



普通高等教育“十三五”规划教材

光电对抗材料基础

Fundermentals of Electro-Optical
Countermeasure Materials

周遵宁 ◎ 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

光电对抗材料基础

周遵宁 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是光电对抗领域的专业性书籍。光电对抗技术是涉及诸多领域的交叉学科，而光电干扰材料又是光电对抗装备的核心。本书的目的在于引导读者熟悉光电对抗领域的核心技术，并且能从材料的光电干扰性能出发来分析问题和解决问题。本书以大气物理学、材料物理、光度学和辐射度学、烟火技术为基础，较系统地研究和论述了衰减型、光辐射型、隐身型、压制性光电干扰材料的作用原理、制备和分散技术、效能评估方法以及在作战中的应用。它不仅反映了当前的最新科研成果和观点，同时也反映了国内外光电对抗材料技术的最新进展和科学前沿。

本书内容系统、全面，可作为从事光电对抗无源干扰技术、特种功能材料等相关行业科技工作者和工程技术人员的参考书，也可作为兵器科学与技术、材料科学与工程及相关专业本科生和研究生的教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

光电对抗材料基础 / 周遵宁编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-5682-3617-1

I. ①光… II. ①周… III. ①光电对抗-光电材料-基本知识 IV. ①TN204

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 003369 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16. 25

字 数 / 380 千字

版 次 / 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 42. 00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

光电对抗技术是能够与不断发展中的先进光电器材相抗衡的一门新技术，是交叉性很强的边缘性学科，其与雷达对抗和通信对抗共同组成电子对抗。光电对抗材料是光电对抗技术的核心，涉及物理学、材料学、化学、光学、电磁学、环境科学等诸多领域，具有多学科性特点。光电对抗材料干扰效能的实现与其应用结构组成和使用方式密切相关，因而又具有多工程性特点。

当前，军用光电子器件正以史无前例的速度向前发展，新技术和新装备不断涌现，性能水平持续提高，远远超出了对其形成有效干扰的光电对抗材料的研发和工程应用的需求。主要原因在于：一是光电对抗材料的创新性、多学科性、多工程性等特点，大大增加了研发难度；二是系统论述光电对抗材料的专业性教材的匮乏；三是缺乏专业性和工程应用性兼备的光电对抗材料研发人才。

近年来，我校相继开设了与光电对抗相关的本科生和研究生课程，引起了学生浓厚的学习兴趣，同时也对专业性教材提出了迫切需求。本书作为光电对抗领域的一部基础性、专业性书籍，是在总结归纳光电对抗材料发展历史和性能特点，并结合几十年的工程实践经验基础上，较全面地阐述了光电对抗材料设计的基础知识和干扰效能的评估方法，主要论述了与光电对抗新体制和新技术密切相关的新型光电对抗材料的设计及发展趋势。

全书共分7章：第1章概述了光电对抗材料的概念、范畴、特点及分类等；第2章和第3章分别阐述了主要光电对抗材料设计的相关基础知识，包括烟火药的设计及气溶胶物理；第4章至第7章分别讲述了衰减型、光辐射型、隐身型、压制性光电对抗材料的设计、制备、效能评估方法以及各自的新体制和新技术发展现状。

在本书撰写和修改过程中，得到了曾庆轩教授、张建国教授、乔小晶教授的大力支持，他们对课程规划设想提出了很好的建议，也促使我更仔细地考虑课程结构以及课程内容的工程应用性。在写作过程中，李石川博士为本书6.2节提供了相关书稿素材，汤润泽博士和魏学宾硕士参与编写了本书的第2章和第4章的部分内容，崔玉玲、金华等高工对光电对抗材料的工程应用提供了相关素材，陈永鹏硕士和姚凯访问学者为本书纠正了

很多错误，在此一并表示诚挚的感谢。

本书尝试对光电对抗材料的相关理论和技术做出总结，以期对该领域的发展起到抛砖引玉的作用，也诚挚地希望本书能对从事该领域研究的基础研发和工程技术人员提供帮助。但由于作者的水平有限，加之光电对抗材料是一个富有挑战性和创新性的研究领域，书中难免有一些缺点和不足，真诚希望读者不吝赐教，提出宝贵的改进意见。

北京理工大学

周遵宁

2016年10月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 材料光电磁现象起源	001
1.2 电子战与光电对抗	005
1.3 光电对抗材料特征及分类	007
第 2 章 烟火药设计基础	009
2.1 烟火药设计的一般要求	009
2.2 烟火药组成及分类	010
2.2.1 烟火药组成	010
2.2.2 烟火药分类	013
2.3 烟火药配方试验设计	014
2.3.1 化学平衡计量法	014
2.3.2 均匀试验设计法	015
2.4 烟火药的制备	019
2.4.1 原材料准备	019
2.4.2 配料与混合	022
2.4.3 造粒	022
2.4.4 干燥	024
2.5 烟火药的安全性	025
第 3 章 气溶胶物理	027
3.1 气溶胶粒子尺寸及形状	027
3.1.1 粒子形状	027
3.1.2 粒子密度	029
3.1.3 粒子几何直径	030
3.1.4 粒子的空气动力学直径	032

3.2	气溶胶粒子的性质	033
3.2.1	粒子的表面性质	033
3.2.2	粒子的带电性	037
3.2.3	粒子的磁性	040
3.3	气溶胶粒子间的相互作用	042
3.3.1	范德华力	042
3.3.2	静电作用力	043
3.3.3	液桥作用	045
3.4	气溶胶的动力学特性	046
3.4.1	气溶胶粒子聚集	046
3.4.2	气溶胶粒子扩散	050
3.4.3	气溶胶粒子沉降	055
3.5	气溶胶的光学特性	059
3.5.1	光与气溶胶作用的定性描述	060
3.5.2	影响粒子光散射性质的参数	062
3.5.3	瑞利散射	064
3.5.4	Mie 散射	065
3.5.5	粒子群的光散射	066
第4章	气溶胶衰减型干扰剂	069
4.1	固相燃烧反应型干扰发烟剂	069
4.1.1	受热升华冷凝型发烟剂	069
4.1.2	HC 固相反应型发烟剂	070
4.1.3	炭黑类固相反应型发烟剂	071
4.2	爆炸分散型干扰发烟剂	075
4.2.1	红磷	075
4.2.2	铜金粉	080
4.3	气流分散型干扰发烟剂	082
4.3.1	S-4 发烟剂	082
4.3.2	雾油发烟剂	083
4.3.3	金属四氯化物	084
4.3.4	远红外液体干扰剂	085
4.3.5	鳞片石墨	089
4.4	评估烟幕干扰效能的特征物理量	093
4.4.1	质量浓度	093
4.4.2	烟幕粒度分布	095
4.4.3	烟幕持续时间	098
4.4.4	烟幕透过率	099

4.4.5	可见光总遮蔽力	100
4.5	环境气象因素对烟幕的影响	101
4.5.1	风速与风向	102
4.5.2	大气湍流	103
4.5.3	太阳高度角	105
4.5.4	能见度	105
4.5.5	大气稳定度及其分类	106
4.5.6	湿度、地形等对烟幕的影响	108
4.6	烟幕和遮蔽物对人员的影响	109
4.6.1	军用烟幕和遮蔽物的暴露剂量指南	109
4.6.2	对烟幕和遮蔽物操作人员的要求	115
第5章	光辐射型干扰剂	116
5.1	辐射度量和光度量	116
5.1.1	辐射度量	116
5.1.2	辐射强度和辐射亮度测量	118
5.1.3	光度量	120
5.1.4	发光强度的测量	121
5.2	材料的光发射	122
5.2.1	基态和激发态	122
5.2.2	材料光发射原理	127
5.2.3	荧光和磷光	128
5.3	激光致盲	131
5.3.1	激光的产生	131
5.3.2	激光致盲干扰	133
5.3.3	激光致盲武器议定书	135
5.4	白光干扰剂	138
5.4.1	白(热)光	138
5.4.2	白光干扰剂	139
5.4.3	白光干扰剂的强闪光效应	141
5.5	红外诱饵干扰剂	148
5.5.1	红外诱饵辐射机理	149
5.5.2	MTV点源红外诱饵	150
5.5.3	双光谱匹配红外诱饵	155
5.5.4	红外成像诱饵	157
第6章	光学隐身材料	161
6.1	发射率(比辐射率)	161
6.1.1	发射率的相关概念	161

6.1.2	材料发射率的影响因素	162
6.2	可见光/近红外隐身涂层	165
6.2.1	隐身涂层特点及性能要求	166
6.2.2	隐身涂层颜色术语	167
6.2.3	隐身涂层组成及制备	168
6.2.4	单色迷彩	173
6.2.5	变形迷彩	175
6.2.6	变色迷彩	177
6.3	中远红外隐身材料	181
6.3.1	中远红外涂层隐身原理	181
6.3.2	中远红外隐身技术途径	182
6.3.3	中远红外隐身涂料	186
6.3.4	低发射率涂层	195
6.3.5	热迷彩涂层	199
6.3.6	热反射涂层	201
6.3.7	相变材料涂层	202
6.4	激光隐身材料	204
6.4.1	激光隐身原理	204
6.4.2	激光隐身材料	205
6.5	光电假目标	207
第7章	压制性光电干扰材料	211
7.1	燃烧剂	211
7.1.1	油基燃烧剂	212
7.1.2	金属燃烧剂	214
7.1.3	烟火燃烧剂	216
7.1.4	自燃燃烧剂	217
7.2	导电纤维类干扰材料	219
7.2.1	碳纤维	219
7.2.2	镀铝玻璃纤维	221
7.2.3	导电纤维丝束设计要求	223
7.3	导电粉尘	223
7.4	导电液溶胶	225
7.4.1	掺合型导电涂料	225
7.4.2	导电液溶胶的性能要求	229
7.4.3	带电粒子在电场中的运动	230
7.4.4	带电粒子在电场中的沉降	231

7.5 激光毁伤效应	233
7.5.1 热烧蚀破坏效应	233
7.5.2 激波破坏效应	235
7.5.3 辐射破坏效应	235
附表 A 烟火药危险性分类表	237
附表 B 美国炸药贮存距离表	241
附表 C 烟火制造工房、库房和贮存室离开居住建筑、客运铁路和公路的 最小间距	243
附表 D 烟火药制造工房的最小间距	244
附表 E 粉体的流动性指数	245
附表 F 粉体的喷流性指数	246
参考文献	247

第 1 章

绪 论

材料、信息和能源被认为是现代文明的三大支柱，而材料是工程技术的基础与先导。现代社会的进步，在很大程度上都依赖于新材料的发现与发展。无怪乎历史学家将材料作为文明社会进化的标志，将历史划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等。20 世纪 80 年代出现的新技术革命把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。

材料的发展最早是从结构材料 (structural materials) 开始的，结构材料是反映能承受外加载荷而保持其形状和结构稳定的材料，如建筑材料、机器制造材料等。功能材料 (functional materials) 的概念是美国 Morton J A 于 1965 年首先提出来的，是指具有优良的物理、化学和生物或相互转化的功能，用于非承载目的的材料，又分为一次功能材料和二次功能材料。一次功能材料指的是向材料输入的能量和从材料输出的能量属于同一种形式时，材料起到能量传输部件的作用。二次功能材料指的是向材料输入的能量和从材料输出的能量属于不同形式时，材料起能量转换部件的作用。有人认为这种材料才是真正的功能材料。功能材料是能源、计算机、通信、电子、激光等现代科学的基础，在未来社会发展中具有重大的战略意义，因而新型功能材料的研究在近年来得到了突破性的进展。

1.1 材料光电磁现象起源

电磁现象是由带电荷的基本粒子之间的相互作用引起的。电荷是基本粒子的内禀性质，实际上讨论一个基本粒子的电荷，比讨论它的质量更精确。这是因为根据相对论的质能原理，一个粒子的质量在不同环境中可以是不一样的。例如，核子的平均质量在中等原子质量的元素中是最小的，这也是在不违背能量守恒定律的前提下，裂变和聚变核反应能进行的基本原因。基本粒子的电荷却是非常稳定的，基本粒子组成的微观物体或宏观物体，其总电荷在任何物理过程中都是守恒的。在宏观物体中往往正负电荷互相抵消，呈现为中性，此时电相互作用很小，不容易被人察觉。自然界中虽然不存在严格的质量守恒，却存在严格的电荷守恒 (conservation of charge) 。电荷守恒的意思是，在任何物理过程中，正负电荷之和是个守恒量，任何相互作用都不会改变这个守恒量。这是富兰克林最早提出的假设，后来经过无数实验的验证而无误。

电相互作用的精确规律是在 1785 年由法国人库仑 (Charles Augustin Coulomb) 发现的，因而把在任何两个带电荷的粒子或物体之间都有的电相互作用力称为库仑力 (Coulomb force) 或静电力 (electrostatic force) ，也证明了电相互作用是直接和电荷联系在一起。

电和磁现象的联系，首先是由丹麦人奥斯特发现的。在 1820 年左右，奥斯特发现的电流对磁针的作用力和安培精确测量的两根带电流的导线间的作用力，显示了磁相互作用力与运动电荷有关。奥斯特对电磁学的发现促进了安培对电磁力的研究，这两人的工作也导致了毕奥-萨伐尔定律 (Biot-Savart law) 的发现，并由此导致了应用广泛的电磁铁的出现。后来法拉第得到了更广泛的关于电和磁关系的观念，并设计了很多实验，证明电流和磁倾向于彼此环绕。安培受到菲涅耳的启示，提出“磁在本源上是由于电流的作用，在磁体中的每个粒子都有一种产生磁极的赤道圈式的电流”，这就是著名的安培分子电流观念，其推广了法拉第的电与磁的环绕关系。20 世纪原子物理和量子力学建立以后，证明原子磁矩是由绕核电子的轨道角动量和电子自旋共同贡献的，这使得安培分子电流假说有了实在的内容。

法拉第是 19 世纪电磁领域最伟大的实验家。1831 年 10 月，他将永磁体插入与电流计连接的螺线管中，结果电流计的指针发生跳动，他清楚地认识到，这不是来自伏打电池的电流，应该是感生电流，这就是著名的法拉第电磁感应定律 (Faraday's law of electromagnetic induction) 的发现。法拉第创造了一种电场或磁场中的“力线”符号 (图 1.1)，并用“力线”符号代替了数学分析，从而把问题分析很清楚。法拉第通过思辨和实验验证，导出“光与磁之间存在某种直接联系”这一重大结论。1845 年，法拉第使线偏振光通过一片放置在强大磁场中的“重玻璃片”，然后发现光波通过该材料以后光的波前发生扭曲。法拉第并没有做仔细的理论分析，但是足以使他深信光与电磁现象是有关系的，他的这个思想直接影响了麦克斯韦。

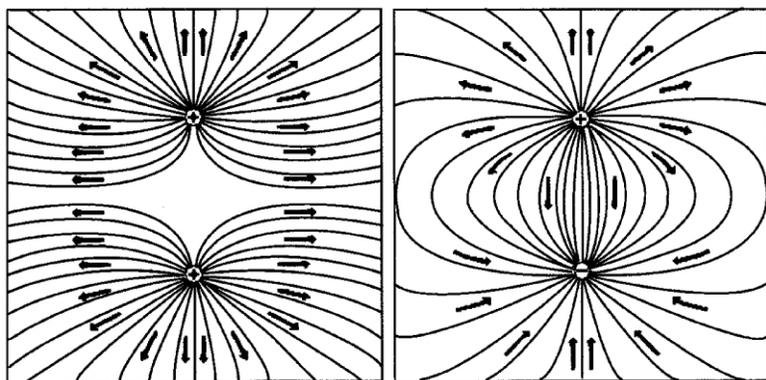


图 1.1 法拉第用来分析电场的“力线”

1861—1862 年，麦克斯韦发表了题为 *On Physical Lines of Force* 的论文，开始把法拉第的实验思想翻译成数学语言。麦克斯韦认识到电磁场的能量存在于电介质与导体之中。法拉第曾经对电介质在电磁感应中的作用做过讨论，他认为电介质在外加交流电场中会发生类似“受迫振动”的行为。麦克斯韦改变了法拉第的术语，他认为电位移的变化是一种电流，被称为“位移电流 (displacement current)”，位移电流也会感应出周围的磁场，与导体中的传导电流的作用是类似的。更重要的是麦克斯韦认识到介质中的电位移会产生一种波速接近光速的波，这就开启了电、磁、光现象统一的美妙数学理论的大门。麦克斯韦提出此观点的时候，并没有扎实的实验证据，但是其建立的方程组却预言了电磁波的存在，后来被赫兹用电磁波实验证实了。

赫兹用莱顿瓶 (Leyden jar) 作为电磁波的发生源。莱顿瓶在电学发展史上是个重要的实验设备, 实际就是一个电荷存储装置。图 1.2 中显示的间距被调节到很小的两对铜球, 分别是 1887 年赫兹实验的发射器 (transmitter) 和接收器 (receiver), 发射器连着变压器和莱顿瓶, 接收器则用一个圆形导线连接起来。当实验室中一边的莱顿瓶发生振荡放电的时候, 另一边接收器中的两个黄铜球之间会产生细微的电火花 (electric spark)。当时赫兹非常激动, 因为这个凌空产生的电火花就证实了电磁波 (electromagnetic wave) 确实空间发生了传播。赫兹还使用大的薄锡板作为电磁波反射镜, 使电磁波发生反射、折射、衍射和偏振, 还让电磁波在水中发生折射等。赫兹讲 “这些实验的目的就是要验证法拉第-麦克斯韦理论的基本假说, 而实验的结果证实了这个理论的基本假说的正确性。” 后来科学家的实验证明: 单位时间内, 受光照作用的金属板释放出来的电子数和入射光的发射强度成正比; 电子的初动能随入射光的频率线性增强, 与入射光的光强度无关; 光电子的发射时间与光的强弱无关, 光电子的逸出几乎是在光照到金属表面上即时发生的。

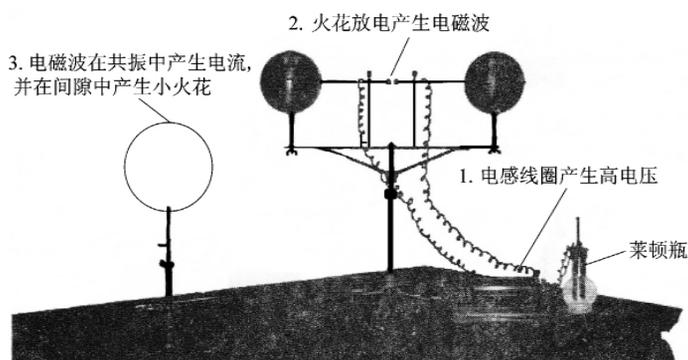


图 1.2 赫兹实验的基本框架: 莱顿瓶、发射器、接收器

由赫兹实验开始, 电、磁、光现象都被统一在电磁波这个概念下, 同时电磁波谱 (electromagnetic spectrum) 的概念开始建立。实际上, 人类现在已经能充分运用电磁波谱的各个波段, 在自然科学、工学的很多领域进行基础研究, 并在信息电子有关的工业领域进行商业化应用。

电磁波 (又称电磁辐射) 是由同相振荡且互相垂直的电场与磁场在空间中以波的形式移动, 其传播方向垂直于电场与磁场构成的平面, 有效地传递能量和动量。由物质中的分子、原子受到热激发而发射电磁波的现象称为热辐射。电磁波在空间传播过程中所携带的能量, 称为电磁辐射能。

电磁辐射可以按照频率分类, 从低频率到高频, 包括无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和 γ 射线等 (图 1.3)。只要是本身温度大于绝对零度的物体, 都可以发射电磁辐射。按照波长或频率的顺序把这些电磁波排列起来, 就是电磁波谱。

电磁波是以波动的形式在空间传播的, 因此具有波动性; 而电磁波是由密集的光子微粒组成的, 其在与物质相互作用时, 主要表现为粒子性, 因此电磁波具有波粒二象性。波粒二象性是微观世界物质运动的基本规律。电磁辐射的实质是光子微粒的有规律的运动。频率越低, 光的波动性越显著; 频率越高, 粒子性越显著。电磁波的粒子性, 使得电磁辐射的能量具有统计性。

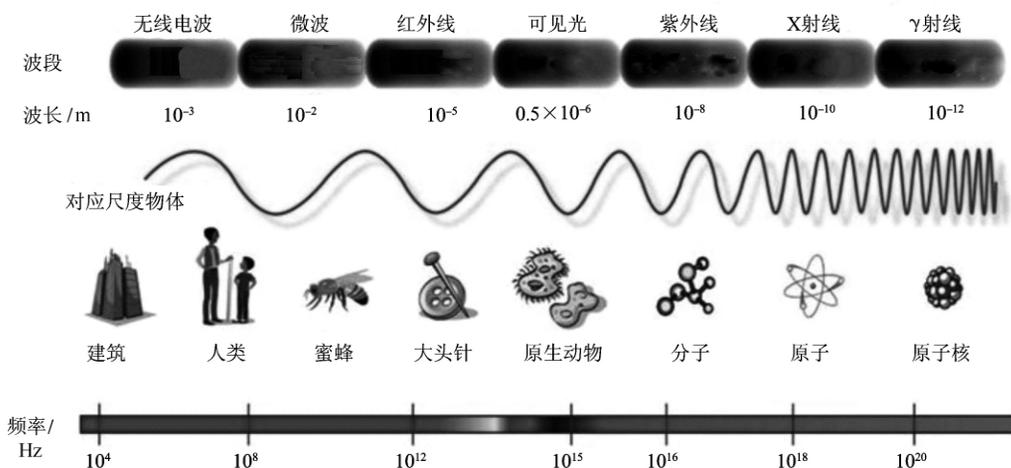


图 1.3 电磁波谱

人眼可接收到的电磁辐射，波长在 380~780 nm 之间，称为可见光。可见光是人类自然而然就认知到的，其他波段的电磁波，却是在赫兹的电磁波实验以后才逐渐为人类所知，并逐渐应用到生活领域。赫兹最早发现的是无线电波，这可能通过振荡电路 (resonant circuit) 的方法获得。赫兹发现阴极射线能穿过金属箔，而不是反射。他的实验过后没多久，在 1895 年，德国维尔茨堡的医生伦琴发现克鲁斯阴极射线管发射的一种辐射引起一张涂有氰化钠钡的屏幕闪闪发光，而且他发现这种射线能穿透普通光线不能穿透的纸、木头、铝，甚至人体。伦琴命名这种射线为 X 射线 (X-rays)，意思是未知的，他用这种射线拍摄的一张人体全身骨架照片，配合上主人公同时衣冠楚楚的照片做对比，登载在报纸上，在德国和欧洲造成轰动。1912—1913 年，劳厄、布拉格父子等终于使用 X 射线实现了对晶体微观结构的实验观测，同时证明了 X 射线是电磁波以及晶体确实具有完美的周期结构，这是物理学和其他学科有重要影响的衍射学的开端。同样在 1895 年，德国的 Lummer、Pringsheim 和 Kurbolm 测定了在给定温度下的辐射强度。他们证实了热辐射是电磁波引起的，而且其辐射强度 (radiation strength) 在某个波长上有极值。1900 年，普朗克在讲课时为了解释这个现象，发现必须把光的能量量子化，再使用玻尔兹曼的统计物理的方法，才能得到符合实验的理论曲线，拉开了 20 世纪伟大的量子物理的序幕。

爱因斯坦从普朗克的能量量子化假设中得到了启发，认为普朗克的理论只考虑了辐射物体上谐振子能量的量子化，即谐振子所发射或吸收的能量是量子化的，他则提出辐射能本身也是量子化的，也就是说光在空间传播时，也具有粒子性，粒子 (现称为光子) 的能量 $E_0 = h\nu_0$ ，其与光的频率成正比。爱因斯坦提出的“光子说”成功地解释了光电效应的实验结果，使得人们第一次对同一客体使用两种图像来描述：光虽然确定是一种电磁波，但同时亦是由光子组成的粒子流。

依据光子理论，当金属中一个自由电子从入射光中吸收一个光子后，就获得能量 $h\nu$ ，如果 $h\nu$ 大于电子从金属表面逸出时所需的逸出功 A 时，这个电子就可从金属中逸出。由能量守恒定律可知，其最大初动能与光子频率有关。这个理论于 1916 年被密立根的实验所证

明。同样由光子理论可得出，当一个光子被吸收时，全部能量立即被吸收，不需要积累能量的时间，说明了光电效应的瞬时发生的问题。

1916年，爱因斯坦又提出，在电磁辐射同物质粒子相互作用时，每个光子在传递一份能量 $h\nu$ 的同时，还传递一份大小为 $p=h/\lambda$ 的动量。1923年前后，这个假设被康普顿散射实验所证实（图1.4）。其利用特殊实验装置发现了散射光谱中除有与入射线波长 λ_0 相同的射线外，还有波长 $\lambda > \lambda_0$ 的射线。这也有力证实了光子理论，说明了光子具有一定的质量、能量和动量，同时也证实了在微观粒子相互作用的基元过程中，也同样严格地遵守着能量守恒定律和动量守恒定律。

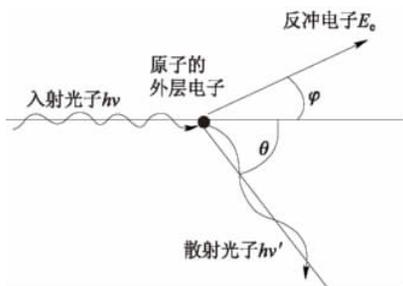


图 1.4 康普顿散射示意

由光的波粒二象性的提出可以看出，在光子论提出之前，人们过于重视波动的研究而忽视粒子规律的研究。那么在原子结构的理论方面，是否是过于重视粒子规律的研究？由此，1923年法国年轻的物理学家德布罗意（L. de Broglie）大胆假设实物微粒也应像光子一样具有波粒二象性，即：任何运动着的物体都会有一种波动伴随着，因此不可能将物体的运动同波动的传播分拆开来，这种波动称为“相位波”。

德布罗意认为，质量为 m 的粒子以速度 v 匀速运动时，具有能量 E 和动量 p ；从波动性方面来看，其具有波长 λ 和频率 ν ，这些量之间的关系也和光的各量之间的关系一样。

$$\begin{aligned} E &= mc^2 = h\nu \\ p &= mv = h/\lambda \\ \lambda &= h/p = h/mv \end{aligned}$$

需要指出的是，德布罗意并不是简单地套用光量子的概念，而是进行过一种以相对论和量子论为基础的具体推导。

1927年，戴维逊（Davisson）和革末（Germer）采用 54 eV 的电子束在镍单晶上进行反射实验，测得的入射电子束的波长与计算值吻合得很好，从而证实了电子束德布罗意波的存在。同时，汤姆逊（Thomson）父子的电子衍射实验也证实了电子的运动具有波粒二象性。随后，人们进一步测定了其他基本粒子（如原子、分子和质子等）的德布罗意波长。

1.2 电子战与光电对抗

在我国习惯称电子战为电子对抗，而西方国家则称之为电子战（electronic warfare, EW），其诞生于 20 世纪初。随着电子战技术、装备和战术的发展，电子战的内涵也不断发展，定义几经修改（图 1.5）。海湾战争后，美国参谋长联席会议又对电子战做了重新定义：利用电磁能或定向能控制电磁频谱或攻击敌军的任何军事行动。它由电子攻击（EA）、电子防护（EP）和电子战支援（EWS）三部分组成。该定义实际上是对电子战概念的又一次扩展，即将定向能武器的攻击也列入电子战范畴，而且对敌方的攻击也不仅限于敌方电磁频谱的使用。

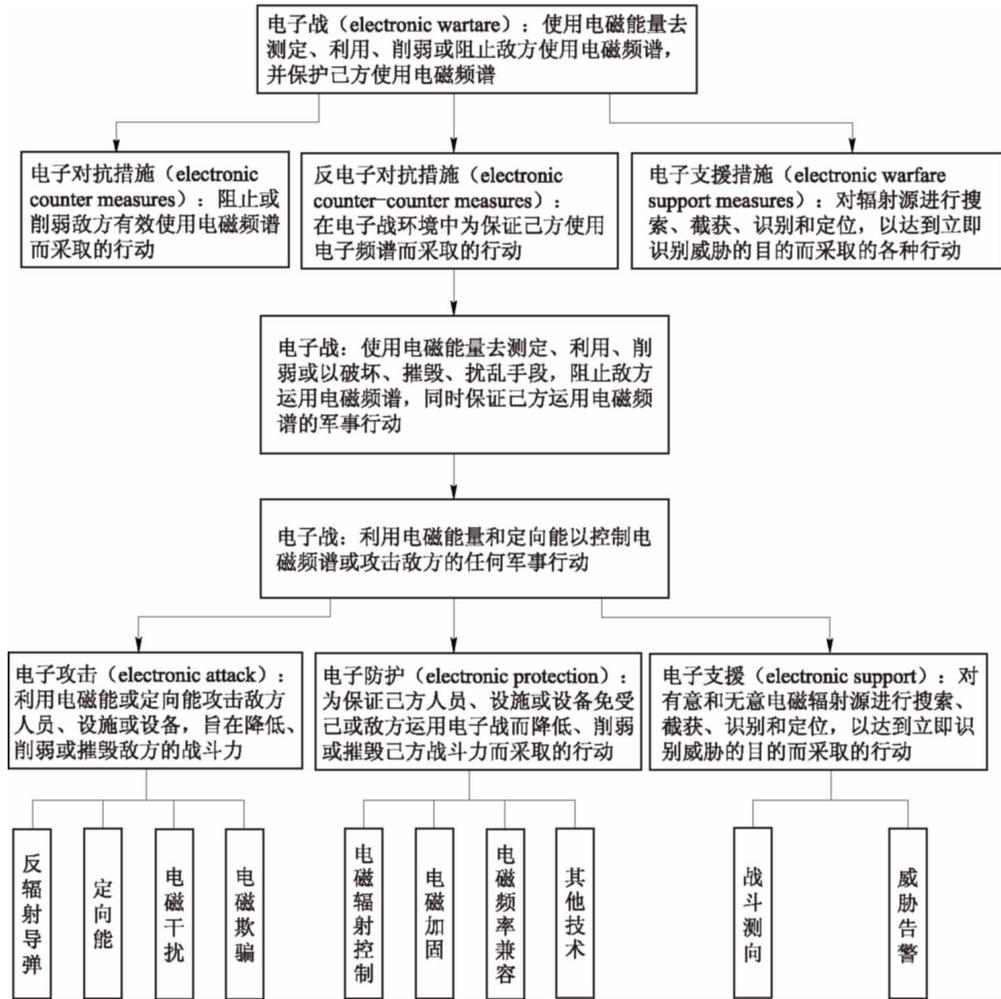


图 1.5 电子战概念发展历程

光电对抗 (electro-optical countermeasure) 是电子战的一个重要组成部分，是电子战中光波段 (紫外、可见光、红外波段等) 的抗争，是为了削弱、破坏敌方光电设备的使用效能，保护己方光电设备正常发挥效能而采取的各种措施和行动的统称。具体来说，就是指利用光电设备和器材对敌方光电武器进行侦察告警并实施干扰，使敌方的光电武器 (主要是各类光电制导武器、光电侦察设备等) 削弱、降低或丧失作战效能，或通过采取光电隐身、光电假目标、光电防护等反侦察、反干扰措施，避免己方武器装备或作战人员受到敌方光电武器设备的侦察和干扰，从而有效地保护己方光电设备和人员，提高其战场生存能力和作战效能。

光电对抗是否有效，必须符合如下四个基本特征：光电频谱匹配性、干扰视场相关性、最佳距离有效性和干扰时机实时性。随着现代光电子技术的发展，光电武器装备日趋增多，光电对抗也日趋激烈。光电对抗基本形式如图 1.6 所示。

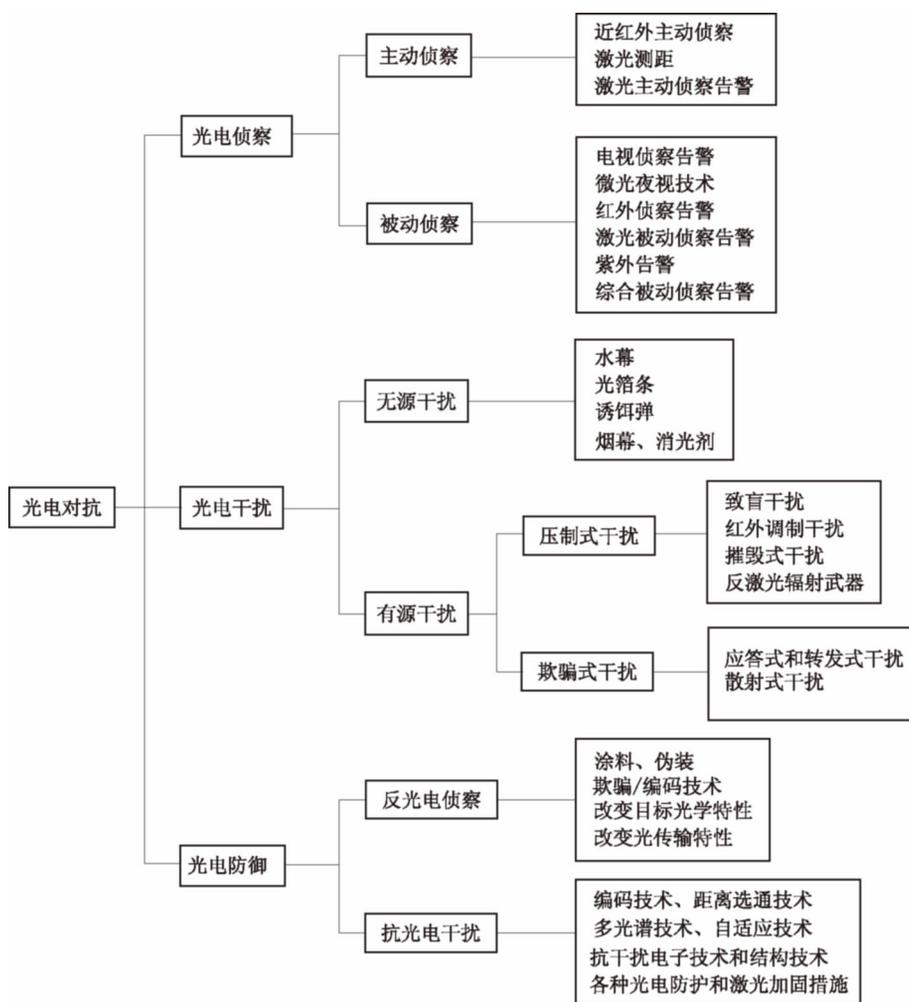


图 1.6 光电对抗的基本形式

1.3 光电对抗材料特征及分类

当今世界，以新材料和信息技术为核心的高新技术的迅猛发展和广泛应用，使得多种军用光电武器与装备在情报侦察、夜间作战、远程打击等作战行动中发挥了极其重要的作用，因此与之相抗衡的光电对抗技术也逐渐引起重视，并走上快速发展的道路。

光电对抗技术发展的关键是光电对抗材料技术的发展。光电对抗材料是通过材料本身结构和组成实现对电磁波的吸收、散射、反射、发射等功能，属于功能材料，严格意义上讲是属于二次功能材料。其可以是单质，也可以是化合物，可以是导体、半导体或绝缘体，还可以由化学反应产生相应的光电对抗效应，大多数情况下，光电对抗材料以粒子的状态发挥对抗效应。但光电对抗材料不是光电材料。光电材料是能把光能转变为电能的一类能量转换材料，主要包括光电子发射材料、光电导材料和光电动势材料三种。

随新材料和新型加工、制备技术的发展，光电对抗材料的应用范围更宽，作用效率更