

# 微重力环境材料科学实验

陈诺夫

研究员,中国科学院半导体研究所,半导体材料重点实验室,北京 100083;中国科学院力学研究所,国家微重力实验室,北京 100080

关键词 微重力 空间材料科学 对流 浮力 流体静压力

在空间微重力环境中,对材料制备影响较大的对流、沉降、浮力和流体静压力等因素都消失了,为人类探索、研究新的材料规律和材料制备新技术提供了一个特殊实验环境。本文介绍了国际空间材料科学研究的历史和现状,以及我国空间半导体材料科学研究取得的主要成果。

## 1 微重力环境在材料科学实验中的作用

在太空进行材料制备和材料性能检验的研究统称为空间材料科学。外层空间可以为材料科学研究提供特殊的实验环境,包括空间微重力环境、超高真空环境、超洁净环境和辐射环境等。目前,绝大部分空间材料科学研究还仅利用空间的微重力环境。飞行器在外层空间围绕地球匀速转动,所受到的离心力与地球引力相抵消。飞行器中的物体所受到的地心引力仅相当于地球表面的万分之几,甚至千万分之几,即 $10^{-4}\sim 10^{-7}g$ 量级( $g$ 为地球表面的重力加速度)。因此,称空间飞行器中的引力水平为微重力。

我们知道,地面上流体中的粒子会发生沉降,而密度不同的两种流体也要发生浮起与沉降现象。以水和油的混合物为例,在地面重力场中,油总是浮在上面,而水总是沉降在底部。在空间微重环境中,对流、沉降、浮力、流体静压力等现象都消失了,另外一些物理现象却显现出来。例如,液体的表面张力使液体在不和其他物体接触时,紧紧抱成一团,在空中悬浮;液体和其他物体接触时,液体在物体表面能无限制地自由延展。太空毛细现象加剧了液体的浸润性,气体泡沫能均匀地分布在液体中,不同密度的液体可均匀混合、“和平共处”,这些现象对改进材料的制备、加工工艺和新材料的开发都十分有利。

在空间微重力条件下,流体静压力和浮力引起的对流被极大地抑制、甚至消失。熔体(溶液)中由于溶质比重不同引起的分层和沉降现象也随重力的减弱而消失。因此,在空间微重力环境中进行多元素材料的制备,例如化合物材料、多元合金材料、以及多元复合材料等,由

于流体静压力的消失,熔体(溶液)受器壁的约束减弱。为了消除器壁对材料制备的影响,还可以采用无容器材料制备方式。在微重力环境中,由于熔体(溶液)中不同比重的溶质可以均匀地混合,制备出的多元材料的组分和性质都更加均匀。在微重力环境中,由于浮力引起的对流消失,晶体生长时所受的扰动减小,生长出的晶体中的缺陷必然会减少。在空间微重力环境中,还可以发现被重力场所掩盖的一些材料性质和现象。总之,空间微重力环境为探索、发现材料的新性质、制备新材料提供了一个特殊的实验环境。

目前可以通过四种方法获得微重力实验条件:

第一种是落塔(或落井)。在高塔的顶端将实验设备自由下落,并采取措施,尽量减少空气阻力,使落体的加速度接近于地面重力加速度 $g$ ,可产生几秒钟的微重力环境。

第二种方法是飞机作抛物线飞行。飞机以 $45^\circ$ 角快速爬高,关闭发动机以后,飞机继续升高到最高点后以 $45^\circ$ 角缓慢下降,这样飞机的轨迹就构成了抛物线。当飞机沿抛物线飞行时,可产生大约十几秒的微重力环境。

第三种方法是用探测火箭产生减小的重力条件。在火箭熄火后,负载与箭体分离,在滑行期间为抛物线轨道。从负载分离到进入大气层之前,可获得几分钟时间的微重力环境。

第四种方法是轨道航天器。在航天器绕地球做轨道运动期间,地球对航天器的引力就是使航天器做轨道运动所需的向心力。这样,返回式卫星获得微重力环境的时间一般为十几天,航天飞机可达几十天,而空间站则是半永久式的。

前三种方法产生微重力环境的时间都很短,不适合进行长时间的科学研究。为了获得较长时间的微重力

环境,需要用返回式卫星、航天飞机或空间站。

从材料研究的角度,微重力环境是一个几乎无对流、无沉降和无静水压作用的特殊环境,易于实现纯扩散的晶体生长过程和无容器加工过程。利用这种特殊条件,可以进行晶体生长、合金凝固、特种玻璃和复合材料制备研究,获得地面上无法得到的晶格缺陷少、组分均匀、结构完整和性能优良的各类材料。同时,加深对材料科学规律的认识和理解,发现可适用于指导地面材料加工过程的新工艺、新方法,为形成新的高技术产业提供依据。

## 2 国际微重力材料科学的历史回顾

空间材料科学实验是与空间飞行技术的发展密切相关的,空间飞行器的研制成功为空间材料科学研究提供了有利的工具。1969年,前苏联在联盟-6号飞船上首次搭载了名为“火神”的空间炉,进行了金属焊接和合金熔化、结晶实验,开始了真正的空间材料科学实验。

世界上的发达国家,一定是材料科学研究的先进国家,例如:美国、俄罗斯、日本和德国等。同样,重视空间材料科学研究的国家也一定是材料研究的先进国家。目前,空间材料科学研究基本上都集中在美国、俄罗斯、欧空局、日本和加拿大等国家和地区。

利用空间微重力环境开展在地基条件下难以进行的金属、半导体、光学晶体和高分子材料等物理与化学特性的研究,丰富和充实材料科学理论,指导地基的材料制备与加工,已经成为空间材料科学研究领域的共识。

材料科学中一些重要基本理论问题、关键物性参数及物理化学特性由于涉及复杂实验环境而无法彻底澄清。空间微重力环境提供了一个无重力沉降及浮力对流影响的实验条件,可以促进上述问题的解决,改进地面材料制备与加工工艺。利用空间微重力环境开展地基难以制备的新型材料与高性能材料探索性研究,越来越受到人们的重视。

经过几十年的努力,微重力材料科学领域已经取得了一批研究成果,并展现出美好而诱人的应用前景。从1969年联盟-6号飞船上首次进行空间材料科学实验开始,经过进步、联盟、阿波罗、天空实验室、和平号空间站及光子号卫星等空间飞行器,到目前的国际空间站,为人类开展空间材料科学实验提供了有利的条件。空间材料科学研究涉及的材料有:①新型铸造合金;②半导体晶体;③高温陶瓷;④金属泡沫材料;⑤轻质金属基材料;⑥生物材料;⑦高分子材料;⑧智能与自修复材料;

⑨空间探测事业需求的飞行器空间防护材料、润滑与推进材料;⑩颗粒物;⑪电子晶体与光子晶体材料等。

尽管空间材料科学研究至今已进行30余年,认识到了许多新现象,但研究结果的深度、自洽性同地面类似研究相比,非常初步,有的结论禁不起推敲。但是,随着航天技术的不断进步,随着微重力材料科学理论不断完善和发展,将来一旦取得重大突破,可能产生巨大的经济效益,其价值目前还难以准确估量。

## 3 我国的微重力材料科学实验

1987年,我国首次利用返回式卫星进行了空间材料科学实验。在林兰英院士(图1)的领导下,中科院半导体所、航天集团五一〇所、中科院物理所等单位利用我国自行研制的返回式卫星,在空间微重力环境下第一次开展了从熔体中生长砷化镓单晶的实验,开辟了我国空间材料研究的新领域。在这次卫星的空间飞行时间里,林兰英院士领导的科研小组成功地采用熔体再结晶的方法,生长出了砷化镓单晶。这也是国际上在空间从熔体中生长出的第一根砷化镓单晶。

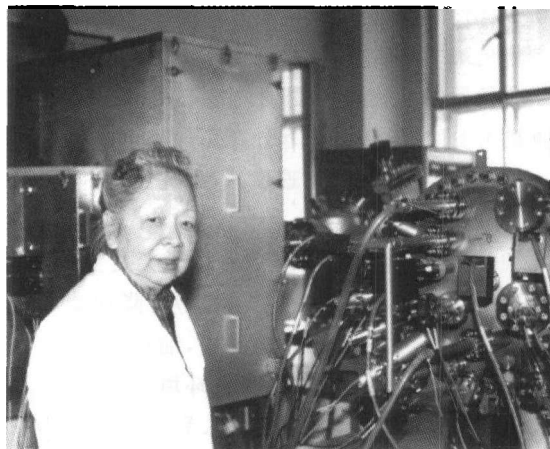


图1 半导体材料学家林兰英院士

2001年是一个值得纪念的里程碑,从1969年开始空间材料科学实验以来,在空间制备的材料性能始终未能达到制作器件的要求,即未能在空间制备出器件级的材料<sup>[1]</sup>。因为虽然在空间微重力环境中制备材料具有很多优势,但是由于受载荷与能源的限制,在空间制备材料的设备只具备最基本的功能,在使用功能和控制精度等方面无法与地面使用的设备相比。这一年我国用空间生长的半绝缘砷化镓单晶制作了低噪声场效应晶体管(图2)和模拟开关集成电路(图3)。这两种器件和电路的电学性能全面超过了用地面材料所作的相同器

件和电路<sup>[2]</sup>,特别是用空间材料制作的低噪声场效应晶体管的噪声仅为 0.78 dB,而用地面材料制作的相同器件的噪声都在 1.0 dB 以上。研究结果发表在国际著名学术刊物应用物理快报 (Applied Physics Letters) 上,受到国际同行的高度重视,多次在国际学术会议上作邀请报告。

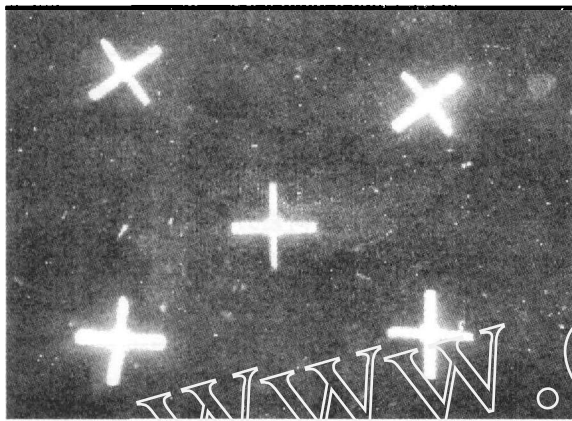


图2 用空间生长半绝缘砷化镓单晶制作的低噪声场效应晶体管

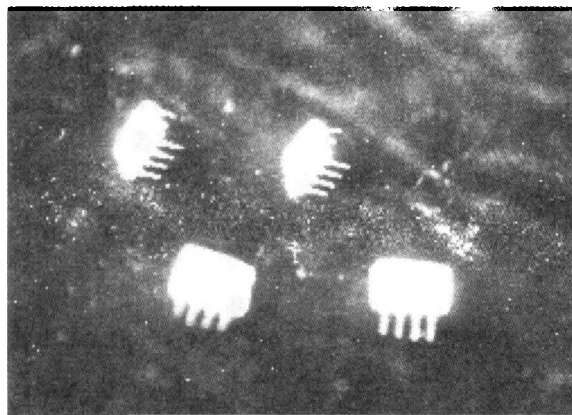


图3 用空间生长半绝缘砷化镓单晶制作的模拟开关集成电路

我国空间材料科学研究虽起步较晚,但经过 20 多年的不懈努力,现在无论是在空间材料加工装置制造,还是在空间材料制备研究领域,都已取得与国际同行平等对话的地位。

由于我国是发展中国家,在财力和技术等方面都无法和美、俄等空间大国相比,空间实验机会较少。到目前为止,我国在空间共有 7 次搭载空间材料实验的飞行,总共进行了 69 种(次)材料科学实验,一种材料最多

的实验次数为 5 次,而俄罗斯对于一种材料的空间飞行实验就达 75 次。可见我国急需增加空间材料科学实验的机会。特别是近期,很多高等院校都开始了空间材料科学研究,所以空间材料科学实验对航天器的需求更为迫切。

## 4 结 语

外层空间是一个人类认知最少的领域,空间微重力环境为人类探索发现新的材料规律和材料性质提供了特殊的实验条件,从材料研究的角度,微重力环境是一个几乎无对流、无沉降和无流体静压力作用的特殊环境,易于实现纯扩散的晶体生长过程和无容器加工过程。利用这种特殊条件,可以进行晶体生长、合金凝固、特种玻璃和复合材料制备研究,获得地面上无法得到的晶格缺陷少、组分均匀、结构完整和性能优良的各类材料。空间材料科学研究的结果可以用于地面材料制备工艺的改进,以及材料性能的提高。

(2007 年 8 月 2 日收到)

- 1 MIL' VIDKII M G, et al. Prostomolotov, semiconductors on the way to space technology[J]. J of Journals, 1998, 2(1): 6-13.
- 2 CHEN N F, ZHONG X R, LIN L Y. Comparison of field effect transistor characteristics between space-grown and earth-grown gallium arsenide single crystal substrates[J]. Appl Phys Lett, 2001, 78(4): 478-479.

## Materials Experiments under Microgravity

CHEN Nuo-fu

Professor, Key Lab of Semiconductor Materials ISCAS, Beijing 100083; National Microgravity Laboratory, CAS, Beijing 100080

**Abstract** The microgravity in out space provides human being a quite special environment for exploring new laws and new preparation methods of materials, because the convection, deposition, floating, and hydrodynamic pressure, which have great effects on the preparation of materials, disappear in microgravity environment. The internationally historical and current studies on materials under microgravity, and the study results in this field achieved in China are introduced in this paper.

**Key words** microgravity, space materials science, convection, floating, hydrodynamic pressure

(责任编辑:方守狮)