

专题

95-04-01-03

# 微米/纳米技术在航天 系统中的应用

李 德 孚



中国国防科技信息中心  
*China Defense Science and Technology  
Information Center*

# 辑 要 页

密级

报告题名 副题名 (类型)	微米/纳米技术在航天系统中的应用		
GF 编号		报告密级	内部
部门编号		分 类 号	
基层编号	CDSTIC/ZP-95-04	作者(学术或 技术职务)	李德孚等
总页数	170		
成果登记号		审查批准人(职 务或技术职务)	史秉能 (副所长)
完成单位	中国国防科技信息中心 一室		
叙词	微米技术、纳米技术、航天系统、惯性制导		
<h2 style="margin: 0;">摘 要</h2> <p style="margin: 10px 0;">本资料为美国航空航天公司对微米/纳米技术在航天系统中应用前景及潜力调研的论文集,内容分空间分系统与器件,关键技术,制造和成本估算四个方面。</p> <p style="margin: 10px 0;">本资料评述了微米/纳米技术的现状,对未来航天系统的潜在影响进行了评估,预计这项技术将引发航天系统制造方法和使用方式的变革,同时还大大降低航天系统的费用,微米/纳米技术不仅对航天系统极为有用,而且市场研究证明这项技术对世界商业应用也极有前途。</p>			

完成日期:1994年12月

## 说 明

微米 / 纳米技术(*micro-/nanotechnology*) 是一项面向 21 世纪的重要的军民两用技术。这项技术的未来发展有着广阔的前景。

80 年代以来, 美国、日本和西欧的一些国家十分重视微米 / 纳米技术的研究和发展。日本和德国在积极推进微型机械加工技术方面已取得一定成效。1993 年美国国家关键技术委员会在提交总统的报告中, 将“微米级和纳米级制造”列为国家关键技术。以发展两用技术为宗旨的美国国防部高级研究计划局(*ARPA*), 在 1995 财年的计划中, 将微机电系统(*MEMS*) 和专用集成微型仪器(*ASIM*) 视为直接关系国防与经济发展的高技术而加以重点发展。美国兰德公司(*RAND*) 还对微机电系统有可能在军事上获得的其他应用进行了专题研究。

美国航空航天公司在 1993 年就微米 / 纳米技术对未来航天系统的潜在影响, 进行了调查和评估, 初步预测了该项技术在未来军用与民用航天系统中的应用, 以及对未来航天系统的体系结构概念可能产生的影响, 并在此基础上出版了题为《革命性低成本空间系统“纳米卫星”的概念》(*IAF-93-U. 5. 573*) 的文集。为便于从事或有志于从事微米 / 纳米技术工作的科技工作者了解这一领域的新近发展, 现将该文集翻译出版。为更好反映文集内容, 改名为《微米 / 纳米技术在航天系统中的应用》。

# 目 录

背景与发展方向 .....	(1)
各章内容梗概.....	(12)
制导、导航和控制用的纳米技术 .....	(17)
制导、导航与控制用的微型传感器和微型仪器 .....	(28)
卫星通信系统用的微米/纳米技术 .....	(32)
用于航天器温度控制的纳米技术.....	(53)
航天器电源和电气系统的小型化.....	(59)
用于航天器爆炸系统的纳米技术.....	(61)
小型、微型和纳米卫星的概念 .....	(66)
采用纳米技术的电子组件:多芯片模块的作用 .....	(76)
微型光学设备在空军航天系统中的应用.....	(81)
用于航天发射保障系统参数测量的纤维光学传感器 .....	(102)
航天器和发射环境保障用的化学微型传感器 .....	(112)
空间任务使用的微米/纳米压力和温度传感器 .....	(123)
航天应用的微型机械设计与制造的摩擦学方法 .....	(127)
用于结构力学的微米/纳米技术 .....	(138)
微流体力学 .....	(142)
微加工技术 .....	(147)
微电子 .....	(154)
卫星小型化的经费趋向 .....	(160)

# 背景与发展方向

## 背 景

航空航天公司的任务之一是预测航天系统和新系统结构的发展，该公司正在就新兴的微米和纳米技术对未来空军航天系统的潜在影响，进行一次持续的调研和评估。这里，“微米和纳米技术”一词广义地定义为，包括从亚毫米到亚微米尺寸的材料、工艺和器件的综合和集成。作为这项调研和评估工作的一部分，航空航天公司还要回答如何最佳地利用这项大有前途的技术的问题。

本报告是利用航空航天公司内部科研经费开展这项调研和评估的第一批成果。这项计划是由于微制造技术和纳米加工工艺明显取得迅速进展所引起的。虽然这些进展旨在开发世界商业市场，但是可能大大降低航天系统的费用，并对其有重大的影响。现已组建了一个“纳米技术工作组”(NANOWOG)，参与的单位有航空航天公司的一些技术中心和工程保障部门。该工作组正在继续评估这项技术，其目的是要弄清纳米技术将如何(而且以怎样的速度)应用于空军航天与导弹系统中心(SMC)的航天系统。

新兴的微米与纳米技术的一个令人关注的例子是微工程，其典型产品为利用三维硅微机械加工制成的结构。这是传统的制造微电路的二维半导体工艺的改进，由于全世界都在研究与开发，已导致出现各种各样的微机电系统(MEMS)——目前广泛重视的一个课题。

微工程是一门学科，它专门研究具有纳米、微米和毫米尺寸的实体结构的三维小型传感器和致动器的设计、材料合成、微机械加工、组

装、总装和封装<sup>[1~3]</sup>。利用”这项技术可以把传感器、致动器以及信号和数据处理器做在同一块基片上<sup>[4,5]</sup>,构成一件微型仪表。目前正在开发的微型仪表的样件已可以探测局部地区和遥远地区的环境(例如微光学的<sup>[6]</sup>,微化学的<sup>[4]</sup>),根据已经编程的指令作出决策[如互补型金属氧化物半导体(CMOS)加工过程],然后完全按照这个指令进行工作(如通过微致动器、电或流体控制器)。信息可以通过基片上的直接通信或无线通信传送到相邻的微型仪表上去。本研究的结果以及同微米技术方面工业界领导人的对话,导致我们为这样一种仪表起一个术语,叫做“专用集成微型仪表”(ASIM),类似于目前常用的“专用集成电路”(ASIC)。ASIC可通过诸如金属氧化物半导体实现机构(MOSIS)服务<sup>[7]</sup>之类的设施网络,用传统的“标准加工工艺线”进行研制和制造。

我们相信,如同ASIC一样,ASIM也可以借助微电子工艺技术进行批量制造<sup>[8]</sup>。当然,同ASIC相比,ASIM要复杂得多,因为它既有可弯曲的部件又有活动部件,而且采用诸如生物或化学活化剂之类的特殊材料。确切地说来,ASIM是一种高水平的微型器件,在这种器件中把几种微机电系统集成在一块基片上,或者说就如同一个许多基片模块的组件。这种结果就是一个高度复杂的分系统,包含了必要的微电路和硅或其他材料的三维微机械加工——也可能用微电子加工方法和先进的材料加工技术(所有这些都集成起来)进行制造。ASIM的制造是由半导体工艺技术——也就是由ASIC技术和目前的MEMS技术自然发展过来的。这种设想的主要好处类似于高度自动化的微电路制造的好处:可以降低这种非常复杂、非常有用而且“有意识”的微系统的费用。

这种新兴的微机械加工技术,同已经很成熟的微电子工艺与制造技术,以及非硅的先进材料工艺技术结合在一起,很有可能会降低美

国空军未来航天系统的费用。具有亚微米特性的集成微型仪器会使亚毫米尺寸的器件降低研制与试验费用、缩小体积、减轻重量，同时还可以降低对功率和温控的要求、降低对震动的敏感性，并通过冗余提高可靠性。但是，这些器件也增加了复杂性，在材料加工过程中要求更精确的控制，而且对材料的兼容性也提出更严格的要求。对航天系统应用具有明显潜在意义的、范围非常广泛的各种各样微型器件和应用，目前正在积极的研究与开发之中。这些活动早已促使航宇局着手实施一项低费用的（不足1亿美元）“发现号”微型卫星计划<sup>[9]</sup>，相比之下，“旗舰号”卫星计划的费用却在10亿美元以上。约翰·霍普金斯大学、洛斯·阿拉莫斯国家实验室和“战略防御计划”(SDI)的一些部门也正在积极考虑小卫星的研制任务。

突出的优点是希望大幅度降低研制和生产复杂而先进的航天器分系统所需的费用。这种希望是在现有半自动微加工方法的标准工艺线上，即半导体工业已经很成熟的生产技术和基础设施的基础上实现的。

由于有效载荷的尺寸可能大大缩小，我们看到了导致研制集成的、小型的、可靠而且完全可用的纳米卫星系统的一场革命。这些纳米卫星将在小厂房内用工业界和大学联合财团（例如康奈尔大学、斯坦福大学、加州大学伯克利分校以及诸如MOSIS之类的民用标准工艺线网络）经营的灵活而自动化的ASIM标准工艺线廉价地进行制造，而且发射费用只需目前的几分之一。这种小型纳米卫星航天系统方案允许有一定的可接受的故障率，但不会影响其后果，因而可使空军拥有现在庞大的发射系统不可能做到的快速发射和全球范围内实施战术支持的能力。而且，由于大大缩小有载效荷及其发射架的尺寸，带来的另外一个好处是可以大大减少对环境的影响。

降低有效载荷费用和重量的好处有很大的意义。“大力神/半人马

座”运载火箭价值在 2.5 亿美元以上，一枚运载火箭的失效就会造成严重的后果。与此相反，利用“德尔它 I”火箭，一次发射的费用不足 2.5 亿美元的 1/4 —— 但是，要求大大缩小有效载荷的尺寸。例如“飞马座”(Pegasus) 之类的小型运载火箭，发射费用则可以更低。汇总微米 / 纳米技术，利用三维微机械加工制造微型仪器，是全世界都蓬勃进行研究的一个领域<sup>[10]</sup>。美国的器件研制人员正在利用微机械加工的标准工艺线。一个例子是硅结构公司的一个项目，正在瑞士的一条标准工艺线上进行制造。类似的，荷兰正利用高技术设施开发集成电路(二维)和微型机械(三维)，德国正在利用新颖的微机械加工方法(通常简称为 LIGA，系德文“光刻、电铸成型和铸模”的缩写)和材料开展这方面的标准研究与开发。此外，日本的政府部门(如通商产业省)和商业公司(如日立公司、索尼公司、东芝公司)都在各式各样的潜在应用方面投入大量的研究与开发资金。处在研制阶段的器件种类日益增多，其中典型的有核( $10^{12}$ ，万亿位)存储器、单电子器件以及各种传感器<sup>[11~14]</sup>。去年有关微工程技术专业会议的数量就大大增加，其中最主要的是 1992 年 4 月国家研究委员会(NRC)为国防部航宇局召开的一次专题研讨会，而且计划于 1993 年 4 月召开一次部际(包括国防部、能源部、国家卫生研究院、国家科学基金会以及商务部)专题研讨会。去年，许多政府实验室(例如桑地亚国家实验室<sup>[15]</sup>、劳伦斯·利弗莫尔国家实验室<sup>[16]</sup>、海军研究实验室<sup>[17]</sup>、喷气推进实验室<sup>[18]</sup>)都已经组建了“国家”微工程研究机构。空军正在通过 ASOFR/ 大学研究倡议计划开始积极开展这个领域的研究活动<sup>[19]</sup>。

市场研究也证明这项技术对全世界的商业应用很有前途<sup>[20]</sup>。这个领域新建公司的数量明显日益增多，一些大公司(如通用动力、福特、IBM、休利特-帕卡德、莫托洛拉、卢卡斯·诺瓦传感器公司)显然提供了投资。国防高级研究计划局(DARPA)正在把它的资源投入开发(



军民)两用技术的应用<sup>[21,22]</sup>。他们正在资助微机电系统在国防部方面各种各样应用的研究开发工作,而且正在建立一个微机电系统的标准工艺线,以促进新器件的预先开发和小批量生产。这些器件大部分将是在地球上应用的,但有些也可在空间应用。在历史上,美国的高技术是由于政府部门(国防部、能源部、航宇局)的需求产生的,而民用部门是次要的受益者。在微工程方面,情况可能恰恰相反。微工程的大量应用是面向民用部门的,对于军用的就较少,而对于军事航天应用的则更少。

最近航宇局主持召开的一次题为“微米技术及其对航天系统的应用”(MTASS)专题研讨会,证实了这种观点<sup>[18]</sup>。承包商提出需要革新航天(产品)鉴定程序,战略防御计划局(SDIO)已尽力采取这种措施加速其航天系统的研制工作。航天鉴定高昂的费用是由于用户不愿意接受失败所造成的。这种观点也是航空航天公司在通用系统工程和总装(GSE&J)任务中作用的一个重要推动因素。于是需要一种可供选择的解决办法,即以低费用但又有效地完成任务,在保持可允许的故障率的同时,可以利用民用部门在半导体器件、新型数据与信号处理芯片以及自动化制造方案中所取得的进展。我们同意E·梅特勒和F·哈德伊在航宇局MTASS专题研讨会上所写的:微型仪器将在航天器和航天系统技术方面引起一场革命<sup>[18]</sup>。这种看法最近已在《航空周刊与航天技术》杂志的封面报道上得到重申<sup>[22]</sup>。

## 航空航天公司的作用

为了完成这项初步调研和评估计划,我们在公司内部组建了一个非正式的纳米技术工作组(NANOWOG),其成员来自一些技术中心和本公司的工程保障部门。这项技术调研任务按照航天器的分系统和

技术进行分类,并由个别志愿参加者为首的纳米技术课题组(NANOFOP)负责实施。这些纳米技术课题组情况见下表。

**纳米技术课题组一览表**

纳米技术课题组负责人	技术中心 / 部门	研究范围
<i>Henry Helvajian</i>	力学与材料技术中心	技术发展方向
<i>Ernest Robinson</i>	力学与材料技术中心	总体研究
<i>Robert Abramson</i>	方案开发分部	费用模型
<i>Farzad Baban</i>	力学与材料技术中心	流体力学
<i>Dick Chang</i>	力学与材料技术中心	结构
<i>David Gilmore</i>	航空热力与推进分部	温控
<i>Selma Goldstein</i>	结构力学分部	军械
<i>Michael Hilton</i>	力学与材料技术中心	摩擦技术 / 延时释放润滑剂
<i>Siegfried Janson</i>	力学与材料技术中心	微型卫星 / 推进
<i>Charles Klimcak, Bernardo Jaduszliwer</i>	电子技术中心	纤维光学传感器
<i>Gary Loper, Steven Moss, James Swenson</i>	电子技术中心	光学传感器
<i>Kenneth MacWilliams</i>	电子技术中心	电子器件
<i>Donald Mayer, Geza Csanky</i>	电子技术中心 通信系统分部	半导体工艺
<i>Gouri Radhakrishnan</i>	力学与材料技术中心	多芯片模块 / 组装
<i>Geoffrey Smit</i>	控制系统分部	制导、导航与控制
<i>Bruce Weiller</i>	力学与材料技术中心	化学传感器
<i>Richard Welle</i>	力学与材料技术中心	温度与压力传感器
<i>Allyson Yarbrough</i>	通信系统分部	微型通信系统

在这次初步调研中,没有对航天器的所有分系统都作调查。比如,信号处理、数据处理、电源的深入评估和任务设计就未作调研。也没有同迄今为止的所有现行计划都取得联系(例如,“慧眼”、下一代预警系统、战略防御计划局以及国防高级研究计划局的各种计划)。此外,

没有搜集那些要求不予透露协定的公司和保密来源的信息。纳米技术课题组在大学、政府和商业部门确定一些优秀的研究中心，以及这个领域的关键领导人物（这些都已经纳入一个初始的数据库之中）。作为本调研工作的一部分，我们对这些单位和个人都作了访问或联系以及采访。在这些访问和采访期间，航天应用问题是一个新的课题，几乎没有得到优先的考虑，相反的，重点都是在商业应用方面。

我们发现，通过简单的重复电路和元件冗余，超小型系统可以大大提高数据探测能力。提高了数据探测能力就可以完全监控在轨航天系统的功能，以便延长其执行任务的寿命，或者甚至可以把发生故障的部份进行修复。微机电系统方案通过单个元件集成和多路信息反馈，利用大量简单的器件实现复杂的协调功能（如光学的、机械的、流体的）。专用集成微型仪器的集成技术，有可能在确保大幅度降低经费的同时保持航天系统的能力。

我们这项初步研究的结果（由本报告的各位作者撰写的文章已编在各章之中）表明，如果每个元件和分系统都利用现有的技术进行装配和集成，微工程技术目前的水平可以在某种程度上大大缩小有效载荷的尺寸。工业界和大学的领导人没有看到制造集成微型仪器和纳米卫星部件的基本局限性，这也是航宇局“微技术及其在航天系统的应用”（MTASS）研讨会小型卫星小组的结论<sup>[17]</sup>。

一些大学和工业界的联合计划富有活力而且不断发展，在大多数情况下，在这些财团中工业界的投资同政府部门的经费相当或者超过政府部门的经费。斯坦福大学就是一个例子，它拥有一个有一座实际工厂的专用设施，一座净化室，并具有微电路制造和三维微机械加工能力。这个设施把传统的电子学方面的成就同制造与产品控制结合起来，能够制造原型产品，而不仅仅是一些较大装置的分立元件。加州大学伯克利分校有一个先进的微机电系统研究中心，拥有大量设施和

能力，而康奈尔大学的中心也进一步改进了制造复杂三维结构的微机械加工工艺。加州大学洛杉矶分校正开始兴建一个新的先进微系统（碳原子）技术中心。大学和工业界联合的各种设施都可能成为专用集成微型仪器的来源，并在空军航天与导弹系统中心（SMC）的新一代纳米卫星中发挥作用。

我们的观点是，专用集成微型仪器先要研制出来，以代替现有航天器和各级运载火箭上目前的航天分系统，然后再发展成为独特的纳米卫星航天系统结构。我们认为，卫星将不再在那些高悬着庞大部件的大型而高跨度的工厂里制造和装配。明天的卫星可能是由大学、航空航天公司和空军菲利普实验室按空军的计划进行研制，然后在大学的研究中心或者民用研究中心的标准生产线上进行小批量生产，如同现在 *MOSIS* 财团生产民用专用集成电路一样。这样一种设想将改变航空航天公司同有着许多传统的主承包商的空军航天与导弹系统中心之间的整个传统关系。在这样一种新的文化背景下，航空航天公司在通用系统工程与总装方面的作用（要扩大到提供航天系统的直接监督和研制），甚至要比现在更加重要。

## 发展方向

正象我们已经看到的那样，对微机电系统、小型器件以及传感器及其有关的微电路方面正在取得的进展所作的初步评估，表明在空军航天与导弹系统中心的卫星（以及民用卫星）和发射系统上的应用，有可能大大节省费用。眼下感兴趣的是加速度表、惯性测量元件、换能器、射频元件、光学元件和传感器、电源系统、振动传感器、微型热交换器、分布式传感器等等，所有这一切现在都可以利用半自动的方法进行小批量生产。概括前面所说的内容，总的优点是：降低研制与试验

费用，减小体积，减轻重量（由于降低对电源和温控的要求）；降低对振动的灵敏度；提高可靠性（通过冗余设计）；提高数据采集和探测能力（借助分布式传感器网络）；以及微传感器和生产整套、独立、专用微型仪器的电子设备相结合。

为了实现这种可能性，航空航天公司应该计划与“系统计划办公室”（SPO）进行明确的对话，其主要目的有三点：（1）把可以用在现有航天系统的专用集成微型仪器应用到未来的发射中去；（2）确定在未来的局部改进中将要采用专用集成微型仪器的发展路线；（3）为未来完全利用这些技术的SMC航天系统结构开发纳米卫星的方案。大多数器件主要是硅基的。必须开发除了硅以外的材料工艺，以便充分利用专用集成微型仪器的方案，还要把许多先进的材料工艺技术组合起来。这项工作可以利用航空航天公司的专长并与政府和大学研究中心合作来完成。

近期内可能作为更深入评估的一些对象是系统安全监控、陀螺、广泛应用的集成的高度测量专用集成微型仪器、性能可能改进的“半人马座”上面级火箭的低温测量仪以及高频通信的专用集成微型仪器。微型系统的温控是中期的研究对象，可能是由在高功率信号处理芯片的硅基片上制造的微型热交换器和计算机组成的。就远期而言，应该着手为纳米卫星及其体系结构开展点设计的研究。

航空航天公司还应该同有关大学关键的微机电系统研究中心（例如康奈尔大学、斯坦福大学、加州大学伯克利分校、凯斯-韦斯顿大学、密执安大学和威斯康星大学）以及重要的政府部门（如国防高级研究计划局、能源部、航宇局）建立密切的联系，以便把可行的技术集中应用到空军航天与导弹系统中心（SMC）的航天系统上去。尽管大学实验室（以及私人公司）的重点是在商业方面，几乎没有什么关于航天应用的，但是这些新出现的微机电系统技术对于这些应用说来也是理想

的。微机电系统技术已经降临，它在航天系统上的应用看来是不可避免的。

## 参考文献

- [1] *Science* 254, 1300-1342(1991), and articles therein.
- [2] N. Flanerty, *Electrical Engineering*, 55-61(April 1992).
- [3] S. D. Senturia, *Natural Science*, 288-295(Jan. 1991).
- [4] B. D. Nordwall, *Aviation Week and Space Technology*, 53(June 1992).
- [5] L. O'Connor, *Mechanical Engineering*, 40-47(Feb, 1992).
- [6] R. C. Hughes, A. J. Ricco, M. A. Butler, and S. J. Martin, *Science* 254, 747-80(1991).
- [7] "The MOSIS Service "(information brochure), USC/Information Sciences Institute, 4676 Admiralty Way, Marina del Rey, CA90292-6695.
- [8] P. Menzel, *U. S. News and World Report*, 52-53 (March 1992).
- [9] R. T. Ridenhore, *Planetary Report* 12 [4], 4-7 (1992).
- [10] R. Crawford, *Science* 254, 1304-1305 (1991).
- [11] *Sensors and Actuators* 20 [1-2](1989), and articles therein.
- [12] *IEEE Proceedings of MEMS/91*, Cat. Numb. 91CH2957-9(1991), and articles therein.
- [13] *IEEE Proceedings of MEMS/92* Cat. Numb. 92CH3093-2(1992), and articles therein.
- [14] J. Brysek, K. Petersen, J. R. Mallon, Jr., L. Christel, and F. Pourahmadi, "Silicon Sensors and Microstructures," Novasensor Co. (1988).
- [15] *Sandia Report* 573-122/40137(1991).
- [16] *Photonics Spectra*, 46 (June 1992).
- [17] W. M. Tolles, *NRL Publication* NRL/MR/10003-92-6989 (1992).
- [18] *Proceedings of the NASA/JPL Workshop on Microelectronics and Applications to Space Systems* (May 1992).

- [19] *"Proposer's Guide to the AFOSR Research Program," AFOSR Pamphlet 70-11 (March 1992).*
- [20] *"World Smart Sensor Markets," MIRC Report 532B-40 (1991).*
- [21] *P. Speser and R. Barrett, Laser Focus World, 49 (July 1992).*
- [22] *W. B. Scott, "Micromachines Hold Promise for Aerospace," Aviation Week and Space Technology, 36 (1 March 1993).*

## 各章内容梗概

本资料的技术评价由四大类组成：即空间分系统与器件；关键技术；制造；成本评估。下面的内容梗概为读者提供各章的大致内容，指出与本领域有关的问题。括号内的说明是编辑人员的评论。

### 空间分系统和器件

#### 制导、导航和控制用的纳米技术

构成制导、导航和控制分系统的几乎所有元件，都是利用 *MEMS* 和 *ASIM* 制造技术小型化的选择对象。*ASIM* 陀螺有希望成量级的降低成本和提高可靠性。一个集成的、标准化的高度测量系统，即一个可能的 *ASIM*，是更深层次讨论的对象。

#### 制导、导航与控制用的微型传感器和微型仪表。

以电子隧道电流为基础，喷气推进实验室创新的 *MEMS* 传感器可用来测量姿态。这种传感器也可以用于测量地球重力场升高一英尺的变化，还可以用作无制冷的红外传感器。

#### 利用纳米技术设计创新的微型卫星通信系统

通过采用集成互连和阻抗匹配网络，微机械加工技术已被用来制造小型毫米波喇叭天线和反射天线。微机械加工的波导也有几个有吸引力的方案。

#### 航天器温度控制用的纳米技术

讨论热交换微型管道的制造技术和介绍  $1kW/cm^2$  热交换器的运行，还介绍了在芯片上制造的能提供自调节的，通过泵、阀门及液体容



器闭路循环微冷却的 ASIM 的可能性。

### **纳米卫星系统的电源**

以普通音频速率在地球低轨道执行通信任务的纳米卫星只要求非常低的能量，卫星表面的太阳能电池就可以轻松地供给所需能量。但仍需要研究纳米电池、纳米燃料电池、薄膜电池与太阳能电池及其它小电源结合的适当的作用。

### **纳米技术在航天器爆炸系统的应用**

固态激光二极管引爆的航天器爆炸系统的进展，大大改进了分离系统的工艺、可靠性和安全性。空军空间与导弹系统中心(SMC)正努力把运载火箭使用的几百个器件标准化。一个目标是在这些爆炸系统工作时监控环境和激波传输。但是航天器爆炸系统采用纳米技术存在利弊两方面的因素。

## **关键技术**

### **小型、微型和纳米卫星**

从最初的空间计划开始，已经发射了许多种类的小卫星。最终的小型卫星会采用集成 ASIM 的微制造技术，产生纳米卫星或“芯片级卫星”，从而大幅度降低卫星成本和发射费用。

### **采用纳米技术的电子组件：多芯片模块的作用**

纳米技术在空间系统的应用最终会受到组件的限制，目前的工艺水平是多芯片模块(MCM) 组装技术。为了改善这个技术，航空航天公司资助的研究致力于高密度互连和高频网络的研究开发工作。

### **微光学技术在未来空军空间系统中的作用**

可以实现传统光学每个功能的微光学，已成为制造传感器、电子器件和 ASIM 其它部件自动制造工艺不可缺少的一部分。这样做的结