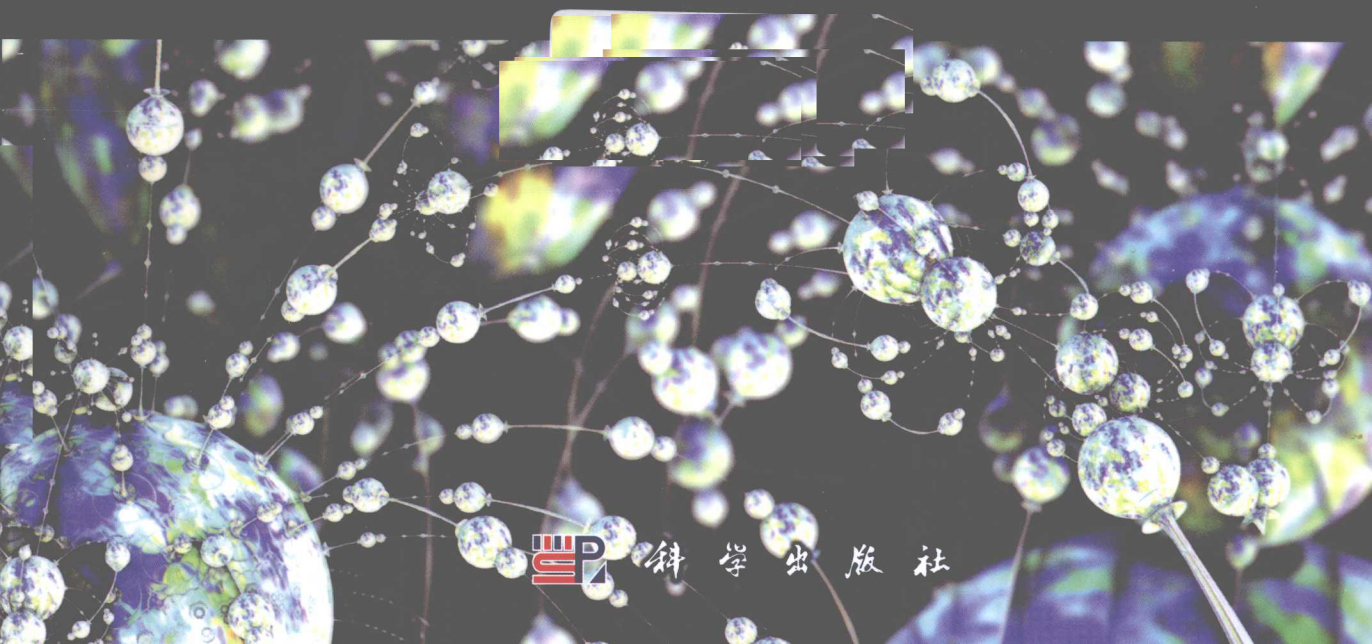


# 光学与光子学

——美国不可或缺的关键技术

美国国家科学院 国家科学研究委员会 编

曹健林 等 译





# 光学与光子学 ——美国不可或缺的关键技术

美国国家科学院 国家科学研究委员会 编

曹健林 等 译

科学出版社

北京

图字: 01-2014-8236

## 内 容 简 介

光学与光子学技术是现代生活的中心,一直作为最重要的使能技术推动着人类文明的进步,并毋庸置疑地将在未来产生更为深远的影响。本报告分 10 章,分别论述了近 15 年来光学与光子学领域的科技进步、随之产生的技术机遇和美国视角下的世界技术前沿现状,并提出了确保美国保持全球领先地位的建议。其中第 1 章是绪论,第 2 章讨论光子学技术对美国的影响,第 3 章到第 10 章分别论述某个特定领域(分别为通信、信息处理和数据存储、国防与国家安全、能源、健康与医疗、先进制造技术、先进光子测量与应用、战略光学材料、显示技术)的技术应用。

本书可作为政府官员、投资人和研发机构负责人的决策参考资料,也可作为相关领域从业人员制订科研、生产计划的情报材料,同样也可以作为青年学生和一般大众学习、了解相关领域知识的科普材料。

© Copyright 2013 by the National Academy of Sciences.

### 图书在版编目(CIP)数据

光学与光子学:美国不可或缺的关键技术/美国国家科学院,美国国家科学  
研究委员会编;曹健林等译. —北京:科学出版社,2015.3

书名原文: Optics and photonics: essential technologies for our nation

ISBN 978-7-03-043728-0

I. ①光… II. ①美… ②美… ③曹… III. ①光学—研究进展—美国  
IV. ①O43-171.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 050469 号

责任编辑: 钱 俊 鲁永芳 / 责任校对: 钟 洋  
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**北京盛通印刷股份有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 18

字数: 336 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 本书译校者名单

(按姓氏笔画排序)

|     |                     |
|-----|---------------------|
| 马 健 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 王 成 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 王淑平 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 王惟彪 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 王肇圻 | 南开大学                |
| 卢振武 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 田 媛 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 白雨虹 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 司丽娜 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 匡尚奇 | 长春理工大学              |
| 吕 聪 | 吉林大学                |
| 朱立禄 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 刘文武 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 刘妍妍 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 闫 锋 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 孙再成 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 纪文字 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 严 寒 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 李 迪 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 李自乐 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 李金环 | 东北师范大学              |
| 李树军 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 李耀彪 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 佟存柱 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 宋世俊 | 吉林大学                |
| 张 光 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 张 莹 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |

|     |                     |
|-----|---------------------|
| 张 健 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 张 涛 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 张艳超 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 张晓安 | 吉林大学                |
| 周 哲 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 周海宪 | 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所 |
| 孟 徽 | 中国科学技术部             |
| 郭宸孜 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 黄子强 | 电子科技大学              |
| 曹 金 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 曹健林 | 中国科学技术部             |
| 常 唯 | 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 |
| 谢文法 | 吉林大学                |

## 译者序

联合国教科文组织(UNESCO)把2015年定名为国际光学年(International Year of Light, IYL)。能赶在IYL之初完成本书(实际上是美国国家科学研究委员会的一本专门研究报告集)的翻译工作并及时出版,我感到格外高兴。

人们对光的认识从来没有像今天这样普及和深入。光的本质、光与物质的相互作用、光与其他能量形式的相互转换、光作为信息载体的独特优势以及光作为人们改造和适应自然界的有力工具,在全世界范围内被越来越多的人研究和应用,也越来越多地受到产业界、学界和政府的重视。以美国为代表的一些发达国家像本报告的题目所鲜明指出的那样,把光学和光子学当做事关国家和民族未来的核心技术给予长期关注。在美国,组织专门委员会对光学和光子学相关的研究、应用和产业状况进行系统分析,找问题指方向,这已经是第三次了。每次的报告处处都提醒政府和业界要加大资源投入,继续努力巩固和加强美国在光学和光子学所有领域的领先地位。至于个中的原因是什么?我想每位读者都能从本报告集中找到答案。

新中国成立以来,我国的光学事业一直在高速发展。作为世界第一人口大国,今天中国学习光学和光子学的科学与工程,从事光学和光子学研发与产业,直到应用最新光电产品的人数都理所当然地是世界之最。中国人民正在了解光、研究光、利用光,用光来为自己、也为世界创造光明的未来。中国仍是世界上最大的发展中国家,我们深知自己与国际先进水平的差距,也特别愿意向全世界的同行们学习。15年前,本报告的前篇(《驾驭光:21世纪的光学科学与工程》)刚出版,已故中国光学学会理事长、原南开大学校长母国光院士就把美国同行送他的简本转给了我,时任中科院长春光机所所长的我深感该报告对工作大有帮助,我的同事们还下载了全本并译成中文在全所传阅。这次是长春光机所信息中心 *Light: Science & Applications* 编辑部正式购买了版权并组织翻译,担任校对的我同样深感得益良多。

本报告集首先是写给政府官员、投资人和研发机构负责人的,告诉他们为什么要关注光学和光子学的研发、应用和产业;对于相关领域的从业人员,本报告集也很有用(特别是给出的大量参考材料),告诉大家竞争的激烈程度和存在的问题及今后努力的方向;对于学习光学和光子学的青年学生,本报告集向他们展示了未来广泛的研究和就业前景;而对于一般大众,本报告集也是一本很好的高级科普资料,揭示了光学和光子学技术在现代社会方方面面中所发挥的巨大作用。对于中国和中

国的同行们来说,本报告集还有一个特殊作用——处处把中国当做一个特别的竞争对手,几乎每提竞争必涉及中国,这本身就为我们提供了大量可供参考的数据资料。和 15 年前相比,中国在光学和光子学的所有领域都有了明显的进步,我们和世界先进水平的差距显著缩小,然而下一个 15 年呢? 竞争将更加激烈,“后发优势”的效果将递减,显然,我们必须加倍努力。

本报告集的翻译是由 Light 编辑部组织国内多位专家和学者共同完成的。这支年轻的队伍在过去三年的时间里奋发图强,创造了中国科技期刊界的一个奇迹。但完成这次任务毕竟属于“赶工”,缺乏对译文的仔细推敲;本人也已离开科研一线,校对工作都是利用业余时间进行,还有大量工作是在候机室和飞机上完成的。疏漏甚至误译之处实难避免,还请读者、特别是本领域的专家们指正。

2015 年还是中国光学事业奠基人、“两弹一星” 功勋奖章获得者、也是本人的导师王大珩先生诞辰 100 周年,谨以此书向大珩先生致敬。

祝我国的光学事业能继续加速发展进步!

是为序。

曹健林  
2014 年 12 月

# 美国国家科学院

---

科学、工程和医学等方面的国家咨询机构

**美国国家科学院(NAS)**是由从事科学与工程研究的杰出学者组成、非政府非营利性、自持续且致力于促进科学与技术发展，并为服务公共福祉而开展成果应用的社会团体。根据国会于 1863 年向该团体授予的许可证权限规定，国会要求国家科学院向联邦政府提出科技建议。美国国家科学院现任院长是拉夫·J·希瑟龙(Ralph J. Cicerone)博士。

**美国国家工程院(NAE)**成立于 1964 年，遵从国家科学院的宪章，它是一个由杰出工程师组成的评议机构。国家工程院自行运营和挑选成员，与国家科学院共同承担向联邦政府提出建议的责任，国家工程院还倡导旨在满足国家需求的工程项目，鼓励教育和科研，并对工程师们做出的卓越成就予以表彰。国家工程院现任院长是查尔斯·M·韦斯特(Charles M. Vest)博士。

**美国医学研究院**成立于 1970 年，由国家科学院设立，旨在强化本行业杰出人员对公共卫生相关政策审核方面的应尽职能。根据国会向国家科学院授权的职责，医学研究院应主动向联邦政府提出建议，发现医疗保健、医学研究、医学教育等领域的问题。美国现任医学研究院院长是哈维·V·法恩伯格(Harvey V. Fineberg)博士。

**美国国家科学研究委员会(NRC)**由国家科学院于 1916 年组建，其宗旨是联合广大科技界人士，共同实现国家科学院提出的推动知识交流和向联邦政府献言献策的目标。根据国家科学院确定的总体政策，国家科学研究委员会是国家科学院和国家工程院的主要运营机构，向政府、公众、科学及工程界提供服务。国家科学研究委员会由国家科学院、工程院和医学研究院共同管理，主席和副主席目前分别由拉夫·J·希瑟龙(Ralph J. Cicerone)博士和查尔斯·M·韦斯特(Charles M. Vest)博士担任。

[www.national-academies.org](http://www.national-academies.org)

# “驾驭光：把握光学发展趋势，迎接未来科研挑战” 专题项目委员会

PAUL McMANAMON，励磁技术有限公司，副主席

ALAN E. WILLNER，南加利福尼亚大学，副主席

ROD C. ALFERNES(已退休)，NAE，阿尔卡特-朗讯公司，加利福尼亚大学圣巴巴拉分校

THOMAS M. BAER，斯坦福大学

JOSEPH BUCK，博尔德非线性系统有限公司

MILTON M.T. CHANG，Incubic 管理有限公司

CONSTANCE CHANG-HASNAIN，加利福尼亚大学伯克利分校

CHARLES M. FALCO，亚利桑那大学

ERICA R.H. FUCHS，卡内基·梅隆大学

WAGUIH S. ISHAK，康宁公司

PREM KUMAR，美国西北大学

DAVID A.B. MILLER，NAS，NAE，斯坦福大学

DUNCAN T. MOORE，NAE，罗彻斯特大学

DAVID C. MOWERY，加利福尼亚大学伯克利分校

N. DARIUS SANKEY，美国高智公司

EDWARD WHITE，爱德华·怀特咨询公司

## 职员

DENNIS CHAMOT，执行主任，美国国家材料与制造委员会

ERIK B. SVEDBERG，研究主任

HEATHER LOZOWSKI，财务主管

RICKY D. WASHINGTON，行政协调主管(2012 年 8 月前担任)

MARIA L. DAHLBERG，项目主管(2012 年 8 月前担任)

ANN F. LERROW，项目助理(2012 年 8 月上任)

LAURA TOTH，项目高级助理(2012 年 2 月前担任)

PAUL BEATON，项目经理，STEP<sup>①</sup>(任职期间：2011 年 10 月至 12 月)

CAREY CHEN，Christine Mirzayan 科技政策研究员，STEP(任职期间：2011 年 10 月至 12 月)

---

① STEP，美国科技与经济政策委员会。

## 美国国家材料与制造委员会

ROBERT H. LATIFF, R. Latiff 联合会, 亚历山大, 弗吉尼亚, 主席  
DENISE F. SWINK, 独立顾问, 日耳曼敦, 马里兰, 副主席  
PETER R. BRIDENBAUGH(已退休), NAE, ALCOA 公司, 波卡拉顿, 佛罗里达州  
VALERIE M. BROWNING, ValTech 解决方案有限公司, Port Tobacco, 马里兰州  
YET-MING CHIANG, NAE, 麻省理工学院, 剑桥, 马萨诸塞州  
PAUL CITRON(退休), NAE, Medtronic 有限公司, Minnetonka, 明尼苏达州  
GEORGE T. (RUSTY)GRAY II, 洛斯·阿拉莫斯国家实验室, 新墨西哥州  
CAROL A. HANDWERKER, 普渡大学, 西拉斐特, 印第安纳州  
THOMAS S. HARTWICK, 独立顾问, 斯诺霍米什, 华盛顿州  
SUNDARESAN JAYARAMAN, 佐治亚理工学院, 亚特兰大, 佐治亚州  
DAVID W. JOHNSON, JR., NAE, 史蒂文斯理工学院, 贝德明斯特, 新泽西州  
THOMAS KING, 橡树岭国家实验室, 橡树岭, 田纳西州  
MICHAEL F. McGRATH, 分析服务有限公司, 阿灵顿, 弗吉尼亚州  
NABIL NASR, Golisano 可持续发展研究所, 罗彻斯特, 纽约州  
PAUL S. PEERCY, NAE, 威斯康辛-麦迪逊大学  
ROBERT C. PFAHL, JR., 国际电子生产商联盟, 赫恩登, 弗吉尼亚州  
VINCENT J. RUSSO, 航天技术协会有限公司, 代顿, 俄亥俄州  
KENNETH H. SANDHAGE, 佐治亚理工学院, 亚特兰大, 佐治亚州  
ROBERT E. SCHAFRIK, GE 航空公司, 辛辛那提, 俄亥俄州  
HAYDN WADLEY, 弗吉尼亚州, 夏洛茨维尔, 弗吉尼亚州  
STEVEN WAX, 独立顾问, 雷斯顿, 弗吉尼亚州

### 职员

DENNIS CHAMOT, 执行主任  
ERIK B. SVEDBERG, 高级项目主管  
RICKY D. WASHINGTON, 执行助理(2012 年 8 月前担任)  
HEATHER LOZOWSKI, 财务主管  
MARIA L. DAHLBERG, 项目主管(2012 年 8 月前担任)  
ANN F. LERROW, 项目助理(2012 年 8 月上任)  
LAURA TOTH, 项目助理(2012 年 2 月前担任)

## 致 谢

本报告的草稿已请多位具有不同观点和专业技术背景的评委根据国家科学研究委员会下设的报告审查委员会批准的程序进行了评审。力求获得公正、严谨的点评，帮助委员会出版尽量权威可信的印刷版报告，同时确保报告能够满足客观性、有理有据和紧扣研究主题的要求。评审意见和报告草稿属于保密信息，藉此保护审查程序的完整性。我们感谢以下人员对本报告所做的评审：

William B. Bridges (NAS/NAE)，加利福尼亚理工学院

Elsa Garmire (NAE)，加利福尼亚理工学院

James S. Harris (NAE)，斯坦福大学

Thomas S. Hartwick，休斯航空公司

Eric G. Johnson，克莱姆森大学

Stephen M. Lane，劳伦斯·利弗莫尔国家实验室

E. Phillip Muntz (NAE)，南加利福尼亚大学

Thomas E. Romesser (NAE)，诺斯洛普·格鲁门航天系统公司

上述评审人员提供了很多建设性的意见和建议，但他们未被要求对结论或建议进行批注，也未被要求检查本报告在发布前的最终草稿。本报告的评审工作由 NRC 指定的红色星球风险投资基金( Red Planet Capital Partners )的 Peter Banks (NAE) 监督，负责确保根据机构程序对本报告进行独立评审，并确保所有评审意见都获得谨慎考虑。编撰委员会和协会全权负责本报告的最终内容。

委员会还要感谢出席委员会会议的演讲嘉宾，他们的发言加深了委员会成员对光子学和相关问题的了解：

John Ambrosco，Coherent 公司

Eugene Arthurs，SPIE

John Dexheimer，Lightwave 咨询公司

Ed Dowski，Ascentia 成像技术公司

Julie Eng，Finisar 公司

Michael Gerhold，美国陆军研究办公室

Larry Goldberg，国家科学基金会

Matthew Goodman，国防高级研究计划署

Linda Horton, 能源部

Kristina Johnson, 咨询顾问

Christian Jörgens, 德国大使馆

Bikash Koley, 谷歌公司

Prem Kumar, CLEO

Minh Le, 能源部

Donn Lee, 脸谱网

Robert Leheny, 国防分析研究所

Frederick J. Leonberger, Eovation 咨询有限责任公司

Tingye Li, AT&T 顾问

Aydogan Ozcan, 加利福尼亚大学洛杉矶分校

Mario Paniccia, 英特尔公司

Kent Rochford, 国家标准与技术研究所

Joseph Schmitt, 圣犹达医疗用品公司 Cardiovascular 分部

Jag Shah, 国防高级研究计划署

Bruce J. Tromberg, 加利福尼亚大学欧文分校

Usha Varshney, 国家科学基金会

Paul Wehrenberg, 咨询顾问

# 前言

1988 年，美国国家科学研究委员会（NRC）就光学与光子学的发展现状和未来趋势组织了一次系列研究，相关成果形成了论文集《光子学：在信息时代保持竞争力》<sup>①</sup>。1998 年，NRC 又组织了一次相同性质的研究，成果以论文集《驾驭光：21 世纪的光学科学与工程》<sup>②</sup>（以下简称《驾驭光》）出版。现在，经历了 15 年显著的技术进步和经济发展之后，我们认为还需要再进行一次研究来引导国家在该领域的战略思考。自 1998 年以来，许多其他国家都设立了各自的光学与光子学领域战略规划，并援引 NRC 1998 年《驾驭光》研究报告作为影响他们思考的重要文件。此次研究定名为“光学与光子学：美国不可或缺的关键技术”，讨论光学和光子学这一广阔领域产生的诸多影响，同时针对美国的战略利益，提出相应的行动和研究建议。

为了完成本研究，NRC 设立了“驾驭光：把握光学发展趋势，迎接未来科研挑战”委员会，由来自与光学科学与工程息息相关的多个领域的专家组成，包括材料科学、通信、量子光学、线性和非线性光学元件、半导体物理、装备制造、生物学、制造业、经济政策和风险资本。专家们既来自学术界，也来自企业。本研究的主要内容如下（详见附录 A）：

1. 回顾《驾驭光》报告发表以后学科领域取得的进展；
2. 确定源于光学科学与工程最新进展的技术机遇和潜在应用；
3. 评估美国 and 国外光学科学与工程之发展现状，包括民营和公共研究之趋势、市场需求、将光子学创新成果转化为竞争优势的实例（包括小型企业的举措）、劳动力需求、制造业基础设施和光子学对国民经济的影响等；
4. 指出需要优先攻关的一系列重大挑战性问题，以满足国家需求，填补国家竞争力方面的技术差距；
5. 提出建立和维持美国在全球光子学相关行业领先地位的行动建议（包括短期和长期目标，参与方和实施变革的责任方）。

从一开始就显而易见的是，光学与光子学相关领域的基金资助机构与专业协会

---

<sup>①</sup> 国家科学研究委员会，1988 年，《光子学：在信息时代保持竞争力》，华盛顿特区：国家学术出版社。

<sup>②</sup> 国家科学研究委员会，1998 年，《驾驭光：21 世纪的光学科学与工程》，华盛顿特区：国家学术出版社。

都迫切希望 NRC 能对该领域的未来提供一个权威性发展蓝图。如果该领域本质上是一项能够带动经济显著增长的“使能技术”，那么本研究将促进政策制定者和决策者们充分利用光学与光子学领域的研究成果。这就是本研究的宗旨。

包括下列在内的诸多因素使我们的工作富有挑战性：

1. 光学与光子学覆盖的领域非常广泛，包含着众多技术科学和工程学专题；
2. 该领域影响着包括能源、医药、国防、通信在内的众多商业市场，然而，这些市场的现行数据资料中却鲜见对光学与光子学这一决定性技术的重视；
3. 该领域的拓展已远远超出了美国的范围，许多其他国家已在研究、开发和制造方面投入了大量资金。

另外，光学与光子学领域通常会作为使能技术列入其他学科的框架之下（例如，电气工程学和物理学）。因此，在劳动力和经济影响方面收集光学与光子学的数据变得十分困难。例如，光学的发展带来了 DVD 播放器的普及，但它对经济的影响究竟应该用整个 DVD 播放器，还是用播放器中那个价格不贵但却支撑全系统正常工作的高性能激光器来衡量呢？再比如，假定没有低损耗光纤，使我们社会发生深刻变化的互联网技术就不可能迅速发展并达到今天的水平，但低损耗光纤本身并不昂贵。我们遇到了很多此类问题。

我们在研究过程中发现，光学与光子学领域已取得了令人振奋的进展，并相信该领域的未来前景将会更为广阔。关于该领域发展广度和深度的热门新闻报道有一段轶事：《时代》杂志列出的 2011 年 50 项最佳发明中，有 12 项以光学作为整个发明的关键技术<sup>①</sup>。

我们真诚地感谢慷慨赞助本研究的组织和机构，包括美国陆军研究办公室、国防高级研究计划署、能源部、国家标准与技术研究所、国家研究委员会、国家科学基金会、美国光学学会、国际光学工程学会（SPIE）。他们都为本研究提供了重要资源，并在重要时刻帮助解决关键问题。我们还要感谢帮助委员会完成这项工作的很多相关人员，包括研讨会发言人和研究论文评审人员，尤其要感谢委员会内部杰出的工作人员。

我们非常感谢 Dennis Chamot, Maria Dahlberg, Erik Svedberg, Laura Toth 和 Ricky Washington 等 NRC 职员对委员会的帮助。他们的专注和专业精神、远见和友好值得我们铭记。作为本研究项目主管，Erik 是一位孜孜不倦的杰出合作伙伴，其真知灼见确实不可多得。委员会还要感谢国家科学院科技与经济政策委员会的执行主管 Stephen Merrill，他的下属职员参与了本研究的后期的工作，特别是 Paul Beaton

---

<sup>①</sup> L. Grossman, M. Thompson, J. Kluger, A. Park, B. Walsh, C. Suddath, E. Dodds, K. Webley, N. Rawlings, F. Sun, C. Brock-Abraham, N. Carbone, 2011 年，50 项最佳发明，《时代》杂志。

(项目经理)和 Carey Chen(Christine Mirzayan 科技政策研究员)付出了很多努力。我们还要感谢国际科学组织董事会主席 Kathie Bailey-Mathae, 他对本研究的初期准备工作做出了重要帮助。

我们真诚地希望本研究论文的观点能对读者了解未来的工作有所帮助, 无论这些读者是国会议员、赞助机构成员、企业技术主管, 还是高校学生。

Paul McManamon 和 Alan E. Willner, 副主席

“驾驭光: 把握光学发展趋势, 迎接未来科研挑战” 专题项目委员会

# 目 录

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 摘要 .....                               | 1  |
| 第 1 章 绪论 .....                         | 9  |
| 1.1 研究意义 .....                         | 9  |
| 1.2 使能技术 .....                         | 11 |
| 1.3 经济问题 .....                         | 12 |
| 1.4 全球视野 .....                         | 13 |
| 1.5 教育的重要性 .....                       | 13 |
| 1.6 未来的发展 .....                        | 14 |
| 第 2 章 光子学对国民经济的影响 .....                | 15 |
| 2.1 引言 .....                           | 15 |
| 2.2 光子经济学：激光器案例研究 .....                | 15 |
| 2.2.1 激光技术对经济的影响 .....                 | 16 |
| 2.2.2 早期激光器的研发投资 .....                 | 17 |
| 2.2.3 早期激光器市场 .....                    | 18 |
| 2.2.4 国际对比 .....                       | 19 |
| 2.2.5 激光器案例研究结论 .....                  | 20 |
| 2.3 评估光子学的经济影响力——美国的行业收入、就业和研发投资 ..... | 21 |
| 2.4 政府和工业界资助的光子学研发资金及联邦政府提供的光学资金 ..... | 24 |
| 2.5 美国自 1980 年以来光子学创新领域的变革 .....       | 30 |
| 2.6 光学行业的风险投资 .....                    | 33 |
| 2.7 技术市场、知识产权和美国大学的技术特许 .....          | 38 |
| 2.8 协同研发模式及其对光子学创新的意义 .....            | 40 |
| 2.8.1 半导体制造技术联盟 .....                  | 42 |
| 2.8.2 美国光电产业发展协会 .....                 | 43 |
| 2.8.3 美国国家纳米技术计划 .....                 | 45 |
| 2.9 简要评述 .....                         | 47 |
| 2.9.1 拟定的国家光子学计划 .....                 | 47 |
| 2.10 本章研究成果 .....                      | 48 |
| 2.11 建议 .....                          | 48 |

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 第 3 章 | 通信、信息处理和数据存储                     | 50  |
| 3.1   | 引言                               | 50  |
| 3.1.1 | 通信                               | 50  |
| 3.1.2 | 信息处理                             | 54  |
| 3.1.3 | 数据存储                             | 56  |
| 3.2   | 影响案例：互联网                         | 57  |
| 3.3   | 技术进步                             | 58  |
| 3.3.1 | 通信                               | 58  |
| 3.3.2 | 网络                               | 66  |
| 3.3.3 | 研发示范领域                           | 68  |
| 3.3.4 | 信息处理                             | 68  |
| 3.3.5 | 数据储存                             | 71  |
| 3.4   | 制造业                              | 71  |
| 3.4.1 | 通信                               | 71  |
| 3.4.2 | 信息处理                             | 72  |
| 3.4.3 | 数据储存                             | 72  |
| 3.5   | 经济影响                             | 73  |
| 3.5.1 | 美国和世界其他地区之间的比较                   | 74  |
| 3.6   | 研究成果和结论                          | 75  |
| 3.7   | 建议和重大挑战性问题                       | 76  |
| 第 4 章 | 国防与国家安全                          | 79  |
| 4.1   | 引言                               | 79  |
| 4.2   | 光学和光子学对防御系统的影响                   | 80  |
| 4.3   | 技术概述                             | 81  |
| 4.3.1 | 《驾驭光：21 世纪的光学科学与工程》问世以来光学相关研究的变化 | 81  |
| 4.3.2 | 把握最新技术进步，获取发展机遇                  | 83  |
| 4.4   | 加工技术                             | 93  |
| 4.5   | 美国的全球地位                          | 94  |
| 4.6   | 研究成果和结论                          | 96  |
| 4.7   | 建议和重大挑战                          | 97  |
| 第 5 章 | 能源                               | 98  |
| 5.1   | 引言                               | 98  |
| 5.2   | 太阳能发电                            | 100 |
| 5.2.1 | 光伏系统                             | 103 |
| 5.2.2 | 聚光太阳能发电系统                        | 110 |
| 5.2.3 | 混合系统                             | 114 |