

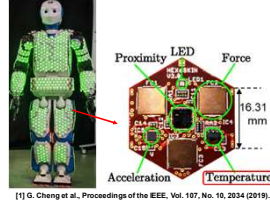
# ショットキー型ゼーベック効果を用いた熱センサの提案

奈良先端大<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup> ○上田彩貴<sup>1</sup>, 上沼睦典<sup>2</sup>, 浦岡行治<sup>1</sup>  
E-mail: ueda.saiki.up5@ms.naist.jp, m.uenuma@aist.go.jp

## 研究背景

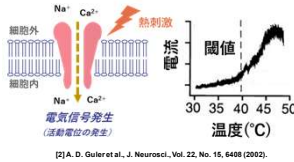
### ● 電子皮膚 (E-skin) の需要が増加

- ✓ 自律型ロボット<sup>[1]</sup>の出現やウェアラブル端末の流行
- ✓ 感覚システムの高度化を目指して、生物の神経回路を模倣して高効率な情報処理を実現するニューロモルフィック技術の研究が進行
- エネルギー効率や大きさなどが課題



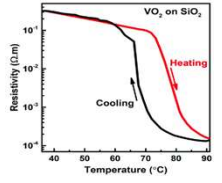
### ● 温度感受性TRPチャネル

- ✓ 生物の末梢感覚神経や上皮で温度を感じる受容体
- ✓ 温度変化に伴うイオンチャネルの開閉により熱刺激が検出され、**温度閾値に基づいた電気信号を脳へ送信**<sup>[2]</sup>
- ✓ 超低消費電力で大規模センシングを実現
- 既存のセンシング技術では再現が困難



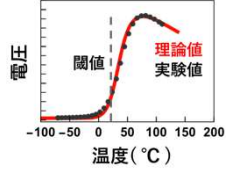
### ● 金属絶縁体転移材料 (VO<sub>2</sub>)

- ✓ 特定の温度で金属状態と絶縁状態の間で相転移
- ✓ 相転移により電気抵抗を3桁急激に変化させる材料<sup>[3]</sup>
- 抵抗値変化を利用したセンシング技術が研究されているが、電力やヒステリシスが課題



### ● ショットキー型ゼーベック効果 (SBS)

- ✓ ゼーベック効果とショットキー障壁を組み合わせることで、金属薄膜とSi基板の界面において**温度閾値を持った熱起電力**が発生<sup>[4-6]</sup>
- ✓ パラメータの変更により温度閾値の操作が可能であるため、**閾値型温度センサに応用が可能**



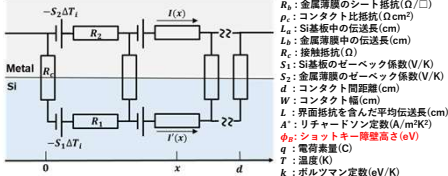
### ■ 目的

金属/半導体界面に生じるSBSを利用して、温度感受性TRPチャネルを模擬した受容体型熱センサの作製及び評価

## シミュレーション

### ■ 計算方法

#### ● 等価回路モデル



【参考文献】「ショットキー型ニューロモルフィック受容体熱センサの作製と評価」第15回「ニューロモルフィック」第15回シンポジウム(2015, 9/10)

等価回路モデルより、見かけ上の熱起電力(ゼーベック係数)Sは

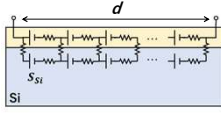
$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{R_b}{R_a + R_b} (S_1 - S_2) \left(1 - \frac{\tanh d/L}{d/L}\right) + S_2$$

Si基板中の伝送長および金属薄膜中の伝送長、平均伝送長は

$$L_a = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_a}}, L_b = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_b}}, L = \frac{2L_a L_b}{L_a + L_b}$$

界面抵抗および界面比抵抗は

$$R_c = \frac{\rho_c}{W \Delta x}, \rho_c = \frac{k}{q A T} \frac{d\phi_B}{dT}$$



#### ● 計算式

$$\Delta V = -S \Delta T = \frac{R_b \Delta T}{R_a + R_b} (S_2 - S_1) \left(1 - \frac{\tanh d/L}{d/L}\right) - S_2 \Delta T$$

#### ● 計算に使用したパラメータ

- $\sigma_f$ : Mo薄膜の電気伝導度: 2 S/ $\mu$ m
- $S_f$ : Mo薄膜のゼーベック係数: -2  $\mu$ V/K
- $t_f$ : Mo薄膜の厚み: 10-100 nm
- $t_s$ : Si基板の厚み: 300  $\mu$ m
- $d$ : 電極間距離: 0.1-10 mm
- $\rho_{Si}$ : Si基板の抵抗率: 0.5  $\Omega$ cm
- $\phi_B$ : ショットキー障壁高さ: 0.78 eV

Si基板のシート抵抗は

$$R_a = \frac{1}{\sigma_f t_f}$$

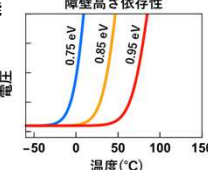
Mo薄膜のシート抵抗は

$$R_b = \frac{1}{\sigma_f t_f}$$

#### ● ショットキー障壁依存性

障壁高さにより閾値制御が可能

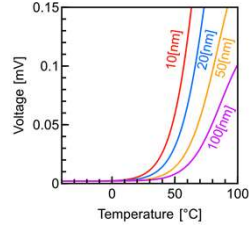
障壁高さ依存性



### ■ 素子構造による温度閾値制御

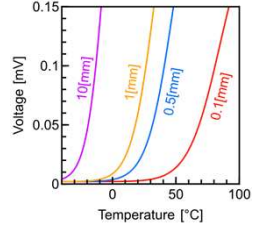
#### ● 薄膜の膜厚依存性

計算に使用したパラメータ  
 $t_f$ : Mo薄膜の厚み: 10, 20, 50, 100 nm  
 $d$ : 電極間距離: 1 mm



#### ● 電極間距離依存性

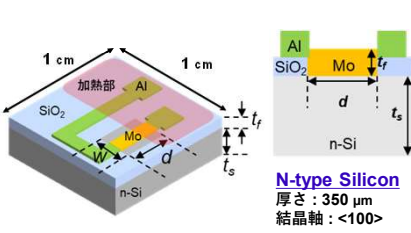
計算に使用したパラメータ  
 $t_f$ : Mo薄膜の厚み: 50 nm  
 $d$ : 電極間距離: 0.1, 0.5, 1, 10 mm



- 薄膜の厚みが薄いほど電圧の傾きが大きい
- 電極間距離を変化することで、温度閾値を制御可能
- 電極間距離が長いほど温度閾値は低下

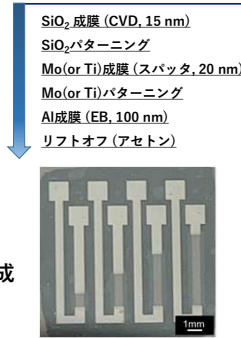
## デバイス作製

### ■ 熱センサの構造



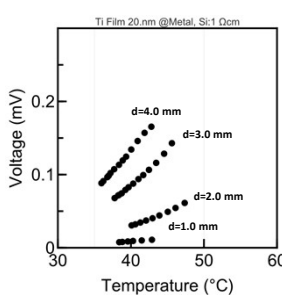
- SiO<sub>2</sub>を絶縁膜としてMo(or Ti)/Si界面を形成
- Alで電極間距離dの電極を形成

### ■ 作製プロセス

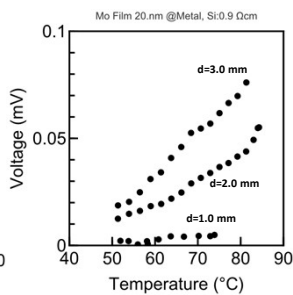


### ■ 測定結果

#### ● Ti薄膜 20 nm



#### ● Mo薄膜 20 nm



- 片側に熱を加えることによって、SBSによる起電力を確認
- 電極間距離を長くすることで、起電力の増加傾向がみられた

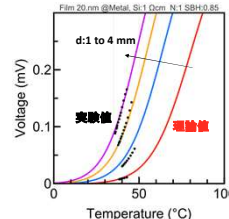
## 考察

### ■ 実験値と理論値の比較

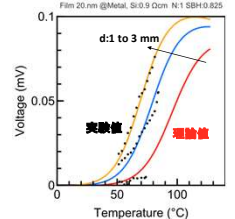
- fittingの結果、実験結果は理論式に一致する傾向がみられる (Ti-20nmでは $\phi_B = 0.85$  eV、Mo-20nmでは $\phi_B = 0.825$  eV)
- 膜厚誤差の調整、薄膜の導電率( $\sigma_f$ )とショットキー障壁( $\phi_B$ )の温度依存性を考慮することで更に一致する可能性が考えられる

→ センサ構造 (ショットキー障壁領域) を調整することで、温度閾値の制御が可能であることが明らかとなった。

#### ● Ti薄膜 20 nm



#### ● Mo薄膜 20 nm



## 結論/展望

- 金属/半導体界面に生じるSBSを利用して、温度感受性TRPチャネルを模擬した受容体型熱センサを作製できた
- SBSを利用した熱センサでは、センサ構造 (ショットキー障壁領域) の調整によって温度閾値が制御可能であることを明らかにした
- 今後、実際のデバイスへの応用を見据え、 $\mu$ mオーダーのデバイスサイズにおける検討を行う