

# 布洛姆伯根与非线性光学效应

刁述妍

1961年第一台激光器发明不久,弗兰克(P. A. Franken)等人利用红宝石激光器在光波段观察到二次谐波的产生,这是最早发现的二阶非线性光学效应。1962年,布洛姆伯根(Nicolaas Bloembergen, 1920~)等提出了实现高效非线性频率变换的准相位匹配(QPM)理论,1965年出版专著《非线性光学》。布洛姆伯根对非线性光学频率变换进行了开创性的理论工作,在科学研究和实际应用中具有重要意义。在布洛姆伯根奠定的理论基础上,出现了研究非线性光学效应的热潮,人们陆续发现和探讨了各种非线性光学效应,如受激拉曼散射、受激布里渊散射和光学参量振荡等。此后,非线性光学迅速发展起来并成为光学的一门分支学科,布洛姆伯根教授也被公认为非线性光学理论的奠基人。

## 布洛姆伯根的学术生涯

布洛姆伯根1920年3月11日生于荷兰的道尔勒赫特(Dordrecht),1941年在荷兰的乌得勒支(Utrecht)大学本科毕业,1943年获得硕士学位。1946年到美国哈佛大学协助珀塞尔(Edward Purcell)和庞德(Robert Pound)等研究核磁共振,1948年于荷兰莱顿大学获得博士学位,然后又到美国。1949年任哈佛大学高级研究员,1951年任教授,1958年入美国国籍,1990年于哈佛大学退休。1991年担任美国物理协会会长,上海复旦大学名誉教授。布洛姆伯根在核磁共振、固态微波量子放大器、电子顺磁共振、激光光谱学和非线性光学等方面贡献突出,一生获得很多荣誉,1974年获美国国家科学奖章,1979年获美国光学学会馥优选奖,同年在荷兰获洛伦兹奖章,1983年获电气和电子工程学会荣誉勋章,1981年与肖洛共同分享诺贝尔物理学奖的一半(表彰他在非线性光学领域发展激光光谱学方面所作的杰出贡献)。

布洛姆伯根取得了如此成就的原因是多方面的。首先是良好的家庭教育和遗传因素。布洛姆伯根的祖父是曾获数学物理学博士学位的中学校长,父亲是化学工程师,母亲精通法语。他们非常注重孩子的培养和教育,日常生活中教导孩子要勤俭、吃苦,鼓励孩子多读书、坚持体育锻炼。父母还立下一

条规矩,每天要抽出一段时间参加体育活动,如划船、航行、游泳、溜冰、打曲棍球等,这使布洛姆伯根至今保持了打网球、徒步旅行和滑雪的习惯,在体育锻炼中学习、娱乐,获得了健康体魄。二次世界大战期间,希特勒出兵荷兰,国内生活条件非常艰苦,布洛姆伯根以野菜充饥、用煤油灯照明学习,同时还要提防被警察逮捕,他在如此恶劣的生活环境中仍然坚持学习并获得硕士学位。

其次是他的挑战精神。布洛姆伯根12岁进入乌得勒支地方性市立学校,该校是1474年创建的拉丁语学校,注重人文学科教学,老师基本都有博士学位。布洛姆伯根在这样良好的氛围中开始了人文课的学习,为日后撰写《非线性光学》打下了坚实基础。布洛姆伯根对自然科学的爱好在中学时期就表现出来,物理和化学基础知识学得很好,阅读诺贝尔物理学和化学奖得主居里夫人的传记,还自己动手制作收音机,从中受益匪浅。他对数学和物理之间关系的兴趣浓厚,觉得数学对物理现象的描述非常神奇。对于选择物理,布洛姆伯根说“我觉得物理是最难和最具有挑战性的学科”。正是这种挑战精神使他攻克了一个个难关,取得了一个个丰硕成果,最终荣获1981年度诺贝尔物理学奖。

第三是广泛的学习兴趣和创新精神。布洛姆伯根早期研究核磁共振,使他对激射器产生了浓厚兴趣,他设计的一台三能级激射器的功率大大高于气体激射器,成为应用广泛的微波放大器。布洛姆伯根还研究可高精度观测原子结构的激光光谱学,这促使他深入细致地分析研究了线性光学,还有物质之间相互作用的电磁辐射、光波与介质之间的相互作用等。

第四是团结合作、善于接受新鲜事物。布洛姆伯根在哈佛大学的科学生涯中,与许多有名望的同事和有才华的研究生一起合作,与他一起合作过的博士生和博士后大约各有60人,布洛姆伯根说:“和年轻人一起工作可以避免头脑老化,使自己变得更年轻、更有朝气”。布洛姆伯根利用暑假参加学习班和学术会议,还以顾问身份参加企业和政府组织,以提高专业知识、增加社会阅历。

## 布洛姆伯根在非线性光学 研究中所作的贡献

非线性是物质世界中普遍存在的现象, 介质在较强激光光场作用下产生的极化强度与入射激光光场之间不再是线性关系, 而是与场强的二次、三次以至于更高次项有关, 这种关系称为非线性。凡是与非线性有关的光学现象称为非线性光学现象, 研究非线性光学现象和理论的学科称为非线性光学, 它是光学的重要组成部分。激光问世之前, 基本上是关于研究弱光束在介质中的传播, 介质的极化率是与光强无关的常量, 光波的叠加遵守独立传播原理, 这部分内容属于线性光学范畴。随着激光器的诞生, 特别是调 Q 激光器的出现, 非线性光学效应随之被发现, 并且用线性光学理论无法解释。非线性光学效应无论是在基础研究还是实际应用中都发挥了非常重要的作用。非线性光学效应有二阶非线性光学效应, 如二次谐波产生 (SHG)、和频和差频产生 (SFG, DFG)、参量产生和放大 (OPG, OPA)、参量振荡 (OPO)、三阶非线性光学效应, 如三次谐波产生 (THG)、双光子吸收 (TPA)、受激拉曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS), 另外还有光折变效应和相位共轭等。

布洛姆伯根教授指出了激光器的特性: 激光器是相干波源, 具有高单色性、高方向性和高强度的特点。布洛姆伯根还提出能够描述液体、半导体和金属等物质的非线性光学现象的一般理论框架, 主要包括三个方面。第一, 介质对光波场的非线性响应及其描述; 第二, 光波场之间以及光波场与介质之间相互作用的理论及描述; 第三, 光通过介质界面时的反射和折射理论。

非线性光谱学就是利用非线性光学的原理、概念、方法和有关物理效应研究原子、分子以及固体光谱, 从而解决光谱学所面临的各种问题。布洛姆伯根在非线性光学的研究中, 提出了三阶非线性光学效应的“四波混频”, 即利用三束相干光通过非线性介质相互作用得到另一频率的信号光。利用四波混频可将可调谐相干光源的频率范围扩大到红外和紫外; 在简并情况下可用于自适应光学中的波前再现; 在材料研究中, 四波混频是非常有效的光谱分析工具; 利用四波混频及共振增强效应, 可高精度确定原子、分子或固体中的能级间隔。

20 世纪 60 年代末, 布洛姆伯根又开始将非线性光学效应用于化学研究, 即利用激光协助化学反应, 也称为“化学裁缝”或“化学外科手术”。他的设想是利用激光选择性地激发化学键, 进行拆键和合键, 而不影响分子的其他部分, 然而至今未获成功。

在非线性光学频率变换过程中, 相位匹配是重要条件, 满足相位匹配条件可以大大增强信号光的输出, 获得高转换效率和增益。相位匹配方式通常有两种, 一种是双折射相位匹配 (BPM), 即利用晶体的双折射和色散特性, 通过改变入射光对晶体的入射角或改变晶体的温度来改变相互作用光波之间的相位, 以实现相位匹配。利用这种方式实现相位匹配有许多不利方面, 如非线性材料必须具备较大的双折射, 相互作用光波的有效作用长度受到限制, 不能利用材料的最大非线性系数等。另一种相位匹配方式就是 1962 年布洛姆伯根等提出的准相位匹配 (QPM), 即利用非线性极化率的周期跃变实现非线性光学频率转换效率的增强。利用这种相位匹配方式克服了上述双折射相位匹配的缺点, 可根据需要选择晶体的极化周期, 调谐方式灵活、方便, 特别是近几年, 随着晶体制作工艺的进步, 准相位匹配技术得到了越来越广泛的应用。

近几年来, 有关非线性光学现象的研究越来越广泛。例如光学混频、光学参量放大及受激拉曼散射等效应的研究已形成一定理论, 并获得广泛应用。非线性光学的研究已从固体扩展到气体、原子蒸气、液体及液晶。利用非线性光学效应可实现激光频率的转换和调制, 研究物质的高激发态以及高分辨率光谱, 进行光学信息处理、改善成像质量等。在光纤宽带传输中需通过非线性光学实现开关和放大器的应用, 在军事方面 (如光电对抗、遥感、激光雷达等) 也有广泛应用。特别是 20 世纪 90 年代以来, 非线性光学的研究已经进入飞秒区域, 在光通信领域等方面发挥着重要作用。非线性光学的研究使人们更加深刻地认识到光学现象的丰富性和复杂性。

非线性光学对现代光学的发展、光谱学的研究具有一定推动作用, 在非线性材料物理、固体物理、天体物理、化学研究等方面有很大影响。布洛姆伯根教授作为非线性光学的奠基人之一, 推动了非线性光学的发展, 对物理学做出了重要贡献。

(山东省临沂师范学院物理系 276005)