

一种适于条纹相机的新型组合红外阴极^{*}

范文慧¹⁾ 侯 洵²⁾ 王永昌¹⁾ 杜 力²⁾ 龚 平²⁾ 刘 英²⁾ 过晓晖²⁾

(¹⁾ 西安交通大学理学院现代物理研究所, 陕西, 西安, 710049

(²⁾ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西, 西安, 710068)

摘要 利用电子俘获材料的快速红外上转换特性, 将其制成红外上转换屏与可见光阴极耦合构成了一种适用于条纹相机的新型组合红外阴极, 测量表明: 它能将可见光条纹相机的波长响应范围延伸至 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$, 而且时间分辨率优于 24ps 、红外最小可探测能量密度优于 $4.8 \times 10^{-9} \text{J}/\text{mm}^2$.

关键词 电子俘获材料, 红外上转换屏, 组合红外阴极, 条纹相机.

引言

随着光纤通讯、激光核聚变、生命科学、物理学与化学研究超快现象的需要, 扩展变像管条纹相机的波长响应范围一直是条纹相机的重点研究方向之一, 主要体现在研制对红外、X 射线乃至核辐射灵敏而且具有快速响应的光电阴极方面. 为了研究红外过程, 人们在红外阴极方面已做了大量工作, 但红外电阴极不仅投资大、制作成本高, 而且量子效率、稳定性、使用寿命等均不如可见光阴极^[1].

我们研制的电子俘获材料^[2~4] (ETM-Electron trapping material) 作为红外上转换的一种途径, 具有线性范围大、量子效率高^[5]、红外响应快、响应范围宽 ($0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$)、使用方便 (室温下工作)、热稳定性好、造价低等优点. ETM 制作的红外上转换屏作为一种极为方便的波长转换器件, 可用于快速红外过程研究, 利用它将可见光探测器 (如条纹相机) 的使用范围拓展到近红外区是一项非常有意义的工作. 作为尝试, 我们应用 ETM 制作的红外上转换屏与对可见光敏感的多碱光电阴极耦合构成组合式红外阴极, 利用 ETM 屏的快速红外→可见特性, 将近红外光转换为可见光, 然后用可见光光电阴极进行探测. 通过对这种新型组合式红外阴极的时间分辨率、最小可探测能量密度、空间分辨率等参数进行测量, 表明这种组合式阴极具有红外响应范围宽、时间分辨率高等显著特性, 是一种适于条纹相机使用的新型组合红外阴极.

1 原理

在多种超快测量技术中, 条纹相机因能同时获得单次光脉冲的一维空间信息和时间结构信息而具有特殊地位^[6], 成为研究从 $10^{-8} \sim 10^{-13} \text{s}$ 范围内超快现象的主要手段, 其核心部件是由光电阴极、电子光学系统及荧光屏组成的变像管.

* 国家攀登计划基金 (编号 59308006) 资助项目

稿件收到日期 1998-03-22, 修改稿收到日期 1998-08-14

1.1 组合红外阴极

传统的 Ag-O-Cs 阴极及 III-V 族半导体负电子亲和势(NEA)光电阴极普遍存在制作成本高、量子效率低、稳定性差、使用寿命短等缺点,为此,我们在对 ETM 快速红外上转换特性研究^[7]的基础上,采用间接测量原理,先利用 ETM 屏^[8]将需探测的近红外光转换为可见光,再用对可见光敏感的光电阴极进行探测.与采用直接探测原理的红外阴极相比,该组合阴极具有制备工艺简单、使用寿命长、响应更高、测量范围宽等诸多优点.为了减少光弥散,提高耦合效率和空间分辨率,选择光纤面板(FOP)作 ETM 屏的输出窗,并用 FOP 将 ETM 屏与可见光阴极耦合构成组合阴极.选用的可见光阴极不仅要具备灵敏度高、暗电流小、面电阻小、时间响应快等特点,而且其光谱响应与制作上转换屏所用 ETM 的发射光谱有良好的匹配性.我们选用 CaS:Eu,Sm 和 CaS:Ce,Sm 制作 ETM 屏,它们的红外上转换发射光谱峰值分别位于 672nm 和 504nm^[3],由于 S-20 阴极不仅具备暗电流小、量子效率高、时间响应快等特点,而且在 0.4~0.7 μm 波段内具有较高的光谱灵敏度^[9],对这两种 ETM 屏的兼容性好而且易制作,故选用 S-20 阴极作为组合红外阴极中的可见光阴极.

1.2 红外扫描变像管

用于研究超快现象的变像管是一种光电成像器件,它利用电子光学技术与脉冲选通、偏转扫描等技术传递和记录瞬变的光学图像,从而为被研究的快速、不重复瞬变现象提供空间和时间信息.短聚焦聚焦变像管具有动态范围大、时间分辨率高及结构相对简单等优点^[10,11],对可见光的时间分辨率 $\sim 600\text{fs}$,将它与组合红外阴极配合构成了 ps 红外扫描变像管(见图 1).它由组合红外阴极、狭缝阳极、行波偏转器、聚焦线圈和荧光屏构成,工作时阴极加负电压,阳极和荧光屏接地.正对狭缝阳极的阴极发射的光电子在聚焦磁场作用下在荧光屏上成一狭缝像,该狭缝像在行波偏转器偏转场作用下在荧光屏上扫描,从而给出光强随时间的变化.

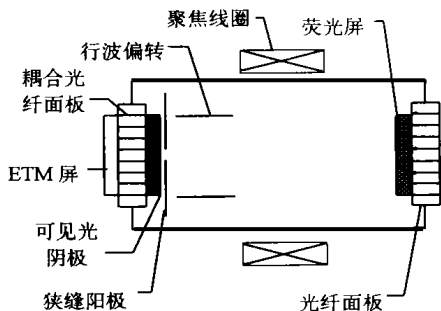


图 1 皮秒红外扫描变像管结构图
Fig. 1 Picosecond infrared image converter

2 结果与讨论

利用 ETM 屏与可见光阴极耦合构成组合式红外阴极,将可见光条纹相机的测量范围拓展到近红外区是一项非常有意义的工作.为了充分了解这种组合式红外阴极的性能,我们对其时间分辨率、最小可探测能量密度等参数进行了测量.

2.1 时间分辨率

时间分辨率是反映条纹相机性能的重要指标,其测量装置如图 2 所示.在经过标定的 Nd:YAG 激光器产生的 ps 红外单脉冲激光激励下,采用双光束入射测量方案,利用 ps 可见光条纹相机测量了组合阴极的时间分辨率,测量结果如图 3 所示,其结果表明:在波长 1.064 μm 、脉宽 19.2ps 的超短脉冲激光作用下,这种组合阴极的时间分辨率优于 24ps.

由于入射激光脉宽与组合阴极时间分辨率相近,因此,为了更准确测量这种具有 ps 量级时间分辨率的阴极,最好采用 fs 量级红外激光作为测试光源以消除光源对测量结果的影

响. 进一步的实验和分析正在进行, 将另文报道.

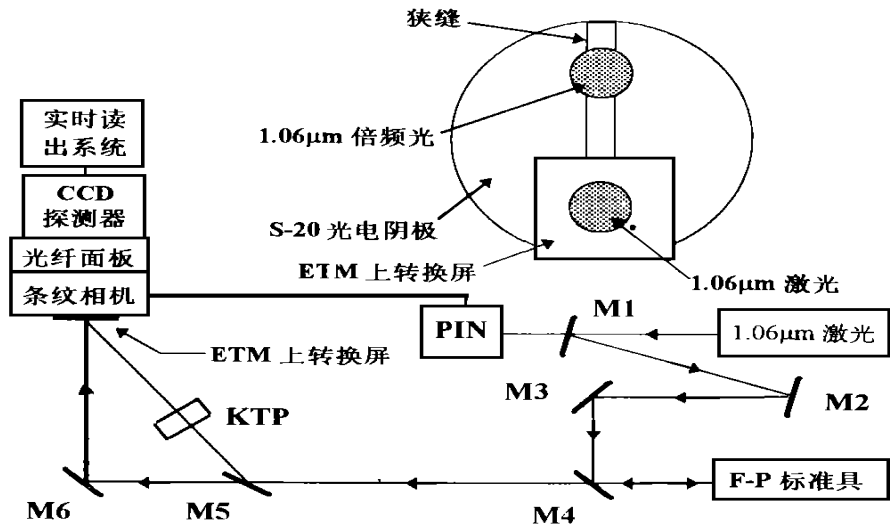


图 2 组合红外阴极时间分辨率测量装置
Fig. 2 Schematic of experimental arrangement for time resolution of the ETM-based combined photocathode

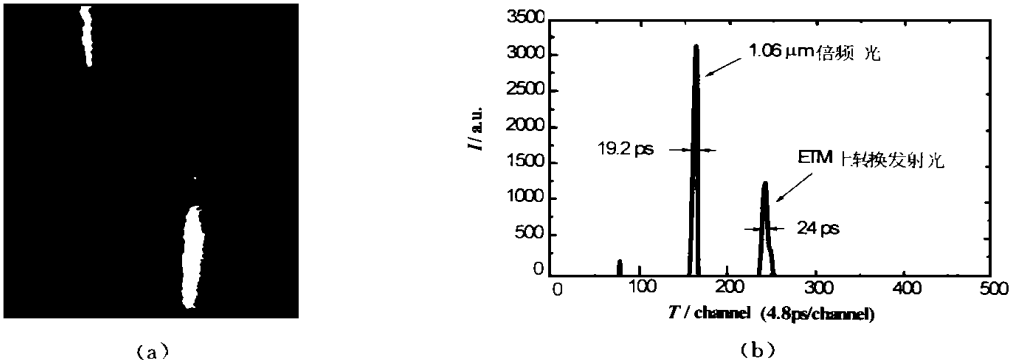


图 3 组合红外阴极时间分辨率测量结果
(a) 时间分辨率条纹像 (b) 相应的强度分布
Fig. 3 Measured result of time resolution for the ETM-based combined photocathode
(a) Time-resolved streak image (b) The corresponding intensity profile

2.2 最小可探测能量密度

对条纹相机而言, 最小可探测能量密度反映了相机对微弱光信号的探测能力. 作者选用对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器输出的 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 超短激光脉冲, 采用参考光和测量光同时入射的测量方案(见图 4), 利用 1 台可见光条纹相机对这种组合红外阴极的最小可探测能量密度进行了测试(见图 5). 结果表明: 在可见光条纹相机最小可探测能量密度 $J_{\min}=8.3\times 10^{-10}\text{ J/mm}^2$ 条件下, 测得这种新型组合红外阴极的最小可探测能量密度优于 $4.8\times 10^{-9}\text{ J/mm}^2$

就条纹相机而言,变像管光电阴极的发射具有统计涨落现象,而且这种现象在时间分辨率为 ps 或 fs 时非常严重.若发射的光电流密度太小,统计涨落的噪声就会淹没要研究的光信号,为此,光电流密度必须达到能在荧光屏上建立目标所具有的最小灰度等级.假设要求的灰度等级 n ,时间分辨率为 Δ_e ,电子光学系统的放大倍率为 m ,动态空间分辨率为 δ 则此时需要的最小光电流密度^[9]为

$$J_{\min} = \frac{e \sum_{i=1}^n m^2 N_i}{n \Delta_e} \tag{1}$$

式(1)中 N_i 表示灰度等级为 i 的像素所要求对应的光电阴极像素在分辨率为 Δ_e 内发射的光电子数.若不因统计涨落现象将相邻两灰度等级淹没,则 N_i 应满足

$$N_{i+1} - \frac{1}{2} \overline{N_{i+1}} > N_i + \frac{1}{2} \overline{N_i}. \tag{2}$$

除光电阴极发射的统计涨落外,荧光屏噪声和系统的调制传递函数对最小可探测能量密度影响最大.故最小可探测能量密度首先由所需的临界信噪比确定.若输出信噪比已达到临界值,而记录系统由于灵敏度低而无法记录,则最小可探测能量密度由记录系统确定.这样,实测时对临界信噪比的估计、荧光屏的噪声和系统的调制传递函数将对测量结果有较大影响.因此,在实际应用中,这类由 ETM 与可见光探测器构成的近红外探测器的灵敏度主要取决于所选用的可见光探测器的灵敏度.以条纹相机为例,日本 Hamamatsu TV. 有限公司研制的 C1370 小型条纹相机系统的最小可探测能量密度已达 $6 \times 10^{-15} \text{ J/mm}^2$ ^[12],如果将

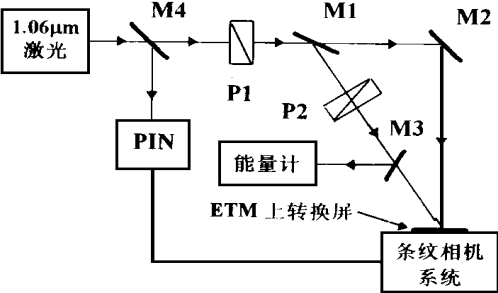
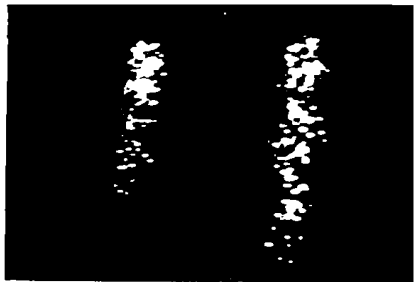
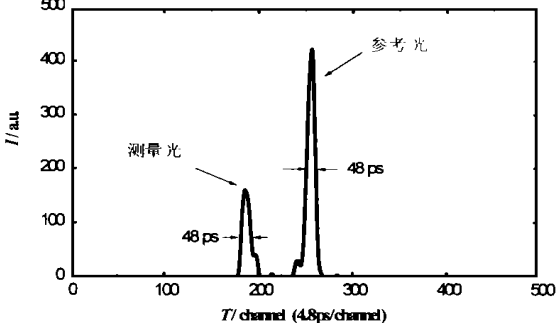


图 4 组合红外阴极最小可探测能量密度测量装置
Fig. 4 Schematic of experimental arrangement for minimum detectable energy density of the ETM-based combined photocathode



(a)



(b)

图 5 组合红外阴极最小可探测能量密度测量结果
(a) 最小可探测能量密度条纹像 (b) 相应的强度分布

Fig. 5 Measured result of minimum detectable energy density for the ETM-based combined photocathode

(a) Minimum detectable density streak image (b) The corresponding intensity profile

ETM 转换屏与这种可见光条纹相机组合成一台红外条纹相机，其最小可探测能量密度会大大降低。

当然，ETM 的红外转换效率也是一个重要的制约因素。由于条件所限，我们仅用 Nd:YAG 产生的 1.064 μm 激光进行了研究，而电子俘获材料 CaS:Eu,Sm 的红外激励峰值波长 $\sim 1165\text{nm}$ ，如果通过改变激活剂种类，使 ETM 红外激励峰值波长接近所需探测的红外光或选择输出波长 $\lambda = 1.20\text{ }\mu\text{m}$ 的 InGaAsP 半导体激光器作为激励光源进行研究，势必大大提高这种组合阴极的灵敏度。

此外，组合阴极中 ETM 屏与可见光阴极的耦合也是一个值得注意的问题。ETM 膜层太薄或太厚都会影响测量结果，而且测量时 ETM 是否被激发到饱和状态也是测量中须注意的问题。因此，测量结果是多次重复的平均值。测量系统中涉及的能量计 $\text{R}_j\text{-7200}$ 、分束镜 M^3 的透、反射率等因素引起的误差对结果的影响很小。

2.3 空间分辨率

条纹相机的空间分辨率不仅反映相机对空间光信息的分辨能力，而且直接影响相机的时间分辨率，是反映相机性能的重要参数。组合式红外阴极的空间分辨率主要取决于 ETM 上转换屏的空间分辨率，对于采用微通道板(MCP)制作的 ETM 屏，经分辨率板测试表明其空间分辨率达到 30 lp/mm。

3 总体结构和工作过程

我们利用 ETM 的快速红外上转换特性，试制了一种基于 ETM 的组合红外阴极，并将它应用于 ps 红外条纹相机的研制中，总体结构如图 6 所示，其基本工作过程是：被测光信号经变像管光电阴极前的输入光学系统在组合阴极上成像，同时，快速光电二极管(PIN)接收被测光信号，产生电触发脉冲，通过延时装置控制变像管扫描电路的启动时刻，适当调整延时器，使 PIN 产生的电触发信号与到达条纹相机的待测光信号同步，从而适时触发扫描电路工作，使入射到组合阴极上的待测光信号经选通、偏转、扫描等过程，在荧光屏上形成条纹像，经中继透镜组被 CCD 摄取，随后由实时读出系统对条纹像进行视频数字化分析、处理，给出所需测量值。

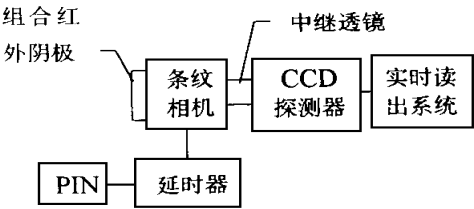


图 6 皮秒红外条纹相机总体结构框图
Fig.6 Overall schematic diagram of the structure of picosecond streak camera

REFERENCES

1 Gex F, Bauduin P, Hammes C, et al. SPIE, 1984, 491:276~280
2 FAN Wen-Hui, WANG Yong-Chang, GONG Ping, et al. Acta Photonica Sinica(范文慧,王永昌,龚平等,光子学报), 1997, 26(9) :803~808
3 FAN Wen-Hui, WANG Yong-Chang, DU Li, et al. Acta Optica Sinica(范文慧,王永昌,杜力等,光学学报), 1998, 18(6) :813~817
4 FAN Wen-Hui, WANG Yong-Chang, LIU Ying, et al. Acta Optica Sinica(范文慧,王永昌,刘 英等,光学学报), 1998, 18(5) :591~595

- 5 GONG Ping, HOU Xun·*J·Infrared Millim·Waves*(龚 平, 侯 洵, 红外与毫米波学报), 1995, **14**(2) : 156~158
- 6 Wang D H·*SPIE*, 1988, **1032**:2~5
- 7 FAN Wen-Hui, WANG Yong-Chang, HOU Xun, *et al·Chinese Journal of Lasers*(范文慧, 王永昌, 侯洵等, 中国激光), 1999, **26**(1) : (To be published)
- 8 FAN Wen-Hui, HOU Xun, WANG Yong-Chang, *et al·Chinese Journal of Luminescence*(范文慧, 侯洵, 王永昌等, 发光学报), 1998, **19**(4) :
- 9 XU Da-Lun·*High speed photograph on streak camera*, Beijing:Science Press(徐大纶·变像管高速摄影, 北京:科学出版社), 1990, 43:222
- 10 Babushkin A V, Jaeger E, Postovalov V E, *et al·SPIE*·, 1988, **1032**:75~77
- 11 Feldman G G, Ilyna T A, Korjenevitch I N, *et al·SPIE*, 1990, **1358**:497~499
- 12 Tsuchiya Y·*Picosecond*, 1983, **14**(6) :6

A KIND OF NOVEL ETM-BASED COMBINED PHOTOCATHODE FOR INFRARED STREAK CAMERA^{*}

FAN Wen-Hui¹⁾ HOU Xun²⁾

WANG Yong-Chang¹⁾ DU Li²⁾ GONG Ping²⁾ LIU Ying²⁾ GUO Xiao-Hui²⁾

⁽¹⁾Institute of Modern Physics, School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

²⁾Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract Using the characteristics of electron trapping material (ETM) for the rapid infrared upconversion, a kind of novel combined infrared photocathode was made by coupling ETM-based infrared upconversion screen with visible photocathode. The present experiment showed that the combined photocathode is able to extend spectral sensitivity to $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ and make time resolution better than 24ps , and minimum detectable energy density less than $4.8 \times 10^9 \text{ J/mm}^2$.

Key words electron trapping material, infrared upconversion screen, combined photocathode, streak infrared camera.

^{*} The project supported by the National Climbing Program of China

Received 1998-03-22, revised 1998-08-14