

単結晶シリコンマイクロボロメータの設計と試作

Micro Bolometer of Single Crystalline Silicon

岸 直輝^{*1} 原 仁^{*1}
 KISHI Naoki HARA Hitoshi
 蒲原 敦彦^{*1} 山岸 秀章^{*2}
 KANBARA Nobuhiko YAMAGISHI Hideaki

単結晶シリコンを用いた非冷却型マイクロボロメータを開発した。マイクロ赤外分光デバイスの検出器に応用できる。ボロメータの構成要素である吸収体、測温抵抗体を単結晶シリコンのみで構成し、不純物濃度の制御による、吸収率、抵抗温度係数、雑音電圧の設計方法、及びマイクロマシン技術によるエアブリッジ構造を利用した熱的特性の設計方法を開発した。

試作結果では、 $D^*(500\text{ K}, 10\text{ Hz}, 1\text{ Hz}) = 1.1 \times 10^8 [\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}]$ と高感度を得た。

We have developed an uncooled micro bolometer for micro infrared spectroscopy. The electrical lead that is only made of single crystalline silicon is proposed as the sensing element of the bolometer. This lead functions both as the absorber, and as the temperature-sensitive resistor. Single crystalline silicon is a suitable material, because SOI (Silicon on Insulator) wafers can be used. Since the fabrication is compatible with IC processes, low-costs and stable infrared sensors can be realized.

A micro bolometer has been realized with a specific detectivity of $D^*(500\text{ K}, 10\text{ Hz}, 1\text{ Hz}) = 1.1 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ at bias voltage 9.0 V. The length of resistor is 10 mm.

1. はじめに

環境計測，医療・バイオ計測，温度分布計測，排ガスモニタ，プロセスの品質管理などのさまざまな分野で，赤外線分光分析が用いられている。しかしこれらの装置は規模が大きく，高価なものであり，将来的にはマイクロマシン技術を用いた小型で低コストなマイクロ赤外分光デバイス⁽¹⁾が期待されている。

このデバイスの実現には，赤外光源，赤外フィルタ，赤外検出素子の3つの要素の開発が必要である。

赤外検出素子に要求される性能は，小型で，感度が均一であり作製が容易であることが挙げられる。本研究ではマイクロマシンの技術を用いた赤外検出素子の設計手法の確立，試作による性能の確認を行った。

赤外線の検出器は大きく量子型と熱型に大別される。量子型は光子によって素子内に電子または正孔が励起され，その変化を抵抗値や電流として検出する。高感度・高速応答であるが，感度波長帯域が狭く，長波長帯域では冷却が必要となる。熱型は赤外線の吸収によって素子の温度が上昇し，それを抵抗値や起電力，容量変化など

で検出する。量子型に比べ感度は低く応答は遅いが広帯域で室温で動作する。最近のマイクロマシン技術の進歩により，高感度・高速化が期待されている。

熱型検出器の性能は，入射赤外線をいかに効率よく温度に変換するかに依存する。センシング部を中空につり上げたエアブリッジ構造を用いて，基板との熱伝導を低減し，更に薄膜化で熱容量を減らすことにより，熱型検出器の欠点である感度・応答を改善できる。この構造を

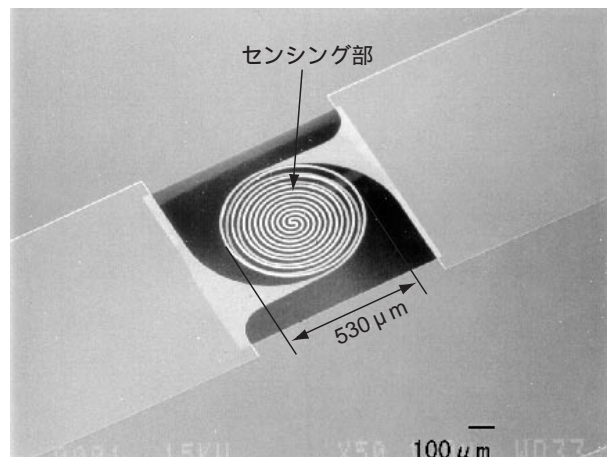


図1 試作した単結晶シリコンボロメータの電子顕微鏡像

*1 中央研究所 マイクロマシン研究部

*2 IA事業本部 環境機器事業部 技術部

再現性良く、大量・安価に作製するためには、半導体プロセス技術を応用したマイクロマシン技術が最適である。

熱型検出器の検出方法の種類は、抵抗型(ボロメータ: bolometer), 起電力型(サーモパイル: thermopile), 容量変化型(焦電: pyroelectric)等がある。焦電型は温度変化の時間微分に比例した出力を得るため、入射光のチョッピングが必須である。また、電極の構成や焦電体の成膜など、マイクロ化には不向きである。サーモパイルは感度向上のために冷・温接点数を増やす必要があり、マイクロ化と共に構造が複雑になってしまう。

ボロメータは吸収体が塗布された抵抗体の抵抗変化を検出する単純な構造である。従来は抵抗体として金属酸化物などの組成比が制御された抵抗温度係数が高い物質を用いる。これらの形成はバルク材からの削出しや、ハードマスクを用いた多元蒸着などによる薄膜形成を用いるため、マイクロ化には不向きであった。同様に、吸収体の塗布方法、パターン形成方法もマイクロ化には問題があった。

本研究では、SOI(Silicon on Insulator)基板と半導体プロセス加工でマイクロ化したボロメータを開発した。単結晶シリコンの抵抗温度係数は高くないが、最適な不純物濃度を選択することによって、S/Nを改善した。また、熱伝達率は金属並であるが、構造体として弾性限界が大きく、クリープや疲労の点からも優れた材料であることを利用し、構造設計により熱的特性を改善した。赤外線吸収に関しては、シリコン中の自由キャリアによる吸収を利用したことで、他の吸収体を付加することによる熱特性の劣化はなく、再現性が向上した。

2. 検出原理

試作したボロメータを図1に示す。測温抵抗体と吸収体の機能を兼ねたセンシング部は単結晶シリコンのみで構成されている。

赤外線検出器の評価指数である比検出能 D^* のボロメータに関する理論式は次式となる。

$$D^* [\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}] = \frac{\eta \alpha V_b}{4G V_n} \sqrt{\frac{\Delta f A}{1 + (2\pi f C/G)^2}}$$

η : 赤外線吸収率
 α [K] : 抵抗温度係数
 G [W/K] : 熱コンダクタンス
 C [J/K] : 熱容量
 V_n [V] : 雑音電圧
 V_b [V] : ブリッジ電圧
 A [cm²] : 受光面積
 Δf [Hz] : 増幅帯域幅
 f [Hz] : チョッピング周波数

この D^* が最大となるように設計を行う。各パラメータは独立ではないので、単結晶シリコンに関してのそれぞれのパラメータを実験の結果を含めて考察する。

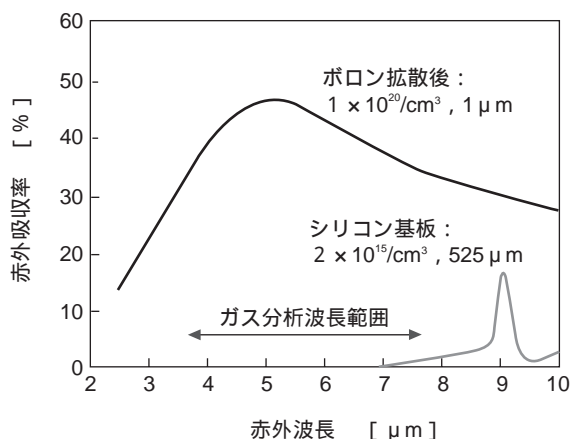


図2 不純物拡散による赤外線吸収率の改善

設計仕様は以下のように定める。

- (1) チョッピング周波数: 10 Hz
- (2) 測定対象: 500 K黒体炉
- (3) 抵抗値: 1 k~1 M

設計の要素は、

- (1) センシング部の不純物濃度の設計
- (2) センシング部の形状の設計
- (3) プロセスの設計

である。不純物は、p-type(Boron-dope)とする。

3. 不純物濃度の設計

センシング部としての単結晶シリコンの不純物濃度は赤外線吸収率、抵抗温度係数、雑音電圧の性能を決定づける。以下ではこの3つの性能の不純物濃度依存性を述べ、最適な濃度を決定する。

3.1 赤外線吸収率の不純物濃度依存性

センシング部を吸収体の側面から考察する。

低濃度の両面研磨ウエハ(p型 $8 \sim 15 \text{ cm}$, $3 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 厚さ $525 \mu\text{m}$)を用い不純物拡散の効果を実験により検証した。図2は不純物拡散前後の赤外線吸収率特性を示す。前記基板は $525 \mu\text{m}$ の厚さがあるにもかかわらず、シリコンの特性吸収帯以外では吸収がない。この基板の片面に不純物拡散を施すことにより赤外線吸収特性が大きく改善していることが解る。このとき拡散深さは約 $1 \mu\text{m}$ 、不純物濃度は最大で約 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ である。

また、キャリアの有効質量と移動度から、自由キャリアによる吸収率の濃度依存性の計算結果を図3に示す。これは実験結果とよく一致している。

3.2 抵抗温度係数の不純物濃度依存性

図4に抵抗温度係数の不純物濃度依存性を示す。p型の

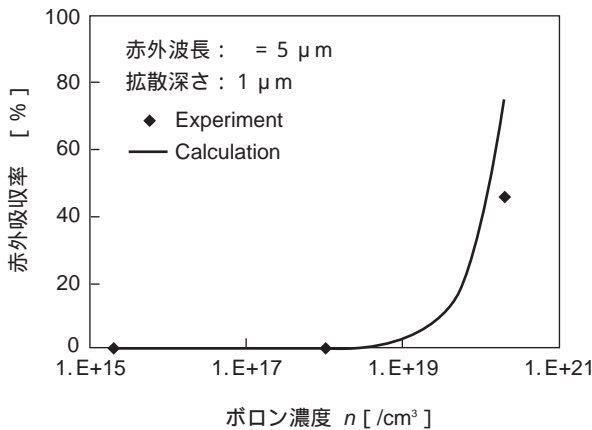


図3 赤外線吸収率のボロン濃度依存性

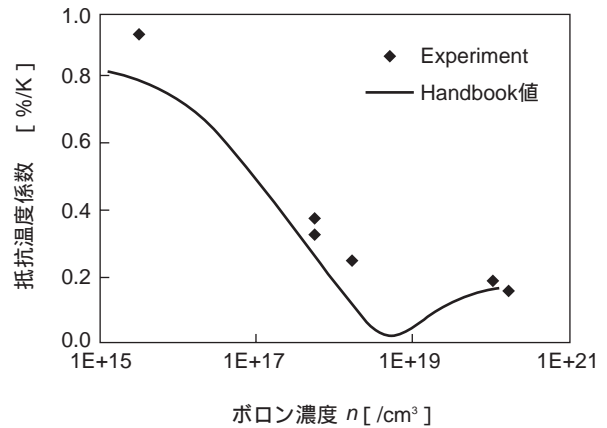


図4 抵抗温度係数のボロン濃度依存性

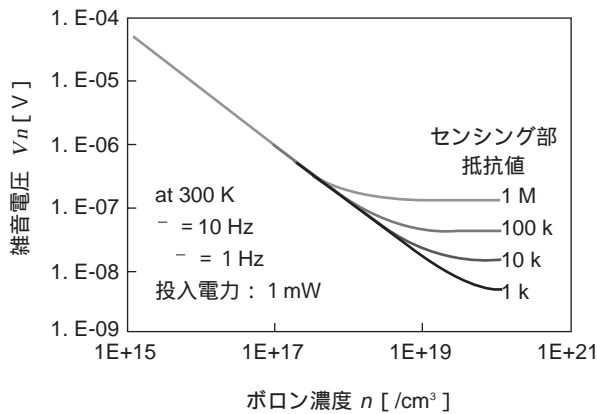


図5 雑音電圧のボロン濃度依存性

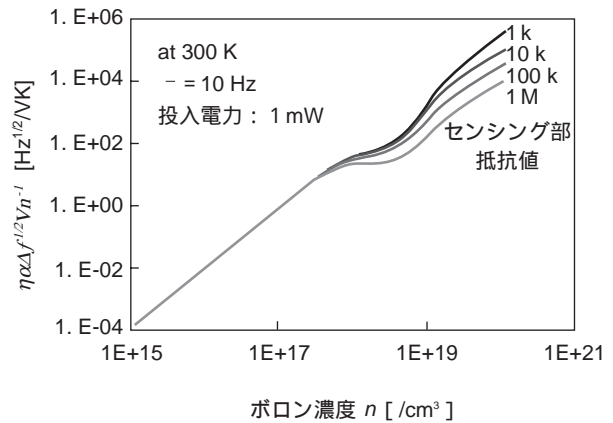


図6 D*のボロン濃度依存性

単結晶シリコンの抵抗温度係数は不純物濃度に依存し、常温では0~0.8%/Kとなる。金属と同様に、温度係数は正であり、少なくとも300~350Kでは抵抗値と温度の関係は線形である。

3.3 雑音電圧の不純物濃度依存性

ボロメータは比較的低周波で用いられることから、 $\frac{1}{f}$ ノイズとJohnsonノイズ(熱雑音)が支配的であり、素子の雑音電圧 V_n は、これらのスペクトル強度の合成としてモデル化できる。

$\frac{1}{f}$ ノイズは統一的に説明する理論はなく、表面状態、コンタクト状態に大きく影響するが、Hoogeらは、金属や半導体のバルクから発生する $\frac{1}{f}$ ノイズの実験式を提案し⁽²⁾、抵抗体の格子散乱による移動度のゆらぎに起因して、導電率がゆらぐモデルをたてた。

このモデルをもとに実験より係数を求め、雑音電圧の不純物濃度依存性を各抵抗値毎に計算した。この時、ブリッジ電圧による投入電力が一定であるとして計算し

た。結果を図5に示す。

以上の図3~5と理論式に基づいてD*の不純物濃度による依存性を図6に示す。図6より、不純物濃度を固溶限界近くまで高濃度にする事で、大きいD*が得られることが解る。

4. 形状の設計

熱的特性を考慮してセンシング部の形状を設計する。熱容量をできるだけ小さくするために、センシング部には他の支持体や吸収材を付加せずに体積を極力小さくする。また、熱コンダクタンスを低くするために、真空中で2本のリード線のみが熱接地された理想構造とする。このとき、センシング部の形状は長さL、幅w、厚さdで決定される。

理論計算の結果、D*はセンシング部の幅wには依存しないので、作製の容易さを考慮して10μm幅と設定した。厚さdに関しては、D*はdの平方に反比例するため、薄い程D*が改善される結果を得た。しかし、十分な吸収率を得

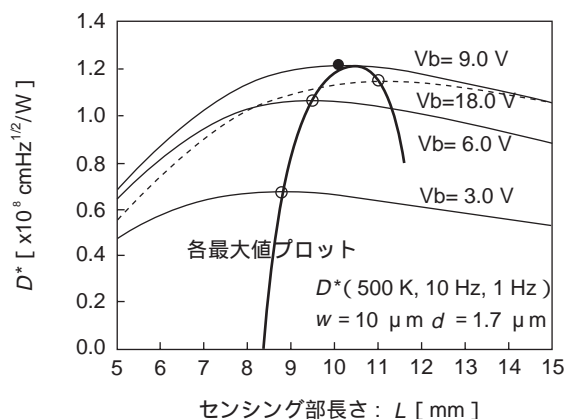


図7 D*におけるセンシング部の長さの依存性

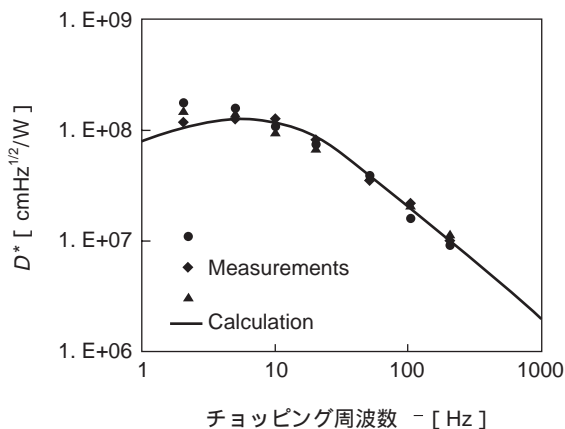


図9 D*(500 K, 10 Hz, 1 Hz)の周波数特性

るための不純物拡散深さと、センシング部の自立を考慮し、ある程度の厚さが必要である。ここでは標準的なSOI基板を用いたため、活性層厚さ $d = 1.7 \mu\text{m}$ とした。

図7は、センシング部の長さ L とブリッジ電圧による D^* の依存性の計算結果である。抵抗体長さ $L = 1 \text{ cm}$ 、ブリッジ電圧 $V_b = 9 \text{ V}$ のときに、最大の $D^*(500 \text{ K}, 10 \text{ Hz}, 1 \text{ Hz}) = 1.2 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ が得られる。

5. プロセスの設計

試作プロセスを図8に示す。SOI基板の単結晶シリコン層にボロンを拡散し、アルミニウム電極を形成し、ヒドラジンを用いて基板を除去した後に中間の絶縁層を除去した。最後にダイアフラム状の単結晶シリコンをドライエッチングでパターンニングし、エアブリッジ構造のセンシング部を形成する。

6. 評価

BaF₂を窓材として真空パッケージしたボロメータの500

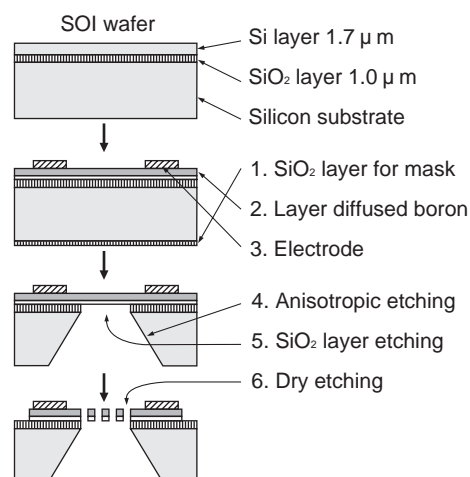


図8 作成プロセス

K黒体の赤外照射による D^* の周波数特性を測定した。結果を図9に示す。 D^* とカットオフ周波数は設計値と良く一致している。 $f = 10 \text{ Hz}$ では、実験値、設計値共に $V_b = 9 \text{ V}$ で最高値となり、 $D^* = 1.1 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ を得た。

7. おわりに

SOI基板を用いた単結晶シリコンボロメータを設計・試作した。その結果以下のことを得た。

- (1) S/N向上のために、不純物濃度は高濃度を選択する。
- (2) 熱的特性と抵抗値を考慮すると、線状のセンシング部を自立させた形状が最適である。
- (3) $f = 10 \text{ Hz}$ の仕様では、センシング部の長さは 1 cm 、ブリッジ電圧は 9 V が最適である。
- (4) 実験結果と設計値は良く一致し、 $D^*(500 \text{ K}, 10 \text{ Hz}, 1 \text{ Hz}) = 1.1 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ を得た。

単結晶シリコンボロメータは半導体プロセスと整合性が良く、赤外光源、赤外フィルタ、ガス流路等と集積化したマイクロシステムデバイスの要素技術として有用である。

謝 辞

本研究は、通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDOから依頼を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として横河電機(株)が実施したものである。

参考文献

- (1) H.Hara and H.Yamagishi, "Micro Variable Infrared Filter", T. IEE Japan, vol. 119-E, no. 2, 1999
- (2) 橋口住久, "低周波ノイズ", 朝倉書店, 1991