

《微电子参考资料》特五

美国 2000 年微电子技术开发计划

美国国家半导体咨询委员会

机电部电子科技情报研究所

1992 年 5 月

TN
5

前 言

美国国家半导体咨询委员会(NACS)在呈送给美国总统及国会的第一份工作报告《危机中的战略工业》中,阐明了半导体工业是关系到国家安全和经济命运的战略工业,针对美国半导体工业正陷入危机的严重局势,提出了挽救该工业的一系列建议。此后又以“维护富有活力的基础工业”和“半导体工业的资本投资”为题递交了两份专题调研报告,以进一步阐明他们的建议。为了进一步落实这些建议,以振兴美国半导体工业,1991年4月,该委员会与科技政策局(OSTP)共同主办了2000年微电子技术研讨会,目的是研究制定美国2000年微电子技术开发计划,即“MICRO TECH 2000”计划。本报告就是该计划的详细说明,包括计划目标、进度、开发重点、方案选择及经济效益分析等。

本报告内容较详细,对我国制定半导体工业今后的发展战略较有参考价值,故将全文译出,以供领导和有关部门参考。

本报告由罗敬承、周有斐和衣丰涛同志翻译,马天方同志校对。责任编辑:罗敬承、邝心湖。

由于水平所限,不妥之处请指正。

目 录

序言	(1)
总结报告	(3)
一、引言	(6)
二、技术开发计划	(9)
(一)光刻	(9)
(二)工艺	(14)
(三)模拟	(22)
(四)器件与电路	(27)
(五)结构	(30)
(六)经济效益	(36)
三、结论	(41)

序 言

1991年4月,美国国家半导体咨询委员会(NACS)与科技政策局(OSTP)共同主办了一次研讨会,许多美国半导体专家聚集一堂,共同研讨有关制订今后十年内积极发展美国半导体技术的计划及其所涉及到的各种问题。这一定名为“MICRO TECH 2000”(2000年微电子技术)的研讨会致力于振兴美国半导体工业的技术竞争能力。NACS强烈地认为,在技术上处于富有竞争力的地位固然很重要,但它仅仅是保持富有活力的半导体工业的一个方面,而至关重要的还必须有一个能鼓励人们在设备与研究开发方面进行大笔投资的环境,必须拥有受过良好教育的美国劳动大军,同时,半导体工业必须拥有相当大的市场,尤其是美国市场。为了使美国半导体工业繁荣昌盛,所有这些因素都必须富有竞争力。

这次研讨会是在NACS技术工作组的指导下于1990年11月开始筹划的,最后于1991年4月23~25日在北卡罗来纳州的研究三角园(Research Triangle Park)召开。美国半导体制造商、设备制造商、材料供应商、私营研究机构、大学,以及联邦政府有关机构与实验室,共90位代表参加了这次会议,并为草拟这一报告作出了贡献。

研讨会的主要任务是制定技术发展计划。这一计划将有助于今后十年内美国半导体工业界致力于开发先进技术,同时也有助于到2000年将该工业推上世界领先地位。研讨会的目的是确定“MICRO TECH 2000”计划的技术目标,即超前于目前的预测,开发一种富有竞争力的 $0.12\mu\text{m}$ 半导体制造工艺是否切实可行;要确定开发此制造工艺以及用该工艺制造一种产品的工程样品所应采取的最关键措施;以及要确定在什么时候必须提供各种资源才能在2000年达到这一目标。

显然,在能够提出一个广泛全面的技术发展计划之前,除了要考虑技术课题外,还必须考虑其它很多问题,这些问题包括各种工业、政府与大学关键人物所扮演的合适角色及彼此间的联系;为实现技术目标所需要的投资水平和来源;如果发展计划取得成功,半导体和电子工业以及整个国家获得的预期效益;有关这样一个复杂事业的组织结构与领导的计划;以及外国竞争对手对此发展计划可能作出的反应等。NACS 已收到研讨会与会者针对这些领域提出的许多有用的建议,并且在研究研讨会结果的同时将继续向工业界领导、政府专家与学术团体征求意见。

NACS 愿向参加“MICRO TECH 2000”研讨会的所有人员表示谢意,感谢他们在会前和会议期间表现出来的热情和付出的艰辛劳动。

总 结 报 告

“MICRO TECH 2000”研讨会于 1991 年 4 月 23~25 日在美国北卡罗来纳州的研究三角园举行。90 位美国半导体工业专家聚集一堂，共商开发 2000 年尖端半导体技术所需的技术框架。研讨会要求与会者讨论在 2000 年开发出一种用于生产的 $0.12\mu\text{m}$ 工艺的可行性，研究阻碍半导体不断迅速发展的技术难关，并确定应在哪些方面投入更多的力量才能加速半导体技术的进展步伐。

虽然“MICRO TECH 2000”研讨会的与会者集中讨论为在 2000 年实现开发出 $0.12\mu\text{m}$ 制造工艺这一目标所做的工作，但是他们预期，在执行整个技术开发计划过程中将会给半导体工业带来源源不断的好处，其中包括加速新工艺与新设备的应用，通过协作开发可减少风险与降低研究开发费用，以及为提高企业各个方面效率提供新型经营工具。这些中间效益很多都已在研讨会制定的技术发展计划中展示的一些重大事件中显露出来。

研讨会使用了一个富有进取心的长远目标来建立一个具体的框架。任何一个实际开发计划都将定期进行审查，并应保持足够的灵活性，以便能适应国际竞争环境。要成功地开发出 $0.12\mu\text{m}$ 工艺还需要几百名科学家和工程师进行多年的努力。可以预期只要将目前在许多半导体公司、联邦政府实验室和大学从事半导体技术攻关的人力资源进行更好协调，就可获得为实施这一计划所需的绝大部分人力资源。要使这种良好的协调工作付诸实施，需要制订一个统一计划，以便将那些从事很多不同技术开发工作的人力资源进行集中安排。

为实现此目标，研讨会组织者认为，象“MICRO TECH 2000”这样的计划必定要涉及到半导体技术的许多方面，包括制造设备、材料、计

计算机辅助设计与模拟,生产线与市场的经济模型,封装与测试等。为研究这些技术领域中的各个方面,将研讨会参加者分成六个工作小组,并给每个小组都分发了一份建议要研究的问题清单,且要求他们草拟出一份技术发展计划,用以描述在本世纪剩余时间内使美国半导体技术在世界范围内保持领先地位应采取的行动。研讨会还留出时间来讨论有关跨越几个工作小组的问题。

各工作小组得出的结论是:虽然有许多未知因素与困难问题尚待解决,但似乎不存在任何能阻止半导体技术继续迅速前进的基本技术障碍。半导体技术将不断向前推进,其动力不仅有逐步发展的和逐渐增长的技术进展,也有革命性的技术革新。各工作小组还认为,为了在2000年能用 $0.12\mu\text{m}$ 工艺制造出工程样品,必须解决以下问题:

(1)到1994年必须拥有足够规模的能刻蚀出 $0.10\sim 0.15\mu\text{m}$ 线宽的试验性光刻能力,以便能开发出至关重要的工艺与制造设备。这种需要可能要求采用电子束掩模或直接晶片曝光工具,或者拥有先进的X射线或移相光刻能力。在今后几年内必须支持一些光刻替代技术的研究开发工作,用以确定哪一种系统最适用于生产。

(2)半导体设备与工艺开发人员将在90年代中期需要有大直径(300mm)晶片的供应源。如果该计划进展顺利,则晶片制造厂家就必须加速它们自己的开发进度。不幸的是,目前还没有一家美资硅片供应厂家。

(3)必须提高先进计量技术的优先地位,到本世纪末,半导体制造工艺将需要在当前科学还不知道如何测量的层次上进行控制。例如,超净生产区需要控制小到 $0.03\mu\text{m}$ 的微粒,但至今还没有一种已知方法能测量或表征这些微粒。

(4)工艺复杂度继续不断增长的趋势,将越来越强调解决有关多层

结构(包括互连与有源器件),平面化(特别是高宽比很大的间隔、通孔以及接点)与新材料研究等问题。

(5)计算机模拟与设备和工艺开发间的交互作用是个关键。迫切需要的是原位测量用的更先进的传感器技术,以及附加的物理模型。应当开发三维模型(即把已往认为是二阶效应的物理效应也考虑进去)来取代二维模型。

(6)在本次研讨会上已探讨过的 $0.12\mu\text{m}$ 制造工艺应当能用来制造 1 千兆位 SRAM,即比目前预测还超前一代(3 年)的产品。即使每个存储单元仅占 $0.55\mu\text{m}^2$,这样一种芯片也需要占用约 10cm^2 的面积。面积占 $5\sim 7\text{cm}^2$ 的逻辑器件可构成一个“单片系统”。这些芯片尺寸将使所有线宽(与间隔)缩小到 $0.10\sim 0.12\mu\text{m}$,而公差约为 10%。采用这样的技术,最后形成的线宽将小于目前的尺寸公差。

(7)为了获得可接受的工艺容限,高度先进的计算机集成制造技术是必不可少的。加工过程中的实时在线控制将是必要的,因为制造商再也不能接受等到制造周期结束后才去测量加工结果。

这些技术进展都是通过更有效的研究开发工作取得的,而且与加速开发新产品和制造能力密切相关,为了正确估计这些技术进展带来的效益和付出的费用,还需要进行大量的工作。

一、引 言

“MICRO TECH 2000”研讨会要求与会的半导体工业专家编制出一套详细的技术发展计划,用以说明为了到 2000 年能实现开发出可用于生产的 $0.12\mu\text{m}$ 半导体工艺这一总目标,在 90 年代需要实现的主要的重大技术突破。如能按照此进度表进行开发,则该工艺可望能提供制造出比目前预测超前一代(3 年)的千兆位 SRAM。这一富有进取性的目标为研讨会定下了基调。执行好这样一个大胆的技术发展计划,就能保证美国公司在今后十年内可以利用世界第一流的技术。

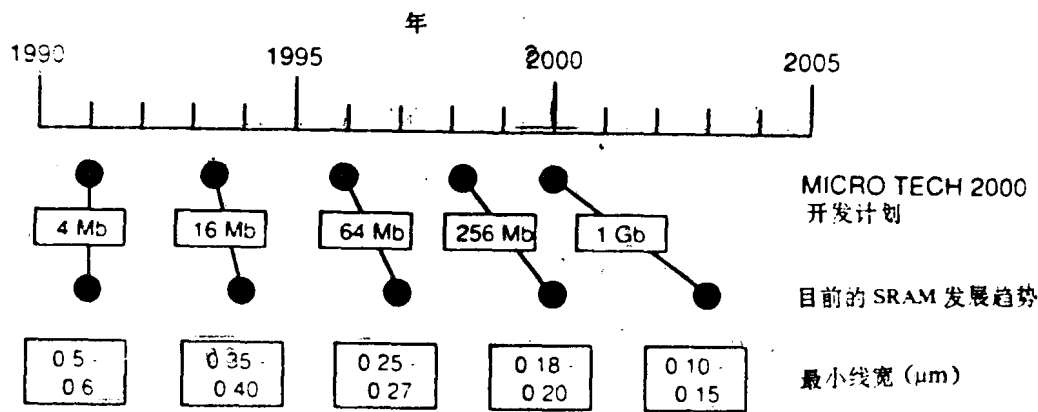
虽然“MICRO TECH 2000”研讨会的与会者集中讨论为达到这一长远目标所需做的工作,但他们还预期在整个技术开发计划执行的过程中,会有源源不断效益注入半导体工业。在努力完成每个开发任务过程中所取得的中间阶段重大专门技术的突破都将是保证工业界广泛合作的一个重要部分。实际上,也许不一定要实现“MICRO TECH 2000”的最终目标后才能保证美国在国际半导体市场中的竞争力。如果世界形势表明,减弱攻势的时间表合乎时宜的话,则可修订发展进程表。

为了完成下列技术发展计划中所列的任务,需要有几百名科学家与工程师花好几年的时间来参与这项工作。预期只要将目前在许多不同公司、联邦政府实验室与大学从事半导体技术攻关的人力资源进行更好协调,就可获得为实施这一计划所需的绝大部分人力资源。为了提高实现“MICRO TECH 2000”技术目标所需的研究开发能力,需要集中精力来组织好各种不同的技术开发任务,并实现技术发展计划中所列的各项任务。许多与会者提出的有创见的建议已经送交 NACS,供该委员会在继续研究研讨会结果时考虑。

为了在所允许时间内制定出开发 $0.12\mu\text{m}$ 半导体技术的详细技术

计划,研讨会将“MICRO TECH 2000”计划分发给六个工作小组,给予每个组列出了一份包含在技术发展规划中建议要研究的课题清单,并且给时间讨论跨组的问题。各工作小组的技术发展规划都是为了支持图 1.1 所示的“MICRO TECH 2000”总开发计划。该总计划示出了要加速开发 1 千兆位 SRAM 技术,以及要逐步加速开发每一代交叉的技术。因此这一技术开发计划的成功与否,不但可由最终目标的实现来衡量,而且也可由 90 年代内每一代技术的效益来衡量。

图 1.1 “MICRO TECH 2000”工程样品开发计划



注: (1)SRAM 的发展趋势是根据存储器历年发展速度标示,即每 3 年开发出一代新的产品。(2)Mb:兆位,Gb:千兆位

各工作小组所分派到的技术课题如下:

- 光刻:光刻工具、掩模、光刻胶与计量。
- 工艺:工艺设备、设施、缺陷控制、成品率、硅片尺寸、传感器、小型硅生产线与计量。
- 模拟:软件环境(包括 CAD、CIM、CAM 与 CAT 测试)、算法及计算平台。
- 器件与电路:电路技术、器件结构、冗余度、修整、测试与芯片结构。

表 1.1 “MICRO TECH 2000”计划需要加速开发的技术领域

A. 光刻

掩模技术

套刻技术

计 量

光刻胶、光刻胶技术

光刻方式

光学

X 射线接近式

X 射线投影式

电子束直接曝光

电子束投影

电子束接近式

离子束

B. 工艺

微污染

工艺控制与工艺/工具开发

离子注入

化学汽相淀积(CVD)

物理汽相淀积(PVD)

图形转移(刻蚀)

热处理

大直径晶片、集成工艺设备群

计量技术

C. 模拟

工厂模型

三维工艺物理模型

工具模型

0.12 μ m 器件模型

电路板、模块与芯片使用的设计、布图与模

拟工具计算框架与标准

D. 器件与电路

互连技术

1 千兆位 SRAM 单元技术

器件设计

器件技术

测试的设计

E. 体系结构

高速互连

高性能封装

平板显示

F. 经济学

制造教育

制造经济学

工厂/产品成本模型

市场模拟

• 结构:系统环境、应用、封装、互连、软误差与数据可靠性。

• 经济学:经济与分析工具、制造成本、设施费用、技术开发计划的

经济效益。

“MICRO TECH 2000”研讨会确认所有需要加速开发的技术领域如表 1.1 所示。

二、技术开发计划

(一)光刻

1. 概述

光刻技术的范围从提交最终设计信息一直到以完全显影的光刻胶将设计图形转移到硅片上。它包括数据处理和数据后处理,掩模生成及其有关的检验和修正,将图形转移到硅片上,光刻胶和光刻胶处理工艺以及计量技术。

为了实现“MICRO TECH 2000”计划的目标,即到 2000 年制出 1 千兆位 SRAM 工程样品,必须根据最小特征尺寸为 $0.1\sim 0.15\mu\text{m}$ 的设计线宽,开发出一整套光刻设备和工艺,同时在各种各样的技术和生产问题方面满足严格的要求。而且,应该走不断演进的道路以便满足直到 2000 年的各代半导体技术提出的逐步提高的光刻要求,同时提前 3 年实现 $0.12\mu\text{m}$ 这一代技术。

由于光刻技术是器件开发和工艺设备开发的关键,因而确定了两种不同的光刻要求:

- 开发/样品研制能力 用以支持器件和工艺设备的开发。到 1994 年需要具备这种能力,以便与“MICRO TECH 2000”计划的时间表相吻合。

- 生产能力 到 1997 年可获得能投产的机器。

由于“MICRO TECH 2000”计划所需的光刻技术很可能是几种光刻技术的混合搭配,所以也必须注意这种组合系统的集成及与其应用

相关联的折衷方案。

2. 技术开发计划

光刻技术开发计划示于图 2.1。它示出了 2000 年前每一代光刻技术主要的光刻选择方案和为达到“MICRO TECH 2000”目标所要求的进度和决策时刻。由于现时选择最佳方案还存在不定因素,因此在技术发展计划中留有尽可能长的时间先不作决策。每一代技术都有多种光刻技术选择方案,如图所示,由三角形限定选择光刻方案的决策时间。就 1 千兆位 SRAM 技术来说,必须力图在 1994 年作出决定将选择方案压缩到约 2 种,并在 1996 年前后作出最后决策。

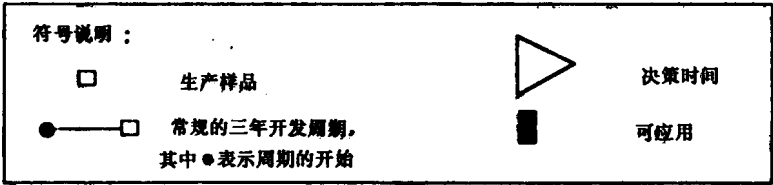
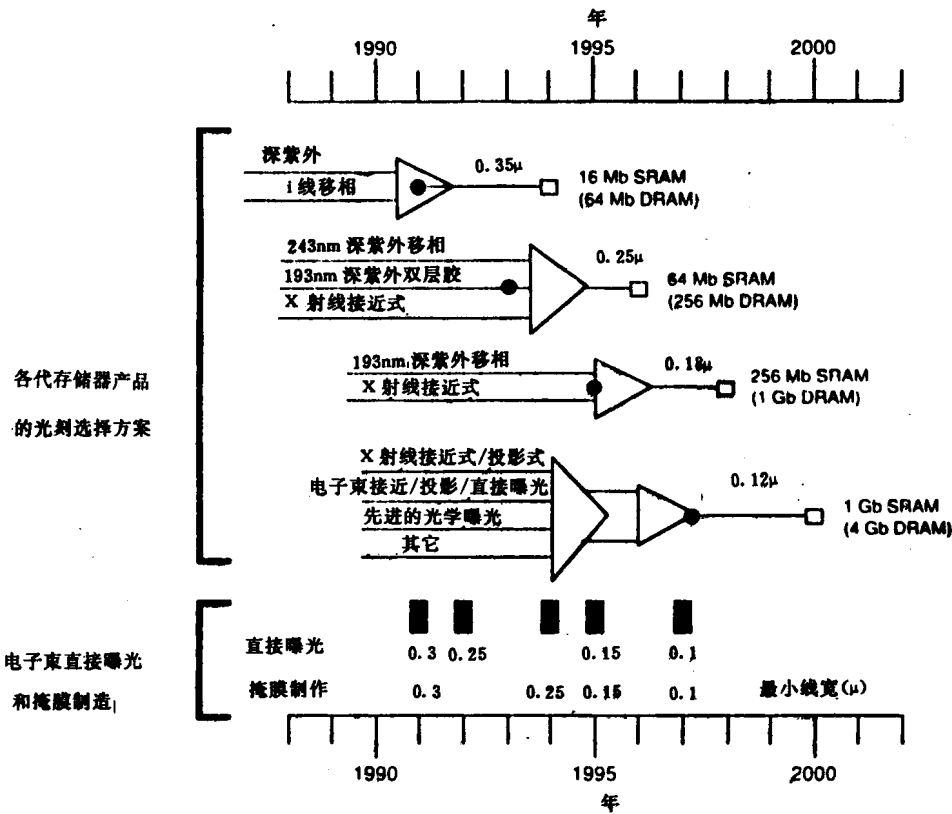
图 2.1 指出,加速各代技术的发展将对开发新光刻设备通常所用的 3 年开发周期形成压力。例如,对于 64 兆位 SRAM 这一代来说,该图示出开发周期应开始于选定最好的设备方案的决策时间之前。而对 1 千兆位 SRAM 这一代技术来说,有足够长的时间进行两阶段决策程序来压缩光刻设备选择方案,仍能在 2000 年前按计划做出工程样品。

该图也示出了能满足 $0.12\mu\text{m}$ 早期样品研制和实验需要的电子束制版机和电子束直接曝光机的技术发展计划。前者反映出所有需用掩模的光刻方法都依赖于掩模制作,而后者则反映了本工作小组的建议,即电子束直接曝光法是在“MICRO TECH 2000”计划的时间范围内满足 $0.12\mu\text{m}$ 样品制作需要的一种富有生命力的方法。

3. 需要加速开发的项目

a) 专门技术项目—对于光学光刻,关键领域是移相技术和深紫外(DUV)光源(193nm);对于 X 射线接近式光刻,关键领域是掩模技术、步进曝光装置的开发,包括先进的对准系统和晶粒源备选方案;对于 X 射线投影曝光,关键领域是掩模技术,掩模检验和修正系统,以及步进曝光装置的开发;对于电子束直接曝光,关键领域是生产能力的提高;

图 2.1 光刻技术开发计划



对于电子束投影曝光,关键领域是掩模技术和辐射损伤研究;对于电子束接近式曝光,关键领域是掩模技术和步进曝光装置的开发和性能鉴定;对于离子束曝光,关键问题是需要及早按比例扩大系统设计,并进行特性鉴定,以证实其可行性。

b)掩模技术—这一领域历来得不到足够的支持,但它对一切掩模光刻法都是不可缺少的项目。需要有一种把掩模误差与器件性能和成品率联系起来的综合特性表征法,以指导电子束设备开发,确立灵敏度满足需要的改进的检测方案,以及开发掩模修正技术,其目的在于提供一种通用技术来支持与上面确定的每一种掩模光刻方法相关的特有的掩模技术问题。

c)套刻技术的改进—这个领域需要加速开发对一层层套刻至关重要的技术,诸如超高性能移动系统和控制;设备基线的稳定性、校准和控制系统的开发;以及对准技术的优化。

d)计量技术的改进—计量能力落后于现今的需要,而且,如果不加速研究,预计一直到2000年都将会落后于半导体工业未来的需要。

e)光刻胶、光刻胶技术和工艺—通过光刻胶把设计图形转移到硅片上是一切光刻方法的基础。所有选择方案都要求有目前还达不到的先进性能。这涉及多层和表面成象的光刻胶,对所有预料到的辐射波长具有适当灵敏度和强度的负性和正性光刻胶,以及把图象精确转移到硅片上所需要的工艺。

f)设计数据的后处理和前处理—数据量随着每一代新技术而急剧增加,再加上最近为适应邻近效应、检测和移相掩模而提出的数据后处理的需要,这就要求加强这方面的研究工作。

4. 最优先开发的项目

光刻的重要性要求提出所有有希望的研究领域。在光刻方面,现有

的研究工作仅仅部分地适应这些要求,一项加速的技术开发计划要求开发工作超前于目前的需要。为了在整个90年代加速半导体技术的进展步伐,深紫外移相光学光刻法和电子束光刻法应列为优先开发领域。此外,X射线接近式曝光光刻法应继续得到支持,特别是在套刻和掩模技术等关键领域尤应得到支持。

5. 其它可供选择的方案

现在,不可能很有把握预测在16兆位SRAM以上的各代技术中哪一种光刻方法将占优势。因此,光刻技术开发计划的固有战略将是对有竞争力的那些光刻技术继续进行研究,直到开发工作要进一步集中的最后决策时间。

6. 成功的关键因素

及早应用足够的资源使上述关键领域的技术开发加速进行,这是获得成功的最关键因素。光刻技术的可用性控制着“MICRO TECH 2000”的许多其它方面的技术,因此,光刻技术能力需要适当超前于可交付使用的千兆位SRAM样品进度表的要求。在确定要加速开发的各个技术领域,掩模技术及其有关的各种技术已明显地成为重要的问题,因为这些技术对所有掩模光刻法来说都是至关重要的。在这些技术领域,电子束技术不仅是掩模曝光的基本技术,而且,对于器件开发和工艺设备的特性鉴定所需要的早期样品试制工作来说,电子束直接曝光也是本工作小组认定的一种方法。因此,另一个成功的关键因素是不断地、及时地获得最先进的电子束设备,以及必不可少的检测、计量和修正设备。每一种光刻方法都有它自己的一系列关键的成功因素,但要在“MICRO TECH 2000”技术开发中获得全面成功,将取决于在今后十年内,如何适当处理竞争中的各项优先开发项目以及是否能够坚持按光刻技术进展计划所列的决策时间作出决策。

7. 可能出现的障碍

可能出现的障碍视现在所考虑的特殊类型的光刻方法而定。这些可能出现的障碍已在上面第3节中作过描述。

(二) 工艺

1. 概述

工艺领域包含的三个主要课题：一是微沾污，包括洁净室设施、材料纯度要求和水的净化；二是设备和工艺控制，包括总的设备要求、离子注入、化学汽相淀积、物理汽相淀积、图形转移、热处理、硅片尺寸和主要的工艺难关；三是计量学，包括长度测量、微粒测量、沾污测量和厚度测量以及工艺控制用传感器。

2. 技术开发计划

表 2.1, 表 2.2 和表 2.3 分别列出了微沾污、工艺控制和计量学的技术开发计划。

3. 需要加速开发的项目

a) 微沾污

- 要求洁净室的总体洁净度达到的 $0.1\mu\text{m}$ 微粒, 1 级; 而设备群周围的洁净度能够控制到优于 $0.03\mu\text{m}$ 微粒, 1 级。

- 要求液体化学过滤器能够达到每毫升内大于 $0.03\mu\text{m}$ 的微粒少于 2 个。

- 要求气体过滤器能够达到每立方英尺内大于 $0.03\mu\text{m}$ 的微粒少于 0.05 个。

b) 工艺控制和总的设备要求

- 要求设备开机时间达到 97%, 这里开机时间被定义为制造设备可用于生产的时间占总生产周期的百分比。