

应用研究

用激光照明的照相光学装置

提要:在需要高强度短光脉冲的光学装置领域里,激光的特性使其发挥了独特的作用。固态激光可以将脉冲持续时间控制在 $10\sim 20$ 毫微秒内,而其强度又远远超过绝大多数照相光学装置所需的强度。激光的时间相干性避免了光学系统色差所引起的问题,亦使实验者能避免实验本身所发出的光线。

有一大类光学测量与观察,其中起主导作用的是折射率变化所引起的位相移动,而不是吸收或反射所产生的振幅变化。这些包括对近于透明的机体和结构的显微检验,对透镜、平板和光学材料的疵瑕与裂缝检验,特别是对气体的运动及密度分布的测量。

众所周知,光探测器(包括眼睛和照相底片)仅对强度有反应,对入射光线的位相变化是没有感觉的。为此,目视和普通照相是不适合于“位相”物体的。因为这类测量很重要,若干能够探测位相变化的光学技术已经出现。所有这些技术,用这种或那种方法,将位相变化转变为振幅变化,因此可以用肉眼观察或记录在照相底片上。

有三种主要的探测折射率变化,或称为“折射率显示(Schlieren)”的光学技术,它们分别对光学厚度,它的一阶空间导数和二阶空间导数发生反应。它们的灵敏度、分辨本领和对比等各有各的极限,但是每一技术的极限在极大程度上为光源特性所决定,这是有趣的,也是富于启发性之处。

本文的目的是描写这些光学仪器技术的作用,指出每种方法的极限,并表明如何利用激光作光源来改进它们的性能。

激光器

在讨论特殊光学装置之前,有必要回顾激光的特性。这里主要关心的是激光器的特性,而不是它们的运转详情。对于光学装置,其最重要的特性如下:

1. 单色性——激光的单色性比最普通的,甚至带有滤光片的光源还要好。能够制造发射窄于1埃的谱线的气体与固体激光器。

2. 空间相干性——激光辐射多少有点空间相干性,那就是说,由输出孔的各部分发出的辐射,相互之间有确定的位相关系。位相不变的结果,使激光光束可以比普通非相干光源准直成更为平行的光束,或聚焦成更小的点。

3. 功率——激光器采用了以前没有用过的原子发光机构。白炽光源依靠热来激励原子,于是原子自发地发射光。这种光源的强度随其温度而增加,因而每一光源的强度均为发射单元所能获得的温度所限。由于激光器中的原子是在较通常高得多的速率下完成受激发射的,故就光谱强度而言,它相当于具有不能获得的温度的辐射物体。很容易

产生兆瓦以上的峰值功率。

4. 持续时间——快速控制激光腔中光路上的透过率,例如利用克尔盒、染料盒或转动棱镜,可以将激光发射时间压缩到几分之一毫秒(称Q突变)。现在的技术可以产生持续时间为10~20毫微秒的脉冲。

记住这类光源,我们就能讨论三类主要的相敏光学系统。为简单起见,用透镜来说明这些技术,几乎所有的实际系统都是用反射镜代替透镜,但它们的工作原理却是相同的。

阴影图

能看到折射率变化的最简单方法是阴影图或直接阴影法,如图1所示。用一透镜或抛物面反射镜准直由一小光源发出的光。使光线通过待检验区后射到屏上或照相底片上。在屏上看到的效应与太阳光越过受热物体时在墙上造成的可见“热波”一样。

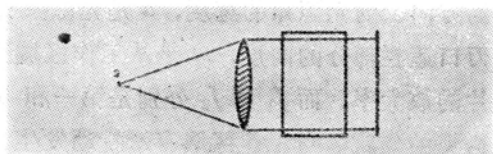


图1 阴影图系统

折射率梯度并不产生这种效应。例如,均匀的梯度仅使整个光束偏转,因而仍产生均匀的照明。只有引起光线“堆积”的梯度变化,才能在屏上见到。

在阴影图技术中(参考1),象的清晰度依赖于光源尺寸。由图2所示的几何结构可

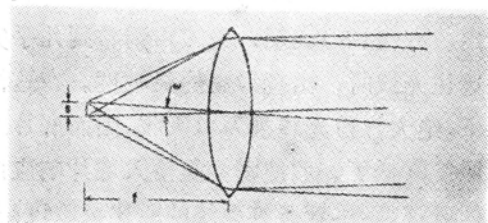


图2 光源尺寸引起的发射情况

知,在阴影图中由清晰边缘所产生的半影区的宽度 W 是由

$$W = sl/f \quad (1)$$

所给定的,其中 s 是光源直径, l 是物体到屏的距离,而 f 是准直透镜或反射镜的焦距。为获得高的影象清晰度,需要一个非常小的光源。不过为了在短时间内,使拍摄整个工作截面的足够大的底片能曝光,高强度是需要的。过去使用的最亮的光源局限于氩、氩或氦中的火花。但是在这些气体中复合过程的余辉使光延续的时间,超过了许多情形中所容许的值。只有牺牲闪光的强度,才能使其缩短。

在火花放电发光时间方面的另一重要因素是回路的振铃频率。为了获得高强度,就要在短时间内放出大量能量,但是由增大容量或提高电压来增加能量的贮藏,将会降低振铃频率,延长闪光时间。

有人企图使光通过克尔盒,切除闪光上升及衰减部分,以此来缩短火花发光的时间。不幸的是,强度的损失超过时间的缩短。

这样,在设计时间分辨的阴影图工作的光源时,就在尺寸、时间与强度三者之间采取了折衷。由于激光器依据了与其他光源不同的原理,因此不受到同样的约束。光线的空间相干性可以将发射的光束聚焦成直径为几个波长的斑点(这依赖于其相干程度)。因为实际上激光器本身是大的,同时由于它的相干性,几乎是一个点光源,因此并不靠牺牲强度来获得很小的有效尺寸。当考虑到底片曝光所需的少量能量时,小光源的光强就不成问题了。

激光器也不需要象其他所有非相干光源一样,在光强与闪光时间之间折衷。当激光脉冲时间缩短时,强度就会增加,而不是象火花光源和闪光灯那样下降。因此激光器对

于阴影照相来讲,几乎是一个理想的光源,它兼备了有效尺寸小、时间短和强度高诸优点。

在采用 Q 突变方法时,固态激光还具有准确同步的优点,而这正是火花光源的一个缺点。令克尔盒这种 Q 开关迅速动作,可以使激光具有高的重复率。利用这方法能获得较火花或闪光管更高的重复率。此优点的根本原因在于,与粒子数的增加和减少相联系的时间常数要比在气体中与离化和复合有关的时间常数短得多。

条纹照相法

探测及拍摄透明介质中折射率或密度变化的最灵敏方法之一,是 Toepler 的条纹方法(参考 2、3),光学系统如图 3 所示。利用一

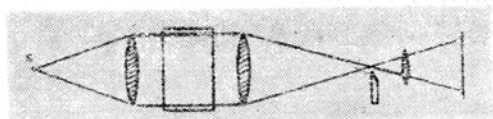


图 3 条纹系统

透镜将小光源发出的光线收集并准直。准直的光线通过折射率发生变化的区域(称工作区域)后,被另一透镜会聚于焦点上。在焦点处放一刀口,使光源象的一部分被遮拦。通过刀口的光线再经另一透镜,这个透镜将工作区域成象在屏上或照相底片上。假定工作区域由于密度或温度不均匀而存在折射率梯度。通过这梯度区的光线稍有偏转,当这些光线到达刀口平面时与平面相交,其交点与没有偏转的光线不同。偏向刀口的光线与没有偏转的光线相比,吸收较强,而偏离刀口的光线则吸收较弱或完全不吸收。在象平面上得到的结果是,工作区域的象的照度随着通过工作区域各点的光线所受到的偏转程度而变化。由此就获得工作区域的照片,它

的照度分布是在拍摄的那一瞬间,垂直于刀口的折射率梯度的记录。当然,这种基本安排有许多变形及改进。条纹照相原理与暗视场显微方法及检验反射镜和透镜组的傅科刀口法是完全一样的。

图 4 表明在条纹系统中刀口与光源象之间的关系。刀口在一定位置时,底片上的辐照由

$$H = Nba/m^2 f_1 f_2 \quad (2)$$

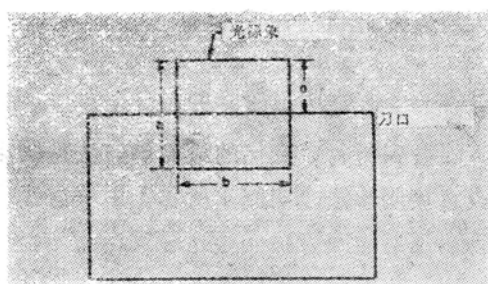


图 4 条纹系统中刀口与光源象的几何关系

给定,其中 N 是光源的辐射, b 是在平行于刀口的方向上的光源象的宽度, a 是光源象未被刀口遮拦部分的高度, m 是从工作区域到底片的放大率,而 f_1 和 f_2 分别是第一和第二透镜的焦距。当工作区域有一扰动发生,有些光线将要偏转一小角 ϵ , 在底片相应部份的辐照将发生变化,其值为

$$\Delta H = Nb\epsilon/m^2 f_1 \quad (3)$$

象的这部分与背景的对比是式(3)与式(2)之比,或

$$C = \Delta H/H = f_2 \epsilon/a \quad (4)$$

对比灵敏度(定义为对比随偏角的变化率)由

$$S_c = f_2/a \quad (5)$$

给定。方程(5)表明,当刀口调整到几乎完全遮住光线时,出现最高的灵敏度。在这情况下,绝大部分光线被刀口吸收,因而底片上的照度降低了。假使曝光量落入底片响应曲线的趾部,则尽管条纹系统的对比灵敏度高,底片的对比密度将很低。因此必须经常在适

当的底片曝光与高的灵敏度之间采取折衷。

当需要具有十分之一微秒或更短的分辨时间的条纹测量时，这问题甚至更为严重。如前所述，由于获得具有短持续时间的强光源有困难，通常只有牺牲闪光的强度方能获得短的时间。不幸的是，这与我们所需要的刚好相反。为了在底片上获得相同的能量，应使短的曝光时间与高的强度相称。而且，由于倒易律的失效，底片的短时间曝光就需要更多的能量。

在平行于刀口方向上扩展光源，就能得到较多的光线，而这样的光源是通常采用的。然而，制造较宽的光源并没有帮助。其理由如下：假使较宽的光源在刀口平面上聚焦成相同尺寸的象，则准直透镜收集到的光量大致相同。假使采用较宽的象，则刀口一定要向上调整，以达到相同的灵敏度，因而附加的光线将要损失。只有增加光源的辐射，才能在底片上得到较高的强度，而不致降低对比灵敏度。象先前指出的那样，激光器正好具有这种特性。

激光器引起的重大改变不仅仅在于代替了普通的光源。整个光学系统的设计免除了为保存光线而必须加于其上的约束。假使不是因为这样考虑，对于大多数的应用， f 数大的系统是有利的。长焦距系统的灵敏度高，象散小，而且反射镜易于制作。

已经用几何光学观点来讨论条纹法。为了对它的限制有较完整的了解，必须要考虑衍射作用(参考4)。

马赫-陈德尔干涉仪

能够看到气流的另一方法是马赫-陈德尔干涉仪。它适合于定量测量气体的密度分布(参考5)。光学安排如图5。从小光源 S 发出的光线准直成平行光束，然后被光束分

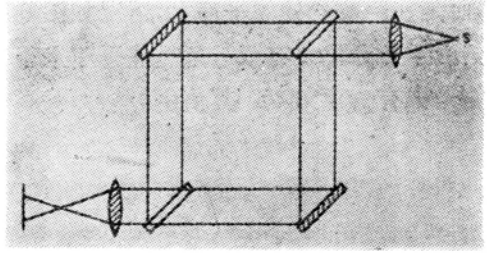


图5 马赫-陈德尔干涉仪

裂器分成两束近似相等的光。两光束分别走过光程相等的两路程后，被另一光束分裂器重新组合，然后进入右边的照相透镜。令一光束通过检验区(包括位相物体)，而另一光束则在检验区之外通过。当二光束重新组合时，没有受到扰动的光束起位相参考的作用，因此它们的干涉能直接测量检验区内的位相移动。

假使调整光束分裂器，使两光束会合时不再严格共线，而夹一很小的角度 α ，则它们的干涉就产生具有间隔 b (等于 λ/α)的平行带或条纹。当检验区域内发生改变气体密度的扰动时，通过检验区的光在扰动区内的传播速度将发生变化。当两光束组合时，相长和相消干涉区发生在不同位置。这效应是条纹图案的局部移动。沿着每一根条纹追到场的未扰动部分，便可加以识别。数出条纹的数目便可决定移动量。不必对底片作显象密度分析，只要根据每一条纹的移动量，便可能找出光线所通过的区域的平均密度的改变量。

双光束干涉产生的条纹只有三种情况，即它们可以是离开一边，太高或太低，或在光学系统中，而不是在检验区内。而且，假使光源的尺寸有限，那末在距照相机焦平面的所有距离上，并不是能同样地看清楚条纹。这种“焦深”问题是如下发生的：考虑在一光束中放一薄尖劈，它所产生的两束光之间的夹角为 α ，假定照相机不是聚焦在尖劈平面

上,而是在距离 d 处的平面上,情况如图 6 所示。由于光源尺寸有限,通过焦平面上每一点的光锥有一顶角 ω ,其值由

$$\omega = s/f_1 \quad (6)$$

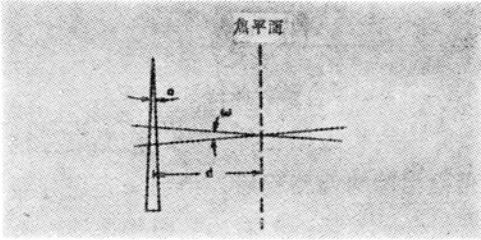


图 6 焦深几何关系

给定,其中 s 是光源宽度, f_1 是准直透镜的焦距。尖劈代表光学厚度的梯度,因而从尖劈射出来的光线,具有不同的位相,这位相依赖于所通过的点的厚度。特别是由方程(6)描写的光锥的二边缘的光线具有一位相差,其值对应于光程差 ωda 。当与参考光束组合起来时,这些极端光线就产生有不同位相的条纹。即一条可以产生暗条纹,而另一条则产生亮条纹。这使得干涉图案的对比下降。假使程差大于半个波长,则对比很差,故可定出一个界限:

$$\omega da = \lambda/2 \quad (7)$$

将方程(6)代入光程(7),得到马赫-陈德尔干涉仪的焦深

$$d = bf_1/2s \quad (8)$$

由含有光源尺寸的代表式可明显的看出,激光光源的小的有效尺寸(由于它的空间相干性)可使场的深度有显著的改进。

为了在用白光的干涉仪中获得条纹,两光路的光程长必须相等。假使采用单色光,光程不等时亦能得到条纹。当光谱带宽变窄时,可允许的程差相应增加。能得到条纹的程差由光源的“相干长度”限制,其值近似为

$$\Delta l \sim c/\Delta\nu \quad (9)$$

其中 $\Delta\nu$ 为光源的光谱半宽度。只有当程差

比这长度小时,才能得到高对比条纹。

与容许程差密切联系的,是光源能产生的条纹数。由经验发现,光谱宽度为 $\Delta\nu$ 的光源所产生的条纹数近似等于

$$N \approx \nu/2\Delta\nu = \lambda/2\Delta\lambda \quad (10)$$

因此有效的条纹数大约是相干长度中波长数的一半。

特殊观察所需的条纹数目依赖于做实验时工作区的密度范围(参考6)。密度改变 $\Delta\rho$ 所引起的折射率变化为:

$$\Delta n = K\Delta\rho \quad (11)$$

其中 K 是气体的格拉德斯通-戴尔常数。条纹数等于在检验区的宽度 L 中,在二种折射率时波长数的差,这样

$$N_f = K\Delta\rho L/\lambda_0 \quad (12)$$

对于高速风洞,这范围可以非常大,而且因为条纹的移动正比于密度的范围及风洞的宽度,这些因素给光线的光谱宽度定下了严格的条件。通常的折衷方案是严格地过滤光源,并增加曝光来弥补光的损失,这样就损失了时间分辨本领。

记录给定事件所需的条纹数目由方程(12)表明。它反比于光的波长,而对于确定的光谱宽度,所提供的数目正比于波长。这样在光谱的长波端工作是有利的,但是在激光器问世以前,由于只有比较弱的红光源,加上照相乳剂对红光的灵敏度很低,故这种优点实际上被抹煞。现在激光器为高速红外底片的使用提供了足够的强度,使可见光谱的红色端能为高密度范围的干涉量度学所利用。

结 论

已经讨论了拍摄折射率变化的典型技术,激光器具有的特性使其能作为每一种技术中有价值的光源。尚有其它的特性,为这

些技术及其他照相光学应用提供了方便。激光的单色性使它可能利用窄带滤光片来排除由发光过程——例如火箭排气或强的冲击波——发出的光线。如象白昼光这样的背景光亦可以滤掉。这使得在重现所要求的过程特性时有更高的对比。窄的光谱亦提示了一类新透镜组，它可以牺牲消色差来改进其他象差的校正。为了减少透镜在单一波长情况下的损失，亦可有效地涂增透膜，这样就可能设计更复杂的透镜。光谱纯度在显微照相方面，特别在记录活样品(过份的热量会破坏

它们)的特性方面是有利的。

当激光器得到充分利用时，对条纹照相将有特别大的影响，使它避免了使用通常光源时所必需的那些技术，并给予它许多干涉量度方面的性质(参考7)。可望在干涉仪中对散射光及乱反射光进行特殊处理，由此来改进对比。

参 考 文 献 (略)

译自 Clark G. L.; *SPIE J.*, 1965(Aug.-Sept.) 3, №6, 214-218

复制全光照片的新技术

美帝密西根大学科技学院的布鲁姆(D. B. Brumm)已发明一种从一张全光照片复制许多份类似照片的技术。此法是以一张全光照片重现的实象或虚象(或两者并用)作第二张全光照片的拍摄对象，以未经衍射的波前作参考光束。

这种方法的优点是在复制全光照片时，被复制的照片与复制的照片两者的乳胶不必靠近。以前复制全光照片时，两者必须挨紧。正如记录原有的全光照片一样，复制时也使用激光束。

译自 *Science News*, 1966 (Dec.24), 90, №26, 534

可用烛光重现全光照片

科学工作者现在不仅可以生产可用普通白光(甚至烛光或火柴光)重现和观察的全光照片，还能够简便和价廉地复制全光图。全光图是记录在照象胶片或干板上的三维图象，将光射过胶片，即可看见。

虽然生产全光照片的母片需要激光器，但使用美帝鲍谢与隆公司研制出的技术，复制首批1,000张，每张成本不过二角多美金。

译自 *Science News*, 1966 (Dec. 31), 90, №27, 562

以全光照相记录封闭的爆炸

据美帝汤普森·雷莫·伍耳德里奇(T. R. W)公司报导，已在空气-乙炔混合物的爆炸瞬间对之进行快速照象。此种混合物装在一透明塑料圆筒中，以小火花塞引爆。

据称，以干涉法记录容器中的爆炸，此举尚属首次。其成功归因于使用了一个闪光持续时间为100毫微秒、照度为3,000万瓦的脉冲红宝石激光照明器。

译自 *Microwaves*, 1967 (June), 6, №6, 6