; I_Ω 决定转换到靶面上的离子电流密度; β 用于衡量离子源质量,由成像系统球差决定。为了同时考虑色差的影响,采用谱亮度 β_s 作为评价尺度。

聚焦离子束的应用,不仅局限于光刻,还能用于器件的微细结构成型和分析。通过选择合适的离子源, FIB 能进行离子注入或淀积刻蚀,甚至材料改性。

实际中 FIB 的第一个应用是掩模修补^[7]。与通常的激光修补不同之处, FIB 除了能溅射剥离缺陷的多余部分之外,还可以通入 CH 等反应气体,在局部区域上, CVD 淀积粘附力强、化学特性稳定的无定型碳膜,修补针孔。

FIB 的分辨率取决于光学系统的质量及参数,可表示如下^[6]

$$\text{RES} = MD \frac{\overline{H_0}}{H} \quad (4)$$

其中

$$H = \frac{\pi^2}{\ln 2} \frac{2}{0} \ln[1 + \text{OTF}(\bar{\nu}) \frac{S}{N}] \bar{\nu} \bar{\nu} \quad (5)$$

$$\bar{\nu} = \sqrt{MD}$$

H —— 无量纲参数;

$\bar{\nu}$ —— 归一化空间频率;

M —— 光学系统倍率;

D —— 离子源半径;

OTF —— 光学系统传递函数;

S/N —— 光学系统信噪比。

上式表明, 实际系统的分辨率等于一个理想系统乘上一个衰减因子 $\frac{\overline{H_0}}{H} < 1$ 。目前, 使用液态金属离子源已获得小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的分辨率^[6]。

7 未来发展方向

高刻蚀速度和高均匀性一直是微细加工技术发展的主要内容, 随着基片尺寸不断增大, 器件结构尺寸不断缩小, 这些要求就更为突出。

新的等离子体产生方式是近年来干法刻蚀技术发展的重点。电子回旋共振(ECR)技术已得到普遍应用。它是 1984 年前后日本日立公司最早研究的, 在较长时间里得不到重视, 只在日本发展。直到八十年代末, 美英法德的少数公司才开始开发, 近年来进展很快。曾有人认为 ECR 技术将是今后的发展主流, 但时过不久, 美国 Lam 公司与 IGM 公司合作发展了线圈耦合等离子体(TCP)技术, 最近又出现螺旋式(Helicon)、螺旋共振式(Helical resonator)、空心阳极式(Hollow anode)和共振感应式(MORI)等新型等离子体结构。这些新开拓的技术的共同特点是能够产生高密度的等离子体, 以提高腐蚀速率和腐蚀均匀性。

在集成电路生产中, 减少人为污染和工艺过程中引进的尘埃, 一直是改进工艺和设备设计的一个重要目标。工艺过程和机器操作中采用机器人或机械手的传输方式已非常普遍。为了更好地实现无污染的高效率生产, 近年来出现了各种形式的多工艺真空联机系统, 并着重考虑了无尘、无人化和人工智能。这种结构已打破单机单工艺的传统形式。在一个系统中可以实现预处理、刻蚀、钝化、清洗等多工序的联机系统, 或者把预处理、溅射、刻蚀、CVD 等多种关联工艺组合在一起, 实现密封的工艺流程。具有代表性的有两种: 主干道式和集团式^[11]。

多工艺真空联机系统的优点是: 占地面积小、降低厂房净化要求、缩短工艺周期, 便于控制材料表面特性、提高重复性、便于实现全自动化、提高经济性。但是, 保证最低的设备故障率是其最突出的问题。

参 考 文 献

- 1 李建中. 半导体器件工艺中干法刻蚀技术的进展. 微细加工技术, 1993, 3: 43 ~ 51
- 2 Seliger R L, Fleming W P. Focused ion beams in microfabrication. J Appl Phys, 1987, 45(3): 1416 ~ 1422
- 3 Melngailis J, Focused ion beams technology and applications. J Vac Sci Technol, B5(2): 469 ~ 495
- 4 Wibertz Ch, et al. Recent progress in gas field ion source technology. Proc SPIE 1994, 2194: 407 ~ 417
- 5 Orioff Jon. Limits on imaging resolution of focused ion beam repair of opaque defects. Proc SPIE. 1995, 2522: 412 ~ 420
- 6 Ferranti David C et al. Advances in focused ion beam repair of opaque defects. Proc SPIE 1994, 2194: 394 ~ 404
- 7 邹海兴, 王世贵等. 微电子光刻设备国内外现状. LSI 制造与测试, 1989, (2): 21 ~ 24
- 8 Seriff. Leading edge mask-repair research. Semiconductor international, Feb 1985. 35 ~ 36
- 9 毕建华等. 亚微米聚焦离子束溅射刻蚀的实验研究. 微细加工技术, 1996, (2): 26 ~ 34
- 10 Zhihong Mai, et al. Fabrication of silicon microlens arrays using ion beam milling. Semiconductor Photonics and Technology, 1996, 2(1): 61 ~ 65
- 11 郭永康, 郭履容, 张晓春. 光刻全息图的刻蚀条件研究. 光学学报, 1992, 12(3): 252 ~ 255
- 12 程美乔等. Si 在 SF₆ 中反应离子刻蚀及其研究. 微细加工技术, 1995, (1): 15 ~ 19
- 13 付永启等. 二元光学元件的刻蚀技术. 光学技术, 1996(增刊): 8 ~ 12
- 14 Stern M B, et al. Dry etching for coherent refractive microlens array. Opt Eng, 1994, 33(11): 3547 ~ 3551
- 15 Gratrix Edward J. Evolution of a microlens surface under etching condition. Proc SPIE 1993, 1992: 266 ~ 274
- 16 Somekh. Introduction to ion and plasma etching. J Vac Sci Tech, 1976, 13(6): 1003 ~ 1007

Presence and Future Developing Tendency of Ion-etching Technology

REN Yan-Tong

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Abstract

Several ion-etching technology are introduced in this paper. They are plasma ion-etching, reaction ion-etching, ion milling, focusing ion-etching. Further developing directionn for the technology is discussed.

Key words: Ion-etching technology, Plasma ion-etching, Reaction ion-etching, Ion milling, Focusing ion-etching

任延同 男, 1941 年 6 月生。1966 年毕业于黑龙江大学物理系, 1968 年后于长春光机所一直从事半导体光电器件及硅靶视像管、硅增强靶视像管和光盘槽槽机等研究工作, 1987 年后从事情报研究及课题跟踪信息服务工作, 1993 年后从事期刊编辑、出版工作。