

# 透明セラミックス技術を用いた高解像度 X 線イメージング検出器の開発

亀島 敬

公益財団法人高輝度光科学研究センター XFEL 利用研究推進室 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

国立研究開発法人理化学研究所放射光科学研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

初井字記

国立研究開発法人理化学研究所放射光科学研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

## 要旨

X 線イメージング検出器は汎用性の高い計測ツールとして広く用いられている。X 線透過像をミクロン～サブミクロンの高い空間分解能で検出する場合、X 線像をシンチレーターで可視蛍光像に変換し、レンズでイメージセンサーに拡大投影する間接変換型 X 線イメージング検出器を使用する事が一般的である。一方で、この構成ではシンチレーターや支持基板の界面、その接合層で生じる可視光の拡散が原因で像が滲むため、500 nm 前後の構造の解像が限界であるとされてきた。

我々は可視光の拡散を極限まで抑制することを狙った開発をこれまで行ってきた。具体的には、透明セラミックス技術を用いて光の散乱要因である気孔および接着層を持たない薄膜シンチレーターを開発し、可視光の拡散を抑制した。これを組み込んだ X 線イメージングユニットを構築、その空間分解能の評価を実施し、200 nm line-and-space パターンの解像に成功した。また、この性能を用いて超大規模集積回路 (VLSI) 内層部の 300 nm 幅アルミ配線の撮像に成功した。本研究成果で、間接変換型 X 線イメージング検出器の限界に近い解像力を安定して引き出す手法を確立することが出来た。現行機は視野が 130  $\mu\text{m}$  程度と狭いが、ビームプロファイル計測等の用途であれば十分であり、X 線自由電子レーザー施設 SACLA および大型放射光施設 SPring-8 において高精度ビームモニターとして運用に至っている。この解像力をさらに X 線 CT 等の利用実験に適用するには視野の拡大が必要である。本稿の終わりにその方向性について触れる。

## 1. はじめに

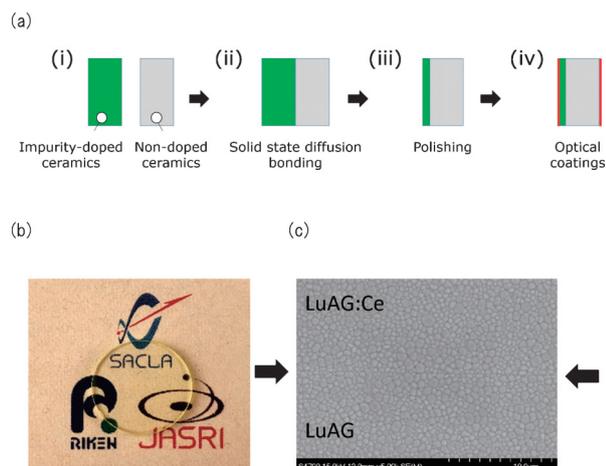
X 線を利用した計測では X 線を試料に照射し、そこから生じる透過 X 線・回折 X 線・蛍光 X 線等の信号を測定することで試料の情報を得る。これらの信号を測定する役割を持つ検出器は X 線計測分野において必要不可欠な要素である。特にイメージング検出器は広範囲の X 線信号を画像として取得し、その空間分布情報を同タイミングで得ることが出来る。その高い汎用性と得られる情報量の大きさから、数多くの実験や装置で採用されている。

回折 X 線のような角度を持って発散する X 線信号は、試料から一定の距離を置き空間的に拡大してから撮像するケースが多いので、検出器の解像度に対する要求は比較的小さい。一方で、X 線 CT などの試料の X 線透過像を計測するアプリケーションにおいては、X 線イメージング検出器の解像力はデータ精度を決める重要なパラメーターとなる。X 線画像を高い解像度で取得する場合、シンチレーターで X 線を可視光に変換し、これをレンズで拡大して撮像するレンズ結像方式の間接変換型 X 線イメージング検出器を一般的に用いる。この撮像方式は、シンチ

レーターを薄くして被写界深度外で生じるデフォーカス成分を除去することで、解像力を高めることが出来る。例えば、シンチレーターを支持基板に接着剤で接合し、10  $\mu\text{m}$  程度まで薄く研磨することで 1  $\mu\text{m}$  を超える精度の画像を得ることが可能となる<sup>1)</sup>。しかし、この薄膜化の手法は X 線による損傷で接合層の光学特性が劣化し可視光のイメージが滲んでしまうため、レンズが持つ理論限界に近い解像力を得られないという課題があった<sup>2)</sup>。

## 2. 薄膜シンチレーターの開発

本研究では、X 線イメージング検出器の解像力の限界に挑戦するために薄膜シンチレーターの光学特性を高める事に注力した<sup>3)</sup>。解像力を下げる原因とされる光の散乱要素を最小化する上で、透明性の高いシンチレーターと支持基板を用いるだけでなく、これらを直接接合する構造が必要と考えた。接合層が無ければ、そこで生じる光の散乱や反射の問題を根本的に解決できるからである。我々は、透明セラミックス技術<sup>4-6)</sup>を用いてシンチレーターの薄膜化を試みた。セラミックスはその内部に残存する空隙(気孔)



**Fig. 1** (Color online) (a) Fabrication sequence of the thin-film scintillator. (b) Photograph of the transparent LuAG:Ce/LuAG composite ceramics. The thickness of the LuAG:Ce and LuAG layers are  $5\ \mu\text{m}$  and  $1\ \text{mm}$ , respectively. (c) Secondary electron micrograph of the LuAG:Ce/LuAG composite ceramics cross section at the region of the bonding interface. The arrows indicate the bonding interface.

を除去し、結晶粒界サイズを蛍光波長より十分に小さいサブ nm に抑えることで単結晶と同等の透明性を得られる<sup>7)</sup>。加えて、焼結現象を利用した固相拡散接合を用いて、直接接合が可能である<sup>5,6)</sup>。これらの特徴を活かした透明薄膜シンチレーター製作手法を **Fig. 1(a)** に示す。(i) 同材料の透明セラミックスでシンチレーターと支持基板を作製する。シンチレーターは Ce 等の不純物を添加することで得られる。(ii) これらを固相拡散接合で複合化する。同材料のセラミックスであれば屈折率差が  $0.1\%$  より小さい程度まで抑えられるので、接合面で光の反射は極めて小さくなる。(iii) シンチレーターと支持基板の接合面は一つが多結晶体と同等の機械強度を持つため<sup>8)</sup>、研磨でシンチレーター層を  $5\ \mu\text{m}$  程度まで薄くできる。(iv) 仕上げに、基板両面に光学コーティングを施すことで、全ての界面で光学特性の高い薄膜シンチレーターを得ることができる。本手法を用いて  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (略称 YAG:Ce) 薄膜シンチレーターの開発に成功し、X 線自由電子レーザー施設 SACLA の X 線レーザーモニターに採用された<sup>9)</sup>。

今回、X 線イメージング検出器の限界の解像力を達成すべく、 $5\ \mu\text{m}$  厚の  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (略称 LuAG:Ce) シンチレーターを開発した。YAG と比較し量子効率が高くなるので X 線の侵入長が短くなる。これにより、被写界深度内で生じる蛍光の割合が増え、深度外で生じる割合は低下するのでデフォーカス成分の影響をより小さくすることが出来る。また、支持基板である無添加 LuAG 層の厚みを  $1\ \text{mm}$  とすることで、支持基板中で  $10\ \text{keV}$  の光子を  $\sim 10^{-43}$  台まで減衰することが出来る。この高い X 線遮蔽力は光軸上に設置されるコンポーネントを X 線損傷から守り、シンチレーター・対物レンズのタンデム配置を可能と

する。これにより、高い開口数を持ち作動距離の短い対物レンズを組み込んだ光学配置を実現できる。

開発した薄膜シンチレーターの透明性を目視・透過率計測・電子顕微鏡による観察で評価を行った。**Fig. 1(b)** は開発したシンチレーターの写真であり、シンチレーター・支持基板の接合面で生じる反射や散乱は確認できない。また、LuAG:Ce のピーク波長  $520\ \text{nm}$  の光を  $0$  度の入射角で作製した基板に照射し、その透過率を測定した。得られた透過率は  $83.8\%$  であり、これは LuAG の屈折率  $1.85$  で決まる  $0$  度入射時の理論透過率  $83.0\%$  とよく一致しており、接合面における反射は小さく、高い透光性を持つことを示唆している。一方で、透過率測定は散乱し拡散した光も透過光としてカウントしてしまうので透明性を示すには不十分である。ゆえに電子顕微鏡で LuAG:Ce と LuAG の接合面付近を撮像し、結晶粒界の様子を観察した (**Fig. 1(c)**)。通常、電子顕微鏡を用いても粒界の様子を観察するのは難しいので、試料にサーマルエッチング処理を行うことで結晶粒界を強調している。**Fig. 1(c)** の上部はシンチレーター層 LuAG:Ce、下部は支持基板層の無添加 LuAG である。これらの接合面の両端の位置を黒矢印で指している。数  $\mu\text{m}$  サイズの結晶の粒が、LuAG:Ce シンチレーター層、LuAG 支持基板層、およびその接合面を含め、隙間なく埋め尽くしている様子が観察できる。これは光の散乱の原因となる気孔が無く、開発した薄膜シンチレーターが高い透明性を有す事を示している。

### 3. 検出器の空間分解能の評価

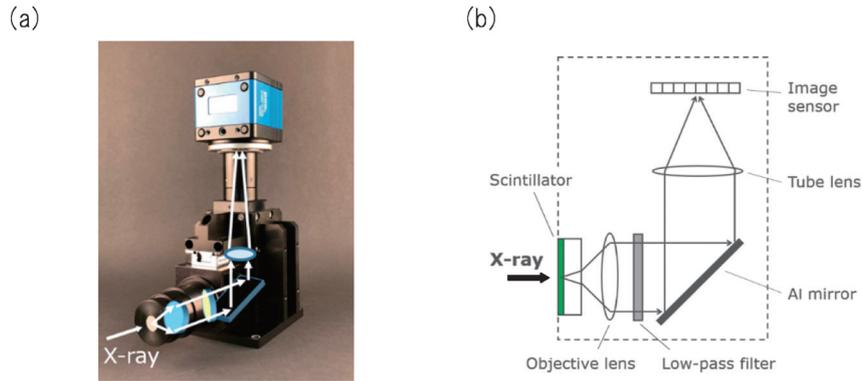
開発した薄膜 LuAG:Ce シンチレーターの性能を評価するために、レンズ結像型 X 線イメージング検出器を構築した (**Fig. 2(a)**)。また、**Fig. 2(b)** は検出器内部の光学配置の概略図である。次に各コンポーネントの詳細を記す。

#### ・シンチレーター

**Fig. 1(a)** の製法で開発した  $5\ \mu\text{m}$  厚の LuAG:Ce 層、 $1\ \text{mm}$  厚の LuAG 層を持つ複合セラミックス。LuAG:Ce の発光は  $520\ \text{nm}$  にピーク波長を有し、 $450\sim 700\ \text{nm}$ <sup>10)</sup> に分布する。これに最適化した誘電多層膜によるコーティングを LuAG:Ce シンチレーターおよび LuAG 支持基板の表面に施した。X 線入射面は反射膜、出射面は反射防止膜とした。反射膜は遮光だけでなく、対物レンズと逆方向に生じた蛍光を反射することでシンチレーターの発光効率を実効的に 2 倍にする役目を果たす。

#### ・対物レンズ

$1\ \text{mm}$  厚の LuAG 基板は  $10\ \text{keV}$  の X 線を  $10^{-43}$  まで減衰させるので、ミラー等を用いて放射線に弱い対物レンズを光軸から外す必要がない。これにより、作動距離が小さく開口数が大きい対物レンズを使用できる。今回は開口数



**Fig. 2** (Color online) (a) Photograph of the constructed X-ray imaging detector. (b) Schematic of the optical system in the detector. Reprinted with permission from 3). Copyright 2019 Optical Society of America.

0.85, 光学倍率100xのレンズを採用した。

#### • バンドパスフィルター

不純物 Ce による発光450~700 nmの他に, LuAG 結晶内のアンチサイト欠陥・酸素欠陥を起因とした発光があり, これらは紫外領域<sup>11)</sup>に分布する。対物レンズの被写界深度から大きく外れる支持基板層で発光すると空間分解能を低下させる原因となる。これらを除くためにバンドパスフィルターを光路に挿入した。470 nm より短波長をカットしている。

#### • イメージセンサー

科学計測用 CMOS カメラ PCO 社製 pco.panda 4.2を用いている。他の科学計測用 CMOS カメラと比較し, ファンを持たない空冷タイプであり振動要素がないことが特徴の一つである。高空間分解能計測に有利と考え, 今回の評価機に採用した。

これらで構成した X 線イメージング検出器の性能を **Table 1**にまとめた。実効ピクセルサイズは65  $\mu\text{m}$  であり, 視野は133  $\mu\text{m}$  角である。また, 10 keV のエネルギーを持つ X 線1光子が LuAG:Ce シンチレーター層で吸収されると, 発光・伝送効率からイメージセンサー上で平均~13 electrons の信号で検出される設計となっている。この検出器の X 線に対する空間分解能を SPring-8 BL29XUL<sup>12)</sup>で評価を行った。X 線テストチャート NTT-AT 社製 XRESO-100に X 線ビームを照射し, その透過信号を検出器で撮像した。チャートには1  $\mu\text{m}$  厚のタンタルでパターンが描かれている。**Fig. 3**は実験セットアップ図である。X 線ビームを二結晶分光器で $10^{-4}$ オーダーに単色化し, また, その高調波を X 線ミラーで $10^{-4}$ オーダーまで減衰させた。加えて, X 線オプティクス波面およびスリット等から生じるスペックル信号を抑えるために X 線ディフューザーを光軸上に配置し, ビームプロファイルの一様性を高めた。テストチャートとシンチレーター検出

**Table 1** System performance of the constructed X-ray imaging detector.

Effective pixel size	[ $\mu\text{m}$ ]	0.065
Field of view	[ $\mu\text{m}^2$ ]	133 × 133
Image format	[pixels]	2048 × 2048
10 keV Conversion ratio	[electron/X-ray]	13
Dynamic range	[bit]	16
Frame rate	[fps]	30

面を0.5 mm まで近づけて設置することで, テストチャート透過時に生じる X 線回折を抑えるセットアップとした。

**Fig. 4** はそれぞれ撮像した200, 400, 600 nm line-and-space パターンの X 線透過像と, その射影プロファイルである。光子エネルギー7.3 keV, ビーム強度 $5.8 \times 10^{12}$  photons/s/ $\text{mm}^2$ , フラットフィールド補正した露光時間200 ms の画像の100枚平均, から X 線透過像を得ている。

**Figs. 4 (a, b, c)**それぞれ line-and-space パターンの解像に成功しているのが分かる。Modulation  $M$  を  $M = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / (T_{\text{max}} + T_{\text{b}})$  と定義した場合,  $M$  はそれぞれ 9%, 45%, 41% となる。ここで  $T_{\text{max}}$  は space 部の透過率,  $T_{\text{min}}$  は line 部の透過率,  $T_{\text{b}}$  は背景部の透過率を指している。

**Figs. 4 (d, e, f)**においてプロファイルの山, 谷, ベースライン部の値にそれぞれ相当する。

また, Modulation transfer function (MTF) を評価するためにジーマンススターパターンの X 線透過像を取得した。ジーマンススターパターンは同心円上に連続した空間周波数のデータを有している。同心円ラインプロファイル上の line-and-space から空間周波数と Modulation  $M$  を計算・プロットすることで MTF を得る。line-and-space のステップ角を  $d\theta$ , 同心円の半径を  $r$ , 同心円上の line および space の幅を  $W$  とすると, line-and-space の空間的周期  $2W$  は  $2W = rd\theta$  で表される。また, 空間周波数は  $f = 1/(2W)$  のように周期の逆数で定義される。これらから

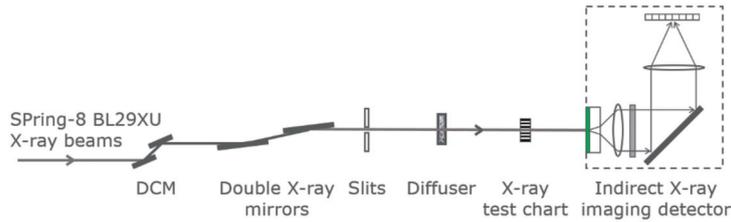


Fig. 3 (Color online) Experimental setup of X-ray imaging. Reprinted with permission from 3). Copyright 2019 Optical Society of America.

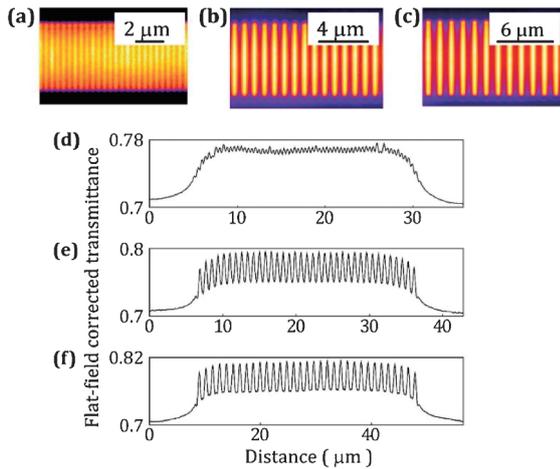


Fig. 4 (Color online) (a), (b), (c) Microradiographs at the areas of 200, 400, and 600 nm line-and-spaces, respectively. (d), (e), (f) Projection profiles at the areas of 200, 400, and 600 nm line-and-spaces, respectively. Reprinted with permission from 3). Copyright 2019 Optical Society of America.

$f = 1/(rd\theta)$  の関係を得られる。空間周波数は半径  $r$  に逆比例することが分かる。MTF の評価には光子エネルギー 7.3, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0 keV の X 線ビームを使用した。このとき、5  $\mu\text{m}$  厚のシンチレーターの量子効率は 34%, 36%, 38%, 25%, 18%, 15% となる。その内の 2 つ、7.3, 16.0 keV の X 線透過像を Figs. 5 (a, b) に示す。Fig. 5 (c) はジューメンスタースターパターンの X 線透過像から計算・プロットした MTF であり、Fig. 5 (d) は Fig. 5 (c) カットオフ領域の拡大図である。Figs. 5 (c, d) 内の  $m$  でラベルされたエリアは、ジューメンスタースターパターン内にある円環部に相当し、データが無い。Fig. 5 (d) に関し、カットオフ周波数を見積もるために終端の 2 点のデータを外挿して  $m$  でラベルしたエリアにプロットしている。Figs. 5 (a, b) は、共に 200 mm line-and-space パターンを解像しているが、そのコントラストは Fig. 5 (a) が有意に高い。Fig. 5 (c) で示す MTF も同様に全エネルギーでカットオフが 2500 line pairs/mm (200 mm line-and-space パターンの解像に相当) 近辺、もしくはそれ以上に到達しているが、他の周波数帯でその Modulation の大きさに差がある。これは X 線光子エネルギーに応じて、(1) シンチレーターに対する侵

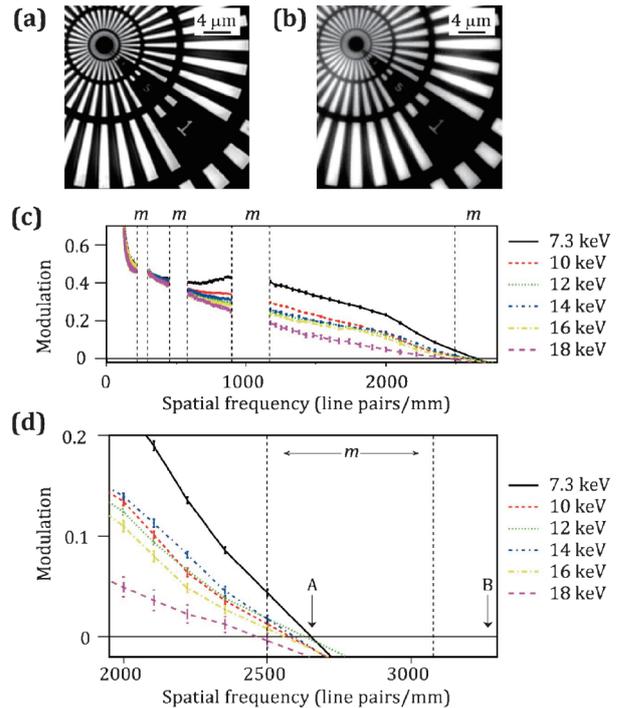


Fig. 5 (Color online) (a), (b) Microradiographs of a tantalum Siemens star pattern acquired at photon energies of 7.3 and 16 keV. (c) MTFs calculated from the microradiograph of a tantalum Siemens star pattern. (d) MTFs around the cutoff region. The arrow A indicates the cutoff frequency of 2650 line pairs/mm ( $w_c = 189$  nm). The arrow B indicates the diffraction-limited cutoff frequency of the present detector at 3269 line pairs/mm ( $w_c = 152$  nm). The label  $m$  in (c) and (d) indicates the frequency sections without data points (see the text). All the bars in (c) and (d) show the standard errors for the data points. Reprinted with permission from 3). Copyright 2019 Optical Society of America.

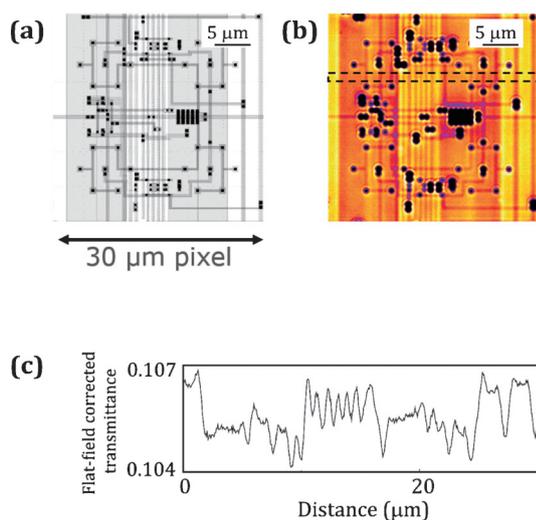
入長が異なり、被写界深度外で発光するデフォーカス成分の割合に差を生じること、(2) 試料からの X 線回折による広がり方が異なること、また、(3) シンチレーターおよび支持基板内で蛍光 X 線発生の有無によってバックグラウンド信号量が変化すること、による影響と考えられる。(3) に関し、LuAG は  $\text{Lu L}_3$  9.24 keV,  $\text{Lu L}_2$  10.35 keV に吸収端を持つので、これらを超えたエネルギーを持つ X 線を照射するとそれぞれの準位で蛍光 X 線を生じる。蛍光 X 線はシンチレーターおよび支持基板内部でランダム

方向に一定距離進むので検出する信号が拡散することになり、結果として像の Modulation を低下させる。以上の理由から 7.3, 10.0, 12.0 keV の MTF に顕著な差が生じたと考えられる。

カットオフ周波数は理想的な条件において  $f_0 = 2NA/\lambda$  で決まる。NA は対物レンズの開口数、 $\lambda$  はシンチレーターの中心蛍光波長である。今回の構成は  $NA = 0.85$ , LuAG:Ce ピーク波長  $\lambda = 520 \text{ nm}$  なので、 $f_0 = 3269 \text{ line pairs/mm}$  と見積もれる。これは Fig. 5(d) 内に、B で示した位置となる。一方で、実験で得られた 7.3 keV の X 線ビーム照射時のカットオフ周波数は  $2650 \text{ line pairs/mm}$  であった。これは Fig. 5(d) 内の A が指す位置である。これらはそれぞれ、 $152 \text{ nm}$ ,  $189 \text{ nm line-and-space}$  パターンを観察した時、丁度ゼロコントラストになる条件に相当する。この理論値 B と実験値 A との差は、上述の MTF のエネルギー依存性の原因と同様に、対物レンズ被写界深度が  $\pm 0.66 \mu\text{m}$  に対しシンチレーター層が  $5 \mu\text{m}$  と厚いこと、試料からの X 線回折、シンチレーターや支持基板内で生じる蛍光 X 線、また光学系の残収差等の複合的要因によると考えられる。

#### 4. 超大規模集積回路 (VLSI) の内層配線の可視化

得られた X 線イメージング検出器の性能を検証するため、 $200 \text{ nm}$  プロセスで製造された超大規模集積回路 (VLSI) の内層配線の撮像を行った。Fig. 6(a) は VLSI チップ SOPHIAS<sup>13)</sup> のイメージ領域ピクセルの設計図で、最



**Fig. 6** (Color online) (a) Designed layout of metal layers (gray) and vias (black) in a CMOS imaging sensor. One pixel with an area of  $30 \times 30 \mu\text{m}$  square is shown. (b) Microradiograph for the pixel region shown in (a). (c) Line profile calculated for the image section depicted as a dotted rectangle in (b). Reprinted with permission from 3). Copyright 2019 Optical Society of America.

小幅  $300 \text{ mm}$  のアルミ配線、タングステン貫通電極がシリコン基板内部に埋め込まれている。図中のグレー線がアルミ配線、黒い四角がタングステン貫通電極である。微細な配線構造に加え、シリコンとアルミは元素番号 (Si は 14, Al は 13) が近いこと、また、アルミ配線の厚みは  $500 \mu\text{m}$  厚のシリコン基板に対しておよそ  $1000$  分の 1 である  $600 \text{ nm}$  という X 線画像にコントラストを付けづらい試料であった。

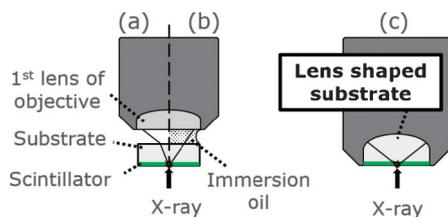
Fig. 6(b) は実際に取得した Fig. 6(a) のエリアの X 線透過像である。  $12.0 \text{ keV} \cdot 1.7 \times 10^{13} \text{ photons/s/mm}^2$  の X 線ビーム照射、 $600 \text{ ms}$  露光で得た画像のフラットフィールド補正およびその  $255$  枚積算から得ている。また、画像の視認性を高めるために contrast-limited adaptive histogram equalization 法<sup>14)</sup> を適用している。Fig. 6(b) から確認できるようにアルミ配線の可視化に成功している。Fig. 6(c) は Fig. 6(b) 内の破線で囲んだエリアの射影プロファイルである。図からアルミ配線部は  $1 \sim 2\%$  程度のコントラストで検出されているのが確認できる。ここでコントラストは  $C = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / T_{\text{max}}$  で定義している。この結果は、これまで観察が難しいとされてきた VLSI の微細配線パターンの欠陥を、非破壊で検出できることを示している。

#### 5. おわりに

本稿では、X 線イメージング検出器の空間分解能の向上のアプローチについて紹介した。透明セラミックス技術で薄膜シンチレーターに高い光学特性を与えることでシンチレーター内の光拡散を抑え、光学系で決まる回折限界に近い解像力を得ることが出来た。X 線信号を計測する役割を持つ X 線イメージング検出器の解像力の向上が、各種アプリケーションにおいて計測精度・測定限界値の点で広く貢献すると期待したい<sup>15,16)</sup>。

また、本研究成果を発展させる案を現在検討しており、そのうちの一つに広視野化がある。現在の  $200 \text{ nm line-and-space}$  パターンを解像出来る光学構成では視野が  $133 \mu\text{m}$  と小さく、X 線自由電子レーザー施設 SACLA および大型放射光施設 SPring-8 のビームモニター等の用途に限られている。特に動的な試料を撮像する場合、イメージを一括で取得する必要があるため視野の広さが重要となる。そこで、高 NA 広視野光学系に  $100 \text{ Mpixel}$  超の CMOS イメージセンサーを具備した X 線イメージング検出器の開発を進めている。これにより  $200 \text{ nm line-and-space}$  パターンを可視化する解像力と  $2 \text{ mm}$  程度の視野を早期に供用する予定である。つい最近になって、 $10 \text{ mm}$  を超える視野についても可能性が示唆される予備検討結果が得られた。  $20$  倍の X 線拡大光学系と組み合わせることが出来れば、試料上で  $10 \text{ nm line-and-space}$  分解能、画素数  $1 \text{ Gpixel}$  を超える超高解像撮像の可能性がでてきた。

もう一つの高度化の方向性は、検出器本体の空間分解能



**Fig. 7** (Color online) Comparison of the objective lens structure. (a) Dry lens. (b) Liquid immersion lens. (c) Solid immersion lens equipped with a lens-shaped scintillator.

の更なる向上である。レーリーの分解能  $\delta = 0.61\lambda/NA$  で定義されるように高い空間分解能を得るには蛍光波長  $\lambda$  を短くし、レンズの開口数  $NA$  を高める必要がある。開口数は  $NA = n \cdot \sin \theta$  のようにレンズへの開口角  $\theta$  とレンズ外媒質の屈折率  $n$  に依存する。ゆえに、 $NA$  を高めるには従来光学構成の **Fig. 7(a)** ではなく **Fig. 7(b)** に示す液浸系対物レンズを用いて  $n$  を高める方法が一般的であるが、媒体にオイルを使うこと・開口角を高めるために支持基板層を薄くする必要のあることからオイルや後段に配置される光学系への放射線損傷の影響が大きく、その運用は現実的ではない。そこで開発したシンチレーターの高い光学特性を活かし、**Fig. 7(c)** に示すようにシンチレーター基板をレンズ加工し、対物レンズの先頭に組み込む。これにより、屈折率1.85を持つシンチレーター自身を媒体とした固浸レンズが実現できる。液浸レンズと比較し開口数が高いだけでなく、支持基板部の厚みから得られる放射線遮蔽、固体を媒質とした長時間の安定なフォーカス等の実用的な構造を持つ。現在、LuAG:Ce ピーク波長520 nm、 $NA = 1.6$  で検討しており、カットオフ周波数  $f_0 = 6154$  line pairs/mm (81 mm line-and-space パターンでゼロコントラストに相当) に到達する見込みとなっている。

#### 謝辞

高輝度光科学研究センターの竹内晃久博士、上杉健太郎博士、工藤統吾博士に検出器の空間分解能評価、画像解析の手法をご提案・ご教授頂きました。理化学研究所の香村芳樹博士、玉作賢治博士、矢橋牧名博士に手厚い実験サポートと数多くのご助言を頂きました。神島化学工業株式会社の柳谷高公グループマネジャー、村松克洋チームリーダーに薄膜シンチレーターを製作して頂きました。シグマ

光機株式会社の皆さまにはイメージングユニットの構築、シンチレーターのコーティングをして頂きました。謹んで感謝申し上げます。ここで紹介した研究は、日本学術振興会 (No. 26790077) による科学研究費助成事業若手研究 (B) および高輝度光科学研究センターによる匠プロジェクト研究課題 (T27-4) の助成を受け、SPring-8/SACLA の利用研究課題として行われました。

#### 参考文献

- 1) T. Martin and A. Koch: *J. Synchrotron Radiat.* **13**, 180 (2006).
- 2) H. Graafsma and T. Martin: *Advanced tomographic methods in materials research and engineering*, 277 (2008).
- 3) T. Kameshima, A. Takeuchi, K. Uesugi, T. Kudo, Y. Kohmura, K. Tamasaku, K. Muramatsu, T. Yanagitani, M. Yabashi and T. Hatsui: *Opt. Lett.* **44**, 1403 (2019).
- 4) H. Yagi, T. Yanagitani, H. Yoshida, M. Nakatsuka and K.-i. Ueda: *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 133 (2006).
- 5) H. Yagi, T. Yanagitani, K. Takaichi, K.-i. Ueda and A. A. Kaminskii: *Opt. Mater.* **29**, 1258 (2007).
- 6) 村松克洋, 八木秀喜, 柳谷高公: *OPTRONICS* **9** (2012).
- 7) Y. N. Barabanenkov, S. N. Ivanov, A. V. Taranov, E. N. Khazanov, H. Yagi, T. Yanagitani, K. Takaichi, J. Lu, J. F. Bisson, A. Shirakawa, K. Ueda and A. A. Kaminskii: *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* **79**, 342 (2004).
- 8) H. Yagi, K. Takaichi, K. Ueda, Y. Yamasaki, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: *LaPhy* **15**, 1338 (2005).
- 9) T. Kameshima, T. Sato, T. Kudo, S. Ono, K. Ozaki, T. Katayama, T. Hatsui and M. Yabashi: *AIP Conf. Proc.* **1741**, 040033 (2016).
- 10) T. Yanagida, Y. Fujimoto, Y. Yokota, A. Yoshikawa, T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Shimizu, H. Yagi and T. Yanagitani: *Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, 1612 (2010).
- 11) Y. Fujimoto, T. Yanagida, H. Yagi, T. Yanagitani and V. Chani: *Opt. Mater.* **36**, 1926 (2014).
- 12) K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki, N. Kawamura, M. Suzuki and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.* **467-468, Part 1**, 686 (2001).
- 13) T. Hatsui, M. Omodani, T. Kudo, K. Kobayashi, T. Imamura, T. Ohmoto, A. Iwata, S. Ono, Y. Kiriwara and T. Kameshima: *Proceedings of the International Image Sensor Workshop (IISW)* (2013).
- 14) K. Zuiderveld: *Graphic Gems IV* (1994).
- 15) K. Ohwada, K. Sugawara, T. Abe, T. Ueno, A. Machida, T. Watanuki, S. Ueno, I. Fujii, S. Wada and Y. Kuroiwa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, SLLA05 (2019).
- 16) T. Osaka, I. Inoue, R. Kinjo, T. Hirano, Y. Morioka, Y. Sano, K. Yamauchi and M. Yabashi: *J. Synchrotron Radiat.* **26**, 1496 (2019).

## 著者紹介



### 亀島 敬

高輝度光科学研究センター XFEL 利用研究推進室 研究員

理化学研究所 放射光科学研究センター 客員研究員

E-mail: kameshima@spring8.or.jp

専門：X線検出器システムの開発

#### 【略歴】

2009年3月総合研究大学院大学エネルギー加速器科学研究科博士課程修了。博士(理学)。2009年4月理化学研究所X線自由電子レーザー計画推進本部研究員を経て、現在に至る。



### 初井宇記

理化学研究所 放射光科学研究センター 先端光源開発研究部門 制御情報グループ 次世代検出器開発チーム チームリーダー

E-mail: hatsui@spring8.or.jp

専門：放射光実験用X線検出システムの開発，放射光科学

#### 【略歴】

1999年3月総合研究大学院大学数物科学研究科・機能分子科学専攻博士課程修了。博士(理学)。1999年4月日本学術振興会特別研究員(PD)，2000年8月分子科学研究所・助手，2007年12月高輝度光科学研究センター・研究員，2008年4月理化学研究所・X線自由電子レーザー計画推進本部・データ処理系開発チーム・チームリーダー，2011年4月理化学研究所・放射光科学総合研究センター・XFEL研究開発部門・ビームライン研究開発グループ・データ処理系開発チーム・チームリーダー，を経て現在に至る。

# Development of high-spatial resolution X-ray imaging detector by using transparent ceramic technology

## Takashi KAMESHIMA

XFEL Utilization Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute  
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, JAPAN

RIKEN SPring-8 Center, RIKEN

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, JAPAN

## Takaki HATSUI

RIKEN SPring-8 Center, RIKEN

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, JAPAN

**Abstract** An X-ray imaging detector is a versatile tool for measurement of X-ray signals. In resolution ranges of a few micrometer or less, an indirect X-ray imaging detector is generally used. This detection system consists of a scintillator, imaging optics, and an image sensor. The detected X-ray image is converted to a visible one on the scintillator plane, and then projected to the image sensor through the magnification optics. In this imaging system, the optical diffusion of the luminescent light in the scintillator makes a blur and limits the resolving power of around 500 nm.

This development focused on suppressing the optical diffusion to enhance the resolving power of the indirect X-ray imaging detector. We have successfully developed thin-film scintillators with high transparency by using transparent ceramics technology. The fabricated scintillators have no adhesive layers and pores causing the optical diffusion. We have constructed an indirect X-ray imaging detector equipped with the fabricated scintillator for evaluation of the resolving power. X-ray transmission images of 200 nm line-and-space patterns were successfully resolved. Also, the detector performance was demonstrated by visualizing the aluminum wiring lines with 300 nm width patterned in the inner layer of very large scaled integrated circuits (VLSI). In this research, the indirect X-ray imaging detector has achieved the resolving power close to the diffraction limit. The developed detector is deployed to high-resolution beam monitors in the X-ray free electron laser facility SACLAL and the synchrotron radiation facility SPring-8. The current field of view of 130  $\mu\text{m}$  square is however too small to be applied to user experiments such as X-ray computed tomography. At the end of this report, we mention direction for enhancement of the field of view.