

激光高能X射线成像中探测器表征与电子影响研究

张天奎 于明海 董克攻 吴玉迟 杨靖 陈佳 卢峰 李纲 朱斌 谭放 王少义 闫永宏 谷渝秋

Detector characterization and electron effect for laser-driven high energy X-ray imaging

Zhang Tian-Kui Yu Ming-Hai Dong Ke-Gong Wu Yu-Chi Yang Jing Chen Jia Lu Feng Li Gang
Zhu Bin Tan Fang Wang Shao-Yi Yan Yong-Hong Gu Yu-Qiu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 245201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.245201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.245201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

强脉冲离子束辐照金属材料烧蚀产物特性分析

Characteristics of metal ablation product by intense pulsed ion beam irradiation

物理学报.2017, 66(5): 055202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.055202>

kHz 激光与固体靶相互作用产生的X射线源

X-ray source produced by laser solid target interaction at kHz repetition rate

物理学报.2013, 62(20): 205204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205204>

超相对论强度激光与薄膜靶作用中0.4 nm以下X射线阿秒脉冲的产生

Generation of attosecond X-ray pulse of wavelength below 0.4 nm from the interaction of ultra-relativistic intense lasers with thin foil targets

物理学报.2013, 62(12): 125206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.125206>

飞秒激光与固体靶相互作用中光辐射时间特性的实验研究

Experimental study of time characteristic of optical radiation in femtosecond laser interaction with solid targets

物理学报.2012, 61(9): 095201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.095201>

超强激光与Ar团簇相互作用中X射线的研究

X-ray source generation under laser-Ar cluster interaction

物理学报.2012, 61(7): 075206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075206>

激光高能X射线成像中探测器表征 与电子影响研究*

张天奎¹⁾ 于明海¹⁾ 董克攻¹⁾ 吴玉迟¹⁾²⁾ 杨靖¹⁾ 陈佳¹⁾ 卢峰¹⁾
李纲¹⁾ 朱斌¹⁾ 谭放¹⁾ 王少义¹⁾ 闫永宏¹⁾ 谷渝秋^{1)2)†}

1)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

2)(上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

(2017年6月25日收到; 2017年8月17日收到修改稿)

基于激光尾场加速电子的高能X射线源具有高光子能量与小源尺寸的特点, 在高空间分辨无损检测方面发挥着十分重要的作用. 在X光机上测量了CsI针状闪烁屏、锗酸铋(BGO)闪烁阵列与DRZ闪烁屏的本征空间分辨率, 并模拟了三类探测器对高能X射线的能量沉积响应, 其中CsI针状闪烁屏的空间分辨率高达8.7 lp/mm. 采用Ta转换靶产生的高能X射线开展透视照相, 能够分辨最高面密度33.0 g/cm²的两层客体结构. 开展了X射线照相、X射线与电子混合照相以及电子照相三种情况的比对实验, 在X射线产额不足或探测效率不够情况下采用X射线与电子混合透视照相的方案, 以牺牲对比度为代价, 能较大幅度地提高图像信号强度.

关键词: 激光尾场加速, 高能X射线, 无损检测, 成像探测器

PACS: 52.38.Ph, 52.59.-f, 52.70.La, 52.59.Px

DOI: 10.7498/aps.66.245201

1 引言

自Tajima和Dawson^[1]提出通过高强度激光驱动等离子体波来加速电子, 即激光尾场加速机制以来, 国内外已采用气体喷嘴^[2-4]、放电毛细管^[5,6]、等离子体密度梯度注入^[7,8]、双束激光束对撞^[9,10]等方案, 研究获得了能量几十至GeV级的高能电子束^[11-15]. 当前大量研究致力于从改进横向发射度^[16]、能散^[9]等方面, 提高激光尾场电子束品质. 利用激光尾场电子产生高能光子主要有两种方式: 一种是电子与固体靶相互作用产生轫致辐射^[17-19], 另一种是电子与第二束激光作用产生汤姆孙散射光子^[20,21], 获得的高能光子能够应用于驱动巨偶极共振^[22]、天然铀中光致裂变^[23]等研究.

特别是由尾场电子通过轫致辐射机制产生的高能X射线具备高光子能量、小源尺寸及低剂量(辐射防护容易满足)的优点, 在高空间分辨无损检测方面具有十分重要的应用, 尤其适合于高面密度客体检测^[18,19,24-27].

基于激光尾场电子的高能X射线源尺寸只有几十微米^[19]至几百微米^[18], 比基于传统加速器的高能X射线源尺寸(其电子束斑一般为1.5—2 mm^[28])要小, 因此为了在透视照相中尽可能提高空间分辨率, 必须发展匹配激光高能X射线的成像探测器. 当前实验中主要采用锗酸铋(BGO)阵列^[18]、成像板^[19,26]等成像介质, 对闪烁体等探测器本征空间分辨、X射线能量响应等研究较少. 此外, 由于激光尾场加速电子能量比高能照相采用的传统加速器电子能量(一般为2—

* 国家自然科学基金(批准号: 11505166, 11174259, 11375161, 11405159)、等离子体物理重点实验室基金(批准号: 9140C680301150C68297, 9140C680302130C68242)和国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0401100)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guyuqiu@caep.ac.cn

15 MeV^[28]高, 因此穿透一定厚度高Z转换靶后的残余电子更多, 在穿过2 mm厚度W转换靶后, 能量9 MeV电子残余份额只有 3×10^{-4} , 而能量60 MeV电子残余份额高达 2×10^{-2} , 因此残余电子对透射照相的影响必须特别关注. 目前研究中一般均采用磁场方式将残余电子偏离照相方向^[18,19], 有无残余电子实验条件下的对比实验研究不足.

因此, 本文围绕激光尾场电子与高Z转换靶作用产生的高能X射线透视照相研究, 展开相关工作. 首先通过蒙特卡罗方法模拟设计转换靶; 第二测量探测器空间分辨率, 并模拟能量沉积响应, 获

得多种成像探测的参数; 第三模拟高面密度客体透视照相; 第四开展客体透视照相实验, 获得高面密度客体图像; 第五评估电子对照相影响, 定量分析残余电子因素.

2 模拟设计与探测器表征

本研究是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心45 TW激光装置上开展, 该激光装置激光到靶能量0.9 J, 脉冲宽度24 fs, 焦斑 $6.9 \mu\text{m}$ (能量集中度58%), 激光峰值强度约 $2.9 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$. 激光高能X射线透视照相布局见图1, 主要过程分

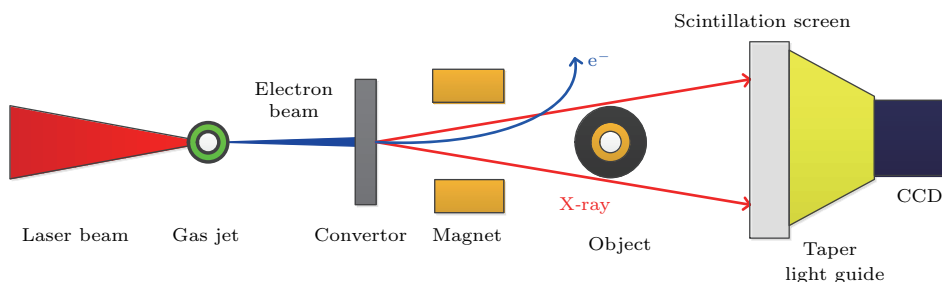


图1 (网刊彩色) 激光高能X射线照相布局图

Fig. 1. (color online) Lay-out of the radiography by laser-driven high energy X-ray.

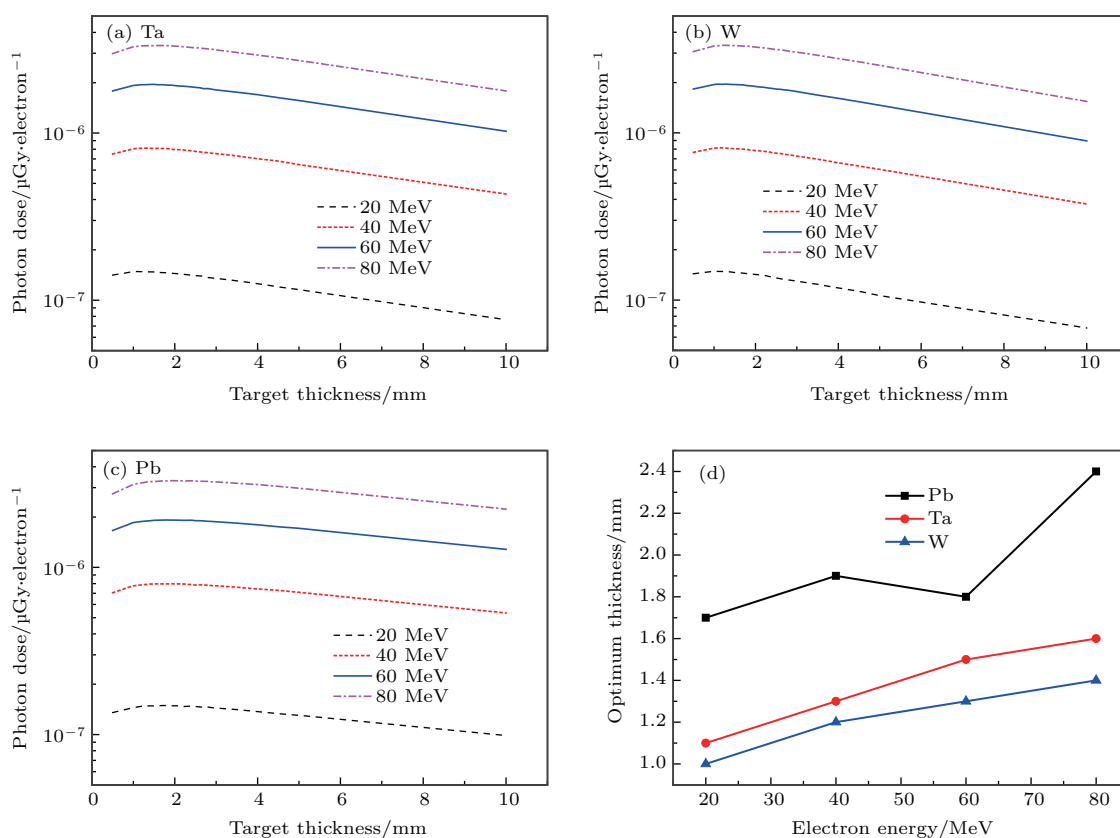


图2 (网刊彩色) 不同能量电子轰击多种厚度Ta, W与Pb靶产生(a)–(c)韧致辐射剂量以及(d)最优靶厚

Fig. 2. (color online) (a)–(c) The bremsstrahlung dose generated by electrons with different energy interaction with Ta, W and Pb targets with different thicknesses, and (d) optimum thickness.

为辐射产生、客体透视与图像记录三个环节. 首先飞秒激光与喷嘴喷射的气体通过尾场加速获得高能电子, 电子与高Z转换靶通过轫致辐射产生高能X射线; 第二穿过靶的残余电子再由磁铁偏转, 高能X射线对客体进行透视照相; 第三通过闪烁屏(或闪烁阵列)将X射线转换为可见光, 由光锥耦合可见光到CCD, 从而记录透视图像.

2.1 转换靶设计

首先模拟单能电子(能量设为20, 40, 60与80 MeV)与多种厚度Ta, W与Pb靶作用, 运输产生轫致辐射, 单个电子对应的X射线剂量结果如图2所示, 模拟采用MCNP软件实现. 以剂量最大为目标, 获得最优靶厚的结果见图2(d). 结果显示, X射线剂量随着电子能量提高而显著提升, 三种不同靶材料下剂量基本一致; 最优靶厚随着电子能量提高而增加, W与Ta靶的最优厚度为1—1.5 mm, Pb靶的最优厚度为1.6—2.5 mm. 对于能量达60 MeV的高能电子, 厚度1—2 mm的Ta靶产生X射线剂量基本不变, 因此为保证高能电子打靶下X射线产额, 同时兼顾靶的机械强度等, 转换靶优化为2 mm的Ta靶.

图3给出了厚度2 mm的Ta靶在不同能量电子作用下产生轫致辐射谱的比较, 随着电子能量提升, 轫致辐射量增加十分显著. 能量1—10 MeV的X射线产额, 80 MeV电子约是20 MeV电子的12倍, 40 MeV电子约是20 MeV电子的3.8倍.

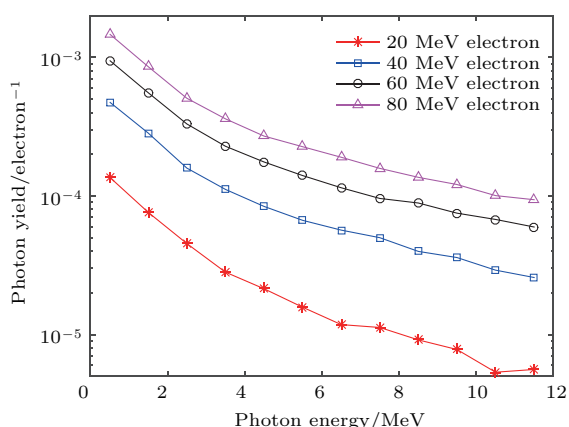


图3 (网刊彩色) 厚度2 mm的Ta靶在不同能量电子作用下产生的轫致辐射谱比较

Fig. 3. (color online) The comparison between bremsstrahlung by the Ta target with a thickness of 2 mm impacted by electrons with different energies.

2.2 探测器空间分辨率测量与能量沉积模拟

表1列出了CsI闪烁针状屏(由直径约5 μm针状闪烁体垂直排布于屏表面)^[29], BGO闪烁阵列(阵列像素大小500 μm)与DRZ闪烁屏三类探测器的技术参数. 图4是X射线光机上测量的探测器本征空间分辨率图像. 测量中将标准分辨率板(厚度0.05 mm Pb, 线对数0.25—10.0 lp/mm)紧贴探测器前表面, X射线光机采用Mo靶, 管电流0.2—1.0 mA, 管电压20—40 kV. 根据图4数据计算出调制传递函数(modulation transfer function, MTF)^[30,31]曲线见图5, 将MTF值降低至10%对应的空间频率作为空间分辨率, 具体结果见表1第5列.

表1 三类成像探测器技术参数
Table 1. Parameters of three types of imaging detectors.

探测器	灵敏层材料	灵敏层厚度/mm	灵敏层密度/g·cm ⁻³	空间分辨率/lp·mm ⁻¹
CsI	CsI	2	4.51	8.7
BGO	BGO	1	7.13	0.33
DRZ	CO(NH ₂)OC ₂ H ₅ 与Gd ₂ O ₂ S:Tb混合	0.436	4.587	1.3

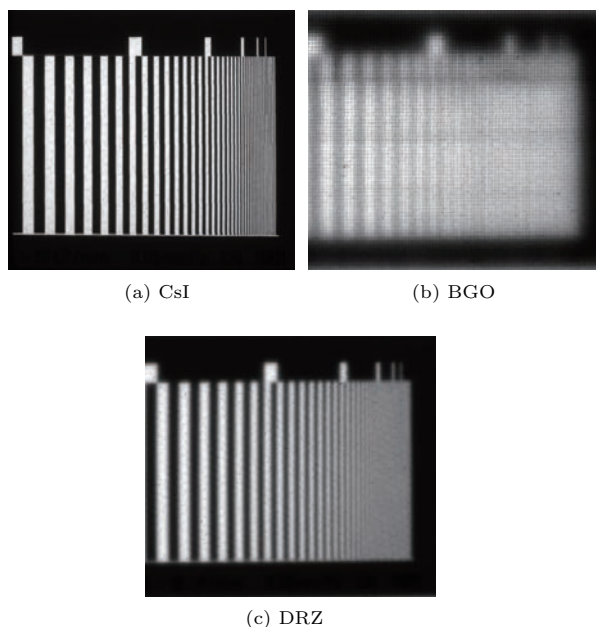


图4 探测器空间分辨率测量图像

Fig. 4. The images for measuring the spatial resolution of the detectors.

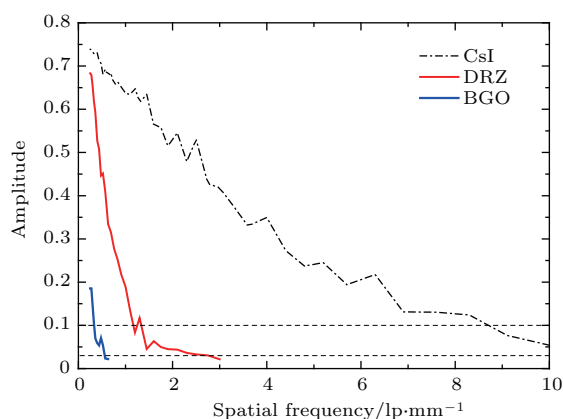


图5 (网刊彩色) 不同探测器的MTF曲线

Fig. 5. (color online) The MTF curves of different detectors.

采用蒙特卡罗方法模拟三种类型探测器对不同能量光子的能量沉积, 结果如图6所示, CsI与BGO的能量沉积值随光子能量提高而增加, 而DRZ由于灵敏层厚度很薄, 在光子能量大于500 keV后能量沉积基本不变. 综合考虑空间分辨率与探测效率, CsI与BGO两类探测器能用于激光高能韧致辐射测量, 不过也存在各自的缺点: BGO空间分辨率很低, 限制了高空间分辨照相的应用, 同时存在均匀性差的不足; CsI对高能X射线探测效率过低, 限制了在高面密度客体透视照相中的应用.

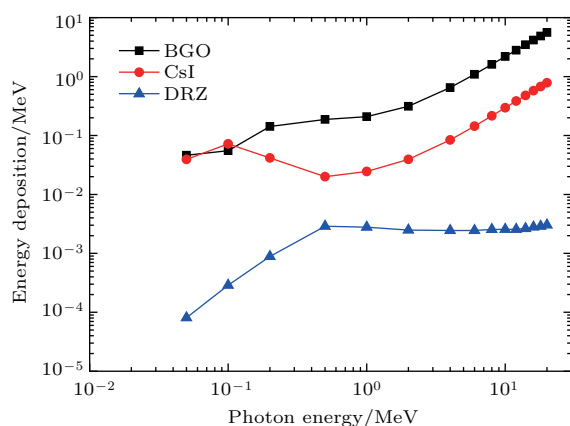


图6 (网刊彩色) 探测器对于不同能量光子的能量沉积响应

Fig. 6. (color online) The energy deposition response of the detectors for the different energy photons.

3 透视照相分析

3.1 高面密度客体透视照相模拟

本研究中设计的高面密度客体如图7所示, 由两层球壳组成, 内层采用钨铜合金, 密度 14.7 g/cm^3 , 外径18 mm; 外层采用紫铜, 密度

8.9 g/cm^3 , 外径26 mm. 为了验证激光高能X射线源的穿透能力, 在内层球壳中心设置中空结构, 内径为4 mm.



图7 (网刊彩色) 高面密度客体实物图

Fig. 7. (color online) Practicality picture of the high area density object.

模拟不同能量的单能X射线对双层客体的透视图照相图像如图8所示, 图9为对应的中心线X射线记录信号强度. 结果显示: 当光子能量大于1 MeV, 照相结果就能反映客体结构信息; 当光子能量大于2 MeV后, 可获得对中空结构分辨更清晰的照相结果, 半径值2, 9与13 mm处能够观察到由于客体边界(与客体半径相对应)引起的数据明显变化. 中心像素的强度值在光子能量5 MeV时达到最大值, 之后随着光子能量增加, 中心像素强度值略有降低, 这表明对应图7所示客体, 穿透性最强的射线能量为5 MeV.

对比高能韧致辐射对双层客体的照相结果见图10, 韧致辐射谱由40 MeV单能电子与Ta作用获得, 韧致辐射的照相结果介于1 MeV与2 MeV单能X射线照相结果之间, 能够反映照相客体的两层结构.

3.2 客体透视照相实验

实验中采用喷嘴口径0.7 mm, 喷气气体He气(气压约3000 kPa), 获得了激光尾场加速电子束电量30—60 pC, 能量40—60 MeV, 能谱如图11所示. 在此基础上采用3 mm厚度Ta材料作为转换靶, 开展了透视照相实验, 布局如图1所示, 放大倍数为2倍, 同时设置了高强度磁场强度的偏转磁铁, 避开电子对照相的干扰. 实验中采用的转换靶厚度比2.1节中设计值略大, 主要因为与气体靶作用后的剩余激光将烧蚀转换靶(转换靶距离喷嘴出口仅数毫米), 导致转换靶减薄, 因此为了减少更换靶, 提高实验效率, 采用略厚的转换靶.

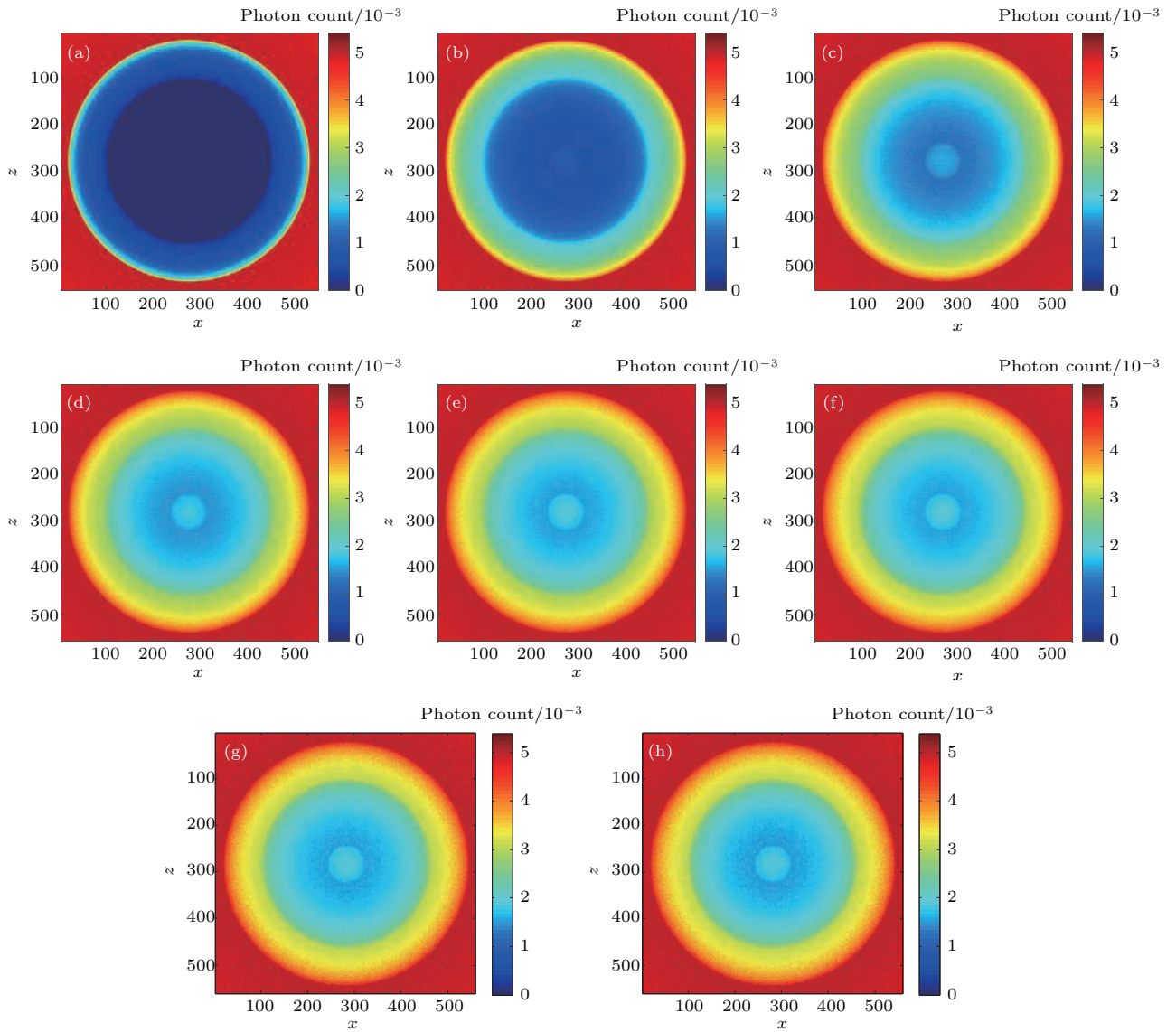


图8 (网刊彩色) 不同单能X射线对两层客体透视照相模拟图像 (a) 0.2 MeV; (b) 1 MeV; (c) 2 MeV; (d) 3 MeV; (e) 4 MeV; (f) 5 MeV; (g) 6 MeV; (h) 7 MeV

Fig. 8. (color online) The simulated radiographic images of the two-layer object using the monoenergetic X-ray with different energy: (a) 0.2 MeV; (b) 1 MeV; (c) 2 MeV; (d) 3 MeV; (e) 4 MeV; (f) 5 MeV; (g) 6 MeV; (h) 7 MeV.

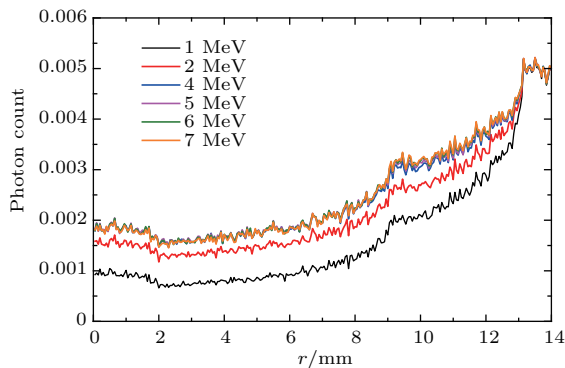


图9 (网刊彩色) 不同光子能量照相结果水平中心线数据
Fig. 9. (color online) The horizontal lineouts of the radiographic results by the different energy photons.

采用BGO阵列记录的两层客体透视照相原始图像如图12(a)所示,可以明显看到两层结构的交界面,中心空心结构也隐约可见.几何均值滤波、调和均值与中值滤波方法^[32]的结果分别见图12(b)–(d),照相图像已经能够分辨中心空心结构,在图12(e)所示的中值滤波中心线数据中间也能观察到对应的小峰结构.两层客体的面密度最高达到 33.0 g/cm^2 ,在中空结构处面密度达到 27.7 g/cm^2 ,照相图像中能够分辨客体内部结构,表明激光高能X射线源的穿透能力已能满足高密度客体透视照相的要求.

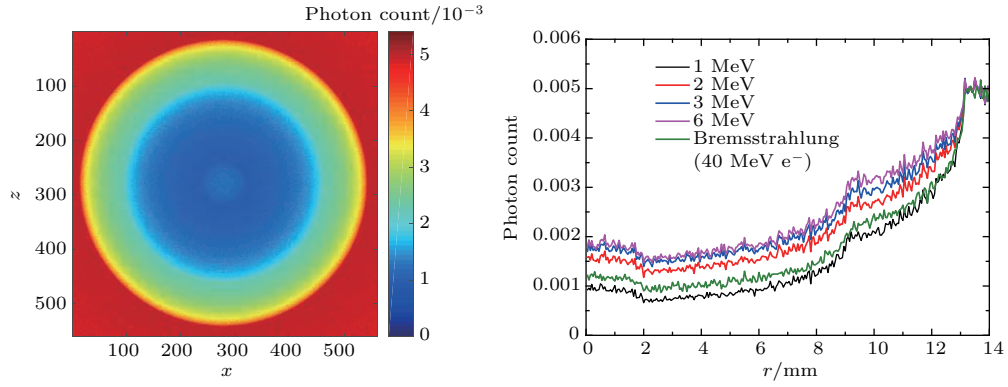


图 10 (网刊彩色) 韧致辐射能谱照相模拟图像与水平中心线数据

Fig. 10. (color online) The simulated radiographic image obtained by the photons with bremsstrahlung and the horizontal lineouts.

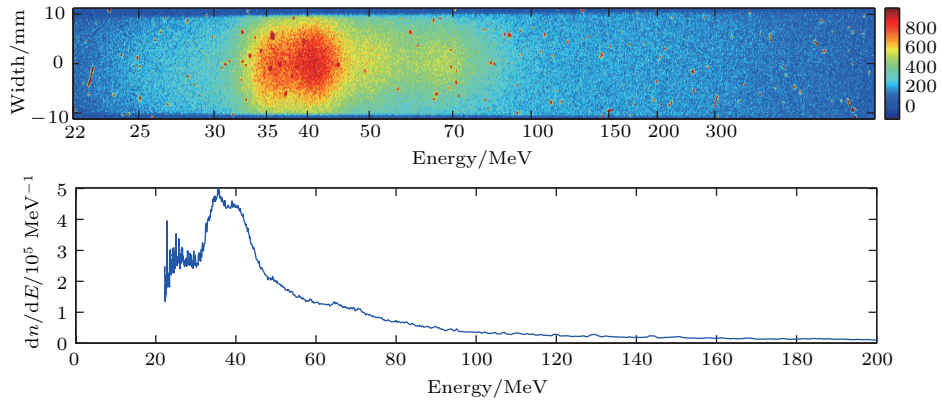


图 11 (网刊彩色) 实验测量的尾场电子能谱

Fig. 11. (color online) The experimental spectrum of the wakefield electrons.

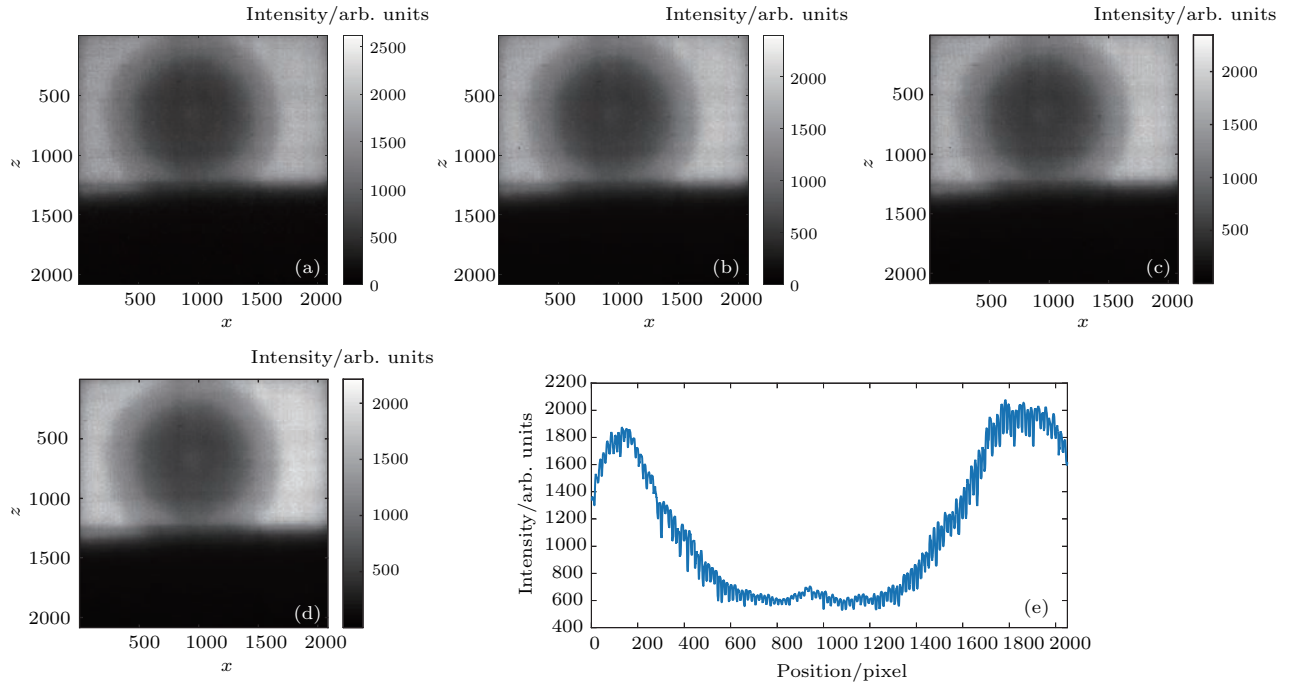


图 12 BGO 阵列记录两层客体照相的原始图像与滤波结果 (a) 原始图像; (b) 几何均值滤波; (c) 调和均值滤波; (d) 中值滤波; (e) 中值滤波结果水平中心线数据

Fig. 12. The raw radiographic image of the two-layer object recorded by BGO array and its filtering results: (a) Raw image; (b) geometric mean filtering; (c) harmonic mean filtering; (d) median filtering; (e) the horizontal lineout of median filtering result.

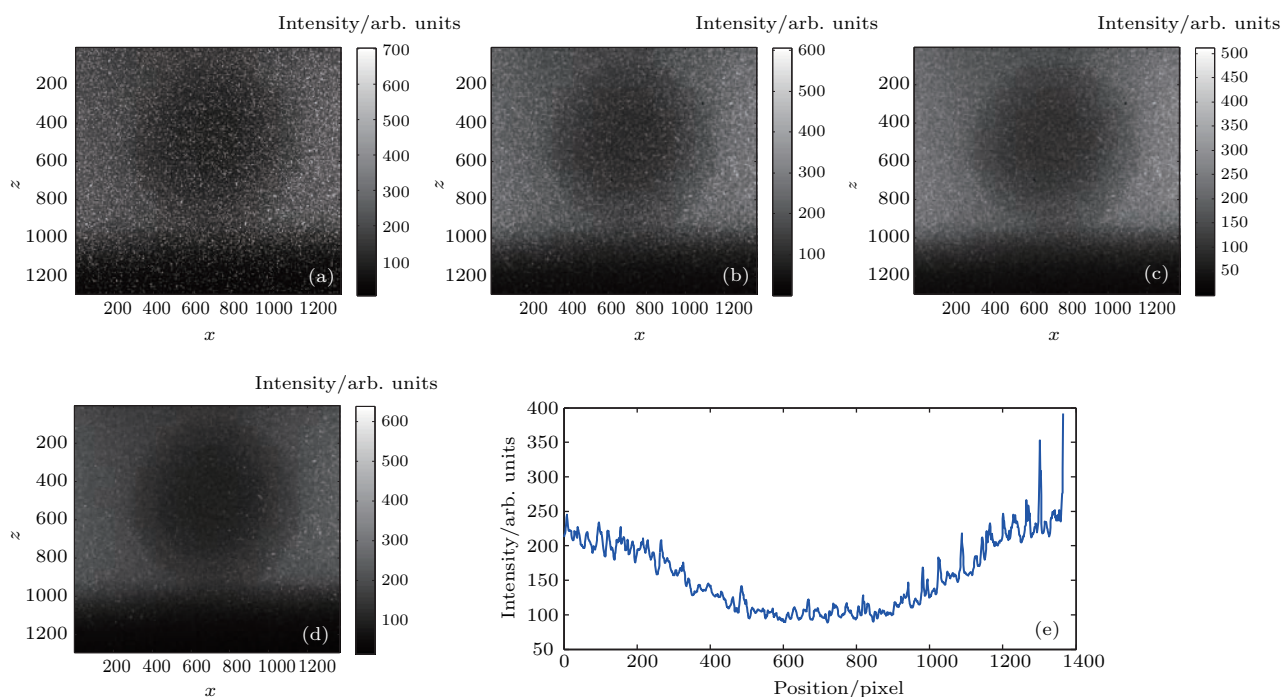


图 13 CsI 针状屏记录两层客体照相的原始图像与滤波结果 (a) 原始图像; (b) 几何均值滤波; (c) 调和均值滤波; (d) 中值滤波; (e) 中值滤波结果水平中心线数据

Fig. 13. The raw radiographic image of the two-layer object recorded by CsI needlelike screen and its filtering results: (a) Raw image; (b) geometric mean filtering; (c) harmonic mean filtering; (d) median filtering; (e) the horizontal lineout of median filtering result.

采用 CsI 针状屏记录的照相图像及滤波结果见图 13, 在滤波图像上可以看到客体的两层结构, 但是中心空心结构在滤波图像与中心线数据上都观察不到, 主要是由于 CsI 针状屏对高能 X 射线的探测效率过低; 此外获得图像的信号强度很弱, 除去噪声的图像计数约比 BGO 阵列条件下低一个量级, 上述结果与能量沉积响应的模拟结果(图 6)一致。

3.3 电子对照相影响评估

为了研究激光尾场电子对高能 X 射线照相的影响, 分别开展了 X 射线照相(在转换靶后加入偏转磁铁), X 射线与电子混合照相(转换靶后无偏转磁铁)以及电子照相(不加入转换靶与偏转磁铁)三种情况对比实验, 测量图像见图 14. 实验记录采用 CsI 针状闪烁屏, 为了照相客体具有明显的区分特征, 内层钨铜合金球壳只放入一半. 结果显示, 韧致辐射照相能够反映客体内部结构信息, 但由于 X 射线探测效率较低, 图像的信号强度很弱, 同时也不能反映客体中心的中空结构(如图 13); 韧致辐射与电子混合照相的信号强度较高, 但是有无内层

客体结果的对比度较差; 电子单独照相情况下不能反映客体的内部结构。

为了定量评估电子的影响, 在图 14 所示图像中选择直穿、实心客体照相、空心客体照相三个典型区域的像素强度进行分析, 如图 15 所示. 在图 15 (a) 所示像素强度分布中, 作为 X 射线产生的源头, 尾场电子携带的能量大于 X 射线, 此外电子在闪烁探测器中能量沉积效率高于 X 射线, 因此电子照相下信号强度很高, 约为 X 射线照相下信号强度的 100 倍. 在直穿区域, X 射线与电子混合照相的强度约为 X 射线照相强度的 6 倍, 而在穿透空心、实心客体的区域混合照相的强度约为 X 射线照相强度的 2 倍, 表明通过转换靶后的残余电子贡献了穿透客体后强度的 50%. 图 15 (b) 给出了像素强度比的分布, 以直穿强度作为分母, 比较穿透实心客体与空心客体强度比的差异, 强度比差异越大表明射线对两种面密度客体区分能力越好, 其中实心区域面密度 27.7—33.0 g/cm², 空心区域面密度 7.1—7.2 g/cm². 分析表明, X 射线照相下两个区域强度比相差约 27%, 电子与 X 射线混合照相下强度比相差 12%, 而电子照相强度比仅相差 2%, 因此

在目前信噪比情况下从电子照相图像(图 14(c)与图 14(f))区分不出实心与空心客体区域。

值得注意的是,利用通过转换靶后的残余电子与 X 射线混合照相,在空心与实心区域的强度比差

异下降了一半,但在客体照相区域强度提高了一倍,因此在 X 射线产额不足或探测效率不够的情况下,可采用 X 射线与电子混合透视照相,以牺牲对比度为代价,能较大幅度地提高图像的信号强度。

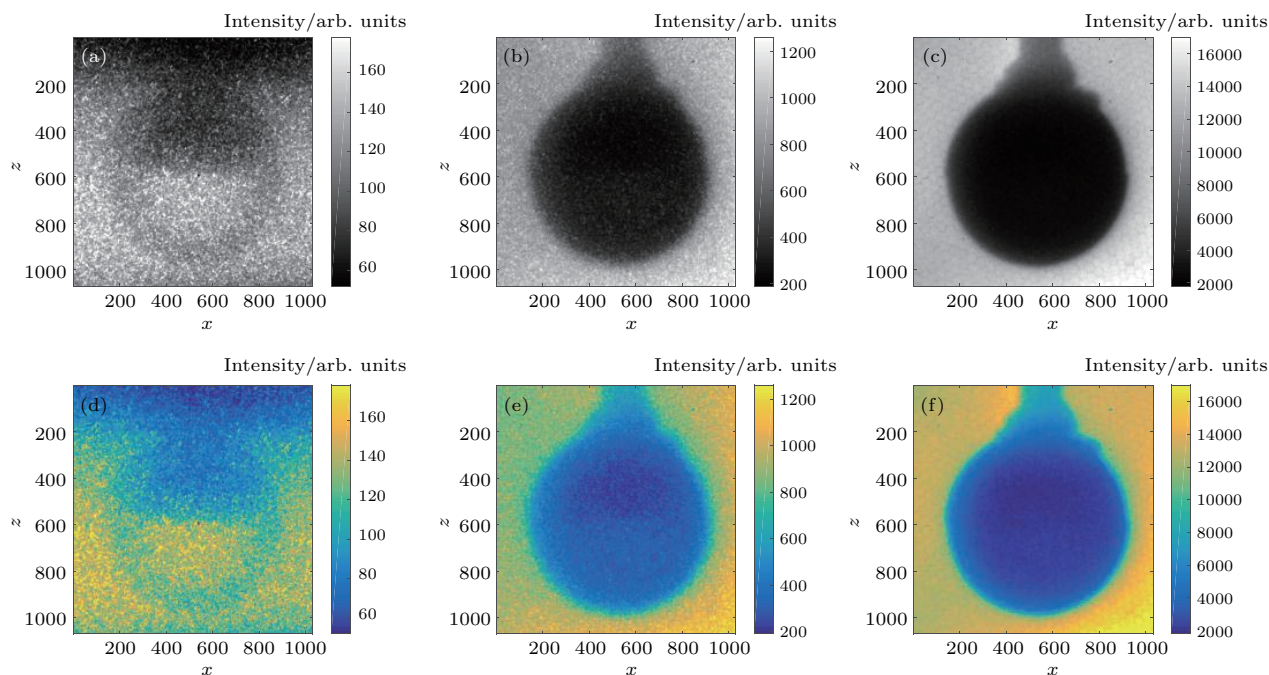


图 14 (网刊彩色) 三种辐射情况下客体照相图像 (a), (d) X 射线; (b), (e) X 射线与电子混合; (c), (f) 电子; 其中 (a), (b) 与 (c) 由灰度色标显示; (d), (e) 与 (f) 由 parula 的伪彩色标显示

Fig. 14. (color online) The object radiographic images by three types of radiation: (a) and (d) X-ray; (b) and (e) mixed of X-ray and electron; (c) and (f) electron; (a), (b) and (c) are shown with gray color scale; (d), (e) and (f) are shown with parula color scale.

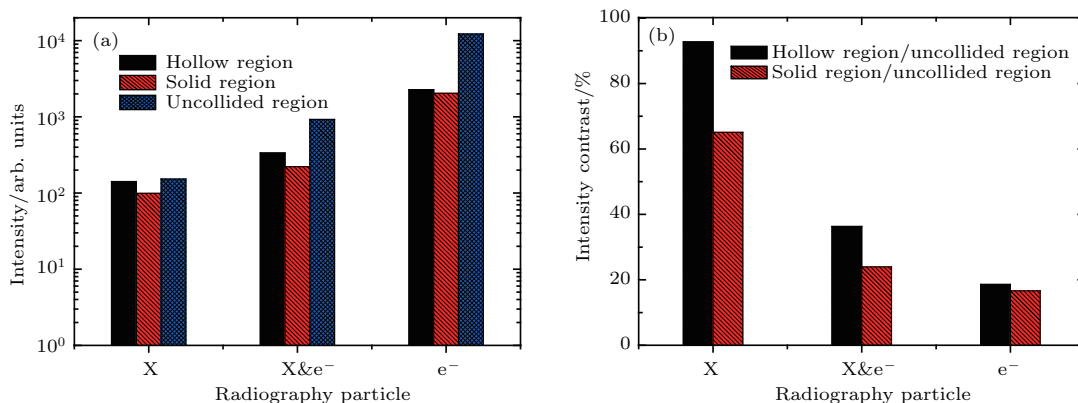


图 15 (网刊彩色) 三种辐射的照相图像中典型区域像素强度分布 (a) 强度分布; (b) 强度比分布

Fig. 15. (color online) The pixel intensity distribution of typical region in radiographic images by three types of radiation: (a) Intensity distribution; (b) intensity contrast distribution.

4 结 论

首先,通过蒙特卡罗软件开展了不同电子与多种厚度高 Z 转换靶作用产生韧致辐射模拟,优

化获得转换靶厚度为 2 mm. 第二,测量了 CsI 针状闪烁屏、BGO 阵列与 DRZ 闪烁屏三类探测器的本征空间分辨率,模拟了其对应高能 X 射线的能量沉积响应,其中 CsI 针状闪烁屏的空间分辨率高达 8.7 lp/mm,可作为激光驱动 X 射线成像探测器备

选,但存在着高能X射线探测效率不足的缺点.第三,在模拟高面密客体透视照相的基础上,利用激光尾场加速电子与Ta转换靶作用产生高能X射线,获得了两层客体的透视照相图像,BGO阵列采集图像中能够分辨客体中心的空心结构,透视照相面密度最高达到 33.0 g/cm^2 .第四,开展了X射线照相、X射线与电子混合照相以及电子照相三种情况的比对实验,在定量分析图像信号基础上,在X射线产额不足或探测效率不够情况下采用X射线与电子混合透视照相的方案,以牺牲对比度为代价,能较大程度地提高图像信号强度.

本工作可对强激光驱动X射线中转换靶设计、探测器优化与照相实验实施等研究提供有益参考,也可作为一般高能辐射成像研究的借鉴.

参考文献

- [1] Tajima T, Dawson J M 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 267
- [2] Mangles S P D, Thomas A G R, Lundh O, Lindau F, Kaluza M C, Persson A, Wahstrom C G, Krushelnick K, Najmudin Z 2007 *Phys. Plasmas* **14** 056702
- [3] Hafz N A M, Jeong T M, Choi I W, Lee S K, Pae K H, Kulagin V V, Sung J H, Yu T J, Hong K H, Hosokai T, Cary J R, Ko D K, Lee J 2008 *Nat. Photon.* **2** 571
- [4] Dong K G, Gu Y Q, Zhu B, Wu Y C, Cao L F, He Y L, Liu H J, Hong W, Zhou W M, Zhao Z Q, Jiao C Y, Wen X L, Zhang B H, Wang X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8733 (in Chinese) [董克攻, 谷渝秋, 朱斌, 吴玉迟, 曹磊峰, 何颖玲, 刘红杰, 洪伟, 周维民, 赵宗清, 焦春晔, 温贤伦, 张保汉, 王晓方 2010 物理学报 **59** 8733]
- [5] Leemans W P, Nagler B, Gonsalves A J, Toth C, Nakamura K, Geddes C G R, Esarey E, Schroeder C B, Hooker S M 2006 *Nat. Phys.* **2** 696
- [6] Osterhoff J, Popp A, Major Z, Marx B, Rowlands-Rees T P, Fuchs M, Geissler M, Horlein R, Hidding B, Becker S, Peralta E A, Schramm U, Gruner F, Habs D, Krausz F, Hooker S M, Karsch S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 085002
- [7] Geddes C G R, Nakamura K, Plateau G R, Toth C, Cormier-Michel E, Esarey E, Schroeder C B, Cary J R, Leemans W P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 215004
- [8] Wang T, Wang X F 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044102 (in Chinese) [王通, 王晓方 2016 物理学报 **65** 044102]
- [9] Faure J, Rechatin C, Norlin A, Lifschitz A, Glinec Y, Malka V 2006 *Nature* **444** 737
- [10] Rechatin C, Faure J, Ben-Ismael A, Lim J, Fitour R, Specka A, Videau H, Tafzi A, Burgy F, Malka V 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 164801
- [11] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Kiselev S, Gordienko S, Lefebvre E, Rousseau J P, Burgy F, Malka V 2004 *Nature* **431** 541
- [12] Mangles S P D, Murphy C D, Najmudin Z, Thomas A G R, Collier J L, Dangor A E, Divall E J, Foster P S, Gallacher J G, Hooker C J, Jaroszynski D A, Langley A J, Mori W B, Norreys P A, Tsung F S, Viskup R, Walton B R, Krushelnick K 2004 *Nature* **431** 535
- [13] Geddes C G R, Toth C, Tilborg J V, Esarey E, Schroeder C B, Bruhwiler D, Nieter C, Cary J, Leemans W P 2004 *Nature* **431** 538
- [14] Yoshitama H, Kameshima T, Gu Y Q, Guo Y, Jiao C Y, Liu H J, Peng H S, Tang C M, Wang X D, Wen X L, Wen T S, Wu Y C, Zhang B H, Zhu Q H, Huang X J, An W M, Hung W H, Tang C X, Lin Y Z, Wang X D, Chen L M, Kotaki H, Kando M, Nakajima K 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2938
- [15] Li W T, Wang W T, Liu J S, Wang C, Zhang Z J, Qi R, Yu C H, Li R X, Xu Z Z 2015 *Chin. Phys. B* **24** 015205
- [16] Plateau G R, Geddes C G R, Thorn D B, Chen M, Benedetti C, Esarey E, Gonsalves A J, Matlis N H, Nakamura K, Schroeder C B, Shiraishi S, Sokollik T, Tilborg J V, Toth C, Trotsenko S, Kim T S, Battaglia M, Stohlker T, Leemans W P 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 064802
- [17] Leemans W P, Rodgers D, Catravas P E, Geddes C G R, Fubiani G, Esarey E, Shadwick B A, Donahue R, Smith A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2510
- [18] Glinec Y, Faure J, Dain L L, Darbon S, Hosokai T, Santos J J, Lefebvre E, Rousseau J P, Burgy F, Mercier B, Malka V 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 025003
- [19] Ben-Ismael A, Lundh O, Rechatin C, Lim J K, Faure J, Corde S, Malka V 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 264101
- [20] Phuoc K T, Corde S, Thauray C, Malka V, Tafzi A, Goddet J P, Shah R C, Sebban S, Rousse A 2012 *Nat. Photon.* **6** 308
- [21] Chen S, Powers N D, Ghebregziabher I, Maharjan C M, Liu C, Golovin G, Banerjee S, Zhang J, Cunningham N, Moorti A, Clarke S, Pozzi S, Umstadter D P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 155003
- [22] Giulietti A, Bourgeois N, Ceccotti T, Davoine X, Dobosz S, D'Oliveira P, Galimberti M, Galy J, Gamucci A, Giulietti D, Gizzi L A, Hamilton D J, Lefebvre E, Labate L, Marques J R, Monot P, Popescu H, Reau F, Sarri G, Tomassini P, Martin P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 105002
- [23] Reed S A, Chvykov V, Kalintchenko G, Matsuoka T, Rousseau P, Yanovsky V, Vane C R, Beene J R, Stracener D, Schultz D R, Maksimchuk A 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 231107
- [24] Edwards R D, Sinclair M A, Goldsack T J, Krushelnick K, Beg F N, Clark E L, Dangor A E, Najmudin Z, Tatarakis M, Walton B, Zepf M, Ledingham K W D, Spencer I, Norreys P A, Clarke R J, Kodama R, Toyama Y, Tampo M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2129
- [25] Ben-Ismael A, Faure J, Malka V 2011 *Nucl. Instrum. Meth. A* **629** 382
- [26] Dopp A, Guillaume E, Thauray C, Lifschitz A, Sylla F, Goddet J P, Tafzi A, Iaquanello G, Lefrou T, Rousseau

- P, Conejero E, Ruiz C, Phuoc K T, Malka V 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **830** 515
- [27] Felicie A, Thomas A G R 2016 *Plasma Physics and Controlled Fusion* **58** 103001
- [28] Zhang C Z, Guo Z P, Zhang P, Wang X G 2009 *Technology and Principle of Industrial CT* (Beijing: Science Press) pp40, 41 (in Chinese) [张朝宗, 郭志平, 张朋, 王贤刚 2009 工业CT技术和原理 (北京: 科学出版社) 第40, 41页]
- [29] Nagarkar V V, Gupta T K, Miller S R, Klugerman Y, Squillante M R, Entine G 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 492
- [30] Coltman J W 1954 *J. Opt. Soc. Am.* **44** 468
- [31] Park H S, Chambers D M, Chung H K, Clarke R J, Egleton R, Giraldez E, Goldsack T, Heathcote R, Izumi N, Key M H, King J A, Koch J A, Landen O L, Nikroo A, Patel P K, Price D F, Remington B A, Robey H F, Snavely R A, Steinman D A, Stephens R B, Stoeckl C, Storm M, Tabak M, Theobald W, Town R P J, Wickershaw J E, Zhang B B 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056309
- [32] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L(translated by Ruan Q Q)2013 *Digital Image Processing Using MATLAB* (2nd Ed.) (Beijing: Tsinghua University Press) pp54–58 (in Chinese) [Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L 著 (阮秋琦 译) 2013 数字图像处理的MATLAB实现 (第二版)(北京: 清华大学出版社) 第54—58页]

Detector characterization and electron effect for laser-driven high energy X-ray imaging*

Zhang Tian-Kui¹⁾ Yu Ming-Hai¹⁾ Dong Ke-Gong¹⁾ Wu Yu-Chi¹⁾²⁾ Yang Jing¹⁾
Chen Jia¹⁾ Lu Feng¹⁾ Li Gang¹⁾ Zhu Bin¹⁾ Tan Fang¹⁾ Wang Shao-Yi¹⁾
Yan Yong-Hong¹⁾ Gu Yu-Qiu^{1)2)†}

1) (Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (IFSA Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(Received 25 June 2017; revised manuscript received 17 August 2017)

Abstract

High energy X-ray sources based on laser-wakefield accelerated electron beams have several important advantages, including high photon energy and small source size, and have many important applications such as high resolution radiography in non-destructive testing. Firstly, the thickness of electron converter is optimized with the targets Ta, W and Pb each with an optimal thickness of 2 mm. We calibrate the intrinsic spatial resolution of CsI needle-like scintillation screen, bismuth germanium oxide (BGO) scintillation array and DRZ scintillation screen with an X-ray tube. And the spatial resolution of CsI needle-like scintillation screen is as high as 8.7 lp/mm. The energy deposition responses of these three detectors to high X-ray are also simulated. Experiments show that the features of a two-layer object can be resolved up to an area density of 33.0 g/cm² by using the high X-ray source generated by injecting laser-wakefield accelerated electron beam into a Ta convertor target. Experiment that compares X-ray radiography, mixed radiography of X-ray and electron, and electron radiography, is also carried out. Since low X-ray yield and low detection efficiency are two serious problems in high energy X-ray radiography based on laser-wakefield accelerated electron beams, we propose and prove a method of improving image signal intensity greatly at the cost of image contrast by adopting the mixed radiography of X-ray and electron.

Keywords: laser wakefield acceleration, high energy X-ray, non-destructive testing, imaging detector

PACS: 52.38.Ph, 52.59.-f, 52.70.La, 52.59.Px

DOI: 10.7498/aps.66.245201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11505166, 11174259, 11375161, 11405159), the Foundation of Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China (Grant Nos. 9140C680301150C68297, 9140C680302130C68242), and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFA0401100).

† Corresponding author. E-mail: guyuqiu@caep.ac.cn