

# 激光在半导体电子学中的应用

邱明新 陆世桢

(上海市激光技术研究所)

林成鲁

(中国科学院上海冶金研究所)

激光在半导体电子工业生产中已得到日益广泛的应用,这是激光微加工最集中、最重要的应用领域。所谓激光微加工,系指激光与被加工材料相互作用区大小在亚毫米至亚微米并且相互作用激光能量在毫焦耳范围内的加工。激光微加工的许多技术如激光微调、激光划片、激光标记、激光焊接等等已用于生产线,取得了明显的经济效果。有不少技术还正在深入研究,具有重要的应用前景,如激光再结晶、激光化学气相沉积、激光诱导化学光刻与掺杂等等。特别是半导体集成电路已跨入超大规模集成电路(VLSI)的八十年代,微米乃至亚微米级的微细加工技术已成为电路制造的核心,因此需要更新、更精密的加工工艺和高度自动化的设备。激光微加工将成为 VLSI 制造中必不可少的技术。目前,激光微加工正在向纵深发展:不断提高加工精度、发展亚微米加工技术;使激光加工设备多功能化和智能化;降低激光微加工成本,提高竞争能力等。本文分三部分介绍激光微加工在半导体电子工业生产中的应用。

## 一、激光微调、划片与标记

激光微调,包括微调电阻、电容以及厚、薄膜混合集成电路等,早在 1968 年就开始研究<sup>[1]</sup>,七十年代中期在工业上得到应用。到 1981 年,世界上已有 1000 台以上的激光器在工业生产线上用作微调。激光划硅片也在七十年代就被普遍用于半导体器件的工艺生产线。目前,激光微调的范围已扩展到硅片上电阻的微调,以满足大规模和超大规模集成电路制作的需要。就微调功能来说,已从早期微调单个电阻发展

物理

到功能微调,即模拟实际工作条件,对电路中的电阻或电容进行微调,以使电路参数(如频率、电压、相位、阻抗等)达到预定指标。此外,还用于石英晶体振荡器等的精密微调。它具有刻槽宽度窄、调整精度高、容易实现自动化等优点。

无论是激光微调还是激光划片,都是利用能量高度集中的激光束通过光学透镜聚焦到工件(如厚膜电阻、薄膜电阻、硅片、陶瓷基片等)的表面上。激光焦点的功率密度约  $10^7-10^8\text{W}/\text{cm}^2$ ,聚焦在工件表面时,使金属氧化物——氧化钨或钽膜、镍铬薄膜等局部汽化,或者在硅片上刻槽(见图 1)。

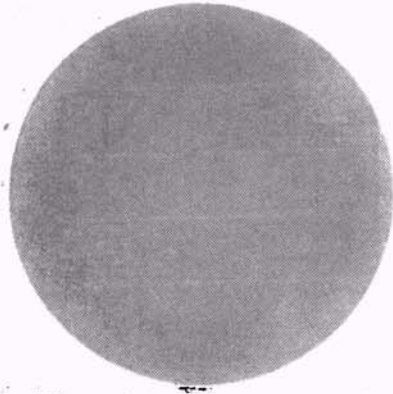


图 1 激光束在硅片上刻槽的照片

激光微调可用 Xe 激光器、CO<sub>2</sub> 激光器、YAG 激光器及倍频 YAG 激光器等。目前较普遍采用的是 YAG 激光,因它的波长短、峰值功率高,设备体积也小。为使聚焦激光束斑更小,可采用倍频 YAG 激光器。刻槽要求激光束具有高重复频率,通常可用连续泵浦的声光调 Q YAG 激光器,这种激光的特点是:聚焦光斑约  $10\mu\text{m}$ ,峰值功率约千瓦级,脉冲时间约数百毫秒到数十毫微秒,重复频率高达几千赫兹至

几十千赫兹，而且开关速度较快等。由于脉冲时间短，热量传到基片上之前激光作用区的材料已被蒸发，因此加工薄膜时不致损伤基底材料。所以，特别适于在硅片上的电阻微调，诸如线性放大器、振荡器、数/模、模/数转换电路的修正以及存贮器电路的连线切断等。而铬硅、镍铬、氮化钽等金属粉做成的薄膜只有几千埃到微米的量级，用几百瓦的峰值功率、脉宽为几十毫微秒的激光束足以烧蚀膜层，而对其周围的电路元件无影响。为保证激光微调速度，要求脉冲重复频率在几百赫兹到几千赫兹。

激光划片要求激光具有更高的峰值功率，划片的平均功率一般为 10—50W，聚焦光斑为 10—50 $\mu\text{m}$ ，Q 开关速度为 5—50kHz。平均功率 10W 时划硅片的槽深为 100 $\mu\text{m}$ ，宽为 15 $\mu\text{m}$ ，移动速度可达 200mm/s。美国量子电子学公司的 604-NC 型激光器采用数控刻划，能按照输入程序进行划片、切割和雕刻各种图形，光斑直径在微米左右，成品率达 98% 以上。激光微调及划片的原理如图 2 所示。

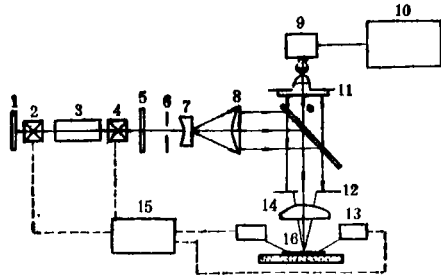


图 2 激光微调 and 划片的原理图

1. 反射镜；2. 机械光闸；3. 透镜；4. Q 开关；5. 半反镜；6. 隙缝；7. 透镜；8. 透镜；9. CTV 摄像机；10. 监视 CTV；11, 12. 隙缝；13. 探针；14. 透镜；15. 电桥及控制器；16. 工件

激光标记是最近几年才发展起来并很快用于生产的一种新技术。这对识别流水线上的基片和元件，监控生产过程和最后的成品标记都是很有用处的。美国已有约 400 个激光系统用于激光标记。激光标记是利用激光能量去融蚀表面敷层或表面材料，用计算机控制形成字码，在以下的生产过程中用 He-Ne 激光来识别这种字码，以便及时地控制生产过程。所用的激

光器有能量为 3J，脉冲宽度为 1ms，重复频率为 25Hz 的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器，或者能量为 mJ，脉冲宽度为 100ns 的连续泵浦 Q 开关 YAG 激光器。

## 二、半导体的激光退火与激光再结晶

自 1977 年以来，为了摸索离子注入半导体的新退火方法，各国学者进行了大量的研究工作。这种努力是从激光退火的研究开始的，到 1979 年，已基本上弄清楚了半导体激光退火的机制。尽管激光退火技术本身的实际应用受到不少限制，可是人们从中得到启发，从不同的角度研究了多种瞬时退火技术，包括用激光束、电子束、离子束、X 射线、闪光灯以及石墨加热器等。新发展的各种退火方法，按照引起半导体材料性质变化的加热周期的长短，可以分为三类<sup>[2]</sup>：

### (1) 绝热退火

例如，以脉冲宽度为数十毫微秒的调 Q 红宝石脉冲激光照射硅，光的吸收层（一般小于 2 $\mu\text{m}$ ）的热扩散损失很少，可以作绝热处理。退火时硅片中温度梯度达  $10^8$ — $10^9\text{K/m}$ ，晶体生长速度通常为 2—6m/s。通过离子注入损伤层的熔化再结晶，可以消除缺陷、激活杂质，但引起了注入杂质的再分布。

### (2) 热流退火

例如，利用连续 Ar<sup>+</sup> 激光对离子注入的硅片进行扫描退火，典型的作用时间是毫秒数量级，样品中深度方向的温度分布是单调降低的，横向的温度分布则取决于光斑面积和热扩散距离。这种方式通常以固相外延再生长来消除损伤，可以保持注入杂质的原来分布，但是在注入区域往往有残余损伤，注入区域的下层有位错环等。

### (3) 等温退火或快速热退火

例如，以大功率连续 CO<sub>2</sub> 激光对硅退火，热扩散距离比样品厚度大得多，样品是被均匀加热的。这种退火方式对硅片的作用时间为数秒，既可以完全消除离子注入层的损伤，又能基

本保持注入杂质的原来分布。近几年,用闪光灯、石墨加热器的快速热退火引起了普遍重视,可望得到实际应用。

激光与半导体材料相互作用的广泛研究,已派生出若干很有生命力的应用项目,其中用激光再结晶的方法进行 SOI (semiconductor on Insulator) 材料与器件的研究已显示出重要的应用前景,并正走向实用化。国内外都很重视这项新技术的开发研究。

SOI 技术就是在绝缘衬底上生长有器件应用价值的半导体材料,这种材料可以制造新型的三维集成电路和抗辐照器件。目前在二维平面内制作的大规模集成电路已逐渐受到微细加工精度的限制,为了跨越二维大规模集成电路的极限,就必须考虑主体结构的电路。三维集成电路就是电路元件呈立体布局的集成电路,它由半导体-绝缘层-半导体……多层构成,穿过绝缘层的互连线连接每层半导体的集成电路。三维集成电路的特征是既可以实现集成电路的超高密度化,又可以实现大量信息的高速处理,还可以将传感、信号转换、存贮等多种功能集成在一块集成电路中。实现三维集成电路的最主要的课题是获得优质的 SOI 材料。此外,SOI 器件具有好的抗辐照能力,它不仅具有蓝宝石上外延硅的 SOS 工艺的一切优点,而且克服了 SOS 工艺费用高及特有的辐照效应等的不足,是一种很有发展前途的抗辐照器件。

制造 SOI 材料与器件的工艺有许多种,其中研究得最早、最多并且在三维集成电路等方面最有实用前景的是激光再结晶的 SOI 技术。通常的做法是:在绝缘层上淀积多晶硅,然后用连续  $Ar^+$  激光束扫描,使快速升温、熔化多晶硅层。在快速冷却再结晶的过程中形成大晶粒多晶硅或单晶硅。透射电子显微镜的分析表明,在激光处理以前,多晶硅的晶粒度为  $200-500 \text{ \AA}$ ,激光再结晶以后,晶粒度长大到  $10 \times 30 \mu\text{m}^2$  以上。为了获得更好的再结晶硅,还可采用单晶硅作子晶,然后用激光辐照多晶硅,使其从子晶开始侧向外延;或者利用整形激光束

(如月牙形、双峰形等)进行再结晶。

激光再结晶以后,多晶硅晶体结构的变化导致了多晶硅电学性质的大大改善。图 3 为热退火与激光再结晶多晶硅在室温下电阻率随掺杂浓度的变化。在低掺杂浓度时,激光再结晶多晶硅的电阻率较热退火多晶硅下降了大约五个数量级,接近图中用虚线标出的单晶硅曲线。激光再结晶多晶硅(SOI 材料)优良的电学性质是制作 SOI 器件的基础。

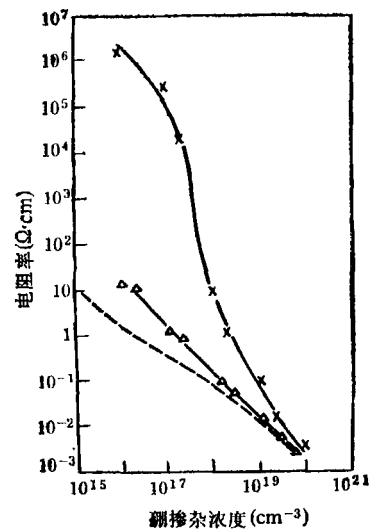


图 3 热退火(x)和激光再结晶(Δ)多晶硅电阻率随掺杂浓度变化的曲线

通过用格林函数形式求解有源热扩散方程<sup>[3]</sup>,可以得到  $Ar^+$  激光辐照硅片时温度场纵向分布(如图 4 所示)。结果表明,在  $Ar^+$  激光束斑  $\phi 40 \mu\text{m}$ ,样品预热  $300^\circ\text{C}$ 、激光功率在  $6\text{W}$  以上时,就能使多晶硅表面温度达到熔点,开始发生相变。而  $SiO_2$  的熔点比硅高得多,所以不会发生熔化。在  $SiO_2$  厚度为  $1 \mu\text{m}$  时,多晶硅表面熔化时  $SiO_2$  与单晶硅界面处温度约为  $830^\circ\text{C}$ 。而在激光扫描速度为  $2\text{cm/s}$  时,激光的作用时间约为  $2\text{ms}$ 。这样短的时间,温升又不高,所以上层多晶硅激光再结晶时对单晶硅衬底的影响是不大的,因此允许制造多层结构的器件。

我们已利用  $Ar^+$  激光再结晶的 SOI 材料

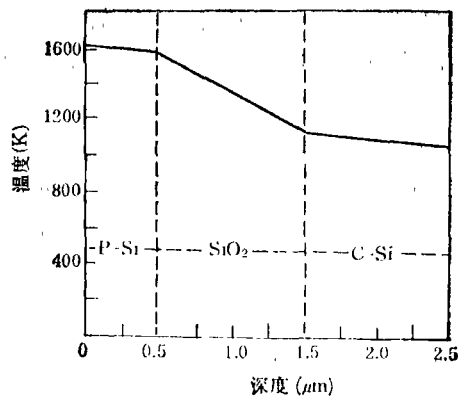


图4 Ar<sup>+</sup>激光辐照多层结构(多晶硅-二氧化硅-单晶硅)样品时升温随深度的分布  
(激光功率 6W, 束斑  $\phi 40\mu\text{m}$ , 样品预热 300°C)

成功地制作了 MOSFET/SOI 与 CMOS/SOI, 单管与集成电路的性能良好, 例如 CMOS/SOI 倒相器比相同尺寸的单晶硅 CMOS 倒相器的速度性能好得多<sup>[4]</sup>. 日本富士通已利用 Ar<sup>+</sup> 激光再结晶的 SOI 技术试制成功有 440 门的 CMOS 门阵列静态随机存取存储器. 美国林肯实验室等已研制成功抗辐照性能优良的 SOI 器件.

利用激光再结晶的 SOI 技术, 还可以得到不同类型的将半导体迭在一起的迭层结构, 为复合功能的集成电路研制提供了可能. 例如, GaAs/SiO<sub>2</sub>/Si, InP/SiO<sub>2</sub>/Si 结构等的 SOI 技术研究均已取得某些进展<sup>[5]</sup>.

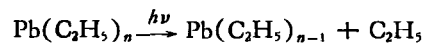
### 三、激光化学气相沉积、光刻和掺杂

自从 1979 年美国林肯实验室 Ehrlich 小组用 Ar<sup>+</sup> 激光倍频沉积 Cd 以来<sup>[6]</sup>, 激光诱导半导体表面微区化学反应的研究非常活跃, 不少新工艺技术已在半导体加工中得到了初步的应用.

#### 1. 激光诱导沉积金属、化合物和半导体

通过利用 Ar<sup>+</sup> 激光倍频 (波长 257.2 nm) 和准分子激光 XeCl (波长 308nm), KrCl (波长 222nm), KrF (波长 248nm) 和 ArF (波长 193nm) 作为光源, 用金属有机化合物蒸气作为光分解的工作气体, 经紫外光分解产生的金属

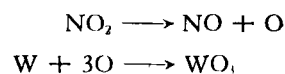
原子沉积在固体表面, 形成一层金属膜, 这一过程被称为激光气相化学沉积. 目前已研究了 Cd, Zn, Mn 等十几种金属和非金属的激光诱导沉积<sup>[7,8]</sup>. 根据分子的键能和紫外光子的能量, 我们对 Pb(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>n</sub> 等分子的分解过程进行了研究. 结果表明, 分解速率与光强成线性关系; 分解过程是一个多步过程:



沉积过程可能是: 表面先吸收一个金属有机化合物的分子层, 在紫外光照射下, 这层分子分离成原子, 吸附在固体表面, 然后再吸收一个分子层的金属有机化合物, 如此循环往复的沉积过程称为表面光分解. 也可能是: 金属有机化合物先在激光焦点的空间分解, 金属原子通过空间扩散而被表面吸附, 这称为空间分解. 实验证明两种过程是同时存在的, 但以空间分解过程为主.

金属原子被固体表面吸附后, 在吸附表面作二维扩散, 互相碰撞, 结合成原子团. 这些原子团成为随后沉积的核, 这一过程称为成核过程. 以后又随着原子团的不断扩大, 形成成片的膜层, 这过程称为成膜过程.

沉积金属化合物需要二种自由基: 金属自由基与非金属自由基. 例如 WO<sub>3</sub> 膜层的沉积中使用了 W(CO)<sub>6</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的混合蒸气. 前者在紫外光作用下产生 W 原子, 后者分解成 O 自由基, 然后两自由基化合生成 WO<sub>3</sub><sup>[9]</sup>:



WO<sub>3</sub> 是光电变色薄膜. 用这种方法还可形成 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜, 磁性薄膜 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 荧光薄膜 PbO 和光电导薄膜 PbS 等. 用类似的方法还可沉积 GaAs 等化合物半导体.

#### 2. 激光诱导化学光刻

激光诱导化学光刻是用紫外激光或可见 Ar<sup>+</sup> 激光在半导体表面扫描, 扫描区上工作气体光分解产生卤素自由基, 这些自由基化学腐蚀半导体表面生成 SiCl<sub>4</sub>, GaCl<sub>3</sub>, AsCl<sub>3</sub> 等, 它们从表面上蒸发, 从而光刻出图形. 所采用的工

作气体通常有  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{Br}$ ,  $\text{CH}_3\text{I}$ ,  $\text{CCl}_4$  和  $\text{XeF}_2$  等。

无论是用紫外激光还是可见  $\text{Ar}^+$  激光, 激光化学光刻均存在一个激光功率密度的阈值, 高于这一数值, 光刻的速率随激光功率密度增大而迅速地增加, 最后达到饱和。可见激光光刻与热效应分不开。激光功率密度足够高时, 晶体受光照射局部熔化, 卤素自由基在半导体熔融区渗透, 使光刻速率加大。使用紫外激光以及  $\text{Cl}_2$  为工作气体时, 在阈值功率密度以下, 自由基腐蚀了表面一层硅, 形成非饱和键卤化物分子, 这些分子蒸气压较低, 被吸附在硅单晶表面, 成为妨碍进一步刻蚀的保护层。紫外激光功率密度提高后, 低蒸气压的非饱和键卤化物分子的键被重新打断, 使新的硅表面暴露, 从而使刻蚀继续进行。对硅片来说, (100)面的刻蚀速率比(111)面的至少要大二个数量级, 这是由于(100)面上原子间距大于(111)面上的, 所以卤素自由基较难扩散进(111)面。但到达功率密度阈值时, (111)面与(100)面光刻速率相同, 这是因为这时二个面均处于熔融状态。

用  $\text{KrF}$  准分子激光代替  $\text{Hg-Xe}$  灯或  $\text{D}_2$  灯对聚甲基丙烯酸 (PMMA) 光刻胶掩膜光刻时, 也发现非线性效应。用  $\text{KrF}$  准分子激光只需用常规光源曝光能量的  $1/50^{[10]}$ 。因此, 用准分子激光仅需很短的曝光时间即可完成光刻, 从而可避免振动、热形变等引起的畸变, 以保证获得细线条, 这在超大规模集成电路的制备中是不可少的。

另外, 还有一种光刻, 称为消熔光刻, 即利用光子的能量将晶体键打断, 使晶格表面原子释放出来, 从而一层一层地剥去。另一种消熔光刻则是热消熔过程, 即由于激光加热引起溅射与蒸发。这些光刻技术都在发展之中, 其目标都是制备亚微米级光刻条纹。

### 3. 激光诱导掺杂与表面净化

激光诱导掺杂实际上存在两个过程: 第一个过程为有机化合物分解并在半导体表面沉积

的过程; 第二个过程为沉积在表面的元素在激光的热作用下, 向半导体表面层扩散(包括液相或固相扩散)的过程。利用激光掺杂可以获得浅结。在适当的激光条件下还可以做到无损伤掺杂, 即是掺杂过程不引起晶格损伤, 从而省去了掺杂后的退火处理。

用激光掺杂来生产硅太阳能电池, 其工艺成本仅为常规方法的五分之一, 每小时可以处理 700 块 4 英寸的硅片, 每块成本为 0.28 美元, 所以有强的商业竞争力。激光掺杂通常使用准分子激光, 也可用 YAG 激光及  $\text{Ar}^+$  激光等。利用准分子激光进行硅光电池的掺杂, 每平方厘米的硅片约需 1J 的能量。

激光以很高的能量加热固体表面, 使固体表面层吸附的原子获得动能离开表面, 称为激光净化。激光净化可以免去在实验室中所采用的超高真空复杂系统。在一般高真空下, 一个激光脉冲作用后的瞬间, 固体表面是清洁的, 在这瞬间可进行表面物理的有关实验。用这一技术也可以除去金属或半导体表面层沾污的杂质, 除去金属或氧化物膜层。通常可用准分子激光, 每平方厘米约需 1—2J 的能量。

### 参 考 文 献

- [1] E. J. Swenson, *Laser & Applications*, 4 (1985), 115.
- [2] J. M. Poate, J. W. Mayer (Ed.), *Laser Annealing of Semiconductors*, Academic Press, (1982) New York.
- [3] 林成鲁、常虹, *微电子学与计算机*, 1(1985), 26.
- [4] 沈宗雍、林成鲁、方芳、邹世昌, *科学通报*, No. 16(1985), 1274.
- [5] Li Xiqiang, Chen Zhihao, Lin Chenglu and Wang Weiyuan, in: *Energy Beam-solid Interactions and Transient Thermal Processing*, Ed. J. C. C. Fan and N. M. Johnson, North-Holland, (1984), 621.
- [6] T. F. Dentsh, R. M. Ehrlich and J. R. Osgood, *Appl. Phys. Lett.*, 35(1979), 175.
- [7] Qiu Mingxin, R. Monot and H. Van den Bergh, *Scientia Sinica, A* 27 (1984), 531.
- [8] M. S. Chiu, Y. G. Tseng and Y. K. Ku, *Opt. Lett.*, 10 (1985), 113.
- [9] 沈光平、周政卓、邱明新, *光学学报*, 5(1985), 89.
- [10] Y. Kawamura, K. Toyoda and S. Namba, *Appl. Phys. Lett.*, 40 (1981), 374.