

EDS 工程师培训教材

电子工业静电防护高等职业技能职业培训教材

电子工业静电 防护指南

孙延林 编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子工业静电防护指南

孙延林 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

随着我国 IT 业的突飞猛进,特别是国防电子信息化和微电子的迅速发展,静电对电子和相关行业的不良影响日益显著。为了预防静电危害和提高电子产品质量,推动我国国防和电子行业基础产品科技进步,应广大电子生产、科研单位和防静电装备企业的要求,编写了《电子工业静电防护指南》一书。本书搜集了国际上近年来最新静电防护技术发展的动态和防静电系统工程设计、检验数据及相关标准,涉及专业内容广泛,图文并茂,结合实际,通俗易懂,并且书后留有习题集。

本书可供电子行业工程、工艺、生产、质量管理等人员参考和学习,也可作为电子行业 EOS/ESD 工程技术人员的培训教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子工业静电防护指南/孙延林编. —北京: 电子工业出版社, 2006.10

ISBN 7-121-03295-3

I.电… II.孙… III.电子工业—静电—防护—指南 IV.①TN082-62②O441.1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 122344 号

责任编辑: 孙延真

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 16.25 字数: 320 千字

印 次: 2006 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

我国的防静电事业起始于 20 世纪 60 年代。这个时期石油、化工、煤矿开采等行业迅速发展，因静电引起的爆炸火灾事故逐渐增多，一些石化、劳保及职业安全部门开始着手研究和治理静电引起的火灾爆炸事故。

电子行业防静电事业起步晚于石化、火工、煤矿系统，它是以研究静电对微电子器件与组件损坏和如何防止这种损坏而产生的，最早起步于 20 世纪 70 年代中期，是从引进国外计算机机房用防静电活动地板并由国内有关单位仿制开始的。电子行业的防静电问题在 20 世纪 70 年代我国 IT 业发展初期时还处于萌芽阶段。20 世纪 80 年代，我国电子信息产业随着国家产业政策调整将其列为国家重要发展方向之后，计算机、通信、集成电路等产业进入了快速发展期，静电危害问题日趋显著。如 CMOS 器件绝缘层的典型厚度约为 $0.1\mu\text{m}$ ，其相应耐击穿电压为 $80\sim 100\text{V}$ ，VMOS 的耐击穿电压只有 30V ，千兆位 DRAM 耐压仅为 $10\sim 20\text{V}$ 。在电子产品的生产和运输、储存等过程中产生的静电电压远大于上述阈值，造成微电子器件击穿或者软击穿，使之失效或者严重地影响了产品可靠性。美国是最早研发集成电路的国家之一，在早期微电子生产过程中有过沉重的教训。据 3M 公司和美国 ESD 工程师协会 20 世纪 80 年代后期的有关报道，美国集成电路发展的初期，每年因静电造成电子工业直接经济损失达一百多亿美元，间接损失则更大。英国也曾有过年损失近 20 亿英镑的报道。日本在 20 世纪 90 年代初报导，他们不合格的微电子器件中有 45% 是因静电造成的。在我国电子行业，由于多方面原因，静电防护工作的开展相对于欧美国家滞后许多，基础研究薄弱，普及教育落后，静电对我国大规模集成电路的生产和信息化发展已产生多方面不良影响。据不完全统计，每年静电造成电子行业直接经济损失超过了 10 亿元人民币。

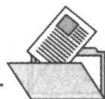
为了更好地解决电子工业的静电防护问题和普及静电防护的基本知识，本人根据电子工业现实情况，从工程实际应用的角度编写了《电子工

业静电防护指南》一书。该书共分 7 章：第 1 章为静电基本概念，主要介绍静电的一些基础知识；第 2 章为电子工业中的静电问题，介绍了静电对电子工业的危害及存在的静电源、静电敏感器件分级标准；第 3 章为静电防护原理，阐述了电子工业静电防护的基本原理和方法；第 4 章为防静电工作区（EPA）的构成和技术要求，重点提出防静电工作构成的技术设计要求和实际工程应对方案；第 5 章为防静电工作区的防静电工艺与管理，重点介绍了防静电工艺要求、技术质量管理与培训方面要求；第 6 章为防静电工作区系统的检验，介绍了静电检测的基本知识和如何验收一个防静电工作区及对其实效检验；第 7 章为静电放电模型与器件、设备 ESD 敏感度测试，介绍了一些广泛应用的静电放电模型以及对器件、设备的 ESD 基本实验方法。另外本书根据广大读者的需要，在附录中介绍了一些国内外防静电标准、资料，供静电防护工程技术、质量、管理人员培训用的习题集等，可作为工作时的参考。

该书涉及专业内容广泛、图文并茂、结合实际、通俗易懂，并留有练习和思考题，可供电子行业技术、工艺、生产、质量管理、销售、操作职工等人员参考和学习，也可作为电子行业 EOS/ESD 工程技术人员培训教材和电子行业静电防护技术手册使用。由于作者水平有限，书中难免有疏漏和欠缺，敬请广大读者指正。

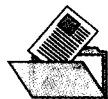
作 者

2006 年 9 月



目 录

第 1 章 静电基本概念	1
1.1 静电的定义与不同类型的电	1
1.1.1 静电具有的特点	1
1.1.2 不同类型的电	1
1.1.3 几种常见的静电物理量纲及换算	2
1.2 静电的产生	2
1.2.1 固体起电	2
1.2.2 粉体起电	5
1.2.3 液体起电	6
1.3 静电场	7
1.3.1 电场强度	7
1.3.2 静电电压	7
1.3.3 静电电位	8
1.4 静电屏蔽、导静电、静电耗散、静电绝缘材料的划分	8
1.4.1 导静电和静电屏蔽材料	8
1.4.2 静电耗散材料	8
1.4.3 静电绝缘材料	9
1.5 摩擦分离起电的极性排列与难起静电材料（抗静电材料）	9
1.6 静电感应与静电屏蔽	10
1.6.1 静电感应	10
1.6.2 静电屏蔽	11
1.6.3 法拉第筒（笼）	13
第 2 章 电子工业中的静电问题	15
2.1 静电效应与静电对微电子制造业的危害	16



2.1.1	静电效应	16
2.1.2	静电对微电子制造业的危害形式	17
2.2	静电放电敏感器件 (SSD 或 ESDS 器件)	19
2.2.1	器件 ESD 损伤失效模式	19
2.2.2	SSD 的分级	23
2.3	电子工业静电损害事例及统计	26
2.3.1	电子器件损失统计	26
2.3.2	典型事例	27
2.4	电子生产、使用环境中的静电源与静电防护场所	28
2.4.1	人体静电与人体用品	29
2.4.2	树脂、浸漆封装表面	32
2.4.3	各种包装容器、物流传递用品和传输带 (线)	32
2.4.4	各类工作表面、工具 (包括气动工具、吸锡器等)	32
2.4.5	装配、清洗、试验和修理过程	32
2.4.6	各种绝缘地面	33
2.4.7	生产、装联、焊接、检验、高低温处理等设备	33
2.4.8	接地系统和电源	33
2.4.9	生产、存储环境中的绝缘物和对地绝缘的导体	34
2.4.10	环境电磁场	34
2.4.11	有静电防护要求的场所	34
第 3 章	静电防护原理	35
3.1	静电耗散及泄漏	35
3.1.1	静电耗散及泄漏一般要求	35
3.1.2	耗散与接地的特殊情况	37
3.1.3	防静电材料 (装备) 使用中的安全问题	37
3.2	静电中和	38
3.3	静电屏蔽与接地	39
3.4	环境增湿	40
3.5	电子产品 ESD 的防护设计	40



3.5.1 SSD ESD 保护电路的设置	40
3.5.2 电子设备的 ESD 防护	45
第 4 章 防静电工作区 (EPA) 的构成和技术要求	47
4.1 EPA 的构成	47
4.1.1 EPA 定义和总体技术要求	47
4.1.2 EPA 硬件组成和要求	48
4.1.3 软件与管理方面要求	49
4.1.4 在 EPA 内防静电用品、装联生产设备、特殊装备 (车辆、 航空器) 的要求	50
4.1.5 EPA 环境要求	70
4.2 EPA 内的接地与防雷	76
4.2.1 安全保护接地	76
4.2.2 工作接地	77
4.2.3 重复接地	78
4.2.4 中性点、零点和中性线、零线	79
4.2.5 屏蔽接地	80
4.2.6 直流接地	80
4.2.7 信号接地	80
4.2.8 防静电接地	80
4.2.9 EPA 防雷接地与防雷设计	80
4.2.10 EPA 防静电接地及与其他接地的关系	89
第 5 章 EPA 的防静电工艺与质量管理	95
5.1 EPA 的防静电工艺及要求	95
5.1.1 SSD 的进厂检验	101
5.1.2 SSD 的运输、存储、保管	102
5.1.3 配、收、发、领、退料中的要求	103
5.1.4 预处理过程中的要求	104
5.1.5 印制电路板装插、焊接过程中的要求	104
5.1.6 印制电路板测试检验过程中的要求	105



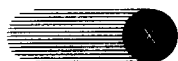
5.1.7	印制电路板中间处理过程中的要求	106
5.1.8	试运转、观察及老炼过程中的要求	106
5.1.9	包装的静电防护工艺要求	107
5.2	EPA 的质量管理与企业 ESD 防护培训	107
5.2.1	静电分析	107
5.2.2	SSD 的静电防护性能设计	108
5.2.3	EPA 的管理要求	108
5.2.4	防静电工程设计和管理的	109
5.2.5	企业职工对 ESD 的培训与考核	111
第 6 章	EPA 防静电系统的检验	112
6.1	电阻的测试与电阻率的计算	113
6.1.1	电阻和电阻率的定义	113
6.1.2	电阻测试原理	114
6.1.3	测试电极	117
6.1.4	电阻测试与表面、体积电阻率计算	120
6.1.5	电阻测试时的注意事项	123
6.2	静电电压衰减时间的测试	125
6.2.1	静电电压衰减时间（期）的定义	125
6.2.2	静电电压衰减时间测试原理	125
6.2.3	静电电压衰减期时间测试注意事项	127
6.3	静电屏蔽性能的检测	127
6.3.1	检测仪器和测试原理	128
6.3.2	测试注意事项	129
6.4	摩擦起电电压与 EPA 系统静电电位（电压）测试	130
6.4.1	EPA 系统静电电位（电压）测试	130
6.4.2	摩擦起电电压测试	136
6.5	静电电量测试与计算	141
6.5.1	测试要求	141
6.5.2	静电电量计算	142



6.6 各类防静电产品（材料）、工程的测试和时效检验	143
6.6.1 腕带	143
6.6.2 EPA 人体综合电阻测试	144
6.6.3 防静电鞋电阻的测试	144
6.6.4 手套（指套）、帽、袜、鞋束、工具（刷）、气动工具的 电阻测试	145
6.6.5 防静电工作服的测试	146
6.6.6 集成电路防静电包装管的测试	147
6.6.7 柔韧性包装类（包括发泡垫、海绵类）的测试	147
6.6.8 周转容器、盒的测试	147
6.6.9 窗帘的测试	147
6.6.10 墙面静电泄漏电阻的测试	148
6.6.11 防静电液、蜡表面电阻的测试	148
6.6.12 座椅、工作台、运转车电阻的测试	148
6.6.13 地面、地垫的测试	149
6.6.14 离子静电消除器消除静电性能的测试方法	150
6.6.15 传输带系统电阻的测试	153
6.6.16 吸锡器、电烙铁电阻的测试	153
6.6.17 防静电产品和工程的时效检验	153
第 7 章 静电放电模型与器件、设备 ESD 敏感度测试	155
7.1 静电放电模型与 ESD 敏感度测试	155
7.1.1 人体模型（HBM）	155
7.1.2 机器模型（MM）	158
7.1.3 带电器件模型（CDM）	160
7.1.4 带电电路板模型	164
7.1.5 人体—金属 ESD 模拟器	164
7.1.6 家具 ESD 模型	166
7.1.7 几种广泛应用的 ESD 模型的对比	166
7.1.8 设备的 ESD 试验	167



7.2 静电放电模拟器简介	170
7.2.1 ESD 模拟器的放电方式	170
7.2.2 常用 ESD 模拟器介绍	172
7.2.3 放电试验注意事项	174
附录 A 本书专业名词英文缩写	176
附录 B GB/T15463—95 静电安全名词术语	177
附录 C IEC61340—5—1《静电场中电子器件的防护—— “一般要求”》表	194
附录 D 《静电放电控制程序》前言与静电放电协会标准	196
附录 E JGB1649—93《电子产品防静电控制大纲》 之附录 A 静电放电敏感度分级试验（补充件）	215
附录 F 常用物理量纲表	222
附录 G 国内外部分防静电标准及相关标准目录	224
附录 H 静电防护指南习题集	229
参考文献	249



第 1 章 静电基本概念

1.1 静电的定义与不同类型的电

静电的定义 (Electrostatic): 一种处于相对稳定状态的电荷。由它所引起的磁场效应较之电场效应可以忽略不计。

1.1.1 静电具有的特点

静电具有以下特点。

(1) 在电子工业生产中, 产生的静电具有高电位、小电量、对地分布电容小、泄漏与放电时间短的特点。设备、生产环境或人体上的静电电位可达几千伏以上。电子生产环境所积累的静电量一般不高, 通常为微库仑 (μC , $1 \times 10^{-6}\text{C}$) 级、纳库仑 (nC , $1 \times 10^{-9}\text{C}$) 级。放电时间多为微秒 (μs , $1 \times 10^{-6}\text{s}$) 级、纳秒 (ns , $1 \times 10^{-9}\text{s}$)。但瞬间放电的峰值能量可达几百瓦以上, 峰值电流达几至十几安培, 足以造成微电子器件 (组件) 的损坏。

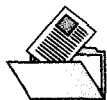
(2) 静电较之流动电流受环境条件, 特别是湿度的影响比较大。静电测量时复现性差、瞬态变化多。

1.1.2 不同类型的电

电有以下 3 种类型。

(1) 处于稳定状态不产生流动的电荷称为静电。

(2) 在导体中, 电荷随着外施恒定不变的电场, 做定向运动形成的电流称为直流电。



(3) 在导体中, 电荷随着外施周期性方向变化的电场, 做周期性方向变化的运动形成的电流称为交流电。

1.1.3 几种常见的静电物理量纲及换算

以下介绍几种常见的静电物理量纲及换算。

(1) 静电电量: 表示电荷多少的物理量称为电量, 通常用“ Q ”表示。
电量单位是库仑, 用“ C ”表示。

$$1\text{mC}=1\times 10^{-3}\text{C}; 1\mu\text{C}=1\times 10^{-6}\text{C}; 1\text{nC}=1\times 10^{-9}\text{C}; 1\text{pC}=10^{-12}\text{C}$$

(2) 电阻: 表示物体导电能力的物理量称为电阻, 通常用“ R ”表示。
电阻单位是欧姆, 用“ Ω ”表示。

$$1\Omega=1\times 10^{-3}\text{k}\Omega; 1\Omega=1\times 10^{-6}\text{M}\Omega; 1\Omega=1\times 10^{-9}\text{G}\Omega$$

(3) 电容: 物体所带电量与该物体的电位的比值称为电容, 表示物体存储电荷的能力, 通常用“ C ”表示。电容的单位是法拉, 用“ F ”表示。

$$1\text{pF}=1\times 10^{-6}\mu\text{F}; 1\text{pF}=1\times 10^{-12}\text{F}$$

(4) 静电电位: 电场力对单位正电荷从某点移动到无限远处所做的功称为静电电位, 通常用“ U ”表示。电位的单位是伏特, 用“ V ”表示。

$$1\text{V}=1\times 10^{-3}\text{kV}$$

(5) 静电的放电能量: 静电放电时所具有的能量, 通常用“ W ”表示。
能量的单位是焦耳, 用“ J ”表示。

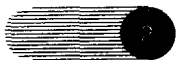
$$1\mu\text{J}=1\times 10^{-3}\text{mJ}=1\times 10^{-6}\text{J}$$

1.2 静电的产生

静电产生可分为固体起电、粉体起电和液体起电。

1.2.1 固体起电

下面介绍固体接触时的摩擦分离起电和固体的带电形式。





1.2.1.1 固体接触摩擦分离起电

摩擦起电的定义:两个物体相互摩擦后分别带有等值异号电荷的过程。两个物体在接触摩擦时,在界面处由于两个摩擦面能态的差异,如电子逸出功(功函数)、湿度、电荷载体浓度等的不同,发生电荷转移而形成偶电层。除了不同的物质间接触摩擦会产生偶电层外,偶电层也能在相同物质间发生,如图1.1(a)、(b)所示。

偶电层形成过程中的电荷交换是在接触面的各点进行的,并且摩擦生热可明显地改变相互作用面的能量状态,能促使物体起电。互相接触摩擦的物体,在接触摩擦前未有过剩的电荷,是中性的;互相接触摩擦的两物体所获得的电荷密度相等,但所带电荷的极性相反。另外可将偶电层简单地视为一个电容器,两接触面就是电容器的极板,将它们机械分离之后,各自所带电荷符号相反,电量相等,而带电电位相对升高如图1.1(c)所示。

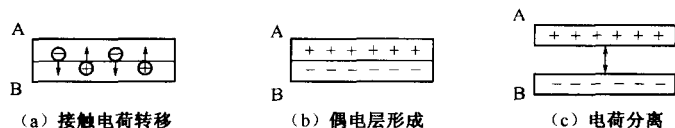


图 1.1 接触摩擦起电的基本过程

如设 C 为偶电层间单位面积的电容(层间为空气,空气的介电常数 $\epsilon=1$)层间距离 $d=25\times 10^{-10}\text{m}=2.5\text{nm}$, 则

$$C=\epsilon \quad \epsilon_0/d=1\times 8.85\times 10^{-12}/25\times 10^{-10}=3.54\times 10^{-3}\text{F/m}^2 \quad (1.1)$$

若距离 $d=1\times 10^{-3}\text{m}$, 则 C 变为 $8.85\times 10^{-9}\text{F/m}^2$, 电容减少到 4×10^{-5} , 两接触面电压就会增大 40 万倍。可见,物体摩擦分离后是导致静电电压剧增的主要原因。

(1) 导电金属之间的摩擦: 导电金属之间接触摩擦会在两表面产生的偶电层形成电位差。当两物体分离时,因导体电荷可以自由流动,当分离处电场强度剧增的作用下,两界面极性不同的电荷受电场力影响在瞬间



发生中和, 使分离时之间的电位降低了许多。这就是导体摩擦起电很小的原因。

(2) 导体和绝缘体、两绝缘体之间的摩擦: 因绝缘体的界面形成偶电层并分离时, 由于其电荷是束缚电荷, 很难发生中和, 所以分离后电位很高如图 1.2 所示。表面起电阈值与空气湿度、物体表面形态、物体绝缘程度有关。一般空气湿度为 70% 以上时, 起电现象会明显减少。物体的体积电阻率和表面电阻率分别为 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 、 $1 \times 10^{11} \Omega$ 以上时, 物体明显地呈现起电现象。

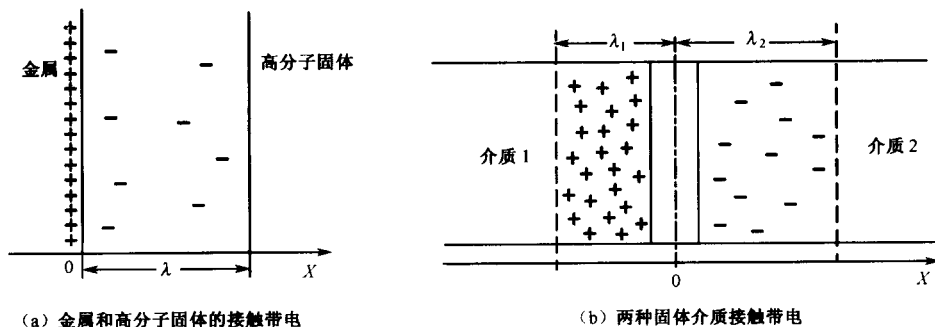


图 1.2 固体的接触带电

1.2.1.2 固体的带电形式

固体的带电形式有以下 5 种。

(1) 断裂带电。材料因机械断裂使带电粒子分开, 断裂后的两半各带上等量异号电荷。

(2) 压电效应起电。某些材料在机械力作用下产生电荷的效应, 即压电效应。如石英晶体在 $1 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 的压力下, 承受压力的两个表面上出现正、负电荷, 产生约 0.5V 的电位差。

(3) 热电效应起电。若对热电偶加热, 则一端带正电, 另一端带负电。冷端与加热端所带电量符号相反, 这种现象称为热电现象。



(4) 剥离起电。当相互密切结合的物体剥离时，会引起电荷的分离，引起分离物体双方带电的现象，称为剥离起电，如图 1.3 所示。剥离带电根据不同的接触面积、接触面的粘着力和剥离速度而产生不同的静电量。绝缘材料剥离速度和剥离带电量的关系如图 1.4 所示的曲线表示。

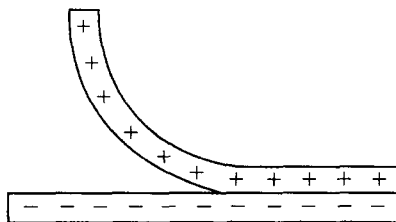


图 1.3 剥离起电

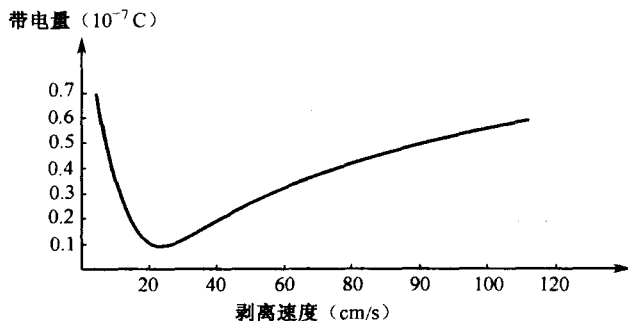


图 1.4 剥离速度与剥离带电量的关系

(5) 电解起电。固体与液体（电解质溶液）接触时，由于固体离子向溶液扩散，在固体和电解质溶液的界面上就有电流流过。随着这一过程的进行，界面上出现偶电层，形成电位差。

1.2.2 粉体起电

粉体起电是由于粉体与器壁、粉体与粉体间相互碰撞、接触分离、摩擦、碎裂而引起的。起电量与其分散度、电导率、壁面电导率、速度、周



围空气湿度、相互作用的强烈程度、碰撞时的接触程度及接触面积等有关，颗粒越小，相互作用越强烈，碰撞面积越大，起电就愈强烈。

1.2.3 液体起电

下面介绍液体起电的基本过程。

1.2.3.1 液体的偶电层

液相（如树脂、漆类）与固相（如金属、高分子材料）界面亦能形成偶电层，这样在界面处形成了偶电层，内层是紧贴在固体表面上的离子，称为固定层或吸附层，而外层离子是可动的称为活动层或扩散层，这种液体起电如图 1.5（a）所示。

1.2.3.2 流动带电

当液体流动时，流动层的带电粒子随液体流动形成了流动电流。异号带电粒子留在管道中，如管道接地则流入大地，这样就发生电荷分离，随液体流动的电荷所形成的电流称为流动电流如图 1.5（b）所示。影响液体带电量的大小和极性的因素有：液体的种类和特性、管道材料及其表面光滑程度，流速、温度、含水量、空气和混合物以及杂质微粒等。

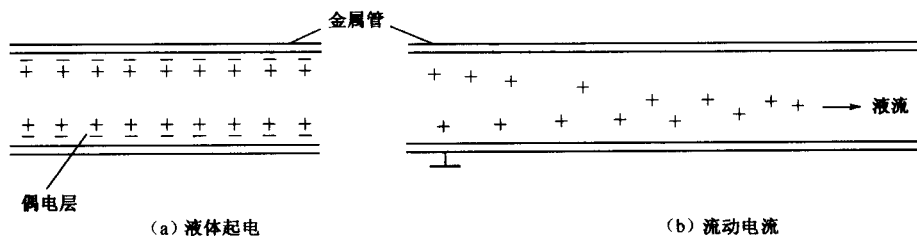


图 1.5 液体起电与流动电流

综上所述，物体摩擦和剥离起电是电子工业环境中最常见的起电方式。

