

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600056

研究課題名(和文)高温環境に設置されるMEMSセンサからの信号読み出し技術の実証

研究課題名(英文)Readout Technology of MEMS Sensors Installed in High Temperature Environments

研究代表者

田中 秀治 (Tanaka, Shuji)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00312611

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：数百の高温環境に設置する容量型MEMSセンサのための信号読取り技術を実証した。高温環境に耐熱性容量型センサ，SiCダイオードブリッジ，およびカップリングキャパシタを設置し，そこから配線を室温環境に伸ばし，Siの信号処理回路に接続する。まず，pn接合SiCダイオードに白金電極を形成することで，400～600の高温でも動作することを確認し，各温度における特性を測定した。また，高温で利用できるダイボンディング，ワイヤーボンディングなどの実装技術を開発した。これらの要素技術を用いて，SiCダイオードブリッジ回路を構成し，高温で試験した。さらに，SiC微細加工技術を開発し，センサ基本構造を試作した。

研究成果の概要(英文)：A readout technology of capacitive MEMS sensors installed in high temperature (several hundred degree C) environments was developed. A heat-resistive capacitive MEMS sensor, a SiC diode bridge and coupling capacitors are installed in a high temperature environment, and connected to a Si-based signal processing circuit installed in a low temperature environment by an extension wire. Pn-junction SiC diodes were metalized with Pt and successfully tested at 400-600 degree C. The diode characteristics were obtained at different temperatures. Special high-temperature Jisso technology including die bonding and wire bonding was developed. Based on this technology, a SiC diode bridge circuit was constructed and successfully tested at high temperature. In addition, SiC microfabrication technology was studied, and a fundamental sensor structure was fabricated.

研究分野：MEMS

キーワード：高温センサ 信号読出し SiCダイオード ブリッジ回路 高温実装技術 MEMS

1. 研究開始当初の背景

高温環境におけるセンシングは、熱機関やプラントの制御、資源開発などに潜在的な用途が多数ある。これまでに耐熱センサに関する研究はなされているものの、通常、センサの信号処理には Si の電子回路が必要であり、このことはセンサと信号処理回路からなるシステムを考えた場合、大きな問題である。まず、図 1 に示すように、Si の信号処理回路を室温に近い環境に置き、高温環境に設置されたセンサと配線で繋ぐシステムが考えられるが、特にセンサが小形である場合（本研究では、容量型 MEMS センサを想定）、比較的長くなるであろう配線による寄生容量のため、センサの SN 比やダイナミックレンジが著しく悪化する恐れがある。他には、高温で利用できるワイドバンドキャップ半導体、望ましくは SiC の信号処理回路を用いるシステムも考えられるが、SiC の集積回路は研究開発段階にあり、容易に入手できるものではない。

2. 研究の目的

上述のように、現在、高温環境に設置された MEMS センサの信号読み出しに利用できる技術が整っていない。そこで、本研究では、次の節に述べる方法によって、高温環境に設置された容量型 MEMS センサを読み出す技術の実証を行った。

3. 研究の方法

本研究では、センサと最低限の回路要素を高温環境に設置し、そこから配線を伸ばして、室温環境に設置された Si の信号処理回路に繋ぐ方法を実証する。図 2 に回路構成を示すように、高温環境には差動容量型センサ ( $C_1$ ,  $C_2$ )、ダイオードブリッジ ( $D_{1-4}$ )、およびカップリング容量 ( $C_c$ ) を設置し、そこから同軸ケーブルを伸ばして、室温環境に設置されたオペアンプに接続する。カップリング容量には、ダイオードブリッジを通して、 $C_1 - C_2$  に応じた電荷が蓄積され、以下の式に示されるバイアス電圧  $V_{dc}$  が発生する。

$$V_{dc|A} = -\frac{(C_1 - C_2)}{(C_1 + C_2)} \times V_p \quad (1)$$

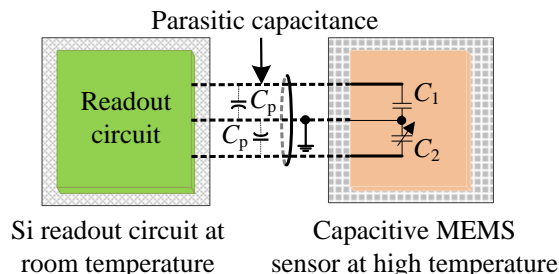


図 1 高温環境でのセンシングにおけるセンサと読み出し回路の関係

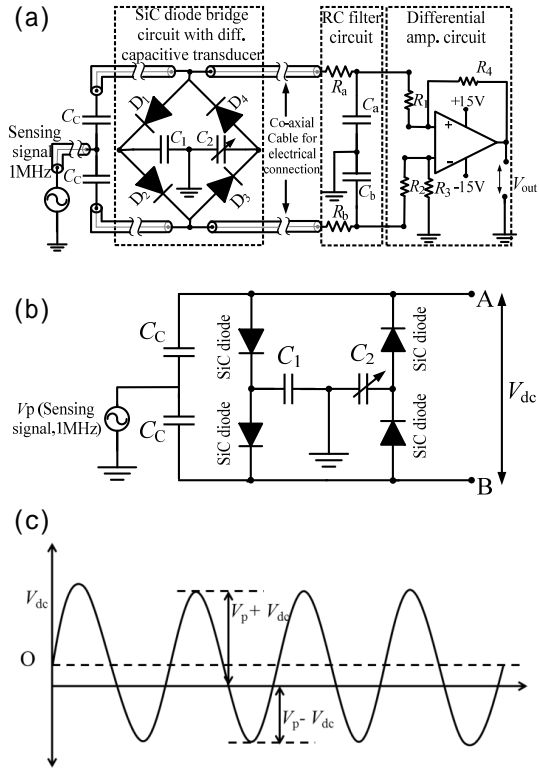


図 2 SiC ダイオードブリッジを用いた差動容量型センサ読み出し回路 (a) 回路全体構成, (b)ブリッジ回路, (c) 端子 A, B に発生する電圧出力

$$V_{dc|B} = +\frac{(C_1 - C_2)}{(C_1 + C_2)} \times V_p \quad (2)$$

$$V_{dc} = 2 \times \frac{(C_1 - C_2)}{(C_1 + C_2)} \times V_p \quad (3)$$

ここで、 $V_p$  は入力電圧、 $V_{dc|A}$ 、 $V_{dc|B}$  はそれぞれ端子 A B に発生するバイアス電圧であり、図 2 (c) に示す関係がある。カップリング容量を適度に大きくしておけば、配線容量に大きな影響を受けずに、 $V_{dc}$  を読み出すことができる。

図 2 の回路を高温環境で成立させるためには、高温で利用できるダイオードと容量が必要である。本研究では、ダイオードとして pn 接合型 SiC ダイオードを利用する。4 (1) では、pn 接合型 SiC ダイオードの高温評価の結果を述べる。4 (2) では、図 2 に示すセンサ読み出し回路を耐熱実装技術を用いて構築し、高温での動作を実証した結果を述べる。

4. 研究成果

(1) pn 接合型 SiC ダイオードの高温評価  
実験に供した SiC ダイオード

本実験に用いた pn 接合型 SiC の断面構成を図 3 に示す。基板は抵抗率 0.02  $\Omega \cdot \text{cm}$ 、厚さ 340-380  $\mu\text{m}$  の 4H-SiC であり、接合領域は 220  $\mu\text{m}$  角、コンタクトパッドは 300  $\mu\text{m}$  角である。ベース層の厚さは 15  $\mu\text{m}$ 、ドーパント濃度は  $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  である。エミッタ

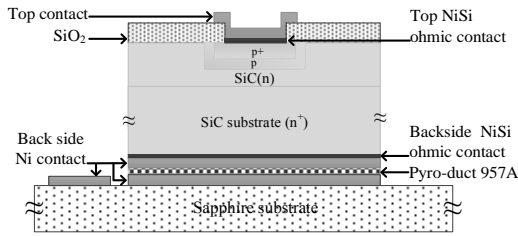


図3 pn接合型SiCの断面構成

のAlドーパント濃度は $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ である。コンタクトパッドにはNiSiが形成され、Alでメタライゼーションされているが、高温に耐えられるメタライゼーションに変更する必要がある。本研究では、NiとPtをメタライゼーションに用いた。厚さ750 nmのNiとPtのコンタクトパッドをSiCダイオードに形成し、後述する高温対応のダイボンドによってサファイア基板に固定し、室温から600までの条件でSiCダイオードの電流-電圧(I-V)特性を測定した。

#### SiCダイオードの高温特性

Niメタライゼーション、Ptメタライゼーションの結果をそれぞれ図4、5に示す。どちらのメタライゼーションでも、SiCダイオードは動作し、600でのideality factorは1.02と良好な値である。ただし、高温での高電流領域を見ると、Niメタライゼーションでは電流の減少が観察され、これは接触抵抗が増大したことが理由であると考えられる。なお、SiCダイオードでは、温度が上がると順方向電圧が下がっており、Siダイオードの場合と逆である。これは、Siではキャリア寿命は温度にほとんどよらないの対して、SiCでは指数関数的に長くなるためである。

図6は、400においてNiメタライゼーションとPtメタライゼーションのI-V特性を空气中で7時間にわたって測定した結果である。Niメタライゼーションでは、接触抵抗の増大による高電流領域での順方向電圧の情報が見られるが、Ptメタライゼーションは優れた安定性を示した。Ptメタライゼーションについては、500、600でも空气中7時間の測定を行った。図7に示すように、600ではわずかに高電流領域での順方向電圧上昇が7時間後に見られるが、Ptメタライゼーションは空气中高温でも優れた安定性を示すことがわかった。図8に400におけるダイオードの直列抵抗の変化を2種類のメタライゼーションについて示すが、高温環境でのセンサ読み出し用途には、Ptメタライゼーションが優位なのは明らかである。

#### (2) SiCダイオードブリッジを用いた高温センサ読み出し回路

##### 耐熱実装技術

SiCダイオードをサファイア基板にダイボンディングするために、耐熱導電性ペースト

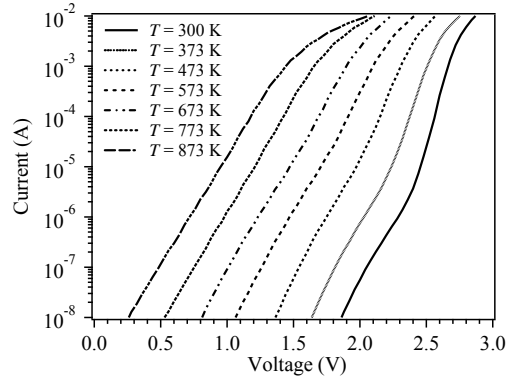


図4 SiCダイオード(Niメタライゼーション)のI-V特性

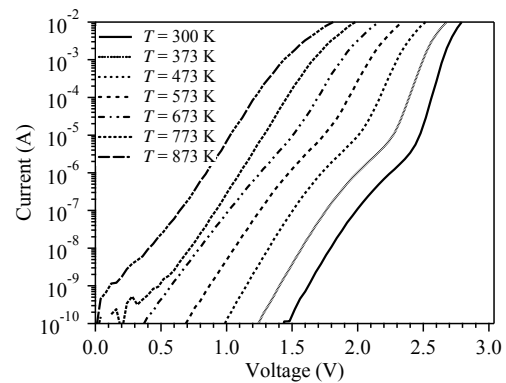


図5 SiCダイオード(Ptメタライゼーション)のI-V特性

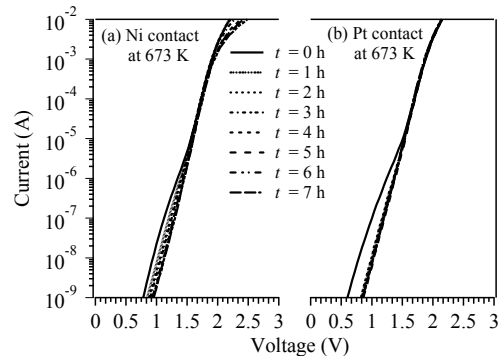


図6 SiCダイオードのI-V特性の400における継時変化(Ni, Ptメタライゼーションの比較)

(Pyro-Duct 597-A, Aremco Products, 米国)を用いた。標準条件で接合したところ、空气中、500、2時間で耐熱導電性ペーストが黒色に変色し、導電性が低下した。そこで、接合条件を見直し、図9の加熱条件で接合したところ、600でも耐熱導電性ペーストの劣化は見られなくなった。この条件でSiCダイオードのダイボンディングを行った。

また、SiCダイオードブリッジを構成するにあたってワイヤボンディングが必要である。金ワイヤを用いた一般的なワイヤボンデ

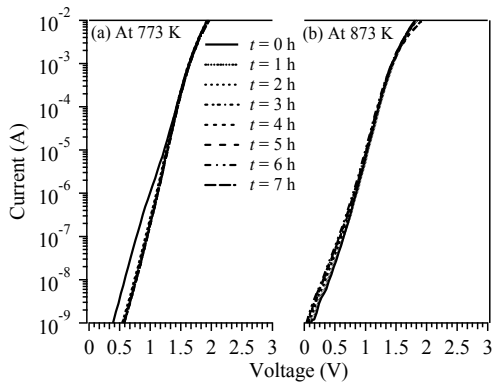


図7 SiC ダイオード (Pt メタライゼーション) の I-V 特性の 500 , 600 nm における継時変化

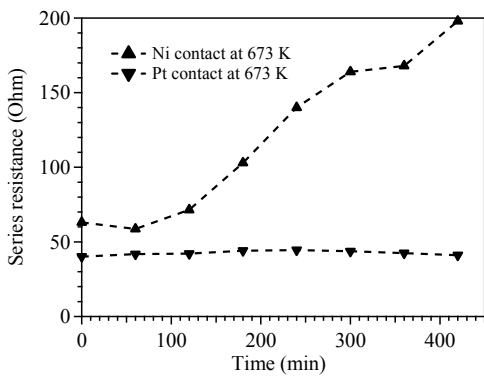


図8 400 nm におけるダイオードの直列抵抗の変化 (Ni , Pt メタライゼーションの比較)

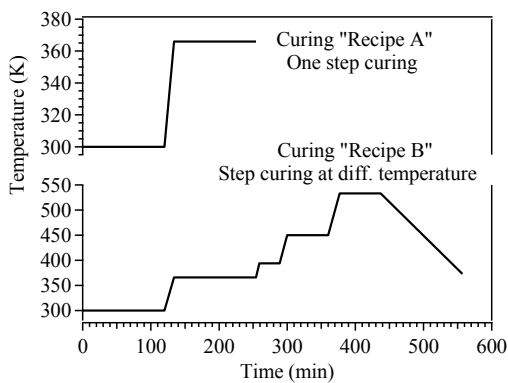


図9 耐熱導電性ペーストの加熱条件

リングは耐熱性に問題があるため、直径 25  $\mu\text{m}$  の Ni ワイヤを用いたウェッジワイヤボンディングを開発した。

SiC ダイオードブリッジ回路による容量読み出し

上述の実装技術を用いて、Ni 薄膜配線を形成したサファイア基板の上に SiC ダイオードブリッジ回路を作製した。カップリングキャパシタもこの基板の上に形成するべきであるが、本研究では、市販のキャパシタを接続して室

温環境に設置した。センサの代わりに、Si 基板上に作製した MOS キャパシタを利用し、これを上述のサファイア基板に実装した。MOS キャパシタは、Si 基板をドライ酸化し、Ni 電極を用いて作製されているが、複数の容量が並列になっており、配線を切断 (スクラッチ) することによって容量を減らす方向に変化させられる。図 10 に SiC ダイオードブリッジとダミーセンサである MOS キャパシタを実装した試料を示す。

この試料を 400 nm に加熱し、ダイオードブリッジ回路からの出力を測定した。 $C_1$  と  $C_2$  は最初、5 pF であるが、 $C_1$  の並列容量を切り離していくことによって ( $C_2 - C_1$ ) をおおよそ 0 pF から 3 pF まで変化させた。そのときの電圧出力を図 11 に示す。期待通り、容量差に応じた電圧変化が得られている。

さらに、ダミーセンサの代わりに、簡易的な加速度センサをこの SiC ダイオードブリッジ回路に測定し、電圧出力を確認した。簡易的な加速度センサは金属と樹脂で作製されているので、室温環境に設置して実験を行った。

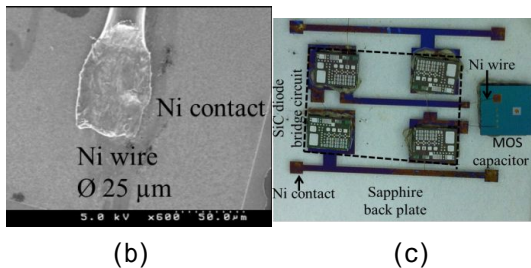
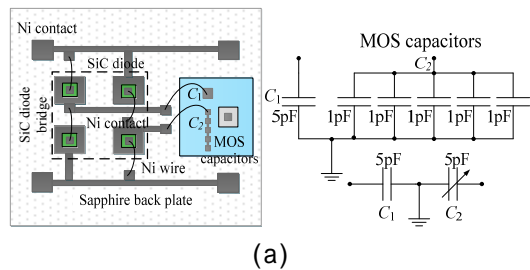


図10 SiC ダイオードブリッジとダミーセンサである MOS キャパシタを実装した試料

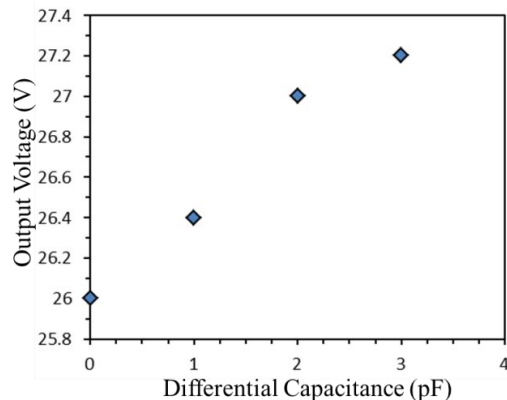


図11 SiC ダイオードブリッジ回路からの電圧出力

### (3) SiC MEMS センサのための SiC 微細加工技術の開発

高温で利用できる差動容量型 MEMS センサとして、図 12 に示すような Si-SiC ハイブリッド構造のセンサを想定し、そのための微細加工技術を開発した。図 12 の構造において、バルク部分は Si 基板であり、ばね構造は SiC 薄膜で形成されている。また、3 枚の基板が Au を介在層として接合されている。

この構造を実現するにあたり、鍵となるプロセスは、SiC の成膜、SiC 薄膜のエッチング、および 3 枚のウェハの Au-Au 接合である。SiC の成膜には、polycarbosilane (液体) をプレカーサに用いる自作のプラズマ CVD ツールを用いて、400 のプロセス温度で応力制御したアモルファス膜を得た。SiC 薄膜のエッチングには、自作の RIE ツールを用いた。マスクには Ni 薄膜を用いた。3 枚のウェハの Au-Au 接合は、自作の治具を用いて 3 枚のウェハを 2 段階でアライメントし、市販のウェハボンダで 300 にて 3 枚を同時に接合した。図 13 に加工したセンサ構造の SiC ばね部分を示す。

### (4) まとめ

本研究では、高温環境に設置された差動容量型 MEMS センサを読み出すための方法として、SiC ダイオードブリッジを用いた方法を提案し、その可能性を実験的に実証した。Pt または Ni メタライゼーションによって pn 接合 SiC ダイオードが 600 でも動作し、高温実装技術によって SiC ダイオードブリッジ回路も高温で動作することを確認した。さらに、高温で利用できる差動容量型 Si-SiC ハイブリッド MEMS センサの構造を提案し、その実現に必要な SiC の成膜技術とエッチング技術、および Au を介在層に用いる 3 層ウェハ接合技術を実証した。

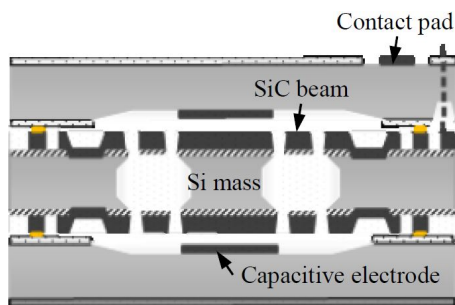


図 12 Si-SiC ハイブリッドセンサの構造

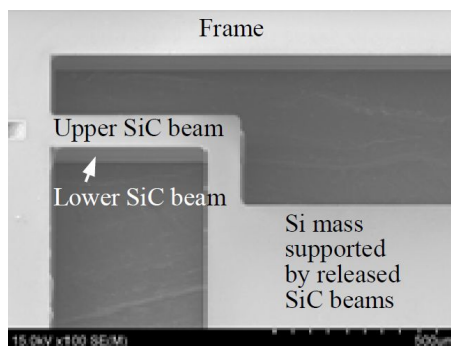


図 13 Si-SiC ハイブリッドセンサの SiC ばね構造

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

Rakesh Chand, "MEMS-based Capacitive Sensor using Silicon Carbide for High Temperature Application" 「高温利用のための炭化珪素を用いた MEMS 技術による容量型センサ」, 東北大学工学研究科 博士学位論文, 2015 年 3 月

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

田中 秀治 (TANAKA, Shuji)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00312611

#### (2) 研究分担者

#### (3) 連携研究者