

光 学 的 新 面 貌

〔波兰〕A. 贝卡拉 著

朱裕栋 译

缪家鼎 沈文达 校

科 学 出 版 社

1 9 8 1

内 容 简 介

书介绍量子电子学、非线性光学和相干光学这三个重要的新领域。书写法别具一格，兼有科普读物和专著的特点。书中第一部分介绍了麦克斯韦方程、反馈原理、受激辐射和各种能谱。以下内容较深，但写得颇为生动。第二部分介绍各种激光器和激光。第三部分介绍场与物质相互作用所产生的非线性现象；第四部分介绍干涉的概念，并概述了象的无透镜重现和全息术。本书可供大学、高校师生和对现代光学感兴趣的广大读者参考。

A. Пекара

НОВЫЙ ОБЛИК ОПТИКИ

«Советское радио», Москва, 1973

光 学 的 新 面 貌

〔波兰〕A. 贝卡拉 著

朱裕栋 译

缪家鼎 沈文达 校

责任编辑 张钟静 陈菊华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1981年9月第一次印刷 印张：7 1/2

印数：0001—5,750 字数：165,000

统一书号：13031·1670

本社书号：2293·13—3

定价：1.20 元

译 者 的 话

光学是一门古老的科学，至今已有两千多年的历史。在这漫长的历史中，光学时快时慢地、时多时少地不断取得一些新的成就。二十年前激光器的问世，使光学又发生了一场革命，本书就是描述这个革命给光学带来的新面貌。

激光的历史虽还不长，但由于它具有一系列极其优越的特性，得到了迅速的发展，应用越来越广，人们对它的兴趣也越来越大。专业工作者不断研究它，初学者也想要了解它，为此，出版了不少关于激光的读物，其中有通俗读物，也有专门著作。不过，以深入浅出的手法，兼顾科普性和专业性两个方面的读物，至今还不多见，而本书正具有这些特色。

波兰物理学家贝卡拉的这本《光学的新面貌》，不论从内容和写法上都别具一格，给读者一种新鲜之感。作者从事教学和科研工作多年（华沙大学教授、波兰科学院通讯院士），编著过多种物理学不同学科的专著和教科书，还为青少年撰写过不少科普读物。他善于用日常生活中的例子和直观的实验，形象而巧妙地解释一些基本概念；对某些较深的材料也能做到深入浅出，避免过分专门的论述。我们觉得本书在介绍激光这门新学科方面确有独到之处，所以把它译了出来。

本书波兰文原著于1968年出版，我们是根据1973年版的俄文本转译的。沃新能同志曾对译文提出修改意见，在此表示感谢。由于水平有限，译文中定有错误和缺点，请读者批评指正。

译 者

俄文版编者序摘译

本书叙述激光器在光学中引起的革命。第一个激光器，或者说第一个光量子发生器，于1960年制成，从此光学开始了剧烈的变革；这种变革至今仍在继续中。

激光的主要特性是它的相干性，也就是光场振动在空间和时间上的高度一致性。正是这个特性使激光不同于灼热体或荧光灯的辐射，后者的光场是非常混乱的。

激光由于相干性高，便有很好的方向性，因而已被用于各种光学通讯系统。依靠激光，可以达到很高的能量密度。由此产生了一个光学的新分支——强光光学（即非线性光学——译注），它具有许多特殊的规律、现象和效应。当然，书中谈到的并非激光物理的全部方向。譬如，用激光加热等离子体实现受控热核反应，这是物理学中最有前途的方向之一，现已受到全世界（包括波兰）的重视，但书中并未论及。

迄今为止，已出版了许多有关激光的通俗读物，对激光器的作用原理及其应用范围作了标准的介绍。另外也出版了不少的好书和科学水平较高的专著。然而，在量子电子学方面，却一直缺少介于科普性和专业性之间的读物；至于非线性光学，则几乎连科普读物也没有。

本书系波兰物理学家贝卡拉所著，它别具一格，既是一本具有相当高科学水平的专著，又是一本科普读物，适合于对量子电子学和非线性光学的成就感兴趣的广大读者阅读。

本书第一部分写得特别清楚、形象、精致，甚至还带有一点艺术性。作者通过日常生活的简单例子和直观实验，解释

了一些关键性的概念(反馈、能级、反转分布等)。此外,本书后半部讲述非线性光学和相干性,写得较深,可供大学高年级学生参考。

俄译本删去了一些过时的内容,对某些章节也略作了一点压缩,但仍竭力保持原作者所用语言的文学风格和鲜明的形象性,所以也没有另增添章节来反映这方面的最新成就,只是加了一些注释。我们和作者同样希望,本书能激起青年们对这一重要科技领域的兴趣。

P. B. 霍哈洛夫

H. Γ. 梁勃采夫

作者序摘译

物理学又在发生一场变革——光学向我们展示了它的新面貌。诚然,光学早已是够美妙和够完善的了;如今则变得更加美妙和完善,同时也更加深奥了。

我之所以说又在发生一场变革,是想强调物理学的变革总是周期性地每隔几年发生一次。1942年,在核反应中首次释放出原子能,很快又出现超高频技术,从而在物理学、无线电工程和电子学方面掀起了一个个“发现”的巨浪,并在战后的年代里革新了它们的内容。当时我在两本书^[6,7]中分别介绍了这些变革。说来也巧,不久前我在同两位著名学者的交谈中,十分愉快地得知,原来他们正是在我那本论述超高频波的书的激励下,开始从事物理学和电子学的研究的。这样说来,我的劳动结出了果实。现在读者面前的这本新书,作者自信也是有用的。

本书的写法十分独特。绪论和第一部分是写给想熟悉量子电子学的广大读者的,只要求他们具备中学的物理和数学知识就够了。这类读者从本书第二部分也能汲取许多知识,不必害怕公式,因为它们并不影响对正文的理解。第三、四部分则是供懂得物理和数学的大学生和科学工作者阅读的。然而,就连他们读了第一、二部分,也会在发挥想象力方面有所裨益,因为想象力之于科学工作,不但是助手,而且是响导。

对于本书我为什么选用了这种写作形式?那是因为,几年前在一次令人难忘的私人“学术讨论”中,瓦日夫斯基教授使我信服地认识到,科普读物不但应该向读者介绍科学道路

引人入胜的一面,介绍它的方法和成就,而且要指出科学道路上的种种困难。所以,我觉得一部科学著作除了阐述研究的方法和成果,还应当为想象力提供食品,在其中添进几颗盐巴,好让读者感到这种食品美味可口。于是我就兼用了这两种形式。

在这本书里,我所讲到的只是物理学中有关量子电子学的两个很重要的方向(我正在从事这两方面的工作)——非线性光学和激光器作强光源的相干光学。这两门飞速发展的科学,不断有许多重要的著作问世,而且不但在出版后,甚至在写作过程中,书很快就会过时。由于我用于写书的时间不多,做得又慢,无力再把它写得更扎实一些,就只好这样献给读者了。

最后我要感谢诺贝尔奖金获得者汤斯教授。我在坎布里奇(马萨诸塞州)的马萨诸塞理工学院逗留期间,他曾给了我不少学术上的帮助,这对本书的内容大有影响。我还应当感谢密歇根大学的利思教授,他从自己的全息学研究的成果中惠赠了三幅原版照片(图 10.15—10.17);还有柏林的诺别尔特也赠送了两幅模型照片(图 3.17 和 3.18)。也要感谢我的几位学生和同事,特别是基里契尔,他们为本书插图出了不少力气。

阿尔卡奇 贝卡拉

1966 年于华沙

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 在耶日茨市场上思考反馈	1
1.2 麦克斯韦方程浅说	5
1.3 科学发现是怎样来的	15
绪论参考文献.....	18

第一部分 量子电子学浅说

第二章 量子放大器和量子振荡器.....	19
2.1 谈谈放大原理	20
2.2 电子管放大器和微波激射器的作用原理	25
2.3 谈谈能级或者用原子物理学的语言来描述桌子	27
2.4 原子和分子的能级 自发辐射和吸收	32
2.5 受激辐射	35
2.6 相互作用和光谱	36
2.7 麦克斯韦-玻耳兹曼分布或曰无序中之有序	38
2.8 微波激射效应	41
2.8.1 快速绝热跃迁或二能级微波激射器	43
2.8.2 分离法	43
2.8.3 泵浦法或三能级微波激射器	44
2.9 氨微波激射器	46
2.10 晶体微波激射器	52
2.11 红宝石激光器	56
2.12 激光的特性	59
2.12.1 相干性	59
2.12.2 单色性	60

2.12.3 功率	61
2.12.4 非线性现象	61
2.13 气体激光器	63
2.14 最短波的“功绩”	67
2.15 结语	69
第一部分参考文献	73

第二部分 关于激光器

第三章 进一步介绍激光效应和各种激光器	74
3.1 受激跃迁的发现	74
3.2 法布里-珀罗干涉系统	77
3.3 泵浦的方法	79
3.4 固体激光器(又称离子激光器)	81
3.5 气体激光器	88
3.6 半导体激光器	94
第四章 激光的特性	99
4.1 方向性和相干性	99
4.2 光的衍射	101
4.2.1 惠更斯原理	101
4.2.2 光的单缝衍射	102
4.2.3 光的双缝衍射	105
4.2.4 光的圆孔衍射	105
4.2.5 光在挡板上的衍射	107
4.3 激光光束的发散度	109
4.4 光束的聚焦	110
第二部分参考文献	113

第三部分 非线性光学概述

第五章 光场与物质相互作用所产生的非线性现象	114
5.1 非线性介质的标量描述	114

5.2	非线性介质的张量描述	116
5.3	施加电场时的非线性光学现象	118
5.4	光波电场作用下介电常数和折射率的变化	122
5.4.1	介电常数和折射率的求法	122
5.4.2	电场对 ϵ 和 n 的影响	124
5.4.3	液体中的非线性现象的机理	125
5.5	光束的自聚焦和自通道	128
5.6	二次谐波的产生	134
5.7	新方法: 折射率匹配(同步)	138
5.8	混频(包括光频)	142
第六章	其它非线性光学现象	146
6.1	双光子激发	146
6.2	受激喇曼现象	147
6.2.1	斯托克斯-喇曼散射	147
6.2.2	反斯托克斯-喇曼散射	150
6.2.3	反斯托克斯-喇曼散射的机理	153
6.3	布里渊散射	155
6.3.1	布里渊散射理论	155
6.3.2	用激光技术研究布里渊现象	158
6.3.3	产生超声波的光学方法	160
6.3.4	超声波的发生机理	160
第三部分	参考文献	163

第四部分 关于相干光

第七章	相干性的概念	165
7.1	光的相干性的现象学概念	165
7.2	光的相干性和傅里叶频谱分布	169
7.3	范西杰特-采尼凯定理	172
7.4	扩展光源的波场上的相干区域	179
7.5	迈克耳逊恒星干涉仪	181

第八章	谈谈干涉和衍射理论.....	183
8.1	关于法布里-珀罗干涉仪	183
8.2	基尔霍夫衍射理论要点	189
8.3	福克斯和李的模产生理论	193
第九章	谈谈成象过程.....	197
9.1	傅里叶定理	197
9.2	显微镜成象(阿贝理论)	200
9.3	阿贝理论的实验证明	204
第十章	谈谈波前重现法成象.....	208
10.1	传递函数	208
10.1.1	时间信号的变换	208
10.1.2	象的变换	209
10.2	象的二阶段变换方法(沃尔甫凯-布喇格法)	211
10.3	盖伯的波前重现法 全息图	215
10.4	用无透镜法构成空间象	217
第四部分	参考文献.....	226

第一章 绪 论

1.1 在耶日茨市场上思考反馈

在过去一段悠闲的日子里，我常去光顾波兹南的耶日茨市场。说得确切点，我是拎着提包跟着妻子一块转。那时我已听到了许多赞扬耶日茨市场和那极好的男女卖主们的话。我渐渐相信，耶日茨市场确是波兰最好最繁荣的市场，在这里可以领略到一种十分文明的生意经，可以接触到一批彬彬有礼、交易公平的买卖人。就拿库尔卡先生来说吧（我实在不知他的尊姓大名，只是我儿子从小这样称呼他，大家也就叫惯了），他便是一个真正的行家，简直称得上一名演员。他的手艺过硬，一刀子下去（恕我下面把此刀称之为解剖刀），准确无误。库尔卡先生做起外科手术来（小伙子难听地叫它“开膛”），动作利索，技巧过人。他那解剖刀紧挨鸡肫或鸡肝划过去，难得有一毫米的差距。承蒙他好言相劝，使我终于感到没有必要拜他为师，去学那门困难的手艺，因而我能抽出更多的时间来思索。库尔卡先生的性格也极好，他为人善良，和蔼可亲。他对顾客一向以朋友相待，毫无私心地充当他们的参谋。如果把他身上的这一切集中起来，再推而广之，大家定能想象得出耶日茨市场该是何等模样了。

我们不仅是市场的顾客，也是它的朋友，更不待说是它的仰慕者了。既然是朋友，我便总是设法别让卖主按过低的价格出售他那一向是上等的食品。每当我的妻子购买蔬菜和别的食品时，即使有人从旁暗示价钱太贵，我却总说这是便宜

货。不过，有时我也遇到卖主和顾客顶牛的不愉快场面。考虑到自己不宜插嘴，我便又回到思索中。

应当对大家讲明，你们此刻阅读的这本书，首先是通过思索写出来的。当然也不仅仅靠思索。单凭思索，恐怕什么事也做不成。这本书曾花去了我许多劳动，其中有研究方面的，也有理论方面的，甚至还有教育学方面的。这一点读者是容易领会的。可是，话说回来，如果对周围的各种现象不加思索，对书中该讲什么和怎样讲法不作考虑，光靠劳动也还成不了书。所以，有一段时间，我曾不断地冥思苦想，往往在快要入睡的时候还在想，醒转来又想，随时随地都在想，连走在街上也在想。然而，一些最宝贵的想法却是在耶日茨市场上产生的。其中一个是关于反馈这样一个基本概念；几十年来，无线电技术人员对它早已弄得一清二楚了。它的“老家”乃是控制论，以后则被推广到技术和人类生活的不同领域。于是我决定用耶日茨市场上可能发生的某些事情作为例子，来阐明反馈的概念。

我们不妨抽象地想象一下。拿市场连同它的卖主们作比喻，要比用一个由离子、电子和光量子组成的系统进行说明，可能更容易使大家明白道理。假设耶日茨市场正在出售奶油，标价 70 兹罗提¹⁾。可是卖主们根本不考虑赚钱的事，他们并不在乎生意的好坏，却对文化、艺术和科学颇有兴趣，津津乐道地谈论伦布兰特²⁾和爱因斯坦，完全不提价格，更无意去抬高它了。不料，市场里突然传来一个消息（我们管它叫信号），譬如，有个人跑过来说：“神女街那边奶油已涨到 80 兹罗提啦！”，卖主们并未停止聊天，只是把标着 70 兹罗提的价

1) 波兰货币单位。——译注

2) Rembrande (1606—1669)，荷兰画家。——译注

目牌换成 80 兹罗提，继续谈论着诗歌和雕塑。第二个信号又来了，它的“载体”报告说：“阿姨，符兹兑赫的奶油价已是 100 兹罗提啦！”；随后又来了一个报信的：“古茹普已经 100 出头啦！”，这时卖主们才不约而同地各自按自己的主张变更价格，尽管照样海阔天空地谈天，又都只字不提钞票的事，可是价格却已提高了。

这就是信号对市场的第一种作用。传进市场里来的消息是输入信号，卖主们的举动则是输出信号。涨价是对有关较高价格的信息的反应，也就是对进入系统的输入信号的反应。所以，我们可把这个系统叫做放大系统。这种放大显然是不大的：价格只从 70 兹罗提涨到 100 兹罗提；而且又是在系统的各个元件并无相互作用的情况下发生的。

现在再请大家思考另一种情况：卖主们在一起商议价格，但他们都很公道，约定不许涨价。他们在谈论中对涨价表示不满，以致一位女卖主当场就摘下一块原标 100 兹罗提的牌子，换上 80 兹罗提的新牌。另一位男卖主也拿掉原标 90 兹罗提的价目牌，安上一块 80 兹罗提的。卖主们强烈地感到于心有愧，终于把价值一直降到了 60 兹罗提。不过，我们也别过份夸张，把卖主们捧成天使。

现在我们就用通常的技术术语来描述市场上所出现的情景。市场上发生了系统元件之间的相互作用，这种相互作用影响到输入信号。这就是所谓的反馈。这是一种使输入信号减弱的反馈，我们把它称之为负反馈。根据负反馈的强度，价格被稳定或调整在一定的水平上；所以说，具有负反馈的放大系统就是一种调整器。

现在转到第三种最重要的情况，即研究具有正反馈的系统。但我要先向耶日茨市场的朋友们打个招呼，请他们对我现在所讲的事情切莫见怪。假设我们的卖主们此刻不是在谈

论印象派，而是一味议论着价格，说某某地方上涨了，某某地方抬高了，起劲地猜测行情，弄得人心慌慌，异常紧张，——这就是说，输入信号正在一点点增强。尤其是，如果那个成为信号载体的人不想离开市场回家，而又折了回来，这就等于信号从市场的边缘反射，如同皮球从墙上一次又一次地往回弹，越来越加剧其运动。这样就会产生强烈的反馈，致使价格一涨再涨。市场上激起一片狂热：奶油价跳到 200 兹罗提，300 兹罗提，一直往上涨，竟至接近 1000。输出信号超过输入信号，于是发生了灾难。这就是正反馈的作用结果。

我以为现在可以大胆地来谈微波激励器和激光器了。实质上，在激光器或微波激励器的那些系统中，起作用的正是正反馈这个现象。正反馈产生于原子之间，而一份份的辐射能量（即量子）便是输入信号。

假设有一个密度相当高，因而能够产生相互作用的原子系统。在这个系统的两端，具有两块平行平面反射镜，这是用来建立正反馈的装置。

光子射入这个系统，它们激发原子。受激原子自发地以量子形式发出辐射。其中的一些量子激发别的受激原子，迫使它们放出新的量子，从原子中放出来的这些新的量子，都朝同一方向发射。关于受激辐射及其发现者爱因斯坦，我们在 § 2.5 和 § 3.1 还要讲到。受激发射的量子射至反射镜表面，并被反射，同时引起新量子的受激发射，再射至另一个反射镜。又一次反射后，量子便雪崩般向左运动，然后再向右运动，直到全部受激原子放出能量为止。但由于其中一个反射镜是做得部分透明的，所以这种“光的雪崩”会使一部分能量射到外面。虽说这只是一部分辐射，但其亮度却比太阳高出许多倍。而且，这部分能量又是在很短的时间内释放出来的，所以这样得到的辐射功率很大。红宝石内的铬离子就是这种

原子系统的例子。红宝石被制成一根磨光的棒，其两个端面严格平行，并涂有反射层（例如镀银）。红宝石的激发或泵浦用闪光灯来实现。

这就是本书第一、二部分所要讲解的微波激光器 and 激光器中正反馈的作用。

1.2 麦克斯韦方程浅说

1820 年初，哥本哈根大学物理学教授奥斯特给学生们讲解新的、非常有趣的电现象和磁现象。当时还不知道电和磁有什么共同之处。只是设想会有某种联系，但谁也未能发现它。奥斯特在一次讲课中，安排了一个非常精采的“伽伐尼电池”实验（这种电池是伏特发明的）。他用一根金属导线把电池两端连接起来，结果导线被烧得赤热。他认为这是由于产生了两股反向的电力，所以引起了一种剧烈的电的冲突。奥斯特向学生演示了这个有意义的实验，由于他的勤奋努力，终于获得了只有研究者才能期望的那种最高奖赏——发现了新的现象。（瞧，这种电的冲突竟推动了磁针！）

奥斯特研究和描述了这个现象。他把自己的论文寄给法国科学院。著名的物理学家安培读了这篇论文。一星期后，他创造了一个目前仍在沿用的术语，引入了电流的概念，而且导出了电流方向影响磁针的著名法则。从此，人们知道了并不是两股电力或两股电流的冲突使得导线灼热和推动磁针。发生这种现象只是由于有一种通量沿着导线从正电极流向负电极，也就是有电流通过的缘故。安培连续三年研究了电动力学现象的数学理论。由此诞生了电动力学。

因此，在那科学上有许多重大发现的 1820 年，奥斯特和安培向我们展示出一座横跨于电与磁之间的桥梁。不过，这

座桥梁只能允许一个方向通行：从电走向磁。谁能调个方向从磁走向电呢？谁能靠磁来获得电流呢？

法拉第一心想要解决这个问题。从1822年起，他便着手“变磁为电”的研究。电流在其通过的导线周围形成磁场。因而，磁场也应该在导线内激励出电流！可是，在法拉第顽强劳动的九年里，在无数次努力均归失败的九年里，磁场并未激励出电流，因为大自然本来就不是用这个方法安排奥斯特和安培的现象的。直到1831年，当法拉第发现电磁感应现象后，他才懂得这个道理。这时，他只花了十天功夫，就把这个现象所遵从的规律解释得一清二楚了。在闭合的导线内产生电流的原因，不是由于磁场的存在，而仅仅是由于磁通量随时间的变化。确切地说，这种磁通量变化所产生的并非电流，而是电压（所谓电动势），因为电流只有在导线两端接通时才能流动。如果导线两端断开，便不产生电流，而产生电压。

十九世纪杰出的科学家之一麦克斯韦正确地描述了奥斯特和法拉第的现象，把它概括成两个著名的方程^[3,8]。

因此，电流在自己轴线周围产生磁场。磁场的方向，也即磁场中作用力的方向，用场的力线表示。这些围绕电流的力线是一个个同心圆。我们说，电流的磁场是圆形的。但电流并非只是在导线内才能通过。它不但可在良导体内通过；如果加上电池所产生的电压，同样也能在不良导体内通过。倘若介质是导电的，则电场促使介质中的电荷移动，电荷的运动便形成电流。这种电流叫做传导电流。假如介质是一种电介质，电场就只能使那些与介质分子束缚在一起的电荷稍许移动一点儿，因为在介质的晶格中（若为晶体介质），位移的力和使电荷保持在某一位置的力之间达到平衡。因而产生介质的极化。