

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

# Applied Nanophotonics

# 应用纳米光子学

[白俄] 塞尔吉·加波纳科 (Sergey V. Gaponenko) 著  
[新加坡] 希米·沃尔坎·迪默尔 (Hilmi Volkan Demir)

李红博 译

CAMBRIDGE

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

非  
外  
借

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

# Applied Nanophotonics

# 应用纳米光子学



[白俄] 塞尔吉·加波纳科 (Sergey V. Gaponenko) 著  
[新加坡] 希米·沃尔坎·迪默尔 (Hilmi Volkan Demir)

李红博 译



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

版权专有 侵权必究

---

## 图书在版编目 (C I P) 数据

应用纳米光子学 / (白俄) 塞尔吉·加波纳科,  
(新加坡) 希米·沃尔坎·迪默尔著; 李红博译. —北京:  
北京理工大学出版社, 2022.12  
书名原文: Applied Nanophotonics  
ISBN 978-7-5763-2038-1

I. ①应… II. ①塞… ②希… ③李… III. ①纳米技术-光子-研究 IV. ①TB383②O572.31

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 007820 号

---

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2022-6649

This is a simplified Chinese edition of the following title published by Cambridge University Press:

Applied Nanophotonics 978-1-107-14550-4

© Cambridge University Press 2019

This publication is in copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Beijing Institute of Technology Press 2022

This simplified Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this simplified Chinese edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Beijing Institute of Technology Press.

Copies of this book sold without a Cambridge University Press sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Cambridge University Press 防伪标签, 无标签者不得销售。

---

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)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (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 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 22.25

字 数 / 522 千字

版 次 / 2022 年 12 月第 1 版 2022 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 160.00 元

责任编辑 / 李颖颖

文案编辑 / 李颖颖

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

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

此为试读, 需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

## 作者简介

作者 Sergey V.Gaponenko 是白俄罗斯国家科学院纳米光学实验室的教授和负责人。他还是纳米光子学和半导体纳米晶光学性质领域的权威科学家（剑桥大学出版社，1998 年，2010 年）。

作者 Hilmi Volkan Demir 是新加坡南洋理工大学的教授，也是该大学发光半导体和显示卓越中心的创始人和主任。

原著出版社：剑桥大学出版社

纳米光子学主要研究纳米尺度光与物质的相互作用，涵盖复杂纳米结构中的光传播、发射、吸收和散射的所有过程。我们发现，从基础理论知识开始讲起，然后再进一步拓展到基于纳米光子学的应用，这对于纳米光子学从业者来说非常重要且非常实用。然而，多数文献难以完全涵盖这些方面。《应用纳米光子学》这本书的想法诞生于新加坡南洋理工大学，在那里，我们对如何开展纳米光子学领域的学术教育和技术培训，进行了长期的讨论。因此，本书旨在成为一本独立的教科书，可供研究生、本科生，以及从事纳米光子学研究的工程师、科学家和研发专家使用。

作者于 2000—2018 年期间在斯坦福大学、比尔肯特大学、新加坡南洋理工大学和白俄罗斯国家科学院在纳米光子学领域开展了深入的研究工作，这些工作积累促成了本书的完成。为此，我们要感谢所有的同事、合作者和学生。这些年，我们与他们探讨了纳米光子学的世界，并在这快乐有趣的经历中学到了很多东西。为此，我们特别感谢斯坦福大学的 D.A.B.Miller 教授和 J.Harris 教授对本书提出的宝贵建议；感谢新加坡南洋理工大学在 2014—2016 年为本书提供的创意氛围和宣传支持。同时感谢对本书进行部分校对的 A.Baldycheva 博士，P.L.Hernandez-Martinez 博士，S.Golmakaniyoon 博士和 R.Thomas 博士，以及为本书进行封面设计的 K.Güngr。

此外，我们要感谢剑桥大学出版社出色和富有成效的合作，感谢贵社促成了本书。我们特别感谢来自剑桥的 Heather Brolly, Anastasia Toynbee 和 Gary Smith。我们还要感谢审阅人和同事们在本书项目的早期阶段提出的宝贵的意见和建议。

最后，感谢我们的妻子、家人和朋友永无止境的鼓励和支持。

塞尔吉·加波纳科  
希米·沃尔坎·迪默尔  
2018 年 5 月

# 符 号

$A$	自发辐射系数 (概率), 爱因斯坦系数
$A$	量子阱的尺寸、长度、空间周期
$a$	加速度
$a_{\text{B}}^*$	激子波尔半径
$a_{\text{B}}$	$=5.291\ 7\cdots \cdot 10^{-2}\ \text{nm}$ , 激子波尔半径
$a, b, c$	三维格子的周期
$a_{\text{L}}$	晶格周期
$B$	磁感应矢量
$B$	受激发射系数 (爱因斯坦系数)
$C$	浓度
$c$	$=299\ 792\ 458\cdots\ \text{m/s}$ , 真空中的光速
$D$	电位移矢量
$D$	模式密度, 态密度
$D$	光密度 [ $-\lg$ (透射率)]
$d$	偶极矩; 偶极矩的单位向量
$d$	空间维度; 厚度
$e$	$=1.602\ 189\ 2\ \cdots \cdot 10^{-19}\ \text{C}$ , 基本电荷
$E$	电场矢量
$E$	动能
$E_{\text{F}}$	费米能级, 费米能
$E_{\text{g}}$	带隙能量
$F$	力
$f$	体积填充因子; 分数
$f_{\text{BE}}$	玻色-爱因斯坦分布函数
$f_{\text{FD}}$	费米-狄拉克分布函数
$G$	格林函数
$h$	$=6.626\ 069\cdots \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$ , 普朗克常数
$\hbar$	$\equiv h/2\pi$
$H$	哈密顿算符
$H$	磁场矢量
$I$	强度
$i$	虚数单位

$J$	电流密度
$k, k$	波矢量, 波数
$k_B$	$= 1.380\ 662 \cdots 10^{-23} \text{J/K}$ , 玻耳兹曼常数
$l$	轨道量子数
$L, L$	角动量
$L, l$	厚度
$l$	平均自由程
$M$	磁极化强度
$M$	激子质量
$M$	质量
$m_0$	$= 9.109\ 534 \cdot 10^{-31} \text{kg}$ , 剩余的电子质量
$m^*$	有效质量
$n$	单位矢量
$N, n$	浓度; 整数
$nr$	折射率, 用于吸收材料的复折射率的真实部分
$P$	电极化强度
$P$	半导体中的空穴浓度
$p, p$	动量, 准动量
$Q$	量子效率; 量子产率
$R$	强度的反射系数
$r$	振幅的反射系数
$r$	半径矢量
$R, r$	半径, 距离
$r, \theta, \varphi$	球坐标
$Ry$	$= 13.605 \cdots \text{eV}$ , 里德伯能量
$Ry^*$	激子里德伯能量
$S$	坡印亭矢量
$T$	平移矢量
$T$	时间段; 温度; 传输系数
$t$	时间; 振幅传输系数
$U$	势能; 能量
$u$	每单位体积的光谱能量密度
$V$	体积
$v, v$	速度
$v_g, v_g$	群速度
$W$	发射率
$x, y, z$	坐标
$\alpha$	吸收系数
$\Gamma$	退相率

$\gamma$	衰退率
$\gamma_{\text{vacuum}} \equiv \gamma_0$	真空中的辐射（自发）衰减率
$\varepsilon$	相对介电常数；摩尔吸光系数
$\kappa$	折射率的虚部；隧道中的消逝参数
$\lambda$	波长
$\mu$	约化质量；化学势；磁导率
$\mu_0$	真空的渗透性
$\nu$	频率
$\xi$	量子系统中粒子的所有坐标的集合
$\rho$	电荷密度
$\sigma$	吸收截面
$\tau$	各种过程中的时间常数（衰变，转移，散射）
$\chi$	介电敏感性
$\chi_{nl}$	球形贝塞尔函数的根
$\Psi$	波函数，与时间有关
$\psi$	波函数，与时间无关
$\omega$	角频率，圆频率
$\omega_p$	等离子角频率

## 缩 略 词

2DPC	two-dimensional photonic crystal 二维光子晶体
3DPC	three-dimensional photonic crystal 三维光子晶体
AFM	atomic force microscope 原子力显微镜
CCD	charge-coupled device 电荷耦合器件
CCT	correlated color temperature 相关色温
CD	compact disk 光盘
CD-ROM	compact disk read-only memory 光盘只读存储器
CFLs	compact fluorescent lamps 紧凑型荧光灯
CIS	copper indium sulfide 铜铟硫
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor (technology) 互补金属氧化物半导体 (技术)
CQD	colloidal quantum dot 胶体量子点
CQS	color quality scale 颜色质量等级
CRI	color rendering index 显色指数
CVD	chemical vapor deposition 化学气相沉积

CW	continuous wave 连续波
DBR	distributed Bragg reflector 分布式布拉格反射器
DFB	distributed feedback 分布式反馈
DOM	density of modes 模式密度
DOS	density of states 态密度
DVD	digital versatile disk 数字多功能光盘
DWDM	dense wavelength division/multiplexing 密集波分/多路复用
EBL	electron blocking layer 电子阻挡层
EQE	external quantum efficiency 外量子效率
ESU	electrostatic unit 静电单位
ETL	electron transport layer 电子传输层
FCC	face-centered cubic 面心立方
FMN	flavin mononucleotide 黄素单核苷酸
FRET	Förster resonance energy transfer 福斯特共振能量转移
FTTH	fiber to the home 光纤到户
HOMO	highest occupied molecular orbital 最高占据分子轨道
HTL	hole transport layer 空穴传输层

ICP	inductively coupled plasma 电感耦合等离子体
IJE	injection efficiency 注入效率
IQE	internal quantum efficiency 内部量子效率
IR	infrared 红外线
ITO	indium tin oxide 氧化铟锡
LAN	local area network 局域网
LCD	liquid crystal display 液晶显示器
LDOS	local density of states 局域态密度
LED	light-emitting diode 发光二极管
LEE	light extraction efficiency 光提取效率
LER	luminance efficacy of optical radiation 光辐射的发光效率
LUMO	lowest unoccupied molecular orbital 最低未占分子轨道
MBE	molecular beam epitaxy 分子束外延
MDM	mode division multiplexing 模式分多路复用
MEG	multiple exciton generation 多重激子生成
MIXSEL	mode-locked integrated external-cavity surface-emitting laser 锁模集成外腔表面发射激光器
MOCVD	metal-organic chemical vapor deposition 金属有机化学气相沉积

MOVPE	metal-organic vapor-phase epitaxy 金属有机气相外延
NP	nanoparticle 纳米粒子
NW	nanowire 纳米线
OLED	organic light-emitting diode 有机发光二极管
PC	personal computer 个人计算机
PC	photonic crystal 光子晶体
PECVD	plasma-enhanced chemical vapor deposition 等离子体增强化学气相沉积
PL	photoluminescence 光致发光
PON	passive optical network 无源光网络
PSS	patterned sapphire substrate 图案化的蓝宝石衬底
RDE	radiative efficiency 辐射效率
RET	resonance energy transfer 共振能量转移
RIE	reactive ion etching 反应性离子蚀刻
RIU	refractive index unit 折射率单位
ROM	read-only memory 只读内存
SAM	saturable absorber mirror 可饱和吸收镜
SDL	semiconductor disk laser 半导体薄片激光器

SEM	scanning electron microscope 扫描电子显微镜
SERS	surface enhanced Raman scattering 表面增强拉曼散射
SESAM	semiconductor saturable absorber mirror 半导体可饱和吸收镜
SOI	silicon-on-insulator 绝缘衬底上的硅
TAC	time-to-amplitude converter 时间-幅度转换器
TCO	transparent conducting oxide 透明导电氧化物
TEM	transmission electron microscope 透射电子显微镜
TNT	trinitrotoluene 三硝基甲苯
UV	ultraviolet 紫外线
VCSEL	vertical cavity surface-emitting laser 垂直腔面发射激光器
VECSEL	vertical external-cavity surface-emitting laser 外腔型垂直表面发射激光器
VTE	voltage efficiency 电压效率
WDM	wavelength division/multiplexing 波分/多路复用
WPE	wall-plug efficiency 电光转换效率
XRD	X-ray diffraction X 射线衍射
YAG	yttrium aluminum garnet 钇铝石榴石

## 公司和组织

AAAS	American Association for the Advancement of Science 美国科学促进会
ACS	American Chemical Society 美国化学学会
AIP	American Institute of Physics 美国物理研究所
APS	American Physical Society 美国物理学会
CIE	Commission Internationale de l' éclairage 国际照明委员会
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne 洛桑联邦理工学院
ETHZ	Swiss Federal Institute of Technology at Zurich 瑞士苏黎世联邦理工学院
IBM	International Business Machines 国际商业机器公司
MIT	Massachusetts Institute of Technology 麻省理工学院
NREL	National Renewable Energy Laboratory 美国国家可再生能源实验室
NTSC	National Television System Committee 美国国家电视系统委员会
OSA	Optical Society of America 美国光学学会
RCA	Radio Corporation of America 美国无线电公司
RSC	Royal Society of Chemistry 英国皇家化学学会

# 目 录

## CONTENTS

第 1 章 序言 .....	001
参考文献 .....	004

### 第一部分 基础理论

第 2 章 势阱和固体中的电子 .....	007
2.1 一维势阱 .....	007
2.1.1 电子的波动性 .....	007
2.1.2 方势阱里的粒子 .....	008
2.1.3 波函数和薛定谔方程 .....	010
2.1.4 有限深方势阱 .....	012
2.1.5 势能结构和能谱 .....	012
2.1.6 双势阱和多势阱 .....	014
2.2 隧道效应 .....	015
2.3 中心对称势 .....	017
2.4 周期性势垒 .....	021
2.5 半导体和电介质中的能带结构 .....	024
2.6 准粒子：电子，空穴，激子 .....	027
小结 .....	036
思考题 .....	037
拓展阅读 .....	038
参考文献 .....	038
第 3 章 半导体中的量子限域效应 .....	039
3.1 各种维度的态密度 .....	039
3.1.1 相空间中基本单元 $h^d$ 的态密度 .....	041
3.1.2 态密度的作用 .....	042
3.2 半导体和金属中的电子限域 .....	043
3.2.1 技术方法 .....	045
3.2.2 金属中不存在量子限域效应的原因 .....	045

3.3 量子阱、纳米片和超晶格	046
3.3.1 双异质结概念	046
3.3.2 二维量子阱中的电子和激子	048
3.4 量子线和纳米棒	053
3.5 纳米晶、量子点和量子点凝聚态物质	056
3.5.1 从团簇到晶体	056
3.5.2 半导体纳米晶的合成	057
3.5.3 光学吸收光谱	058
3.5.4 强限制作用	059
3.5.5 纳米晶的发光	064
3.5.6 量子点凝聚态物质	066
小结	067
思考题	068
拓展阅读	068
参考文献	069
<b>第4章 几何尺寸受限的光波</b>	<b>072</b>
4.1 两种电介质交界面上的光	072
4.1.1 色散定律和折射率	072
4.1.2 Helmholtz 方程	075
4.1.3 光正入射在两种介电材料界面处的反射	076
4.1.4 斜入射: 斯涅尔定律、全反射现象、菲涅耳公式和布儒斯特角	078
4.2 光在周期性介质中的传播	081
4.3 光子晶体	087
4.3.1 概念	087
4.3.2 光子能带结构的理论模型	088
4.3.3 2D 和 3D 光子晶体的实验性能	091
4.3.4 自然界的光子晶体结构	093
4.3.5 光子晶体波导	094
4.4 金属反射镜	095
4.5 光的隧穿	097
4.6 微腔	099
4.7 光在金属-介电纳米结构中传输: 纳米等离子体光子学	100
4.8 光学天线	105
4.9 非周期性结构和多重光散射	107
4.10 电学现象和光学现象上的相似性	110
小结	111
思考题	111
拓展阅读	112

参考文献	113
<b>第5章 光子的自发辐射过程与荧光寿命调控</b>	<b>116</b>
5.1 物质的发光过程	116
5.1.1 自发跃迁和受激跃迁	116
5.1.2 热平衡：玻耳兹曼分布和普朗克公式	117
5.1.3 发光	118
5.1.4 寿命和量子产率	119
5.1.5 荧光和磷光	121
5.1.6 自发跃迁和受激跃迁中爱因斯坦系数之间的基本关系	121
5.2 光子态密度	121
5.3 珀塞尔效应	123
5.4 光子密度在光学中的状态效应	125
5.5 Barnett-Loudon 求和规则	126
5.6 镜面和界面	127
5.7 微腔	130
5.8 光子晶体	131
5.9 纳米光子学	133
5.10 纳米天线	139
5.11 控制发射模式	140
小结	141
思考题	143
拓展阅读	143
参考文献	144
<b>第6章 受激发射和激光</b>	<b>146</b>
6.1 受激辐射、饱和吸收和光增益	146
6.2 激光	149
6.3 半导体激光器	151
6.4 双异质结和量子阱	154
6.5 面发射半导体激光器	155
6.6 量子点激光器	156
6.7 量子级联激光器	157
6.8 半导体激光器市场	158
小结	158
思考题	159
拓展阅读	159
参考文献	160