

超快激光的新前沿——阿秒科学*

苍宇 魏志义 张杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

摘要 超短脉冲激光正在进行着从飞秒($1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$)向阿秒($1\text{attosecond} = 10^{-18}\text{s}$)的跨越,这一跨越对于激光原理和激光应用来说都有很重要的意义.文章通过阿秒脉冲与飞秒脉冲比较来介绍超快激光的新前沿——阿秒科学,包括阿秒科学的诞生、现状以及由于阿秒脉冲的产生而出现的阿秒科学的概况.

关键词 超短脉冲激光,阿秒科学

NEW FRONTIER OF ULTRAFAST LASERS: ATTOSECOND SCIENCE

CANG Yu WEI Zhi-Yi ZHANG Jie

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In the visible and near infrared region ultrafast lasers have reached a pulsewidth of 3.7fs, which is about one period of the wave. This heralds the new age of attosecond pulses, which have been observed in the XUV region through high harmonic generation. In this paper, new developments of ultrafast lasers, the possibilities of attosecond pulse generation and potential applications are discussed.

Key words ultrashort laser pulses, attosecond science

正如激光的发明引起了光学领域的一场巨大的革命一样,超短脉冲激光的产生使人类探索许多未知领域及发现新的物理规律的梦想成为现实.自然界中存在着许多以前受测量手段的时间分辨率限制而无法认识的超快现象,如分子尺度上的运动,单分子的振动及转动,液体或晶格的振动及转动,化学键的断裂和形成都发生在飞秒($1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$)到皮秒($1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$)的范围.锁模技术使激光脉宽一下子缩短到了飞秒的数量级,终于为研究这些超快现象提供了时间分辨的可能.1999年,20世纪末的诺贝尔化学奖授予了美国埃及裔科学家 Ahmed Zewail^[1],表彰他在超快光谱和飞秒化学方面的开拓性工作.他利用基于飞秒脉冲的抽运探测技术成功地控制了化学键的断裂和成键,同时制造了一种飞秒量级的分子“照相机”,以实时检测化学反应,观察由反应物到生成物的中间态.而飞秒脉冲引出的新学科不仅有超快化学,还有超快物理学和超快生物学.目前啁啾脉冲放大技术的使用,使得在台面尺度实现激光峰值功率超过100TW($1\text{TW} = 10^{12}\text{W}$)成为现实.这样的超短、超强激光脉冲聚焦后所产生的电场强度大大超过了原子内的电场强度,从而使人类终于拥有了可以彻底改变和控制物质中电子的运动并进而改

变和控制物质性质和状态的能力.这就使物理学研究的范围得到了极大的扩展,许多传统的物理概念受到了强烈的冲击和挑战,一门崭新的学科——强场物理^[2]正在诞生.

在这种情况下,阿秒脉冲的产生和应用成为人们奋斗的新目标.然而,要突破现今3.7fs这样一个对800nm波长的激光来说不到两个光学周期的脉宽界限,无论在理论上还是实验上都面临巨大的挑战,因此,极端条件下的非线性光学和阿秒科学将是未来几年里超快光子学中最热门的研究课题^[3].

阿秒激光脉冲在其产生和测量上究竟有哪些特点,现在面临的问题是什么?下面结合飞秒脉冲激光的产生和测量对这些问题作一全面介绍.

1 周期量级的飞秒激光

根据测不准原理,极宽的光谱带宽才能支持极短的脉冲宽度,因此,要得到脉宽极窄的激光脉冲,必须对激光的光谱进行充分的展宽.而实现这一目

* 国家自然科学基金(批准号:19825110)资助项目
2001-01-16收到初稿,2001-03-13修回

的原理就是由自相位调制和光学克尔效应(又称非线性克尔效应,如图1所示)引起光谱展宽,并通过克尔效应的自聚焦效应实现克尔透镜锁模,从而得到脉宽较窄的锁模脉冲序列。

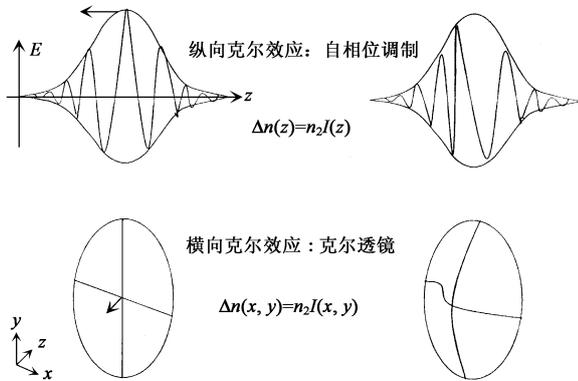


图1 克尔效应示意图

但是经过光谱展宽的激光脉冲在非线性介质里传播时其色散效应很明显,这就使最终得到的脉宽比光谱实际支持的最短脉宽要宽.因此,我们还要对色散进行补偿才能得到超短脉冲激光.虽然得到超短脉冲的手段各异,包括在激光器腔内直接获得、光参量放大及光纤压缩等,但根本上都必须实现以下的步骤:利用光谱展宽实现脉冲压缩、锁模以及色散补偿.传统上实现这一过程的主要技术为光纤-光栅对技术.利用光纤内充入的惰性气体作为非线性介质,实现光谱展宽,利用光栅作色散补偿.1999年,荷兰一个研究小组以腔倒空的飞秒钛宝石激光作种子光源,通过采用标准的硅光纤展宽光谱及光栅补偿色散后,得到4.9fs的世界记录.一年后维也纳技术大学的研究人员通过使用一种充惰性气体的中空波导为非线性光学介质后,同样对放大激光进行了光谱展宽并压缩,得到了3.7fs的结果.这样的激光脉冲对于可见光而言,还不到两个光学振荡周期。

通过不同方式得到的5fs范围的脉冲的干涉自相关曲线的比较如图2所示.我们发现,虽然方法各异,却产生了大致相同宽度的脉冲.而这些方法进一步只能向实现更好的色散补偿,寻找增益带宽更宽的激光增益介质,以及产生更宽的光谱的方向努力.但两个光学周期左右的脉宽是否就是一个本质的屏障?在产生更短的脉宽方面还能得到多大的进展?

钛蓝宝石的增益带宽和参量过程限制了进一步的发展,而且即使将不同的参量过程组合起来在不同的光谱区产生超短脉冲,再将它们组合起来形成

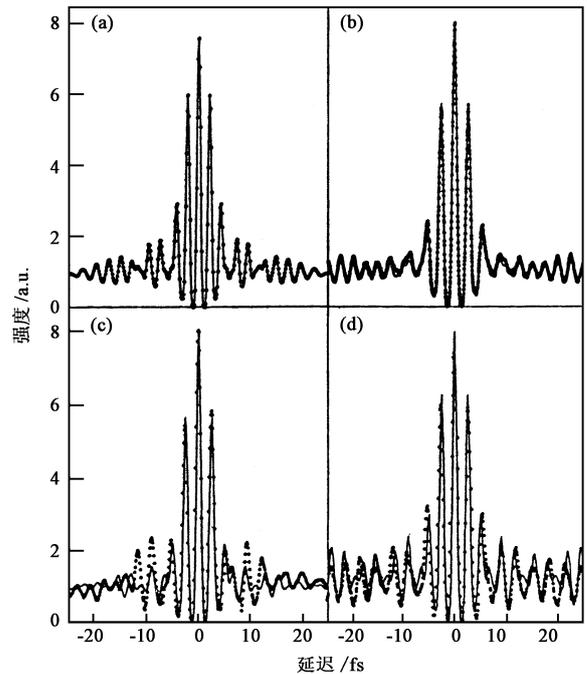


图2 通过不同方式得到的5fs范围的脉冲的干涉自相关曲线的比较示意图^[4]

干涉自相关曲线的比较示意图^[4]

(a) 光参量放大的方法;(b) 腔倒空输出的脉冲通过硅光纤后的压缩结果;(c) 毫焦耳脉冲通过冲量光纤后的压缩结果;(d) 从钛宝石激光振荡器得到的脉冲。

[由(a)到(d)的点和(a)上的线表示测得数据;由(b)到(d)的线代表自相关法得到脉宽所做的拟合曲线]

一个超宽的频带来支持仅含一个光学周期的极短的超短光脉冲,也只有当我们能实现色散补偿时,这些组合光谱的超宽的频宽才会变得有用.目前最宽带的啁啾镜的设计都仅能够在200THz的范围内获得色散补偿和高反射率,很明显,这对进一步减少脉冲宽度又设置了一个限制.显而易见,在可见和近红外波段产生超短脉冲的难点是设计和制造带宽更宽并能色散补偿的啁啾镜.最后,即使这种组合光谱的技术有很大的发展空间,这些理论还是要受到限制,即光学振荡周期的限制.故所有尝试产生短于1fs的脉冲的设计都必须用更短的深紫外区的波长.在这个光谱区,高阶非线性光学过程即气体高次谐波有可能会产生阿秒脉冲。

在强激光场下的气体原子产生高次谐波的过程大致可分为两类.对于激光场不十分强但已经强到可以改变原子势垒形状时,这时的电子在变形的势垒中的运动变得非常偏离简谐振荡.这样的高阶非简谐振荡(束缚-束缚)可以诱导出短波长的高次谐波.随着激光场的进一步增强,原子势垒的变形加剧,在上半个激光周期的电场的作用下电子穿越势

物理

垒发生隧道电离,紧接着,在激光场的下半个周期里,许多自由电子又随着激光场的转向得到了向心的加速度,快速地与离子核复合,这种快速的振荡运动(束缚-自由-束缚)可以诱导出 X 射线波段的高次谐波.诱导这些谐波能够达到非常高的阶数(大于 100).在时间域内,这些谐波的组合对应着一串阿秒的远紫外脉冲序列.最近已经有实验用高次谐波得到阿秒脉冲信号了^[5],但阿秒脉冲真正得到应用仍然还有一段很长的路要走.

2 阿秒脉冲的测量

理论家已经预言,本质上高次谐波可以实现相当好的同步以产生阿秒脉冲序列,其中每个脉冲约为 100 阿秒.如果是这样的话,许多实验室可能已经产生了这样的脉冲,但在还没有人想出测量这么快的光学事件的方法之前,我们又如何知道它是否发生了呢?

一个寻找灵感的途径就是借鉴目前用于飞秒脉冲测量的方法——自相关法.自相关本质上就是用脉冲自己测量自己.具体地说,就是先将一个脉冲分成完全相同的两个,然后在可调范围内造成两个相同脉冲在迈克耳孙干涉仪两臂上的延迟,再使它们都通过非线性光学材料.当两臂完全等长时,两个脉冲会同时到达非线性材料,这时的信号最强.随着光路不对称性的变化,两个波一先一后地到达非线性材料,引起非线性响应信号发生相应改变.观察非线性响应的变化,使我们能测出两脉冲重叠程度随光程差 Δx 变化的情况,脉冲的宽度就简单地正比于 $\Delta x/c$.

在阿秒科学中,主要的问题是从可见光发展起来的方法不能简单地推广到高次谐波的超紫外区域.没有人知道如何将一束高次谐波分成完全相同的两束,而且对目前我们已知的非线性介质来说,脉冲的强度还不足以产生非线性响应.

最近,希腊 FORTH 实验室的物理学家们^[6]已经提出并演示了一种方法来解决这些问题.首先他们在产生高次谐波之前就将激发脉冲分成完全相同的两束,有效地解决了产生两个完全相同的脉冲的问题.他们解决第二个问题的方法是使用离化的气体产生高次谐波,因为离化气体更容易产生高次谐波.而同时离化气体还充当了非线性介质,以测量脉冲序列中的脉冲宽度.

这是一个非常有创新性的主意,但还是有点不

足,这就是观察到的信号太复杂.但是,信号中确实有一部分是标志高次谐波的干涉条纹,这个干涉条纹所显示的脉冲序列正是我们所期待的,序列中每一个脉冲宽度约为 100attosecond.

所有上述对阿秒脉冲结果的解释依赖于更细致的理论分析,如果分析是正确的话,FORTH 就解决了阻碍阿秒科学发展的主要问题,通过这一工作,实验上的阿秒科学就可以登台亮相了,人们也真正进入了阿秒科学时代.

3 阿秒脉冲的应用

我们知道,飞秒脉冲近年来已获得了广泛的应用,如抽运探测超快光谱学、荧光上转换飞秒光谱学、量子系统相干控制等.A. Zewail 正是由于应用这些相关的技术来测量飞秒尺度下的化学键断裂等飞秒化学上的工作而获诺贝尔化学奖.

除此以外,超快光谱学还有助于对半导体中载流子行为进行研究和对热化过程进行测量.在分子超快光谱学里,用 10fs 的时间分辨率可以测量分子的振动.用超快光谱学还能对 THz 范围的纳米级量子点的声学共振进行研究.

超快光谱学的另一项进展是使用强激光脉冲与相对论电子束作用产生汤姆孙散射而反射飞秒 X 激光脉冲,利用 X 射线散射诊断和抽运探测设备可以对飞秒时间尺度的晶体结构进行探测^[7].研究者们已经发现在强激光脉冲的辐照下材料非热效应的烧蚀现象,这种方法同样能够监视声学冲击波对材料造成的结构性改变.

另外,还有许多飞秒激光脉冲的各种应用,例如,使用能量高度集中的飞秒激光脉冲进行微加工.据德国汉诺威的激光中心报道,由于飞秒脉冲与物质的非热相互作用,比起普通的激光更有利于开展超精细结构的生产制造,这对于复杂形状的微加工具有特别的价值.另外,这一技术还可用于复杂的脑外科及眼科手术中.德国 JENA 大学的 König 采用高强度钛蓝宝石单束激光,发明了目前世界上最精细的激光手术刀,由于飞秒激光束极强的聚焦能力,这种“激光刀”的刻痕宽度仅 0.11 μm ,并已成功地进行了人体第一号染色体的细胞分离手术及动物癌细胞的切除实验.

飞秒激光另一个独特的方面是它的光谱带宽和亮度,这些性质在干涉测量中非常有用.美国麻省理工大学的 researchers 指出,因其亮度高于传统的白光

光源,从而在光学相干断层照相法中有着非同寻常的作用.所谓光学相干断层照相法是一种与 X 射线断层扫描照相法很相似的医疗诊断方法,不同的是它用飞秒激光代替了 X 射线.利用短于 10fs 脉冲的宽带光谱,研究者们能够获得细胞级的分辨率,同样它在眼科学荧光上转换中也有重要的应用,例如对早期视网膜剥离的检查.

在频率测量上,飞秒激光同样有着重要的应用,由振荡器产生的一个短于 10fs 的光脉冲的光谱包含了百万以上的模式,这些模式有固定频率间隔,相当于用飞秒激光脉冲作为光学频率的尺子,可以在激光光谱的范围内精确地确定任何频率.这样的频率尺子能够在光学频段上建立更精确的原子钟.

现今在精确度量衡上的挑战是怎样将光学的频率标准同 9.193 GHz 的标准铯 - 133 原子钟直接联系起来.这个问题在用所谓的频率链原理试图解决的同时,锁模激光提供了一种更简单的改动方法,即直接将它们的模式间隔与指定微波频率联系起来,许多科学家相信这一研究工作的深入开展将导致新

一代频率标准的产生.

作为比飞秒激光更短的脉冲,阿秒脉冲将在上述领域中得到同样甚至更重要的应用,如能够观测电子围绕原子的运动,原子的电离和离子键的形成^[8].同时阿秒脉冲将由于其超短的脉宽和超宽的频谱而被应用于许多新的领域并开拓出新的应用.

参 考 文 献

- [1] Zewail A H. Science, 1988, 242:1645
- [2] 张杰.物理, 1997, 26:643 [Zhang J, Wuli(Physics), 1997, 26:643 (in Chinese)]
- [3] Steinmeyer G, Sutter D H, Gallmann L *et al.* Photonics Spectra, 2000, (2):100
- [4] Steinmeyer G, Sutter D H, Gallmann L *et al.* Science, 1999, 286:1507
- [5] Papadogiannis N A, Witzel B, Kalpouzos C *et al.* The Am. Phys. Soc., 1999, 83:4289
- [6] Paul Corkun. Physics World, 2000(2):23
- [7] Rose-Petruck C *et al.* Nature, 1999, 398:310
- [8] Robert F. Service Science, 1995, 269:634

• 物理新闻 •

“意大利领航员已登陆” (“The Italian Navigator Has Landed”)

“意大利领航员已登陆”是在 1942 年 12 月 2 日战争年代发出的一个密码信息,它表示核反应试验成功.这个成语来自于当时欧洲人对哥伦布发现新大陆的一种表示.后来这句话也用来对其他领域探险成功的表示,例如在原子核领域.这种探险的榜样是恩·费米在原子核领域内进行的第一次核反应试验.

今年 9 月 12 日是费米的百年诞辰,许多单位(如芝加哥大学的费米实验室,意大利的 Pisa 大学和美国的能源部等)都准备进行庆祝活动.这些活动聚集了大量优秀的实验与理论物理学家.

在物理学的许多领域里,有非常多的事物是用费米的名字来命名的,它们是:国家实验室——费米实验室;芝加哥大学的费米研究所;芝加哥大学的费米教席; 10^{-15} m 的长度单位——1 费米;物理中两大类粒子之一——费米子;凝聚态物理中的能级——费米能级;粒子间的相互作用——费米相互作用;费米常数、费米温度、费米气体,……,现在美国发行了一张费米邮票.

(云中客摘自“美国物理新闻”2001 年第 556 号)