

电子材料与器件 第九届学术年会 论文集

中国真空学会电子材料与器件专业委员会

1992. 10.

目 录

001 卫星防污染工作概要	薛大同 (1)
002 21 世纪的材料与元器件——纳米电子学	徐敏龙 徐玉成 (10)
003 发展中的平板 CRT 技术——真空微电子学的重要应用领域	郭淑慈 (14)
004 离子注入聚苯胺材料的导电性能研究	於增文 朱锦良 刘兆民 (17)
005 介质谐振器材料钛酸盐陶瓷的研制	王硕仁 (21)
006 La-Mo 阴极及其应用	冯辅义 (24)
007 13X 分子筛的电负性与吸附性能的关系	孙大明 王玫 (29)
008 高压真空器件中的高牢固度室温吸气剂	秦光荣 詹锋 尉秀英 季耀权 (32)
009 蒸发薄膜的均匀性和结合力	李仲君 何育红 (36)
010 双掺 LiNbO ₃ 自倍频晶体高效激光增透膜	王金叶 刘琼 (39)
011 薄膜电阻拐弯部分有效方数的计算及低阻设计	章秀淦 郭革 (32)
012 用于质谱分析器的陶瓷环高阻膜的研制	毛祖尧 魏春珍 王从建 蔡连珍 (45)
013 用 AES 研究硅化钛复合膜生成	邹惠良 (49)
014 Si ₃ N ₄ 膜绝缘与击穿特性的研究	吴冲若 樊玉蕊 (52)
015 偏压对 α -Si:H 薄膜微结构的影响	张盖 吴中和 张旭 张晓林 晏继文 张光华 石白光 (60)
016 S 枪溅射沉积 W/Mo 膜的工艺和特性研究	钱锋 王向东 黄健 丁明清 (64)
017 超微粒子——聚乙烯薄膜的结构研究	高鸿钧 刘燕文 赵永强 刘维敏 薛增泉 吴全意 (67)
018 金刚石薄膜与微晶	袁磊 刘宁 (72)
019 硅氧化物薄膜折射率特性的研究	朱自强 胡敏 (75)
020 ZnOUPF 生长的动态分析及其表面光电电压谱研究	潘孝仁 赵大春 (79)
021 研究用于离子检测的通道电子倍增器	董引吾 (81)
022 多元线阵高温超导远红外 Bolometer 研制	杨德嘉 鄢凯 王吉云 经东 王子良 (84)
023 低惰性、高分辨率的硒化镉像管靶面	吕永积 董年初 (88)
024 医学影像设备与用 25 毫米硒砷碲像管 GS8812 及其在心血管造影设备中的应用	夏志如 (92)
025 CH ₄ /H ₂ 混合气体对 GaAs、InP、GaSb 的反应离子刻蚀	曹松彬 钱鹤 刘训春 (96)
026 铜铂丝装管试验情况	高玉成 (99)
027 彩管排气小车维修	任德荣 (102)
028 真空开关管的一次封排技术及真空性能分析	顾树仪 (106)
029 YBCO 薄膜红外探测器的发展	刘心田 (110)
030 彩色显象管的排气工艺	黄树昌 (113)
031 硝酸盐和硫酸盐制造工艺的研究	吴长贵 王先秀 (117)
032 微波介质陶瓷的发展	张诸礼 王筱珍 邓传益 (121)
033 真空在节能荧光灯中的重要性	陈曾济 季敬川 (124)
034 真空微电二极管及微位移传感器的研究	朱长纯 王海笑 刘君华 关辉 李毓民 (128)
035 陶瓷金属化批量生产实用工艺技术	赵厚沛 谈曼君 (132)
036 离子注入平面工艺在光电探测器器件研制中的应用	夏春华 杨文臣 (136)
037 利用网络技术快速进行 CH ₄ 质谱仪真空系统的检修	吴方 孔俊 张学林 彭红时 (140)

038	n- γ 分辨快中子探测器静态高真空的保持	龙 放 张国斌 欧阳晓平 曹锦云 (143)
039	TJ-500 铁磁性材料磁控管溅射设备	宦鸿信 王龙超 陈平 (147)
040	四极质谱定量分析的可能性及努力方向	史小军 (152)
041	低气压弧光放电阴极发射性能的测试	宗国瑞 许永龙 (156)
042	锆—石墨吸气剂在旋转阳极 X 线管中的应用	蔡曼莉 (160)
043	硅烷等离子体光发射谱的空间分布特性	晏继文 冯意炯 奚中和 石自光 张晓林 张光华 (163)
044	摄像靶用 $Sb_2S_3:Sb$ 的结构模型及其共熔合成机理	李英杰 (167)
045	微间隙击穿性能的研究	吴冲若 樊玉薇 (171)
046	辉光放电电子束瞬态湿火研究	李秀琼 卢殿通 陈维德 杨军 (177)
047	硅烷等离子体空间分布 OES 中的氢稀释效应	晏继文 冯意炯 奚中和 石自光 张晓林 张光华 (180)
048	激光束与半导体材料相互作用机理的研究	徐国昌 (183)
049	用分子束研究 CO 与 H_2 在 Ni 表面吸脱附动力学	席光康 刘键 李胜林 贺添喜 (186)
050	GaAs / Si 衬底电路制备中 Ge 元素分布影响的分析研究	邵力为 李明祥 周文华 (190)
051	BW-1400、BW-2000 型标准温度灯研制	钱锋 (193)
052	CdSe 光电导靶的物性研究	封淑华 朱周霞 周荣兰 具昌南 (197)
053	ECR 等离子体在薄膜技术中的应用	周忠毅 白绍英 (201)
054	一种新型垂直偏转系统慢波线的工艺研究	谈曼君 赵厚沛 (205)
055	现代有机电子功能薄膜及器件	杨大本 (209)
056	扫描隧道显微技术、应用及进展	王林 韦钰 (213)
057	像素管技术进展	严增耀 (217)
058	一种新颖的石英晶土微量天平探头	陈章其 吴冲若 张根柱 周刚 (221)
059	导电微粒 / 聚合物复合材料的制备及其电气性能的研究	李永祥 吴冲若 刘泽 (226)
060	微气相色谱分离柱的研究	陈章其 吴冲若 林远柱 (234)
061	溅射离子泵小抽速测试方法之实验	杨静安 刘世杰 (238)
062	热阴极失效分析	王亦曼 李季 (241)
063	ZZ-3200J 型高真空镀膜机的研制	李云奇等 (244)
064	M-CuTCNQ-Cu 开关特性的研究	吴海明 (249)
065	氧化镍(NiO_x)薄膜的电色性能	申功烈 (252)
066	模拟气体燃烧器	吴冲若 邱洁真 张楼英 (255)
067	钨添加剂对 SnO_2 元件气敏性能的影响	吴冲若 邱洁真 林海安 (259)
068	膜厚监测仪在声表面波器件中的应用	戴金华 汤长春 (264)
069	聚酰亚胺 LB 膜 MIS 结构 C-V 特性	林海安 吴冲若

附: 题录

070	Y-100 / 150 型风冷脂润滑分子泵的研制	杨振银
071	用 XPS 对电子管栅极失效原因的分析之一	刘顺华 率川 张国民 李巧云
072	AgZn50at% 光记录合金组织结构和光学性能研究	许昆 贾德履

073	专家信息库的建立——红外材料器件薄膜文献信息库	王素儒
074	铝膜的等离子体氧化	孙大明 刘国贵
075	PECVD SiO ₂ 在红外探测器工艺中的应用	宋泉珍
076	制备 PbSe 光敏模的一种新工艺	赵崇花
077	GaAs 光电阴极在激活过程中表面分析数据及微机处理	黄振武
078	贵金属真空热处理及真空炉发展趋势	唐致沪
079	显像管排气机真空测量装置	罗文生
080	高功率横流 CO ₂ 气体激光器的热转移	唐士清
081	1.06μ 激光增透膜的实时控制和损伤阈值	王明利 范正修
082	小型真空可变电容器的研制	董谦 王光荣 顾瑞英

卫星防污染工作概要

薛大同

兰州物理研究所

1. 引言

卫星上许多工作部件要求有清洁的表面,例如光学镜头、观察窗、太阳电池盖片、热控涂层、继电器触点、马达电刷、波导内壁等等。这些敏感表面不仅在零部件制造、分系统装配、总装过程中有可能被污染,而且有可能在地面热真空试验和空间运行期间,遭受不同程度的污染。例如,润滑或导热用的油脂会通过表面爬移到达敏感表面;姿控发动机喷出的羽状烟柱、燃料电池抛出物及工作仓排出的废物、废液会形成明显的粒子状污染;卫星本身的非金属材料在真空、受热情况下会放出可凝挥发物,它们以单个分子的形式蒸发、升华、分解逸出,而后以随机方式沉积在冷的裸露表面上,形成分子污染;地面热真空试验中有油真空机组的油污染及工况结束后,深冷热沉壁板升温过程中释放出原来被冷凝的污染物,粘附到相对温度较低的航天器敏感表面上等等。

我国卫星的防污染工作,至今已有近20年历史,而作为基础工作的材料出气测试及其机理探讨,更可以追溯到80年代初。其间,建立了国际通用的材料出气筛选设备,建立了具有我国特色的原位质量损失测试设备、原位可凝挥发物测试设备、油脂饱和蒸汽压测试设备、材料出气速率测试设备,研制了石英晶体微量天平、可供星载的分子污染监测器,测试了几百种我国各个型号卫星用材的质量损失、可凝挥发物、水蒸汽回吸量以及油脂饱和蒸汽压、出气速率等数以千计的数据,并且发展了与污染加速预估和污染空间输运分布有关的理论模型和数值计算方法,还建立了《真空中材料挥发性能测试方法》、《卫星真空热试验污染控制方法》等航天工业标准。这些工作,为我国卫星的“防污染”,奠定了良好的基础。

然而,我国发展实用型卫星特别是长寿命卫星的时间还不长,卫星防污染工作尚缺乏经验和周密的计划。随着卫星性能指标的提高,防污染的重要性明显地暴露出来。从而引起各个型号卫星研制工作的重视,有的从争取任务开始,就把“防污染”作为论证报告的重要附录之一;在模飞阶段,就注意收集与污染有关的材料数据,并对关键材料进行了出气筛选测试,使卫星防污染工作迈出了可喜的一步。

2. 卫星防污染工作的一般内容

结合我们自己的经验和了解到的国内外卫星防污染措施,初步归纳卫星防污染工作应包括防空间污染和防地面污染两部分。具体来说,包括分子污染、羽流污染、爬移污染、沾污及真空试验污染五个方面。

2.1 分子污染

卫星防污染最主要的是防止空间环境中形成的分子污染。分子污染包括水汽、二氧化碳等无机物及摩尔质量为 $50\sim 800\text{g/mol}$ 的有机物。防止分子污染要从减少污染源、减少污染物

沉积、减少污染物危害及软科学几个方面着手。在附录1中罗列了这些方面已经开展和需要开展的工作。

分子污染的防护措施可以概括为预防、排除、抑制三种，其中预防是最主要的。现将具体措施列举如下：

1) 材料选择规范

除了规定可挥发物含量的可允上限值外，还应该指出材料的优选方向。例如，油润滑剂若采用全氟烷基聚醚对防污染是比较理想的，因为它不粘着，在表面上容易去除，轰击时完全分解成挥发物质，不留残渣。又如有机材料应尽量使用聚合材料，因为聚合物分子量可达几千或更大，蒸发困难。如果必须使用非聚合材料，应尽量选用分子量达几百或更高的，以减少蒸发。再如聚合物固化温度越低，固化时间越短，可挥发物就越多，所以如果可能的话，要少用室温固化材料。

2) 材料预处理工艺建议

如果材料的可挥发物含量超标，又没有好的替代材料，就应制定恰当的预处理规范，通常的做法是热真空浸泡。如果没有热真空条件，仅在大气下加热，用热的干燥氮气冲洗，或在室温下长时间真空浸泡，也有部分效果。

3) 污染物排除措施

在空间，有时也采用加热办法去污。此外，还可以用射频等离子体发生器形成原子氧，使聚合物薄膜迅速无害氧化。

4) 抑制污染影响

在采取以上各种措施后，还可以采取各种抑制污染影响的措施。例如，使污染源与敏感表面隔开、远离或改变方向和视场；尽量提高敏感表面温度以加快污染物解吸、蒸发；在敏感表面上涂覆一层对污染物具有小的粘着几率的薄膜以减少污染或涂覆浸润性好的薄膜以减少污染膜对光的散射等等。

2.2 羽流污染

羽流污染是在空间真空和微重力条件下，喷气发动机、火工品等喷出的羽状烟柱造成的颗粒状污染，有可能对光学窗、热控涂层、太阳能电池等造成严重影响，一般来说，羽流污染与所用燃料种类、发动机工作方式、羽流和敏感表面相对位置及敏感表面种类都有关系。羽流污染可以使用显微摄影、全息摄影、石英晶体微量天平称重等方法检测。在地面模拟羽流污染需要高空点火模拟设备，模拟试验费用浩大，所以，羽流污染模拟不是必测项目，只有特别关键时才这样做。防止羽流污染的主要途径是几何位置上避让或采取遮挡措施。现在还没有数值模拟羽流污染的方法，设计时往往仅依据经验留足保险系数，充分避让和遮挡。在卫星防污染工作中，羽流污染不占主要地位。

2.3 爬移污染

爬移也就是铺展或蔓延，是纯粹的界面化学问题。因此，只要有不浸润的阻挡圈，就可以防止爬移。在这阻挡圈上，液体的表面张力应大于固体表面的“临界表面张力”。具体做法上既可以采用提高液体表面张力的办法，也可以采用降低固体表面“临界表面张力”的办法。后者包括：

1) 选用自疏液性液体。这种液体在固体表面上会形成一层吸着膜，膜的“临界表面张

力”比液体本身的表面张力小；

2) 在液体中添加疏油性添加剂。此添加剂形成的吸着膜的“临界表面张力”比该液体的表面张力小；

3) 涂覆低能高分子膜。它们具有很低的“临界表面张力”。

目前，用得最多的是最后一种办法，即涂覆防爬涂层的办法。

2.4 沾污

在卫星产品加工、清洗、装配、试验、储运各个阶段，都可能发生沾污，在附录1中罗列了这些阶段可能存在的沾污源。对这些沾污源，需要根据实际情况，分别予以恰当的控制。

材料机加工中的油污、抛光液、清洗中的有机溶剂、甚至手汗都是可疑的污染源。有机溶剂如果能溶解被清洗材料，或者会渗透进材料中，或者会和材料起化学变化，则此种有机溶剂必须禁用。

2.5 真空试验污染

卫星部件及整星往往要经过地面热真空环境试验，试验中有可能使卫星污染。真空试验污染是一种地面人工环境中的分子污染，与空间真空环境中的分子污染的差别是：

1) 卫星产品中逸出的污染物打到器壁上后，可能重新返回到产品上，特别是工况结束热沉升温时，这一现象最为突出；

2) 抽气机组可能存在有害污染源；

3) 真空室可能不够清洁，特别是前次试验凝结的污染物，有可能成为下次试验的污染源；

4) 真空室内的各种装具、电缆、接插件、绝缘材料等也有可能成为污染源。

为了防止污染，实验前要将真空室长期高温烘烤，至少100℃，48h，以便去除前次试验中凝结在器壁上的污染物；真空室的抽速与航天器体积比要尽量大，深冷壁板可起到分子沉作用，防止了航天器逸出的污染物从器壁返回星体；热工况模拟如采用鼠笼加热，鼠笼在冷工况时也要保持温度高于航天器最高温度点，以免鼠笼上沉积航天器逸出的污染物，在热工况时又返回到星体的某些低温表面；工况结束时，深冷壁板要缓慢升温，最好比星体温度仅高几摄氏度，以免壁板上凝结的污染物返回星体，如果此时能充10Pa左右的干燥氮气，使分子平均自由程显著缩短，可大大减少壁板上凝结的污染物返回星体；如果采用扩散泵抽气机组，由于开机和停机时返油量最大，因此如能在此时充入少量干燥氮气，可以减少返油。

地面环境试验造成的污染可以选用恰当的去垢剂、有机溶剂清洗，或用气流冲洗、热真空浸泡、高频加热、电子轰击、紫外照射等办法去除。

3. 卫星防污染工作的策略

我们认为卫星防污染工作的策略应该是：统筹安排，分头把关，全面控制，重点防护。

统筹安排包括两层意思：一是防污染工作要贯穿在整个型号研制的始终，走在型号研制的前面，不要等到初样接近定型时再去考虑防污染问题；二是总体、有关分系统及部件研制部门、试验评价测试部门、总装部门，都要有人分管防污染工作，并形成相互协调的机构。

分头把关指把整星污染要做的工作梳理清楚，然后根据专业分工和特长，分头去办。例

如：羽流污染由总体、姿态控制部门负责；爬移污染由各分系统直接与有机化学专业所联系解决；沾污在统一的防污染指南指导下由研制、试验单位负责把关；真空试验污染由环模试验部门及进行真空试验的其它专业所负责把关，空间真空技术专业所着重从材料筛选、去气、改性等减少污染源的方法及污染检测、预估、模拟、机理探讨等软科学上做工作；而防污染的规范，包括材料筛选规范、材料处理规范、环境控制规范、防污染设计准则等则由前述防污染协调机构集体起草报质量部门和总师系统审批。

全面控制指除加严防护部位以外，一律按统一的卫星洁净度控制指南去做，使之达到卫星防污染的一般要求，而不仔细预估每一环节对整星污染和寿命的影响究竟有多大。例如：应明确规定卫星上所有非金属材料都要按QJ1558-88（相当于国际通用的ASTM E595-90）标准作出气筛选试验；还可以进一步规定对CVM（收集到的可凝挥发物）明显超过0.1%的材料给出红外谱图，作为了解污染物成份和综合分析污染物来源的基础。

重点防护指对卫星关键部位，要确保在寿命期内的污染不致造成性能下降超出允许值，这就要从减少污染源、减少污染物沉积、减少污染物危害和软科学等几个环节仔细地做工作。其中减少污染源包括材料筛选、控制工艺、控制环境、材料去气、材料改性控制材料用量及研制新材料等方面；减少污染物沉积包括几何上远离、相背、遮挡，采用低温、粗糙的易吸附材料中途吸附及敏感表面选用不易吸附的材料，加工尽量光滑和提高工作温度使污染物尽可能减少附着；减少污染物危害包括采用加热、轰击及其它去污技术去除污染，防止污染物交链、分解出有害产物、与敏感表面化合等恶化现象的发生，采用提高性能或增加备份等冗余设计措施；此外，为了保证寿命期内污染不致造成性能下降超出允许值，还要开展污染物的目测、成份分析、测厚、测性能及表面分析等污染物检测工作，开展可凝物逸出量的加速测试、污染物的空间输运及分布、污染物沉积引起的性能衰减等污染预估工作和出气机理、空间输运过程、污染物沉积过程、污染物谱图识别等机理探讨工作。有必要时，还要开展污染模拟试验，以判明污染预估的准确性。以上各项工作如何有选择、有步骤地开展，还要结合卫星重点防污部位的实际需要及进度、计划、经费等状况具体安排，逐项落实。

4. 几点具体的防污建议

1) 所用的全部非金属材料都要按 QJ1558-88（相当于国际通用的 ASTM E595-90）标准作出气筛选试验，测出它们的TML、CVM、WVR三项指标。如果已经在其它型号上做过该项试验，原则上可以免做，但如果厂家、原料、配比、制造工艺、固化工艺、处理工艺等有变化或未知，则需重做。

2) 关键防污部件的包装材料，要和卫星用材一样进行出气筛选试验。

3) 在综合比较、分析的基础上，草拟我国的TML、CVM、WVR三项指标的分级筛选线及各级的适用对象。

4) 逐步建立我国卫星用非金属材料可凝挥发物的红外谱库，作为了解污染物成份和综合分析污染来源的基础。

5) 关键防污部件所用有机溶剂，要进行非挥发性残留物含量测定。

6) 热真空环模试验的污染量，要用石英晶体微量天平监测，为了保证监测的可靠性和精度，宜将探头恒温保持在产品可能达到的最低温度以下。

7) 加速起草我国的卫星洁净度控制指南, 并尽快试行。

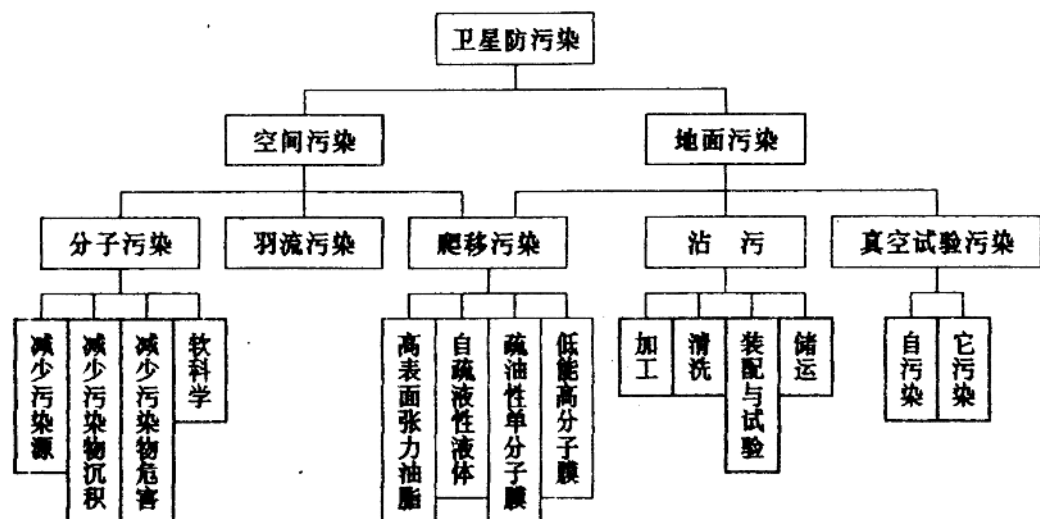
参考文献

- 1 中华人民共和国航天工业部部标准: QJ 1558-88. 真空中材料挥发性能测试方法. 1988-04-25发布;
- 2 ASTM Designation: E595-90. Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected volatile Condensable Materials from Outgassing in a vacuum Environment. Published April 1990;
- 3 薛大同. 航天材料的真空性能. 见: 中国真空学会电子材料与器件专业委员会第七届学术年会论文集(摘要), 江苏扬州, 1990; 36-38
- 4 薛大同, 魏向荣, 王先荣等. 空间材料出气筛选装置的研制与试验. 见: 全国电子材料与器件学术交流会, 成都, 1991;
- 5 ESA PSS-01-201 Issue 1. Contamination and Cleanliness Control. August 1983;
- 6 Patrick T J. Space Environment and Vacuum Properties of Spacecraft Materials. Vacuum, 1981; 31(8/9): 351
- 7 Dauphin J. Materials in Space: Working in a Vacuum. Vacuum, 1982; 32(10/11): 669
- 8 薛大同. 石英晶体微量天平问答. 真空与低温, 1984; 3 (3): 84

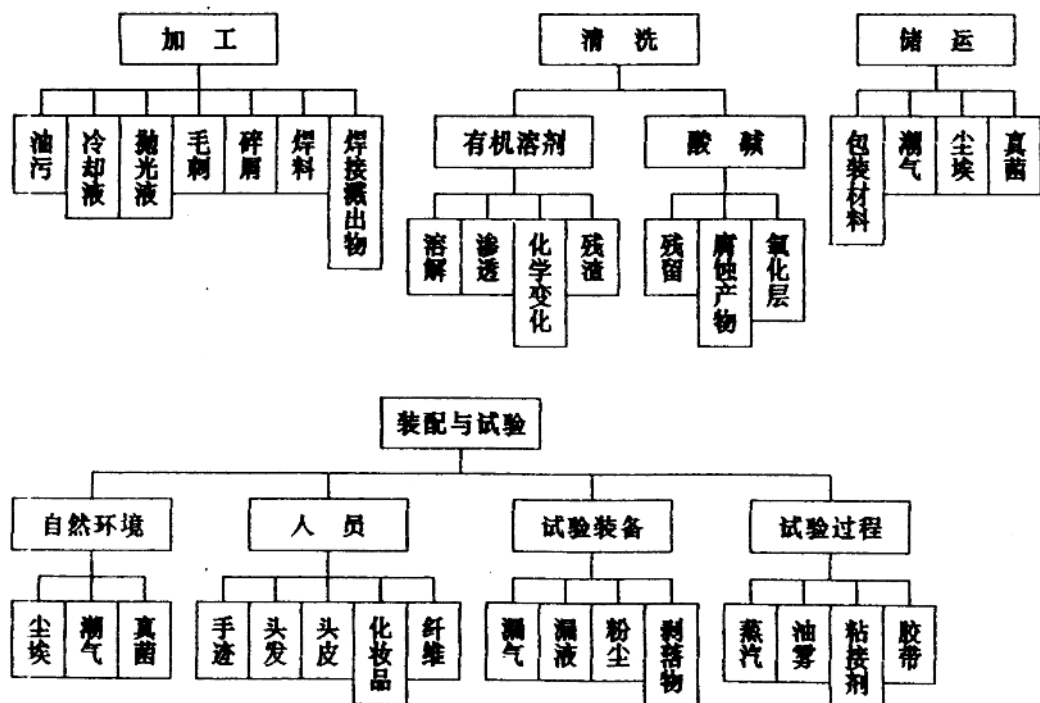
附录1 卫星防污染工作内容与方法框图

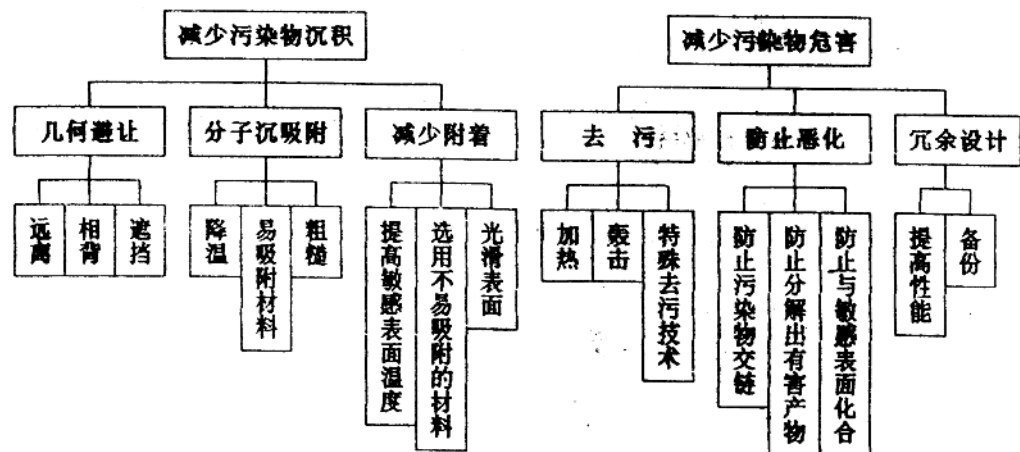
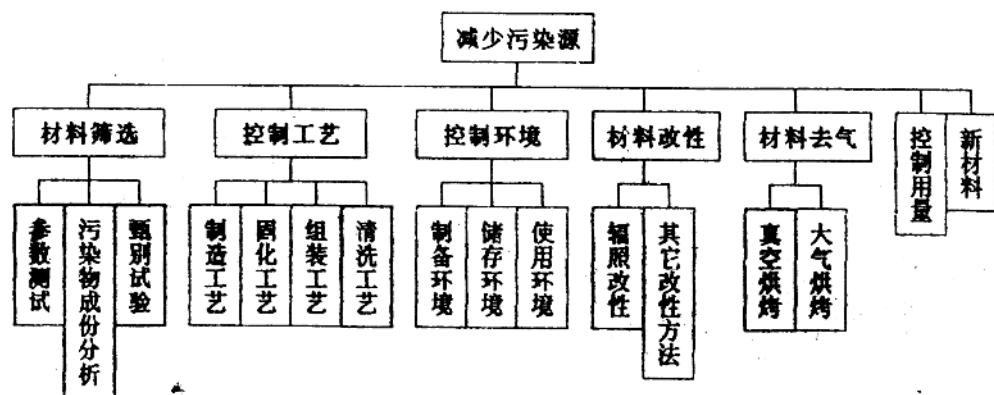
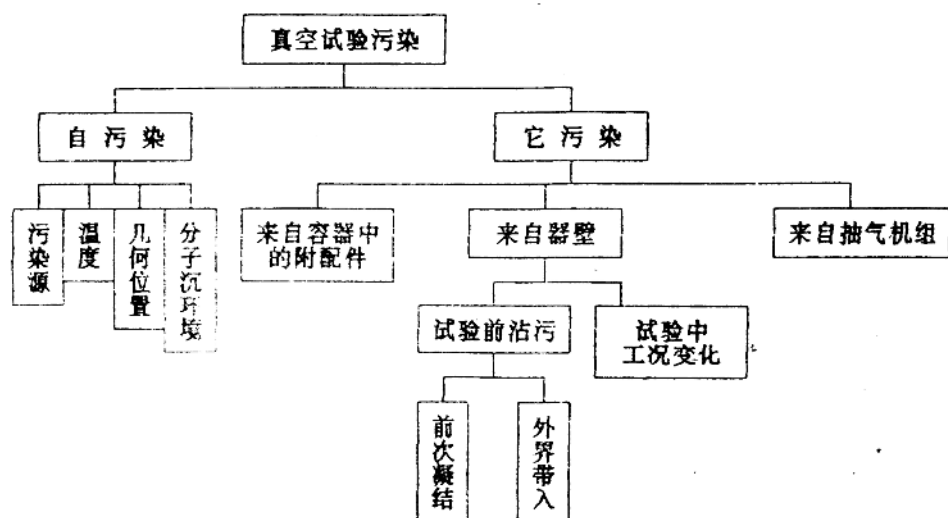
卫星防污染工作内容与方法框图

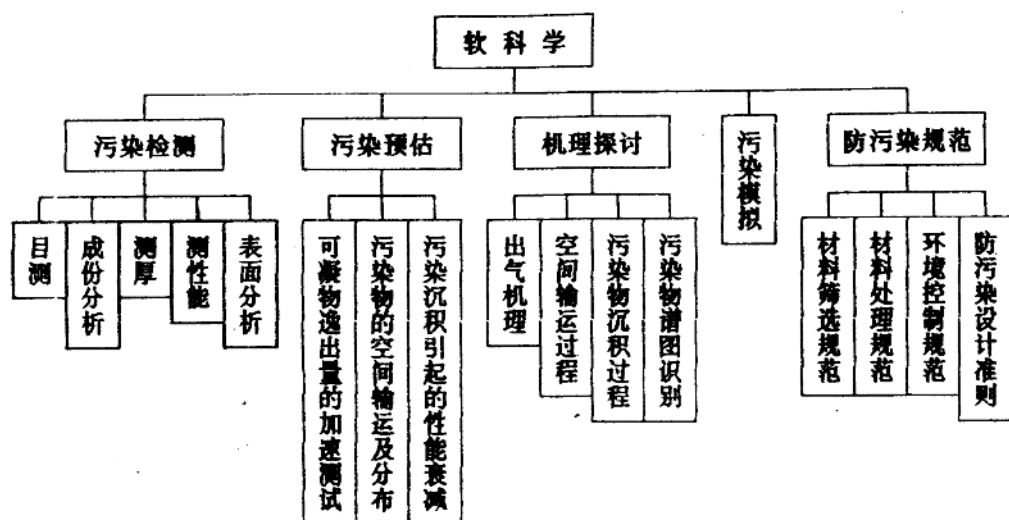
1. 一级框图



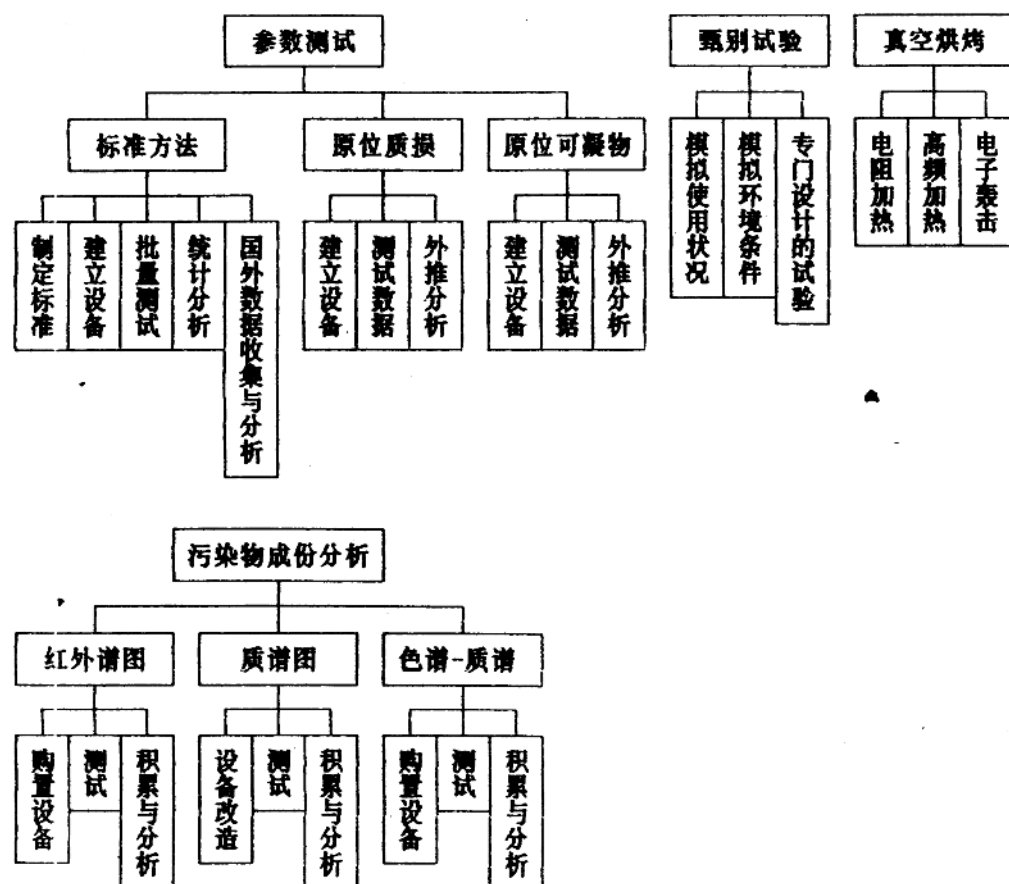
2. 二级框图

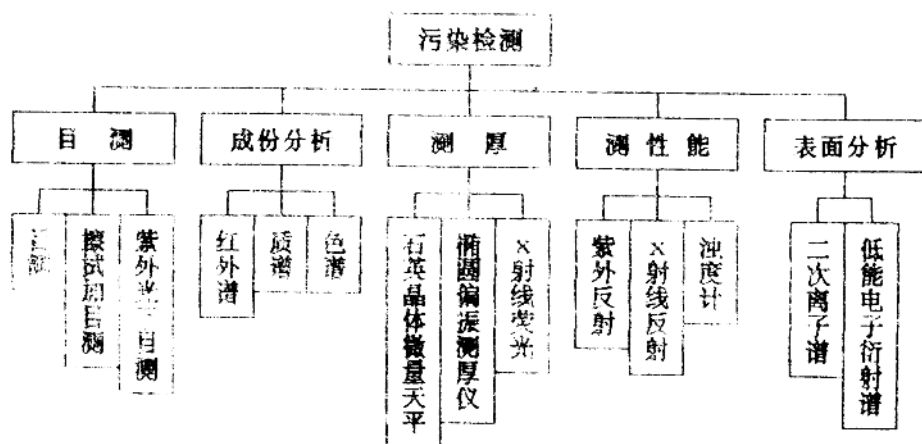
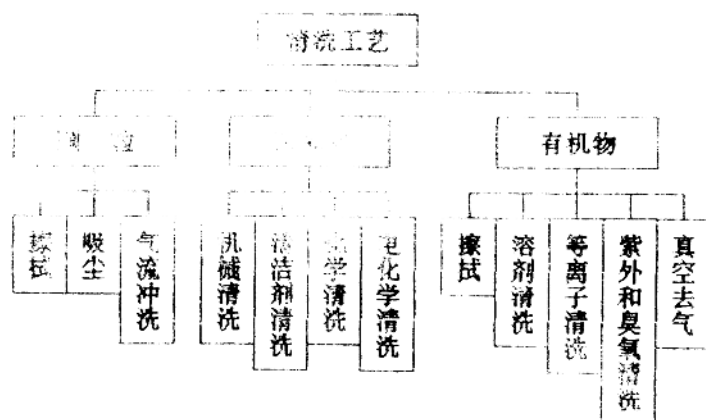






3. 三级框图





21 世纪的电子材料与元器件——纳米电子学

徐毓龙 徐玉成

西安电子科技大学, 710071, 西安

一、引言

纵观电子材料与元器件的发展史, 不难看出, 精细化、微型化是它们发展的重要趋势。电子陶瓷和集成电路的发展史很生动地显示了这种发展趋势。我们祖先创造的各种陶、瓷器是以粘土为主要原材料的, 今天的各种先进电子陶瓷则是以精细粉料, 超微粒—纳米级粉料为基础。1958 年德克萨斯公司推出的第一块集成电路, 将一个晶体管, 三个电阻和一个电容器作在长 1cm 宽 0.5cm 的面积上, 1969 年英托尔公司在同样面积上作出了约有 1000 个元件的 256RAM。1990 年日本 Hitachi 公司宣布了 64 兆位 RAM 的原型, 在 1cm^2 的面积上制作了约 1 亿个元件。陶瓷材料的超微粒化、集成电路的微小型化, 不仅提高了现有电子材料和元器件的性能, 而且产生了许多现有电子材料和元器件无法与其相比的新型电子材料和元器件, 这就是纳米级电子材料和元器件。纳米级电子学融材料、元器件和电路为一体, 许多人认为它是 21 世纪的电子材料和元器件⁽¹⁾。

纳米级电子材料与元器件主要包括两个方面的内容:

1. 纳米级超细粉料及由其制成的元器件。
2. 纳米级半导体器件和集成电路。纳米级的范围一般指 1nm 到 100nm。本文重点在第二方面。

二、纳米级加工技术

要做出纳米级的元器件和电路, 要求器件和电路的纵向和横向尺寸都要控制在纳米级水平, 即 1nm 到 100nm 范围。

2.1 纵向加工技术——各种先进的外延技术

近年来在分子束外延 (MBE) 和金属有机气相沉积 (MOCVD) 等薄膜生长技术基础上, 各种超薄膜 (层) 生长技术相继被开发出来, 已能实现单原子薄膜生长, 材料纵向尺寸控制精度已高达 2Å。

改进 MBE 和 MOCVD 技术, 提高精度到原子级的原子层外延 (ALE) 技术⁽²⁾有: 原子层数字外延、迁移加强原子层外延、光辅助外延 (PCVD)、激光加强原子层外延等。

2.1.1 迁移加强原子层外延⁽¹⁾

用 MBE 和 MOCVD 虽然可以生长超薄 III—V 族化合物半导体, 例如 GaAs/AlGaAs 异质结, 但由于在界面上存在许多原子台阶, 得到的异质结界面不光滑⁽²⁾。迁移加强外延 (MEE) 利用无砷 (As) 气氛中镓 (Ga) 原子和铝 (Al) 原子的快速迁移, 交替沉积镓和铝原子及砷分子到生长面上, 在 300℃ 的低温下能得到界面光滑的 GaAs/AlGaAs 异质结构。

2.1.2 原子层数字外延⁽¹⁾

这种技术的突出特点是所生长的外延层厚度和生长温度、源压力、生长时间等模拟量无关, 完全由源气体开关操作的次数这个数字量决定, 每操作一次长一个原子厚的外延层。

近年来外延技术不但已从制造 N 型区和 P 型区都是相同半导体材料的同质结扩展到 N 型区和 P 型区是不同半导体材料的异质结, 还扩展到其它类型的材料, 例如在碲 (Te) 衬底上生长准一维硒 (Se) 膜。通常半导体材料的清洁表面呈现悬挂键, 如锗、硅等半导体清洁表面那样, 外延时要求晶格匹配。而硒、碲等材料的清洁表面没有悬挂键, 外延生长靠范德瓦尔斯 (Van Der Waals) 力, 这种外延叫范德瓦尔斯外延⁽¹⁾。它是生长高质量原子级厚度的异质结构的有力工具之一。

近年外延技术的一个热门是制造硅基半导体异质结⁽³⁾。现有的异质结, 都是由 III—V 族, II—VI 族化合物半导体制造的, 和硅比起来, 这些材料至少贵十倍以上, 而且它们的机械性能和热性能差, 缺陷密度低的大晶片很难制作, 加之又没有像 (SiO₂) 那样的氧化物, 因而虽然异质结有许多突出的优点, 但 III—V 族, II—VI 族化合物半导体异质结器件只在硅材料不能显示威力的光电器件领域取得一定的成功。充分发挥异质结构器件威力的办法是寻找和硅匹配的半导体材料, 制作硅基异质结构, Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结是成功的例子。硅和锗的晶格常数相差 4.2%, GeSi/Si 异质结外延由于晶格失配是很难的, 但利用新近研究的应变层外延技术, 生长出性能良好的 Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结, 层的厚度可控制到单原子。我国中电总公司某所也在研究这项技术。

2.2 横向加工技术—高分辨率电子束和聚焦离子束技术

平面工艺是半导体工业最强有力的生产技术, 纳米电子学无疑要继承平面工艺的精华。平面工艺中器件的横向尺寸控制精度取决于掩模 (版) 精度和光刻胶的性质等因素, 传统制版、光刻技术用可见光或紫外线作光源, 精度不能满足纳米级加工技术的要求。英国开文敌什 (Cavendish) 实验室, 美国海军研究实验室和欧洲、日本的一些实验室正致力于纳米级结构制造技术的研究, 开发高分辨率电子束和聚焦离子束技术⁽⁴⁾。现已制出称作“纳米印刷机” (Nanowriter) 的电子束系统, 它的工作电压 100KV, 束电流几皮安, 束点直径 4—5nm, 用 50nm 厚的 PMMA 抗蚀剂已作出小于 10nm 线宽的图案。

三、纳米级器件和电路的物理基础

纳米级电子学的物理基础是异质结构、超晶格和各种量子干涉效应。

3.1 异质结构

最简单的异质结构是两层性质不同的半导体薄层材料如 GaAs 和 AlAs 构成的异质结。安德森 (Anderson) 指出, 在异质结界面会出现载流子富集的薄层, 在这薄层的电子只能在异质结界面方向作自由运动, 在垂直异质结界面方向的运动是量子化的。这一载流子富集的薄层叫二维电子气 (2DEG)。在低温下 2DEG 中载流子的迁移率远大于体内其它地方载流子的迁移率, 这称作 2DEG 中的迁移率增强效应。由于 GaAs 中电子的有效质量很小, 在 GaAs 中很容易观察这种迁移率增强效应。

3.2 超晶格

超晶格的概念是 Esaki 和 Tsu 在七十年代初首先提出的。他们设想用禁带宽度不同的半导体薄层 GaAs 和 AlGaAs 交替排列构成周期性异质结构, 由于 AlGaAs 的禁带宽度大于 GaAs 的禁带宽度, 这种结构形成了周期性排列的电子和空穴的势阱, 叫量子阱。若半导体薄层足够薄, 那么载流子在垂直超晶格平面方向的运动是量子化的, 而在平行于超晶格平面方向的运动是非量子化的。

另一种超晶格, 叫掺杂超晶格, 或 $n-i-p-i$ 超晶格, 它是在半导体材料中周期性地进行 n 型和 p 型掺杂而做成的。这种超晶格的一个重要性质是载流子有效寿命十分长。

3.3 各种量子干涉效应

当器件的尺寸和电子的平均自由程或电子波相干长度相当时, 电子输运性质会严重偏离现在用来描述电子器件电性质的扩散—漂移理论的结果。这时, 电子在器件内的运动不受散射或碰撞, 作所谓无碰撞输运 (Ballistic transport), 电子的波动性本质主导器件的性质, 因而各种量子干涉效应在纳米级器件和电路中显得十分重要。这些效应包括: 量子约束 (Quantum Confinement)、单电子干涉 (Single electron interference)、无碰撞电子输运 (Ballistic transport)、 $A-B$ (Aharonov-Bohm) 效应、 $A-B$ 振荡等等。

下面只简介人们不大熟悉的 $A-B$ 效应。在经典电动力学中, 电磁学完全由电场和磁场来描写, 基本电动力学方程也只由这些场来完全描写。但是在量子力学中, “势”代替“场”被引进薛定格方程。1959 年 Aharonov 和 Bohm 指出, 当电子波通过无场区域时, 它会受到矢势的作用。最近人们观测到, 在低温量子线中磁阻与 $A-B$ 效应有关的 $A-B$ 振荡现象。

在异质结构中出现了二维电子气的概念。二维电子系统的逻辑延伸是一维电子系统, 或称量子线, 先进的加工技术已能制造量子线。二维电子系统的最后延伸是零维电子系统, 即量子点。所以在纳米电子学中, 低维物理也是一个重要基础。

四、纳米级新器件

4.1 高电子迁移率晶体管 (HEMT) ⁽⁵⁾

利用 2DEG 的迁移率增强效应, Minura 和他的合作者 1980 年开发了

AlGaAs/GaAs 异质结 MOS 晶体管, 称之为高电子迁移率晶体管 (HEMT)。它还有许多其它名称, 例如调制掺杂场效应晶体管 (MODFET), 选择掺杂异质结晶体管 (SDHT), 二维电子气场效应晶体管 (TEGFET) 等。

2DEG 的高迁移率和纳米级先进加工技术相结合, 使 HEMT 成为当今世界上速度最快的器件, 已经做出 AlGaAs/GaAs、AlGaAs/GaInAs/GaAs、AlInAs/GaInAs/InP 等结构的 HEMT, 电流增益截止频率 f_T 从 1984 年的 50GHz 提高到 1989 年的 250GHz, 可望很快达到 400GHz。它会在微波, 毫米波低噪声放大器, 功率放大器, 超宽带行波放大器和超高速数字逻辑电路等领域得到越来越广泛的应用⁽⁵⁾。

4.2 异质结激光器

随着各种先进外延技术的出现, 双异质结激光器和多量子阱 (MQW) 激光器相继问世。由于异质结构 2DEG 的优异性能和有源区可以做到纳米级厚, 它们的性能远优于它们的先驱——同质结激光器。由于 III—V 族, II—VI 族化合物半导体混晶很容易进行禁带宽度调节, 因而可将异质结构的激光器调节在 SiO₂ 通讯光纤损耗最低的 1 μ m 和 1.3~1.5 μ m 波段, 因此这些激光器在光纤通讯中将发挥很大的作用⁽⁶⁾。

4.3 共振隧道器件^{(1),(7)}

当势垒足够薄时, 微观粒子穿透势垒的隧道效应十分显著, 对于多势垒的半导体结构, 当邻近量子势阱的子带能量相同时, 隧穿几率发生共振, 叫共振隧道。Chang 等人于 1974 年首次观察到在双势垒半导体结构中的共振隧道现象。

基于量子约束效应和共振隧道现象, 人们开发了和正在开发着许多有前途的共振隧道器件, 如共振隧道二极管 (RTD), 共振隧道晶体管 (RTT), 共振隧道双极晶体管 (RTB), 表面共振隧道晶体管 (SRTT) 等。

这些多势垒结构共振隧道器件的 I—V 特性曲线上呈现一个至几个峰值, 器件工作在某些区域呈现负微分电阻, 这些特性会在实现各种逻辑功能时得到应用。

参考文献

1. Proceedings of the First International Conference on Electronic Materials(1989), Co-edited by T. Sugano, R.P.H.Chang.
2. L.Goldstein et al, Jpn. J. Appl. 22(1983)1491.
3. J.C.Bean, Proceeding of IEEE, Vol. 80, No. 4(1992)571.
4. H.Ahmed, Proceedings of IEEE, Vol. 79, No. 8(1991)1140.
5. L.D.Nguyen, et al, Proceedings of IEEE, Vol. 80, No.4(1992)494.
6. Lee, Proceedings of IEEE, Vol. 79, No. 3(1991)253.
7. M.Shur, Physics of Semiconductor Devices, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.