



応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2023年 3月 13日

半導体ピクセル検出器：SiからCdTeそしてTlBrへ
Semiconductor pixel detectors : Si, CdTe and TlBr

患者の負担を軽減する世界初の新技術 臭化タリウムを用いた 高性能なハイブリッド型半導体ピクセル検出器を実現

高輝度光科学研究センター¹、東北大²、クリアパルス³、豊和産業⁴
豊川 秀訓¹、人見 啓太郎²、野上 光博²、久保 信^{2,3}、末永 敦士⁴

【発表概要】

- 世界で初めて、Tl電極を用いることで、常温で安定動作する高品質の臭化タリウム（TlBr）をセンサーとして搭載したハイブリッド型半導体ピクセル検出器を開発した。
- 同技術は、発表者が長年蓄積してきたハイブリッド型半導体ピクセル検出器の開発実績と、共同研究者の高純度のTlBr結晶作成技術によって実現できた、画期的な成果である。
- 高性能かつ常温で動作可能なTlBr検出器は、がんの粒子線治療における照射箇所のモニタリングや、より被曝量の少ない検査など、医療現場における患者負担の軽減を実現する。現在、群馬大学の重粒子線医学研究センターでの臨床研究計画が進行中である。

高輝度光科学研究センターの豊川秀訓氏と東北大学の人見啓太郎氏らの研究グループは、半導体材料として最高クラスのガンマ線吸収係数を持つ臭化タリウム（TlBr）を搭載した、高性能な二次元検出器を完成させた。非侵襲的に内部を観察できる放射線イメージングは医療応用や工業分野の開発に欠かせない技術であり、検出器の性能の向上はこれらの分野を大きく進展させる。本講演で発表するTlBrセンサーを搭載したハイブリッド型ピクセル検出器は、すでに製品化を視野に入れたプロトタイプが完成している。同技術は研究グループらの長年の研究が結実した有望な技術であり、患者の負担を軽減する医療応用や、日本発の技術として広く海外展開されることが期待できる。

【詳細】

放射線計測を革新してきたハイブリッド型二次元検出器

物体を破壊することなく内部の様子を観察する放射線イメージング技術は、医学、工学、物理学の研究や産業の発展を牽引してきた。医療現場では、放射線による人体の内部の観察が、診断や治療に欠かせない技術となっている。また産業分野においては、材料の内部を非破壊で観察できる技術として、X線やガンマ線を用いた放射線透過試験が広く行われている。

高輝度光科学研究センターの豊川秀訓氏は、世界最高性能の放射光を利用できる大型放射光施設SPring-8に所属する研究者だ。豊川氏は、放射線イメージングの精度を上げるため、試料照射後の回折・散乱光を検出する検出器の性能を高める研究を長年続けてきた。

その成果のひとつが、1990年代に開発されたハイブリッド型半導体ピクセル検出器だ。ハイブリッドという名は、センサー部と読み出し集積回路を別々に作って組み上げる方式に由来する。センサーに二次元のアレイ状に微細電極加工された半導体センターを用いることで、困難とされていた高い空間分解能とエネルギー計測の両立を実現した。

2001年にはセンサーにシリコン（Si）を用いたPilatus検出器が実用化された。この検出器はのちに放射光施設における2次元検出器のスタンダードとなり、現在では世界中の施設で利用されている。また、Pilatus検出器はスイスのパウル・シェラー研究所（PSI）のラボで開発されており、このラボでは欧州原子核研究機構（CERN）のLHC実験におけるCMSピクセル検出器も開発されており、その基盤技術をPilatus検出器と共有している。

2009年にはカドミウムテルライド（CdTe）を用いた広いエネルギーレンジにわたり感度が極めて高い2次元検出器を開発し、この成果は、2018年に製品化されたWERPAD検出器に進展した。読み出し回路には、波長を弁別してそれぞれの回折像を抽出できる大規模集積回路を使用した。2つの機能を組み合わせることで、複数の波長を同時に高精度で計測できる検出器が誕生した。

さらに高性能な検出器の開発を目指す豊川氏は、かねてより、化合物半導体のひとつである臭化タリウム（TlBr）を用いた放射線検出器の開発を夢見ていた。原子番号がTlとBrの原子番号はそれぞれ81番と55番で非常に高く、また密度も鉄と同程度の 5.84g/cm^3 であるため、透過力の高い γ 線の検出効率が他の材料よりも非常に高いという特徴を持つ（図1）。さらにTlBrは、X線から γ 線の領域を室温で安定して測定できる。この特性は検出器として実用化する際に有用である。冷却装置が必要なCdTeに比べて、室温で安定するTlBrの検出器は低コストで設置条件を選ばないため、応用範囲も広がるからだ。

TlBr研究の世界的権威との出会い

TlBrは古くから使われている半導体材料だ。豊川氏以外にもTlBrを用いた検出器の開発を目指している研究者は大勢いる。だが、その実現を困難にしていたのは、TlBrの結晶の育成の難しさに

あった。純粋な結晶を作ることが困難で、TlBrの結晶中に不純物があると検出器の性能を制限する。そのため、これまで実用レベルのTlBr検出器を開発することができなかった。

そのような状況下で、豊川氏のグループだけがTlBr検出器の実現にたどり着けた理由は、2022年の応用物理学会での出会いにあった。

「TlBrを用いた検出器の開発は私の長年の夢でした。1年前の春の応用物理学会で、TlBr研究の世界的権威である人見先生の研究発表を聞き、私の技術と組み合わせれば目指している検出器が実現できると確信しました。発表が終わるとすぐに、共同研究の誘いをもちかけました」（豊川）

豊川氏の確信は現実となった。2022年12月に、TlBrハイブリッド型ピクセル検出器の第1号が完成した（図2）。声をかけた日から、まだ9か月しか経っていない。異例の早さでの実現だった。

研究チームには、放射線測定機器の開発・製造を行っているクリアパルス株式会社や、さまざまな材料の微細加工・応用技術を持つ豊和産業株式会社なども加わり、社会実装に向けてすでに動き出している。豊川氏は次のように意気込みを語る。

「半導体製造のベンチャー企業とも連携し、製造体制についても準備をしています。実用化に向けて企業とコラボレーションをしたオールジャパン体制で、世界に対抗できる日本発の技術として展開していきたいと考えています」（豊川）

より効果的で患者負担の少ない、がん治療を目指す

現在、群馬大学の重粒子線医学研究センターでは、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所プロジェクト「RIイメージング研究」との共同研究として、豊川氏が開発したCdTeハイブリッド型ピクセル検出器を利用し、治療ビームの照射領域をリアルタイムで可視化するための基礎研究を行なっている。重粒子線治療は、炭素線を患者に照射して体の深部のがんを集中的にたたき放射線治療である。メスを使うこともなく、その手前や奥など周りの正常な細胞を傷つけにくく、副作用の少ない治療方法である。ただし、重粒子線を照射する領域ががんの病巣からずれてしまうと、思うような効果は得られない。現状では、照射領域を治療計画時に計算で求めているが、治療ビームの到達位置を実際に観察することができれば、より患者さんにやさしい治療法を実現することができる。

この問題を解決するのがCdTe検出器の導入だ。重粒子線照射後に発生する電子制動放射線を検出器で捉えることで、治療効果をリアルタイムに知ることができるからだ。

既にCdTe検出器を導入した成果は見え始めているが、豊川氏が今回開発したTlBr検出器による高性能化も視野に入れている。

「冷却装置の不要なTlBr検出器は、CdTe検出器を用いる場合に比べると、高性能であるだけでなく、装置全体がコンパクトになります。大掛かりな装置が必要なくなることで、患者の心理的な圧迫感を軽減できます。また、CdTeに比べて低コストで運用できるため、将来的には一般病院への普及も可能になります」（豊川）

さらに、TlBr検出器がレントゲンやCT装置に実装されれば、検査のために使われるX線の線量を抑えることができ、患者の被曝量を減らすことができるTlBr検出器の応用範囲は医療分野だけに留まらなないと、豊川氏は語る。

「新しい装置は新しい分野を開拓します。私たちの開発したTlBr検出器は、既存の方法の性能を高めるというだけではなく、新しい研究や産業の誕生のきっかけになると考えています。今はスタート地点に立ったところですが、これから、数年かけて大規模化し、さらに性能を出していきたいと思います」（豊川）

【図】

臭化タリウム (TlBr)

- ・高原子番号(81番、35番)
- ・高密度(7.56 g/cm³)
- ・ワイドバンドギャップ(2.68 eV)

材料	密度(g/cm ³)	
Si	2.33	←アルミニウム (2.7 g/cm ³)
Nal	3.67	
Ge	5.32	←鉛ガラスLX-57B (~4.36 g/cm ³)
CdTe	5.85	
TlBr	7.56	←鉄 (7.87 g/cm ³)

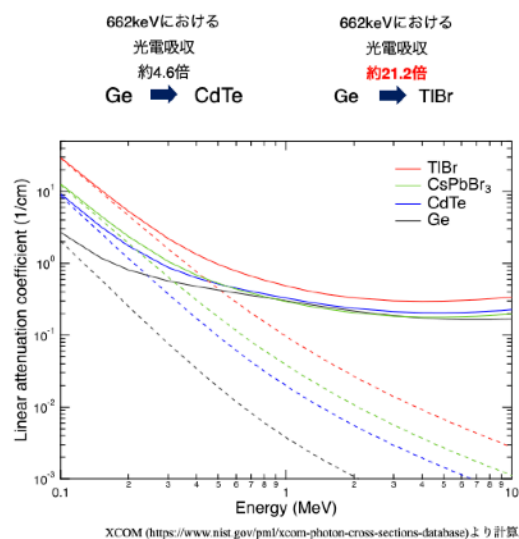


図1 臭化タリウムの特性

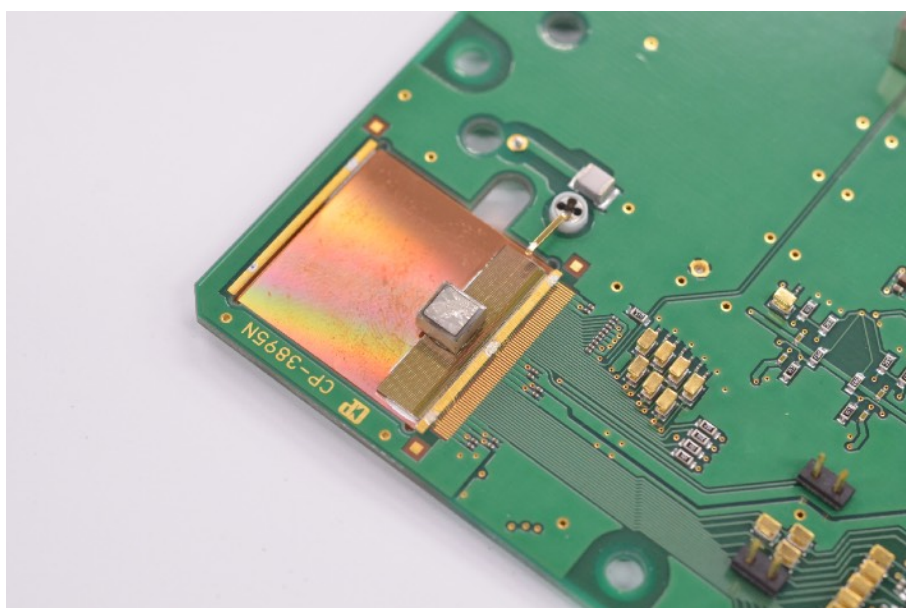


図2 フリップチップ実装したTlBrハイブリッド型ピクセル検出器 試作機