

激光与 红外探测原理

Laser and Infrared
Sounds Principle

■ 戴永江 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

激光与红外探测原理

Laser and Infrared Sounds Principle

戴永江 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

激光与红外探测原理/戴永江编著. —北京: 国防工业出版社, 2012. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 08084 - 1

I. ①激… II. ①戴… III. ①激光探测②红外探测
IV. ①TN247②TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 205827 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 $\frac{1}{4}$ 字数 358 千字

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 75.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，原国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金

第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

前 言

自 2002 年《激光雷达原理》一书出版后,已将近十年。承蒙出版社青睐,要求修改再版。但近十年来,技术形势已发生变化。考虑到光电辐射的物理本质、技术共性,应用领域和未来发展趋势,将激光雷达和红外辐射探测合称为涵盖光波波段更广、有源和无源结合更加紧密的“光电雷达”。建国以来,我国已经形成激光雷达和红外辐射探测,两大紧密结合的科学技术、产业和应用体系,并日益成熟、完备和系统化。因此,再版时,将书名改为《激光与红外探测原理》。

本书涉及光电辐射基本物理规律、辐射的发射、传输、目标特性、检测、信息处理、显示和传输、系统整机工程(含建模及仿真、随动控制、与其他技术综合及组网)和现代光电雷达制造等环节。近年来,实行军民结合,寓军于民的发展策略,开拓了更广泛的应用领域和市场前景,发展成为国防和社会信息化建设的重要组成部分。

我国在这一方面虽取得一定的成就,但和世界先进水平仍有一定差距,这要求把握未来发展特点,勇于改革创新。这些特点是:

(1) 探测的对象已扩展到宇宙空间、生命科学和分子及原子范围。基础理论、技术科学和工程融合的趋势日益明显。人类正在利用光电雷达探索宇宙空间、海洋和地球深部。

(2) 对目标信息获取、传输和控制,受激辐射和自发辐射的辐射源,被动和主动接收式,军事和民用等方面的内在联系,越来越密切。

(3) 人类所获得的目标信息 75% 来自视觉图像。图像所给

出的信息、遐想和知识，就远远超过文字和声音的叙述。信息内容不仅是位置、速度、方位、姿态等，还包括几何形状、表面特性、内部结构、运动和其他特征量的变化，甚至生命信息均可用图像表示。高分辨率三维图像信息获取和分析日益重要。三维成像成为发展主流。

(4) 信息获取多元化、精细化，信息处理和传输的数字化，多传感器的信息融合和网络化，信息控制的高速化、智能化特征日益明显。

(5) 器件技术、单元技术和系统技术之间，硬件技术和软件技术之间互相渗透，互相结合日益密切。由以分立元件为主，发展为矩阵激光辐射源、大规模凝视焦平面探测器和高速微电子处理器相结合，并能与全球定位系统和惯性导航系统实现综合一体化。

(6) 纳米级微尺度的小型化研究、加工和应用成为可能，微机械、微电子和微光子加工工艺逐渐实现研制、生产和应用的探测、通信和控制的一体化。使多功能化、微型化、集成化和网络化已成为现实。

(7) 应用领域不仅以军用为主，在在线生产、医学和生命科学等方面也得到越来越多的应用。作为新兴战略性产业和市场效益的特征日益明显。

(8) 采用节能、洁净的燃料电池供电的数字化的探测传感器、通信和控制一体化微型模块已成为关键技术和信息社会的“发动机”、“助推器”。加快了微电子和光电子材料和器件、智能化探测系统制造产业的发展。

因此，再版时，一方面保持原书的主要内容，同时立足于激光与红外探测发展的跨学科、跨领域和微型化的特点，以原理性共性基础知识为基础，贯彻物理基础、系统原理、关键技术、工艺工程的结合，军用和民用结合的原则。技术性较强内容，则放入作者的另一本著作《激光雷达技术》中。在叙述上，以激光与红外探测系统为干线，强调物理基础和原理，以分立式元器件为

基础, 充实阵列辐射和探测技术的微光学器件和技术, 介绍激光与红外探测关键器件和技术, 也简介其他配套关联技术和知识。

本书共有 8 章, 第 1 章简介基本概念、发展历史、分类和应用等; 第 2 章~第 5 章介绍辐射源和目标与背景辐射、单元探测器、阵列辐射源和探测器及光电辐射在大气及介质中的传输等基础关键技术; 第 6 章~第 8 章介绍基本原理, 介绍无源系统, 测距跟踪、测速、微脉冲和成像等原理及技术。其他的关键技术, 如光学系统、扫描技术、调制解调和伺服控制等, 配套的卫星定位系统 (GPS)、惯性导航系统 (INS) 和自由空间光通信 (FSO) 等, 就结合有关章节简略介绍。

本书涉及学科领域广泛, 着重物理概念分析, 数学表述。对几种主要的光电雷达原理做了较详细介绍。可作为大学生、研究生的专业参考书, 也可供工程和军队技术专业参考。

我的老师、同事都曾在工作中给以支持、指导和帮助, 使我终身受益, 令人难忘。我在德国宇航研究院与费茨麦耶尔教授、雷曼博士的长期合作研究, 与美国、德国、日本、英国等同行的多次学术交流和讨论, 对本书的编写也是有帮助的。

我的学生在科学研究和生活中, 曾给以积极支持和关心。在应用研究和产业化过程中, 本书编写组在海外的博士、硕士和留学人员等对本书的编写, 做了自己的工作。

我国著名雷达专家王小谟院士对本书的编写给予重要指导, 著名雷达对抗专家张锡祥院士、中国航天电子技术研究院胡润卿研究员详细审阅了本书相关章节, 提出了宝贵修改意见, 使作者受益匪浅。在此, 对他们表示深深感谢。

作者

2011 年于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 发展简史	3
1.3 主要研究对象和内容	11
1.4 光电辐射基本概念和规律	14
参考文献	16
第 2 章 辐射源	19
2.1 基本辐射源	19
2.1.1 分类及特点	19
2.1.2 黑体辐射源	23
2.1.3 非相干辐射源	27
2.1.4 地球及近地辐射源	29
2.1.5 宇宙空间辐射	35
2.2 目标辐射特性	40
2.2.1 基本概念	40
2.2.2 有动力目标辐射源	42
2.3 激光辐射源	45
2.3.1 基本要求	46
2.3.2 光束特性	47
2.3.3 气体激光器	53
2.3.4 固体激光器	53
2.4 半导体激光器	56
2.4.1 基本原理	56

2.4.2	基本特性	59
2.4.3	半导体二极管激光器的特殊问题	63
2.5	新型半导体激光器	66
2.5.1	“半导体能带裁剪工程”(半导体能带工程) 概念	66
2.5.2	分布反馈激光器和布喇格反射激光器	67
2.5.3	异质结激光器	68
2.5.4	量子阱激光器	70
2.5.5	垂直腔面发射激光器	72
2.6	二极管激光泵浦固体激光器	75
2.7	激光集成模块组件	81
2.7.1	概述	81
2.7.2	可调激光发射模块	82
2.7.3	激光收发模块	83
2.7.4	光孤子激光模块	84
	参考文献	85
第3章	探测器	87
3.1	分类谱系	87
3.2	特性参数	89
3.2.1	响应率	91
3.2.2	信噪比	92
3.2.3	探测率或归一化探测率	93
3.3	热敏型探测器	94
3.3.1	热敏电阻	95
3.3.2	温差电探测器	97
3.3.3	热释电探测器	99
3.4	光子探测器	102
3.4.1	外光电效应探测器	103
3.4.2	内光电效应探测器	107
3.4.3	半导体光电二极管	112

3.4.4 特种半导体光电二极管	116
参考文献	129
第4章 微型辐射源和探测器	131
4.1 基本概念和知识	131
4.1.1 基本概念	131
4.1.2 微系统和微光学研究对象	135
4.1.3 微光机电系统基本效应	136
4.1.4 微光机电系统基本理论概述	138
4.2 微光机电系统关键技术	145
4.2.1 微电子机械系统技术	145
4.2.2 互补金属氧化物半导体技术	147
4.2.3 光刻电铸注塑工艺	148
4.2.4 绝缘硅技术	149
4.2.5 二元光学技术	150
4.2.6 专用集成电路应用软件技术	151
4.2.7 自由空间微光机电集成技术	152
4.2.8 纳米光子学	152
4.3 微光学阵列	153
4.3.1 微透镜阵列	153
4.3.2 微光栅阵列	158
4.4 阵列辐射源	161
4.4.1 高功率光纤激光器线阵	161
4.4.2 LED发光二极管矩阵	161
4.4.3 LED信号处理及显示的集成阵列模块	162
4.4.4 阵列二极管激光器	163
4.5 阵列热探测器	168
4.5.1 热敏型阵列探测器	168
4.5.2 非致冷热探测器	171
4.6 阵列光电探测器	172
4.6.1 基本概念	172

4.6.2	基本特性	173
4.6.3	噪声与极限特性	175
4.6.4	性能评价标准	177
4.6.5	典型阵列光电探测器	179
4.7	电荷耦合器件	181
4.7.1	器件结构	182
4.7.2	输出特性	183
4.7.3	沟道效应	185
4.7.4	特性参数	186
4.7.5	特殊问题	189
4.8	光纤激光器和探测器	190
4.8.1	光纤激光器	191
4.8.2	光纤探测器	194
	参考文献	197
第5章	探测原理	199
5.1	基本概念	199
5.1.1	基本框图和功能	199
5.1.2	视觉成像	200
5.2	基本原理与特性	202
5.2.1	作用距离方程	202
5.2.2	作用距离方程和背景影响	204
5.2.3	探测概率和虚警概率	205
5.2.4	一般特性	208
5.2.5	灵敏度、分辨力和传递函数	209
5.2.6	系统信噪比	215
5.2.7	系统设计原则	217
	参考文献	217
第6章	红外探测系统	219
6.1	测温测辐射系统	219
6.2	搜索与跟踪系统	222

6.2.1	搜索	222
6.2.2	跟踪	223
6.3	遥感系统与航天探测器	224
6.3.1	遥感平台	225
6.3.2	探测系统	226
6.3.3	空间望远镜	227
6.3.4	宇宙探测器	232
6.4	红外热成像系统	234
6.4.1	基本结构	235
6.4.2	基本原理	235
6.4.3	性能评价	240
6.5	阵列探测器红外热成像系统	245
6.5.1	结构与特点	245
6.5.2	多元阵列探测器的应用	246
6.5.3	多元阵列探测器的扫描方式	247
6.5.4	前视红外系统简介	249
6.6	焦平面凝视阵列探测器成像	250
6.6.1	单元及线列和 $4N$ 小阵列热释电扫描成像	250
6.6.2	热释电摄像管成像	252
6.6.3	焦平面凝视成像	254
6.6.4	CCD 成像系统	257
6.7	紫外、双色探测和多光谱成像	262
6.7.1	紫外探测	263
6.7.2	多光谱成像	267
	参考文献	269
第7章	激光雷达	270
7.1	引言	270
7.2	激光雷达方程	272
7.2.1	标准形式	272
7.2.2	特殊形式	273

7.2.3	能量形式	277
7.3	探测原理	278
7.3.1	基本概念	278
7.3.2	背景噪声	279
7.3.3	信噪比	279
7.3.4	噪声因子	282
7.3.5	等效噪声功率	283
7.4	优化原理	284
7.4.1	系统信噪比优化	284
7.4.2	系统效率优化	285
7.5	探测概率和虚警概率	287
7.5.1	目标探测统计模型	288
7.5.2	扫描—扫描和脉冲—脉冲统计模型	289
7.5.3	相干探测系统模型	292
7.5.4	非相干探测系统模型	293
7.6	发射和接收	298
7.6.1	发射机	299
7.6.2	收发体制选择	301
7.6.3	激光调制	303
7.6.4	准直和扫描	309
7.6.5	相干激光雷达发射机	310
7.6.6	探测器	317
7.6.7	接收机	320
7.6.8	接收机解调技术	327
7.6.9	信号处理分系统	330
7.6.10	相干接收机的基本特性	335
	参考文献	342
第8章	激光雷达应用	343
8.1	测距跟踪激光雷达	343
8.1.1	基本原理	343

8.1.2	脉冲测距激光雷达	347
8.1.3	连续波测距激光雷达	348
8.1.4	单脉冲测距跟踪激光雷达	351
8.1.5	CO ₂ 相干测距跟踪激光雷达	353
8.1.6	应用实例	354
8.2	测速激光雷达	369
8.2.1	基本要求	370
8.2.2	相干激光多普勒测速	374
8.2.3	尖峰效应测风激光雷达	380
8.2.4	差动激光多普勒技术	384
8.3	微脉冲激光雷达	388
8.3.1	基本原理	388
8.3.2	微弱信号检测原理	392
8.4	成像激光雷达	398
8.4.1	基本要求	399
8.4.2	CO ₂ 相干成像激光雷达	401
8.4.3	合成孔径成像激光雷达	404
8.4.4	光控相控阵成像激光雷达	410
8.5	大气监测激光雷达	412
8.5.1	物理模型	412
8.5.2	大气监测激光雷达	420
	参考文献	424

Contents

Chapter 1 Summarize	1
1.1 Introduction	1
1.2 Development history	3
1.3 Main object of study and content	11
1.4 Basic elementary knowledge	14
References	16
Chapter 2 Radiant source	19
2.1 Basis radiant source	19
2.1.1 Classification and trait	19
2.1.2 Blackbody radiant standard	23
2.1.3 Non-coherent radiant source	27
2.1.4 Radiant source of the globe and near globe	29
2.1.5 Radiant source from aerospace	35
2.2 Radiation characteristic for target	40
2.2.1 Basic concept	40
2.2.2 Radiant source for target with power	42
2.3 Character of the laser radiant source	45
2.3.1 Basis requirements	46
2.3.2 Character for beam of laser	47
2.3.3 Gas laser	53
2.3.4 Solid laser	53
2.4 Semiconductor laser	56
2.4.1 Fundamental	56
2.4.2 Basic character	59
2.4.3 The special problem for diode laser	63