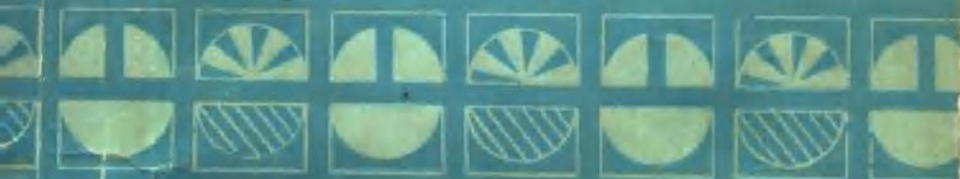


红外技术

〔西德〕K·斯达尔 G·缪斯卡 著

石定河 王桂群 译



华中工学院出版社

内 容 提 要

本书内容分为三大部分：第一部分介绍红外技术的物理基础；第二部分介绍红外技术的各个组成部分的工作原理、结构配置和发展现状；第三部分是本书的重点，较详细地介绍了红外技术在科学研究、工农业生产、医学、军事和日常生活等方面的应用。

本书取材系统、广泛，内容新颖，叙述简练。书中载有大量的图表、曲线和参考文献。本书不仅可供从事红外技术的科技人员、工人和大专院校师生参考，而且对从事普及或推广应用红外技术的其他部门的有关科技人员和管理干部也将有所裨益。

红 外 技 术

[西德] K·斯达尔 著
G·缪斯卡

石定河 王桂群 译

责任编辑 白战雄

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行 各地新华书店经售

咸宁县印刷厂印刷

开本：737×1092 1/32 印张：8.19 字数：177,000

1982年10月第1版 1982年10月第1次印刷

印数：4,000

书号：13255—009 定价：0.90元

译 者 的 话

红外技术是本世纪前半叶出现的一门新兴的科学技术。在初期阶段，其发展的主要推动力是军事方面的需要。后来，它在军事上也确实得到了广泛的应用。因此，一提起红外技术，人们自然会想到它是与军事应用分不开的，甚至认为红外技术就是军事技术。但是，近年来随着红外技术的迅速发展，特别是一些新型红外探测器和成象器件的陆续问世及其成本的不断降低，使得红外技术的应用范围大大扩展。在一些技术较发达的国家，红外技术不仅广泛用于军事、科学研究、工农业生产、医学等方面，而且已进入人们的日常生活。

我国的红外技术虽然起步晚些，但发展很快，应用范围也在不断扩大，当前已出现红外技术由军用转向民用，军民结合更快发展的形势。为了适应这种形势，推动红外技术的研究和发展，加快红外技术由军用转向民用的进程，我们翻译了《红外技术》一书，将它推荐给我国读者。

本书原著是红外技术领域的第一本德文书，它的内容较新，取材系统、广泛，叙述简单明了。本书除简略介绍了红外技术的物理基础，红外技术各个组成部分的工作原理、结构和发展现状外，还着重介绍了红外技术在民用方面的具体应用，甚至对在家用电器上的应用（例如无线电广播和电视的红外伴音传输系统以及收音机、电视机和幻灯机的红外遥控等）也作了介绍。这对我国当前红外技术的研究、普及和推广应用是有借鉴作用的。

本书译稿由华中工学院樊震副教授、刘贤德副教授以及查振亚、潘旭东、唐亮晶、刘栋玉、潘振达等同志分工进行了校订。此外，叶虎年、龚本正、陈国清、常江南等同志也参与了部分译稿的校阅工作。对他们的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢。

最后还要感谢华中工学院出版社的同志，他们为本书的出版做了大量的工作，正是由于他们的辛勤劳动，本书才得以及时与广大读者见面。

由于译者的业务水平有限，译文中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

译 者 1982年9月

前 言

1800年W. 赫胥尔就发现了红外光谱区，但是，直到本世纪三十年代初期，人们对这个光谱区还只是在学术上感兴趣。后来在实验中发现，每种处于绝对零度以上的物体均发射特征电磁辐射，这种辐射的波长（除很热的物体之外）主要位于电磁波谱的红外区。这个特性对于军事上观察和测定肉眼看不见的对象具有特殊的意义。正是这一发现和它在军事方面的重要用途，使红外技术迅速发展起来。在第二次世界大战期间，有的国家已使用了很先进的定位仪和夜视仪。近二十年来，军事红外技术又出现了一派可与同时期内雷达技术的蓬勃发展相比拟的繁荣景象。

那么，我们要问：人们只是在军事上对红外技术感兴趣吗？表面上看起来似乎是这样，其实不然，本书的内容正可以说明这一点。在许多技术的发展过程中常常可以看到：财政上得到很好照顾的军事技术总是比民用技术发展得快，但到一定阶段，民用技术必然要接受军事技术研究的成果（尽管时间推迟），用以解决那些用已有民用技术还不能解决或必须花费高昂代价才能解决的生产技术问题。这样作对于国民经济的发展和促进技术本身的进步都是有益的。

有一种偏见认为，民用红外技术就是指浴室用的和医用的红外加热器。为了纠正这种偏见，本书将全面介绍当前红外技术的应用情况，只是在辐射器一节中，才对加热器略加叙述（如要详细了解这方面的情况，请参阅有关加热器技术的专业文献）。为了促进红外技术由军用转向民用，本书对军用红外技术只作一般介绍，而把重点放在红外技术的民用方面。

作为专门介绍红外技术的第一本德文书，作者希望以此求教于各方面的行家。对于一般科学工作者，本书可以帮助他们了解情况，为进一步研究奠定基础。

在这里，作者要向所有对完成本书给予帮助的同事们表示感谢。作者还要感谢出版社，感谢他们接受了这本著作，从而使广大读者能够了解这门古老的，同时又是全新的技术。

K·斯达尔，G·缪斯卡

1979年秋

重 要 符 号 表

A_D	探测器的面积
A_o	接收镜头的有效面积；入瞳面积
A_R	辐射计透镜面积；透镜的有效孔径
bar	巴
bit	毕特
c	光速
C	电容；热容量；常数
d	光程差；距离；靶厚；透镜厚度
dB	分贝
D	光焦度；物镜的孔径；透射率；探测度
D^*	归一化探测度
D_c	接收系统的直径
E	辐照度；能量
E_{REF}	基准辐射的辐照度
f	焦距；电子系统频率
$f(T_m)$	温度测量仪的刻度函数
F	镜头的光圈数
G	千兆
h	普朗克常数；高度；透镜顶点到主点的距离
H	辐照量；陷阱
I	电流强度；波列强度；目标辐射强度
I_R	探测器的噪声电流
J	焦耳
J	光强度
k	波耳兹曼常数；衍射条纹的级数；吸收系数

K	开尔文；阴极
K	迈依散射系数；对比度；热导率
lm	流明（光通量单位）
lp	线对
lux (lx)	勒克斯（照度单位，1勒克斯=1流明/米 ² ）
L	辐亮度；长度
m	调制度
M	兆
M	辐射出射度；效率
n	毫微
n	折射率；量子数
N	微粒浓度；传导模式数
P	辐射功率（辐射通量）
Q	辐射能
Q _j	焦耳热
Q _c	传导热
Q _{net}	单位时间吸收的净热量
Q _d	放热功率
r	曲率半径；衍射暗环半径
rad	弧度
R	反射率；响应度；电阻
s	秒
sk	黑体
sr	球面度
s	光栅常数
T	绝对温度；周期
U _R	探测器的噪声电压
v	速度
V	伏

ω	角放大率
W	瓦
Z	温差电优值系数
α	吸收率；视场角；温差电系数
α_g	临界角
γ	散射系数
δ	偏向角；位向差
Δ	角色散
$\bar{\epsilon}$	发射率
η	屏增益系数，比例系数
θ	扫描角
θ	扫描速度
λ	波长
λ_c	截止波长
λ_p	峰值波长
λ_n	可用的波长范围
ν	光学系统的垂足放大率；光学系统频率
$\tilde{\nu}$	波数
ρ	反射系数
σ	透射系数；光敏系数；斯忒藩-玻耳兹曼系数，消光系数
σ_M	迈依散射系数
σ_R	瑞利散射系数
$\tau_o(\lambda)$	光学系统的光谱透射率
φ	衍射角
ω	瞬时视场
Ω	瞬时立体角视场
Ω_R	辐射计视场

目 录

重要符号表

第一章 红外技术的物理基础

1·1	辐射定律	(1)
1·1·1	辐射度学基本定律	(1)
1·1·2	黑体辐射定律	(6)

第二章 红外技术的组成部分

2·1	辐射器	(14)
2·1·1	非相干辐射器	(14)
2·1·1·1	热辐射器	(14)
2·1·1·2	非热辐射器	(18)
2·1·1·3	半导体发光二极管(LED)辐射器	(20)
2·1·2	相干辐射器	(22)
2·1·2·1	气体激光器	(25)
2·1·2·2	液体激光器(染料激光器)	(27)
2·1·2·3	半导体激光器	(27)
2·1·2·4	固体激光器	(30)
2·2	辐射调制	(30)
2·2·1	直接调制	(31)
2·2·2	间接调制	(32)
2·2·2·1	光学调制	(32)
2·2·2·2	非光学(机械)调制	(37)
2·3	光学部分	(37)
2·3·1	几何光学定律	(37)
2·3·1·1	折射和反射	(37)
2·3·1·2	色散	(41)

2·3·1·3	干涉·····	(43)
2·3·1·4	衍射·····	(45)
2·3·2	光学元件·····	(46)
2·3·2·1	透镜·····	(46)
2·3·2·2	反射镜·····	(51)
2·3·3	色差·····	(53)
2·3·4	衍射对成象的限制·····	(55)
2·3·5	分光·····	(57)
2·3·6	红外光学材料和部件·····	(61)
2·3·6·1	红外光学材料·····	(61)
2·3·6·2	增透膜·····	(67)
2·3·6·3	滤光片·····	(69)
2·3·6·4	光导体与纤维光学·····	(70)
2·4	大气的影响·····	(72)
2·4·1	大气成分·····	(73)
2·4·2	吸收·····	(74)
2·4·3	散射·····	(77)
2·5	辐射接收器(探测器)·····	(82)
2·5·1	探测器特性, 选择指标·····	(82)
2·5·1·1	灵敏度特性·····	(83)
2·5·1·2	工作参数·····	(86)
2·5·1·3	可靠性参数·····	(90)
2·5·1·4	探测器配置·····	(90)
2·5·2	非量子探测器(热探测器)·····	(94)
2·5·2·1	温差电偶, 温差电堆·····	(98)
2·5·2·2	测辐射热计·····	(98)
2·5·2·3	气动探测器·····	(99)
2·5·2·4	热释电探测器·····	(100)
2·5·2·5	理论极限探测度·····	(101)
2·5·3	量子探测器·····	(102)
2·5·3·1	外光电效应量子探测器·····	(103)

2·5·3·2	内光电效应量子探测器·····	(104)
2·5·3·3	理论极限探测度·····	(111)
2·6	红外发射器和接收器的致冷·····	(113)
2·6·1	辐射致冷·····	(113)
2·6·2	直接接触致冷·····	(115)
2·6·3	佳耳-汤姆逊致冷器·····	(711)
2·6·4	制冷机·····	(119)
2·6·5	温差电致冷器(珀尔帖致冷器)·····	(123)
2·7	接收器-调制·····	(127)

第三章 红外技术的应用

3·1	辐射测量——辐射度学·····	(136)
3·1·1	辐射对比度——调制度·····	(136)
3·1·2	辐亮度随温度的变化——温度对比度·····	(137)
3·1·3	自然表面的辐亮度·····	(141)
3·1·4	温度测量·····	(142)
3·1·5	辐射计——辐射温度计·····	(144)
3·1·5·1	探测器上的辐照度E·····	(146)
3·1·5·2	噪声等效辐照度NEI, 噪声等效温差NETD和辐射计的响 应度R·····	(147)
3·1·5·3	比较式辐射计·····	(148)
3·1·6	测温仪·····	(151)
3·1·7	红外监视器·····	(152)
3·1·8	温度报警器·····	(154)
3·1·9	被动式防盗装置·····	(156)
3·1·10	红外显微镜·····	(158)
3·2	能量辐射物的搜索与跟踪·····	(160)
3·2·1	不调制目标辐射的跟踪仪·····	(161)
3·2·2	调制目标辐射的跟踪仪·····	(162)
3·2·3	偏差信号处理·····	(164)

3·2·4	背景辐射的影响·····	(164)
3·3	红外成象器件,夜视仪·····	(165)
3·3·1	变象管,象增强器·····	(166)
3·3·1·1	光阴极·····	(167)
3·3·1·2	荧光屏·····	(168)
3·3·1·3	放大单元·····	(170)
3·3·1·4	结构形式·····	(173)
3·3·2	摄象管·····	(175)
3·3·2·1	外光电效应摄象管·····	(176)
3·3·2·2	内光电效应摄象管·····	(176)
3·3·2·3	非量子光电效应摄象管·····	(185)
3·3·2·4	电荷耦合图象传感器·····	(189)
3·3·3	机械扫描摄象仪·····	(195)
3·3·3·1	行扫描器·····	(195)
3·3·3·2	热象仪,红外摄象机·····	(204)
3·4	红外光学通信·····	(210)
3·4·1	通过大气的信息传输·····	(211)
3·4·1·1	无线电广播和电视的红外伴音传输系统·····	(213)
3·4·1·2	激光通话器·····	(215)
3·4·1·3	指令传输,红外遥控·····	(217)
3·4·1·4	电视和高保真度音响设备的无线遥控·····	(218)
3·4·2	光缆信息传输·····	(219)
3·5	测距和测速·····	(226)
3·5·1	测距仪·····	(226)
3·5·1·1	短距离测距仪·····	(226)
3·5·1·2	长距离测距仪·····	(228)
3·5·2	测速仪·····	(230)
3·5·3	运动目标的长度测量·····	(231)
3·5·4	红外湿度测量·····	(232)
3·6	医用红外激光器·····	(234)

文献索引

第一章 红外技术的物理基础

红外辐射是电磁辐射。

红外光谱区从780nm延伸至1mm.按照 德国工业标准 (DIN) 5031,这一光谱区属于光辐射谱区.光辐射谱区包括紫外、可见和红外的辐射谱区。表1·1给出按照德国工业标准 5031规定的光辐射谱区的概貌。

表1·1 光 辐 射 谱 区 的 划 分

谱区符号	波长范围
光辐射	100nm至1mm
紫外辐射 (UV)	100nm至380nm
UV-C	100nm至280nm以下
UV-B	280nm至315nm以下
UV-A	315nm至380nm以下
可见辐射(光)	380nm至780nm
红外辐射(IR)	780nm至1mm
IR-A	780nm至1.4μm以下
IR-B	1.4μm至3.0μm以下
IR-C	3.0μm至1mm

1·1 辐射定律

1·1·1 辐射度学基本定律

辐射物理概念和辐射物理度量的基础是辐射传播定律。

这个定律在辐射物理的光学领域和照明技术中，就是光度学基本定律（见德国工业标准5031），将它推广至电磁波谱的红外区，就称为辐射度学基本定律。设一个具有辐亮度 L [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] 的面积元（辐射源） dA_s ，以辐射角 ϵ_s 发射辐射通量 P ，通过距离 r ，以入射角 ϵ_e 入射到接收元 dA_e 。辐射度学基本定律就是表述辐射通量（辐射功率） P 与上述其它量之间的关系的。其关系式为：

$$d^2P = L \frac{dA_s \cdot \cos \epsilon_s \cdot dA_e \cdot \cos \epsilon_e}{r^2} \Omega_0; \quad (1.1)$$

$$d^2P = L dA_s \cdot \cos \epsilon_s \cdot \cos \epsilon_e d\Omega.$$

式中，角 ϵ_s 和 ϵ_e 分别为面积元 dA_s 和 dA_e 的法线与距离 r 之间的夹角；投影 $dA_s \cdot \cos \epsilon_s$ 和 $dA_e \cdot \cos \epsilon_e$ 为垂直于辐射方向的横截面； $\Omega_0 = 1$ 为单位立体角； $d\Omega = \frac{dA}{r^2}$ ①（见图1.1）

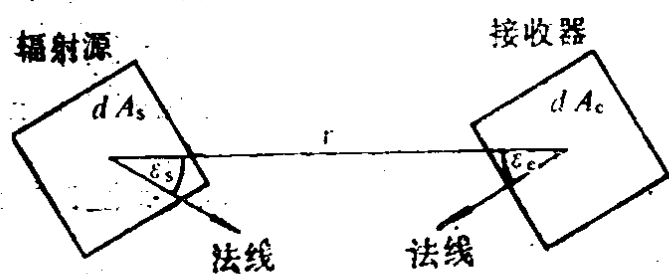


图1.1 辐射度学基本定律的推导

在垂直于面积元 dA_e 入射的情况下，对面积 A_e 积分（ A_e 相对于 r^2 是很小的）式（1.1）得到

$$dP(\epsilon_s) = L \frac{dA_s \cdot \cos \epsilon_s \cdot A_e}{r^2} \cdot \Omega_0. \quad (1.2)$$

在 ϵ_s 方向的辐射通量 P 与 $\cos \epsilon_s$ 成正比例的关系称为朗伯

① $d\Omega$ 为面积 dA_s 的法向立体角。——译者

定律.这个定律在一般情况只是近似成立.一个空腔壁上的小孔(空腔辐射器或者黑体)严格满足朗伯定律,因此也称它为朗伯辐射体(图1.2)。

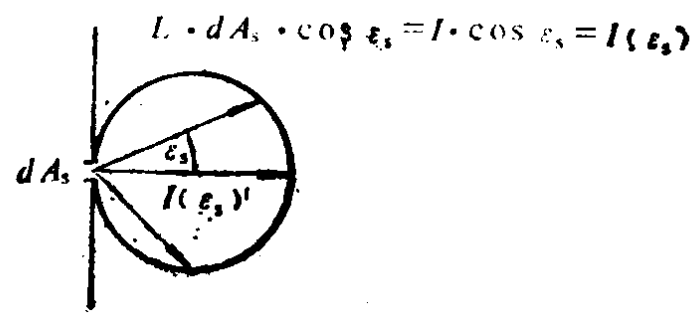


图1.2 朗伯辐射体的说明

L 和 dA_s 的乘积就是辐射强度 I [$W \cdot sr^{-1}$] ,即一个辐射源每单位立体角发出的辐射通量(图1.2)。

辐射度学基本定律包含的另一个重要关系,就是入射在接收器上的辐射通量与距离平方成反比例的关系,即反平方定律。

当一个近似的点源沿立体角 A_s/r^2 发射辐射通量 P 时,若一个面积为 A_s 的接收器在距离 r 处能接收其全部辐射通量,则同一个接收器在距离 $2r$ 处只能接收

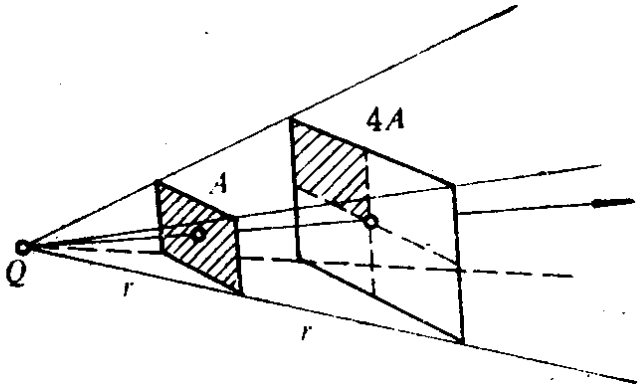


图1.3 反平方定律图解

该辐射通量的 $1/4$;而在 $3r$ 处仅接收这辐射通量的 $1/9$ (图1.3)。

对半球空间积分式(1.2),可得到服从朗伯辐射定律的面积元 dA_s 向半球空间发射的辐射功率(辐射通量)

$$dP(\Omega = 2\pi) = \pi \cdot L \cdot dA_s = M \cdot dA_s; M = \pi \cdot L. \tag{1.3}$$

量 M [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$] 称为辐射出射度, 也常称为发射能力. 按照德国工业标准5031只用辐射出射度这个名称.

直到现在, 我们所引用的辐射量都基于这样一个假定, 即在发射器和接收器之间没有辐射能的吸收、反射和散射. 这个条件只有在真空中才能得到满足. 因此, 实际上必须考虑发射器和接收器之间介质的影响.

照射在接收器单位表面上的辐射通量称为辐照度 E [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$].

$$E = \frac{dP(\epsilon_s)}{dA_s} \quad [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (1.4)$$

因为实际的辐射接收器只能处理光谱的一部分, 并且在有效光谱范围内的响应度大多是波长的函数, 因此同样大小但不同光谱成分的辐射通量将产生不同大小的信号. 此外, 所有实际物体的发射能力和吸收能力也都与波长有关. 因此我们必须引入光谱辐射量的概念, 它是前面所定义的积分辐射量对于波长的微分值, 在英语文献中大多用脚标 λ 标明.

在德语文献中, 变量 λ 大多放在括号内, 如 $L(\lambda)$ 、 $M(\lambda)$ 等. 当依赖多个变量时, 虽然这种写法看起来也还是有意义, 但不象用 λ 注脚的书写方式那样能够立刻让人想到: 光谱辐射量具有与相应的积分辐射量不同的量纲^①. 实际上, 物理学上有意义的也就是可测量的辐射量, 只是与波长间隔 $(\lambda$ 至 $\lambda + d\lambda)$ 有关的光谱辐射量. 表1.2给出了各种不同的辐射量.

①关于光谱辐射量的概念和标注方法, 在英语文献中也不完全统一, 近期通用的规则是这样的: 当表示光谱的单色集中度时用脚标, 如 E_λ 、 L_λ 等, 当表示为波长的函数时, 用 $E(\lambda)$ 、 $L(\lambda)$ 等, 都在辐射量前冠以Spectral字样, 译做“光谱”(或分谱)辐射量. ——译者

表1.2 辐射量一览表

符 号	命 名	定 义	单 位
Q	基本量		
	辐射能	辐射通量与时间的乘积	$J, W \cdot s$
P, Φ	辐射功率	单位时间内从一个发射器发射的或者通过一个面的辐射能	W
	辐射通量		
L	发射方面的量		
	辐亮度	发射器每单位表面沿单位立体角发射的辐射通量	$W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$
I	辐射强度	发射器沿单位立体角发射的辐射通量	$W \cdot sr^{-1}$
M	辐射出射度	发射器每单位表面沿 2π 立体角发射的辐射通量	$W \cdot cm^{-2}$
E	接收方面的量		
	辐照度	入射到一个表面上的每单位面积的辐射通量	$W \cdot cm^{-2}$
H	辐照量	入射到一个表面上的每单位面积的辐射能	$W \cdot s \cdot cm^{-2}$ $J \cdot cm^{-2}$
	光谱基本量		
Q_λ	光谱辐射能	定义如前, 然而与波长单位 $1\mu m$ 有关的量(以下同)	$J \cdot \mu m^{-1}$
	光谱辐射通量		$W \cdot s \cdot \mu m^{-1}$
P_λ	光谱辐射通量		$W \cdot \mu m^{-1}$
L_λ	发射方面的量		$W \cdot cm^{-2}$
	光谱辐亮度		$\cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

续表1.2

I_λ	光谱辐射强度	$W \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
M_λ	光谱辐射出射度 接收方面的量	$W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
E_λ	光谱辐照度	$W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
H_λ	光谱辐照量	$W \cdot s \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$

1.1.2 黑体辐射定律

黑体这一理想概念,对于理解固体的热辐射是很有意义的。黑体就是一个完全吸收入射辐射的物体。一个空腔上的小孔就是一个很近似的黑体。在这里,小孔(即黑体)的尺寸与波长相比较必须是很大的,而与空腔尺寸相比较必须是很小的,当然空腔内壁也应具有高的吸收率。

基尔霍夫定律建立了假想黑体与实际物体之间的关系。实际物体的吸收率 $\alpha < 1$ 。该定律于1858年由实验得到,其表达式为:

$$\frac{M_\lambda(T)}{\alpha(\lambda)} = M_{\lambda(bk)}(T), \quad (1.5)$$

式中, $M_{\lambda(bk)}(T)$ 为黑体在绝对温度 T 时的光谱辐射出射度。这样,基尔霍夫定律可叙述如下:对于给定的波长,光谱辐射出射度 M_λ 与光谱吸收率 $\alpha(\lambda)$ 之比,仅仅是物体温度的函数,并且与同样温度的黑体的光谱辐射出射度总是相等的。同样也可用积分值来定义基尔霍夫定律: