

Peter Franken 与非线性光学

常国庆[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2022-02-21 收到

[†] email: guoqing.chang@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220708

美国物理学家 Peter Franken 出生于 1928 年，卒于 1999 年(图 1)。Franken 从哥伦比亚大学物理系获得了学士、硕士和博士学位，获得博士学位时年仅 24 岁。在斯坦福大学短暂工作两年后，Franken 从 1956 年开始任教于密歇根大学物理系。1973 年，Franken 受聘于亚利桑那大学，担任该大学日后享誉世界的光科学中心的第二任主任，1983 年卸任后继续留在亚利桑那大学工作直至辞世。1961 年，在密歇根大学工作期间，Franken 将高功率红宝石激光聚焦到石英晶体中，首次实验展示了二倍频这一非线性光学过程，该工作标志着非线性光学这门学科的诞生。

1 激光的出现与商业化

非线性光学的诞生直接源于激光的出现。1960 年 5 月 16 日，梅曼(Theodore Maiman, 图 2)建成了人类历史上第一台激光器。梅曼将实验结果写成文章，投给了刚创刊不久的 *Physical Review Letters*(PRL)，但不幸的是这篇文章被主编拒绝了^[1]。梅曼把那篇文章大幅度删减到只剩 300 字左右投给了 *Nature* 期刊，并于 1960 年 8 月 6 日发表，梅曼的工作成果得以正式与读者见面^[2]。后来，诺奖得主 Charles Townes 曾评价梅曼的这篇文章说，如果计算文章单字价值的话，这篇文章无疑是 *Nature* 这

本杂志有史以来发表的所有文章中价值最高的一篇。毫不夸张地讲，激光的出现不仅彻底改变了整个人类的生活面貌，更是改变了光学这一学科。光学是一门非常古老的学科，有 2000 多年的历史，激光的发明让光学这一历史悠久的学科焕发了全新的活力。

在梅曼研制成功第一台激光器之后，不仅各种激光设备相继迅速问世，而且在第二年(1961 年)，世界上就出现了第一个激光器公司——Trion Instrument。这个公司发展非常快，在 1962 年，已经研制成了脉冲宽度大约 0.5 ms 的脉冲激光。这种激光的功率和能量都很高，可以在两个摞在一起的剃须刀片上钻出一个小孔。

Trion Instrument 这家公司位于美国密歇根州一个叫做 Ann Arbor 的小城，有个非常浪漫的翻译名字“安娜堡”，也是密歇根大学所在

地。在密歇根大学物理系担任教授的 Peter Franken 为 Trion 公司提供技术咨询。

2 Lamb 和 Franken 之间的 10 美分赌局

标志着非线性光学诞生的文章“Generation of Optical Harmonics”，于 1961 年在 PRL 上发表，文章的 4 个作者都在密歇根大学物理系工作。他们实验证实了当强光在合适的晶体中传输时能够产生新的光束，其频率为入射光的两倍。

现在我们回顾历史，会觉得晶体中的光学倍频现象似乎很自然，但在 20 世纪 60 年代，产生倍频是不同寻常的想法。众所周知，在量子力学出现之前，麦克斯韦方程基本上总结了所有经典光学的物理知识，由此人们广泛接受光是电磁波这一概念。在量子力学出现之后，光子的概念逐步深入人心，之后的



图 1 Peter Franken(1928—1999)。图片来自美国光学学会网站：<https://www.optica.org/en-us/history/biographies/bios/peter-franken/>



图 2 梅曼(1927—2007)。图片来自 https://ethw.org/Theodore_H._Maiman

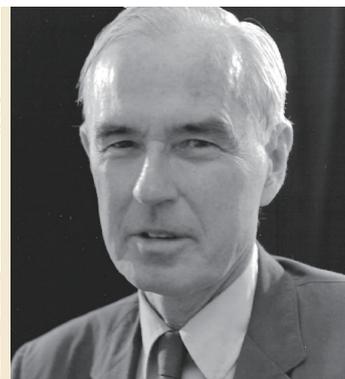


图 3 Willis Lamb(1913—2008)。图片来自 <https://www.thefamouspeople.com/profiles/willis-lamb-7624.php>

几十年里，物理学家在思考有关光的问题时，会不自觉地使用光子的概念。当用光子的概念来思考强光与晶体相互作用时，会很难理解为什么光子的频率会发生变化。所以在那个时代，并不能那么直观容易地预见到像倍频这样的非线性光学效应。当时 Peter Franken 能有这个想法无异于一次概念上的革命。

Franken 提出这一想法之后，很多人并不接受，其中包括 1955 年的诺贝尔物理学奖得主 Willis Lamb (图 3)，他是第一台激光器的建造人梅曼在斯坦福大学的博士生导师。关于能否产生倍频，Lamb 和 Franken 打了一个赌，赌注 10 美分。Franken 后来回忆说，这个在光学发展史上如此神圣的、代表了非线性光学这

一学科诞生的事情，没想到当年打赌的赌注只有一毛钱。

3 回归洛伦兹模型

Franken 教授实现二倍频的灵感来源于美国光学学会于 1961 年春天在匹兹堡举办的关于激光技术的讨论会，激光领域中的著名学者几乎悉数出席。听完几场报告后，Franken 做了一些简单估算，发现目前把激光聚焦后在焦点处产生的电场大概能到 10^5 V/cm。这虽然比原子内部的电场低了 4 个数量级，但 Franken 觉得原子在这么强的电场下的响应很可能不再是线性的，而是非线性的。那么这种非线性响应对入射光会产生什么样的影响呢？这个时候，Franken 是在用电磁波而不是光子的概念来思考这个问题。

在量子力学发明之前，人们通常采用洛伦兹模型描述光和物质中原子的相互作用。原子是由正电荷和负电荷组成，正电荷非常重，负电荷相对较轻，正电荷跟负电荷构成一个谐振子。当光入射到原子，光的电场会让负电荷相对正电荷做简谐振动，从而产生随时间变化的偶极矩，这个随时间变化的偶极矩会再辐射出一个光波，其频率与正负电荷相对振动的频率是一样的。也就是说，这个简谐振动本身会重新释放出与振动频率相同的电磁波，这个电

磁波与入射的电磁波叠加就得到了出射的电磁波。这就是经典光学(或者说线性光学)中的洛伦兹模型。

偶极矩是一个微观的概念，可以把这些偶极矩求和得到一个宏观的“极化”量 P (polarization)。也就是说入射光中的电场会将材料极化，然后会产生极化量 P 。对于线性光学来讲， P 正比于 E ，二者之间满足 $P = \epsilon_0 \chi E$ ，其中 χ 为材料的极化率。 $n^2 = 1 + \chi$ ，其中 n 为折射率。线性光学的特点是光的频率保持不变：如果入射光的频率是 ω_1 的话，出射光的频率仍是 ω_1 。如果有 ω_1 和 ω_2 两个不同频率的光叠加在一起入射到晶体中，那输出光的频率还是 ω_1 和 ω_2 ，这两个频率的光之间不会发生能量交换，也不会产生新频率的光。

在 Franken 看来，若是光很强，对应的电场就会很强，强电场可能会导致材料的响应不再是线性的，也就是说材料的极化 P 不再与 E 成正比关系，而是包含了 E, E^2, E^3 以及更高阶的一些项，那么可以写成 $P = \epsilon_0 [\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots]$ 这样一个简单的表达式，可以认为是对线性光学材料响应的一个简单修正，非线性光学的那些有趣现象恰恰来自于这个方程里面所增加的高阶项。比如说，利用这个表达式就可以简单地理解二倍频现象，我们称之为二阶非线性光学现象，意味着只考虑 $\chi^{(2)}E^2$ ，不考虑后面的更高阶的修正。如果入射光的频率是 ω ，那么把它代入到 $\chi^{(2)}E^2$ 就会得到 $\cos^2(\omega t)$ 这一项。简单展开就会发现里面包括一个直流项，同时还有一个二倍频(second harmonic)项，表明偶极矩会辐射出频率为 2ω 的电磁波。这意味着，激光经过材料之后会有一部分光的频率从原来的 ω 变

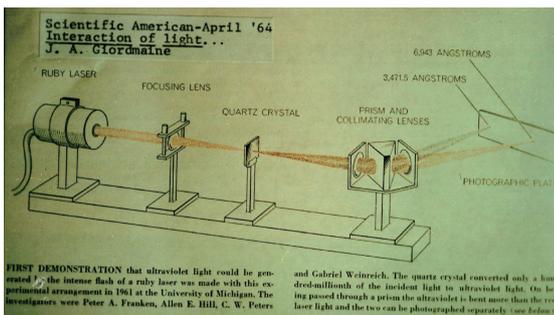


图 4 Franken 的二倍频产生实验装置^[3]

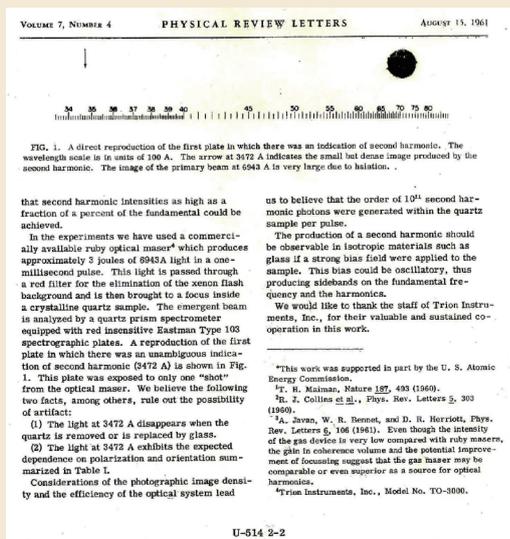


图 5 Franken 发表在 PRL 上的关于二倍频产生的文章^[4]

成了 2ω ，就是我们今天所熟悉的二倍频产生(SHG)过程。

4 实验产生光波二倍频

会议结束后，Franken回到了安娜堡马上着手组建团队，准备实验。他找了物理系的两个同事Peters教授和Weinreich教授一起讨论，Weinreich指出需要用中心对称破缺的光学晶体才能实现光学二倍频，石英晶体是个合适的选择。三人共同设计了实验方案，Franken又找来物理系的本科生Alan Hill来做这个实验。

他们当年的实验装置采用了Maiman所发明的那一类红宝石激光器，发出红色激光，波长为694.3 nm。之后使用透镜将激光光束聚焦到石英晶体中，出射的基频光和二倍频光经过棱镜在空间上分离(图4)。当时没有CCD，只能用感光板这种现在看来非常简陋的设备来探测这两束光。因为基频光非常强，产生了一个非常大的黑点；而波长为347.15 nm的二倍频光很弱，所对应的斑点极小，像一片尘埃。

文章被PRL接收后，当时的编辑误以为这个点就是不小心落上的灰尘，于是把这个斑点(也就是唯一的实验结果)移除了。

这篇文章于1961年8月发表，是大家公认的开启了非线性光学这门学科的一篇文章，标志着非线性光学的诞生(图5)^[4]。

为什么Franken实验中产生的二倍频这么弱呢？这是因为该实验没有考虑到相位匹配这个在非线性光学中异常重要的概念。我们以二倍频过程为例来解释相位匹配。基频光在晶体中一边传输，一边产生二倍频光。当基频光和二倍频光具有相同的折射率时，前期产生的二倍频光和后来产生的二倍频光始终

保持相同的相位才能够发生相长干涉，获得最高的转化效率。而对于一般的材料来讲，基频光和二倍频光具有不同的折射率，所以无法实现相位匹配。1962年，

贝尔实验室的Giordmaine和福特研究所的Terhune提出可以利用双折射晶体实现相位匹配。在双折射晶体中，不同偏振的光具有不同的折射率，因此可以选择让基频光和二倍频光处在两个垂直的偏振上，这样当入射角度合适时就可以让二者的折射率相等，使二倍频的转化效率提高三个数量级。例如，笔者课题组利用BBO晶体可以轻松产生平均功率为20 W的飞秒激光，转化效率超过30% (图6)。

如今，二倍频这个典型的非线性光学现象已经进入了我们的日常生活。打开大家平时用的绿色激光笔，可以看到里面复杂的光学结构。半导体激光器产生808 nm的泵浦光，然后经过由掺钕钒酸钇镀膜形成的谐振腔，产生1064 nm的近红外激光。在谐振腔之后放置一个光学晶体磷酸钛氧钾(KTP)，在里面产生二倍频。也就是说，在KTP晶体里既有1064 nm的光，也有532 nm的光。光束准直后再经过光学滤波器把基频光滤掉，只让二倍频光通过，从而输出绿色激光。

5 其他非线性光学过程

1962年初，Franken等人在另一篇PRL文章中发现，对于二阶

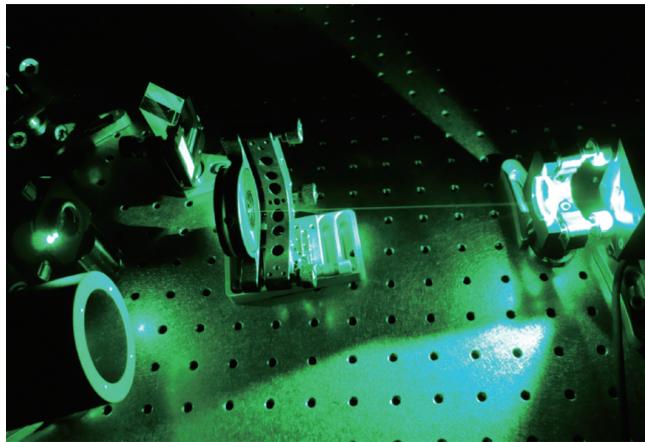


图6 利用BBO晶体通过二倍频产生20 W绿光

非线性过程来说，如果入射到晶体中的是 ω_1 和 ω_2 两种不同频率的光，材料的二阶极化表达式中会含有 $(\omega_1 + \omega_2)$ 和 $(\omega_1 - \omega_2)$ 两项，分别对应和频产生(sum frequency generation, SFG)过程与差频产生(difference frequency generation, DFG)过程^[5]。

在二倍频产生的物理模型中，还有一个常数项，既不是基频也不是二倍频，可以看成是直流项。非线性光学中将通过二阶非线性过程产生直流(准确地说是极低频电磁波)的过程称为光整流。

Franken等人于1962年底在PRL上发表了光整流的实验结果^[6]。如今在太赫兹研究领域，飞秒脉冲入射到合适的光学晶体中，光整流效应会产生一个中心频率比入射光频率低二到三个数量级的电磁波，其中中心频率在太赫兹范围。这是产生皮秒太赫兹脉冲的经典方法。

毫不夸张地讲，正是Peter Franken等人的这三篇PRL实验文章宣示了非线性光学这门学科的诞生。1962年夏天，Franken觉得有必要撰写一篇综述文章全面介绍这一学科，最终于1963年初发表在Reviews of Modern Physics。让

Franken引以为傲的是，他在文中给出了非线性光学的量子力学描述^[7]。

6 尾声

Franken教授的研究兴趣非常广泛，出乎所有人的预料，1963年以后他的研究兴趣转移到寻找夸克的实验中去了，再没有发表任何非线性光学的成果。跟他打赌的诺奖得主Lamb一直对Franken的决定耿耿于怀，认为他既然开创了非线性光学这门学科，理所当然地应该在该

领域中深耕细作，产出更多的学术成果。但Franken本人却不以为然，从不后悔自己的选择，觉得人生在世不过数十年，应该多多经历各种有趣的事情。

非线性光学诞生至今已超过60年，得益于激光技术的不断进步、新型光学晶体的出现以及大量重要应用的迫切需求，非线性光学依旧在源源不断地产生令人惊奇的成果。回顾过往，展望未来，非线性光学活力无限，青春常驻。

参考文献

- [1] <https://physicsworld.com/a/laser-pioneers/>
- [2] Maiman T H. Nature, 1960, 187:493
- [3] Giordmaine J A. Scientific American, 1964, 210(4):38
- [4] Franken P A, Hill A E, Peters C W *et al.* Physical Review Letters, 1961, 7:118
- [5] Bass M, Franken P A, Hill A E *et al.* Physical Review Letters, 1962, 8:18
- [6] Bass M, Franken P A, Ward J F *et al.* Physical Review Letters, 1962, 9:446
- [7] Franken P A, Ward J F. Reviews of Modern Physics, 1963, 35:23



欧普特科技
GOLDEN WAY SCIENTIFIC

做中国专业的 光学元件与光学仪器系统集成商

TO BE A PROFESSIONAL OPTICAL COMPONENTS AND
OPTICAL INSTRUMENTS SYSTEM INTEGRATOR IN CHINA








地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东5层
E/SF M7, NO.1, JIUXIANQIAO EAST ROAD, CHAOYANG DISTRICT, BEIJING

电话：010-8809 6218 / 8809 6099

邮箱：optics@goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd.