

X 光 激 光 器

任 国 光

激光研究中的一个重要目标是发展 X 光激光器。在过去十年里,激光物理学家一直在寻求产生超紫外线 (EUV) 和软 X 光 (SXR) 波长的相干辐射。目前已获得了几种强 X 光辐射源,包括同步回旋加速器辐射源和单脉冲激光产生的等离子体。然而这两种源都只能产生部分相干的辐射,与此相比,X 光激光器能产生亮度高十个量级的相干辐射。

毋庸置疑,极短波长的激光作为一个新领域引起了人们的极大关注。它具有波长短、脉宽窄、亮度高、单色性和相干性好的特点,这将对生物学、物理学、化学和材料科学产生重大影响。美国“星球大战”计划的倡导者也对 X 光激光武器寄以重望,已进行了五次核爆炸抽运 X 光激光的试验。1981 年第一次试验测到了波长为 1.4nm 的强 X 光激光,其功率为几百 TW。1985 年第五次试验,将亮度提高了六个量级,取得了重大进展。在实验室研究方面,美国、苏联、英国、法国也很活跃,他们完成了大量的理论和实验研究工作。已经证明,要产生 X 光激光是相当困难的。首先,就增益固定的情况而言,受激态发射的荧光与跃迁频率 ν 的 $9/2$ 次方成正比^[1]。因此,产生 X 光激光需要极强的 X 光源,最有希望的似乎就是激光产生的等离子体。其次,由于在 X 光波长还没有合适的谐振腔可利用,所以等离子体介质必须要有足够大的增益-长度积,以便产生可测的谱线强度。只是到了 1984 年 10 月,利弗莫尔研究所 (LLNL) 才宣布用电子碰撞激发方案首次令人信服地证明了在 20.6nm 波长处产生了强的激光放大^[2],这是十多年来在短波长方面取得的最有意义的进展,因而成为 1984 年十大科技新闻之一。本文将评介产生 X 光激光的主要方案和实验,介绍

LLNL 取得成功的实验,以及未来的发展和应用前景。

一、产生 X 光激光的主要方案和实验

所有激光器都是利用辐射的受激发射产生光放大。X 光激光与一般可见光激光之间的唯一区别,是激光跃迁处在 X 光频率。但是由于 X 光激光有很高的能密度,所以要使之实现就必须采取不同的技术途径。这种跃迁产生于高度带电的离子和电子的高温等离子体中,其道理可用 Bohr 的类-氢离子基本模型加以解释。在高温等离子体中,将 Z 较高的原子或离子的电子剥离,仅剩一个带正电的核和单个电子,而成为类-氢离子。例如,将碳原子的五个电子剥离,使它与氢原子有相同的电子数,就形成类-氢碳 (C VI) 离子。在此系统中,跃迁能量与 Z^2 成正比,所以只要对 Z 较高的原子进行这种等电子剥离,就能将发射频率移向 X 光区。

1. 光致激发激光

1975 年,苏联首先把利用共振线辐射的光学抽运产生粒子数反转的技术应用到 EUV 和 SXR 波段。此方案是利用激光产生的等离子体中一种离子的强谱线辐射,去共振激发相邻等离子体中的另一类离子,例如 Na^{9+} 的 $1s^2-1s2p$ 共振线被 Ne^{8+} 的 $1s^2-1s4p$ 跃迁所吸收。那么 $n=4$ 能级的粒子数就会增加,从而产生粒子数反转。这就形成了 $n=4 \rightarrow n=2$ 的跃迁,产生 5.8nm 的激光。预料此方案的增益高达 100cm^{-1} ,激光波长也较短,但机制却最复杂。某些复杂的物理问题和技术问题使这种方案难于论证。这就是首先必须要测定精确的共振,激光物质与抽运谱线之间的共振要求重叠

$\pm 0.00015\text{nm}$ 。其次还必须产生足够亮度的抽运辐射，线亮度应大于 0.01 光子/模。第三是用于这个方案的靶子结构十分复杂。

LLNL 进行了三组实验，想直接测量共振抽运激光的放大倍数，都未得到确实的数据。他们选择闪光灯材料，使其发射 1.1nm 的 X 光，将类-氢氟共振光致激发到 $1s4p$ 能级，然后依靠在等离子体中的碰撞，使 $1s4f$ 能级的粒子数增加，这就导致向 $1s3d$ 的粒子数反转，从而引起 23.1nm 的激光跃迁^[3]，后来又把这种技术用于类-氢氟。最近发现类-铍铯与类-氢氟之间在 1.2643nm 附近具有高度精确的共振，而且预料抽运线非常亮，看来前景光明。

2. 复合激光

在迅速复合的等离子体中也很容易产生粒子数反转，虽然在任何常规的激光中并不存在这样的机理，这个想法也是苏联人在 1964 年首次提出来的。这种方法是首先产生和加热等离子体，使原子电离到合适的电离态，然后急剧冷却等离子体以产生强的非平衡（复合）态，离子和电子通过三体复合，级联跃迁到基态。如果某一激发态的衰减比较高的态更快，则在等离子体中就形成了粒子数反转。利用等离子体的流体动力学膨胀、热传导和磁约束等离子体的辐射冷却就能迅速降低温度。

普林斯顿小组把一束 $10\text{--}20\text{GW}$ 的 CO_2 激光聚焦在 $200\text{--}400\mu\text{m}$ 焦点上，产生的功率密度为 $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 。入射激光使低 Z 靶（如碳靶）蒸发，在此过程中将碳原子的电子完全剥离。当把电子限制在一磁场（ 90kG ）中时，由于复合电子又居于较高的能级，所生成的等离子体就因辐射而冷却。预料生成的类-氢离子在主量子数 $n=3$ 和 $n=2$ 的能级间形成粒子数反转，产生了波长为 18.2nm 的辐射，测得的增益-长度积为 $6.5^{[4]}$ 。英国赫尔大学采用类似的设备，但用很细的碳纤维作靶子进行实验，宣称在 18.2nm 谱线测得的增益-长度积为 $5^{[5]}$ 。

在复合方案中，为产生相同波长激光所需的电子温度和密度较低，因而这种方案更适合

较小的设备。复合激光的增益与碰撞激发方案不相上下，但由于复合方案能产生更短的波长而更吸引人。因为等离子体的密度低得多（是 10^{19}cm^{-3} ，而不是 10^{21}cm^{-3} ），因此所受到的折射就小，有较长的等离子体和较大的增益-长度积。复合激光看来很有希望，预计将有进一步的发展。

3. 电子碰撞激发激光

利用电子碰撞激发产生短波长激光也是苏联人首先在 1972 年提出来的。此方案将光学的 $3p\text{--}3s$ 氟 II 激光延伸到了 EUV 和 SXR 范围。为了产生等离子体，用驱动激光照射薄箔靶，等离子体中的自由电子与离子碰撞，将 $2p$ 基态电子激发到 $3p$ 态。由于从 $3p$ 的偶极辐射衰减到 $2p$ 是被禁止的，因而当热运动能量大于 $3p\text{--}3s$ 能级差时， $3s$ 态电子将迅速辐射衰减到 $2p$ 态，从而造成 $3s$ 和 $3p$ 之间的粒子数反转，引起受激辐射（图 1）。LLNL 用此方案成功地获得了短波长激光，经专家小组鉴定数据而被确认^[6]。碰撞激发方案比较简单，但需要产生非常均匀的高温、高密度的等离子体，而且受驱动激光功率的限制，难于产生波长短于 10nm 的 X 光激光。

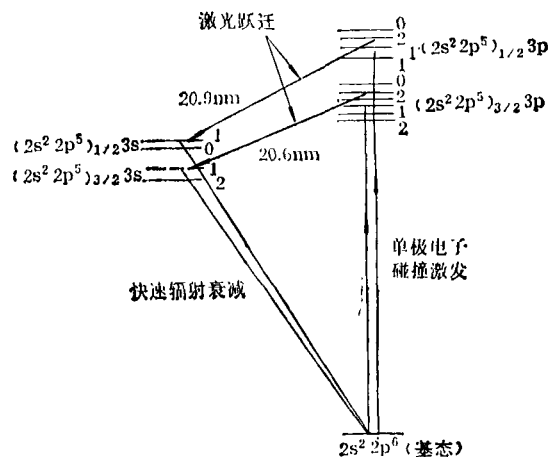


图 1 类-氢硒 (Se XXV) 的简化能级图

其它还有光致电离激光^[7]、自由电子激光^[8]和电荷转移激光^[9]等，这里就不一一介绍了。

二、电子碰撞激发实验获得成功

上面已介绍了电子碰撞激发原理。LLNL 用来产生 X 光激光的技术,是在等离子体中利用自由电子碰撞激发类-氪离子。长期以来人们就认识到,类-氪离子与电子碰撞从 2p 态激发到 3p 态的速率较高。计算也表明,在适当的条件下,类-氪离子的跃迁能在 EUV 和 SXR 波长获得大的激光增益^[10]。从理论上考虑,最有希望实现激光驱动电子碰撞激发方案的元素在氪的附近,因而许多研究小组对类-氪氙 (Kr XXVII) 作了大量的工作。他们计算了这种离子的粒子数反转,确定了最佳的等离子体条件,并计算了类-氪氙 27 种组态的能级和原子参数,给出了在不同电子密度和温度时可能的激光跃迁的增益系数^[11]。LLNL 为了避免用气体靶而使工作复杂化,就选择了在周期表中靠近氪的固体元素硒和钷。这种选择是根据理论的建议进行的,在 Novette 驱动激光器给定的功率和波长条件下,低 Z 元素趋向于过电离,而高 Z 元素则碰撞激发率不够。

1. 理论计算、靶子和主要诊断仪器

LLNL 使用 LASNEX 和 XRASER 两种计算机代码设计这个实验^[12]。设计的主要目标是在长而狭窄的通道中产生最佳的等离子体条件,即具有平坦的电子密度分布(约 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)和温度分布($\sim 1 \text{ keV}$),定标长度最短为 $100 \mu\text{m}$,并且这样的等离子体状态至少要保持 100ps。电子密度的均匀分布是至关重要的,密度分布陡将使 X 光折射出最高增益区。LASNEX 代码就是用来产生这种最佳条件的。XRASFR 代码利用了原子物理数据与从 LASNEX 引入的流体动力学参数,来计算电子能级粒子数、共振线转移和增益^[13]。详细的计算表明,增益可达 10 cm^{-1} 。

LLNL 采用的靶子是由薄的硒或钷箔沉积在 Formvar ($\text{C}_{11}\text{H}_{16}\text{O}_2$)基片的一面而形成的^[14]。硒或钷箔的厚度一般为 75nm,这样薄的硒或钷层是为了避免 3s 到 2p 共振辐射的再吸收。

Formvar 厚 $150 \mu\text{m}$ 、高 1.1cm、长 2.5cm。最重要的选择莫过于采用这种薄的聚合物膜来支撑硒或钷层。当用强度为 $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 的 450ps 脉冲照射时,整个靶子厚度被均匀加热,产生大约为 $5 \times 10^6 \text{ K}$ 的离子温度和最大放大倍数的非常均匀的电子密度($\sim 10^{21} \text{ 电子/cm}^3$)。

为了取得实验的成功,诊断仪器是很重要的。因为通常的 X 光谱仪的灵敏度不够,无法在相邻跃迁产生的强本底中,甄别 X 光激光实验所发射的辐射,所以必须设计高灵敏度的时间分辨光谱仪。LLNL 研制了微通道板掠射光谱仪 (MCPIGS) 和透射光栅条纹光谱仪 (TGSS)。前者有高的光谱分辨($\lambda/\Delta\lambda \approx 1800$)和高的谱线辐射探测阈值($6 \times 10^7 \text{ J/sr}$); 后者的光谱分辨 $\lambda/\Delta\lambda \approx 200-300$,探测阈值为 39 mW/nm ,时间分辨为 20—30ps^[15]。它们从两个轴向测量短波长发射。为了证明放大的辐射具有各向异性,用第二台 MCPIGS 从偏轴 77° 记录整个靶子的光谱。最后用一台晶体谱仪与 X 光条纹相机组成一测量系统,从偏轴 33° 的方向观测靶子,以便提供类-钠、类-氟和类-氪中 $n=3$ 到 $n=2$ 跃迁的时间分辨光谱。实验的主要诊断仪器布局如图 2 所示。

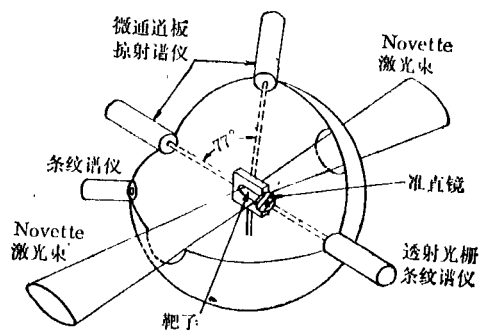


图 2 SXR 激光实验主要诊断仪器布局图

2. 实验及其结果

LLNL 用 Novette 装置的两束激光照射爆炸箔靶完成了一百多次实验。从 Novette 得到的 $0.53 \mu\text{m}$ 激光(用 KDP 晶体倍频),其强度为 $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,脉宽为 450ps,经一个圆柱透镜线聚焦在长 1.2cm、宽 0.02cm 的硒靶区域

内。整个靶子被迅速加热和烧蚀而爆炸，产生一非常均匀的圆柱形类-氙等离子体，其长为1cm，直径为150 μm 。X光激光束沿箔的长轴直线前进，并一直保持在高增益区中，最后射进诊断仪器的窄接收角内。

实验结果首次证实了短波长的放大。对于硒靶在20.6和20.9nm波长时，探测到了放大的辐射谱线。图3(a)和图3(b)给出了在同一时间间隔内，用轴上和轴外两台MCPIGS监测到的光谱数据。类-氙(Se XXV)中3p-3s跃迁的高增益在图3(a)中显而易见，它给出了在最大增益情况下，沿等离子体轴的X光谱。在上百次实验中，20.6nm和20.9nm处的谱线都高耸于光谱之中，它与预期的自发发射光谱强度相比，被放大了700倍。图3(b)表明从偏轴77°的另一台MCPIGS未观测到20.6nm和20.9nm的谱线。但在轴上和轴外都观测到了类-钠离子的共振跃迁谱线(预计无放大)，这证明20.6nm和20.9nm的谱线是各向异性的。对于钼靶，在15.5nm和15.7nm处探测到了放大的辐射谱线。最近，用Nova装置的两束激光照射钼靶，探测到了10.6nm的放大辐射谱线。这是迄今在实验室中产生的最短波长激光。

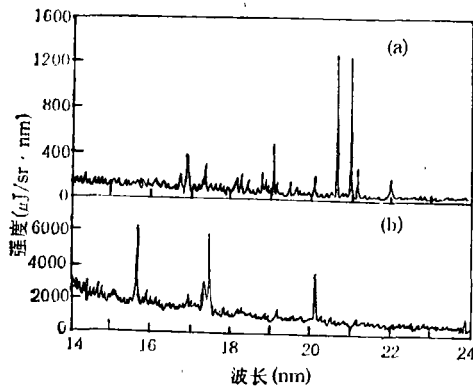


图3 硒等离子体发射的X光谱
(a)轴上记录；(b)轴外记录

由得到的时间分辨光谱，证明获得了最大的放大。如果假设在20.6nm处Doppler展宽的线宽为0.004nm，并给定被测源面积的直径为200 μm ，就能得出等效辐射温度在30—50

keV之间，这与X光的增益一致。与此相比，在20.1nm处的类-钠非激光谱线的亮度仅为0.1keV。

通过改变硒靶的长度，研究了谱线的强度与靶子长度的关系。轴向MCPIGS的数据表明，增益以指数形式随靶子长度的增加而增加^[36]，如图4所示。这是产生放大作用的真凭实据，因为它是受激辐射的特征。就20.6nm和20.9nm的谱线而言，数据相应的增益系数为 $5.5 \pm 0.5 \text{cm}^{-1}$ ，增益-长度积为6—7。信号的急剧上升说明放大器仍未饱和，而从这个激光系统得到的最大输出光谱亮度已达 $2 \times 10^{11} \text{W/cm}^2 \cdot \text{\AA} \cdot \text{sr}$ ，这个亮度是迄今最大功率的X光发生器和同步加速器辐射源亮度的 10^{10} 倍。

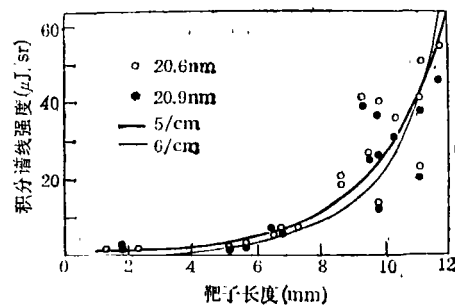


图4 3p-3s跃迁的积分谱线强度与硒箔长度的关系

三、近期的发展

1. X光反射镜和空腔的改进

许多早期提出的X光激光空腔是基于在X光波长，Bragg反射有较高的效率这一事实。遗憾的是在EUV和SXR波段内，自然晶体的Bragg反射并不特别有效，因此目前提出采用人造的分层反射镜。如果将高密度和高X光散射率的膜与低密度和低散射率的膜交叠在一起，那么此结构对垂直入射的EUV和SXR就能起到一个有效的Bragg反射器的作用。这种层状结构反射镜由交替的材料薄层对组成，在不同的微结构里，一般的层厚在几nm到几百nm范围内，已采用溅射和蒸发技术来沉积薄层。在单个反射层中层数可达几百，这取决

于反射镜的设计。

目前的X光激光器是单程的装置,为了提高效率,大大增加相干输出,包括 LLNL 在内的一些研究小组都准备采用 T. Barbee 研制的层状结构X光反射镜。这种镜子采用了20对交叠的钼层和硅层,每一钼层厚 40.6 \AA ,硅层厚 60.3 \AA 。波长为 17 nm 时垂直入射的反射率高达 78% ^[17],这是一项重大的技术成就。Barbee正在研制波长短到 3 nm 的X光反射镜,但反射率不到 10% 。对于更短的波长,恐怕只能用晶体反射了。

2. 激光器的输出达到饱和

为了提高激光器的增益,在原则上除了使激光在激光介质中来回反射外,还可以采用尽可能长的激光介质,因为增益随激光介质的长度成指数地增长。在采用硒和钷箔的实验中,Novette的功率不足以产生足够长的等离子体以达到饱和。虽然在 300 ps 的脉冲里,输出功率大于 100 W ,谱线已经很亮,但这也只是饱和输出功率的 $1/3000$ 。然而用Nova激光束和新的变焦距圆柱透镜,就能使产生的等离子体长度达到Novette的五倍,增益-长度积将达到 $25-30$,足以使输出达到饱和。这说明转换效率有了明显的提高,从目前的 10^{-10} 提高到 10^{-6} 。

3. 向更短波长迈进

因为Nova激光束的功率有限,对于原子序数高于钪(激光辐射谱 10.5 nm)或银(激光辐射谱 9.9 nm)的元素,目前的类-氦碰撞激发方案将不能产生有意义的放大。为了获得对生物学应用有用的短于 4.4 nm 的波长,就需要探索其它的激发方案。目前正在研究的方案是,采用三体复合作为抽运机理,包括类-氢铝中 $n=3$ 到 $n=2$ 跃迁的方案,可能在 3.4 nm 波长产生放大。同时也在考虑为产生粒子数反转的几种新技术,例如目前比较感兴趣的是光致电离产生稀有气体的离子,这是一种非常有效的产生X光激光的方案。

四、X光激光器的应用前景

如果象人们预料的那样,在今后几年里能研制成功实验室的EUV/SXR激光器,那么它们将提供 $2.5-25 \text{ nm}$ 波段的MW到GW量级的单脉冲。这可以补充其它的X光源,用于对时间分辨、强度、光谱纯度和相干性要求很高的那些领域中。

X光激光可用于生物结构的显微术中,特别是如果工作波长短于 4.4 nm ,它可以得到高分辨(50 nm)的生命细胞图象。由于X光激光穿透力强,在勿需破坏组织的情况下,能看到生命细胞内的亚原子级的行为。X光全息照相将对生物学和医学的发展产生革命性的影响^[18]。它将对重要的生物学进程,如脱氧核糖核酸的模制品或蛋白质的合成,作出三维运动图象的观察。在医学方面它将对癌和衰老研究,对疾病的防治以及保健护理都会在一夜之间发生变革。

用EUV/SXR激光在亚ns时间内有选择地激发(或电离)原子束、离子束,将揭开对原子、离子和分子进行高分辨光谱学研究的新篇章。它也将使我们在了解固体表面的物理化学特性方面迈出一大步,从而能更好地控制许多表面过程。

采用大功率的EUV/SXR激光源,可以使金属版印刷术中的亚微米图形全息术复制件达到更小的尺寸。这种金属版印刷术可用于微电子学、集成光学或衍射光栅器件的制造。

X光激光将使极为精确的电子能谱术成为可能,使化学触媒、冶金和有机化合物的研究大为改观。更有意义的是,有可能将小直径的X光激光束用于微探针分析中。

X光激光可用于测量激光束的相干和发散,探索在SXR频率条件下的非线性光学效应。X光激光诊断术可用于观测惯性约束聚变靶的爆聚过程,也可用于利用冲击波产生新材料的研究。

在 X 光激光器的研究中, 各种方案齐头并进, 研究工作十分活跃。LLNL 采用电子碰撞方案取得了突破。由于重复性好, 增益与长度的关系符合指数规律而被公认。普林斯顿、英国赫尔大学和苏联小组采用复合方案, 报道在 EUV 波长观测到增益-长度积在 5 左右。虽然此方案只取得部分成功, 但所需设备小, 能产生更短的波长, 所以引人注目。光致共振激发机制非常复杂, 但在理论上却是有意义的, 前景也令人鼓舞。人们发现了类-铍锰和类-氢氟的谱线之间在 1.2643nm 附近具有高度精确的共振, 而且预料抽运线非常亮。最近, 在应用于 EUV 和 SXR 的高质量反射光学装置方面取得了意义深远的进展, 这项技术日趋成熟, 它将广泛用于短波长激光器的研究。由于产生 X 光激光的机制复杂, 许多物理学问题还不清楚, 靶子的制造难度大, 对诊断技术和设备要求高, 共振腔的研究也刚起步, 所以在实用的 X 光激光器研制成功之前, 还有一段艰难的路, 有很多问题尚待

解决。

参 考 文 献

- [1] M. H. Key, *Nature*, **316** (1985), 314.
- [2] D. C. Matthews, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **29** (1984), 1231.
- [3] D. C. Matthews and R. C. Kaniffman, UCRL-50021-83, (1984), 5—46.
- [4] S. Suckewer et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985), 1753.
- [5] D. Jacoby et al., *J. Phys.*, **B15** (1982), 3551.
- [6] *Phys. Today*, **38-1** (1985), 11.
- [7] P. L. Hugelstein, *Plasma Phys.*, **25** (1983), 1345.
- [8] M. Coiella and A. Cuccio, *Opt. Commun.*, **50** (1984), 41.
- [9] F. V. Bunkin et al., *Sov. J. Quan. Elect.*, **11** (1981), 981.
- [10] V. Feldman et al., *J. Appl. Phys.*, **56** (1984), 2475.
- [11] V. Feldman et al., *J. Appl. Phys.*, **54** (1983), 2188.
- [12] M. D. Rosen, UCRL-52000-85-11, (1985), 2.
- [13] P. L. Hugelstein, UCRL-53100, (1981).
- [14] G. D. Rambach, UCRL-52000-85-11, (1985), 24.
- [15] M. J. Eckart, UCRL-52000-85-11, (1985), 25.
- [16] D. C. Matthews et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54** (1985), 110.
- [17] J. W. Barbee, Jr., *Appl. Opt.*, **24** (1985), 883.
- [18] C. B. Stevens, *Fusion*, **5-2** (1983), 21.

(上接第374页)

最后, 讨论一下测量结果精度及有关问题。对于本实验装置, 在稳定的信号源和测试条件下, 影响测量精度的因素主要是, 计算脉冲数的“量化误差”^[2]。不难想见, 由于时钟脉冲宽度一定(缩小要受系统时钟 Φ_2 的限制), 随着被测信号频率的升高, 量化误差影响增大, 精度要下降。

但是, 根据三态门和计数器 T_2 的工作原理以及对量化误差形成的具体分析, 在本装置不添加硬件的情况下, 通过程序控制仍可使测量精度得到一定的改善。那就是在测量时, 对各个数据点的取数(计算脉冲数)适当重复多次(如十次), 正如数据采集程序所示那样, 然后再根据下面公式(设重复 n 次每次取值 N_i)

$$\hat{N} = \left(\sum_{i=1}^n N_i \right) / n - 0.5,$$

计算出测得的脉冲数估计值 \hat{N} 。实践证明, 与

只作单次取数相比, 效果是好的。在被测信号频率高达 10kHz 时, 相位差测量精度可达零点几度。

本实验高频应用除受精度限制外, 还受到数据采集需要一定时间的限制。根据前面介绍的程序运行过程, 应用频率最高可达 10kHz 左右, 频率再高程序就不能正常运行了。

本测量由于精度尚不够高, 而且只能用于低频, 因而主要用于教学领域。但是, 这一应用向人们展示了, 新技术用于实验教学等领域的前景和意义。

参 考 文 献

- [1] 林抒、龚镇雄, 普通物理实验, 人民教育出版社, (1981), 314—318.
- [2] 陆玉新、傅崇伦, 电子测量, 国防工业出版社, (1985), 140.