

# 全息术是怎样发展起来的?

林 木 欣

(华南师范大学物理系)

## 一、伽柏全息思想的萌生

全息术是伽柏 (D. Gabor, 1900—1979) 早在激光出现之前发明的。它是怎样发展起来的呢? 下面先从伽柏全息思想的由来谈起。

伽柏出生于匈牙利的布达佩斯。他 15 岁开始对物理产生了特别的爱好, 对阿贝显微理论和 Lippman 彩色照相术着了迷。不过, 他在大学里不是攻读物理专业, 而是电力工程。1924 年他在柏林的工科大学毕业, 1927 年取得博士学位。在那期间, 他常到柏林大学听讲, 该校有爱因斯坦、普朗克、能斯脱、劳厄等著名物理学家执教, 从而大大激发了他对物理的兴趣。正如他所说的, “尽管我人在电力工程专业, 但身心几乎全钻到应用物理去了。”然而, 导至他考虑全息术的是 1934 年到英国一家公司的研究室工作以后, 该公司的姐妹公司制造电子显微镜需要提高分辨率, 他对此很感兴趣, 并获得机会进行光学实验的研究。

当时电子显微镜的分辨能力已比最好的光学显微镜提高了一百倍, 但仍不足以分辨晶格。其中球差 ( $\delta_s$ ) 和衍射差 ( $\delta_d$ ) 是限制分辨率的主要因素,  $\delta_s = C_s \alpha_0^3$ ,  $\delta_d = 0.61 \frac{\lambda}{\alpha_0}$ , 式中  $C_s$  是球差系数,  $\alpha_0$  为孔径角。要减少衍射差就要加大孔径角, 把孔径角增加一倍则衍射差减少一半, 但这时球差则增加了八倍。为了兼顾两者, 不得不把电子透镜的孔径角限制为  $5/1000$  rad, 从而通过计算得到分辨率的理论极限约为  $0.4 \text{ nm}$ , 而分辨晶格起码要  $0.2 \text{ nm}$ , 怎么办? 伽柏经过长期思索之后, 正值 1947 年复活节的一个晴天, 他在网球场等待一场球赛时突然想到: “为什么不拍摄一张不清楚的电子照片, 使它包含着全部信息, 再用光学方法去校正它呢?” 他考虑到电子物镜永远不会完善, 若把它省去, 利

用相干电子波记录相位和强度信息, 再利用相干光再现无象差的象, 则电子显微镜的分辨率可提高到  $0.1 \text{ nm}$ , 从而可以观察晶格。这就是伽柏当时研究全息术的基本思想<sup>[1]</sup>。

全息术的概念来自波动光学的发展。远在十七世纪末, 惠更斯发展了光的波动学说, 他的“次波”原理是理解波前和衍射的有力武器。到了十九世纪初, 托马斯·杨做了有名的双缝干涉实验, 用波动学说对干涉现象做了论证。接着菲涅耳用光的干涉思想补充了惠更斯原理, 使得光的衍射理论更为完善。然而, 人们掌握了光的干涉和衍射一百多年后, 全息术才得以发明, 这是什么原因呢? 伽柏曾经说过: “在进行这项研究时, 我站在两个伟大的物理学家的肩膀上, 他们是布喇格和 F. Zernike。这就是说, 伽柏全息思想的萌生受到他们的启发。

在发明全息术的前几年, 伽柏看过布喇格的“X 射线显微镜”, 布喇格采用两次衍射使晶格的象重现<sup>[2]</sup>。尽管 X 射线无法利用透镜成象, 但原子的间距与 X 射线的波长同数量级, 周期性排列的原子对入射 X 射线相互散射, 会产生衍射点阵; 用相干光对这种衍射图样作第二次衍射, 便可恢复晶格的象。这就是伽柏两步成象法的由来。然而他注意到, 布喇格的方法还不足以记录傅里叶变换的全部信息, 虽然振幅可从强度的平方根得到, 但相位已被丢失, 故只适用于入射线与衍射线之间发生的相位改变量已知的一些特殊物体。为了解决相位的记录问题, 伽柏想到了 Zernike 在研究透镜象差时使用过的“相干背景”。他认为: 如果没有什么东西作比较, 丢失相位是不足为奇的; 但加上一个标准, 即用“相干背景”作为参考波, 那么参考波与衍射波(又称物波)相互干涉, 用照相底片记录干涉图样, 便得到包含相位信息在内的干涉图象, 伽柏称之为“全息图”。在全息图上, 两个

波的相位相同处光强极大,相反处光强极小.若制作的是正片,则仅在光强极大处透光.因透光的狭缝处参考光与物波的相位相同,故用参考光照明全息图可重建物波的波前.由于前人未掌握波前重建,故直到1947年全息术的思想才在伽柏的脑子里萌生.

## 二、全息术的发明与早期的困难

伽柏用重建波前的方法考虑他的电子显微镜方案,提出了两步过程的建议<sup>[3]</sup>.按当时的术语第一步为电子分析,即用电子束来照明物,被物衍射的电子束与相干背景(即入射电子束的未衍射部分)之间产生干涉记录在底片上;第二步为光学综合,即用光学系统来再现,并校正电子光学的象差,然后在照相底片上拍摄再现的象.伽柏跟他的助手 J. Williams 一起,首先在光学范畴进行全息实验.

他们用一个汞灯作光源,再用滤光片来得到一定的单色性,借助一个针孔滤光器使之达到所要求的空间相干性.他们的实验是不容易的,高压水银灯提供了相干性和强度之间的最佳折衷,它仅有0.1mm的相干长度,只有200个条纹.但是,为了得到空间相干性,他们必须用一根水银谱线照明直径为3 $\mu$ m的针孔,这光足以制作直径为1cm物体的全息图.他们用直径为1mm的显微照片作实验物体,由于光源很弱,用当时最灵敏的照相乳胶也要几分钟曝光时间,相干长度小迫使他们把每件东西都布置在同一轴线上,根据这个特征,这种实验称为同轴全息实验,在当时来说是唯一可行的方案.图1是伽柏全息术两步成象原理图.图2是伽柏于1948年首次得到的实验结果.伽柏在全息照片上首次再现了三位波动光学大师 Huygens (惠更斯), Young (杨)和 Fresnel (菲涅耳)的名字.再现的图象还不大理想,照片中尚有系统性缺陷,这从字母的畸变可以看出.另外,同轴全息术受到不可避免的孪生象(第二个共轭象)的干扰.伽柏力图用聚焦来分离同轴的孪生象,但完全消除是做不到的.尽管如此,伽柏这次实验首次实现了全息记录和重建波

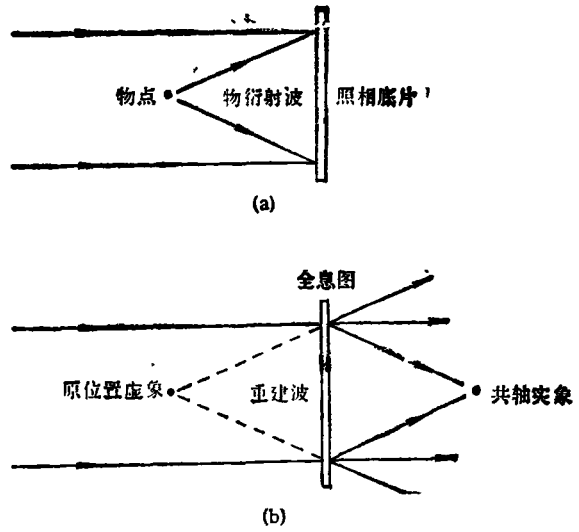


图1 伽柏全息术示意图  
(a)记录; (b)再现

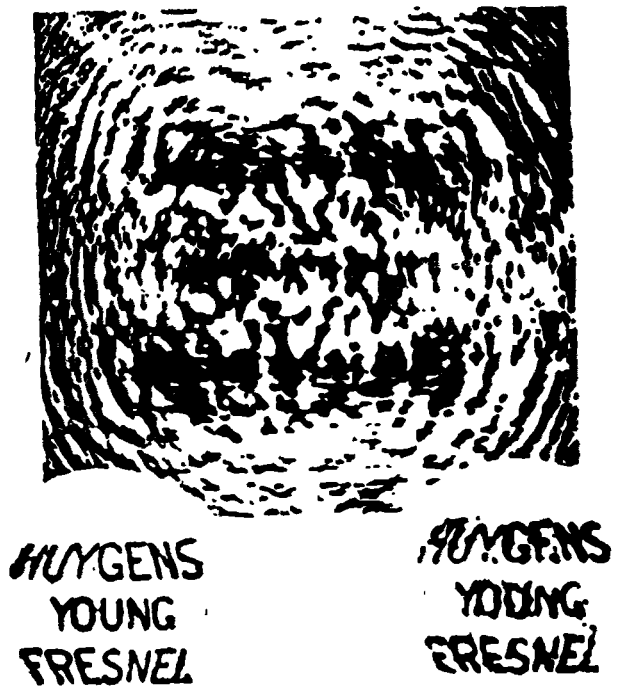


图2 伽柏的首次实验结果(1948)

前,这是史无前例的,它标志着全息术的开端.

自此后,出现了研究全息术的第一次热潮.英国的 Rogers 制作了第一张相位全息图,并阐明了理论;他还发现全息术也适用于无线电波,可用以检测电离层.美国的 Baez 领导了 X 光全息术的实验; P. Kirpatrick 指导研究生

Hussein El-Sum 写的博士论文成了当时研究伽柏全息术的重要文献。

然而，在全息术早期的工作中，人们最关注的还是在电子显微镜中的应用。从1950年开始，伽柏的朋友和同事 Haine, Dyson 和 Muivey 等人从事这方面的研究，伽柏当顾问，可是取得的成果不大。按伽柏后来说：“在三个年头里，我们成功地进行了电子显微镜的大量改进，但后来我们必须停下来，因为我们开始为时尚早。结果表明，电子显微镜离开光学象差所决定的极限还差得很远……”

至于纯光学的全息术研究，由于当时还没有理想的相干光源，因而受到伽柏同轴全息孪生象的困扰，有成效的工作很少。因此，到了1955年左右，全息术已处于“冬眠”状态，许多研究工作似乎已经偃旗息鼓，连伽柏本人也不活跃在这个领域了<sup>[4]</sup>。当然，新生事物的发展经受一些磨难和挫折是不足为奇的，科学研究要求人们坚韧不拔！正是在这个低潮时期，美国密执安大学的 Leith 持不同意见，他认为从汞弧灯的亮度参数和可利用的相干光方面，的确没有值得考虑的工作可做，但可把波前重建的理论用于雷达工作。因此，他和同事 Upatnieks 一起进行了这方面的研究。由于这些工作属于军事秘密，故罕为人知。与此同时，苏联一些科学家也进行着新的探索。

### 三、Leith 和 Danisyuk 等人的重大突破

1963年，Leith 和 Upatnieks 的第一张激光全息图发表，马上引起巨大的轰动，全息术从冬眠中突然复苏了！当然，我们得感谢激光的发明，使得他们在1962年可利用激光这种理想的相干光源进行光学实验。

由于激光的相干长度比水银灯的大几千倍，他们便不受同轴全息术的限制而采用“斜参考波”法，从而创造了离轴全息术<sup>[5]</sup>。由图3可见，他们很容易消除孪生象的干扰。另外，由于激光的强度超过水银灯几百万倍，在适当的曝光时间内便可用颗粒很细的和低速的照相乳胶制作大的全息图，并取得非常好的再现效果。

物理

1963年 Leith 等发表的黑暗背景上透明字的全息照片、景物照片和肖像照片等，图象非常清晰。1964年，他们又用漫射照明制作全息图，成功地得到三维物体的立体再现现象。同时，他们发表了两张景物的全息照片，是由同一张全息图再现的，只是参考光束取不同位置，这是全息图大存储量的第一个证据。现在，人们在单块的铌酸锂晶体已能存贮几千张全息图，整本丛书可记录在一块透明晶体中。

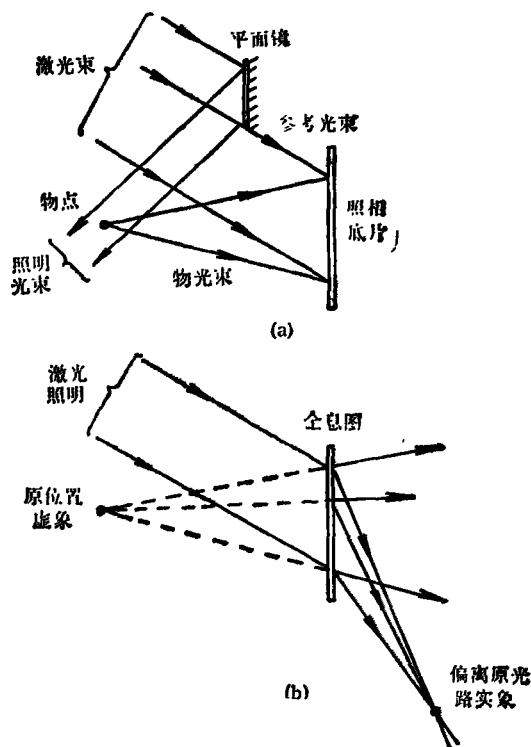


图3 Leith 全息术示意图  
(a) 记录；(b) 再现

Leith 等何以取得这样的成功呢？伽柏曾指出：“他们的成功不仅是由于有了激光，而且归功于 Leith 从1955年就开始的长期的理论准备。”那时他把通信理论和全息概念结合起来，用于侧视雷达的研究，实际上就是电磁波的二维全息术。从而在激光出现以后，便把他所提出的斜参考波法应用于激光全息，取得了全息术的重大突破。为了表彰 Leith 的卓越贡献，美国于1979年授予他国家科学奖章。

另外，我们还应当高度评价苏联物理学家

Danisjuk 的贡献。他也在全息术的低潮时期进行了许多探索,特别是把伽柏全息术与 Lippman 自然彩色照相术结合在一起,于 1962 年提出了一种体积反射再现波前原理<sup>[6]</sup>(即 Denisyuk 原理)。这种原理是使物波与参考波从乳胶的两面入射而产生驻波,形成 Lippman 层,这些层不是平行于乳胶表面,而是平分这两个波前的夹角。如果这种体全息图用白光来照明,则这些层只反射原来的颜色(布喇格条件的限制),从而使物体以原来的颜色出现在原来的位置上。但当时他在缺乏激光器的情况下,只能完成“存在性的证明”,直到 1965 年才由 Stroke 和 Labeyrie 实现。

1970 年, Danisyuk 荣获列宁奖金,他的成就也就为人们广泛承认。这种可用白光反射再现的全息术,为以后白光全息的发展打下了基础,可使最后观察图象摆脱黑房限制和复杂的设备,便于人们参观和鉴赏,这是全息术的又一项重大突破。Leith 对此评价很高,认为 Danisyuk 的工作是“全息术的基础之一”<sup>[7]</sup>。

#### 四、全息术的继续开拓与走向实用

从六十年代中期开始,全息术又进入一个超出人们想象的高速发展时期。伽柏已重新活跃在这块自己开垦的土地上,许多科技工作者和艺术工作者也为这种神奇的照相技术所吸引。下面讨论一下这段时间以来,一些主要工作是怎样发展起来的<sup>[8-10]</sup>。

**1. 脉冲全息术** 由于稳态全息术只要有四分之一波长移动就足以破坏全息图,故使某些应用受到限制,因而在 1965 年以后,发展了脉冲全息术这一分支。例如,用 20—30 ns 的红宝石激光脉冲进行记录,便可测定高速喷气流雾滴的大小,并可制作全息动画片等。

**2. 白光全息术** 用激光记录和白光再现的白光反射全息术,虽然有了广泛的应用,而且仍在不断改善中,但受到反射光谱带宽的影响,在成象的清晰度和景深方面受到限制。1975 年, S. Benton 发明了白光透射全息术,可提供几米景深的记录,并具有大孔径和衍射效率高的优点,

这项发明被认为具有里程碑的意义。

**3. 彩虹全息术** 采用单色相干光的全息术,虽然能记录强度和相位,得到很好的再现立体象,但丢失了色调信息,这总还是一个缺陷。1969 年 Benton 发明了一种用白光再现的彩虹全息术,在一定条件下赋予全息图鲜艳的颜色,但 Benton 的方法要用两步记录过程。1977 年,美籍华人陈选和杨振寰提出了一步彩虹全息,尽管视场受到一定的限制,但具有制作程序简单和信噪比高的优点。至于用两种以上颜色的激光制作的全息图,美国在六十年代已着手研究,一些技术发达的国家也相继起步。1982 年法国展示了彩色的全息动画片,他们是使用氦激光(红色,波长为 647 nm)和氩激光(绿色,波长为 515 nm)记录和放映的。

**4. 其他波源全息术** 由于可见光在大气及水等介质中传播时衰减较大,在不良气候条件下甚至无法工作,因而发展了红外、X 光、微波和超声等全息术,对于军事侦察和监视,医疗透视诊断和无损探伤等,均有重要意义。在电子波源的全息术研究中<sup>[11]</sup>,电子全息象的分辨率已达 0.2 nm。此外,还发展了用数字电子计算机来产生特定的全息图,可再现虚拟的物象,可作光信息处理,光学表面测试和研究记录材料性能等。

全息术在继续发展中,它已展现出光辉灿烂的前景,但在实用化的道路上,还有待人们继续努力。

- [1] D. Gabor, 诺贝尔奖金获得者讲演集——70 年代物理学,知识出版社,(1986),49.
- [2] W. L. Bragg, *Nature*, 149(1942), 470.
- [3] D. Gabor, *Nature*, 161 (1948), 777; D. Gabor, *Proc. Roy. Soc. (London) A*, 197(1949), 454.
- [4] R. Jackson, *Holosphere*, 12-4 (1983), 6.
- [5] E. N. Leith and J. Upatnieks, *J. Opt. Soc. Am.*, 52 (1962), 1123; 53(1963), 1377; 54(1964), 1295.
- [6] Ю. Н. Денисюк, *Докл. Акад. Наук. СССР*, 144(1962), 1275.
- [7] R. Jackson, *Holosphere*, 12-5 (1983), 16.
- [8] 王永昭,光学全息,机械工业出版社,(1981).
- [9] 于美文,光学技术, No. 1(1986), 41; No. 2(1986), 13; No. 3(1986), 39.
- [10] S. A. Benton, *Optical Engineering*, 19(1980), 686.
- [11] 吴自勤、毕林松,物理,16(1987),723.