

微离子束技术及其在微细加工中的应用

华明达

(北京师范大学低能核物理研究所)

二十多年前，著名的美国物理学家费曼说过：如果微细加工技术能加工线度 8nm 的图形，就可以把二十四卷《大英百科全书》刻在一个针尖上。今天，他的预言正在变成现实，微离子束的束斑直径已达到 10nm。

由于计算机和空间技术的需要，微电子学迅速发展，集成电路的集成度越来越高，目前已制成 512K 的 ROM。要求微细加工的线度在亚微米量级 (图 1)。

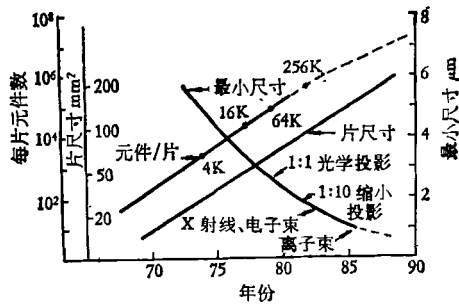


图1 集成度和微细加工的发展

早在 1954 年，W. Shockley 在提出离子掺杂工艺时就设想用微离子束掺杂来获得 p-n 结。六十年代，国内外在发展毫米束离子注入工艺时也曾试探过获得微米离子束，以便进行微细加工。1973 年美国休斯实验室的 R. L. Seliger 等利用 60kV 离子注入机加装聚焦透镜，获得 3.5μm 的束斑，着靶束流 10^{-11}A，初步实现了 He 微离子束光刻和 B 微离子束无掩膜注入^[1]。但由于流强弱，束斑亮度小，故实用性差。解决这个问题的关键是要用新型的离子源来代替当时采用的双等离子体离子源。

场电离离子源技术的突破给微离子束以新的生命力。1975 年，美国阿贡实验室的 V. E.

Krohn 利用液态金属离子源获得束斑直径 15 μm、亮度 $0.9 \times 10^5 \text{A/cm}^2\text{Sr}$ 的微束^[2]。1978 年，休斯实验室用这种源和一个聚焦透镜获得镓离子微束，其直径为 0.1—0.5 μm，着靶束流 $0.12-3 \times 10^{-9}\text{A}$ ，能量 57keV，离子光程 82 mm (图 2)。在束斑 0.1 μm 时，束流密度为

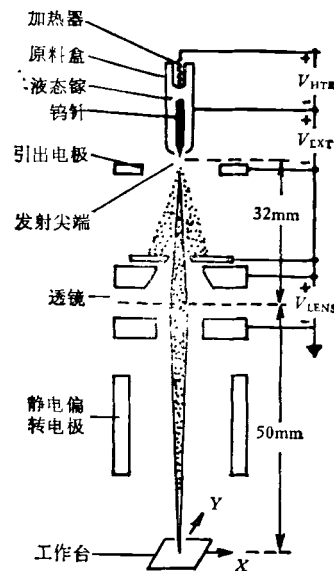


图2 休斯实验室的微离子束装置

1.5A/cm^2 ，亮度 $3.3 \times 10^6 \text{A/cm}^2\text{Sr}$ ^[3]。

1980 年，休斯实验室又建立了带质量分析器的装置，获得 B 离子微束，实现了无掩膜注入。

1981 年 3 月，日本报道了日本电公社武藏野电气通讯研究所研制成功实验性微离子束装置，束斑直径 1 μm，离子流 1nA，制成了线宽为 1.25—2 μm 的图形，图形面积 $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ 。

美、英、日等国已建立起十多台微离子束装

置用于微细加工和微细分析。如美国康乃尔大学、贝尔实验室,英国剑桥大学,日本大阪大学、电化学研究所、JEOL、日立公司等。1982年,美国 Varian 公司设计商品微离子束机,指标为:束斑直径 $0.1\mu\text{m}$,能量 50keV (最高达 200keV),离子种类 $\leq 130\text{amu}$,可在 $5-15\text{cm}$ 晶片上进行曝光或微离子束掺杂。

1979年,第十五届电子束、离子束和光束技术国际会议上关于微离子束技术的报告有5篇,1981年增为12篇,1983年又增到14篇。

1981年,在日本第五届离子源和离子技术会议上有关报告3篇。1982年增为6篇。

1983年9月,在日本京都举行了离子工程国际会议,会上有关报告15篇。

一、场电离离子源

电场强度在 10^8V/cm ($1\text{V}/\text{\AA}$) 以上时,气体、液体或固体表面都会由于场电离或场发射而产生离子。目前对微细加工有实际意义的主要是液态金属离子源和气体场电离离子源。

1. 液态金属离子源也叫熔融金属场发射离子源或电流体动力 (electrohydrodynamic) 离子源

1951年, E. W. Müller 发现原子会从处于正电位的冷的针状电极上场蒸发和场电离,得到离子发射。1956年,他又发现强电场可以从固体金属针尖上拉出离子。

五十年代末,为了发展电推进空间飞行器而研制液态金属离子源。当时得到的主要是带电飞沫,被称为“静电喷射器”。

1961年,阿贡实验室的 V. E. Krohn 用伍德合金做实验,证实了从毛细管阳极上有金属原子离子发射^[4]。

1969年, J. F. Mahoney 等改进了阳极结构,使原子离子占统治地位,这是重大的技术突破^[5]。

1975年, V. E. Krohn 等发展了微离子束技术用的高亮度液态金属源,源点有效直径约 $0.2\mu\text{m}$,在 21kV 加速电压下得到 $10\mu\text{A}$ 离子

流。用 Cs, Ga, Hg 工作时可以在 $200\mu\text{A}$ 离子流以下稳定运行。

1975年以后,美、英、日等国许多实验室都对液态金属源的结构、工作条件和物理机制作过研究,使它进入实用阶段。其结构见图3。核

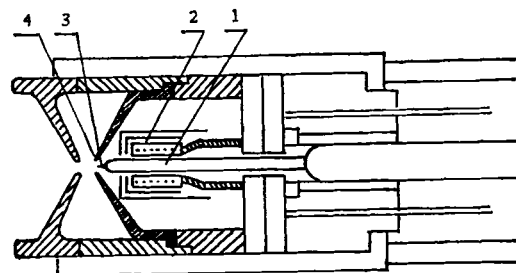


图3 液态金属离子源

1.料盒; 2.加热器; 3.针状阳极; 4.圆孔阴极

心部分是阳极3和圆孔阴极4,装有金属或共晶合金的料盒插入源体,料盒外有加热器,一般工作在 1000°C 左右。阳极是最敏感的部分,其几何参数和电参数关系到离子源的性能。通常有三种结构(图4)。(a)是单针型,(b)是同轴

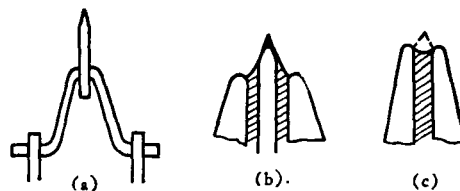


图4 三种阳极结构

(a) 单针型; (b) 同轴针型; (c) 毛细管型

针型,(c)是毛细管即空心针型。一般用钨、钼或钽等材料制成。阳极和阴极间加上数千伏电位差,例如镓,为 $2-6\text{kV}$ 。熔融的金属或合金“润湿”针尖或毛细管顶部,在电场力和表面张力互相作用下出现顶角为 98.6° 的锥,叫做 Taylor 锥,锥顶部曲率半径只有 $0.1-0.2\mu\text{m}$,甚至更小。在这个不会“磨损”的尖顶上,电场强度达 $100-500\text{MV/cm}$ 。强电场的静电力足以克服表面张力,将离子拉出液体表面或使附近的中性原子场电离。

2. 气体场电离离子源

1951年, E. W. Müller 发明了场发射离子显微镜,它利用了气体场致电离现象。美国芝

加哥大学的 R. Levi-Setti^[6] 和俄勒冈大学的 L. W. Swanson^[7] 继续发展这种离子源, 用于离子显微镜和离子探针, 离子源在 77K 温度下工作, H_2^+ 和 H^+ 的角电流强度很低, 仅 0.5—1.0 $\mu A/Sr$. 康乃尔大学“美国亚微米结构研究和开发中心”的 B. M. Siegel 等把离子源的发射部分用液氮冷却到 10K, 使角电流强度达到 5—10 $\mu A/Sr$, 甚至 60 $\mu A/Sr$. 其结构见图 5.

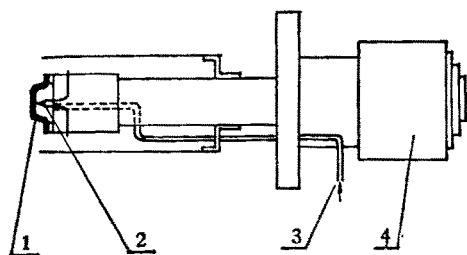


图 5 气体场离子源

1. 圆孔阴极; 2. 场发射器; 3. 气体入口; 4. 氮致冷器

3. 场离子源的特点

(1) 普适性. 可以产生 H, He, Li, Be, B, Na, Al, Si, P, Ar, K, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Kr, Rb, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi 和 U 等三十多种元素的离子. 难熔元素可利用其共晶合金, 使熔点降低, 例如硼可用 BNiPt 或 AuGePtB 合金, 在以 AuGePtB 合金作原料时能引出 100 μA 总离子流, 除了 Au, Ge, Pt 离子外, ^{11}B 离子流为 30 $\mu A/Sr$, 提供了 B 离子注入的可能性.

(2) 点发射, 亮度大. 液态金属离子源在一般条件下其液尖曲率半径为 0.1—0.5 μm , 角电流强度为 20—60 $\mu A/Sr$, 亮度为 $10^7 A/cm^2 Sr$. 气体场离子源发射点 $< 5 \text{ \AA}$, 角电流强度为 10—60 $\mu A/Sr$, 亮度达 $10^9 A/cm^2 Sr$. 这种近乎点发射的高亮度离子源给微离子束光路设计提供了一个很小的物点, 因此有可能聚焦到极小的象斑. 在能散度相同的条件下, 为了获得 0.2 μm 束斑, 如用双等离子体离子源, 着靶束流密度只有 $3 mA/cm^2$, 而用液态金属源, 着靶束流密度将提高 100 倍^[2]. 所以场离子源适合于微细加工和微细分析.

(3) 能散度较小. 离子流 20 μA 以下能散度约 12eV. R. J. Culbertson 的实验表明, 离子流为 1 μA 到 100 μA , 能散度 $\geq 10 eV$ ^[8]. 1983 年, 在剑桥召开的国际微电路工程会议上, G. L. R. Mair 在报告中说, 当离子流大于 25 μA 时, 能散度约 35eV.

(4) 液态金属离子源结构简单, 消耗功率少, 典型的加热器功率为 15W. 寿命较长, 一般工作数十至数百小时, 取决于料盒内的原料量. 这种源气体负载很小, 可用较小的真空设备获得高真空. 气体场离子源要在液氮或液氦的极低温下工作, 结构复杂, 还需要超高真空系统. 但对于曝光 H_2^+ , He^+ 在抗蚀层中有较大的穿透深度, 给出较高的纵横比, 可以曝光较厚的抗蚀层.

二、几种微细加工方法比较

1. 投影光刻

掩模版较大, 它与晶片不接触, 用透射或折射光学系统把模版上器件图形缩小投影在抗蚀层上. 这比常规光刻先进, 但为了确保大视场里的高分辨率及减少畸变, 光学系统设计困难. 又因透镜材料限制, 不能选取太短的波长. 光的衍射使分辨率难以进一步提高, 一般认为极限是 0.5 μm .

2. 软 X 射线

其特点是在很深的抗蚀层内都能保持边缘整齐, 因为使抗蚀层曝光的不是 X 射线的辐射光量子本身, 而是 X 射线激发产生的光电子, 其最大能量不会超过入射光量子的能量 (280—4200eV), 即使光电子在抗蚀层中散射, 其范围毕竟有限. 所以光刻图形不会象电子束那样由于散射而出现边缘模糊和扩张. 在使用铝靶辐射特征 X 射线时, 波长 $\lambda = 8.3 \text{ \AA}$, 因此衍射很小. 目前由光电子能量决定的边缘清晰度是 400 \AA . 但 X 射线曝光的困难是它难以聚焦, 所以为了得到较平行的束, X 射线源必需离掩模版较远, 因而强度减弱, 曝光时间增长. 如同步辐射加速器产生的同步辐射来曝光, 则可缩

短曝光时间,但设备昂贵。

3. 微电子束

电子束尽管已经聚焦到 5nm 束斑,但一般认为难以刻出 $<100\text{nm}$ 的图形。

光刻品质有两个主要指标:分辨率和灵敏度。分辨率决定于入射辐射及其次级效应造成的横向扩散和抗蚀层的反差。灵敏度决定于辐射转移到抗蚀层中的能量沉积率以及这能量转换成化学变化的效率。灵敏度和分辨率有矛盾,难以同时最佳化。

由于电子在抗蚀层中散射严重,同时基片反向散射电子也使曝光区增宽,即所谓邻近效应,所以电子束曝光在抗蚀层中截面呈梨形,大大降低了分辨率。电子质量小,单位射程中能量沉积率小,灵敏度低。

4. 微离子束

离子束可以聚焦,用低温氢场离子源可获得 10nm 束斑,着靶束流 $4 \times 10^{-10}\text{A}$ 。离子质量大,在抗蚀层中能量沉积率高,因此灵敏度高,在 PMMA 抗蚀剂中比电子高 50—100 倍。图 6 表示几种曝光技术的比较。

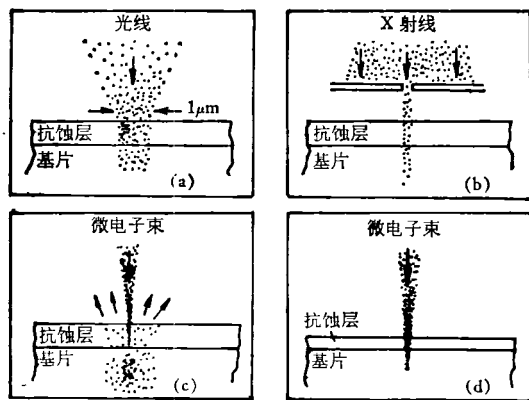


图 6 几种曝光技术比较

图 7 是不同能量的电子和离子在 PMMA 抗蚀层中穿透深度与能量沉积率的关系。

图 8 是电子和离子辐射对 PMMA 抗蚀层的曝光特性。说明抗蚀层获得同样消蚀厚度所需离子辐射剂量比电子低得多。

离子质量大,在抗蚀层中散射半径远小于电子。离子也不引起明显的反向散射。它在抗

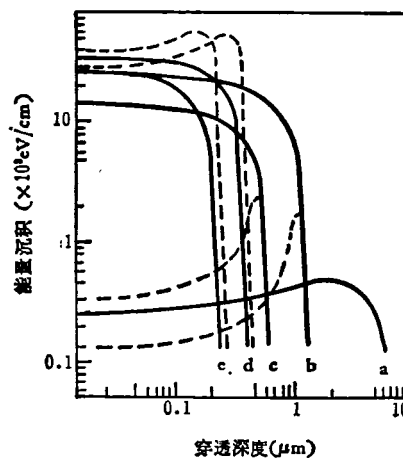


图 7 穿透深度与能量沉积率的关系

a. 20kV 电子; b. 200kV He⁺; c. 60kV He⁺; d. 250kV Ar⁺; e. 150kV Ar⁺。

(对于离子的曲线,实线是电子碰撞损失,虚线是核碰撞损失)

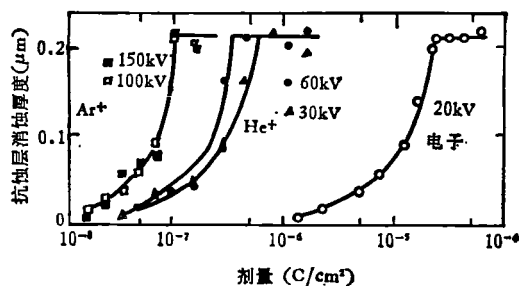


图 8 电子和离子对 PMMA 抗蚀层对电子和离子的辐射的曝光特性

蚀层中产生的二次电子能量很低,射程 $<0.01 \mu\text{m}$,所以邻近效应可以忽略。微离子束曝光横向扩展比微电子束小得多,纵横比高,线条分辨率高。而且能量在抗蚀层中被吸收掉,不引起基片的辐射损伤。

利用 B, P, As 等微离子束可以直接在晶片上书写微电子线路,实现无掩膜工艺,这是微离子束独到之处。

三、微离子束的应用

微离子束主要用于微细加工和微细分析。限于篇幅,本文只讨论前者。微离子束可用于曝光、掺杂、外延、蚀刻和磨削等。

1. 曝光

微离子束曝光有两种方式：一是在涂有感光胶的芯片上一片一片书写，叫串行方式，优点是不用掩模版，减少工序，缺点是效率低。二是用微离子束制作一块掩模版，然后用任何一种曝光手段将图形转移到芯片的抗蚀层上，叫并行方式，优点是效率高，但仍离不开掩模版，其热变形和缺陷等都影响图形质量。

美国休斯实验室用 Ga 离子束在 PMMA 中刻出 0.03—0.3 μm 的线条(见图 9)。

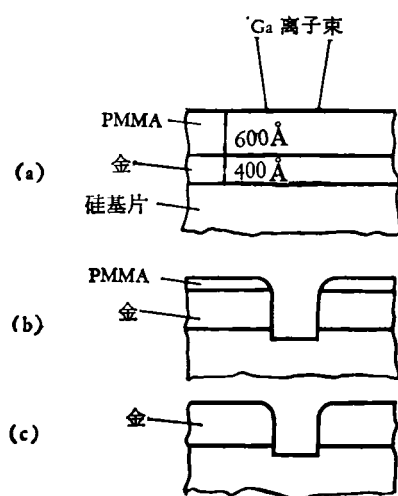


图 9 微离子束曝光示意

微离子束曝光分辨率达 100 Å，书写速率为 4 cm^2/min ，与目前微电子束的书写速率 5 cm^2/min 接近。

2. 掺杂

在计算机精确控制下，聚焦的离子束直接注入晶片，制成 $p-n$ 结、电阻线等，实现无掩膜工艺，将导致大规模和超大规模集成电路生产过程的一次变革。其优点是：(1) 取消了常规的复杂的曝光、蚀刻等掩膜工艺，避免了掩膜或掩膜版的缺陷、灰尘以及加工过程中热变形和损伤对芯片造成的残疵，可提高成品率；(2) 免除了一次一次套刻定位的困难；(3) 芯片加工全过程在高真空中进行，保证了清洁度；(4) 用计算机控制微离子束，提高了精确性、可靠性，可以同计算机辅助设计制版系统配合或联机，可以随时修改微电路，特别有利于研制新的微电子器件，可以取消 70% 的常规生产工序。

1981 年，休斯实验室用 0.2 μm Au-Si 离子束制作了砷化镓金属半导体场效应管。140keV 的 Si^{++} 离子束经偏转后在计算机控制下注入了 $8 \times 50\mu\text{m}^2$ 的活性沟道区和 $16 \times 50\mu\text{m}^2$ 的接触区^[9]。

用这种技术可制作高密度 MOS、砷化镓和 SOS 集成电路、双极大规模集成电路、埋结场效应管、砷化镓金属半导体场效应管以及磁泡存储器等。

3. 杂质含量不均匀分布的器件

目前采用的曝光、掺杂方法中，掺杂浓度在较大范围内都是比较均匀的，无法控制浓度分布。而微离子束可通过改变扫描速度或重复频率以及改变离子能量使杂质浓度沿一维、二维甚至三维非均匀分布。休斯实验室试制了这种新型器件。他们把 GaAsFET 的沟道区分成 1000 条线，在 425 到 475 及 525 到 575 线，每线扫描 1—50 次不等，形成了线性分布掺杂，使其对数增益栅极电压特性的线性范围扩大到四个量级。

4. 新型器件及微细结构物理学研究

在微电子学领域里，约瑟夫森器件正在崭露头角。1981 年，美国贝尔实验室制成了 10^{-11} 平方英寸 ($\sim 10^{-2}\mu\text{m}^2$) 的约瑟夫森结，一只苍蝇眼内可以容纳 1000 万只超导开关。IBM 已制成约瑟夫森计算机的样机，门速度 10ps，功耗 10 μW ，运算速度比目前商用计算机快 50 倍，耗电降到百分之一。

微离子束工艺适用于制作约瑟夫森器件的超导桥 ($\sim 0.1 \times 0.1 \times 0.05\mu\text{m}$)，工艺将比用微电子束简化。微离子束还可用于研制光波导、集成光路和人造微型脏器。

近年来微细结构物理学颇引人注目。在 100—1000 Å 的微系统中物理和化学现象与宏观状态有很大不同。直径在 300 Å 以下的导线，其电阻不是与长度成正比而是成指数增加，这是量子效应引起的。高压下任何固体或气体都会变成金属，如用一般测量方法去测试样品，测量电极在毫米量级，那么样品至少也是毫米

(下转第 64 页)