

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月1日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340067

研究課題名（和文） 超高感度光センサーを用いた2次元硬エックス線検出器の開発

研究課題名（英文） Development of 2-dimensional hard X-ray sensor using a photon sensor with high sensitivity

研究代表者

幅 淳二（HABA JUNJI）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：60180923

研究成果の概要（和文）：ファイバー状、あるいは小角柱状に仕上げられた単結晶シンチレータを束ねた2次元アレイを、2次元位置感度を持つ高感度ピクセル光センサーと組み合わせることで、硬X線のイメージングができるシステムの可能性を探った。ファイバー状の単結晶は微細径が実現出来るが、その仕上がり径を揃えることが極めて困難で、均一な2次元アレイを作ることが困難であった。一方小角柱に機械研磨されたシンチレータのアレイでは、良好なアレイが製作可能であることが判明した。

研究成果の概要（英文）：The integrated system has been investigated for a high performance hard X-ray imager, where the 2-dimensional array of bundle of fibers or machine shaped rectangular rods made of monolithic crystal of inorganic scintillator are viewed by an ultra sensitive pixel photon sensor. It was found that the pultruded fibers could be finer well below 0.5 mm, they are hard to keep a predetermined diameter stably and uniformly. It has been concluded that the machine shaped one can provide very uniform scintillator array although it is not easy to realize very fine size below 1mm.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2011年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2012年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：高エネルギー物理学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：放射線、X線、検出器、2次元、イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

（1）高いエネルギーのX線に対する高効率で位置分解能の良好なイメージ型検出装置が、様々な放射線計測分野で必要とされている。

（2）研究代表者は、超高感度のピクセル型光検出器の開発を終えたところで、その有効性を活かすアプリケーションを検討してい

た。

（3）高いエネルギーのX線に対して高検出効率を持つ無機シンチレータの単結晶ファイバーなどの製造に関する開発研究が進んでおり、それを（2）と組み合わせることで、十分な精細度を持つX線イメージングデバイスが考えられた。

## 2. 研究の目的

(1) 高エネルギーX線に対して良好な検出効率を持ちしかも、応答性が高速なシンチレータを単結晶ファイバーととして、そのファイバーを束ねた単結晶の2次元アレイを作る。

(2) 上記シンチレータアレイと、位置感度を持つ超高感度光ピクセルセンサーあるいは、近年開発された、S-CMOSを使った撮像デバイスと組み合わせたシステムを評価する。

(3) 上記のシステムが実際に高エネルギーX線に対する有効なイメージングデバイスとなるかテストを行う。

## 3. 研究の方法

(1) 入手可能な単結晶シンチレータファイバーの素材として、CeをドープしたLuAGの単結晶を選び、その寸法精度の評価を行った。引き抜き製法で作られるファイバーであるため、ファイバー個々の直径が安定しないばかりでなく、同一ファイバーにおいても軸方向に対してその直径が均一でない可能性がある。そこで100mmの長さを持つ10本のLuAG単結晶ファイバーを入手して、それぞれについて10mm間隔で10点をマイクロメータにより直径測定した。図1に、単結晶ファイバーサンプルの外観を示す。



図1 試作されたCe:LuAGファイバー

こうして製作された10本のサンプル(A~J)についての10地点の測定結果を図2に示す。目標としている、直径480マイクロンに対して、平均464 $\mu\text{m}$ 、偏差約20 $\mu\text{m}$ という結果となった。

これは、恐れていたほどには悪くない結果である。

(2) 実際にこうしたファイバーを束ねて2次元上のアレイを製作する。今回は10mm厚のファイバープレート(口径18.5mmx18.5mm)を、0.5mmのファイバーを束ねることとした。その写真を図3に示す。

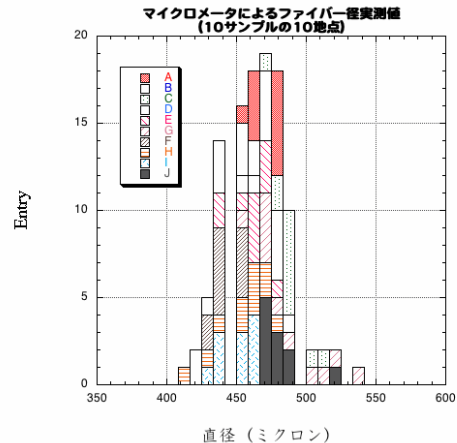


図2 試作されたCe:LuAGファイバー10サンプルの断面形状の測定結果

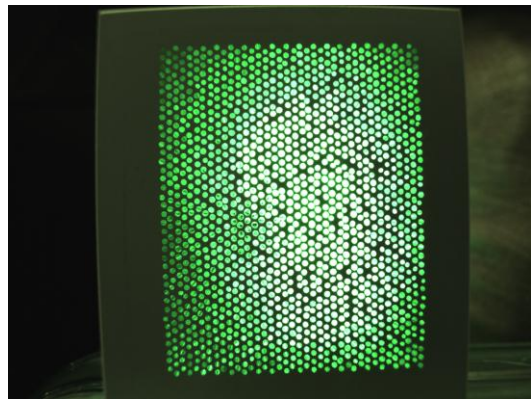


図3 Ce:LuAGファイバーを束ねて作られた10サンプルの断面形状の測定結果

(3) 円形断面の引き抜きファイバーをバンドルする方法では、写真で見られるように、フィルファクターがどうしても低くなってしまふことは避けられない。しかも前項で測定されたように、ファイバー間によっては20%以上も径の違いがあるため、均質な平面充填を実現することが一層困難となる。

そこでオプションとして、2次元測定の精細度に妥協をして、幾分大径(~1mm)の角柱を単結晶シンチレータより機械研磨で切り出し、それを束ねる方法を試した。製作は古河機械金属株式会社へ依頼した。今回の素材は、PrをドープしたLuAG結晶であり、0.9mm角5mm長の角柱を30x30本を束ねて、30mm角の口径を得ている。図4にその写真を示す。

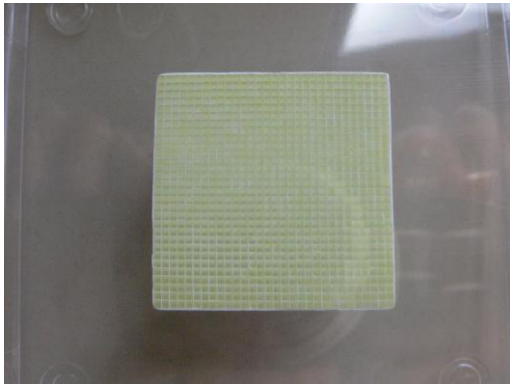


図4 単結晶の機械加工角柱による Pr:LuAG シンチレータアレイ

フィルファクターについて、大きな優位性があることが明瞭に見て取れる。計算上は81%の充填となっており、先のファイバによるアレイに比べて3倍近い改善となっている。

(4) 超高感度ピクセル型光検出器と組み合わせて、そのイメージングデバイスとしての評価準備を行った。図5写真はその機器配列を示す。左端の黒いボックス内に取り付けられているのは LuAG シンチレーションファイバーのアレイである。



図5 シンチレータアレイと超高感度ピクセル型光検出器を組み合わせたシステムの外観

(5) 新しい光センサーとして、近年低ノイズデバイスとして大きな進展が報告されている、scientific CMOS カメラの検討・評価を行った。導入したのは、独 PCO 社の SCMOS camera PCO.edge で、その主な仕様は、表1のとおりである。

type of sensor	scientific CMOS (sCMOS)
image sensor	CIS2051
resolution	2560 x 2160 pixel
pixel size	6.5 $\mu\text{m}$ x 6.5 $\mu\text{m}$
sensor format / diagonal	16.6 mm x 14.0 mm / 21.8 mm
MTF	76.9 lp/mm (theoretical)
fullwell capacity	30 000 e <sup>-</sup>
dynamic range	27 000 : 1 (88.6 dB) (rs1, ssc2)
spectral range	370 nm - 1100 nm

表1 新規導入センサーの緒元

このカメラのセンサーの量子効率(QE)はメーカーにより波長の関数として、図6のように与えられており、図7に示す LuAG シンチレータの発光スペクトルのピークに対して、少し長波長側に感度を持つ。これから一定のレスポンスが期待できるものと考えられる。

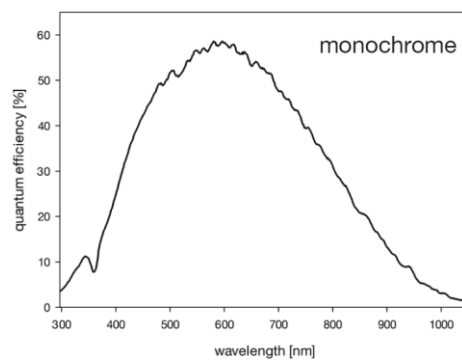


図6 sCMOS センサーの量子効率

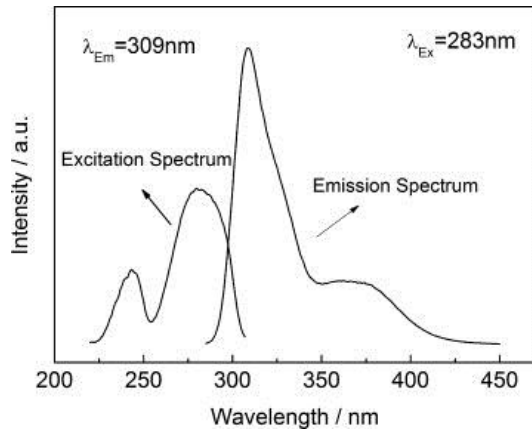


図7 LuAG シンチレータの典型的な発光スペクトル (Radiat. Meas., 45 (2010), pp. 457-460 より抜粋)

実際にこのカメラを超高感度光センサーとして光学系と組み合わせ、先の Pr:LuAG のシンチレータアレイと組み合わせ、システム化を行い、暗箱内に設置した。(図8)

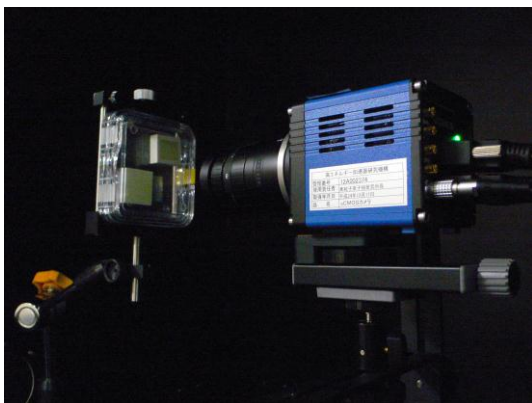


図8 LuAG シンチレータアレイと sCOMS カメラを組み合わせ暗箱内に設置した外観

このシステムが期待通りの低雑音撮影ができるかを確認するため、暗箱内で微弱光による撮影を行った。暗箱内でもシャープな映像が捉えられていることが図9により示されている。

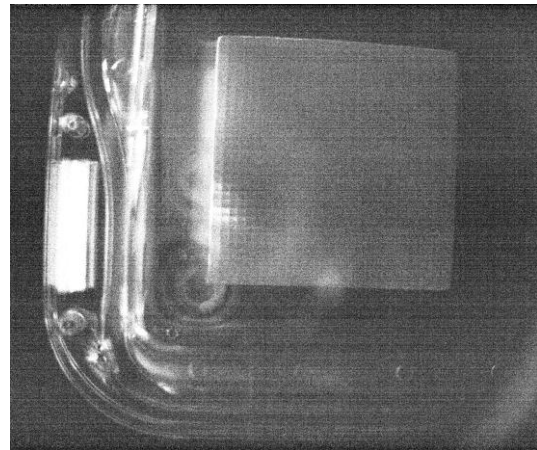


図9 暗箱内で撮影されたシンチレータアレイのイメージ

#### 4. 研究成果

超高感度ピクセル型センサーと組み合わせで硬X線のイメージ装置を実現するための、無機シンチレータのアレイについて、その製造のための可能性を評価した。要求される精細度が1ミリ程度であれば、機械加工による単結晶ブロックのバンドルによる方法が、より現実的であることが、明らかとなった。今後は500ミクロンを下回る精細アレイの実現のために、今回のファイバーにおける製法の高度化を進めていくことが望まれる。さらにこうしたアレイを読み出すシステムとして、新たに、新型の超高感度 CMOS センサー (sCMOS) からなるカメラの可能性についても検討するシステムが完成した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計 2件)
- ① 「巻頭言：単一量子測定と素粒子実験」  
幅 淳二、招待論文、日本光学会誌、光学41巻10号(2012) p501
  - ② “R&D status of 64-channel photon-counting imaging module”  
Y. Kawai, J. Haba, M. Suyama. 査読有  
Nucl. Instrum. Meth. A623 (2010) 282-284

[学会発表] (計 2件)

- ① “Detector technology project in KEK” presented by Junji Haba at the 8<sup>th</sup> Future Light Source Workshop October 17-18, 2012, Pohang (韓国) (招待講演)
- ② “Recent Activities in HEP Detector R&D” presented by Junji Haba at the 35<sup>th</sup> International Conference of High

Energy Physics (ICHEP2010), July 22-28,  
2010, Paris (フランス) (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

幅 淳二 (HABA JUNJI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：60180923

(3) 連携研究者

須山 本比呂 (SUYAMA MOTOHIRO)

浜松ホトニクス株式会社・電子管事業部・  
主任部員

研究者番号：90394139