

超微粒子薄膜与皮秒激光脉冲检测

Ultrafine Particle Thin Film for ps Laser Pulse Detection

吴锦雷

(北京大学无线电电子学系,教授 北京 100871)

吴全德

(北京大学无线电电子学系,教授,中科院学部委员 北京 100871)

俗话说,一寸光阴一寸金。一寸金可以从尺寸、重量等概念去测量它。那么一寸光阴如何测量呢?

大家知道,光的速度是最快的,光每秒钟传播30万公里,相当于绕地球赤道七圈半。一寸光阴是指光传播大约3厘米所需的时间,这是一个极短的时间,它只有 10^{-10} 秒。在物理中把 10^{-6} 秒称为微秒(μs);把 10^{-9} 秒称作纳秒(ns);把 10^{-12} 秒称为皮秒(ps);把 10^{-15} 秒称为飞秒(fs)。从光脉冲持续时间来划分,微秒、纳秒为短脉冲光,皮秒、飞秒为超短脉冲光。超短脉冲光的检测是科学技术发展所要研究的重要课题。

一、超短激光脉冲

超短脉冲光是由激光器产生的,调Q激光器可以把光脉冲做到纳秒量级,锁模激光器可以把光脉冲做到皮秒、飞秒量级。光脉冲越短,光的能量越集中在短时间内激发出来,如果总能量不变,则每一个超短激光脉冲能量就高于一般的一个激光脉冲能量。

皮秒脉冲有两个显著的特点:超短的持续时间和可以产生非常高的功率。

利用这种超短的瞬时性质可以对物质中某些最基本的过程进行研究,其中有的过程发生在皮秒时间尺度上,例如液体中分子振动的自由衰减和取向起伏,固体中的声子衰变,分子间的电荷转移过程等。因此皮秒脉冲及其与物质的相互作用是科学与技术的一个前沿领域。

即使是很小的能量,当它被压缩到几个皮秒时,也能有巨大的脉冲功率。 $1\text{太}(10^{12})$ 瓦的功率甚至用一个中型的激光器就能产生出来,这种高功率性质使人们能够研究许多重要的非线性现象。超短光脉冲是一个迅速发展的领域,高峰值功率的超短

脉冲已经成为基础科学与应用科学研究的一种强有力的工具。在诸如相干光谱学,液体、固体和半导体的快速驰豫过程,非线性光学、快速化学反应动力学,以及生物学中均已发现有广泛的应用并引出了许多前所未有的新结果。超短光脉冲在高速电子学、信息处理、等离子体的产生与诊断、精密测距、材料加工,以及医学等实际领域亦受到重视。

目前超短光脉冲的趋势是愈来愈短的脉冲和愈来愈高的功率,已从皮秒领域发展到了飞秒领域。锁模技术不断改进,新的锁模方法,如对碰脉冲锁模、注入锁模、两种或多种锁模技术的组合、超辐射锁模、相干脉冲以及各种脉冲压缩技术均在迅速发展。香克(Shank)等人1985年所发表的工作是这方面的一个极好的例子。他们将对碰锁模的环形染料激光振荡器—放大器系统所产生的90飞秒的超短光脉冲,通过15厘米的光纤产生自调相,然后利用一对光栅进行线性调频补偿,从而将脉冲压缩到8飞秒,获得了迄今最短的光脉冲。按目前发展趋势,可望在90年代获得持续时间约1~2飞秒的光脉冲,在这种脉冲中大约只包含一个完整的振荡周期(对可见光而言)。半导体激光器锁模的成功以及超短光脉冲(持续时间几皮秒至亚皮秒)的获得也是近年来最主要的进展之一,对各种波长的超短光脉冲的测量与诊断也随之摆到重要的位置,这正是本课题研究的问题。

二、动态条纹相机

随着超短激光脉冲的发展,迫切要求人们对光脉冲重复频率和光脉冲波形给予诊断和测量,而这种诊断对光学大功率瞬态过程,光物理、光化学以及光生物学的快速过程都很重要。用光电探测器和示波器结合起来直接测量的方法已不再适用于超

短光脉冲的时间分辨,近几十年来逐步完善的电子光学皮秒技术,即条纹照相技术,使对皮秒超短光脉冲的检测和诊断成为可能。动态条纹相机能够直接测量作为时间函数的脉冲强度 $I(t)$,并且有很高的时间分辨率,所以它能成为一种诊断工具而被普遍应用。

变像管条纹照相机是1956年由Zavoiskii和Fanchenk提出来的。他们指出条纹相机的时间分辨率最终是被变像管中光电子的渡越时间的弥散所限制。到70年代Bradley在变像管光电阴极附近加了一个平面细网电极(即栅网),加上高电位,改善了时间弥散的限制,将时间分辨率改进到5皮秒。不久,谢利维(Schelev)用条纹变像管(该管使用S-1光电阴极)测出了钕玻璃激光器产生的大约10皮秒光脉冲。条纹相机技术发展很快,有许多新的改进,包括采用微通道像增强器和光纤面板耦合来提高整个系统增益等。目前条纹相机不仅能够对激光脉冲,而且能够对发光现象进行直接记录,并且是在从1电子伏到1万电子伏光子能量的宽广范围内具有皮秒或亚皮秒的时间分辨率,这充分显示出条纹相机的优越性。

变像管的工作原理是,当光脉冲照射到光电阴极上则被转换为电子脉冲,电子经加速、聚焦和偏转场的作用,在荧光屏上扫描,扫描图像是与入射光脉冲随时间的变化相对应的,从而将光脉冲随时间变化转换为电子束在荧光屏上空间位置的变化。这样,在扫描方向上就实现了时间分辨,在与之垂直的方向保持了空间分辨。为了提高整个系统的增益,采用了内增强器和荧光屏光纤板耦合输出方式,内增强器就是在阳极等位区装一块微通道板(MCP),它的最高增益可达 10^{-4} ,这样使扫描图像亮度大大增强,通过接触相机由高速胶片记录,或通过摄像机由计算机记录输出。

动态条纹相机最终的时间分辨率取决于光电阴极的类型和材料、入射光波长,以及所加电场强度。诸因素中光电阴极材料占首要地位。我们认为,含超微粒子的薄膜材料是最有发展前途的光电转换材料。1984年8月在法国斯特拉斯堡举行的第16届国际高速摄影与光学会议上,F.Gex等人的论文指出,半透明银氧铯光电阴极是唯一可用于研究脉冲宽度不到10皮秒、波长1.06微米的激光脉冲的光电转换材料,银氧铯阴极实际上就是银超微粒子埋藏于氧化铯半导体中的薄膜材料。

我们采用的动态条纹相机系统是以可更换光电阴极的扫描变像管为核心的装置系统,主要包括四个部分:扫描变像管系统、扫描控制系统、高压供电系统和真空系统。扫描变像管系统由光电阴极、栅极、聚焦极、偏转板、微通道板和荧光屏等部分组成。

变像管的阴极和栅极结构采用平面型可更换式,并设计了阴极框架,以便阴极和栅极容易更换。由于在使用中可能发生损坏阴极和栅极的情况,而且随使用时间增长,阴极灵敏度也会降低,这种更换是很有必要的。更主要的原因是,这种结构可以方便地研究和对比不同材料制备的光电阴极在激光脉冲作用下的光电特性。就是说,可在另一真空中制备好光电阴极,然后再将它转移到变像管中,并被固定在阴极框架上,这是我们采用的条纹相机的一大特点,也是它的一大优点。

三、新型光电发射材料

超微粒子(也称胶粒)系指1~100纳米之间的粒子,其特性不同于原子分子物理和固体物理中所讨论的特性。超微粒子和含超微粒子薄膜有许多独特的性质,引起科学家和科技领导部门的重视。例如日本曾将超微粒子的研究立为科技立国的第一条。林主税(C. Hayashi)于1986年第十届国际真空会议上发表了1981~1985年日本该项研究的主要成果。日本通产省作出决定,在筑波市成立研究21世纪技术的“超级研究所”,研究的内容涉及原子工程技术、人工智能等高技术课题,以及直径在1微米至10纳米的微小粒子在产业技术上的应用等。这里所说的微小粒子就是超微粒子。

信息社会的发展将由以电子为信息载体发展成以光子为信息载体,因此光通信和光计算等研究受到极大重视。人们需要类似于电示波器的光示波器,它能测出光脉冲重复频率、载空比、光脉冲频率、光脉冲功率、光脉冲波形(波形诊断)等。从光脉冲诊断角度看,一种可行的办法是将光脉冲转化成电脉冲,再用现有的技术分析和记录。这就需要有快速反应的光电转换薄膜材料,通常称之为光电发射阴极。

光电子发射,特别是正电子亲和势光电阴极有极快的光电响应速度(~ 1 飞秒),所以随着皮秒、飞秒超短脉冲研究的进展,对用于检测这种信号的光电发射功能薄膜材料的研究也受到人们极大重视。目前世界上通用的激光脉冲检测的透射式光电发射薄膜基本上有两类。一类是含有碱金属的光电发射薄膜,例如:银氧铯($\text{Ag}-\text{O}-\text{Cs}$)、铯铋(Cs_3Sb)、钠钾铯铋($[\text{Cs}]\text{Na}_2\text{KSb}$)等;另一类是纯金属的薄膜,例如金(Au)、银(Ag)等。前一类光电发射薄膜虽然光电灵敏度较高,但它们不能在温度 150°C 以上的环境中工作,也不能暴露于大气中,如果暴露于大气,则光电薄膜就会报废。这些不足给使用造成极大的困难,甚至某些场合无法使用。而纯金属的 Au 、 Ag 薄膜虽然可以暴露于大气,也可以在较高温度下工作,但由于它们的光电灵敏度很低,同

样给激光脉冲的检测带来困难。

我们研制的银钡氧(Ag-Ba-O)薄膜避免了上述现有技术中的不足,提供了一种可以存放于大气,能在真空中恢复光电发射,可以在较高温度下工作,又有较高灵敏度的光电发射薄膜,它可以用于激光脉冲的检测。这种薄膜材料是金属Ag超微粒子埋藏于半导体BaO基质中的薄膜。Ag-Ba-O薄膜是一种全新型的光电转换薄膜。

四、实验装置

Ag-Ba-O薄膜是在由机械泵、扩散泵及样品管等组成的真空系统中制备的。该系统的真空度为 3×10^{-6} 帕,银钡氧三种元素按一定的工艺方法沉积在玻璃基底上,使其成为金属超微粒子埋藏于半导体层中的光电转换薄膜。

用Ag-Ba-O薄膜检测激光脉冲,须把薄膜装入动态激光脉冲检测系统,薄膜经过暴露于大气的过程。我们的检测设备由激光源、外光路、光电转换薄膜、条纹相机、真空系统、测试仪表等组成。激光由被动锁模Nd:YAG产生,波长1.06微米,每一个短脉冲宽度为50皮秒,9~11个短脉冲组成一个单脉冲序列,每秒或每5秒发出一个单脉冲序列,一个序列的能量为3毫焦。激光束可以经过衰减片、聚焦片打到薄膜上,也可以直接打到薄膜上。如果在外光路中加入KTP倍频晶体,光波可以变为0.53微米的绿光,不论是1.06微米的红外光还是0.53微米的绿光打到薄膜材料上都可以在条纹相机中测到光电发射。条纹相机是瞬态光学检测设备,只有精确地做到光脉冲与电脉冲的同步才能捕获皮秒级激光脉冲信号。测试仪表由存储示波器和能量计等组成。检测系统的真空度为 10^{-6} 帕。

五、多光子光电发射效应

光电薄膜在激光作用下表现为多光子光电发射效应。前苏联列别杰夫研究所谢利维曾介绍用条纹像管检测光脉冲强度分布的例子,他们利用Yb-Er-Al主动锁模产生2.94微米的皮秒光脉冲,每个脉冲的平均能量约有1毫焦,用Ag-O-Cs光电阴极PV-001管检测2.94微米的光脉冲,其阈值灵敏度为 10^8 瓦/厘米²,他们认为可以用三光子、四光子,甚至五光子效应来描述激光作用下的光电发射。

我们使用中等灵敏度的Ag-Ba-O薄膜,用标准白炽灯测得的积分灵敏度为0.2微安/米,激光经过透过率为3.3%的衰减片后作用到光电薄膜上,薄膜对1.06微米光脉冲的阈值灵敏度为 $6 \times$

10^7 瓦/厘米²,对0.53微米光脉冲的阈值灵敏度为 1×10^8 瓦/厘米²,这样的阈值灵敏度可以与上述的谢利维实验采用的Ag-O-Cs薄膜相比拟,而Ag-Ba-O薄膜是经过暴露大气过程的。

Ag-Ba-O薄膜在1.06微米激光作用下表现出四光子发射效应。

固体材料的单光子光电发射服从爱因斯坦关系:

$$E_k = h\nu - h\nu_0, \quad (1)$$

式中, E_k 为逸出固体表面电子最大动能, $h\nu_0$ 为光电子的功函数。根据(1)式,当 $h\nu < h\nu_0$ 时,没有光电发射。但当相干激光照射到样品上,即使 $h\nu < h\nu_0$,也能有光电发射产生,这就是多光子光电发射。根据量子力学的高阶微扰理论,由跃迁几率的计算,得到n光子激发电流密度的表达式,

$$J_n \propto I^n \propto E_-^{2n}, \quad (2)$$

即光电流密度 j_n 正比于垂直于固体表面激光电场分量 E_- 的 $2n$ 次方,或正比于相干激光强度 I 的 n 次方,且有 $nh\nu > h\nu_0$ 。

(2)式可写为:

$$j_n = B_n I^n, \quad (3)$$

B_n 为比例系数,它与激光照射样品的特性有关。从实验结果定性考虑如果材料的单光子发射灵敏度高,其相应的多光子发射灵敏度也高。

六、激光作用下的特殊光电灵敏度

光电发射薄膜的灵敏度在光的作用下会渐渐地衰减,在像激光这样的强光作用下会加速衰减,甚至损坏。Ag-Ba-O光电发射薄膜在较强激光能量密度作用下,例如能量密度大于 10^8 瓦/厘米²的作用下,光电灵敏度同样随着激光作用的时间(脉冲次数)增加而衰减,这与一般的光电发射薄膜的性能相同。但是,我们用临界阈值能量密度测试方法,观察到Ag-Ba-O光电发射薄膜在此能量的激光作用下灵敏度上升的特殊现象。这样的现象在以前的文献资料中未见报道。普通光电阴极只存在阈值波长,不存在阈值能量密度。Ag-Ba-O光电发射薄膜在激光作用下是多光子光电发射,存在一个阈值能量密度。阈值能量密度是指在该能量密度以下,不能激发电光发射,在该能量密度以上,可以激发电光发射。通过实验,我们发现了更多的现象。把激光能量密度从强到弱变化,会发现,激光能量密度降到某一数值以下后,薄膜不再有光电发射电流,我们称这个能量密度数值为“后阈值”。如果我们把一个经过大气暴露的Ag-Ba-O薄膜装入检测系统,用低于“后阈值”的激光能量密度作用于

(下转第5页)

的外贸方式,实施大贸易、大海外战略,主动出击,将外贸重心移向海外。鼓励外贸专业公司在海外组建大型跨国公司或贸易中心、分拨中心,逐步形成—个强有力的销售网络,并带动有实力、有条件的大型生产企业到海外去投资办厂,利用当地资源,就地加工生产,占领当地市场,同时发展工程承包、劳务合作和售后服务。与此同时,要切实改变目前—些海外企业只作为国内公司“联络站”,靠国内公司佣金维持的局面,对进入海外的企业,视同外国企业,允许他们以外商的身份,直接采购国内自营出口企业、三资企业的产品,将他们与国内企业争货源的竞争关系变为带动他们产品出口的合作伙伴关系。此外,还要改革海外企业的经营机制和分配办法,逐步向国际惯例靠拢。

六、管理接轨

管理接轨包括微观管理和宏观管理两个层次。就微观层次而言,企业要以建立现代企业法人制度为目标,从有利于加强宏观管理、国民经济统一核算和按国际惯例办事的原则出发,在理顺的基础上逐步规范包括折旧制度、成本管理制度、审计制度、资产评估制度在内的企业财务会计制度。此外,在企业劳动人事制度、分配制度、领导制度等方面也有必要吸取国外先进的管理经验和方法。

(上接第 29 页)

该薄膜,开始不会有光电发射,在若干次激光脉冲作用后,薄膜出现光电发射,并且光电流随光脉冲次数的增加而上升,随后,达到一个最大值之后逐渐趋于稳定。能够使 Ag—Ba—O 薄膜在初次使用时产生光电发射的激光能量密度称之为“初阈值”。这种上升现象正是这种光电转换薄膜可以大气暴露而又能在真空中不需再激活就能产生足以检测皮秒级激光脉冲信号的优良性能之所在。至于形成这种现象的原因,我们正在从激光作用于薄膜前后结构变化入手加以研究。

七、热助光电发射

这种薄膜也可以运用于探测高重复频率(82 兆赫)、低能量(单脉冲能量小于 10 纳焦)的激光脉冲,激光源由主动锁模氩离子激光器产生,激光波长为 514.5 纳米,脉冲宽度 100 皮秒,平均功率为 1 瓦,用透镜聚焦后照射于光电阴极上,光斑直径为 50 微米,光脉冲的占空比为 1:100。x 轴和 y 轴取对数坐标,光电发射强度与激光脉冲的能量密度的关系不是一条直线,它不能简单地由多光子发射解释,我们认为它可以由热助多光子发射来解释。我

宏观管理上的接轨,除了通过加快总体经济体制改革步伐,逐步强化市场在经济发展中的主导作用,大力构造自主经营、自负盈亏的企业机制,努力使我国的经济体制与国际规范靠拢之外,为了帮助企业尽快进入国际市场大循环,迫切需要在立法、价格、金融、市场中介等方面进行配套改革。首先,必须尽快制定《外贸法》、《反倾销法》等法规,在健全法制和制订、修改、废除法规过程中,应参照关贸总协定框架协议的合理部分,用足用好对发展中国家有特殊优惠的一些条款。其次,要加快价格改革,逐步实施市场性价格体制。如果不形成市场性价格体制,关税杠杆就失去着力点,关税减让承诺和使关税成为主要保证手段的承诺也就失去实际意义。再次,在金融、市场中介等领域,要大力建立新的经营机构,使其直接参与国际业务,实现股票、外汇、信贷、信息等各类专门市场的国际联网,为企业的国际化经营提供切实有效的服务。

同国际市场接轨是一项庞大的系统工程,除了上述六个方面的接轨外,还应包括技术、人才、信息等多方面的接轨。这项系统工程将引发出—系列深层次的接轨条件和接轨要求。因此,接轨的过程也就是深化改革、扩大开放的过程。可以相信,以“复关”为契机,加快我国经济与世界经济的接轨,将有力地促进中华民族的腾飞。(责任编辑 冷远猷)

们利用—般性的瑞恰德森(Richardson)公式来表示电流密度,

$$J = \sum J_n, \quad (4)$$

$$\text{式中, } J_n = a_n T_0^n A (1-R)^n T_0^n F(\delta), \quad (5)$$

表示单纯的热发射(即 $n=0$)和 n 光子发射($n>0$)效应产生的电流密度, A 和 a_n 是瑞恰德森常数,这些常数分别与 n 光子过程的量子矩阵元素有关, $F(\delta)$ 是佛勒(Fowler)函数, δ 是变量,

$$\delta = nh\nu - \Phi, \quad (6)$$

$h\nu$ 和 Φ 分别是光子能量和薄膜材料的光电子逸出功, T_0 是光照表面的温度。

当激光脉冲能量密度较小时,曲线的斜率 $n=1$;当激光脉冲能量密度升高后,热助多光子光电发射效应增强,曲线的斜率变大,进入 $n>1$ 的多光子发射。

Ag—Ba—O 薄膜是金属超微粒子埋藏于半导体基质中的全新型光电转换薄膜。它不含碱金属,有很好的稳定性,可以在大气中存放,再置入真空系统中,不需要激活就能产生足以检测皮秒激光脉冲信号的光电子发射。这种光电转换薄膜有很好的应用前景。(责任编辑 宋义荣)