

超快过程物理学

孟 绍 贤

(中国科学院上海光机所)

超短激光脉冲的出现,打开了超快现象世界的大门,它对原子、分子及其集合中物理过程的研究,引起了人们广泛的兴趣。由于强的短脉冲可以撕裂原子和分子,可以改变原子和分子的状态,以往人们认识不到的原子和分子的性质被揭露出来。现在已经形成了一门新的边缘科学,我们把它叫做超快过程物理学。

超快过程物理学并不是超短激光脉冲的简单应用,因为它有一套独特的研究方法和分析方法,它有自己的研究对象。

超快过程物理学主要是研究原子、分子及其集合中所发生的超快物理学过程的机构和性质,从而确定物质内部超快过程物理学的规律。

为了进行超快过程的研究,首先需要—个超短的脉冲源。用这个源照射原子、分子及其集合,激励起超快过程,然后用超快测量技术进行探测,以确定其运动规律。

下面我们对此加以逐一介绍。

一、超短脉冲源的获得

为了进行超快过程物理学的研究,首先需要—个超短脉冲源。

在1965年人们首先采用激光模式锁定技术(简称锁模),获得了超短激光脉冲。最常用的产生超短激光脉冲锁模激光器有 Nd^{3+} :玻璃、 Nd^{3+} :钇铝石榴石、红宝石三种。 Nd^{3+} 玻璃锁模激光器可得到 10^{-12} 秒的脉冲, Nd^{3+}

钇铝石榴石锁模激光器、红宝石锁模激光器可得到 10^{-11} 秒的脉冲。当在锁模激光腔中加入标准具时,可使脉宽加宽到1毫微秒量级。当锁模不用染料而采用电光或声光主动锁模时,也可获得连续锁模输出。锁模装置如图1。

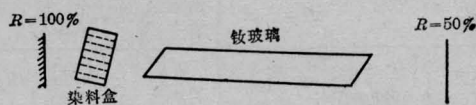


图1 锁模激光器示意图

一般超快过程物理学研究希望波长可连续地调谐,由于染料有较宽的荧光线宽,因此可采用染料激光器的锁模达到波长可调谐。

染料激光器按照运转方式可分为脉冲式锁模染料激光器和连续锁模染料激光器。按照泵浦方式分类可有闪光灯泵浦染料激光器和激光泵浦染料激光器。目前用闪光灯泵浦的脉冲染料激光器的锁模进行的实验总结如表1。连续染料激光器的锁模进行的实验总结如表2。

当采用钽玻璃、红宝石锁模激光器及它们的倍频泵浦有机染料激光器产生锁模时,染料激光器的光腔调整其长度同步于用作泵浦的锁模激光器腔长或为其约数。

为了获得波长连续可调,可采用参量放大技术。用锁模超短激光脉冲泵浦的参量放大实验结果如表3。

收稿日期: 1978年6月30日

表 1 闪光灯泵浦染料激光器

激光染料	可饱和吸收体	可调谐范围(毫微米)	脉冲宽度(微微秒)
七叶灵一水化物	DAPSI	465~480	
若丹明 6G	DQOCT	575~600	1.5~3
	DODCI	600~625	2~3
若丹明 B	DQTCI	605~630	3~4
	DODCI	615~645	2~3
甲紫酚+若丹明 6G	DTDCI	600~704	3~5
	DDCI	645~680	~3
	DOCTI	645~680	~4
DOTCI	HITCCI	795~805	

表 2 连续输出染料激光器

激光染料	可饱和吸收体	脉冲宽度(微微秒)	调谐范围(毫微米)
若丹明 6G	DODCI	亚微微秒	598~615
		0.3~1.5	592~617
	DQOCI	0.6~2	580~613
若丹明 B	DODCI	3~4	610~630
	DQOCI	4~5	600~620
	甲紫酚	3~4	610~620
荧光素钠	若丹明 6G	5~7	546

表 3 超短脉冲光参量放大

晶体名称	晶体厚度	泵浦光波长	参量光波长	调频方式	效率	备注
BaNaNb ₅ O ₁₅	5 毫米	5300Å	0.96~1.16 微米	温度	10 ⁻⁴	Nd ³⁺ : 玻璃锁模, f=100 厘米聚焦
KDP	6 厘米	5300Å	0.87~1.2 微米	温度	1%	Nd ³⁺ : 玻璃锁模
LiNbO ₃	2 厘米	1.06 微米	700~2500 厘米 ⁻¹	角度	3%	Nd ³⁺ : 玻璃锁模, 单脉冲
α-HIO ₃	4 厘米	5300Å	0.71~1.115 微米	角度	0.5%	Nd ³⁺ : 玻璃锁模
LiNbO ₃	2 厘米	5300Å	0.64~0.75 微米	温度		Nd ³⁺ : 锁模锁模
ADP	5 厘米×2	2660Å	4200~7200Å	温度	10%	Nd ³⁺ : YAG 锁模

亦可采用超短脉冲激光与介质内弹性声波场相互作用而产生的受激布里渊散射得到。由于光与声波相互作用, 波长调谐范围较小。

要获得较大波长范围可调, 利用超短脉冲激光与介质的分子振动、转动及光频声子振动相互作用的受激喇曼散射得到, 它是用受激喇曼散射的斯托克斯成分向红外推进, 亦可用反斯托克斯成分向紫外推进。

为获得短波长的超短激光脉冲可采用倍

频技术。如用 KDP 等晶体把钕玻璃激光输出的 1.06 微米倍频为 5300 Å, 再倍频可得 2650 Å 的紫外输出, 要进一步获得更短波长, 由于晶体透过率限制不能继续倍频下去, 则需采用气体倍频。目前用气体倍频技术实现了在波长 887 Å、570 Å、532 Å 和 380 Å 的相干超短激光脉冲输出。

为获得远红外输出, 可采用光混频技术, 钕玻璃激光器有大的振荡带宽, 特别适用于光混频。钕玻璃锁模激光器通过 LiNbO₃ 和 KDP 晶体的光混频, 获得了 1~20 厘米范围

的红外输出,如用染料激光器进行光混频,则可在更宽的范围可调。也有人提出利用超短激光脉冲通过物质的类契林柯夫辐射产生红外、微波的超短脉冲。

超短激光脉冲在液体中聚焦可产生超加宽 $>10^4$ 厘米⁻¹ 的白光超短脉冲。超短激光脉冲在物质中传输时的自调制亦可作为白光超短脉冲源。这样的超短脉冲对超快过程物理学的研究是特别有用的。

为获得 X 光波段的超短脉冲,可采用超短脉冲激光打金属靶以产生强 X 光辐射。它产生的 X 光的方向性与输入激光的偏振状态有关。且其输出 X 光脉冲宽度与泵浦激光脉冲宽度量级相同。

用超短脉冲激光与靶相互作用,还可获得超短脉冲中子源、离子源、电子源等。

为获得超短电脉冲,可采用快上升时间强流光二极管接收超短激光脉冲,目前已经得到脉冲宽度 70 微微秒,电流 3 安培,电压 150 伏的超短电脉冲。另外用光整流技术可获得更短的电脉冲。用超短激光脉冲通过渗铜 LiTaO₃ 光整流获得了脉冲宽度为 ~ 8 微微秒,电压为 300 伏的电脉冲。

物质被高功率超短激光脉冲急速加热,可获得超短的声脉冲,亦可用超短激光脉冲在物质中传播时的自陡峭效应产生声冲击波。

为了获得小于 10^{-12} 秒的超短激光脉冲,可采用超短激光脉冲通过染料非线性压缩,或用光栅对压缩方法。也有人建议用有腔受激喇曼散射效应获得 10^{-15} 秒量级的超短激光脉冲。

有时超快过程物理学研究需要单一超短激光脉冲,为此可用激光触发电光开关从锁模脉冲序列中选取单一脉冲。

以上简要地概述了为了进行超快过程物理学研究所需要的各种超短脉冲源的获得办法。随着超快过程物理学研究的发展,一定会出现许多更新更好的办法。

二、超快过程物理学的实验方法

超快过程物理学的实验方法基本上是利用超短脉冲源激励被研究的物质。研究其频谱响应特性,从而确定物质的状态、结构和性质,或研究物质的衰变特性,确定物质的变化规律和响应特性。

一般情况,把超短脉冲源一分为二,用强的部分激励起超快现象,而用弱的脉冲进行探测。为了探测超快过程不同时间的情况,往往把强脉冲和弱脉冲之间进行适当延迟。做一次实验调一次延迟是不方便的,而且也增加了实验误差。因而人们采用具有不同确定延迟的阶梯板加到探测光路中,这样就可以一次确定不同时刻的超快过程的状态。

为了进行超快过程测量,人们进行了大量的研究。

最直观的办法是采用快上升时间的同轴光二极管和行波示波器结合对超短过程进行观察和拍照,但这只能在过程时间大于 100 微微秒时才可行,如观测一些有机染料的荧光衰变寿命就是采用此办法。对于连续锁模激光输出可采用取样示波器。

对超短激光脉冲的研究主要采用非线性光学效应办法,主要是相关方法。利用超短激光脉冲通过非线性晶体产生谐波的办法来测量脉冲宽度。但由于太麻烦,目前很少有人采用,大部分采用双光子荧光方法。激光激发染料若丹明 6G,由于双光子吸收过程而发出荧光,由这荧光确定脉冲宽度,这种方法简单方便,装置如图 2。把荧光拍照出来,用测微光度计描出图形,即可确定脉冲宽度。类似地还有三光子荧光方法。

最适合于超快过程物理学的研究方法主要是下面三种:

1. 可饱和吸收体开关法。我们知道染料溶液,在强光作用下产生漂白,从而使光透过。基于此可做成可饱和吸收体开关,把超

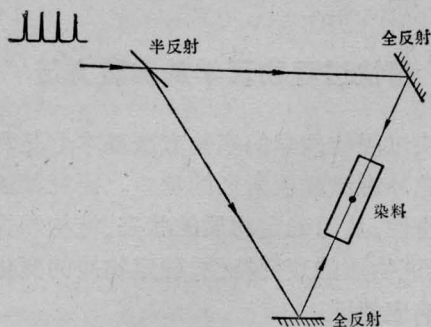


图2 双光子荧光示意图

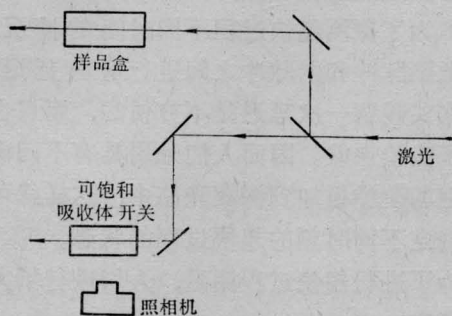


图3 可饱和吸收体开关示意图

短激光脉冲一分为二，一束使可饱和吸收体漂白，另一束激励物质的超快过程，从而对超快过程进行拍照，其示意图如图3。其开关时间取决于激光脉冲宽度和染料的弛豫时间。

2. 光克尔开关法。我们已经知道二硫化碳、硝基苯液体在电场作用下，具有双折射效应，利用这个双折射效应，人们做成了克尔盒开关。然而，不外加电场，而采用具有线偏振的超短激光脉冲通过克尔液体，使二硫化碳分子定向，产生双折射效应，从而做成光克尔盒开关。它探测超快过程和可饱和吸收体开关相同，其示意图如图4。其开关时间为2微微秒。玻璃中光诱导双折射来源于原子的电子云畸变，响应时间为 10^{-15} 秒，因此可做成亚微微秒开关。

3. 条纹照相机方法。条纹照相机可以看作光二极管和行波示波器合而为一的系统，但它观察的是超快过程的条纹像，然后把条纹像用测微光度计进行扫描，给出超快过

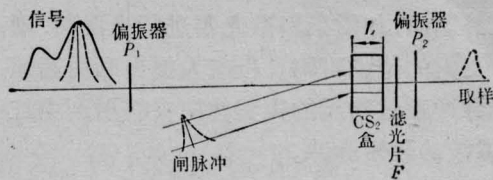


图4 光克尔开关示意图

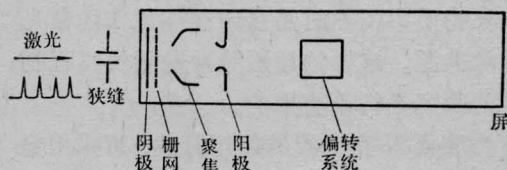


图5 条纹相机示意图

程。它的结构如图5。它是目前超快过程物理学中的通用的装置。响应时间主要受光电效应响应时间的限制，可达到 10^{-14} 秒。对于更快的超快过程研究则需要更快的测量手段。

在超快过程物理学的研究中数据处理是一个复杂的过程，人们有的采用光学多道分析器或光导摄像管把上述装置获得的光信息传输到工业电视显示或者直接交给电子计算机进行处理。

三、超快过程物理学的研究领域

超快过程物理学是一门边缘科学，正在蓬勃发展时期，它主要是研究原子、分子及其集合中的超快过程物理学过程。不同领域中的超快物理学过程都是其研究对象。大致上包括如下内容：

1. 生物物理学

(1) 光合作用。我们知道绿色植物和某些细菌通过光合作用把太阳能转化为化学能贮存起来，对光合作用的研究无疑对四个现代化是十分重要的，但光合作用的细致机理还不是太清楚的。用超短激光脉冲研究叶绿素的荧光发射与时间的关系进一步证实了两种独立的光合系统。

(2) 遗传工程。我们知道生物的遗传密

码主要是编排在脱氧核糖核酸 DNA 分子上。DNA 分子的吸收中心为 2650\AA ，恰为 1.06 微米的四次谐波，因此可用此来研究 DNA 的内部能量转化过程。

(3) 视觉研究。动物和人的眼睛为什么能够看见光，区分光的强弱和颜色，光能如何转换成电能传给视神经系统呢？这是生物物理学的重要问题。超短激光脉冲照射视觉分子（视紫红质），证明了首先生成中间媒介物如视光视紫红质。

(4) 血色素研究。我们知道血色素是红血球中的分子，它负责把氧从肺部转移到身体其它部分，然后再把二氧化碳转移到肺。用连续锁模染料激光器可确定血色素的性质。

2. 化学物理学领域

(1) 荧光衰变和无辐射寿命测量，用锁模激光超短脉冲泵浦荧光染料若丹明 6G 等及红宝石调 Q 染料，首次测出了荧光寿命。用可饱和吸收体做开关测定了锁模染料 9740\AA 和 9860\AA 的无辐射跃迁寿命。

(2) 研究分子的振荡弛豫过程，通过超快过程物理学方法研究了小分子电子基态振动弛豫过程和大分子的激发态弛豫过程，能级之间单态-单态能量转移，三重态-三重态能量转移。

(3) 溶液中化学反应的笼蔽效应，如溶剂中 I_2 分子在 5300\AA 的超短激光脉冲作用下的光分解和复合过程。

(4) 研究单一分子电子态之间的内转换及单态与三重态系统之间的交叉，如对溶解在戊二烯中的苯酮所做的实验发现有单态-三重态迅速的内转换。

(5) 溶剂混合物中，定域电子的光照释放和复合，如对冲淡的金属氨 (NH_3/Na) 溶液 ($10^{-4}\sim 10^{-3}$ 克分子) 的测量。

(6) 液体中分子的定向弛豫时间，如二硫化碳定向弛豫时间为 2 微微秒的研究。

3. 在固体和液体中的应用

(1) 喇曼效应，超短激光脉冲与分子电

子振动、转动能级相互作用与固体光频声子相互作用，研究其弛豫过程，测量光频声子的寿命。

(2) 布里渊效应，超短激光脉冲与分子和固体的声频振动相互作用，测量声频声子的寿命。

(3) 研究超短激光脉冲与半导体相互作用产生高密度电子-空穴等离子过程和寿命。

(4) 研究固体中激子的寿命及激子的玻色凝聚效应，极化子的形成及寿命测量。

(5) 超短激光脉冲与物质的多光子相互作用及光吸收饱和。

4. 等离子体物理

(1) 用超短激光脉冲加热等离子体产生热核聚变的可能性。

(2) 研究激光等离子体中光谱的红移和蓝移。

(3) 研究等离子体的时间和空间发展，进行分幅阴影照像。

(4) 研究气体击穿的多光子离化过程。

5. 电子学

(1) 研究快响应的电子学元件，螺旋触须二极管、杰弗逊结、具有光整流效应的晶体的时间响应特性，确定电缆的频率响应特性。

(2) 研究超短激光脉冲在半导体 PbS、金属钽、钨、金等产生的多光子光电效应。

(3) 研制激光触发超快电开关，用 0.53 微米激光照射半导体，产生电子-空穴对使开关导通，而用 1.06 微米使电子-空穴复合使开关断开，这种装置的开关时间可达几微微秒。

6. 激光技术

(1) 研究自由运行激光器、调 Q 激光器中的微微秒亚结构。

(2) 研究激光材料中自聚焦的响应时间及自相调制。

(3) 研究各种非线性材料的非线性响应时间。光导纤维的频率响应特性测量和测距。等等……。