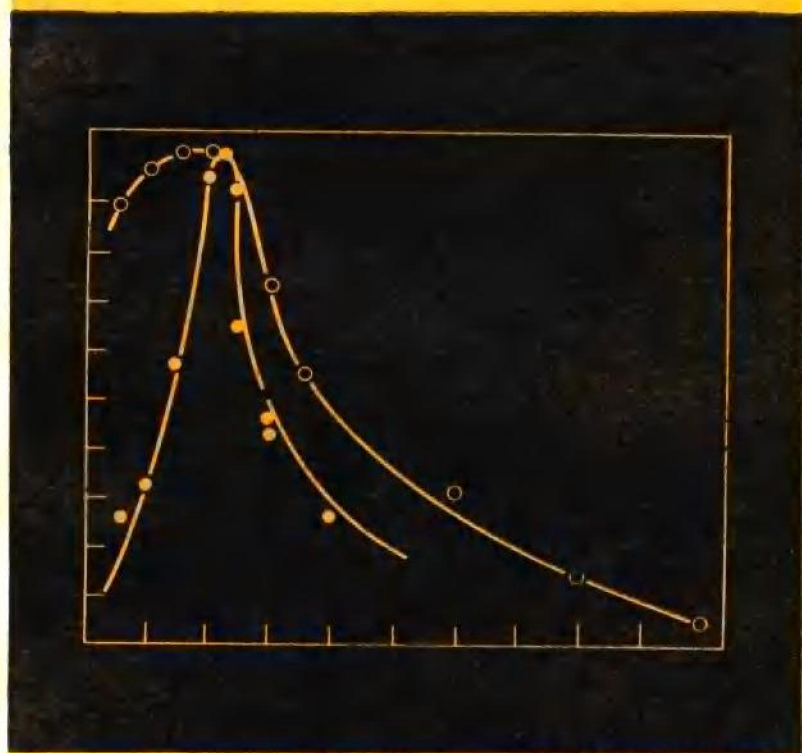


实验物理学丛书

固体核径迹探测器的 原理和应用

朱润生 著



科学出版社

内 容 简 介

固体核径迹探测器(简称 SSNTD)是 1962 年以来迅速发展起来的一种新型核径迹探测器.它价格低廉、处理方法简便、应用广泛.本书系统地介绍了 SSNTD 的基本原理、所用材料、处理方法以及识别核径迹的各种技术.同时列举了大量在物理学、化学、地学、生物学、医学、考古学和环境科学等方面的应用.重点阐述了塑料核径迹探测器及其应用.

本书可供上述各学科专业人员参考,学习.

实验物理学丛书

固体核径迹探测器的

原理和应用

朱润生 著

责任编辑 荣毓敏

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987 年 11 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1987 年 11 月第一次印刷 印张:21

印数:精 1-400 插页:精 2

平 1-1,000 字数:549,000

统一书号:13031·3915

本社书号:5218·13-3

定价: 布脊精装: 7.00 元

平 装: 5.90 元

序 言

实验是物理学发展的基础，又是检验物理理论的唯一标准。回顾物理学发展的历史，正是实验技术的发展，推动着整个物理学向前发展。因此，实验是物理学和一切科学技术发展的基础。

为了适应我国科技事业发展的需要，强调实验物理学的重要性，并总结我国物理学工作者在实验工作中的创新和实践经验，我们特编辑出版《实验物理学丛书》。

本丛书的编辑方针是：1. 密切联系当前科研、教学、生产的实际需要，介绍各种物理实验的基本原理、技术、设备及其在各方面的应用。2. 反映国内外最新的实验水平和发展动向，并注意实用性。3. 以科技工作者和高等院校师生为对象，坚持理论联系实际，贯彻百家争鸣的方针，力求使丛书具有我国的特色和风格。

我国科技事业的发展已进入一个新的时期，实现科学技术现代化是我国广大科技工作者肩负的光荣而艰巨的任务。我们诚恳地希望广大物理学工作者发挥为社会主义事业著述的积极性，不断总结实践经验，总结研究成果，积极支持丛书的出版工作，共同为出好该丛书而努力。

《实验物理学丛书》编委会

《实验物理学丛书》编委会

主 编	钱临照				
副主编	王淦昌	王大珩	柯 俊	洪朝生	管惟炎
编 委	王之江	王业宁	王守觉	王华馥	王祝翔
	许顺生	华中一	苟清泉	何寿安	吴自勤
	张志三	汤定元	杨 楨	杨顺华	项志遴
	姜承烈	徐其昌	徐叙琰	章 综	郭可信
	龚祖同	黄兰友	梅镇岳	程晓伍	薛鸣球
	魏荣爵	王昌泰			

前 言

1975 年出版了由 Fleischer, Price 和 Walker 所著的全面介绍和论述固体核径迹探测器的权威性专著“Nuclear Tracks in Solids, Principles and Applications”。这本书的文献只引到 1973 年。从 1975 年到现在已有十年,在这十年中,固体核径迹探测器无论是在基础研究方面还是在应用方面,都有了巨大的进展。例如,塑料核径迹探测器中辐射损伤径迹形成的机制之一,带电粒子次级能量损失机制,已经为越来越多的人所接受。核径迹的识别,已经从只能辨认核电荷发展到能辨认铁、砷等中等重量元素的同位素。电化学蚀刻方法和自动化观测技术的发展,大大地减轻了繁重的观测劳动,克服了固体核径迹探测器应用中的一个障碍。此外还出现了核径迹蚀刻和复制技术的许多新颖的应用。目前固体核径迹探测器及其原理至少已经应用在三十多门学科领域中。

从 1977 年起,国际性的专门期刊“Nuclear Tracks”开始出版。仅从 1976 年到 1984 年就召开了四次以固体核径迹探测器为主题的国际学术讨论会。1981 年以来,我国也已召开了两次全国性的固体核径迹探测器的讨论会。十年来,国内外发表的有关固体核径迹探测器的文章已不下两千篇。

面对这门学科如此迅速和巨大的发展,以及国内有关工作的蓬勃开展,有必要为固体核径迹探测器的研究者和使用者提供一本将这十年内的进展概括在内的新的专著。这就是写作本书的目的。

朱润生

1985 年 10 月

• • •

目 录

第一部分 基本原理和实验方法

第一章 绪论	1
§ 1.1 什么是固体核径迹探测器	1
§ 1.2 固体核径迹探测器发展简史	1
§ 1.3 固体核径迹探测器的应用	6
§ 1.4 结语	9
参考文献	9
第二章 辐射损伤径迹的特性和形成机制	12
§ 2.1 离子在固体中沉积能量的一般描述	12
§ 2.2 辐射损伤核心区的范围	14
§ 2.3 辐射损伤径迹的组成	17
2.3.1 无机晶体中辐射损伤径迹的组成	18
2.3.2 有机聚合物中辐射损伤径迹的组成	19
§ 2.4 辐射损伤径迹的形成机制	21
2.4.1 一些不太现实的机制	22
2.4.2 与辐射损伤有关的各种物理量	24
2.4.3 离子爆炸脉冲	26
2.4.4 次级能量损失	29
2.4.5 限定能量损失	33
2.4.6 初级和次级辐射损伤	34
§ 2.5 辐射损伤径迹的退火	34
2.5.1 径迹退火中的活化能	34
2.5.2 径迹退火的动力学	36
参考文献	40
第三章 核径迹的显示方法	45
§ 3.1 引言	45

§ 3.2 化学蚀刻	45
3.2.1 化学蚀刻法显示径迹的过程	46
3.2.2 探测器的准备	47
3.2.3 蚀刻设备	47
3.2.4 影响核径迹的记录和显示的因素	48
§ 3.3 电化学蚀刻	49
3.3.1 电化学蚀刻方法	49
3.3.2 电化学蚀刻设备	49
3.3.3 电化学蚀刻的基本过程	51
3.3.4 适于电化学蚀刻的探测器应具有的性质	55
3.3.5 影响电化学蚀刻效率的因子	56
3.3.6 预蚀刻的作用	78
3.3.7 改良的电化学蚀刻方法	80
3.3.8 水树现象	88
3.3.9 电化学蚀刻法的应用	89
§ 3.4 径迹的染色	91
3.4.1 径迹染色的机制	91
3.4.2 径迹染色的步骤和条件	94
3.4.3 影响径迹染色的因素	96
§ 3.5 沉淀缀饰	104
3.5.1 氯化银单晶中径迹的缀饰	105
3.5.2 玻璃中径迹的缀饰	108
3.5.3 云母中径迹的缀饰	108
§ 3.6 径迹变色	109
§ 3.7 混合处理	109
参考文献	110
第四章 化学蚀刻	115
§ 4.1 引言	115
4.1.1 影响固体核径迹探测器蚀刻特性的因素	115
4.1.2 固体核径迹探测器蚀刻参量的测定方法	115
4.1.3 蚀刻曲线	117
§ 4.2 蚀刻条件	120
4.2.1 各种固体核径迹探测器的蚀刻条件	120

4.2.2 蚀刻条件与探测器性能的关系	126
4.2.3 蚀刻剂	127
4.2.4 蚀刻溶液温度的影响	134
4.2.5 蚀刻产物的影响	138
§ 4.3 影响探测器蚀刻特性的环境因素	144
4.3.1 温度	145
4.3.2 化学因素	157
4.3.3 辐照和光化学因素	160
4.3.4 电场	163
4.3.5 机械作用	164
4.3.6 存放时间	167
§ 4.4 一些特殊的技术	168
4.4.1 显示径迹全长的方法	168
4.4.2 4π 立体角观测样品的制备	170
§ 4.5 常用的探测器材料	171
4.5.1 晶体	171
4.5.2 玻璃	172
4.5.3 塑料	173
参考文献	182
第五章 径迹的观测方法	187
§ 5.1 引言	187
§ 5.2 光学显微镜观测技术	188
5.2.1 常规观测方法	188
5.2.2 增强径迹反差的方法	189
5.2.3 利用光导原理照明	191
5.2.4 用激光干涉仪精密测定径迹参量	193
5.2.5 测定径迹密度的统计学方法	193
§ 5.3 径迹的定位和放大	197
5.3.1 化学方法	197
5.3.2 光学方法	200
5.3.3 电学方法	201
§ 5.4 积分计数技术	201
5.4.1 电解池法	201

5.4.2 透射或散射光法	202
5.4.3 粒子透射	203
5.4.4 闪烁计数法	203
5.4.5 机械方法	203
§ 5.5 自动化测量技术	204
5.5.1 火花计数法和击穿计数器	205
5.5.2 图象分析系统	214
参考文献	222
第六章 径迹蚀刻动力学	228
§ 6.1 引言	228
§ 6.2 一些基本概念	229
6.2.1 蚀刻速率比	229
6.2.2 临界角和临界厚度	231
6.2.3 关于记录阈	233
§ 6.3 各向同性探测器中, 蚀刻速率比为常数时, 径迹蚀坑的形 成	234
6.3.1 几何模型	234
6.3.2 径迹参量的计算	236
§ 6.4 各向同性探测器中, 蚀刻速率比不是常数时, 径迹蚀坑的形 成	238
6.4.1 几何模型	239
6.4.2 径迹参量的计算	242
§ 6.5 各向异性的厚探测器中, 径迹蚀坑的形成	244
§ 6.6 厚探测器中径迹蚀刻动力学公式的应用	24 ⁹
6.6.1 入射角	250
6.6.2 锥角	250
6.6.3 径迹长度	250
6.6.4 蚀刻速率比	251
6.6.5 探测器表面上径迹的截面	251
6.6.6 径迹的轮廓	254
§ 6.7 薄膜探测器中径迹蚀孔的形成	254
6.7.1 薄膜穿孔时蚀去的厚度	256
6.7.2 蚀孔的发展	256

参考文献	261
第七章 核粒子的探测和识别	263
§ 7.1 探测效率	263
7.1.1 记录效率和蚀刻效率	263
7.1.2 临界角与蚀刻效率	264
7.1.3 裂片类核粒子的探测效率	269
7.1.4 塑料探测器中, α 粒子类核粒子的探测效率	271
7.1.5 晶态固体核径迹探测器的探测效率	273
7.1.6 蚀刻效率与蚀刻时间的关系	276
7.1.7 加热对蚀刻效率的影响	278
§ 7.2 核粒子的识别	278
7.2.1 各种识别核粒子的方法	278
7.2.2 对实验条件的要求	278
7.2.3 探测器的标定	283
§ 7.3 测定径迹蚀锥长度随剩余射程的变化以识别粒子	283
7.3.1 L - R 关系的标定	284
7.3.2 V_T - J 关系和 R - E 关系	289
7.3.3 一些问题和解决的方法	292
§ 7.4 测量径迹轮廓以识别粒子	297
§ 7.5 测定径迹直径以识别粒子	299
§ 7.6 测定径迹最大可蚀刻长度以识别粒子	305
§ 7.7 识别粒子的其他可能方法	307
7.7.1 测定径迹开始出现的时间以识别粒子	307
7.7.2 在电化学蚀刻过程中测定径迹蚀穿时间以识别粒子	307
§ 7.8 影响分辨率的因素	312
7.8.1 探测器的均匀度	312
7.8.2 蚀刻条件	314
7.8.3 观测量和观测方法	316
参考文献	318

第二部分 应 用

第八章 核物理和粒子物理	323
--------------------	-----

§ 8.1 引言	323
§ 8.2 裂变	324
8.2.1 自发裂变	325
8.2.2 裂变势垒高度	335
8.2.3 光致裂变	337
8.2.4 三分裂	339
8.2.5 裂变能量分布	339
8.2.6 裂变碎片角分布	343
§ 8.3 重离子核反应	343
8.3.1 多重裂变	343
8.3.2 重离子引起的碎裂反应	352
8.3.3 相对论重离子引起的核反应	356
§ 8.4 高能散变	361
§ 8.5 极低能带电粒子核反应	364
§ 8.6 利用堵塞效应测定复合核寿命	365
§ 8.7 超重元素的探索	367
§ 8.8 粒子物理	373
8.8.1 磁单极子的探索	374
8.8.2 半人马座事例	374
8.8.3 对撞机实验	375
参考文献	376
第九章 星际空间核粒子	381
§ 9.1 引言	381
§ 9.2 星体中的核合成和宇宙线的起源与传播	387
9.2.1 元素的核合成过程	387
9.2.2 星体中核合成的模型	390
9.2.3 宇宙线的起源和传播	392
§ 9.3 宇宙线的化学成分	394
9.3.1 铁以下宇宙线的化学成分	394
9.3.2 超铁宇宙线	396
9.3.3 宇宙线化学成分与能量的关系	412
§ 9.4 宇宙线的同位素组成	420
§ 9.5 一些可能的探索	426

9.5.1 超重元素	426
9.5.2 反物质	427
9.5.3 磁单极子	429
§ 9.6 太阳耀斑粒子	434
9.6.1 低能($E \leq 15\text{MeV/核子}$)太阳耀斑粒子的电荷谱和能谱 ...	434
9.6.2 高能($E > 15\text{MeV/核子}$)太阳耀斑粒子的化学组成	440
9.6.3 太阳耀斑粒子的同位素组成	441
§ 9.7 太阳风粒子	442
§ 9.8 磁层粒子	443
参考文献	446
第十章 陨石和月球样品中的陈旧径迹	452
§ 10.1 引言	452
§ 10.2 主要的宇宙效应	454
10.2.1 空间带电粒子的辐照效应	455
10.2.2 陨石的撞击作用及其对辐照效应的制约	457
§ 10.3 陨石和月球样品中,外源造成的径迹	459
10.3.1 外源径迹的一般情况	459
10.3.2 宇宙线重粒子径迹的密度和生成率	461
10.3.3 宇宙线引起的裂变径迹	468
10.3.4 高能散变反应中产生的径迹	470
§ 10.4 古代宇宙线和太阳粒子	470
10.4.1 地球外样品中古代宇宙线和太阳粒子的记录	470
10.4.2 VH 核的通量和能谱	474
10.4.3 $Z \geq 20$ 核的化学组成	478
§ 10.5 衰亡同位素的径迹	482
10.5.1 陨石中的衰亡同位素记录	482
10.5.2 利用 ^{244}Pu 和 U 裂变径迹研究陨石母体的冷却史	487
10.5.3 月球样品中的衰亡同位素记录	488
§ 10.6 陨石和月球样品的辐照年龄和辐照史	489
10.6.1 各种辐照年龄	489
10.6.2 陨石和月球岩石样品的重粒子辐照年龄	490
10.6.3 陨石和月球岩石样品的散变年龄	494
10.6.4 月球土壤的辐照史和辐照年龄	496

§ 10.7 利用陈旧径迹研究陨石和月球表面的侵蚀作用	500
10.7.1 消耗质量的侵蚀作用	500
10.7.2 微侵蚀作用	502
§ 10.8 一些可能的探索	504
10.8.1 磁单极子	504
10.8.2 古代月球磁场	505
参考文献	506
第十一章 辐射剂量学	511
§ 11.1 引言	511
§ 11.2 中子剂量学	512
11.2.1 热中子	512
11.2.2 快中子和中能中子	515
11.2.3 中子剂量计/能谱计	522
11.2.4 一些应用的实例	524
§ 11.3 α 粒子剂量学	526
§ 11.4 多电荷核粒子剂量学	528
参考文献	531
第十二章 裂变径迹测定年代与地球科学	535
§ 12.1 引言	535
§ 12.2 裂变径迹测定年代	536
12.2.1 天然径迹的来源	536
12.2.2 裂变径迹年龄的计算方法	537
12.2.3 裂变径迹年龄的测定方法	539
12.2.4 影响测定结果的外在因素	541
12.2.5 退火效应的校正	545
12.2.6 裂变径迹年龄的地质学意义	553
12.2.7 一些应用的实例	556
§ 12.3 核径迹技术在地球科学中的其他应用	564
12.3.1 岩矿研究	564
12.3.2 成矿机制的研究	566
12.3.3 地质和矿藏勘察	567
12.3.4 氦的迁移与地震预报	570
参考文献	572

第十三章 化学元素分析和射线照相	576
§ 13.1 化学元素分析与投影	576
13.1.1 利用热中子裂变反应	577
13.1.2 利用快粒子裂变反应	582
13.1.3 利用其他核反应和 α 蜕变	583
§ 13.2 射线照相	589
13.2.1 中子照相	589
13.2.2 重离子照相	593
参考文献	603
第十四章 核径迹技术的其他应用	608
§ 14.1 核径迹微孔滤膜	608
14.1.1 核径迹微孔滤膜的制备及其特性	608
14.1.2 核径迹微孔滤膜的应用	612
14.1.3 受控微孔过滤和选择性的微孔滤膜	620
§ 14.2 材料表面的精微加工	620
14.2.1 磁光材料的精微加工	621
14.2.2 材料表面的织构	624
14.2.3 材料的光学特性	626
14.2.4 重离子刻版	627
§ 14.3 径迹复制技术的应用	629
14.3.1 电子的场致发射	629
14.3.2 离子的场致发射	631
14.3.3 微复合材料	632
14.3.4 微电子学器件	634
14.3.5 超导电性研究	634
§ 14.4 其他应用	634
14.4.1 聚变诊断	634
14.4.2 洗提回收重离子	636
14.4.3 计算机软错误的研究	636
14.4.4 积分气压计	638
参考文献	638
附录 几种离子在硝酸纤维素和 CR-39 中的射程和能量损失	644

第一部分 基本原理和实验方法

第一章 绪 论

§ 1.1 什么是固体核径迹探测器

带电的核粒子穿过绝缘固体时,沿着它们的轨迹造成原子尺度上的辐射损伤,如果损伤密度足够高,经过适当处理后,就会形成便于观测的径迹。根据这一原理发展起来的带电粒子探测器,称为固体核径迹探测器。

在各种处理方法中最常用的是化学蚀刻法。图 1-1 示出被裂变碎片照射过的云母经过化学蚀刻处理后,沿径迹处的物质被溶去而形成孔洞。延长处理时间可以使孔洞增大。

可以用作固体核径迹探测器的材料很多,包括多种矿物、玻璃和塑料等。经过化学蚀刻处理后,各种材料中不同核粒子径迹的形状各不相同,测定它们的特征参量,可以分辨核粒子的电荷、质量和能量等。

图 1-2 示出正长石、玻璃和聚碳酸酯中,经过化学蚀刻处理后的 ^{252}Cf 自发裂变碎片径迹。

§ 1.2 固体核径迹探测器发展简史

固体核径迹探测器的发展史可以追溯到五十年代末。当时 D. A. Young 发现,带电粒子照射过的某些固体,在适当的化学处理条件下,沿粒子径迹比未受辐射损伤处容易发生化学变化。例如,用饱和了 FeCl_3 的氢氟酸和冰醋酸的 1:1 混合溶液,处理经过核



图 1-1 云母中裂变碎片的电子显微镜照片
左: 未经任何处理前, 右: 经过化学蚀刻处理后^[1]

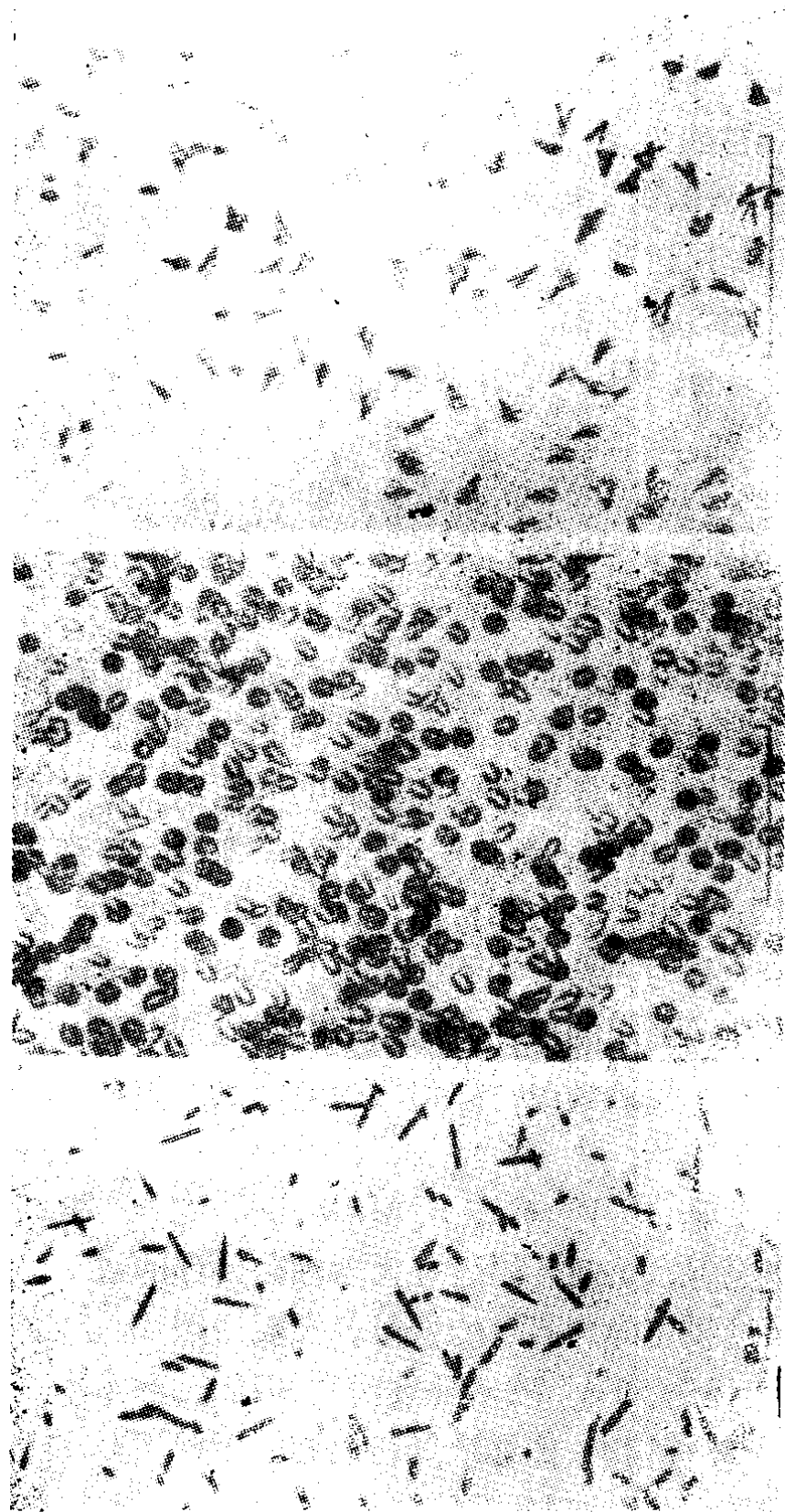


图 1-2 正长石(左)、玻璃(中)和 Lexan 聚碳酸酯中,经过化学蚀刻处理后的 ^{27}Cf 自发裂变碎片径迹的光学显微镜照片^[3]