

基于探针光调制的皮秒分辨X-ray探测方法与实验

王博 白永林 曹伟伟 徐鹏 刘百玉 缙永胜 朱炳利 候洵

Picosecond resolving detection method and experiment for ultrafast X-ray by modulation of an optical probe

Wang Bo Bai Yong-Lin Cao Wei-Wei Xu Peng Liu Bai-Yu Gou Yong-Sheng Zhu Bing-Li Hou Xun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 200701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.200701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.200701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

垂直向列型彩色滤光膜硅覆液晶微显示器的三维光学建模

Three-dimensional optical modeling of vertical alignment mode color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays

物理学报.2015, 64(14): 140701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140701>

用液芯柱透镜快速测量液相扩散系数-折射率空间分布瞬态测量法

Rapid measurement of the diffusion coefficient of liquids using a liquid-core cylindrical lens:a method for analysing an instantaneous diffusive picture

物理学报.2015, 64(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114205>

基于太赫兹时域光谱技术的伪色彩太赫兹成像的实验研究

False-color terahertz imaging system based on terahertz time domain spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114206>

全光固体条纹相机的理论及其静态实验研究

Theoretical and static experiment research on all optical solid state streak camera

物理学报.2014, 63(6): 060702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060702>

彩色滤光膜硅覆液晶微显示器的三维光学建模

Three-dimensional optical modeling of color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays

物理学报.2012, 61(4): 040701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.040701>

基于探针光调制的皮秒分辨 X-ray 探测方法与实验*

王博^{1)2)3)†} 白永林³⁾ 曹伟伟³⁾ 徐鹏³⁾ 刘百玉³⁾
 侯永胜¹⁾²⁾³⁾ 朱炳利³⁾ 候洵¹⁾

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

(2015年4月23日收到; 2015年6月12日收到修改稿)

高能密度物理研究中涉及许多单次皮秒现象的诊断测量, 然而对单次 X-ray 脉冲形状、X-ray 与激光脉冲的皮秒精度同步依然是极具挑战的课题. 传统行波选通分幅相机受电子渡越时间限制, 难以突破 40 ps 时间分辨极限. 本文围绕半导体中光学探针光的全光调制效应, 提出一种以低温 GaAs 材料为基础, 实现皮秒时间分辨 X-ray 探测的新方法, 详细阐述了该探测器的工作机理、器件参数设计和时间分辨能力. 通过飞秒激光打靶实验, 验证了其概念设计的正确性. 结果表明该探测器具有约 1.5 ps 时间响应和 10 ps 时间分辨能力, 通过材料优化可将时间分辨提升至 1 ps 以内.

关键词: 全光调制, 时间分辨, X-ray 探测

PACS: 07.07.Hj, 42.30.-d, 02.60.-x

DOI: 10.7498/aps.64.200701

1 引言

惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 是通过高能量、短脉冲激光加热并压缩核燃料, 实现热核点火并获取聚变能的方法. 在 ICF 研究中, 为了更好地了解激光与物质相互作用、束能量的吸收、等离子体加热和压缩、靶丸内爆动力学以及热核的点火燃烧等基础性课题, 超高时间分辨的诊断技术显得尤为重要^[1,2].

目前, ICF 研究中的超快物理诊断主要集中在 X-ray 行波选通分幅成像技术. 该分幅相机采用行波选通方法对 X-ray 进行高速分幅成像, 其工作原理如图 1 所示.

在微通道板 (microchannel plate, MCP) 上制作多条 X-ray 光电阴极, X-ray 辐射源通过微孔阵

列同时成像于微带阴极上. 当高压皮秒脉冲通过微带阴极进行传输时, 微通道板成像区在高压传输过程中被依次选通. X-ray 在选通区域通过阴极转换成光电子, 然后通过微通道板微孔的倍增效应将电子数进行放大, 最后通过近贴聚焦方式轰击到荧光屏上形成图像输出. 基于此种结构的分幅相机具有几十皮秒的时间分辨^[3,4], 因而被广泛用于惯性约束聚变研究中靶丸内爆均匀性、压缩对称性、体积压缩比、内爆速度等动力学特性的研究中. 然而, ICF 内爆速度一般在 10^7 cm/s 左右, 为避免图像的动态模糊, X-ray 分幅相机曝光时间必须小于 50 ps (10^{-12} s) 才能达到 5 μ m 空间分辨, 到点火驱动装置内爆阶段速度在 3×10^7 — 4×10^7 cm/s 左右, 要满足 5 μ m 空间分辨则需曝光时间小于 10 ps. 现有分幅相机受“电子渡越时间”和“高压窄脉冲”原理上的限制, 很难突破几十皮秒的时间分辨极限, 严

* 国家自然科学基金 (批准号: 11305259, 11327303) 和财政部重大科研装备仪器项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wbo@opt.ac.cn

重制约了内爆物理过程的诊断. 此外, 由于该技术存在电子线路, 在实际实验中强 X-ray、中子和伽玛射线的干扰下, 高压皮秒脉冲会受到很强的干扰, 从而影响信号判读. 为了满足未来 ICF 研究中对超快物理过程的诊断测量, 一种优于 10 ps 时间分辨能力的探测方法亟待解决.

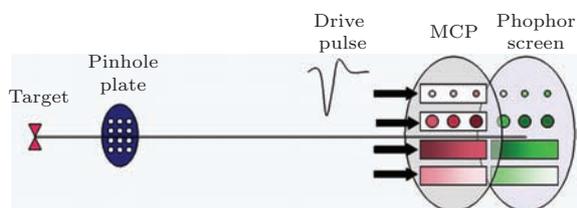


图1 (网刊彩色) 行波选通分幅相机成像原理示意图
Fig. 1. (color online) Schematic of travelling wave gated framing camera.

随着半导体非线性光学技术的发展与成熟, 各国科学家都在探索更高时间分辨的新型诊断技术. 其中, 最具代表性的是 2009 年《Nature》报道了一种利用“光学放大”与“串行时间编码”结合的方法, 实现成像频率 6.1 MHz, 快门时间 440 ps 的超高速成像系统^[5], 但目前主要应用于生物体微发光过程的诊断测试, 极端物理环境下的诊断能力还有待进一步研究. 此外, Chris 和 John^[6] 借鉴全光开关的原理, 通过设计全光偏转器对光束进行扫描成像, 在实验上首次获得皮秒量级的时间分辨, 然而该偏转器只能对 900 nm 附近的波段实现一维扫描成像, 无法满足 X-ray 的二维皮秒分辨成像需求. 2012 年美国隶弗莫尔实验室报道了一种基于半导体中探针光调制效应的 X-ray 探测技术, 实验室验证了该技术可用于 X-ray 的超高时间分辨探测^[7], 该研究小组又于 2013 年将该技术与 X-ray 调制光栅方法结合, 实现了固态全光分幅成像系统, 实验室首次获得 X-ray 的二分幅皮秒时间分辨成像^[8], 该探测器采用光栅结构, 将时间信息转换为空间展开的频率信息, 该方法只需探测器材料有皮秒级的时间响应(完成 X-ray 向探针光的快速转换), 对材料的复合时间没有苛刻要求, 然而其后续复杂的图像获取手段严重制约了该技术的实用性. 《Nature》最新的报道指出, GaAs 材料在 X-ray 脉冲激发下产生的多种能带效应会引起另外一束探针光透射强度的显著变化, 并依此研制可用于同步辐射光源的飞秒同步装置^[9]. 通过半导体工艺的改进可使载流子产生及复合时间缩短至百飞秒量级, 且可通过注入

载流子实现约 10^{-2} 的折射率调制, 理论上可根据该能带调制效应实现 X-ray 的皮秒时间分辨探测.

基于上述背景, 本文围绕半导体中 X-ray 辐射诱导折射率调制效应, 提出一种以低温 GaAs 材料为基础, 实现皮秒时间分辨 X-ray 探测的新方法, 并详细阐述了该方法的工作机理、探测器的参数设计和分辨能力, 给出探测器的理论设计模型, 并进行了实验验证, 未来可通过与光学分幅的结合, 实现在单次物理过程中对 X-ray 的多幅二维图像记录. 相比于传统的微通道板分幅成像技术, 该全光调制探测方法具有飞秒时间响应、皮秒时间分辨的优点, 并可推广至中子、伽马射线等强场粒子的超高时间分辨探测, 由此组成的超高速成像系统对 ICF 研究中内爆动力学、等离子体界面诊断具有重要的推进作用, 对超快现象和超短过程的测量及认知具有重要的应用价值, 可广泛应用于深空探测、核物理、高能物理等学科领域.

2 皮秒时间分辨 X-ray 探测模型

2.1 理论模型

基于半导体全光调制效应的皮秒时间分辨 X-ray 探测原理如图 2 所示.

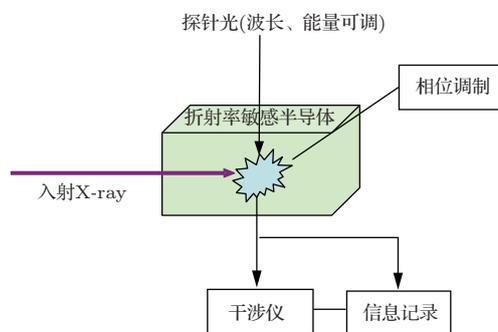


图2 (网刊彩色) 全光调制超快光探测器概念原理图
Fig. 2. (color online) Conceptual block diagram of ultrafast photodetector based on all optical modulation.

待测量的 X-ray 入射在探测器材料上, 由于 X-ray 的激发, 在材料内生产高能量的超热电子, 超热电子在几微米的弛豫过程中激发出大量的非平衡瞬态载流子, 这些载流子引起材料折射率的瞬态变化, 折射率的变化引起另外一束探针光的相位调制, 通过干涉方法将相位信息转换为可供记录的光强信息. 通过对光强信息的解析, 可反演出被测 X-ray 的强度变化过程.

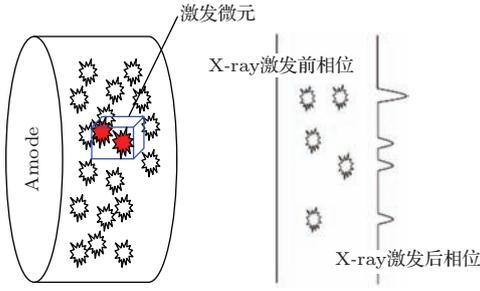


图3 X-ray辐射相位调制原理示意图

Fig. 3. Schematic of X-ray induced optical phase changes.

如图3所示,我们假设辐射通量为 φ_{xray} ,能量为 E_{xray} 的X-ray入射在探测器的有效面积 A_{mode} 内,其中某一微元 s_{rad}^3 内,由于引起的折射率变化为 $\langle\delta n\rangle$,则位相变化为

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} s_{\text{rad}} \langle\delta n\rangle. \quad (1)$$

因微元体积 s_{rad}^3 远小于探测器的面积 A_{mode} ,则探测器中有效折射率变化近似为

$$\langle\delta n\rangle = \frac{s_{\text{xray}}^2}{A_{\text{mode}}} \delta n, \quad (2)$$

其中 δn 是激发体积内总的折射率变化量.由全光调制的理论可知折射率的变化可通过(3)式求得[10]:

$$\delta n = CF(\rho)G(\lambda), \quad (3a)$$

$$F(\rho) = \frac{\rho/\rho_{\text{sat}}}{1 + \rho/\rho_{\text{sat}}}, \quad (3b)$$

$$G(\lambda) = \frac{\Gamma}{1 + \Gamma^2}, \quad (3c)$$

其中(3b)式描述了探测器的载流子饱和能力, $\Gamma = (\lambda_{\text{gap}} - \lambda)/\delta\lambda$ 是与带隙波长和探针光波长选取有关的参量, ρ 为X-ray激发的载流子浓度, ρ_{sat} 是仅与材料有关的饱和载流子浓度, λ_{gap} 是由材料决定的带隙波长, λ 为实验中选择的探针光波长,一般选择在带隙波长附近,对于GaAs材料,带隙波长约在870 nm左右. C 为与材料有关的常数,可通过实验标定获得.联立(1),(2)和(3)式,可得

$$\delta\varphi = \frac{2\pi C}{\lambda} \frac{s_{\text{xray}}^3}{A_{\text{mode}}} F(\rho)G(\lambda). \quad (4)$$

因为在X-ray单次脉冲入射下 $\rho \ll \rho_{\text{sat}}$,则

$$F(\rho) \doteq \frac{\rho}{\rho_{\text{sat}}}, \quad (5)$$

$$\rho s_{\text{rad}}^3 = \frac{E_{\text{xray}}}{E_{\text{e-h}}}. \quad (6)$$

将(5)式和恒等式(6)式代入(4)式可求探测器有效入射面积内相位的平均变化为

$$\overline{\delta\varphi} = \frac{2\pi C}{\lambda} \frac{E_{\text{xray}}}{\rho_{\text{sat}} E_{\text{e-h}}} \frac{G(\lambda)}{A_{\text{mode}}}, \quad (7)$$

其中, $E_{\text{e-h}}$ 为产生一对电子-空穴对所需的能量,对于GaAs约为10 eV[11].由(7)式可知,在材料和探针波长选定后,探测器相位的变化直接与入射X-ray能量变化关联.

为了将相位信息转换为可供记录的光强信息,同时提高探测灵敏度,我们给出如图4所示的探测器的设计模型.

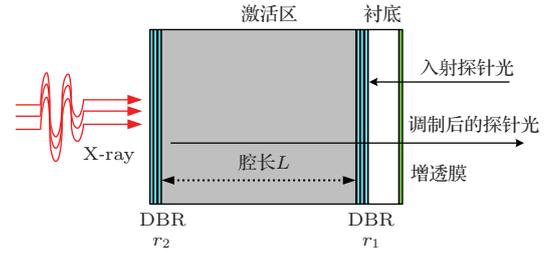


图4 (网刊彩色) 基于法布里-珀罗结构的探测器设计

Fig. 4. (color online) Schematic illustration of the baseline Fabry-Perot detector design.

探测器的结构设计主要由激活区和法布里-珀罗腔(Fabry-Perot cavity,简称F-P腔)两部分组成,其中激活区会因X-ray的入射产生明显的相位扰动,F-P腔主要将相位扰动转换为光强变化.激活区的长度设计为材料对X-ray吸收长度的4—5倍.本文前期的实验中,激活区设计为5 μm 厚的低温生长GaAs外延层,激活区前后端面通过外延生长GaAs/AlAs分布式布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)形成F-P腔,其前后镜的反射率是多层膜系多次反射的综合效果,且垂直指向激活区,分别记为 r_1 和 r_2 .由于X-ray的入射引起激活区低温GaAs材料折射率的瞬态变化,导致探针光传输相位的平均变化 $\overline{\delta\varphi}$,则探测器的反射率由最初的 R_0 变化为 R_t ,其中 R_0 由腔长 L 、前镜反射率 r_1 和后镜反射率 r_2 确定. r_2 理论上越接近100%越好,考虑到工艺实现,实际值一般大于90%即可, r_1 的设计考虑到探针光的出射问题,一般在70%左右.反射镜DBR采用多对1/4波长厚度的AlAs/GaAs制作.探测器的整体设计可通过合理的参数匹配设计,使其处于合适的静态工作点.探测器中选用低温生长GaAs作为激活区材料,主要是为了加速载流子复合时间,降低载流子寿命,达

到提高时间分辨的目的. 经 X-ray 激发后, 探测器对探针光的反射系数变为

$$R_t = \frac{R_0 + F \sin^2 \overline{\delta\varphi}}{1 + F \sin^2 \overline{\delta\varphi}}, \quad (8)$$

其中,

$$F = \frac{4\sqrt{r_1 r_2}}{(1 - \sqrt{r_1 r_2})^2}. \quad (9)$$

这样经 X-ray 调制后的探测器引起探针光反射光强的变化, 将相位信息转为可供记录的强度信息, 为后续反演 X-ray 强度随时间的变化过程提供依据.

2.2 时间分辨特性

探测器的时间分辨能力取决于折射率的变化快慢, 其本质是 X-ray 辐射注入光生载流子的寿命. 光生载流子的产生、复合过程可简单分为超热电子的产生、热电子的弛豫、载流子的复合三个阶段. 其中, 超热电子的产生与弛豫过程决定了探测器的响应时间, 载流子的复合过程决定了探测器的极限时间分辨. 从物理本质上讲, X-ray 入射吸收导致原子内层的电子激发出来, 形成超热电子. 该超热电子在很短的尺寸内与大量的晶格相互作用, 将大量的价带电子激发到导带高处(称为“热电子”), 这些新产生的热电子又通过电子-电子、电子-等离子体激元、电子-格波声子相互作用后, 弛豫并滞留在导带底, 整个过程持续时间在飞秒或皮秒时间尺度. 我们通过飞秒泵浦-探针实验测量了该探测器的时间响应曲线, 实验结果如图 5 所示.

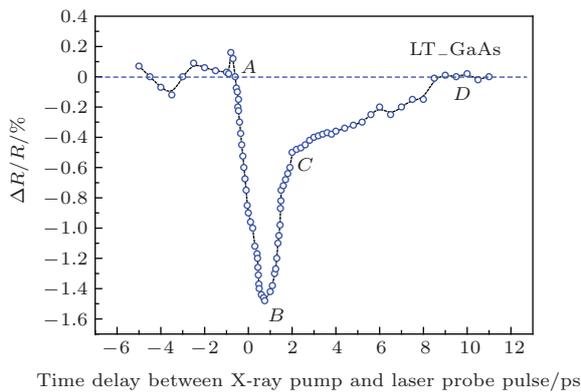


图 5 基于低温 GaAs 材料的探测器时间分辨测试曲线

Fig. 5. Temporal characteristics of the detector based on low temperature growth GaAs.

图 5 中的曲线大致可分为三个阶段, 从 A 到 B 这段时间是超热电子的产生与冷却过程, 也即由于

X-ray 的注入引入的载流子的过程, 持续时间大约在 1.5 ps; B 点之后是载流子的回复过程, 它由一个快速回复过程 BC 和一个慢速回复过程 CD 组成, 大约在 10 ps. 由于探测器激活区中采用低温 GaAs 而引入缺陷态, 缺陷态对载流子复合起了很大作用, 因此在 10 ps 后就基本没有光生载流子滞留在导带内, 适合作为亚皮秒时间分辨探测器的激活区. 虽然可通过半导体工艺将载流子寿命缩短至皮秒量级以下, 但过短的载流子寿命会影响探测器的探测灵敏度, 在实际设计中应根据需求折衷考虑.

此外, 探针光在激活区的传输时间也影响着探测器的时间分辨. 因实验室缺少合适的可调谐多波长脉冲激光器, 本文选用中心波长为 800 nm 的钛宝石飞秒脉冲光作为探针光, GaAs 的折射率按 $n = 3.28$ 计算, 探测器的腔体长度 $L = 5 \mu\text{m}$, 若探针光完全可到达探测器前反射镜, 则最大传输时间为 $\Delta t = 2Ln/c \doteq 0.11 \text{ ps}$, 该设计时间远小于载流子的复合时间, 所以探测器的时间分辨主要取决于载流子寿命.

3 实验结果与讨论

为了验证探测器概念设计的正确性, 我们基于 3 TW 激光平台和激光打靶产生 X-ray 源进行了实验测试, 简化的实验装置如图 6 所示.

从飞秒锁模振荡器输出的中心波长为 800 nm 超短脉冲经再生放大产生能量约 300 μJ , 脉宽约 500 fs 的输出光, 然后经再次放大、压缩产生脉宽 56 fs, 能量 100 mJ 的飞秒光进入真空靶室, 用于产生 X-ray. 再生放大器输出的部分光经光谱滤波后进入分束器, 一路进入探测器, 经调制后反射进入 PIXIS 科学级 CCD 进行成像记录, 另一路进入 PIN 光电探测器与超宽带示波器, 用于监测探针光自身强度的起伏涨落. 实验中采用飞秒激光轰击 Al 靶材产生中心能量约 1.4 keV 的软 X-ray 进行探测器的调制验证. 激发产生的 X-ray 进入探测器前端面, 在入射端口放置与光敏面可平行移动的刀口, 用于遮挡部分入射 X-ray, 形成调制对比度. 另外实验中设有同步装置, 用于调节探针光与激发 X-ray 源之间的延迟.

图 7 给出了实验中 CCD 的记录图像. 图 7(a) 为无 X-ray 入射激发时的探针光反射强度; 图 7(b) 为有 X-ray 激发时的探针光反射强度; 图 7(c) 为光敏面前有刀口半遮挡时对应的探针光反射强度.

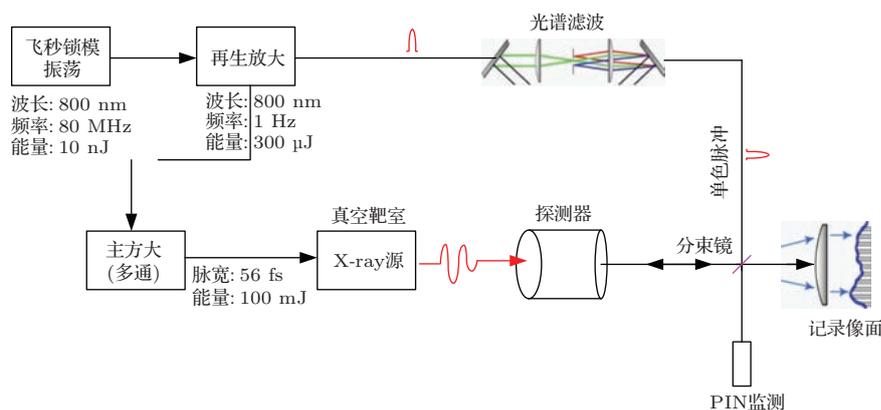


图6 (网刊彩色) 光学实验装置示意图

Fig. 6. (color online) Block diagram of the optical experiment.

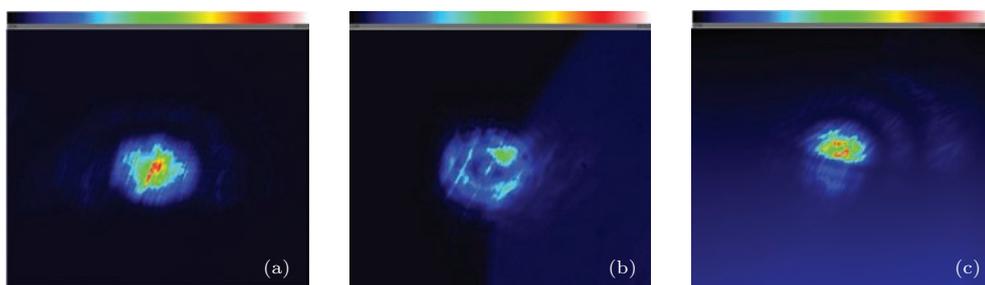


图7 (网刊彩色) 不同刀口遮挡时 X-ray 激发下的探针光强度变化 (a) 无 X-ray 激发时反射强度; (b) 有 X-ray 激发时反射强度; (c) 50% 遮挡 X-ray 时反射强度

Fig. 7. (color online) The transient X-ray induced optical reflectivity changes based on different knife-edge: (a) All blocking of the pump; (b) no blocking of the pump; (c) 50% blocking of the pump.

从图7中可以明显观察到因为 X-ray 的入射激发, 引起探针光反射强度的变化, 实验证明 X-ray 的激发的确起到对探针光强度的调制作用. 同时, 我们也注意到探测器存在较大的响应不均匀性. 在多次实验中出现有些地方反射增强, 有些地方反射减弱的非一致性, 可以归结为激活区本身厚度和 DBR 反射镜的空间非均匀性造成的, 未来经过后续工艺的改进可以避免响应不一致的缺陷.

下面我们从物理本质上分析该调制现象. 首先, X-ray 入射吸收导致 GaAs 原子内层的电子激发出来, 产生一个能量非常大的“超热电子”, 该“超热电子”在微米范围内与大量的晶格相互作用, 将大量的价带电子激发到导带高处(称为“热电子”), 这些热电子通过电子-电子、电子-等离子体激发元、电子-格波声子相互作用后弛豫停止在导带底, 整个过程持续时间在飞秒或皮秒级. 同时, 在原子内层留下的空位, 导致原子状态的不稳定, 外层电子填充内层空位放出的能量产生荧光或导致俄歇电子, 而在 GaAs 这种轻元素里更主要的是俄歇过程, 产生的多个俄歇电子导致更多的导带电子和价带

空穴, 形成很高的载流子浓度. 这样激发的电子可将导带底填满到一定程度, 相比导带未填满时, 价带电子需要更高的能量才能跃迁到导带内, 这样就引起探针光的吸收下降, 导致透射增强, 反射变弱.

由于 X-ray 的波长极短, 其吸收直接与波长和原子序数相关. 实验中 Al 靶材的 K_{α} 线中心能量约为 1.4 keV 的 X-ray, 密度为 5.32 g/cm^3 GaAs, 由公式 $\alpha = (\mu_m(\text{Ga}) + \mu_m(\text{As})) \times \rho$ 计算可得吸收长度约为 $1.02 \mu\text{m}$. 经衰减入射到探测器感光面上的 X-ray 脉冲能量约为 $2 \mu\text{J}$, 假设跃迁出来的内层电子, 经过俄歇效应, 最终由外层价带电子形成的电子-空穴对每对能量约为 10 eV, 则共有约 1.3×10^{12} 对电子-空穴对. 入射在材料表面形成的光斑大小约为 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, 假定 X-ray 在 $5 \mu\text{m}$ 厚的材料内部全部被吸收, 则单脉冲形成的载流子浓度约为 $2.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 本课题组前期的研究表明, 当光注入载流子浓度达到 10^{18} cm^{-3} 时, 折射率变化的值可以达到 10^{-2} 量级^[12], 足以引起探针光显著的相位调制.

由于实验条件的限制, 缺少合适的脉冲 X-ray

源, 该实验未能在脉冲 X-ray 入射条件下对探测器的时间分辨能力进行验证, 但前期的在紫外波段的光学泵浦-探针实验表明该探测系统具有约 10 ps 的时间分辨能力. 通过材料工艺(如掺杂、强场轰击、低温控制)降低复合寿命, 提高时间分辨, 以及构建脉冲 X-ray 源进行动态实验将是后续工作的重点.

4 结 论

基于 GaAs 探针光调制效应的 X-ray 探测技术是一种创新型超高时间分辨诊断技术, 具有飞秒响应、皮秒分辨、结构简单等优点. 本文以低温 GaAs 材料为着力点, 从物理本质上分析了 X-ray 脉冲激发下的载流子超快动力学特性, 即超热电子的产生、冷却、弛豫和复合过程, 理论上通过缺陷能级的引入可实现优于 1 ps 的时间分辨. 另外, 给出了实现皮秒时间分辨 X-ray 探测的理论方法与探测器模型, 验证了目前研制探测器的时间分辨和成像特性. 结果表明, 该探测器预期可实现对 X-ray 的皮秒时间分辨二维成像, 探测器的响应不均匀性和动态特性测试将是下一步研究的工作重点.

感谢王向林博士在光学实验中提供的帮助, 感谢超快诊断课题组各位工艺人员在材料生长中提供的帮助和支持.

参考文献

- [1] Hu X, Jiang S E, Cui Y L, Huang Y X, Ding Y K, Liu Z L, Yi R Q, Li C G, Zhang J H, Zhang H Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1447 (in Chinese) [胡昕, 江少恩, 崔延莉, 黄翼翔, 丁永坤, 刘忠礼, 易荣清, 李朝光, 张景和, 张华全 2007 物理学报 **56** 1447]
- [2] Wang R R, Jia G, Fang Z H, Wang W, Meng X F, Xie Z Y, Zhang F 2014 *Chin. Phys. B* **23** 113201
- [3] Pawley C J, Deniz A V 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 1286
- [4] Schneider M B, Holder J P, James D L, Bruns H C, Celeste J R, Compton J 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 321
- [5] Goda K, Tsia K K, Jalali B 2009 *Nature* **458** 1145
- [6] Chris H S, John E H 2010 *Opt. Lett.* **35** 1389
- [7] Baker K L, Stewart R E, Steele P T, Vernon S P, Hsing W W 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 031107
- [8] Baker K L, Stewart R E, Steele P T, Vernon S P, Hsing W W, Remington B A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 151111
- [9] Durbin S M, Clevenger T, Graber T, Henning R 2012 *Nature Photon.* **6** 111
- [10] Gibbs H M 1995 *Optical Bistability: Controlling Light with Light* (Orlando: Academic Press) pp135-137
- [11] Ziaja B, London R A, Hajdu J 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 033514
- [12] Liang L L, Tian J S, Wang T, Li F L, Gao G L, Wang J F, Wang C, Lu Y, Xu X Y, Cao X B, Wen W L, Xin L W, Liu H L, Wang X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 060702 (in Chinese) [梁玲亮, 田进寿, 汪韬, 李福利, 高贵龙, 王俊锋, 王超, 卢裕, 徐向晏, 曹希斌, 温文龙, 辛丽伟, 刘虎林, 王兴 2014 物理学报 **63** 060702]

Picosecond resolving detection method and experiment for ultrafast X-ray by modulation of an optical probe*

Wang Bo^{1)2)3)†} Bai Yong-Lin³⁾ Cao Wei-Wei³⁾ Xu Peng³⁾ Liu Bai-Yu³⁾
Gou Yong-Sheng¹⁾²⁾³⁾ Zhu Bing-Li³⁾ Hou Xun¹⁾

1) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Key Laboratory of Ultrafast Diagnostic Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 23 April 2015; revised manuscript received 12 June 2015)

Abstract

Diagnostic measurement of single picosecond event in high energy density physics, laser fusion, plasma radiation, and combustion, is of great importance. However, the measuring of the shape of the single X-ray pulse and the synchronization of X-ray and the laser pulse in picosecond resolution is still a great challenge. Restricted by the transit time of electrons, the time-resolution limit of a conventional framing camera based on the microchannel plate is 40 ps. Centered on the full-optical modulation effect of the light-probe, a novel method for X-ray detection of picoseconds temporal resolution based on low temperature GaAs is proposed in this work. The basic physical mechanism of the detector can be explained in both macroscopical and microcosmic ways. In the macroscopical way, the X-ray radiation absorption in the sensor material produces a transient, non-equilibrium electron-hole pair distribution that results in a transient differential change of the local refractive index, which is then sensed by the reflectivity changes of the optical probe beam. In the microcosmic way, X-ray absorption creates photoelectrons and the core level holes are subsequently filled through Auger or fluorescence processes. These excitations ultimately increase conduction and valence band carriers that perturb optical reflectivity.

To verify the proposed X-ray detection method, a Fabry-Perot detector is designed, which consists of a 5 μm thick GaAs layer surrounded by a GaAs/AlAs distributed Bragg reflector. The test is carried out on a femtosecond laser facility, where the X-ray source is produced by focusing the 56 fs Ti: Sapphire facility laser, with a central wavelength of 800 nm, onto an aluminum foil. Then the X-ray pulse induces a transient optical reflectivity change in GaAs, which is a powerful tool for establishing the high-speed X-ray detection.

The experimental results indicate that this technology can be used to provide X-ray detectors with a temporal resolution of tens of picoseconds. By optimizing the material, the temporal resolution can be enhanced to be less than 1 ps. Through further development, this X-ray detector could provide an insight into previously unmeasurable phenomena in many fields. Future work will focus on developing much faster devices characterizing both the rise and fall time and imaging array technology.

Keywords: all optical modulation, temporal resolution, X-ray detection

PACS: 07.07.Hj, 42.30.-d, 02.60.-x

DOI: 10.7498/aps.64.200701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11305259, 11327303) and the Ministry of Finance Major Research Equipment Project, China.

† Corresponding author. E-mail: wbo@opt.ac.cn