

·学科进展与展望·

# 先进电子制造中的重要科学问题

雷源忠\* 雒建斌† 丁汉‡ 钟振\*

(\* 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,北京 100085;

† 清华大学摩擦学国家重点实验室,北京 100084;

‡ 上海交通大学机械工程学院,上海 200030;※ 中南大学机电工程学院,长沙 410083)

**[摘要]** 电子信息产业是关系国家利益和安全的基础性和战略性产业。成为先进电子制造(AEM)强国是我国21世纪发展的战略目标,实现这一目标的关键是必须能自主地提供电子产业的AEM工艺、技术和装备。电子业的迅速发展,对制造装备的极限制造能力提出了严峻的挑战。其主要技术特点有:高运动精度(亚微米至纳米级定位精度)、高加速度( $>15g$ )、高制造精度和高可靠性。提出面向下一代AEM新理论、新方法,造就一大批从事该领域的高科技人才,为我国AEM产业拥有自主产权的新工艺、新装备、实现跨越式发展提供技术基础是21世纪我国基础性研究面临的一项紧迫任务。本文论述了AEM领域的国内外现状、提出了该领域存在的重要科学问题和将要实施的计划措施。

**[关键词]** 先进电子制造,计算机硬盘,芯片封装

## 1 国内外发展和研究现状

### 1.1 电子制造是关系国家利益和安全的基础性和战略性产业

在当今信息时代,社会和经济对信息资源、信息技术和信息产业的依赖程度越来越大,信息化程度已成为衡量一个国家现代化水平的重要标志。而信息化程度与AEM产业的代表产品——计算机和微电子产品的普及与发展密切相关。AEM产业已经是集国家利益、人类智慧和最新科技于一体的基础性和战略性产业,也是当今世界竞争最激烈、发展最迅速的领域。据统计,当今发达国家国民生产总值增长部分的65%与电子有关。电子工业增长速率一般为GDP增长速率的3倍。21世纪,电子工业将成为全球第一大产业。

我国2001年的AEM产业总值达到1.35万亿元,比去年同期增长27%,约占国民生产总值的15%。随着IT行业的竞争加剧以及我国加入WTO,使得AEM产业的中心转向亚洲和中国。据预测,2010年我国AEM产业市场容量将达到6万亿元,中国将发

展成为全球最大的电子信息市场,到2005年我国集成电路的需求量将在365亿块左右。但目前国产芯片自给率不足20%,能够自主开发的仅占5%,大力发展集成电路产业已成当务之急。

在电子产业中,起先导作用的两个行业是微电子产品和计算机的制造。它们相辅相成、互相促进,使得其高速发展。微电子技术以每隔3年芯片的集成度翻两番(增加4倍),特征尺寸缩小1/3的速度发展。目前芯片的特征线宽为 $0.125\mu\text{m}$ ,预计到2010年将达 $0.05\mu\text{m}$ 。计算机也以惊人的速度发展。其主要性能将从目前的3G发展到3T(存储容量由G位发展到T位,集成电路器件从GHz发展到THz,数据传输速率由Gb/s发展到Tb/s)。如此迅速发展的重要原因之一是由于AEM原理探索和技术创新的高度融合、渗透的结果。

### 1.2 AEM快速发展对极限制造能力提出的挑战和涉及的重大科学问题

AEM技术的未来发展,并非传统机械制造技术的局部改造,而是向制造科学与技术提出了制造极限的挑战。其主要表现为如下方面:

本文于2002年5月20日收到。



响,从而可能引起磁头/磁盘界面的摩擦和碰撞。特别是随飞行高度的降低,磁头、磁盘的碰撞和摩擦问题将更为突出,它涉及表面加工与改性、损伤与防止等问题,这已成为当今研究的热点之一。清华大学在亚纳米级表面抛光技术和机理研究中,研制出粗糙度  $Ra < 0.3 \text{ nm}$  的磁头表面抛光技术;Tomcik 等人研究了如何提高保护膜抗碰撞能力和防微颗粒损坏能力<sup>[3]</sup>。

随着磁盘转速的提高,磁头/磁盘间润滑分子的流失、润滑层的化学稳定性及外界环境对界面润滑稳定性的影响等成为了研究的关键。Novotny 等人通过研究润滑剂分子在硅表面的移动来模拟磁盘表面的润滑剂迁移。Gao 等人<sup>[3]</sup>研究了磁头、磁盘表面润滑膜的形成机理以及与工况因子的关系。Perettie<sup>[4]</sup>,杨明楚、锥建斌等人<sup>[5,6,9]</sup>研究了磁头表面的改性问题以及磁盘润滑剂 PFPE 与磁头基体材料  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的相互作用。

在硬盘技术飞速发展的今天,推动硬盘向更大容量、更小体积、更廉价方向发展的首要技术仍然是界面技术,即磁头/磁盘的磁学技术和基于磁头/磁盘界面的机械学、摩擦学、材料学、力学等技术<sup>[9]</sup>。如当磁存储密度达到  $100 \text{ Gb/in}^2$  以上时,飞行高度可能达到  $5\text{--}8 \text{ nm}$ ,磁盘保护层的厚度要降到  $2 \text{ nm}$ ,磁头、磁盘的表面粗糙度分别要下降到  $0.2 \text{ nm}$  和  $0.1 \text{ nm}$  以下。因此,势必带来磁头/磁盘的更多碰撞、摩擦和磨损,磁盘润滑分子的流失加剧,磁头飞行更难稳定控制,磁介质的化学腐蚀加剧等问题。因此,磁头和磁盘的表面超精加工、分子尺度间隙的稀薄气体润滑、磁盘的高精度旋转控制与定位、表面微污染的危害、超薄保护膜的均匀生长等问题都是下一代磁头和磁盘所面临的关键问题。

芯片封装技术的发展也是日新月异。芯片封装中,输入/输出点的互连是关键的环节,包括芯片粘接、引线键合(如图2)等关键过程,都要求设备具有很高的定位精度、空间运动精度和生产率,目前能达到的指标分别为  $2\text{--}5 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 、 $15 \text{ 线/秒}$ 。

对准和定位技术是一项综合技术,其精度由视觉定位精度和机械运动精度共同决定。传统视觉定位采用的灰度关联模式匹配法受光照影响较大,不易处理大的旋转偏差,因此与亚像素图像分析方法相结合的特征点匹配法成为当前的研究热点,从事此项研究的 Adept 等知名公司宣称已研制出了可以实现  $1/40$  亚像素定位精度的新算法,但目前还未见有成熟的产品问世。

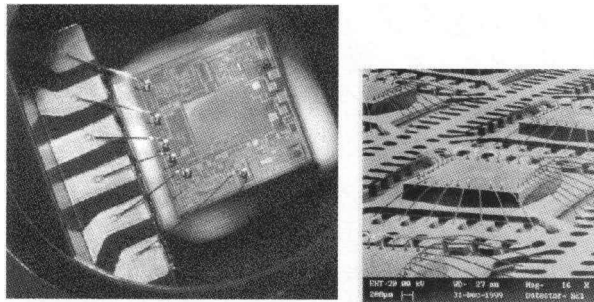


图2 IC的键合过程

封装机构的几何精度设计通过合理分配零部件的几何公差理论上可以保证运动和定位精度,但设备实际运行过程中的热、载荷变形以及振动的影响不容忽视。目前封装设备中常用的工作平台为子母工作台,子平台以柔性铰链机构配合压电致动器实现位置的高速微调 and 精定位。柔性铰链机构具有刚度与疲劳强度较低、运动规律复杂等缺点,制约了微位移平台技术的发展。王煜等提出了多自由度分布柔性并联结构型式微位移平台的设计思想,可使整个弹性系统具有较高的带宽、较好的稳定性和较强的鲁棒性。张文静等提出了面向控制的设计方法,简化了控制器的设计。

封装设备的快速起停带来的宽频振动严重影响定位精度、产品质量与设备寿命,在极短的时间内( $10 \text{ ms}$ 内)抑制定位系统的振动是困扰封装界的难题。寻找高阻尼材料、优化系统结构以降低高频振动,主动控制定位系统的低频振动是当前发展的主要路线。当封装设备的运动向着超精密、超高速方向发展时,非线性摩擦和传动误差等不确定因素的影响将变得十分显著,如何设计高性能的控制器、辨识和补偿控制系统的不确定因素已成为高速运动控制研究的热点和难点。

滴胶是芯片结合、芯片涂层、焊球矩列封装过程的关键技术之一。Razban、Sachs、Schafer 等先后提出过多种控制滴胶形状和体积的方法。由于胶液(多为环氧树脂)为非牛顿流体,其流动性质依赖于压力,挤压时间和温度等诸多因素,目前对滴胶过程缺乏一个符合实际的模型,要实现最小直径为  $0.2 \text{ mm}$  胶粒的精确控制极为困难。Zhang 和 Li 等正尝试理论与实验相结合,以便建立一个反映实际工况的非牛顿流体模型,为设计滴胶工艺与设备提供依据。

半导体芯片的不断缩小使得重力不再起主导作用,与物体表面积相关的范德华力、表面张力和静电力等粘附力突显出来。物体的受力特性还与密度、

表面粗糙度、湿度以及外形密切相关,从而给微操作带来很大的不确定性。到目前为止,微操作的研究很不成熟,传统的理论和方法必须改进和发展才可以适用。

封装过程产生的强瞬态传热和热、力、位移的协同,对芯片封装质量影响极大,并成为芯片封装的一个关键问题。随着半导体芯片尺寸的不断缩小,关于芯片封装中热、力、位移的协同和工艺方法的优化、封装结构优化的设计等研究显得更加重要。

## 2 AEM 领域存在的重要科学问题

### 2.1 超精密抛光中的纳米粒子力学行为、物理化学效应及加工原理与方法

在 AEM 行业,随产品质量的不断提高,对表面质量的要求愈来愈高。如微电子制造中,表面粗糙度、波纹度成为影响着集成电路的刻蚀线宽重要因素之一;在计算机硬盘中,磁头、磁盘的表面粗糙度、波纹度和纳米划痕不仅影响磁头的飞行稳定性,而且影响表面的抗腐蚀性。因此,高精度、高平滑和无划痕的表面成为高技术产业追求的目标。下一代磁盘要求表面划痕深度 $\leq 1$  nm,粗糙度  $Ra \leq 0.1$  nm。然而,当表面粗糙度和波纹度达到埃量级时,已接抛光的极限,任何的非均匀微流动和物理化学作用的不匹配都可能导致较大的表面波动;任何一个微小硬质颗粒就可能造成较大的划痕从而导致废品产生。这无论是在技术上还是理论上都是一个难题。特别是对于计算机磁头,它是一个复杂的三维纳米结构。所有的读写功能都在从基层到边缘  $35\mu\text{m}$  宽的面积内完成。磁头由 7 层到 9 层不同的材料组成,每一层的厚度只有几个到几十纳米。要保证均匀研磨是一个非常困难的问题。因此,要实现如此尖端的技术突破,就必须首先在科学规律研究上实现突破,认识和阐明在表面粗糙峰、固体颗粒等相互碰撞的环境下,伴随着局部高压( $\geq 2\text{GPa}$ )、高剪切率( $\geq 10^8/\text{s}$ )工况下的纳米粒子行为规律、物理化学作用。这些问题的研究将涉及材料、物理、化学、机械、力学等领域。该方面研究涉及以下问题:

(1)超精密抛光中的纳米粒子的作用规律和运动学、摩擦学设计理论;

(2)非均质多组元表面的纳米级抛光机理与技术;

(3)极限精度抛光中的物理化学行为及无损伤表面形成机理;

(4)硬磁盘和大尺寸硅片表面平整化理论和技

术。

### 2.2 高速运动表面纳米润滑分子迁移规律与纳米保护膜的生长机理

微机构处于纳米间隙时,润滑分子的行为对运动副的运行状态有很大的影响。在计算机制造领域,随着硬盘向高速度和高存储密度的发展,磁头/磁盘将处于纳米间隙、高速相对运动和稀薄空气状态下,同时伴随着读写过程电磁信息的交换。润滑分子将受多种复杂力场作用。在此情况下,润滑分子的甩离、逃逸和迁移回流将对降低磁头/磁盘摩擦、避免磁头/磁盘划伤,吸收磁头/磁盘撞击能量和保持磁头运动的稳定性等有重要影响。要揭示该工况条件下的润滑分子运动规律,将涉及材料、信息、摩擦学、力学等领域。这也是国际上硬盘领域的科学家们正在努力研究但尚未解决的问题。

在电子制造过程,常需要通过表面镀膜来实现表面和界面改性、保护和纳米加工。膜的质量要求愈来愈高,厚度越来越小。因此对镀膜技术提出了严峻的挑战。例如计算机下一代硬盘,为了提高磁存储密度,减小磁头和磁盘间隙,要求磁头表面保护膜的厚度下降到 2 nm 左右。如何均匀生长出如此薄的既保证优良的力学性能、又保证足够的抗腐蚀能力的优质固体膜已经是计算机制造界面临的一个非常困难的问题。

在该方面主要涉及以下问题:

(1)磁头、磁盘高速相对运动中表面和界面的润滑分子迁移特性和理论;

(2)复杂力场下润滑分子与基体表面的作用机理和润滑系统设计理论;

(3)纳米薄膜的生长机理、界面力学特性和均匀生长技术;

(4)磁头、磁盘高频碰撞时超薄保护膜的纳米磨损规律和机理。

### 2.3 高加速度往复运动系统的精确定位和操纵理论与方法

随着芯片集成度的增加,芯片接线的间距和焊球的直径一直减小,对封装设备的对准和定位精度提出了更高的要求。现有运动平台的机构设计理论和运动控制技术不能满足要求,需要研究新的运动设计和控制方法,以实现平稳、快速、精确定位。由于 IC 封装设备工作在高加速度状态,必然存在非线性摩擦和传动误差等不确定性因素,如何有效地补偿控制系统的不确定因素是获得高速高精运动的关键和难点。此外,封装设备在高速运行下,需要伺服

驱动系统快速起停,系统易出现振动尤其是高频振动。如何消除高频振动成为封装设备控制中一个重要的课题。

在诸多不确定因素影响的制造过程中,为了实现系统的性能和功能,客观上要求机械运动质量小、机构(结构)形态的优化和控制与机器视觉的精度高、系统可靠性好等目标的高度融合。因为只有解决了光、机、电、控制等方面的理论综合、参数耦合等问题,才能实现高度复杂、多目标制造过程系统的性能要求。该领域所涉及的问题包括以下方面:

(1)高加速度、高精度运动系统的运动学、动力学建模及设计方法;

(2)高速、大位移、超精密运动系统的建模和强鲁棒性控制方法;

(3)自适应减振机理与方法;

(4)基于实时机器视觉信息的微细定位与控制理论;

(5)多信息融合下的操作理论和方法。

#### 2.4 芯片封装过程多因素影响规律及实时控制的理论与方法

粘接与键合是芯片封装中的两个基本制造环节。其核心问题是在结合界面上产生足够的结合力和形成均匀连续的结合状态,这需要设备运行与工艺过程的精细调控来实现。

芯片粘接质量取决于粘接界面结合力的大小和粘接膜的弹性与强度。粘接表面的粗糙度、粘接剂对被粘接表面的浸润与渗透能力、粘着剂的流动特性等直接影响粘结效果。如何控制粘接剂的特性,获取最佳的粘结效果,需要研究基板表面形貌,粘接剂的流动性、浸润性、渗透性、成膜能力等对粘接界面结合力、粘接膜弹性与强度的影响规律以及实现工艺过程的机械运行方式与控制方法,为设计粘接工艺和开发粘接设备提供基础。

芯片键合目标参数近中期的指标将发展至焊点直径小于  $40\ \mu\text{m}$ ,节距小于  $40\ \mu\text{m}$ ,键合次数达到 20 线/秒,在约 10 毫秒的热-力冲击下,材料性能演变产生结合力。键合焊点的质量取决于键合界面原子固态扩散能力;扩散不充分将出现结合空隙,影响键合焊点结合强度与寿命。研究界面在热-力频繁变化下结合强度的变化规律,工艺参数与运动参数统一建模和控制方法,将是新一代封装工艺与装备创新的基本依据。该方面主要涉及以下研究内容:

(1)粘接剂的成膜特性、非牛顿流动特性和粘接界面物理化学作用机制;

(2)键合界面能量输入方式、功率、动态外力等对结合强度的影响规律;

(3)封装过程的热力学建模和热-力-位移的匹配设计理论;

(4)键合系统的动力学建模和高精度力/运动/位置混合实时控制。

### 3 计划和措施

国家自然科学基金委员会在“十五”优先领域中明确将“先进电子制造(AEM)技术基础研究”列为优先资助领域。2001年12月国家自然科学基金委员会工程与材料科学部与信息科学部在上海召开了“AEM技术与装备国际学术研讨会”,之后又组织了数次AEM领域学科交叉问题研讨会。最近国家自然科学基金委员会已决定在AEM领域组织重大项目以推动AEM领域的基础研究,同时为发展我国AEM产业的发展提供理论依据。

### 4 结论

AEM产业正从发达工业国家向我国沿海一带转移。生产的迅速发展造成了大量技术需求,中央和地方政府部门纷纷投资建立相关的研究基地;高等院校、科研机构与生产企业间“产-学-研”合作正在蓬勃发展;相关领域的学术交流和活动非常活跃。从而为我国在AEM产业实现跨越数十年的发展提供了机遇。我们要抓住机遇,以基础和关键技术研究为突破口,建立起面向下一代AEM理论体系,取得源头创新成果,为我国的AEM产业的快速发展奠定基础。

### 参 考 文 献

- [1] Wright P K. 21st Century Manufacturing. Prentice Hall, 2001.
- [2] Menon A K. Critical requirements for 100Gb/in<sup>2</sup> head media interface. Proceedings of the symposium on interface tribology towards 100Gb/in<sup>2</sup>. Orlando, Florida, 1999, 1-9.
- [3] Gao C, Dai P, Vu V. Flying stiction, lubricant pick-up and carbon-overcoat wear of magnetic heads. Trans. ASME, J. of Tribology, 1999, 121:97-100.
- [4] Perettie D J. The head-disk interface: first contact. IDEMA present. Hongkong University of science and technology. 2000, 20-22.
- [5] Luo J B, Yang M C. Surface modification of computer magnetic head. Sino-German Symposium on Micro Systems and Nano Technology, 7-9 September 2001, Braunschweig, Germany.
- [6] Yang M C, Luo J B, Wen S Z et al. Failure characterization at head/write interface of hard disc drive. Science in China, 44(Supp.), 2001, 407-411.

- [7] Yang M C, Luo J B, Wen S Z et al. Investigation of X-1P coating on magnetic head to enhance the stability of head/disk interface. *Science in China*, 44(Supp.), 2001, 400—406.
- [8] Meyer D, Zine-Eddine Boutaghou. Proximity recording — The concept

of self adjusting fly heights. *IEEE. Trans. on Magnetics*, 1997, 33(1): 912—917.

- [9] 杨明楚. 计算机硬盘磁头/磁盘界面纳米摩擦学性能研究. 清华大学博士学位论文, 2001.

## IMPORTANT ACADEMIC PROBLEMS IN ADVANCED ELECTRONIC MANUFACTURING

Lei Yuanzhong\*   Luo Jianbin†   Ding Han‡   Zhong Jue\*

(\* Department of Engineering and Materials Sciences, NSFC, Beijing 100085; † Tsinghua University, Beijing 100084;

‡ Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030; \* Centralsouthern University, Changsha 410083

**Abstract** Electronic information enterprise plays an important role in national profit and national safety. To be a strong country with Advanced Electronic Manufacturing(AEM) technology and enterprises is the goal of the national strategy in the 21 century. The key problem to achieve the great goal is to develop AEM theory, technology and equipment. This paper presents the current situation, trends, important academic problems of AEM and NSFC plan on AEM.

**Key words** Electronic Manufacturing, Computer HD, Comschip Encapsulation

·资料·信息·

### “十五”期间第一批国家自然科学基金重大项目受理申请工作启动

国家自然科学基金委员会根据国家经济、社会、科技发展的需要,重点选择具有前瞻性、基础性、战略性的重大科学问题,组织实施国家自然科学基金重大项目。目前,“十五”期间第一批重大项目申请指南已经发布,受理申请时间为2002年7月20—30日。欢迎具有研究工作基础、条件与能力的科技工作者,根据项目指南按项目整体或其中部分课题提出申请,国家自然科学基金委员会将按照“依靠专家、发扬民主、择优支持、公正合理”的原则,对所有申请组织评审,择优给予资助。有关申请的具体步骤和要求可登录国家自然科学基金委员会网站 [www.nsf.gov.cn](http://www.nsf.gov.cn) 查阅。

有关重大项目立项领域如下:

(1)THz(太赫兹)电磁波段的物理、器件及应用研究

(2)手性与手性药物研究中的若干科学问题研究

(3)生命科学中的单分子行为研究

(4)主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究

(5)地球空间暴多时空尺度物理过程

(6)高分子材料反应加工过程的化学与物理问题研究

(7)先进电子制造中的重要科学技术问题研究

(8)新型半导体量子结构材料与器件相关基础问题

(9)基因表达的调控网络研究

(10)高原低氧高寒的损伤与适应机制

(11)超常条件下材料凝固理论研究

(计划局 供稿)