先进制造技术概述

0引言

由于全球化，世界各地的公司都在价格、质量、可靠性和产品交付方面展开竞争。许多大公司已采用先进制造技术(*Advanced Manufacturing Technology*，简称为*AMT*)来提高效率和绩效；然而，他们继续面临全球市场的高水平竞争和僵化，这已经影响到许多组织方面[1]。因此，需要新技术来帮助组织满足客户需求和全球市场要求。先进的制造技术已证明对许多行业有益，包括发展中国家和发达国家的行业。在大多数发达国家，*AMT*已经与工业4.0的融合应用。在发达国家成功实施*AMT*既有优势也有劣势；发展中国家可以利用这些知识并将其应用于自己的国家，以在制造业中建立更好的生产流程。

*AMT*是指微电子技术、自动化技术、信息技术等先进技术给传统制造技术带来的种种变化与新型系统。具体地说，就是指集机械工程技术、电子技术、自动化技术、信息技术等多种技术为一体所产生的技术、设备和系统的总称。主要包括：计算机辅助设(*CAD*)、计算机辅助制造(*CAM*)、集成制造系统(*CAMS*)等。*AMT*是制造业企业取得竞争优势的必要条件之一，但并非充分条件，其优势还有赖于能充分发挥技术威力的组织管理，有赖于技术、管理和人力资源的有机协调和融合。

1.微纳制造技术及其应用——史铁林教授

1.1微纳制造技术简介

微纳技术通常指纳米/微米级的材料、设计、制造、测量、控制和产品的技术[2]。微纳制造作为微纳技术中的重要一环，受到各国研究人员的重视，近些年来获得快速发展，为微纳技术在国防军工和民用产品领域应用提供前提。至此，全球迈入纳米时代，开始从微尺度和纳尺度认识和改造世界。

微纳制造技术是指制造微米、纳米量级的三维结构、器件和系统的技术。这种技术涉及很多方面，如微纳级精度和表面形貌的测量，微纳级表面机械、物理、化学性能的检测，微纳级精度的加工和微纳级表层的加工原子和分子的去除、搬迁、重组，纳米级微传感器和控制技术，微型机械电子系统，纳米生物学等。微纳结构制造技术是微纳科技走向应用的瓶颈所在，当代微纳结构制造技术大致遵循以下几条技术路线发展：服务于微电子生产的硅微加工技术，包括硅体加工和硅表面加工；非硅超精密特种加工技术；以德国为代表的*LIGA*技术及准*LIGA*技术；隧道式近场放电加工、生物加工等纳系统制造方法。

包括微制造和纳制造两个方面。

(1)微制造有两种不同的微制造工艺方式，一种是基于半导体制造工艺的光刻技术、*LIGA*技术、键合技术、封装技术等，这些工艺技术方法较为成熟，但普遍存在加工材料单一、加工设备昂贵等问题，且只能加工结构简单的二维或准三维微机械零件，无法进行复杂的三维微机械零件的加工;另一种是机械微加工，是指采用机械加工、特种加工及其他成形技术等传统加工技术形成的微加工技术，可进行三维复杂曲面零件的加工，加工材料

不受限制，包括微细磨削、微细车削、微细铣削、微细钻削、微冲压、微成形等。

(2)纳制造是指具有特定功能的纳米尺度的结构、器件和系统的制造技术，主要分为两种方向，一种以微制造为基础向其制造精度的极限逼近，达到纳米加工的能力，另一种采用新物理效应对纳米量级进行操控制造，纳米制造包括纳米压印技术、刻划技术、原子操纵技术等。

1.2微纳制造技术应用

由于微纳制造技术有体积小、重量轻、集成度高、可靠性高、智能化程度高等优点，在信息科学、生物医疗、航空航天、工程材料等领域广泛的应用[3]。在生物医疗领域，医生可以利用微系统进行视网膜手术、发现并去除癌细胞、修补受损血管等，为人类征服绝症带来了希望[4]。航空航天领域内出现的皮卫星、纳卫星和微型飞行器大大减小了传统飞行器的体积和质量，使其成本低廉，发射方便。纳米材料的出现对人类的衣食住行都会产生不同程度的影响。例如，在纺织和化纤制品中添加纳米微粒，可以除味杀菌；玻璃和瓷砖表面涂上纳米薄层，可以制成自洁玻璃和自洁瓷砖。利用微纳制造技术制造的各种微传感器和微加速器在各行业都有应用。

2.大规模集成电路工艺及装备——陈蓉教授

2.1集成电路简介

集成电路(*integrated circuit*，*IC*)、或称微电路(*microcircuit*)、微芯片(*microchip*)、芯片(*chip*)，在电子学中是一种把电路(主要包括半导体设备，也包括被动组件等)小型化的方式，并通常制造在半导体晶圆表面上[5]。这种将电路制造在半导体芯片表面上的集成电路又称薄膜(*thin*－*film*)集成电路。另有一种厚膜(*thick*－*film*)混成集成电路(*hybrid integrated circuit*)是由独立半导体设备和被动组件，集成到衬底或线路板所构成的小型化电路。本文是关于单片(*monolithic*)集成电路，即薄膜集成电路。

2.2大规模集成电路工艺

下图是一个典型的*PNP*三极管示意图，本质上*P*与*N*的材质是一样的(硅)，只是掺杂了不同的杂质改变了其电特性(二极管、三极管就是这么制造的)。所以有没有办法在一片硅上面按需求“做”出*P*结、*N*结，而后用“线路”将各*P*结和*N*结连接成电路，只要前期规划做好，数量庞大的三极管、二极管、线路就可以集成到一个硅片上了。

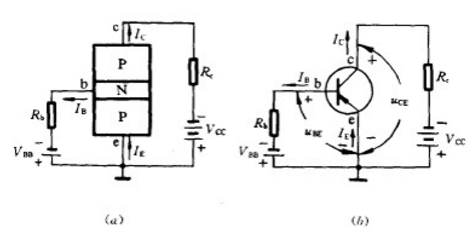


图1.*PNP*三极管示意图

*mos*管是金属(*metal*)、氧化物(*oxide*)、半导体(*semiconductor*)场效应晶体管，名字复杂其实本质就是由金属、氧化物、半导体组成的元器件。前面说到要将三极管、二极管、线路集成到硅片上，其中*MOS*管中的“半导体”就是*P*结或*N*结，用来组成三极管或二极管。“金属”就是连接各结的线路，“氧化物”就是各结间用以绝缘的隔离层。简单点说，集成电路就是在硅片上制造了很多的半导体(*PN*结)、金属(线路)、氧化物(绝缘层)，这些半导体、金属、氧化物组成的器件我们称之为*MOS*管，无数*MOS*管按逻辑电路进行组合就是所谓的集成电路了。

工艺上的步骤有[6]：

1)切割：将工厂生产的硅锭切割成片；

2)影印：在硅片上涂一层光阻物质(想象成防护膜)，然后按设计要求溶解部分光阻物质(让部分区域露出来)。工艺上是在紫外灯上面加一层有很多孔的遮罩，被紫外灯照射的光阻物质就溶解了，没有照射的地方还有保护。如下图所示，通过影印将部分光阻清除，露出部分硅片。

3)刻蚀：露出该露的、遮住该遮的部分后，就使用刻蚀技术将没被遮住的区域“蚀”出一个沟。

4)掺杂：有了沟之后就使用原子轰击这个“沟”使其掺入杂质形成*P*型衬底。

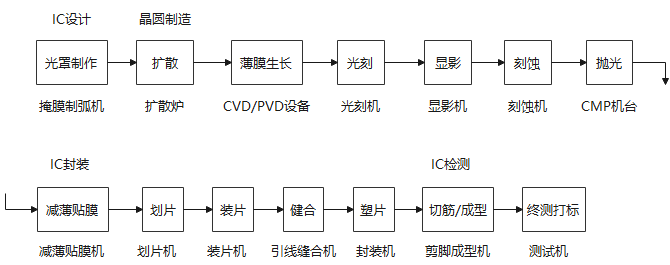
5)沉积：接着在*P*型衬底上沉积一层*N*型硅。

2.4 *LSI*装备

集成电路产业一直遵循“一代装备，一代工艺，一代产品”的模式发展。正因为如此，集成电路制造与检测设备成为了产业技术升级和发展的先导与核心。

集成电路制造往往需要经过上千个工艺步骤才能完成，每个工艺步骤都要依赖特定设备的加工处理才能实现。制造与检测设备是集成电路的核心技术及工艺载体，是产业发展的基础，集人类超精细加工技术之大成，代表着当今世界微细制造的最高水平[7]。芯片集成度的不断提高，不仅使芯片内在结构和生产工艺不断创新，对生产工艺赖以实现的设备技术也提出了新的需求。目前，许多加工技术的精度已经趋近于物理极限，使得集成电路制造设备的性能要求越来越高，先进设备的研发也更具有挑战性。

集成电路专用设备主要分为：1)硅片制造与加工设备；2)掩膜制造设备；3)光刻设备；4)扩散及离子注入设备；5)薄膜生长设备；6)等离子体刻蚀设备；7)湿法设备；8)工艺检测设备；9)组装与封测设备；10)集成电路测试设备；11)生产线其他相关设备。



3.现代优化方法及其在现在设计制造中的应用——高亮教授

现代优化算法包括禁忌搜索(*tabu search*)、模拟退火(*simulated annealing*)、遗传算法(*genetic algorithms*)、神经网络(*neural networks*)和拉格朗日松弛等算法[8]。这些算法涉及生物进化、人工智能、数学和物理科学、神经系统和统计力学等概念，都是以一定的直观基础而构造的算法，我们称之为启发式算法。启发式算法的兴起与计算复杂性理论的形成有密切的联系[9,10]。当人们不满足常规算法求解复杂问题时，现代优化算法开始体现其作用。现代优化算法自80年代初兴起，至今发展迅速。

3.1组合优化问题

组合最优化(*combinatorial optimization*)是通过对数学方法的研究去寻找离散事件的最优编排、分组、次序或筛选等，是运筹学(*operations research*)中的一个经典且重要的分支，所研究的问题涉及信息技术、经济管理、工业工程、交通运输、通信网络等诸多领域.该问题可用数学模型描述为：





其中，*f*(*x*)为目标函数，*g*(*x*)为约束函数，*x*为决策变量，*D*表示有限个点组成的集合。

一个组合最优化问题可用三参数(*D*，*F*，*f*)表示，其中*D*表示决策变量的定义域，*F*表示可行解区域，*F*中的任何一个元素称为该问题的可行解，*f*表示目标函数。满足的可行解，被称为该问题的最优解。组合最优化的特点是可行解集合为有限点集.由直观可知，只要将*D*中有限个点逐一判别是否满足*g*(*x*)的约束和比较目标值的大小，该问题的最优解一定存在和可以得到.因为现实生活中的大量优化问题是从有限个状态中选取最好的，所以大量的实际优化问题是组合最优化问题。

约束机器排序问题(*capacitated machine scheduling*)

*n*个加工量为的产品在一台机器上加工，机器在第*t*个时段的工作能力为，求完成所有产品加工的最少时段数.它的数学模型为









其中，，*T*为决策变量，表示第*t*时段加工产品*i*.要求加工所用的时段数最少，表示产品*i*一定在某一个时段加工，表示每个时段的加工量不超过能力的限制.

3.2启发式算法

启发式算法(*heuristic* *algorithm*)是相对于最优算法提出的。一个问题的最优算法求得该问题每个实例的最优解。启发式算法可以这样定义：一个基于直观或经验构造的算法，在可接受的花费(指计算时间、占用空间等)下给出待解决组合优化问题每一个实例的一个可行解，该可行解与最优解的偏离程度不一定事先可以预计。另一种定义为：启发式算法是一种技术。这种技术使得在可接受的计算费用内去寻找最好的解，但不一定能保证所得解的可行性和最优性，甚至在多数情况下，无法阐述所得解同最优解的近似程度。

启发式算法概念定义的算法集合包含了近似算法概念定义的算法集合。近似算法强调给出算法最坏情况的误差界限，而启发式算法不需考虑偏差程度。由于很多组合优化问题算法的最坏情况误差界估计需要很强的数学基础和较强的技巧，甚至一些问题很难或无法给出最坏情况误差界，而实际问题又迫切需要求解的方法，因此，只能通过启发式算法解决问题。

分类：

1)一步算法

该算法的特点是：不在两个可行解之间选择，在未终止的迭代中，有可能不是一个可行解，算法结束时得到一个可行解。一步算法的一个典型实例是背包问题的贪婪算法。每一步迭代选一物品入包，直到无法再装。该算法没有在两个可行解之间比较选择，算法结束时得到一可行解。

2)改进算法

改进算法的迭代过程是从一个可行解到另一个可行解，通常通过两个解的比较而选择好的解，进而作为新的起点进行新的迭代，直到满足一定的要求为止。因此，也可以称之为迭代算法。

3)数学规划算法

数学规划算法主要指用线性规划的方法求解组合优化问题，其中包括一些启发式规则。这一类方法中，典型的是线性规划及对偶理论在网络流中的应用，产生标号算法等一系列最优算法；其次是基于整数规划分支定界的启发式算法，只搜索一些特殊分支，或是基于整数规划的割平面法，产生的考虑部分割平面的算法。

4)解空间松弛算法

一类方法是线性规划松弛。这类方法的主要步骤是先将整数规划问题*IP*：



松弛为线性规划*LP*：



通过*LP*可以得到*IP*的一个下界，*LP*是多项式可解问题，但*LP*的解不一定是*IP*的可行解。于是，解空间松弛算法的第二步是如何将*LP*的解转化为*IP*的可行解，如四舍五入法，取上整数、下整数等。

拉格朗日(*Lagrange*)松弛法。拉格朗日松弛法主要用于求解下面这样的组合最优化问题*IP*：









如果没有这些约束，*IP*问题是一个多项式时间问题，有这些约束，*IP*为*NP*-*hard*问题。通常称为难约束。这类方法的主要步骤分三个阶段。第一阶段是先将整数规划问题*IP*松弛为拉格朗日松弛问题*LR*：







的存在使得问题*IP*成为*NP*-*hard*问题.松弛约束后，*IP*成为一个易解的问题.松弛后，*IP*的解空间扩大，于是将以罚函数的形式在*LR*的体现，不至于得到的解使的不可行性过大。在这一阶段中，提供了*IP*的一个下界。

第二阶段是求*IP*对偶问题的解，即



通过第二阶段的求解，得到的解*x*和λ，且有。从理论上可以讨论*z*同、*z*同、同等的差距。第三个阶段将第二阶段所得解的可行化，使之成为*IP*的可行解。

5)现代优化方法

现代优化算法是80年代初兴起的启发式算法。这些算法包括禁忌搜索(*tabu* *search*)，模拟退火(*simulated* *annealing*)，遗传算法(*genetic* *algorithms*)，人工神经网络(*neural* *networks*)。它们主要用于解决大量的实际应用问题。目前，这些算法在理论和实际应用方面都得到了较大的发展。无论这些算法是怎样产生的，它们有一个共同的目标——求*NP*-*hard*组合优化问题的全局最优解。虽说有这样的目标，但*NP*-*hard*理论限制它们只能以启发式的算法去求解实际问题。

6)其他方法

启发式方法包含的类型很多，有些方法是根据实际问题而产生。如解空间分解、解空间的限制等。另一类算法是集成算法，这些算法是诸多启发式算法的合成。

4.柔性电子制造技术与应用——尹周平教授

随着时代的发展，柔性技术应运而生。柔性电子英文名为*Flexible* *Electronics*，是一种技术的通称。这种电子设备在一定范围的形变（弯曲、折叠、扭转、压缩或拉伸）条件下仍可工作。柔性电子技术有可能带来一场电子技术革命，引起全世界的广泛关注并得到了迅速发展。美国《科学》杂志将有机电子技术进展列为2000年世界十大科技成果之一，与人类基因组草图、生物克隆技术等重大发现并列。柔性电子可概括为是将有机/无机材料电子器件制作在柔性/可延性塑料或薄金属基板上的新兴电子技术，以其独特的柔性、延展性以及高效、低成本制造工艺，在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛的应用前景，如柔性电子显示器、有机发光二极管*OLED*、印刷*RFID*、薄膜太阳能电池板等。与传统*IC*技术一样，制造工艺和装备也是柔性电子技术发展的主要驱动力。柔性电子制造技术水平指标包括芯片特征尺寸和基板面积大小，其关键是如何在更大幅面的基板上以更低的成本制造出特征尺寸更小的柔性电子器件。目前，柔性电子在体温和心电监测方面，都已实现将技术产品化，未来在医疗领域，柔性电子的应用将越来越广泛。

5.总结

18世纪中叶，随着蒸汽机的发展，英国开始了工业革命，由于电力的商业化，19世纪早期出现了大规模生产系统，20世纪末，随着信息和通信技术(*ICT*)的发展和自动化系统的引入，制造业已经取得了可能被称为革命性的创新进展[11]。制造业的目标是，通过与尖端*ICT*技术的融合，提高竞争力，确保新的增长动力。智能制造是制造业的第四次革命，也被认为是一种新的范式，是尖端技术的集合，通过引入各种*ICT*技术并与现有制造技术融合，支持有效和准确的实时工程决策。为了实现智能制造，从*CPS*、云制造、大数据分析、物联网、智能传感器到增材制造、节能、全息图等各个领域的先进技术正在开发并应用于制造现场。实现智能制造最重要的问题是技术上的互操作性，以及技术本身的发展和开发集成技术的必要性，以及战略上支持技术开发和应用的系统，根据目的、水平、以及开发和引进实用技术的应用步骤。智能制造的实现，不仅适用于一些流程和工厂，也适用于整个企业或供应链，未来将有可能确认其各种效果。

参考文献：

[1] Sukathong S, Suksawang P, Naenna T.Analyzing the importance of critical success factors for the adoption of advanced manufacturing technologies[J].International Journal of Engineering Business Management,2021, 13.

[2] Li Y, Hong M H.Parallel Laser Micro/Nano-Processing for Functional Device Fabrication[J].Laser & Photonics Reviews,2020, 14 (3): 17.

[3] Tiwari N, Santhiya D, Sharma J G.Microbial remediation of micro-nano plastics: Current knowledge and future trends[J].Environmental Pollution,2020, 265 (PT A): 10.

[4] Ahmed J, Gultekinoglu M, Edirisinghe M.Bacterial cellulose micro-nano fibres for wound healing applications[J].Biotechnology Advances,2020, 41: 14.

[5] Sharma T, Wang J Q, Kaushik B K, et al.Review of Recent Progress on Silicon Nitride-Based Photonic Integrated Circuits[J].Ieee Access,2020, 8: 195436-195446.

[6] Das S, Sebastian A, Pop E, et al.Transistors based on two-dimensional materials for future integrated circuits[J].Nature Electronics,2021, 4 (11): 786-799.

[7] Hao Y, Xiang S, Han G, et al.Recent progress of integrated circuits and optoelectronic chips[J].Science China Information Sciences,2021, 64 (10).

[8] Li B H, Hou B C, Yu W T, et al.Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review[J].Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2017, 18 (1): 86-96.

[9] Li Y, Li X, Gao L, et al.A discrete artificial bee colony algorithm for distributed hybrid flowshop scheduling problem with sequence-dependent setup times[J].INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH,2021, 59 (13): 3880-3899.

[10] Pan Q-K, Gao L, Li X-Y, et al.Effective constructive heuristics and meta-heuristics for the distributed assembly permutation flowshop scheduling problem[J].APPLIED SOFT COMPUTING,2019, 81.

[11] Kang H S, Lee J Y, Choi S, et al.Smart Manufacturing: Past Research, Present Findings, and Future Directions[J].International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology,2016, 3 (1): 111-128.