

基于透镜耦合的 X 射线成像探测器闪烁体厚度对成像质量的影响

张永兴^{1,2} 谢红兰¹ 杜国浩¹ 陈荣昌¹ 肖体乔¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 张江园区 上海 201204)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 闪烁体是同步辐射 X 射线成像探测器的重要组成部分, 它将入射 X 射线转换为可见光, 再由可见光成像探测器接收成像。闪烁体的厚度对成像的空间分辨率、图像衬度有较大的影响, 选取合适的厚度的闪烁体, 与探测器物镜(数值孔径)及 X 射线能量等实验条件达到最理想的匹配, 将有助于获得高质量的 X 射线成像结果。但目前上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)用户在开展 X 射线成像实验时, 基本都未考虑到闪烁体厚度对成像质量影响的这个因素, 难以获得最佳图像质量的实验结果。本文先根据理论分辨率曲线预测了探测器各个镜头的闪烁体的最佳匹配厚度, 并利用上海光源成像线站(BL13W1)配备的 PCO2000 探测器以及不同厚度的 YAG 闪烁体进行了实验验证, 经过对实验结果的图像衬度进行分析, 获得了探测器各个物镜镜头的最佳匹配闪烁体厚度, 实验结果与理论预测值基本相符, 这将为上海光源成像线站基于透镜耦合的 X 射线成像探测器的高效使用提供指导。

关键词 X 射线成像探测器, 闪烁体, 空间分辨率, 衬度

中图分类号 TL816⁺.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070102

X 射线自 1895 年德国物理学家伦琴发现后, 就被首先应用于医学成像领域^[1]。在随后 100 多年中, X 射线成像技术得到快速的发展。20 世纪 70 年代, 德国人 Hartmann W 等^[2]用荧光物质作为 X 射线转换屏, 研制出世界上第一个 X 射线间接成像探测器系统; 90 年代, 以单晶闪烁体作为转换屏开始应用于 X 射线成像探测器, 空间分辨率接近闪烁体发射的可见光的瑞利衍射极限^[3]。随后, 高分辨率成像探测器开始广泛应用于同步辐射光源, 工业 X 射线 CT 等成像技术逐步发展起来, 分辨率达到微米量级^[4]。目前, X 射线成像技术在医学、材料、生命科学、无损检测、工业探伤等领域发挥着举足轻重的作用^[5-6]。

X 射线成像探测器是 X 射线成像系统的关键装置, 按照成像方式的不同, X 射线探测器可分为直接式^[5]和间接式^[6]。直接式成像探测器用 X 射线直接在电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)上对待测物体成像, 它对 X 射线的光学响应快, 但 CCD 的耐辐射性较差, 所以直接式成像探测器通常适用于软 X 射线能区^[5]。在硬 X 射线能区, 通常采

用间接式成像探测器对物体成像, 利用闪烁体将 X 射线转换为可见光, 再利用可见光成像探测器对物体成像, 可以避免 X 射线直接照射在探测器造成辐射损伤, 有效保证探测器的寿命^[6]。

目前, 国际上成熟的硬 X 射线间接成像探测器主要有两种结构: 光纤耦合式^[7]和透镜耦合式^[8]。基于光纤耦合的 X 射线成像探测器的系统结构如图 1(a)所示, 闪烁晶体将 X 射线转换成可见光后通过光纤耦合到制冷的 CCD 靶面上获得图像^[7]。这种结构的成像探测器效率较高, 但在工作过程中, CCD 等主要核心部件全都在直通光路中, 高功率密度的 X 射线直通光的照射会对其造成辐射损伤。基于透镜耦合的 X 射线成像探测器主要由闪烁体、光学系统(显微透镜及反射镜)和面阵 CCD 器件构成, 其结构图如图 1(b), 闪烁体将 X 射线转换成可见光后通过透镜光学系统耦合到面阵 CCD 上获得图像^[8-9], 它不仅可以有效避免高功率直通光对探测器主要部件造成损伤, 还可以通过显微镜头的放大获得比可见光 CCD 更高的空间分辨率。

国家自然科学基金(No.11375257)资助

第一作者: 张永兴, 男, 1987 年出生, 2010 年毕业于大连理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为 X 射线成像探测器

通讯作者: 谢红兰, E-mail: xiehonglan@sinap.ac.cn

收稿日期: 2014-03-07, 修回日期: 2014-04-29

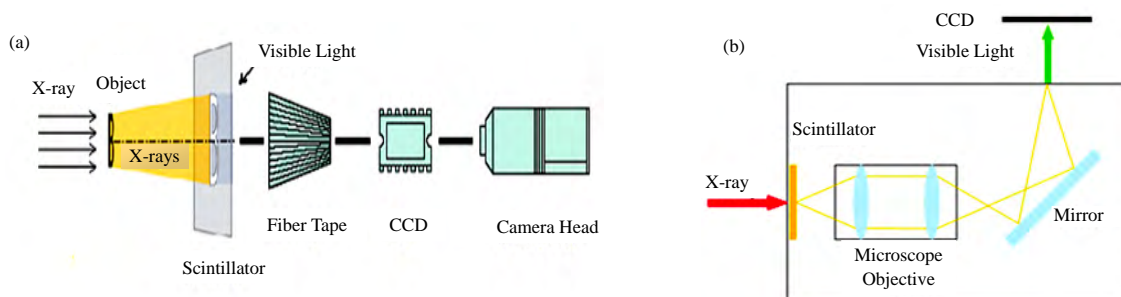


图 1 光纤耦合(a)和透镜耦合(b)X 射线成像探测器结构图
Fig.1 Structural drawing of fiber-coupled (a) and lens-coupled (b) X-ray imaging detector.

本文实验用到的 PCO2000(图 2)成像探测器就是这种透镜耦合式探测器, 可见光 CCD 像素大小 $7.4 \mu\text{m}$, 配备一系列不同倍率的显微镜镜头(放大倍率 $1.25\times$ 、 $2\times$ 、 $4\times$ 、 $10\times$ 、 $20\times$, 对应的数值孔径(Numerical aperture, NA)分别为 0.04 、 0.08 、 0.16 、 0.4 、 0.75), 对应的有效像素大小分别为 $5.9 \mu\text{m}$ 、 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $1.85 \mu\text{m}$ 、 $0.74 \mu\text{m}$ 、 $0.37 \mu\text{m}$ 。



图 2 PCO2000 的实物图片
Fig.2 Photograph of PCO2000.

X 射线成像探测器是 X 射线成像系统的关键装置, 探测器的性能直接决定 X 射线成像图像质量, 因此研究及优化 X 射线成像探测器的性能具有重要的现实意义。影响 X 射线成像探测器性能的因素有以下几点: 闪烁晶体的材料(吸收效率、发光衰减时间等)、厚度、可见光探测器的量子效率以及闪烁晶体与可见光探测器的耦合效率^[10-13]。闪烁晶体在 X 射线成像探测系统中具有极其重要的地位, 闪烁体的性能是决定 X 射线探测系统性能的关键因素。在实际应用中, 人们会着重考虑闪烁体的材料选择, 却很少会考虑闪烁体厚度对成像质量的影响。本文通过理论预测和实验验证, 得到了不同显微镜镜头的最佳闪烁体匹配厚度, 将获得最佳的成像质量, 为上海光源成像线站的基于透镜耦合的 X 射线成像探测器的高效使用提高依据。

1 理论计算及分析

闪烁体是通过吸收高能量粒子或者射线, 并能在很短的时间内把其所吸收的能量以可见光的形式释放出来的物质, 其工作原理如下: 闪烁体晶格吸收 X 射线并激发原子或分子处于电离态, 受激发的原子或分子在退激过程中发射出可见光光子^[10]。闪烁体性能参数主要有: 光子发射效率、X 射线的吸收效率、衰减时间、闪烁体发射光谱与探测器的光谱耦合效率^[10]。目前常用于 X 射线成像的闪烁体有 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)、 $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO)、 PbWO_4 、 CdWO_4 (CWO)、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (YAG)、 $\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (GSO) 等, 其性能参数如表 1 所示。由表 1 可知, YAG:Ce 晶体的发光效率较高, 而且发射光谱波长 550 nm 与 PCO2000 探测器的响应光谱波长 545 nm 耦合效率最佳, 因此选用 YAG:Ce 作为 PCO2000 探测器的闪烁体^[11-12]。

表 1 几种常用闪烁体的物理参数^[11-12]
Table 1 Parameters of several common scintillators^[11-12].

闪烁体 Scintillator	密度 Density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	发射效率 Light yield / $\text{Photo}\cdot\text{MeV}^{-1}$	衰减时间 Decay time / ns	可见光波长 Emission Maximum / nm
BGO	7.1	8 600	300	480
PbWO_4	8.28	300	2-3	410
CWO	7.9	20 000	5 000	495
LSO	7.4	26 000	30	390
YAG	4.56	24 000	90-120	550
GSO	6.7	8 000	60	420

图 3 是基于透镜耦合的 X 射线成像探测器的光路图, 同一光路的 X 射线光子, 在闪烁体内不同位置上被闪烁体吸收并发射出可见光光子, 导致可见光透镜显微成像系统存在像差问题, 所以增加闪烁体的厚度, 会加大探测器光学系统的像差, 影响成像探测器的空间分辨率。然而, 闪烁体厚度越小,

对 X 射线的吸收率就越低,可见光光子产额就越低,此时成像探测器的探测效率就越低。闪烁体厚度越大,对 X 射线的吸收率越大,探测器的探测效率也就越高,然而,厚闪烁体会给探测器光学系统带来较大像差,这样会降低成像探测器空间分辨率^[13]。如何实现闪烁体最佳厚度选择正是本文研究工作的重点,选取最佳厚度的闪烁体,对于优化提高 X 射线成像探测器的性能有着重要意义。

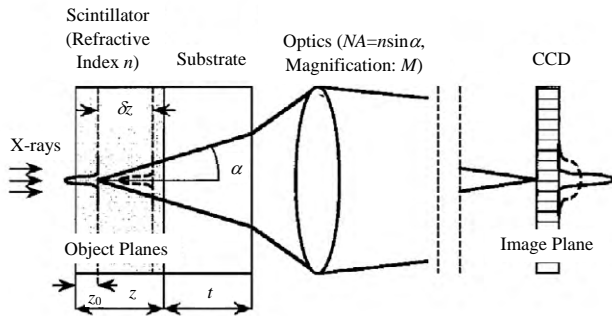


图3 X 射线成像探测器光路图
Fig.3 Schematic of X-ray imaging detector.

此外,探测器的空间分辨率还受到光学系统的焦深的影响^[12,14]。闪烁体探测器的分辨率可以由式(1)求得:

$$R = [(p / NA)^2 + (qzNA)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中, $p=0.18$; $q=0.075$ ^[12]; NA 为物镜的数值孔径; z 为闪烁体的厚度, μm 。式(1)中第一项对应的是光学系统的焦深,第二项对应的是光学系统的像差。

根据式(1),可以得出不同厚度(1 μm 、5 μm 、10 μm 、20 μm 、50 μm 、100 μm 、130 μm 、200 μm) 闪烁体的成像探测器的空间分辨率与显微透镜数值孔径 NA 的关系曲线,如图 4 所示。从图 4 可以看出,对于放大倍率较低($NA < 0.1$)的显微透镜,光学

系统的空间分辨率主要由焦深项决定,与闪烁体厚度密切相关的像差项则几乎不影响空间分辨率;对于倍率较大($NA > 0.2$)的显微透镜,光学系统的空间分辨率主要受与闪烁体厚度密切相关的像差项的影响。正因如此,对于倍率较大的显微透镜,要获得高空间分辨率的成像结果,闪烁体厚度的选择至关重要。

对图 4 中不同闪烁体厚度对应的分辨率曲线求极值点,就可以得到不同闪烁体厚度的理论空间分辨率值和理论最佳匹配数值孔径,如表 2 所示。根据 PCO2000 实际配备的显微透镜,得到不同闪烁体厚度对应的实际最佳匹配数值孔径。从表 2 可以看出,显微镜头放大倍率越高,数值孔径 NA 越大,对应的闪烁体最佳匹配厚度越薄,成像空间分辨率则越高。对于高放大倍率(如 20 倍、40 倍)的显微透镜,最佳闪烁体厚度应该比 20 μm 更薄。

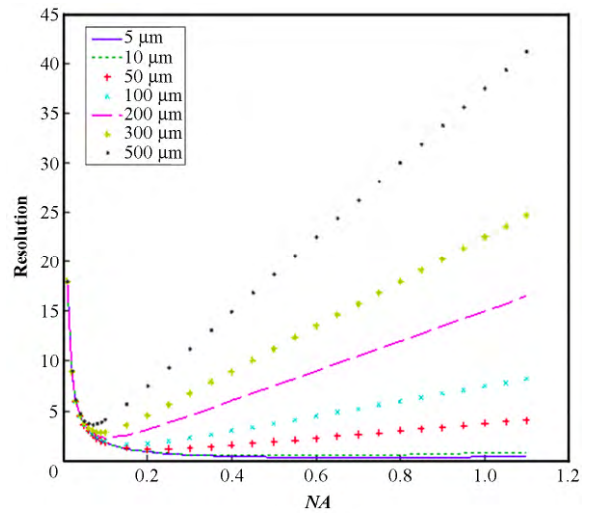


图4 不同厚度闪烁体的探测器分辨率与物镜数值孔径 NA 的关系曲线
Fig.4 Influence of numerical aperture on resolution for scintillators with different thickness.

表 2 闪烁体厚度与物镜镜头匹配表 (理论计算)
Table 2 Optimized link between thickness of scintillator and objective lens (theoretical calculation).

闪烁体厚度 Scintillator thickness / μm	理论分辨率 Theoretical resolution / μm	理论最佳匹配 NA Optimal theoretical NA	实际最佳匹配 NA Optimal available NA	实际最佳匹配倍率 Optimal magnification of objective
1	0.17	1.4	0.95	40×
5	0.37	0.7	0.75	20×
10	0.52	0.49	0.4	10×
20	0.73	0.35	0.4	10×
50	1.16	0.22	0.16	4×
100	1.64	0.16	0.16	4×或 2× 4× or 2×
130	1.88	0.14	0.08	2×或 1.25× 2× or 1.25×
200	2.32	0.11	0.08	2×或 1.25× 2× or 1.25×

2 实验及结果分析

2.1 实验装置及设备

实验在上海同步辐射光源 (Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF) X 射线成像及生物医学应用光束线站 (BL13W1) 上完成, 线站布局如图 5 所示。本实验利用线站配备的 PCO2000 成像探测器 (像素 1 024×1 024, 像素尺寸 7.4 μm×7.4 μm)

对 JIMA RT RC-02 型 X 射线分辨率板进行光学成像。实验样品为直径为 25 mm, 厚度分别为 20 μm、50 μm、100 μm、130 μm、200 μm 的 YAG 闪烁体。将 YAG 闪烁体粘贴在 PCO2000 探测器的转换屏上, X 射线分辨率板放置在六维样品台上并且紧贴探测器的闪烁屏, 关闭实验棚屋。实验参数为: 光子能量为 15 keV, 束流强度为 50.5 mA。

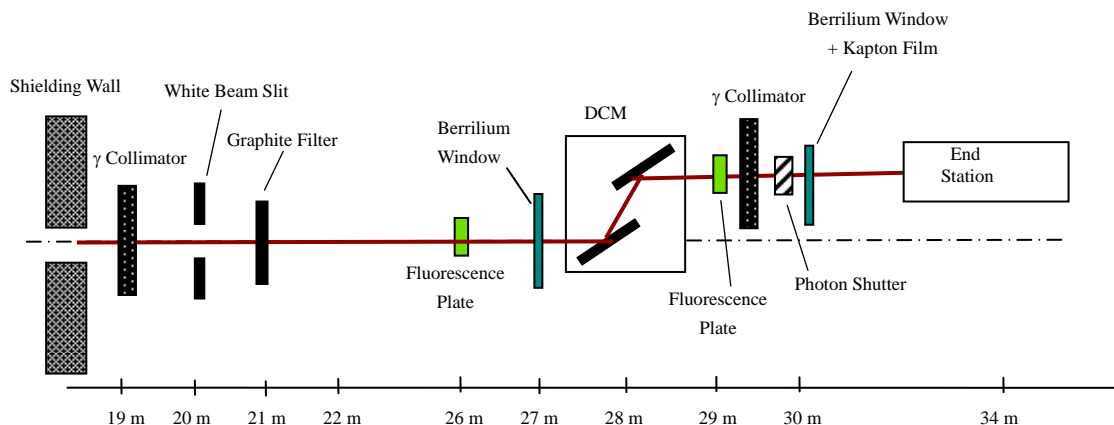


图 5 X 射线成像线站 (BL13W1) 布局图
Fig.5 Layout of beamline of X-ray imaging (BL13W1, SSRF).

2.2 实验方案及流程

实验参数设定好后, 在棚外观察屏观察分辨率板的成像, 预览模式下, 微调物镜的工作距离, 使得分辨率板的成像条纹达到最清晰, 再调节六维样品台, 使得分辨率板呈现“立正”的像并且位于图片的中心位置 (放大倍数较小的镜头), 此时为拍照的最佳状态。

(1) 选取适当的曝光时间, 对分辨率板成像。得到图像后, 调节六维样品台, 移出分辨率板, 以同样的曝光时间再照一张背景图像。为了降低暗场和背景噪声对实验的影响, 重复上面的操作 10 次。

(2) 更换不同厚度的闪烁晶体, 按照(1)的操作, 获得各个厚度闪烁体 (20 μm、50 μm、100 μm、130 μm、200 μm) 条件下的分辨率板图片以及背景图片。

(3) 更换探测器物镜镜头 (放大倍数分别为 1.25×、2×、4×、10×、20×), 按照(1)和(2)的操作, 获得每个物镜在不同厚度闪烁体条件下的分辨率板图片以及背景图片。

2.3 数据处理和分析

为了尽可能消除噪声的干扰、提高图片的清晰度, 减弱探测器暗电流对实验的影响, 先将上面的实验中各组 (不同透镜、不同厚度的闪烁体) 的 10

张分辨率板以及其背景图片分别相加平均处理, 获得 1 张分辨率板的平均图像和 1 张平均背景图片。对上述两图作扣除背景处理得到所需的图片。图 6 就是经过处理后得到的放大倍率为 4 倍 (NA=0.16)、闪烁体厚度为 100 μm 时采集得到分辨率板的图像。

要衡量探测器的成像质量, 需要分析图像的空间分辨率和图像衬度。通过观察图 6 中明暗条纹的最小可分辨间距可以定性得出成像探测器的空间分辨率。衬度可以运用式(2)求得:

$$\text{contrast} = (I_M - I_m) / (I_M + I_m) \quad (2)$$

式中, I_M 为图 6 中强度最大值; I_m 为图 6 中强度最小值。

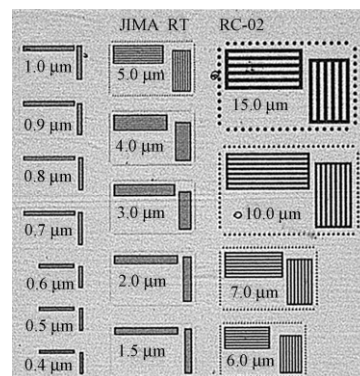


图 6 PCO2000 X 射线成像探测器 (物镜 NA=0.16, 闪烁体的厚度为 100 μm) 拍摄得到的分辨率板成像图片
Fig.6 Image of resolving target (JIMA RT RC-02) (NA=0.16, 100 μm thickness).

选取图 6 中一组条纹可分辨的区域作为目标区域，运用式(2)，计算其衬度。随后逐个计算每组图片的不同目标区域的衬度，然后整理并对比不同厚

度闪烁体的衬度，画出关系曲线图。图 7 是各个显微镜镜头下成像衬度-闪烁体厚度曲线图。

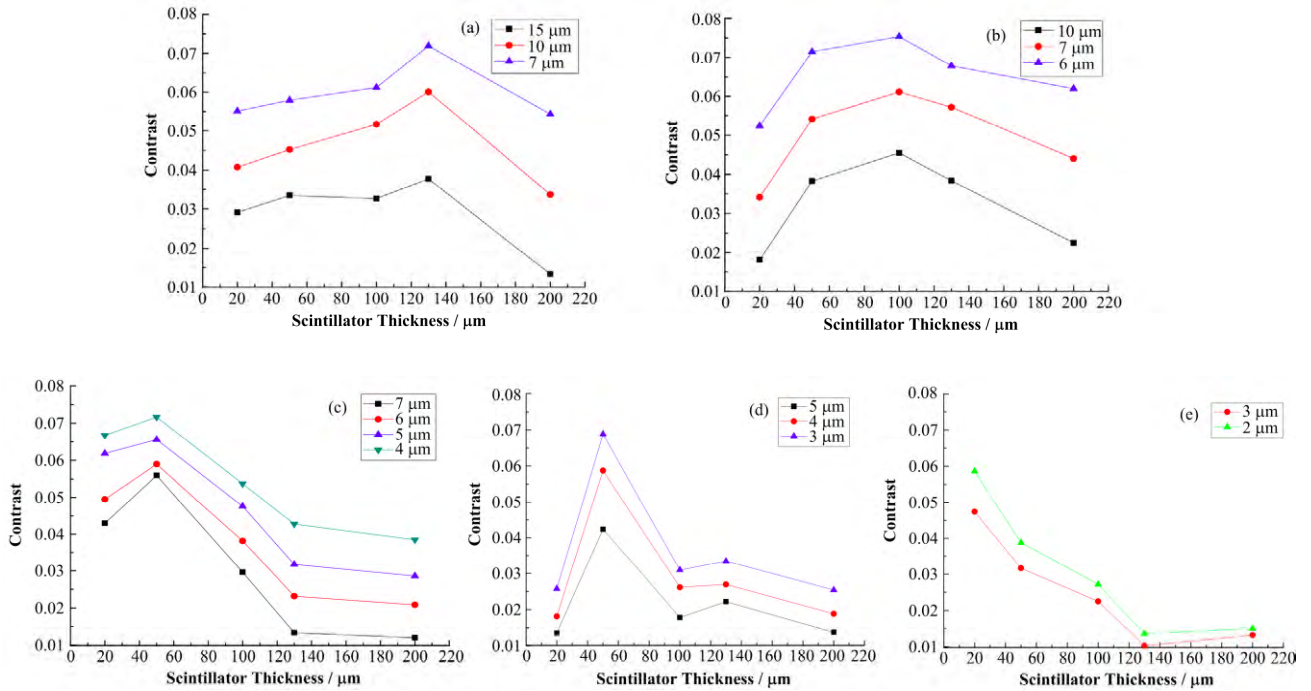


图 7 衬度与晶体厚度的关系曲线

(a) 1.25 倍物镜，闪烁体最佳厚度 130 μm ，(b) 2 倍物镜，闪烁体最佳厚度 100 μm ，(c) 4 倍物镜，闪烁体最佳厚度 50 μm ，(d) 10 倍物镜，闪烁体最佳厚度 50 μm ，(e) 20 倍物镜，闪烁体最佳厚度 20 μm

Fig.7 Curve of relationship between contrast and the thickness of scintillators.

(a) Magnification of lens is 1.25, optimal thickness is 130 μm . (b) Magnification of lens is 2, optimal thickness is 100 μm . (c) Magnification of lens is 4, optimal thickness is 50 μm . (d) Magnification of lens is 10, optimal thickness is 50 μm . (e) Magnification of lens is 20, optimal thickness is 20 μm

从图 7 中，可以直观地得出各个显微透镜所匹配的最佳闪烁体厚度，曲线的最大衬度数值点所对应的就是最佳闪烁体厚度，如表 3 所示。从图 7(a)–(c) 中可以看出，图像衬度值的变化幅度较小，说明闪烁体厚度对于低倍系统的成像影响不大；从图 7(d)–(e) 中可以看出，图像中衬度值的变化比图 7(a)–(c) 中更明显，这证明闪烁体厚度对于高倍放大显微镜镜头系统影响较大，这也与前面我们根据分辨率曲线理论分析的结果(表 2)一致。

将表 3 与表 2 对比，可以发现实验结果与理论估值基本一致：(1) 放大倍数越大的镜头，它对应的闪烁体最佳厚度越小；(2) 闪烁体厚度对分辨率的影响，在高倍率的光学系统更为明显；(3) 高倍镜头匹配的闪烁体厚度的实验结果与预测值之间基本吻合(除了放大倍率 10 倍的显微镜镜头预测的最佳闪烁体厚度是 20 μm ，实际实验得到的是 50 μm)。因为目前成像线站成像探测器只配备了最薄 20 μm 的闪烁体，所以图 7(e) 中的衬度曲线并未达到最大值，如果有更薄的闪烁体，将会有更高的图像衬度。

表 3 实验获得各个物镜的闪烁体最佳匹配厚度
Table 3 Data of the optimum thickness of scintillator (SCIN) through experiment.

显微透镜放大倍率 Magnification of objective lens	数值孔径 NA	闪烁体厚度 Thickness of SCIN / μm	分辨率 Spatial resolution / μm
1.25 \times	0.04	130	7
2 \times	0.08	100	7
4 \times	0.16	50	3
10 \times	0.4	50	1.5
20 \times	0.75	20	0.8

3 结语

本文通过理论和实验研究，得到了不同显微透镜的闪烁体最佳匹配厚度，将这些结论应用在 X 射线成像实验中，可以提高探测器的成像质量。通过本文的理论和实验研究，建议成像线站应该配备比 20 μm 更薄的闪烁体以匹配 20 倍及以上的放大倍率显微透镜，以获得更高成像质量。

参考文献

- 1 Röntgen W C. On a new kind of rays[J]. *Science*, 1896, **3**(59): 227–231
- 2 Hartmann W, Markewitz G, Rettenmaier U, *et al.* High resolution direct-display X-ray topography[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, **27**: 308–309
- 3 Bonse U, Busch F. X-ray computed microtomography (μ CT) using synchrotron radiation (SR)[J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 1996, **65**: 133–169
- 4 Michiel M D, Merino J M, Buslaps T, *et al.* Fast micro-tomography using high energy synchrotron radiation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**: 043702
- 5 Koppel L N. Direct soft X-ray response of a charge coupled image sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1977, **48**: 669–672
- 6 Douissard P A, Cecilia A, Rochet X, *et al.* A versatile indirect detector design for hard X-ray micro imaging[J]. *Journal of Instrumentation*, 2012, **7**: P09016
- 7 Gruner S M, Tate M W, Eikenberry E F, *et al.* Charge-coupled device area X-ray detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, **73**(8): 2815–2842
- 8 Ho Kyung Kim, Jung Keun Ahn, Gyuseong Cho. Development of a lens-coupled CMOS detector for an X-ray inspection system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2005, **A545**: 210–216
- 9 Koch A. Lens coupled scintillating screen-CCD X-ray area detector with a high detective quantum efficiency[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1994, **348**(2–3): 654–658
- 10 Nikl M. Scintillation detectors for X-rays[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**: R37–R54
- 11 Moszynski M. Properties of the YAG:Ce scintillator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*, 1994, **345**: 461–467
- 12 Tous J, Blazek J, Zemlicka J, *et al.* Evaluation of a YAG:Ce scintillation crystal based CCD X-ray imaging detector with the Medipix2 detector[J]. *Journal of Instrumentation*, 2011, **6**: C11011
- 13 Martin T, Koch R. Recent developments in X-ray imaging with micrometer spatial resolution[J]. *Journal of Synchrotron*, 2006, **13**: 180–194
- 14 Douissard P A, Martin T, Rack A, *et al.* X-ray imaging detector with submicrometer resolution based on novel LSO:Tb thin film scintillator[R]. SCINT2009-Jeju, Korea, June 8–12, 2009

Influence of scintillator's thickness on imaging quality of lens-coupled hard X-ray imaging detector

ZHANG Yongxing^{1,2} XIE Honglan¹ DU Guohao¹ CHEN Rongchang¹ XIAO Tiqiao¹

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Zhangjiang Campus, Shanghai 201204, China)

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

Abstract Background: Scintillator is an important component of synchrotron X-ray imaging detectors, which converts the incident X-rays into visible light to be imaged by visible light imaging detectors. The thickness of scintillators has a great impact on the spatial resolution and contrast of the images. When the thickness of the scintillator is matched with detector lens (NA), image quality of experimental results will be improved obviously. But in fact, users doing X-ray imaging experiments at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) don't take into account this factor and it is difficult to obtain the best results with high image quality. **Purpose:** Matching thickness of scintillators with NA of objective can help us get good experimental results with high-quality images. **Methods:** We obtain the optimal thickness of scintillator for every objective lens by the way of mathematical computations of resolution theoretical curves and analysis of image contrast of experimental results. **Results:** Both of the results are nearly in accordance with each other. **Conclusion:** Users of SSRF will get better results of X-ray imaging experiment than before when they chose the optimal thickness of scintillator matched with the objective lens.

Key words X-Ray imaging detector, Scintillator, Spatial resolution, Contrast

CLC TL816⁺.1