

高等学校教材

微细加工技术

蒋欣荣 编著

电子工业出版社

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了利用电子束、离子束、光子束(包括激光束、紫外线、远紫外线、X射线)、原子束、分子束、等离子体、超声、微波、化学和电化学等手段,对不同材料进行各种光刻、刻蚀、制膜、掺杂、退火和材料改性以及切割、焊接、打孔等微细加工的原理、方法和工艺过程;同时还介绍了这些微细加工技术在大规模和超大规模集成电路、太阳电池、集成光路、超导器件、声表面波器件以及各种电子零件等领域的广泛应用。这一技术适用于加工尺度在亚毫米到毫微米宽广范围和不同要求的众多微细加工对象。

本书可供电子物理与器件、半导体器件、激光器件、光电器件、电子材料与元器件、材料科学、医用电子学等领域的教师、研究生、高年级本科生以及有关的工程技术人员作教学、科研之用。

微细加工技术

蒋欣荣 编著

责任编辑 吴金生

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

电子工业出版社计算机排版室排版

人民卫生印刷厂印刷

开本:850×1168毫米 1/32 印张:13.125 字数:350千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数:1000册 定价:3.35元

ISBN7-5053-0861-0/TN·302

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

中世纪欧洲的一些经院哲学家们曾为“一个针尖上能站得下多少个天使”的神话争论不休,而今天人类智慧的创造物——超大规模集成电路的芯片中,在一根头发丝粗细般的横截面上,制作了,几十乃至上百个具有一定功能的晶体管电路却是活生生的现实。创造这种奇迹的方法归功于微细加工技术。微细加工技术就是制造加工尺度在亚毫米到毫微米量级的零、器件或薄膜图形的方法,它不仅适用于大规模和超大规模集成电路制造,而且广泛应用于太阳能电池、集成光路、分子电路、超导器件、声表面波器件、磁泡存储器、各种光电器件、医用传感器以及各种电子、精密机械零件等等的加工制造,是现代高、精、尖的技术之一。

本书是根据本人几年来给电子物理与器件等专业的学生讲授《微细加工技术》课程的讲稿整理而成的。本书初稿参加了全国“电子物理与器件”教材招标,承蒙“电子物理与器件”教材编审组的学者、教授给本人提出了大量的修改意见。根据这些宝贵意见和《微细加工技术》教材招标书的要求,在初稿的基础上进行了大幅度的修改,使其成为现在的样子。

《微细加工技术》是一本口径较宽的工艺技术书,包含十分丰富的内容。本书采用首先综合概述,然后进行各种微细加工手段从事各种微细加工目的的详细论述,最后介绍各种微细加工技术综合应用的典型例子这样的思路和次序编写。全书分为十章,第一章为微细加工技术概论,第二章至第九章详细介绍各种微细加工技术,第十章介绍微细加工技术的典型应用。

本书由浙江大学的周文教授任责任编委,东南大学的万玉金副教授任主审。浙江大学的李志能副教授为本书的写作提供了宝贵意见,沈庆垓、周文、陈抗生、储璇雯以及季敬川等专家、教授为本书的写作和修改给予了大量的鼓励、支持和帮助,在此向这些专家、教授以及“电子物理与器件”教材编审组的学者、教授表示衷心

的感谢。限于本人的经验和水平,书中纰漏和谬误在所难免,读者不吝赐教为荷。

蒋欣荣
1989 年于浙江大学

目 录

第一章 微细加工技术概论.....	(1)
§ 1-1 微细加工技术的含义	(1)
一、微细加工技术的加工尺度	(1)
二、微细加工技术包含的内容	(2)
§ 1-2 微细加工技术的应用	(3)
一、微细加工技术在微电子器件制造中的应用	(4)
二、微细加工技术在其它方面的应用	(11)
§ 1-3 发展微细加工技术的意义	(12)
一、微细加工技术促进集成电路的发展	(12)
二、微细加工技术促进新型器件和有关学科的发展	(13)
参考文献	(15)
第二章 光学曝光微细加工技术	(16)
§ 2-1 接触式和非接触式光学曝光技术	(16)
一、接触式光学曝光技术	(16)
二、非接触式光学曝光技术	(19)
§ 2-2 投影式曝光技术	(20)
一、1:1 全反射投影曝光技术	(21)
二、缩小投影曝光技术	(23)
三、掩模缺陷对曝光成品率的影响	(25)
§ 2-3 远紫外光曝光技术	(27)
§ 2-4 光刻成象特性描述	(30)
一、衍射效应	(30)
二、调制传递函数	(31)
三、驻波效应	(34)
§ 2-5 X 射线曝光技术	(36)
一、曝光原理和曝光系统结构	(36)
二、X 射线源	(38)
三、掩模	(44)

四、抗蚀剂	(46)
五、图形位置的对准	(47)
六、X 射线曝光的利弊	(50)
§ 2-6 微细图形曝光中的抗蚀剂	(51)
一、抗蚀剂的特性	(51)
二、对抗蚀剂的要求	(53)
三、抗蚀剂材料	(55)
四、抗蚀剂图形制作工艺	(58)
五、抗蚀剂的掩模作用	(60)
§ 2-7 本章小结	(62)
思考题和习题	(63)
参考文献	(65)
第三章 电子束曝光微细加工技术	(66)
§ 3-1 引言	(66)
一、电子束图形加工的含义	(66)
二、电子束曝光技术的特点	(67)
三、电子束曝光技术的发展和应 用	(69)
§ 3-2 扫描电子束曝光系统原理	(70)
一、模型机工作原理	(70)
二、电子束发射聚焦系统	(74)
三、偏转系统	(78)
四、控制系统	(81)
§ 3-3 电子束曝光机扫描曝光形式	(86)
一、电子光学柱的类型	(86)
二、电子束曝光机的扫描方式	(90)
§ 3-4 电子束投影曝光技术	(93)
一、电子束缩小投影曝光技术	(94)
二、电子束原尺寸投影曝光技术	(96)
思考题和习题	(102)
参考文献	(104)
第四章 离子束及其曝光微细加工技术	(106)
§ 4-1 引言	(106)
一、离子束微细加工技术概述	(106)

二、离子源技术概述	(107)
三、聚焦离子束技术概述	(108)
§ 4-2 等离子体型离子源	(110)
一、对等离子源的要求	(110)
二、等离子源工作原理	(112)
三、引出系统	(114)
§ 4-3 固体表面离子源	(116)
一、表面电离碱离子源	(116)
二、热离子发射源	(117)
三、场致发射离子源	(118)
§ 4-4 液态金属离子源	(119)
一、发射体的类型	(120)
二、LMIS 发射机理	(121)
三、共晶合金 LMIS	(122)
四、电子与离子的混合束源	(123)
五、LMIS 参数和测试	(124)
§ 4-5 聚焦离子束技术	(129)
一、聚焦离子束模型机	(129)
二、质量分析系统	(132)
§ 4-6 离子束曝光技术	(137)
一、扫描离子束曝光技术	(137)
二、投影离子束曝光技术	(138)
三、离子束曝光技术的特点	(142)
四、问题与展望	(144)
附录	(147)
思考题和习题	(153)
参考文献	(156)
第五章 三束微细加工机理	(158)
§ 5-1 光子散射与能量损失	(158)
一、紫外光散射与能量损失	(158)
二、X 射线散射与能量损失	(159)
§ 5-2 电子散射与能量损失	(161)
一、电子与固体的相互作用	(161)

二、电子散射	(163)
三、电子能量损失	(166)
四、曝光与能量转换	(168)
五、能量吸收密度	(170)
六、胶层等能量密度剖面轮廓	(175)
七、邻近效应及其校正方法	(177)
§ 5-3 离子散射与能量损失	(181)
一、离子与固体的相互作用	(181)
二、离子散射与能量损失	(184)
附录	(194)
思考题和习题	(201)
参考文献	(201)
第六章 图形刻蚀微细加工技术	(203)
§ 6-1 湿法刻蚀微细加工	(203)
一、湿法化学刻蚀	(203)
二、湿法电解刻蚀	(206)
§ 6-2 溅射刻蚀基本原理	(207)
一、溅射刻蚀方法	(207)
二、溅射率与入射角的关系	(210)
三、溅射率与离子能量的关系	(211)
四、溅射率与样品材料的关系	(211)
§ 6-3 溅射刻蚀装置	(212)
一、聚焦方式离子束溅射刻蚀	(212)
二、掩模方式离子束溅射刻蚀	(214)
三、离子束溅射刻蚀的优缺点	(219)
§ 6-4 等离子体刻蚀	(222)
一、等离子体刻蚀原理	(222)
二、等离子体刻蚀反应器	(223)
三、几种常用材料的等离子体刻蚀方法	(227)
四、等离子体刻蚀与湿法刻蚀的比较	(231)
五、问题讨论	(232)
§ 6-5 各种刻蚀方法比较	(234)
思考题和习题	(235)

参考文献	(237)
第七章 薄膜制备微细加工技术.....	(239)
§ 7-1 化学气相淀积制膜技术	(240)
一、CVD 技术原理	(240)
二、CVD 的分类	(241)
三、CVD 工艺技术	(242)
四、各种 CVD 技术比较	(247)
§ 7-2 硅的热氧化制膜技术	(247)
一、硅的常压热氧化技术	(248)
二、硅的高压热氧化技术	(248)
三、硅的等离子体氧化技术	(249)
§ 7-3 真空蒸发镀膜技术	(251)
一、真空蒸发原理	(251)
二、真空蒸发镀膜设备	(255)
§ 7-4 离子溅射镀膜技术	(256)
一、基本工作原理	(256)
二、离子溅射镀膜装置	(259)
§ 7-5 离子镀膜技术	(265)
一、离子镀膜原理·直流式离子镀膜	(265)
二、射频式离子镀膜	(267)
三、离化团束外延技术	(269)
§ 7-6 分子束外延技术	(270)
一、发展状况	(270)
二、MBE 工艺	(271)
三、工艺特点	(272)
四、工艺应用	(274)
§ 7-7 离子注入成膜技术	(276)
思考题和习题	(277)
参考文献	(277)
第八章 杂质掺入微细加工技术.....	(279)
§ 8-1 扩散掺杂技术	(279)
一、扩散机制	(279)
二、扩散方程	(281)

三、扩散方法	(283)
§ 8-2 中子嬗变掺杂(NTD)技术	(283)
§ 8-3 离子注入掺杂技术	(284)
一、离子注入装置	(284)
二、注入离子的浓度分布	(287)
三、离子注入技术的特点	(296)
§ 8-4 单晶体中的沟道效应	(297)
§ 8-5 离子注入损伤与退火技术	(300)
一、注入损伤	(301)
二、热退火效应	(306)
§ 8-6 化合物半导体中的离子注入和退火	(311)
一、化合物半导体	(312)
二、注入损伤及其退火特性	(312)
§ 8-7 反冲注入掺杂	(316)
思考题和习题	(318)
参考文献	(319)
第九章 其它微细加工技术	(320)
§ 9-1 激光微细加工技术	(320)
一、概述	(320)
二、激光热加工技术	(321)
三、激光化学加工技术	(326)
四、激光干涉定位技术	(328)
五、激光退火技术	(330)
§ 9-2 电子束热微细加工技术	(336)
一、电子束微细加工技术概述	(336)
二、电子束热加工方法	(338)
三、电子束热加工实例	(341)
§ 9-3 超声微细加工技术	(344)
一、超声微细加工原理	(344)
二、超声微细加工实例	(346)
§ 9-4 微波微细加工技术	(348)
§ 9-5 电化学微细加工技术	(350)
一、电解微细加工	(350)

二、电解磨削微细加工	(352)
三、电解抛光微细加工	(353)
四、电铸微细加工	(355)
参考文献	(356)
第十章 微细加工技术的应用	(357)
§ 10-1 微细加工技术在光刻掩模制造中的应用	(357)
一、光刻掩模制造工艺	(357)
二、计算机辅助制版	(359)
§ 10-2 微细加工技术在集成电路制造中的应用	(368)
一、集成电路制造工艺及其设备	(368)
二、组装微细加工技术	(372)
§ 10-3 微细加工技术在太阳电池制造中的应用	(375)
一、太阳电池构造及其工作原理	(375)
二、硅太阳电池制造工艺	(377)
§ 10-4 微细加工技术在新型器件制造中的应用	(380)
一、声表面波器件中的微细加工	(381)
二、集成光路中的微细加工	(383)
三、超导器件中的微细加工	(386)
四、磁泡存贮器中的微细加工	(388)
§ 10-5 微细加工技术在多层系统中的应用	(389)
一、多层系统概述	(389)
二、微细加工技术在多层系统中的应用	(390)
§ 10-6 微细加工技术的其它应用	(395)
一、离子注入材料改性技术	(395)
二、常见电子零部件的微细加工技术	(396)
§ 10-7 几个与微细加工技术有关的问题	(398)
一、微细加工中的检测分析	(398)
二、微细加工中的超纯材料	(400)
三、微细加工中的超净制作环境	(403)
参考文献	(405)

第一章 微细加工技术概论

§ 1-1 微细加工技术的含义

一、微细加工技术的加工尺度

微细加工技术是一种制造微小尺寸零器件或薄膜图形的方法,加工尺度从亚毫米到毫微米量级,而加工单位则从微米到原子或分子线度量级($\text{\AA}$ 级)。这种划分方法的依据是什么呢?

首先,我们以机械切削为例来讨论微细加工的上限尺度。假定用软钢材料切削一根直径为 0.1mm ,精度为 0.01mm 的轴零件。实际加工中,对于给定的要求,车刀只允许能产生 $0.01\text{mm}(10\mu\text{m})$ 切屑的吃刀深度;而且在对上述零件进行最后精车时,吃刀深度要更小。由于软钢是由很多晶粒组成的,晶粒的大小为数微米,这样,直径为 0.1mm 就意味着在整个直径上所排列的晶粒只有 20 个左右。如果吃刀深度小于晶粒直径时,那么,切削就得在晶粒内进行,这时就要把晶粒作为一个一个的不连续体来进行切削了。在这一点上,如果是加工较大尺度的零件,那么,吃刀深度可以大于晶粒线度,切削不必在晶粒中进行,可以把被加工体看成是连续体。这就反映了加工尺度在亚毫米、加工单位在数微米的加工方法与常规加工方法的微观机理是截然不同的。另外,我们还可以从切削时车刀所受的阻力的大小来分析微细切削加工和常规切削加工的明显差别。当进行吃刀深度为 $1\mu\text{m}$ 以下的磨削加工时,单位面积所受的切削阻力极大,约为 $1300\text{kg}/\text{mm}^2$,接近于软钢的理论剪切强度 $G/2\pi \approx 1400\text{kg}/\text{mm}^2$ (G 为剪切弹性模量 $\approx 8.3 \times 10^3\text{kg}/\text{mm}^2$);而当进行吃刀深度为 $50\mu\text{m}$ 左右的铣削加工时,其单位面积的切削阻力则下降为 $100\text{kg}/\text{mm}^2$ 左右;当吃刀深度为 0.1mm 以上的普通车削加工时,则会降低到 $20 \sim 30\text{kg}/\text{mm}^2$ 。因此,当切削单

位从数微米缩小到一微米以下时,车刀的尖端会受到很大的应力作用,使得单位面积上会产生很大的热量,导致车刀的尖端局部区域上升到极高的温度。这就是越是采用微小的加工单位进行切削,就越要求采用耐热性高、耐磨性强、高温硬度和高温强度都好的车刀的依据。

然后,我们以溅射去除或镀膜加工为例来讨论微细加工的下限尺度。例如,超导隧道结的绝缘层只有 $10\text{ \AA}$ (1 毫微米 , 1 nm) 左右厚。要制备这种超薄层的材料,只能用分子束外延等方法在基底(或衬底、基片等,以后表示同一意思)上通过一个原子层(或分子层)一个原子层地以原子或分子线度($\text{\AA}$ 级)为加工单位逐渐淀积,才能获得毫微米加工尺度的超薄层。再如,利用离子束溅射刻蚀的微细加工方法,可以把材料一个原子层(或分子层)一个原子层地剥离下来,实现去除加工。这里,加工单位也是原子或分子线度量级,也可以进行毫微米尺度的加工。这种数量级的加工恐怕可以作为对材料进行微细加工尺度的极限了吧。因此,要进行 1 nm 的精度和微细度的加工,就需要用比它小一个数量级的尺寸作为加工单位,即要用 0.1 nm 的加工方法进行加工。这就明确告诉我们必须把原子、分子作为加工单位。

至于微细加工的能量范围,由于各种微细加工机理和加工形式的巨大差异,所以这里不能简单地加以概述,在以后介绍各种微细加工方法时将会述及这个问题。

二、微细加工技术包含的内容

微细加工方法很多,因此,微细加工技术包含丰富的内容。尽管微细加工方法千变万化,但是从最终的加工结果来看,可以归结为三类微细加工形式:即,分离加工——将材料的某一部分分离出来,如分解、蒸发、溅射、切削、破碎等加工;接合加工——一种材料与另一种(或同一种)材料的附加加工或相互结合加工,如蒸镀、淀积、掺入、生长、粘结等;变形加工——材料形状发生变化的加工,如塑性变形、流体变形等。表 1-1 列出微细加工包

含的内容和加工单位。

表 1-1 微细加工技术的内容和加工单位

加工形式	加工机理	加工方法	加工单位 (μm)
分离加工 (切削加工)	化学分解(气体、液体、固体)	曝光、化学抛光、机械化学抛光	0.001~0.01
	电解(液体)	电解抛光、电解加工	0.001~0.01
	蒸发(热式)(真空、气体)	电子束加工、激光加工、热射线加工	0.001~0.01
	扩散分离(热式)(固体)	扩散去除加工	0.001~0.01
	熔解分离(热式)(液体)	熔化去除加工	0.001~0.01
	溅射(力学式)(真空)	离子溅射刻蚀	0.001
	机械剪切(切削、磨削)	刀具切、刨、磨、锉等	大于 10
接合加工 (附加结合)	化学粘着	化学镀、气相镀	0.001
	化学结合	氧化、氮化	0.001
	电化学粘着	电镀、电铸	0.001
	电化学结合	阳极氧化	0.001
	热粘着、热结合	蒸镀、晶体生长、分子束外延	0.001~0.01
	扩散结合(热式)	烧结、掺杂、渗碳	0.001
	熔化结合(热式)	浸镀、熔化镀	0.001~10
	物理粘着结合(力学式)	溅射淀积、离子镀膜	0.001
变形加工	注入(力学式)	离子注入加工	0.001
	热表面流动	热流动加工(气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光)	0.001
	粘滞性流动(力学式)	液体、气体流动加工	0.001
	磨擦流动(力学式)	微粒子流动加工	0.001
	塑性变形	电磁成形、放电、悬臂弯曲、拉伸、滚轧、挤压、锻造等	10

§ 1-2 微细加工技术的应用

微细加工技术最典型的应用就是大规模和超大规模集成电路的加工制造。正因为借助这种微细加工技术,使得众多的微电子器件和技术蓬勃兴起,并在科学研究、生产实践和日常生活中创造了无数的人间奇迹,给人类带来了信息社会的文明,所以,才赋予了微细加工技术更广的内容、更高的要求 and 更重要的使命。此外,微细加工技术还在特种新型器件、电子零件和电子装置、机械零件和

机械装置、表面分析、材料改性等方面发挥日益重要的作用。

一、微细加工技术在微电子器件制造中的应用

在大规模和超大规模集成电路制造过程中,从制备晶片和掩模开始,经历多次氧化、光刻(曝光)、刻蚀、外延、注入(或扩散)等复杂工序,到划片、引线焊接、封装、测检等一系列工艺直至最后得到成品,几乎每道工序都要采用微细加工技术。因此,微细加工技术在这里得到了最全面的应用。由于以后讨论各种微细加工技术时,多以集成电路的微细加工为例,因此下面首先介绍微电子器件的概念,然后分析微细加工技术在其制造中之应用。

1. 集成微电子器件的概念

自本世纪初真空电子管发明以来,电子器件已经经历了五代的发展过程。正是由于电子器件一代接一代的更新和发展,才引起了无线电设备一次又一次的变革和进步,才谱写了一篇又一篇电子学的新篇章。

第一代电子器件是由 1904 年佛莱铭发明的真空二极管和 1907 年德·福雷斯特发明的真空三极管(两者统称为电子管)开始的。第二代电子器件则是从 1948 年巴丁·布莱廷等人发明的晶体管开始的。1958 年,人们打破了半个世纪以来电子线路的旧概念,发明了世界上第一块集成电路(IC),开创了集成电子学的新时代。这块集成电路是一个相移振荡器电路。1958 年到 1967 年,前后十年的集成电路的发展产生了第三代电子器件产品,即小规模集成电路(SSI)。到了 1967 年,人们研制成功了在一块米粒般大小的硅晶片上包含了一千多个晶体管的大规模集成电路(LSI),1977 年美国人在一块面积为 30mm^2 的硅晶片上集成了十三万多个晶体管,制成了超大规模集成电路(VLSI)。因此,人们把 1967 年和 1977 年问世的大规模集成电路和超大规模集成电路分别叫做第四代和第五代电子产品。

一般认为,LSI 系指单块芯片上具有 $10^3 \sim 10^5$ 个元件或者具有 $10^2 \sim 5 \times 10^3$ 个等效逻辑门的集成电路;VLSI 系指元件超过 10^5

个或者等效逻辑门高于 5×10^3 个的集成电路。这种划分方法是依据早期中小规模集成电路的划分方法。大约 10 个元件可以组成一个完整的双极型逻辑门；中小规模集成电路大多数都是逻辑门电路。因此，早期人们将包含 10 个逻辑门或者 100 个元件以下的集成电路称为小规模集成电路 SSI，将芯片上包含有 10~100 个逻辑门或者 100~1000 个元件的集成电路称为中规模集成电路 MSI。等效逻辑门的概念是在 LSI 和 VLSI 发展起来之后提出的，因为这时的集成电路功能复杂，除基本逻辑门之外还有其它形式的电路。所谓等效逻辑门，就是指其元件数目或功能等效于基本逻辑门的单元电路。

其实，仅仅从门数或元件数来规定 LSI 和 VLSI 是不够的。所以，后来人们又考虑到 VLSI 的性能和应用特点，以及制作技术的难易程度，对超高速集成电路另行规定了标准，即凡是超过 10^3 个门的单片超高速电路（单个门的传输延迟时间小于 1ns）也算作 VLSI。

2. LSI 和 VLSI 的发展趋势

七十年代和八十年代是 LSI 和 VLSI 日新月异地发展的年代，这种出乎人们预料的发展目前仍方兴未艾，其发展趋势主要表现在如下几个方面。

(1) 集成度不断提高。

图 1-1 表示 MOS 存储器和中央处理器 (CPU) 的集成度逐年变化的情况。以存储器为例，其集成度大约以每年翻一番的速度提高。由于集成度的迅速提高，容量大的存储器，运算速度快的 CPU 源源不断地研制出来、投放市场。

单位芯片面积上集成度的提高，通常从两个方面来努力。其一是电路线宽大幅度的缩小，其二是电路结构和其它工艺技术的改进。图 1-2 表示平均最小线宽逐年变化的情况。可以看出，最小线宽大约从 1970 年的 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 发展到 1980 年的 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ ，即在十年内缩小了 4 倍。与此对应，电路单元面积与线宽的平方成比例，亦即缩小了 16 倍。目前，线宽 $1 \mu\text{m}$ 左右的集成电路已经出现，例