

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654084

研究課題名（和文）ビルドアップ法による大面積高性能ピクセル検出器の製作手法の確立

研究課題名（英文） Large-area and high-spec detector development with build-up method

研究代表者

身内 賢太郎 (MIUCHI KENTARO)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：80362440

研究成果の概要（和文）：

高集積化によって小型化の進む放射線検出器用集積回路によって大型のガス検出器を読み出すため、低温焼結セラミック基板、スクリーン印刷、ディスペンサーによる描画という3つの手法によるピクセル型読み出し電極製作の手法確立を目指した。セラミック基板に関しては平面度についてバンプボンディングに対する要請をクリア、スクリーン印刷では細線描画という成果により、現状の問題点をクリアした。ディスペンサーを用いたビルドアップ法では、最適な使用材料の選択、ピクセル形状電極の形成、およびストリップ状電極によるガス検出器からの信号読み出しを行い、ビルドアップ法によるピクセル電極製作手法の原理実証に至った。

研究成果の概要（英文）：

We investigated three methods, namely low temperature co-fired ceramics (LTCC), screen printing technologies, and dispenser methods, to establish a way to read large gaseous detector signals with small ICs. As for LTCC and screen printing, we overcame current problems and now these technologies are ready to be tested for build-up methods. We found best materials to be used in the dispenser-based build-up methods, made pixel readout electrodes, and read signals from gas detectors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子学・宇宙線・宇宙物理

キーワード：放射線検出器、ガス検出器、半導体実装、ビルドアップ法

1. 研究開始当初の背景

近年の半導体の集積技術進展によって、放射線検出器読み出し回路の小型化が進み、100 μ m角程度の面積にADCを搭載した回路の製作が可能となっている。一方で高エネルギー実験や宇宙線実験では1m²以上の面積の大型ガス検出器が必要とされている。これまで、ケーブルを介して回路につなぐ手法やコネクタで検出器に直接接続する方法がとられてきたが、いずれも回路と比較して接続のための部品が大きいという問題を持つ。こうした問題を解消するために、大型検出器と小

型回路をつなぐ為の技術的ブレークスルーが必要とされている。集積回路上に電極を形成し、そのまま検出器としてしまうことがこの為の糸口となるが、検出器として単純に半導体を並べる手法では、検出面積=半導体の面積となり、コストが大きな問題となる。本研究は近年技術的な発展の大きい印刷技術を応用した「ビルドアップ法」によって、小型回路の上に検出器を作り上げ大面積検出器からの信号を処理する手法を確立する。

2. 研究の目的

こうした背景のもと、本研究は我々の特許技術「ビルドアップ法」によって、読み出し回路の搭載された IC に大型ガス検出器の読み出しパターンを実装する手法を確立することを目的とする。ビルドアップ法とは、集積回路や基板上に導電性材料や絶縁材料などの材料を立体的に描画してゆく方法である。本研究では、ビルドアップ法に用いることのできる技術を調査、それぞれの問題を洗い出して解決、ピクセル構造を形成、ガス検出器の読み出しとしての動作確認を目的とする。

3. 研究の方法

上記研究目的を具体的に実現する方法として、本研究では3つの手法で電極を製作、比較を行うことで用途に応じた手法選択を可能とする。

具体的には、

- ①低温焼結セラミック基板をバンプボンディングによって半導体に接合する手法
- ②スクリーン印刷による半導体上への電極形成
- ③ディスペンサーによる半導体上への描画の3手法による電極形成を行い、それぞれの手法での実用的な工作精度（最少ピッチ）を評価する。それぞれの行程について、読み出し回路上にピクセル電極を製作することについての問題点があれば洗いだし、可能な範囲で解決を試みる。

3つの手法の比較の後、もっとも実用的な手法を用いてビルドアップ法を用いたピクセル構造の製作とガス検出器と組み合わせた信号検出試験を行い、製作技術の確立を目指す。

4. 研究成果

○低温焼結セラミック基板

低温焼結セラミック基板を用いた方法は、細線加工の精度などこれまでに最も実績のある手法である。ただし、プロセス自体が他の2つの手法と比較して高価なことから、半導体との接合に用いるバンプボンディングが技術的に難しく、歩留まりが上がりず高価になる、という問題点がある。また、我々が本研究を開始する以前に製作した低温焼結セラミック基板は、焼結時に生じる $100\mu\text{m}$ 以上の基板そりが問題となって半導体との接続はうまくいかなかった。

本研究では、セラミック基板の構造を見直し、単純な形状にすることで（以前はチップを搭載するためのくぼみを持つ形状だったが、今回は部品を分けて平面とした。）平面度を向上させることを目指した。こうした改良手法で製作したセラミック基板を図1に示す。図1上部の中央の 20×20 の電極（直径 $130\mu\text{m}$ の電極が $200\mu\text{m}$ ピッチで形成されている。）が半導体との接合面である。この部分に関して、平面度を三次元立体顕微鏡で測定、中央付近の縦方向のプロファイルを図1下部に示す。これまで $100\mu\text{m}$ 以上あった基板のそりが $30\mu\text{m}$ 以下に抑えられていることを確認した。バンプボンディングで要求される、**平面度 $40\mu\text{m}$ 以下**という要請を満たす**低温焼結セラミック基板製作技術の確立**が、本研究の第一の成果である。今後、本研究の発展としてバンプボンディングを行い、ガス検出器の読み出しとして使用する可能性を確認した。

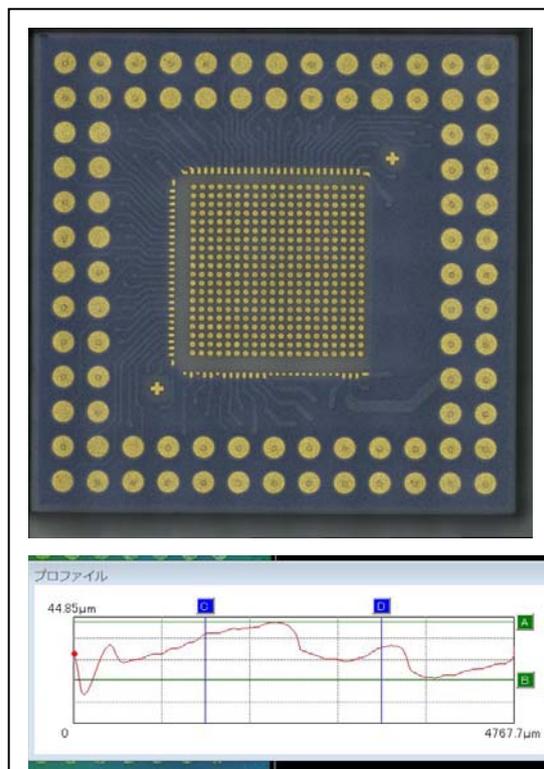


図1 改良手法によって製作した低温焼結セラミック基板（上）とその高さのプロファイル（下）。 $100\mu\text{m}$ 以上だった平面度を $30\mu\text{m}$ 以下に抑えることに成功した。

○スクリーン印刷

スクリーン印刷法は、大面積の電極構造を量産性良く製作する可能性を持つ手法である。ただし、細線の描画精度に限界があること、立体構造を持った対象物に対する描画（段差越えなど）があまり得意でないなどの問題がある。

本研究では、図2に示す様に銀ペーストを用いて50 μm 幅の細線を100 μm で描画することに成功した。また、その上に絶縁材料を重ね塗りするというデモンストレーションも成功した（図2の縦方向に走る透明な線）。数 μm からせいぜい十数 μm の厚みの線への描画はこのように成功したが、実際に「ビルドアップ」を行う際には、100 μm 程度の段差を接続することも必要となる。本研究ではこうした大きい段差を接続する試験も行った。段差を登る方向での描画では、材料が段差のところにたまってしまうという結果になったが、段差を降りる方向での描画を行えばこうした液だまりなく描画が可能であるという結果を得た。同時に段差のある対象に対する再現性の高い描画には描画パラメータを精緻にコントロールする必要があり、本研究で行った手動での描画では限界があることも確認された。50 μm 幅の細線の描画、細線上への重ね塗り技術の確立が本研究の第二の成果である。本研究の成果を基にして、今後、専門業者に描画加工を依頼、10 μm 程度の精度での位置合わせを行い機械による描画を行うことで、読み出し回路を持つ半導体へ直接描画を行うことが可能であるという将来への指針も得た。

銀50/100
UV樹脂100/200

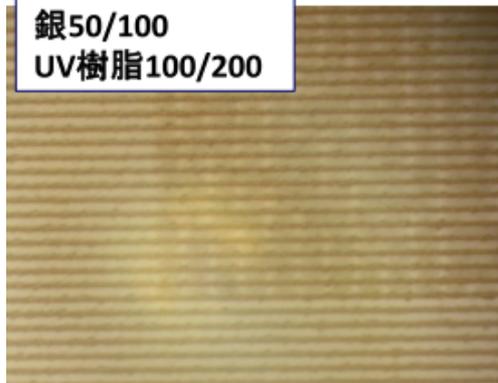


図2 スクリーン印刷の手法を用いて基板上に描画した読み出しパターン例。水平に走る線が銀ペーストで描画した50 μm 幅100 μm ピッチの線、右半分上方で垂直に走る透明の線が銀線の上に描画した100 μm 幅200 μm ピッチの線。

○ディスペンサー法

〈概要〉ディスペンサーを用いた手法は、精度、速度、立体構造への対応のバランスが最も良いため、本研究の技術確立への可能性が最も大きいと期待される。

ディスペンサーによる電極構造製作の模式図を図3に示す。ディスペンサーは、粘度のある材料を、ノズルに加圧することで押し出し描画する装置である。本研究の目的とするビルドアップ法とは立体構造を作る方法であり、図3の様に異なる材料（導電材料と絶縁材料など）を組み合わせ描画することで、半導体上に読み出し電極を製作することが可能となる。本研究では図4に示す、高エネルギー加速器研究機構所有の武蔵エンジニアリング社製「shotmini200 Ω 」を使用した。

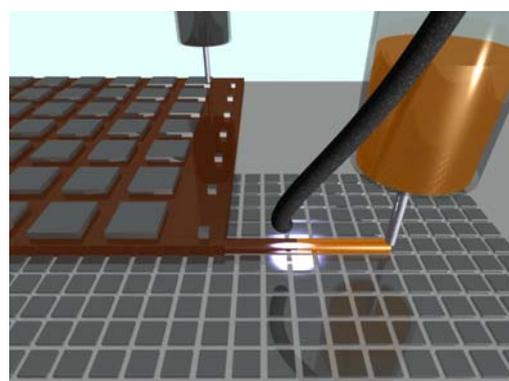


図3 ディスペンサーによる電極構造製作の模式図。



図4 本研究で使用したディスペンサー。
（高エネルギー加速器研究機構所有の武蔵エンジニアリング製 shotmini200 Ω ）

〈材料選択〉 本研究では、ビルドアップ法の為にディスペンサーで使用可能な材料の評価・選定を行った。候補としては、導電性材料としてナノ粒子銀ペースト2種、絶縁材料としてポリイミドと UV 硬化樹脂、さらに機能性材料として高抵抗樹脂（カーボンを含むポリイミド樹脂）を入手、内径 200 μm および 100 μm のノズルによる描画を行った。5 種類の材料の評価結果を表 1 に示す。

本研究の目指す半導体回路上への描画ということで、半導体への影響を最小限にするため、導電性材料としては焼結温度の低いナノ粒子銀ペーストを 2 種類選択した。この結果、銀ペーストでは、200 μm のノズルでの描画は問題なく行えたが 100 μm のノズルを用いた際には、ノズルつまりが起った。詰まったノズルの洗浄方法なども確立したが、本研究終了時点では銀ペーストでの安定描画は 200 μm 以上のノズルによって行うことができる、という結果を得た。絶縁材料としては、常温硬化のポリイミドと UV 硬化樹脂を試験、UV 硬化樹脂が作業性・硬化に関してよい結果を示すことが分かった。また、近年放電対策物質として注目を集めている高抵抗ポリイミドを入手し、試験を行った。作業性は良く細線の描画は UV 樹脂と遜色なく行えるという結果を得た。焼結に関しては、300 $^{\circ}\text{C}$ 以上での焼結が推奨されているが、200 $^{\circ}\text{C}$ での焼結で高抵抗の導電性を得られ、それ以下の温度での焼結では導電性を得られないことが判明した。

これらの評価の結果、以降の試験では、導電性材料としては銀ペースト①もしくは②、絶縁体としては UV 硬化樹脂、必要に応じて高抵抗樹脂を使用、表 1 の硬化法を用いるということに決定した。こうした材料選択および条件出しが本研究の第三の成果である。

	200 μm	100 μm	硬化
銀ペースト①	◎	○	150 $^{\circ}\text{C}$
銀ペースト②	◎	○	150 $^{\circ}\text{C}$
ポリイミド	○	△	常温
UV 樹脂	◎	◎	UV
高抵抗樹脂	◎/	◎	200 $^{\circ}\text{C}$

表 1 ディスペンサーで使用検討した各種材料。◎は描画良好、○はまれにノズルつまりが発生、△はノズルつまり発生。硬化欄は硬化に必要な焼結温度もしくはその他の条件を記載。

〈ビルドアップ〉 半導体上へのピクセル構造の形成を銀ペースト①と UV 硬化樹脂を用い、100 μm のノズルでシリコン基板上へ行った。

ピクセルの読み出しを持つ半導体回路上への電極形成を模すため、1 mm ピッチで 6 \times 6 のピクセルの面積を拡大する、という試験描画を以下の手順で行った。

- i) 6 \times 6 のピクセル状に銀ペーストを点描し、焼結する。
- ii) 周りを取り囲むように UV 樹脂で堤防を作り硬化させる。
- iii) 堤防内部でピクセルの間を縫うように UV 樹脂を描画、堤防内での液面が一樣になるまで放置する。この時、ピクセルの上部は樹脂よりも高くなっていることが重要である。
- iv) 液面が一樣になったら硬化させる。
- v) UV 樹脂の上に銀ペーストでパターンを描画、焼結する。(図 5)

この後 ii) から v) を繰り返して、電極を形成する。

本試験では、図 5 に示す様な「ビルドアップ」の製作実証を行い、銀ペーストによる電気的な結合と UV 硬化樹脂による電気的な絶縁を確認した。**半導体上へのビルドアップの実証**が本研究の第四の成果である。今後、描画の再現性の確保、描画の細線化を行うことで、実際に動作する IC 上への描画が行えるための原理実証が行えた。

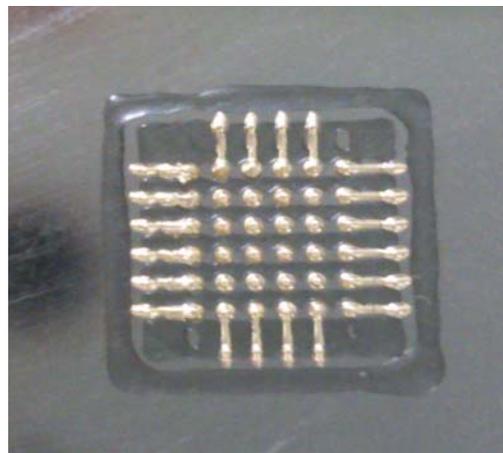


図 5 シリコン上にディスペンサーで製作した読み出しパターンの製作途中の写真。金色に見える部分が銀ペーストによる描画、透明の部分が UV 樹脂による描画部分である。1 mm ピッチで 6 \times 6 ピクセルを有し、外周のピクセルを外側に引き出している。引き出し線は UV 樹脂の上に「ビルドアップ」している。

〈ガス検出器との接合〉

本研究はガス検出器の電荷収集電極の製作を具体的な目的とする。そのため、ガラスエポキシの基板の上に、銀ペースト①を用いて図6に示す様な線を描画した。この製作では安定描画の為に200 μm のノズルを用いて800 μm ピッチでストリップを形成した。

この読み出し電極を多線式比例計数管と組み合わせて、既存のプリアンプに入力した。読み出し電極以外は、実績のある装置を用いて、問題のある場合の切り分けを容易にした。Ar+CH₄ガスをフローで用いて試験を行い、⁹⁰Srからの β 線を入射したところ、図7に示す様な信号が確認された。線源の有無と信号の有無が確認され、確かに β 線の信号を検出していることが確認できた。ディスペンサーを用いて描画、焼結することで製作した電極で確かにガス検出器からの信号を読むことができるというのが本研究の第五の成果である。

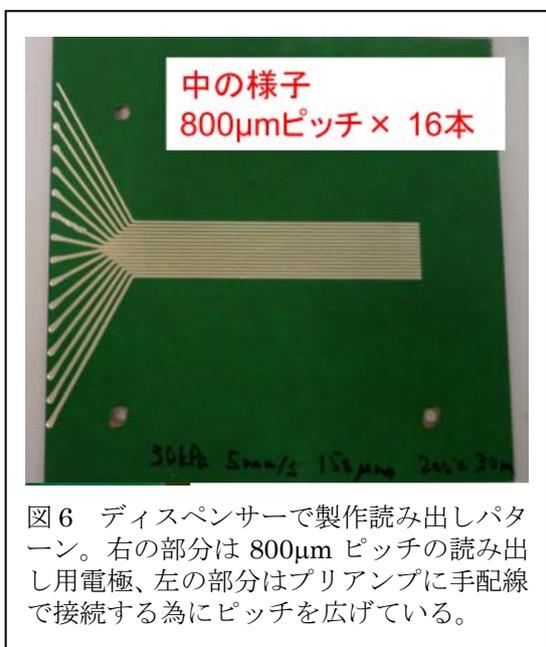


図6 ディスペンサーで製作読み出しパターン。右の部分は800 μm ピッチの読み出し用電極、左の部分はプリアンプに手配線で接続する為にピッチを広げている。

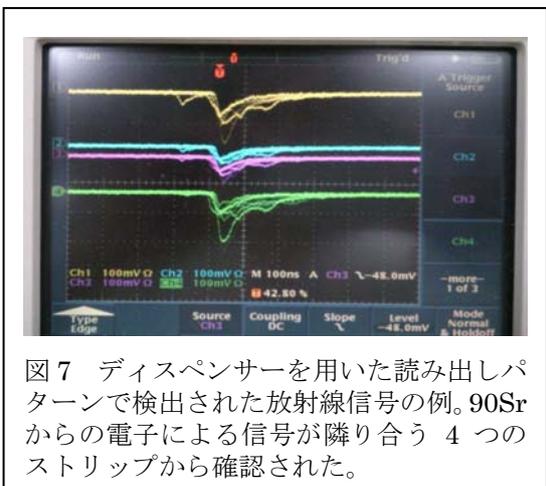


図7 ディスペンサーを用いた読み出しパターンで検出された放射線信号の例。⁹⁰Srからの電子による信号が隣り合う4つのストリップから確認された。

これまでに述べた様に、本研究から

- 1 バンプボンディングに使用可能な平面度を持つ低温焼結セラミック基板の製作
- 2 スクリーン印刷法による細線描画、および重ね塗りの実証
- 3 ディスペンサーで用いるための材料評価と選択
- 4 半導体上へのビルドアップの実証
- 5 ディスペンサーで描画した電極によるガス検出器からの信号確認

という成果を得た。

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1件)

K. Miuchi, K. Nakamura, A. Takada, S. Iwaki, H. Kubo, T. Mizumoto, H. Nishimura, J. Parker, T. Sawano, T. Tanimori, H. Sekiya, A. Takeda, T. Fusayasu, A. Sugiyama and M. Tanaka

“NEWAGE” Proceedings of “CYGNUS 2011 : 3rd Workshop on directional detection of Dark Matter” EAS publication Series
査読なし 53巻 2012 33-41

〔学会発表〕(計1件)

身内賢太郎 「ビルドアップ法によるMPGDの製作」
第9回MPGD研究会 長崎総合科学大学 2012年12月7日

〔その他〕

ホームページ等

<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~miuchi>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

身内 賢太郎 (MIUCHI KENTARO)
神戸大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80362440

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

内田 智久 (UCHIDA TOMOHISA)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・助教
研究者番号：40435615

田中 秀治 (TANAKA SHUJI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・准教授
研究者番号：80311124

田中 真伸 (TANAKA MANOBU)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・准教授
研究者番号：00222117