

厚生労働科学研究費補助金（医療機器開発推進研究事業）  
（分担）研究報告書

PET装置開発、電子回路、放射線検出器開発に関する研究

研究分担者 島添 健次 東京大学・助教  
大野 雅史 東京大学・特任准教授

### A. 研究目的

PET装置開発、電子回路、放射線検出器開発に関する研究を行う。本年度は本PET装置開発の目的である500  $\mu\text{m}$ の分解能を有するPET装置の開発には新規の光センサアレイの開発が必要である。500  $\mu\text{m}$ 程度の分解能を持つ独立読出型の光センサアレイを世界で初めて開発する。同時にこの光センサアレイからの独立読出が可能な時間幅方式の多チャンネル集積回路の開発を行う。想定するPET装置はチャンネル数としては10000チャンネル程度が想定されるため、ASIC (Application Specific Integrated Circuit 特定用途向け専用集積回路)を使用することなく構築することができない。本研究においてはデジタル信号処理技術を用いて多チャンネルの並列信号処理が可能な時間幅 (Time over Threshold)方式を用いたシステムを構築する。本装置の開発によりサブミリメートルの分解能が達成可能であることを確認する。

### B. 研究方法

過去の研究より高分解能の実現にはピクセルの小型化および各ピクセル化された結晶からの個別読み出しが望ましいことがわかっている（図1）。サブミリメートルの空間分解能を実現するためには1 mm以下のサイズの結晶からの信号読み出しが可能な光検出器および個別読み出し方式の信号処理回路系が必要となる。500  $\mu\text{m}$ ピッチのピクセルを有する新規シリコンフォトマルの試作開発を行い、特性の評価を行う。また多チャンネルからの信号読み出し用に適した時間幅方式に基づく専用集積回路の試作開発評価を行う。加えてシリコンフォトマルおよびGAGG結晶アレイとの接合面における分解能の劣化を評価するため、GAGG結晶を既存のデジタルシリコンフォトマルと接着することにより保護面による光の分散を見積もる。

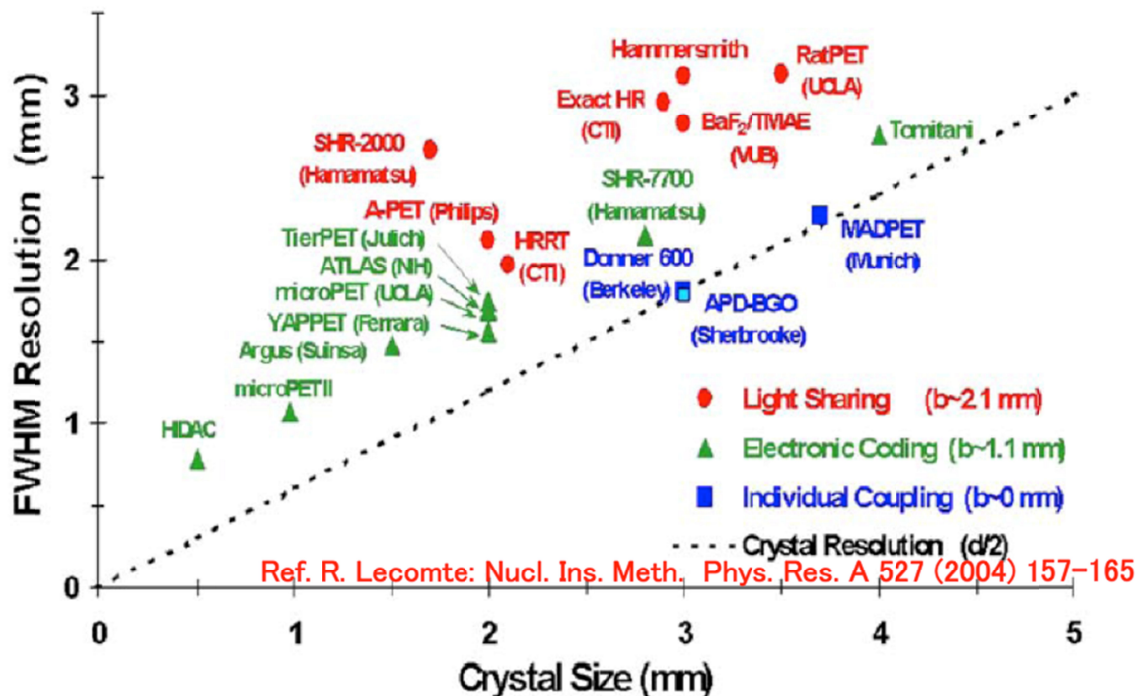


図1 結晶サイズおよび読み出し方式の空間分解能への影響 (R. Lecomteら) 個別読み出し (Individual Coupling)方式が他の方式に比較して優れている事がわかる。点線が理論的な分解能を示す線であり個別読み出し方式により達成可能である。

### C. 研究結果

#### 高分解能光センサピクセルアレイの開発

シリコンフォトマルは近年使用がすすんでいるPETに適した光検出器であり、各ピクセルが多数のガイガーモードAPDから構成される。PMTと比較して量子効率が高く動作電圧は20~80V程度と非常に低いがほぼ同等のゲインを有している。また半導体技術を用いて作製されているためコスト的にも有利であると考えられる。AP

Dと比較してもAPDの30-300程度のゲインと比較して高く、動作電圧も低い。SiPMは $10^5$ から $10^6$ 程度の高いゲインを有し、高速な応答を示すPETに適した光検出素子であるが現在のところ3mm角程度が主流であり高分解能化には限界が存在している。本研究では高分解能化に対応するため $500\ \mu\text{m}$ ピッチの分解能を持つ16チャンネル光センサアレイ（SiPM シリコンフォトマル）の試作開発を行った（図2）。各チャンネルは縁に配置された読出パッドより独立に読出が可能である。角ピクセルは676個のガイガーモードAPD（アバランシェフォトダイオード）のセル（サイズ： $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ ）から構成される。

また本光センサを $500\ \mu\text{m}$ 角のGAGG結晶と光学接合を行い、 $^{22}\text{Na}$ 線源に対する応答を確認した。

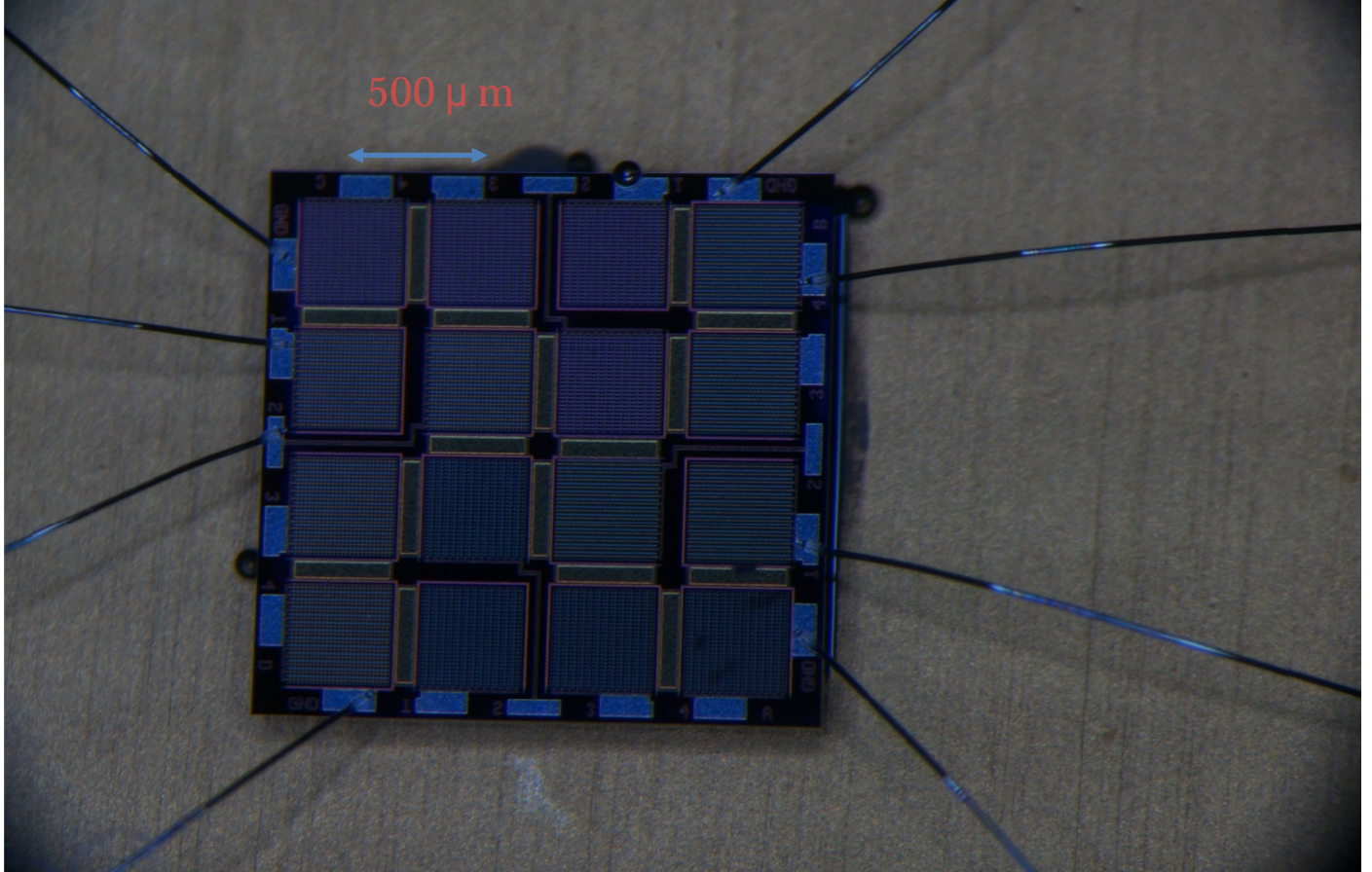


図2 試作した16チャンネルシリコンフォトマル（ $500\ \mu\text{m}$ ピッチ）

図3にシリコンフォトマル内のパターン図を示す、カソード側は共通で、デバイス内で接続されており、アノード側より独立に信号（図中1～4）を読み出す構成としている。



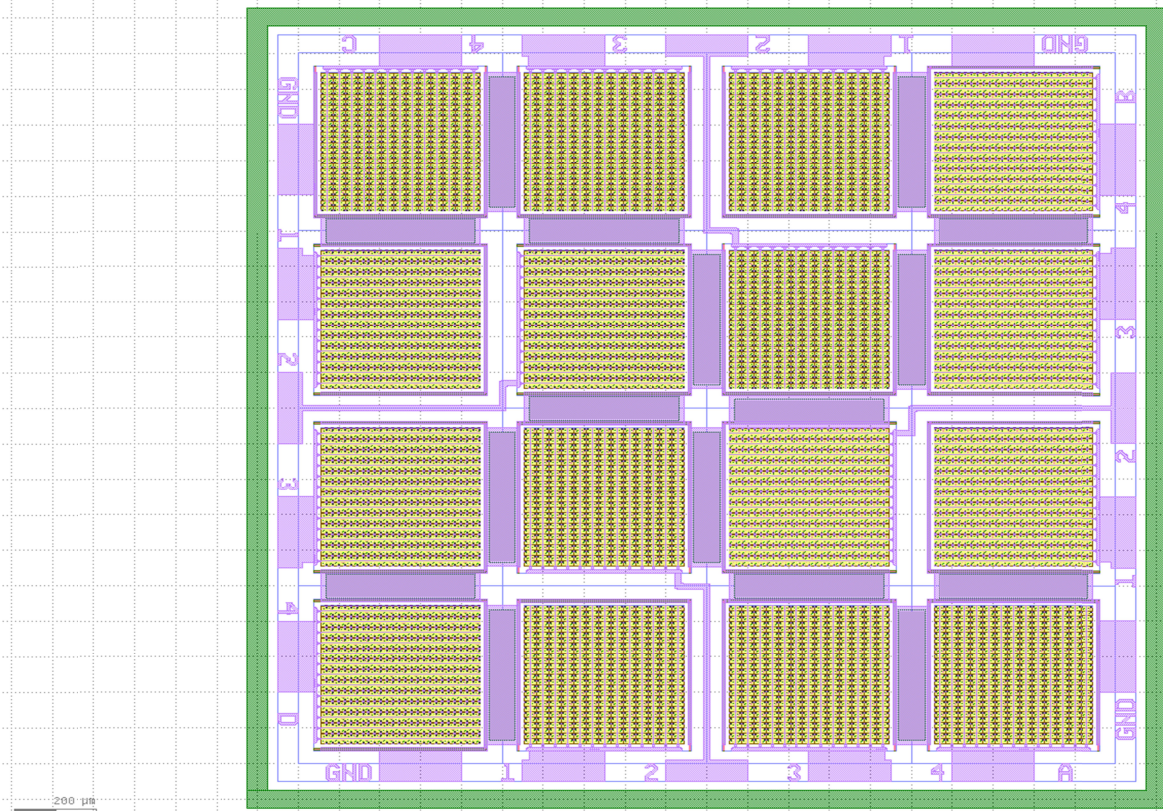


図3 試作したシリコンフォトマル内配線パターン

図4にピクセルの全セルに光を照射した時の応答を示す。信号強度としては120 mV程度の応答が得られており、正常に増幅動作していることが確認できた。一方で読出部分の長いボンディング接続により信号の反射が確認された。また動作不良のチャンネルが存在したため今後確認が必要である。また図4に波長に対する相対感度を示す。もっとも感度が高くなる波長は420 nmであるがGAGGシンチレータの発光波長である520nm に対しても8割程度と十分な感度を有していることが確認できた。

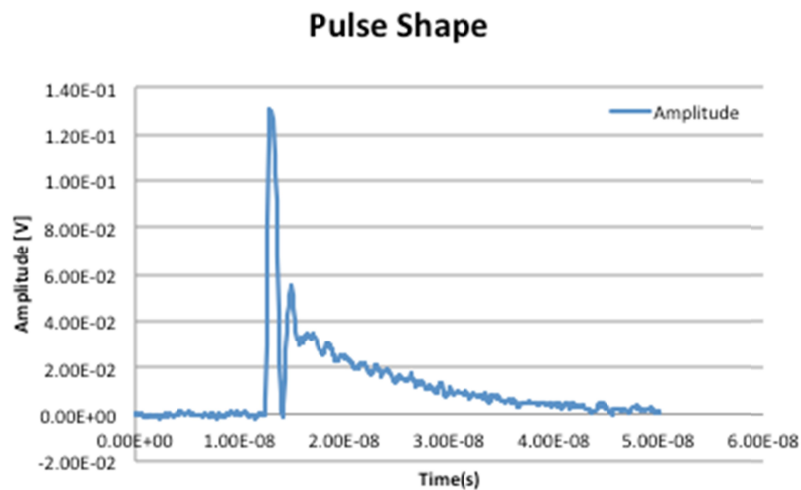


図4 シリコンフォトマルの1ピクセルから得られた信号の例

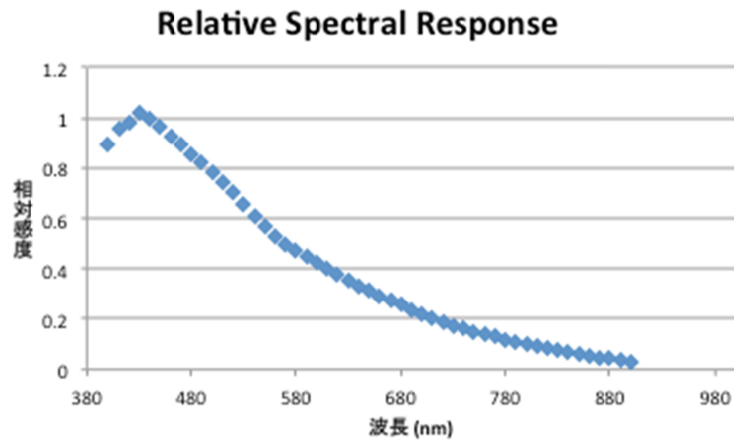


図5 開発したシリコンフォトマルの波長に対する相対感度（横軸：波長（nm）、縦軸：相対感度）

またバイアス入力電圧に対する（ブレイクダウン電圧 = 23V）ダークカウントの変化を図6に示す。28Vで50 kHz程度と低い値が達成されていることが確認できた。PET用の検出器として十分利用可能であることがわかる。

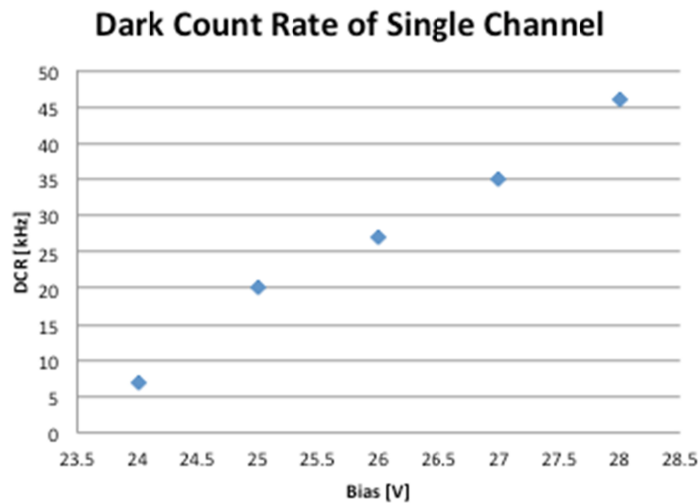


図6 バイアス電圧に対するダークカウントレート (DCR) kHz

また上記のデバイスの性能は以下のようなものであった。

ブレイクダウン電圧： 23.0 V  
 Single Photon Timing： 170 ps @ 3.7V over voltage  
 Signal Rise Time： 250 ps  
 ピーク波長感度： 420 nm  
 絶対感度 (PDE)： 34 % (他デバイスからの計算値)

#### マルチチャンネル読出用ToT-ASICの試作評価

想定するPET装置はチャンネル数としては10000チャンネル程度が想定されるため、ASIC (Application Specific Integrated Circuit)を使用することなく構築することが困難である。TSMC社の0.25  $\mu\text{m}$ のCMOSプロセスを用いてある閾値を超えた電流信号にたいしてエネルギーに対応したパルス幅を有するデジタルパルスを出力するASICの試作開発を行った。作製したASICは48チャンネルの電流比較型コンパレータで構成され2.5 Vの動作電圧、3mW/chで動作する。チップサイズは2.5 mm  $\times$  3.0 mmである。



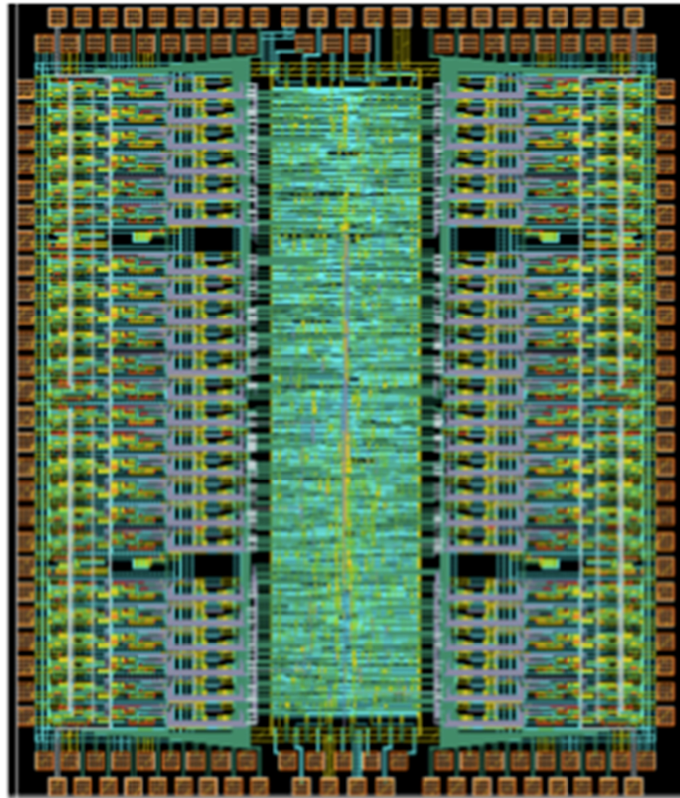


図7 48チャンネルSiPM用ASICチップ チップサイズ2.5mm x 3.0mm(左右に入力パッドおよびコンパレータを配置、中央に閾値調整のためのデジタル回路、DACが配置されている)

本試作のASICをSiPMと接続後動作確認を実施した。使用したSiPMはPM1150 (KETEK) で結晶はLYSO (2 × 2 × 5 mm) である。図8に $^{22}\text{Na}$ でのエネルギースペクトル(時間幅スペクトル)を示す。SiPMの非線形応答のため高エネルギー領域で飽和が見られているが511 keVのピークが明瞭に分離されており、ASICとして正しく動作していることが確認された。

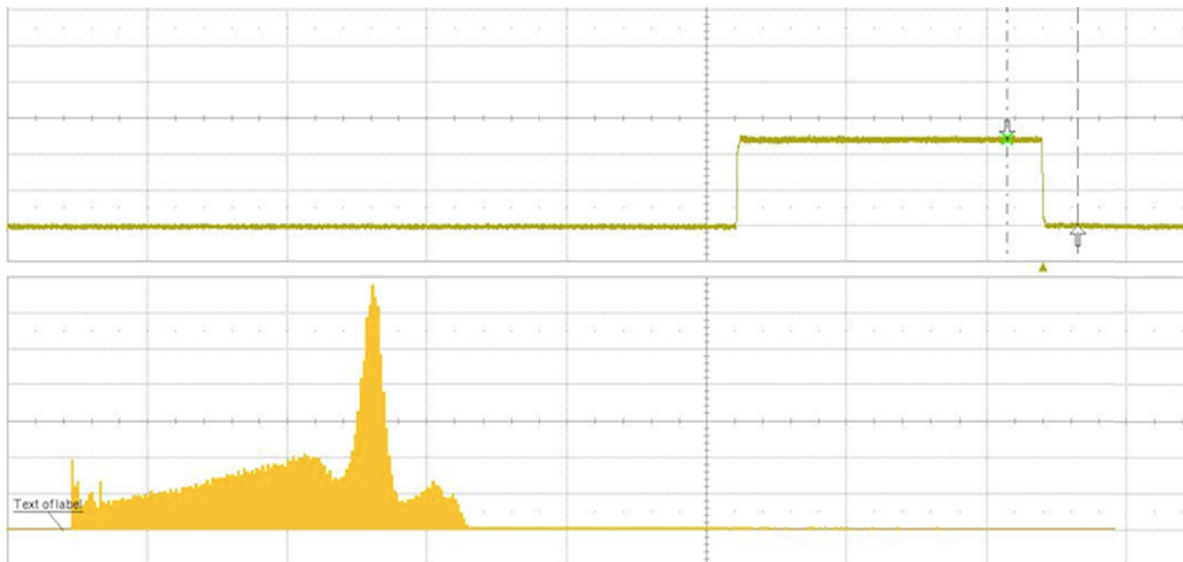


図8 観測されたTime over Threshold 出力と $^{22}\text{Na}$ に対するエネルギースペクトル(横軸は500ns/div、縦軸1 V/div)

### 保護面における光分散の検証

保護層における光分散の検証を行うため、2mmピッチのGAGGアレーをデジタルシリコンフォトマル上に配置しダークカウント（カウント）マップを取得した(図9)。センサの保護面は100 $\mu\text{m}$ のエポキシ層である。結晶の分離性を見ると2.56mm程度(図10参照)であり、この間で光の分散は280 $\mu\text{m}$ 程度存在することが示唆された。

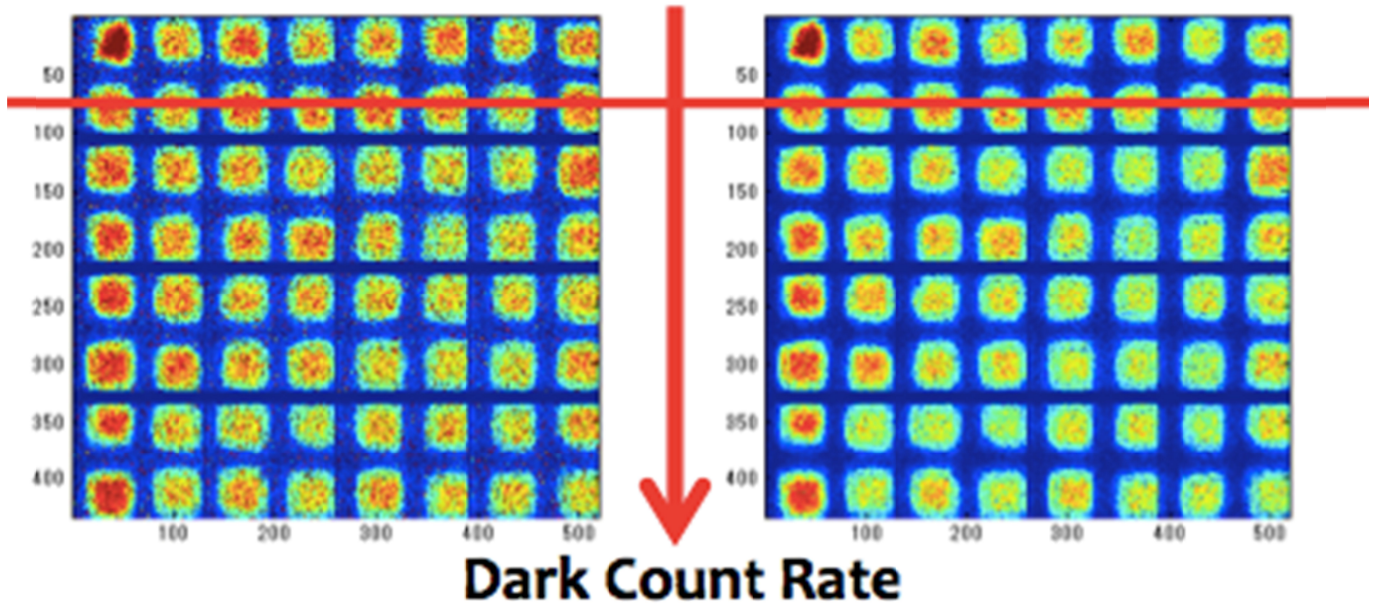


図9 2mm角のGAGG結晶をデジタルシリコンフォトマルに配置した時のダークカウントマップ

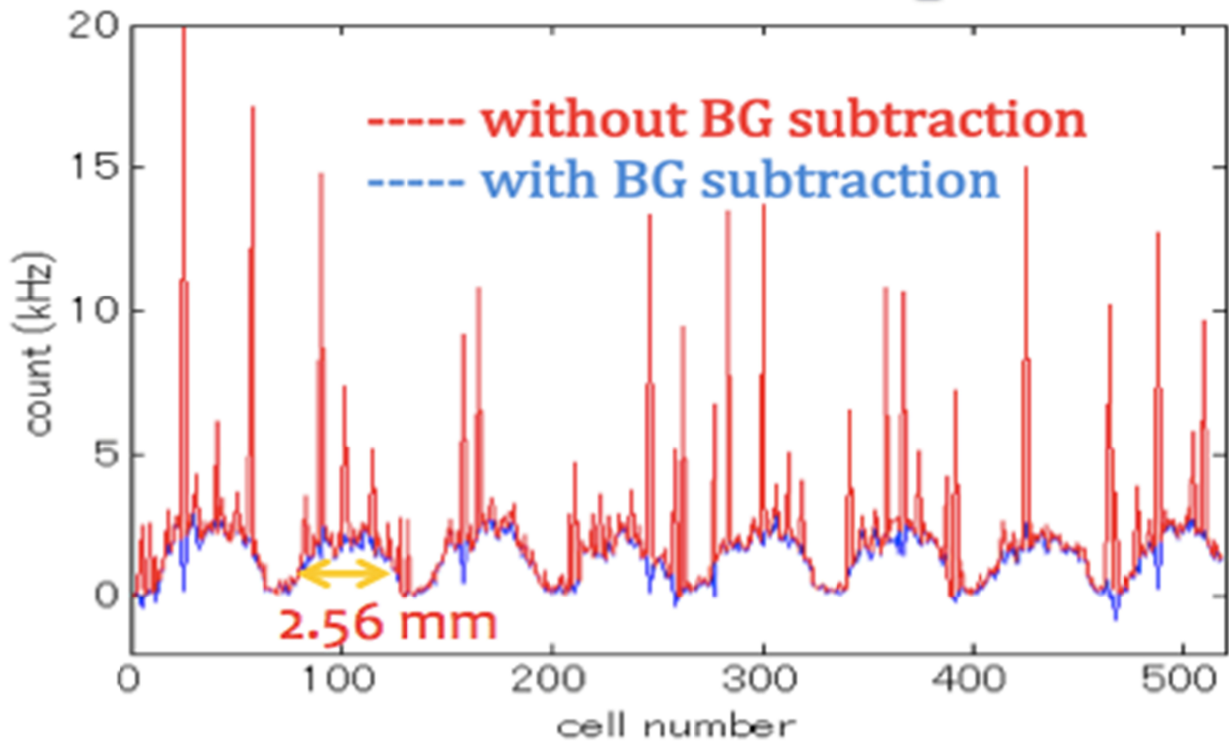


図10 デジタルシリコンフォトマル上に2mmピッチのGAGGを配置したダークカウントマップ

次に500 $\mu\text{m}$ ピッチにGAGG結晶を配置したピクセル検出器にデジタルシリコンフォトマルを光学結合し分離性の検討をおこなった(図11)。各ピクセルはかろうじて判別可能であるが明瞭な分離は難しいことが示唆された。

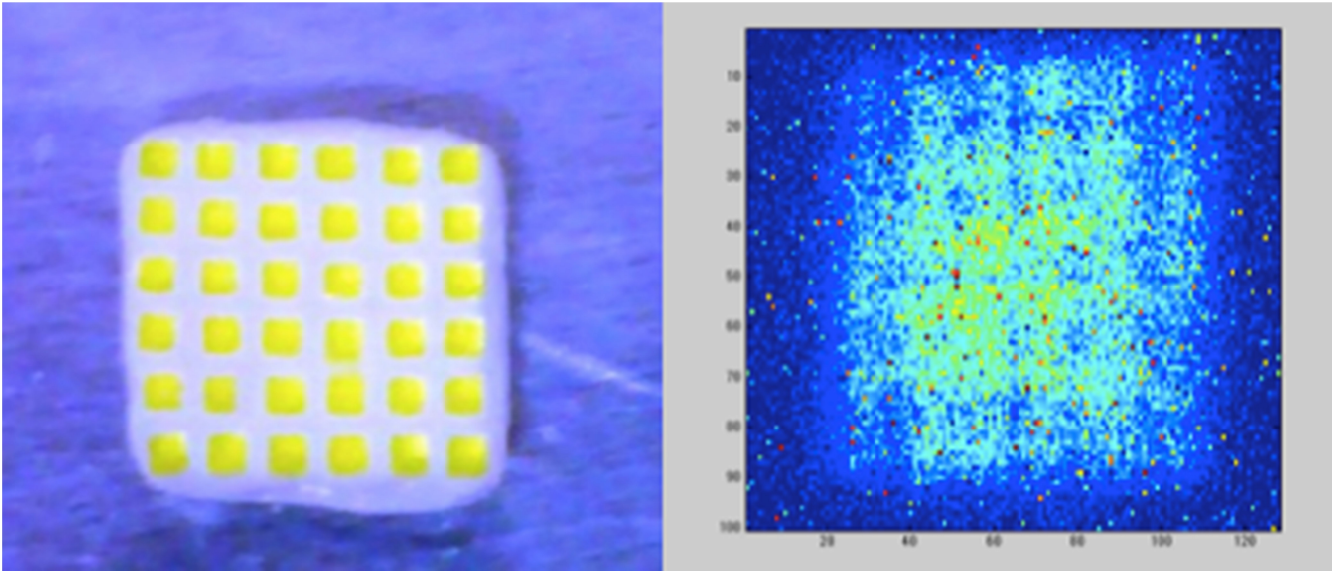


図11 500  $\mu\text{m}$ ピッチのGAGG結晶およびデジタルシリコンフォトマルによる結晶の分離性

#### D. 考察

500  $\mu\text{m}$ のシリコンフォトマルセンサを試作、開発を行った。またGAGG結晶の方は500  $\mu\text{m}$ サイズのもので構成可能である。一方でシリコンフォトマルの受光面への信号の伝達という点で見ると、100  $\mu\text{m}$ の保護面により光が分散し280  $\mu\text{m}$ 程度まで広がるのが観測されている。今後の検出器開発においては保護面の厚みや素材なども含めて検討を行っていく必要がある。

#### E. 結論

500  $\mu\text{m}$ ピクセル型の最小のSiPM (シリコンフォトマル) 検出器アレーを新規に試作し、性能および動作確認をおこなった。デバイス内での光子の増幅が確認され正常に動作していることがわかった。

来年度において本ピクセル検出器をアレー化し超高分解能のPET検出器を構築する。

#### F. 健康危険情報

特に該当なし

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

K. Shimazoe, H. Takahashi, K. Kamada, A. Yoshikawa, K. Kumagai, J. Kataoka, S. Itoh, H. Sato, Y. Usuki, Development of a prototype of time-over-threshold based small animal PET scanner, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 753, 21 July 2014, Pages 84-90

Kamada, K.; Shimazoe, K.; Ito, S.; Yoshino, M.; Endo, T.; Tsutsumi, K.; Kataoka, J.; Kurosawa, S.; Yokota, Y.; Takahashi, H.; Yoshikawa, A., "Development of a Prototype Detector Using APD-Arrays Coupled With Pixelized Ce:GAGG Scintillator for High Resolution Radiation Imaging," Nuclear Science, IEEE Transactions on , vol.61, no.1, pp.348,352, Feb. 2014

Kenji Shimazoe, Tadashi Orita, Yasuaki Nakamura, Hiroyuki Takahashi, Time over threshold based multi-channel LuAG-APD PET detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 731, 11 December 2013, Pages 109-113

「放射線」「放射線計測用ASICの開発」Vo. 39, No. 3, Jan. 2014 pp.99 - pp.107 島添 健次

##### 2. 学会発表

(発表誌名巻号・頁・発行年等も記入)

小型ToT方式APD-PET装置の開発と評価, 島添 健次、高橋 浩之、伊藤 繁紀、薄 善行、鎌田 圭、吉川 彰、片岡 淳 (東京大学、古河機械金属、東北大学、早稲田大学) 2013年9月16-20日 同志社大学



Blood Activity Measurement Using 4 Modules High Resolution PET Tomograph The University of Tokyo Azhar Huusan Malik , Kenji Shimazoe , Hiroyuki Takahashi 2013年9月16-20日 同志社大学

Design of asymmetric PET detector using APD and SiPMs with DOI capability 東大院工 Jia nyong Jiang , Kenji Shimazoe , Hiroyuki Takahashi 2013年9月16-20日 同志社大学

Design of Asymmetric PET Detector Using APD and SiPMs with DOI Capability J. Jiang, K. Shimazoe, H. Takahashi IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference 2013 Souel

#### H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

「非対称読み取りによるPET用放射線検出モジュール」東京大学 高橋浩之、島添健次、織田忠

1. 特許取得  
特に該当なし
2. 実用新案登録  
特に該当なし
3. その他  
特に該当なし