

四川省2011年度重点图书项目

太阳能光伏与照明应用技术系列教材

气体放电型

照明光源

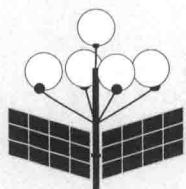
qiti fangdianxing zhaoming guangyuan

王文丽 主 编

周太明 主 审



电子科技大学出版社



四川省2011年度重点图书项目

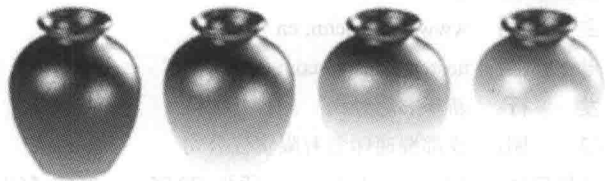
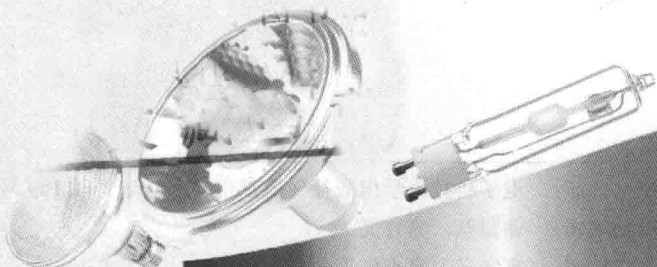
太阳能光伏与照明应用技术系列教材

气体放电型 照明光源

qiti fangdianxing zhaoming guangyuan

王文丽 主 编

周太明 主 审



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

气体放电型照明光源 / 王文丽主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2012.6
四川省 2011 年度重点图书项目
太阳能光伏与照明应用技术系列教材
ISBN 978-7-5647-1162-7

I. ①气... II. ①王... III. ①气体放电灯—教材
IV. ①TM923.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 108790 号

四川省 2011 年度重点图书项目
太阳能光伏与照明应用技术系列教材

气体放电型照明光源

王文丽 主 编 周大明 主 审

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 郭蜀燕 辜守义
责任编辑: 辜守义 高小红
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮件: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 22.75 字数 550 千字
版 次: 2013 年 2 月第一版
印 次: 2013 年 2 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-1162-7
定 价: 66.00 元



■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

四川省 2011 年度重点图书项目
太阳能光伏与照明应用技术系列教材

丛书编委会人员名单

主 审：吴援明 刘 爽

主 编：于军胜 饶海波 李 伟 李绍荣 祁康成 严高师

参编人员（按姓名笔画排序）：

丁 坤 于军胜 万远涛 万贤龙 王文丽

王 军 王 玮 龙剑平 祁康成 杨昕梅

李 伟 李绍荣 宋继荣 林 慧 周琳淞

钟 建 胡 玥 饶海波 顾得恩 唐普英

高 原 高寒松 黄宇红 曹贵川 曾红娟

谢立坤 廖骏源

序

人类社会发展到现阶段，自然资源与生存环境面临着非常严峻的挑战。当前世界各国致力于资源节约型与环境友好型社会的建设，因此，作为“开源节流”型的太阳能光伏技术和高效固态照明技术，符合社会发展的历史潮流和国家节能减排的大政方针。但是，当前我国在太阳能光伏和新型照明领域的人才非常缺乏，相关的教材和图书配套很不完善，本系列教材所涉及的八本系列性的图书正是在这个背景下规划、出版的，可以满足理工科院校的新专业的需求、高校院所人才培养和科学研究的要求。编委会由多名教授、博导以及博士青年教师组成，在材料的制备、表征、性能优化、器件工艺及应用技术等方面，具备丰富的教学与科研经验。我们相信，该系列教材可以为国家“卓越工程师计划”在相关光电材料与器件领域提供参考与帮助。

吴援明

2011年8月

前 言

21 世纪初,我国城市建设快速发展,人们生活水平不断提高,科学技术日益发展,城市街道景观、广场、公共空间、娱乐活动场所都得到了快速发展。同时,能源和环境成为我们可持续发展所面临重大问题。照明设计从建筑中的电气设计分离出来,成为一种专门的学科。节能、环保、绿色照明、宜居成为当前城市照明发展的目标。

城市照明的发展给光源和灯具提供了更广阔的发展空间。从光源的发光机理可以将光源分为热发光光源(白炽灯、卤钨灯)、气体放电灯(汞灯、荧光灯、钠灯、金卤灯、氙灯等)、固体光源(半导体发光二极管 LED)。白炽灯的光效较低,即将被退出市场;气体放电光源从 20 世纪八九十年代进入普通家以来,一直是照明市场的主力军;半导体发光二极管是典型的固体光源,近十年来的发展突飞猛进。目前在市场上广泛应用的气体放电灯在越来越多的领域和 LED 光源共存,发光二极管的理论和基础研究在当前广泛发展的形式下,照明设计师还须对气体放电光源的原理加以对比。为此,我们编写了本书,以享更多的光源与照明专业的学生。

气体放电灯的理论在 20 世纪 80 年代后已基本成熟,我国光源与照明专业的创祖——复旦大学在此领域的研究与教学上做出了卓越的贡献,本书在复旦大学各位前辈工作的基础上、在周老前辈大力的帮助下,增加了一些基本的理论基础,扩展了光源的理论基础。

全书共 8 章,第一章讲述了光源和灯具的基础知识,包括光和光度量、色度学基础、测量方法和仪器、灯具的测量、灯具基础;第二章讲述了人眼的视觉和人体生物效应,包括人眼的视觉、视觉的生理基础、视觉特性、视觉功效、光对人体产生的非视觉人体效应;第三章主要讲述了气体放电光源的物理基础,包括热辐射理论、气体放电的辐射发光、光发射理论、气体放电的理论物理基础;第四章讲述了气体放电的基本原理,包括放电的基本原理、电子发射、带电粒子在气体中的运动,带电粒子和气体的相互作用,气体放电的过程及其理论,气体放电的类型,放电理论和特性,正柱理论、电极理论,气体放电灯的工作电路,发光物质的选择;第五章讲述了气压水银荧光灯,包括水银的特性、低压汞蒸气的实验研究、荧光灯的设计要点、荧光灯的工作电路、荧光灯的种类;第六章讲述了高压汞灯,包括高压汞灯的发展、高压汞灯的放电、光的特性、高压汞灯的结构、高压汞灯的光效、高压汞灯的设计要点、高压汞灯的制造、高压汞灯的特性和寿命、高压汞灯的光色和使用,超高压汞灯、超高压汞灯的启动;第七章讲述了钠灯,包括钠的性质、低压钠灯的辐射放电理论、低压钠灯的工作特性、高压钠灯、高压钠灯的结构和设计、高压钠灯的光效与显色性、高压钠灯的特性和使用、高压钠灯的类型;第八章讲述了金属卤化物灯,包括金属卤化物灯的基本原理、金属碘化物对电弧的影响、化学平衡,稀土金属卤化物灯、钠-铊-铟金属卤化物灯、金属卤化物灯对工作电路的要求,超高压铟灯、卤化锡灯和卤化铝灯,特殊用途的金属卤化物灯,小功率金卤灯,金属卤化物灯的新发展,陶瓷金属卤化物灯,微波硫灯等。

非常感谢照明学会的徐淮理事长对本书所提出的建议、支持与帮助。本书的编写还得到了学生陆海川、邹勇等的大力协助，在此向他们表示衷心的感谢。本书适合从事光源与照明方向的教师和科研人员。

科学技术的发展日新月异，由于编者学识水平有限，书中谬误在所难免，恳望同行专家和广大读者批评指正。

编者

2012年于成都

目 录

第 1 章 光源与灯具的基础知识	1
1.1 光和光度量	1
1.1.1 光与辐射	1
1.1.2 光度量及其单位	7
1.2 色度学基础	10
1.2.1 颜色的特性	10
1.2.2 表色系统	11
1.2.3 光源的颜色参数	17
1.3 测量	20
1.3.1 辐射探测器	20
1.3.2 光谱测量	22
1.3.3 照度和亮度	24
1.3.4 灯具座法	24
1.4 灯具	30
1.4.1 灯具的配光曲线	30
1.4.2 灯具的测量参数	31
1.4.3 灯具的种类及艺术效果	32
1.4.4 不同安装方式的灯具	33
第 2 章 人眼的视觉和人体生物效应	34
2.1 人眼的视觉	34
2.2 视觉的生理基础	34
2.2.1 眼睛	34
2.2.2 视网膜	35
2.2.3 感光细胞	36
2.3 视觉特性	37
2.3.1 光谱光视效率函数	37
2.3.2 明视觉、暗视觉和中间视觉	39
2.3.3 视觉适应	41
2.3.4 视觉的控制	42
2.3.5 表观明度	42
2.3.6 眩光	43
2.3.7 频闪	44
2.4 视觉功效	44

2.4.1	视锐度	44
2.4.2	视觉阈值	45
2.4.3	对比敏感度	46
2.5	光对人体产生的非视觉生物效应	46
2.5.1	光和人体周期节律	46
2.5.2	光与健康、舒适度和清醒度	47
第3章	气体放电光源的物理基础	48
3.1	热辐射理论	48
3.1.1	基尔霍夫定律	48
3.1.2	绝对黑体	49
3.1.3	实际辐射体	52
3.2	气体放电的辐射发光	54
3.2.1	原子分子结构和能级	54
3.2.2	原子光谱的规律性	59
3.2.3	不同原子的光谱	62
3.2.4	线光谱	64
3.2.5	分子的带状光谱	65
3.2.6	连续光谱	66
3.2.7	惰性气体原子光谱	67
3.3	光发射理论	68
3.3.1	爱因斯坦受激发射	68
3.3.2	共振辐射的有利条件	69
3.4	气体放电的物理理论基础	71
3.4.1	汤生雪崩	71
3.4.2	二次发射	72
3.4.3	启动电压和环境温度	73
3.4.4	潘宁效应	73
3.4.5	巴邢定律	74
第4章	气体放电灯的基本原理	76
4.1	气体放电灯的基本原理	76
4.2	电子发射	76
4.2.1	热电子发射	77
4.2.2	正离子轰击发射	78
4.2.3	场致发射	78
4.2.4	电子轰击发射	78
4.3	带电粒子在气体中的运动	79
4.3.1	带电粒子在气体中的热运动	79

4.3.2	带电粒子在气体中的迁移运动	80
4.3.3	带电粒子在气体中的扩散运动	80
4.3.4	带电粒子的双极性扩散	81
4.3.5	带电粒子的消失	83
4.4	带电粒子和气体的相互作用	83
4.4.1	碰撞和碰撞截面	83
4.4.2	原子的激发和电离	86
4.5	气体放电的过程分类和理论	88
4.6	气体放电的类型	89
4.6.1	辉光放电	89
4.6.2	弧光放电	93
4.6.3	高频无极放电	95
4.7	放电理论和特性	97
4.7.1	辉光放电和弧光放电的电流电压理论	97
4.7.2	低气压放电特性	99
4.7.3	高压气体的放电特性	100
4.8	正柱理论	100
4.8.1	荧光灯放电正柱或等离子体	100
4.8.2	荧光灯的电场和电位	103
4.8.3	正柱中的电子速度	105
4.9	电极理论	106
4.9.1	阴极的基本机理	106
4.9.2	阴极的基本方程	106
4.9.3	阳极位降及阳极附近的物理过程	110
4.10	气体放电灯的工作电路	111
4.10.1	放电灯的负阻特性	111
4.10.2	电阻镇流	112
4.10.3	电感镇流	118
4.10.4	电容镇流	121
4.11	发光物质的选择	124
第 5 章	低压水银荧光灯	126
5.1	水银的特性	127
5.2	低压汞蒸气的实验研究	128
5.2.1	低压汞蒸气放电的最佳汞蒸气压	128
5.2.2	惰性气体的作用	129
5.2.3	低压汞灯的直径和长度	130
5.2.4	电流密度的选定	131
5.3	荧光灯的设计要点	132



5.3.1	灯的尺寸和电参数	132
5.3.2	荧光粉层	135
5.3.3	电极的设计材料	137
5.3.4	汞灯中的惰性气体	141
5.3.5	灯中汞蒸气压的控制	142
5.4	荧光灯的工作电路	144
5.4.1	镇流器的功能和指标	144
5.4.2	电磁式镇流电路	145
5.4.3	荧光灯的高频工作特性和电子镇流器	147
5.5	荧光灯的工作特性	153
5.5.1	荧光灯的能量平衡	153
5.5.2	光输出维持特性	154
5.5.3	工作条件对灯特性的影响	155
5.5.4	紫外辐射的防护	156
5.5.5	荧光灯的寿命和启动	156
5.6	荧光灯的种类	158
5.6.1	大功率荧光灯	159
5.6.2	小功率荧光灯	160
5.6.3	反射式和缝隙式荧光灯	161
5.6.4	T5 荧光灯	162
5.6.5	冷阴极荧光灯	163
5.6.6	平板荧光灯	166
第 6 章	高压汞灯	170
6.1	高压汞灯的发展	170
6.2	高压汞灯的放电	171
6.2.1	高压汞灯的放电特点	171
6.2.2	局部温度平衡的结果	173
6.2.3	放电温度的估算	174
6.3	高压汞灯光的特性	175
6.3.1	线光谱	175
6.3.2	连续光谱	176
6.4	高压汞灯的结构	178
6.5	高压汞灯的光效	181
6.5.1	高压汞灯光效的决定因素	181
6.5.2	单位弧长的热损耗功率	182
6.5.3	高压汞灯的辐射效率	184
6.5.4	高压汞灯的光效	185
6.6	高压汞灯的设计要点	186

6.6.1	灯管电参数的选择	186
6.6.2	灯的几何尺寸的计算	187
6.6.3	汞的蒸气压	188
6.6.4	灯的管壁负载	190
6.6.5	汞量 M 的计算	190
6.6.6	高压汞灯的电极	191
6.6.7	荧光粉的选用	192
6.7	高压汞灯的制造	193
6.8	高压汞灯的特性和寿命	195
6.8.1	高压汞灯的启动特性	195
6.8.2	高压汞灯的光特性	199
6.8.3	高压汞灯的寿命	199
6.9	高压汞灯的光色和使用	200
6.10	超高压汞灯	202
6.10.1	超高压汞蒸气放电	202
6.10.2	球形超高压汞灯	203
6.10.3	毛细管超高压汞灯	209
6.11	超高压汞灯的启动	212
第 7 章	钠灯	216
7.1	钠的性质	216
7.1.1	钠元素的性质	216
7.1.2	钠的化学性质	217
7.2	低压钠灯的辐射放电理论	217
7.2.1	低压钠蒸气辐射	217
7.2.2	低压钠灯的光效	222
7.3	低压钠灯的设计	224
7.3.1	保温措施——掺锡的氧化铟红外反射膜	224
7.3.2	放电管材料	225
7.3.3	防止钠迁移的方法	226
7.3.4	电极的材料和结构	227
7.3.5	潘宁启动气体	228
7.3.6	放电管尺寸的设计	229
7.4	低压钠灯的工作特性	229
7.5	高压钠灯	232
7.5.1	高压钠蒸气放电的辐射	232
7.5.2	添加气体的放电辐射	235
7.6	高压钠灯的结构和设计	240
7.6.1	高压钠灯的结构	240

7.6.2	高压钠灯的设计	241
7.7	高压钠灯的光效与显色性	244
7.8	高压钠灯的特性和使用	248
7.8.1	启动特性	248
7.8.2	启动方式	248
7.8.3	工作特性	252
7.9	高压钠灯的类型	255
第 8 章	金属卤化物灯	259
8.1	金属卤化物灯的基本原理	260
8.1.1	基本结构和基本原理	260
8.1.2	汞在金属卤化物灯中的作用	261
8.1.3	金属卤化物的种类	263
8.2	金属碘化物对电弧的影响	268
8.2.1	电弧收缩-变粗现象	268
8.2.2	碘化物的相互作用	271
8.3	化学平衡	273
8.3.1	热化学计算的结果	274
8.3.2	径向温度分布	276
8.3.3	没有吸收时的计算	278
8.3.4	吸收效应	280
8.4	稀土金属卤化物灯	285
8.4.1	灯的结构和特性	285
8.5	钠-铊-铟金属卤化物灯	295
8.5.1	金属卤化物灯的光谱特性	295
8.5.2	钠-铊-铟灯的设计	296
8.5.3	电极的材料和形状	299
8.5.4	灯的充填物	300
8.5.5	灯的外装架	301
8.6	金属卤化物灯对工作电路的要求	302
8.7	超高压铟灯	307
8.7.1	灯的结构	307
8.7.2	灯的特性	307
8.8	卤化锡灯和卤化铝灯	308
8.9	特殊用途的金属卤化物灯	311
8.10	小功率金卤灯	314
8.10.1	电弧管形状和尺寸的设计	315
8.10.2	小功率金卤灯的技术开发	319
8.11	金属卤化物灯的新发展	321

8.11.1	UPS 型金属卤化物灯	321
8.11.2	汽车前照灯用金属卤化物灯	324
8.12	陶瓷金属卤化物灯	331
8.12.1	为何要研发陶瓷金属卤化物灯	331
8.12.2	陶瓷金属卤化物灯的气密封接	332
8.12.3	陶瓷金属卤化物灯的电弧管的设计	333
8.12.4	飞利浦公司陶瓷金属卤化物灯的特性	335
8.12.5	陶瓷金属卤化物灯的新品种	340
8.13	微波硫灯	345
参考文献		348

大阳能技术工程应用案例解密

第 1 章 光源与灯具的基础知识

1.1 光和光度量

1.1.1 光与辐射

一、光的本质

对光的本性的科学假说,最初是牛顿在 1666 年提出的,他认为光是一种弹性粒子,称为“微粒说”。1678 年惠更斯认为光是在“以太”中传播的弹性波,提出了“波动说”。1873 年麦克斯韦根据电磁波的性质证明,光实际上是电磁波。从此人类对光的本性才有了比较正确的认识。1905 年爱因斯坦为了解释光电效应,提出了“光子”的假说,后来由于康普顿效应的发现而得到证实,这样使人类对光的认识更为全面。现代物理认为,光是一种具有波粒二象性的物质,即光既具有“波动性”又具有“粒子性”。只是在一定条件下,某一种性质显得更为突出。一般来说,除了研究光和物质作用的情况下必须考虑光的粒子性而外,可以把光作为电磁波看待,称为“光波”。电磁波理论认为发光体以辐射能的形式发射光,而辐射能又以电磁波形式向外传输,电磁波作用在人眼上就产生光的感觉。量子论认为,光是由许多光量子组成的,这些光量子具有的能量为 $h\nu$,其中 $h=6.626\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ 是普朗克常数, $\nu=c/\lambda$ 是光的频率, $c=2.99792458\times 10^8\text{m/s}$ 是真空中光速, ν 的单位是 s^{-1} 。量子电动力学较好地反映了光的波粒二象性。光在空间运动的特性可以用电磁波理论圆满地加以解释。

光波在电磁波谱里只占据很小的一部分(如图 1-1 所示),它的波长区间在几个纳米到 1mm 之间,包括 X 射线过渡区(1nm 左右)、紫外辐射、可见辐射、红外辐射和无线电波过渡区(1mm 左右)。这些光并不是都能看得见的,人眼所能看见的只是其中的一部分(380nm~780nm),我们把这一部分光辐射称为可见光,也就是人视觉所能感受到“光亮”的电磁辐射。广义地讲,光指的是光辐射,而从狭义上来讲,通常人们所说的光就是可见光。在可见光中,波长最短的是紫光,最长的是红光。在不可见光中,波长比紫光短的光称为紫外线,比红光长的叫做红外线。光的各个波长区域所对应的名称见表 1-1。

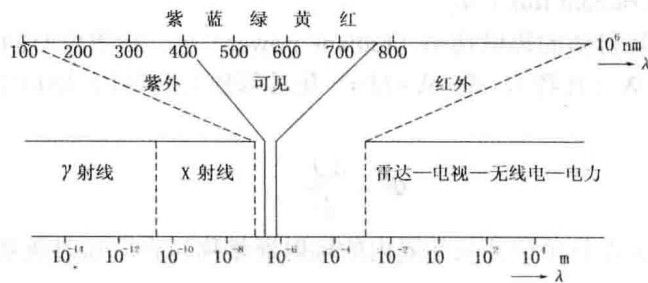


图 1-1 电磁辐射能谱

表 1-1 光的各个波长区域

波长区域(nm)	区域名称
1~280	UV-C (远紫外)
280~315	UV-B (中紫外)
315~380	UV-A (近紫外)
380~435	紫光
435~500	蓝、青光
500~566	绿光
566~600	黄光
600~630	橙光
630~780	红光
780~1400	IR-A (近红外)
1400~3000	IR-B (中红外)
3000~1 000 000	IR-C (远红外)

1. 辐射度量

通常所说的 X 射线、紫外辐射、可见光和红外辐射虽然不是都能用眼睛看得见的，但其中的 X 射线、紫外辐射和红外辐射的许多性质却完全可用与可见光相同的光学原理和定律来描述。纵然如此，在计量这些人眼看不见的光辐射能量时，必须选用对相应波段敏感的光电探测器而不能的眼睛。因此当我们研究关于光辐射能量的计量问题时，不得不把可见光与不可见光区别开来。辐射度学 (Radiometry) 是研究有关 X 射线、紫外辐射、可见光、红外辐射以及其他电磁辐射能量的计量学科。基本的辐射度参量有辐射能量、辐射通量、辐射强度、辐射出度、辐照度和辐亮度。

2. 辐射能量 (radiant energy) Q_e

辐射能量是以辐射形式发射、传播或接受的能量，单位为 J (焦耳)。当辐射能被其他物质吸收时，可以转变为如热能、电能等其他形式的能量。

单位体积元内的辐射能量称为辐射能密度 (radiant energy density)，单位是 J/m^3 (焦耳每立方米)。而在无穷小波长范围内的辐射能密度除以该波长范围所表示的是辐射能密度的光谱密级度，也称光谱辐射能密度 (spectra concentration of radiant energy density)，单位是 J/m^4 (焦耳每 4 次方米)。

3. 辐射通量 (radiant flux) Φ_e

辐射通量就是辐射体的辐射功率 (radiant power) P_e ，指单位时间内该辐射体所辐射的总能量，单位为 W (瓦特)，即 $1W=1J/s$ (焦耳每秒)。若以 t 表示时间，辐射通量的定义式为

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-1)$$

而光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射通量称为光谱辐射通量，这也常用来描述光源的辐射特性。

4. 辐射强度 (radiant intensity) I_e

辐射源在给定方向单位立体角内所包含的辐射通量为该方向上的辐射强度。即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-2)$$

式中, $d\Omega$ 表示指定方向上的立体角元; $d\Phi_e$ 表示离开辐射源的辐射通量。辐射强度定义如图 1-2 所示。

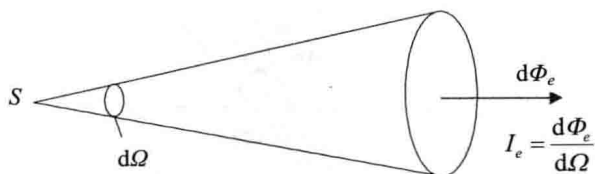


图 1-2 点辐射源的辐射强度

对于点辐射源, 在空间的总立体角为 4π , 故各向同性 (各个方向辐射强度相等, 为 I_e) 的点辐射源向所有方向的总辐射通量 Φ_e 为

$$\Phi_e = 4\pi \cdot I_e \quad (1-3)$$

5. 辐射出射度 (radiant exitance) M_e 和辐照度 (irradiance) E_e

辐射源面上单位面积的辐射通量称为该点处的辐射通量面密度 (radiant flux surface density), 分为两种情况: 辐射出射度和辐照度, 单位均是 W/m^2 (瓦每平方米)。

辐射出射度指单位面积辐射源所发射的辐射通量, 如图 1-3 所示, 数值上为离开辐射源表面一点处的面元的辐射通量 $d\Phi_e$ 除以该面元面积 dS , 即:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1-4)$$

辐射照度描述的是单位面积的上所接受的辐射通量, 如图 1-4 所示。数值上为照射在该辐射接受面上的辐射通量 $d\Phi_e$ 除以该面元面积 dA , 即:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-5)$$

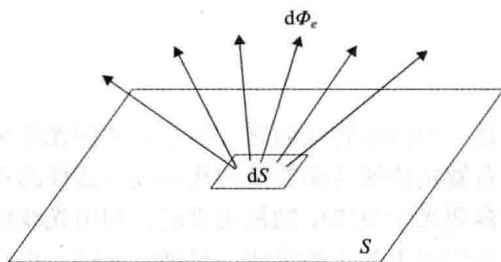


图 1-3 辐射出射度的定义示意图

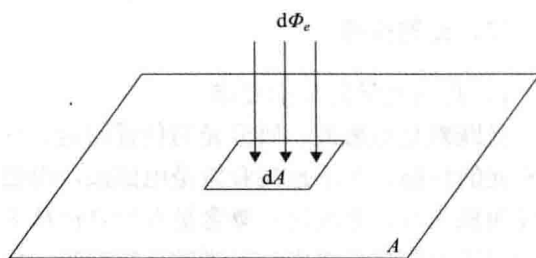


图 1-4 辐照度的定义示意图

辐射出射度 M_e 与辐照度 E_e 的表达式和单位完全相同, 但它们所描述的分别是辐射和接受的特性, 应从概念上分清。对于接受辐射后成为二次辐射源的表面而言, 其辐照度等于辐照度乘以表面的反射系数 ρ 。