セルフパッケージ型マイクロ赤外線センサ

正 員 佐藤倬暢、 非会員 鈴木孝直、 非会員 橋本広和
(株式会社フジクラ 先端技術研究所)

Self-Package Type Infrared Radiation Microsensor

Akinobu Satoh, Takanao Suzuki, Hirokazu Hasimoto
(Advanced Technology R&D Center, Fujikura Ltd.)

Two Si Wafers were bonded using $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ direct bonding technology, where a bridge structure of a composite dielectric film ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) was formed in the bond area. In the center of this bridge structure, a single crystal Si was left in the shape of an island, on which a Schottky Barrier Diode(SBD) with Cr silicide was fabricated and used as a detector part. On the other hand, another Si wafer was used as a cap wafer having anti-reflection coating to improve the light transmittivity in the wavelength range from 8 to $12\mu\text{m}$ up to more than 90%. This cap wafer and the above mentioned main wafer were bonded together using water glass bonding technology at 80°C to encapsulate the detector part in a vacuum. A bolometer type infrared radiation microsensor was thus made on an experiment basis. It has a self-package type structure to protect the detector part from mechanical damages and secure the operational environment. Its size and weight could be extremely reduced down to $2.0\text{mm}\times 2.0\text{mm}\times 0.8\text{mm}$ and 10mg, respectively. The response time is as fast as 4ms which is about 1/100 of that of a conventional bolometer. Other important electric characteristics of this element are as follows: NEP (noise equivalent power) = $5.90\times 10^{-10}\text{ W/Hz}^{1/2}$, $\text{NETD}_{200-205}$ (noise equivalent temperature difference) = 0.02°C , $R(\text{sensitivity}) = 1.69\times 10^5\text{ V/W}$.

キーワード：セルフパッケージ、水硝子接合、複合誘電体膜 ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$)
self-package, water glass bonding, composite dielectric film($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$)

1. はじめに

一般に熱型赤外線センサの応答速度は緩慢で、感度は低いとされている。しかし、波長依存性はなく、室温動作が可能で小型化・軽量化に適している等の利点も持っている。非接触型で温度を測定することの多い医療や 保安・防災の市場では、この熱型赤外線センサの需要が活発である。熱型とは赤外線を検知部で熱に交換して、温度変化を電気信号に変えるもので、その検出方式から焦電型、熱起電力 (Thermopile) 型、気体の熱膨張 (ゴレイセル) 型及び熱抵抗 (Bolometer) 型に分けられている。

赤外線センサとして古くから用いられている Bolometer は(a) 焦電素子の様にチョッパがなくても静止体の検温が出来、(b)サーモパイルの様に感度を高めるのに冷・温両接点数を増やす必要がないので、小型化に向いている等の特徴を持っている。

この Bolometer にマイクロマシン技術を使った試みは、近年数多く報告されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。それらの殆どは熱コンダクタンスを小さくするため、サーフェイスマイクロマ

シン技術で検知部を浮かす構造にしている。しかし架橋部が Si 基板のため熱伝導率も大きく、期待するほどの結果は得られていない。また、マイクロマシン技術で小型化が出来ても、その素子は外ケースに入れられているため最終素子外形は大きくなり、名ばかりのマイクロマシン技術の応用であった。

筆者らはマイクロマシン技術として① $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 直接接合技術、②低温 (80°C) 水硝子接合による気密封止技術、③複合誘電体膜による架橋構造、④表裏貫通配線技術、⑤残留応力制御技術等の要素技術を駆使し、本格的にマイクロマシン技術を応用した赤外線マイクロセンサを造った。この新しく開発されたセンサはマイクロロボット用センサや鼓膜体温計を想定した超小型で高速応答するショットキバリヤ型 Bolometer である。本稿ではそこから得られた知見を述べる。

2. 素子設計

〈2-1〉素子構造

素子の小型化には、今までのセンサ素子の様に Pellet-

Bonding や Wire-Bonding でパッケージに結線していたのではパッケージの分だけ面積が必要で小型化できない。そこで図1に示すように、素子自身にパッケージ機能を持たせたセルフパッケージ型にした。

Bolometer の感度を高めるためには、赤外線を受光したときの検知部の温度変化をできるだけ大きくすることである。このためには受光する光が最初に通過するキャップ部の透過率を上げ、検知部の受光面積を広く、その熱容量は小さく、しかも受光部と周囲のヒートシンク部との熱コンダクタンスを小さくする必要があった。即ち、出来るだけ対象物温度 T_{obj} に検知部温度 T_s を近づけることによって、高感度にすることが出来る。

熱コンダクタンスを小さくするのに、熱伝導率(表1)の低い誘電体膜を用いて検知部を宙に吊し、熱対流による熱伝導を防ぐために真空封止を行った。

検知部は、既存の薄膜サーミスタとショットキバリアダイオード(SBD)を検討したが、前者は架橋部とのなじみが悪いために架橋構造が”破損”したり、残留応力(表4)で”そり”、”たわみ”、”ねじれ”等が生じ、検知部が被検体と直角に向かなくなる。その結果、架橋部の残留応力が少ない単結晶 Si に、クロムシリサイド (CrSi) による SBD

を造り込んで検知部とした。図1に開発した素子構造を示す。

<2-2>本体基板

本体基板として2枚の Si 基板を $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 直接接合で貼り合わせた SOI 基板を製作した⁽⁶⁾。この接合部の複合誘電体膜 ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) は、後で検知部を宙に吊す架橋構造に利用した。このため各誘電体膜の厚さ制御は重要となる。

SOI 基板の片側は SBD を造り込むための単結晶層で、この基板を Bond-Wafer、もう一方の台座基板となる方を Base-Wafer と呼ぶ。

Bond-wafer も Base-wafer も同じ基板 [N型、CZ、(100)、 $1 \sim 4 \Omega\text{-cm}$] を用い、Bond-wafer と Base-wafer はともにパイロジェニック (Pyrogenic Steam) で酸化 ($=500\text{nm} \pm 10\%$) した。その後 Bond-wafer だけに LP-CVD 法 [$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$, 800°C , 0.5torr] で Si_3N_4 膜を、厚さ 130nm 成膜する。これら両基板をアンモニア系溶液で前処理して、クリーンベンチの中で重ね合わせた後、 $1,100^\circ\text{C}$ 以上の N_2 雰囲気炉で接合させた。さらに Bond-wafer 側を $3 \sim 5\mu\text{m}$ の厚さに研磨し、Starting Material を準備した。

<2-3>キャップ基板

この赤外線センサの使用波長範囲は、”空気窓”と呼ばれ、水分や炭酸ガスの影響を受けない領域 ($8 \sim 12\mu\text{m}$) とした。Si 基板でこのことを考慮すると、基板中の酸素原子による Si-O ーパイプレーション ($1,100\text{cm}^{-1}$) が入射光の透過率を下げるので、Si 基板に含まれる酸素原子濃度は $1.0 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 以下とした。

Si 基板中での赤外線の吸収係数は電導型によって異なり、正孔による吸収は電子の 43 倍にもなる⁽⁷⁾。このため赤外線用キャップ基板はN型とした。また、キャップに入射する赤外線の熱励起で、発生する正孔を少なくするために抵抗率も大きめ ($20 \sim 50 \Omega\text{-cm}$) を使用した。キャップ用 Si 基板の仕様は下記の様になる。

[N型、FZ、(100)、 $20 \sim 50 \Omega\text{-cm}$ 、4 inch、 $300\mu\text{m}$]

このキャップ基板に赤外線波長範囲 ($8 \sim 12\mu\text{m}$) の透過率を改善するため、反射防止 (Anti-Reflection: 以下 AR という) 膜を設けた。

表1 架橋構造材料の熱伝導率

材料名	比熱 $\text{erg/g} \cdot \text{K}$	密度 g/cm^3	熱伝導率 $\text{erg/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$
Si	7.00×10^6	2.33	1.50×10^7
Al	8.77×10^6	2.69	2.38×10^7
Ti	5.22×10^6	4.50	0.22×10^7
熱生成 SiO_2	14.00×10^6	2.20	0.01×10^7
LPCVD Si_3N_4	0.71×10^6	3.10	0.12×10^7
AR 膜	4.19×10^6	4.50	0.29×10^7

図1 セルフパッケージ型赤外線マイクロセンサ (SBD-Bolometer)

3. 赤外線センサ素子の製作工程

・本体基板

図2に示す様に、加工前の Bond-Wafer 側に SBD のアノード電極を造り込んだ。このアノード電極を含む Si Island を Hydrazine (50w% $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) の結晶異方性エッチングで形成した後、Base-Wafer 側から貫通孔用V溝の製作にはいる。このV溝壁面に熱生成酸化膜を設け、埋め戻す金属が基板とショートしない様にした。この時、Bond-Wafer 側の Si

Island 端部も一緒に絶縁される。次に、Bond-Wafer 側の Si Island に CrSi₃ の SBD を形成した。V溝金属 (Au/Pt/Ti) や SBD 電極を形成し、その後、貫通部の表面より複合誘電体膜にドライエッチングでコンタクトホールを空け、貫通孔部分の金属接続を Bond-Wafer 側から行う (表裏貫通配線技術)⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。ここで、中間特性チェックを行い、引き続き本体基板表面より Hydrazine の結晶異方性エッチング液を用いて架橋構造製作にはいる (写真1)。検知部にマスク蒸着で金黒を付けて本体基板への素子製作は終了する。

・キャップ基板 (図3)

表裏両面の”窓”部を結晶異方性エッチングで形成し、その時マスクとして使用した酸化膜は水硝子接合時の吸水膜として使用する。その後、AR 膜の製作に入るが、接合面となる部分には AR 膜が残らない様にする。即ち、表面の膜は全面蒸着であるが、裏面は”窓”部だけの部分蒸着にする。最後に光を遮断するための金属膜 (インコネル: Ni80%+Cr14%+Fe6%) を部分蒸着して出来上がる。

・水硝子接合

実験に使用した水硝子は関東化学 (株) 製の珪酸ナトリウム (Sodium Silicate= SiO_2 : 36%, Na_2O : 18%) である。水硝子を超純水で薄めて 0.1W% の溶液を造り、遠心分離器 (20,000rpm、2 時間) に掛けた上澄み液を接着剤として使用した。接合する基板の片側に水硝子接着剤を約 3nm (7,000rpm、30sec) の厚さに塗布し、両面アライナーで整合後、仮止め、ローラ押さえ (1st Step)、加熱接合 (2nd Step、80℃、30min) の順で行った。

4. 素子評価

〈4-1〉複合誘電体膜による架橋構造の破壊強度

検知部を吊した架橋構造の機械的破壊強度を (株) 島津製作所のダイナミック微小硬度計 MCITE-200 を用いて計測した。よく用いられるビッカースやヌーブ硬さと異なり、ダイナミック硬度計は圧子を押込んでいく過程の荷重と

I. Starting Material

II. Cathode Electrode

III. Si Island

IV. Through-hole

V. SBD

VI. Metal Electrode interconnection

VII. Inspection(1)

VIII. Passivation

IX. Air-bridge

X. Deposition of Gold-black

XI. Bonding of cap wafer and main wafer

図2 本体基板の製作工程

表2 赤外線マイクロセンサの特性

	記号	単位	測定値 1
固定パラメータ			
検出部面積	A	cm ²	1.30E-03
絞り半径	r	cm	0.5
絞り半径と Bolometer の距離	D	cm	7.0
黒体放射率	ϵ		0.94
フィルタ帯域幅	B _w	Hz	100
アンプゲイン	A _p		100
設定パラメータ			
黒体温度	T ₀	℃	200
周囲温度	T _a	℃	24.5
黒体放射エネルギー	W ₀	W/cm ²	2.67E-01
Bolometer へ向かうエネルギー	W ₀	W/cm ²	2.25E-01
Bolometer への入射エネルギー	W	W/cm ²	1.15E-03
検知部への入射エネルギー	W·A	W	1.49E-06
測定データ			
ノイズ電圧	N	V	1.00E-03
出力電圧	S	V	2.52E-01
感度	R=S/W·A	V/W	1.69E+05
感度 (1/アンプゲイン)	R/A _p	V/W	1.69E+03
NEP (等価雑音パワー)	W·B _w ^{-1/2}	W/Hz ^{1/2}	5.90E-10
D* (比検出度)	A ^{1/2} /NEP	cm·Hz ^{1/2} /W	6.10E+07

I. Starting Material

II. Anisotropic etching

III. Anti reflection film

IV. Spinning of water glass

V. Bonding of cap wafer and main wafer

図3 キャップ基板の製作工程

表3 反射防止 (AR) 膜の応力

膜 層	膜名称	膜厚 (μm)	膜構成比率 (%)	単層膜応力 (10^9dyne/cm^2)	応力比率 (10^9dyne/cm^2)
表 面	ZnS	0.40	14.5	+ 1.308	+ 0.1897
2	MgF ₂	0.30	10.9	- 3.516	- 0.3832
3	ZnS	0.80	29.1	+ 1.308	+ 0.3806
4	MgF ₂	0.30	10.9	- 3.516	- 0.3832
5	ZnS	0.30	10.9	+ 1.308	+ 0.1426
6	Ge	0.20	7.3	+ 0.787	+ 0.0575
7	ZnS	0.45	16.4	+ 1.308	+ 0.2145
Si 基板		515.0			S $\Rightarrow$ 0.2185

写真1 架橋構造

押し込み深さの関係から硬さを求めるもので、試料の塑性変形だけでなく、弾性変形をも含んだ特性が得られる。電磁力によって発生させた荷重が、試料に対し垂直に負荷されるような機構が設けられており、押し込み深さは差動トランスにより計測している。圧子は先端が $50\mu\text{m}$ 径のフラットな形状を使用し、圧子を当てる部分は架橋構造がクロスしている SBD の中心とした。複合誘電体膜は、上下の SiO_2 膜厚が 500nm 、中心にある Si_3N_4 膜厚が 130nm の架橋構造で、SBD 部は $260\mu\text{m}^2$ 、ブリッジの幅 $50\mu\text{m}$ および $100\mu\text{m}$ 、長さ $1460\mu\text{m}$ である。その破壊強度測定結果は約 1.5gf/本 であった。ただし、圧子の荷重が架橋部に均一に掛かり 2 本以上のブリッジが切れている場合は 2.0gf 以上であった。また、破壊強度はブリッジ幅での異差はみられなかった (図 4)。ただし、切断時のブリッジの伸びは幅 $50\mu\text{m}$ の時 $1.9\mu\text{m}$ (伸び率 = 0.35%)、幅 $100\mu\text{m}$ で $1.1\mu\text{m}$ (伸び率 = 0.20%) であった。また、切断箇所の顕微鏡検査では、ほぼ全数が SBD から遠い側の端部で切断していた。これはブリッジが Si 基板に固定されている所に応力集中が起きたためと思われる。

〈4-2〉水硝子接合の評価⁽⁵⁾⁽⁹⁾

接合実験は Si/Si 、 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 Si/SiO_2 、 $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ の組み合わせで行った。この結果、片側には SiO_2 の様に水分を吸収する層が必要であることが判った。

水硝子膜厚が約 $3 \sim 25\text{nm}$ の時、全試料で接着率は 95% 以

上を得た。ボイド発生は主な原因はパーティクルで、その直径の約 $150 \sim 200$ 倍がボイドとなった。

接着強度の測定は Step 毎に分けて行い、第 1 Step での界面エネルギーはナイフエッジ法⁽⁶⁾で約 0.562J/m^2 、第 2 Step での加温接合では、ほぼ全試料で約 290Kgf/cm^2 以上の接着力を得た。

気密試験は、接合する片側の基板に V 溝貫通孔を開けて接合し、圧力センサ用システムに組み立ててから He リーク試験を行った。水硝子膜厚が厚くなると未反応基が多くなり、気密性は悪くなる (図 5)。さらに、セルフパッケージ型のマイクロ赤外線センサを用いて耐環境加速試験を行った。この時の素子は水硝子接合のシール幅が 0.32mm で 5×10^{-3} torr に真空封止された。加速試験の可否は電気特性と気密試験で行い、気密試験は高温フロリナート (FC-70、沸点 = 215°C) 加温発泡による漏れ観察で評価した。その結果、煮沸試験や PC テストでは水硝子の未反応基が水に溶ける等、水分に弱いことが判った。しかし、真空は破られても、接合が剥がれることはなかった (注：環境試験後の接合強度は平均で 5.59Kgf/素子 あった)。

〈4-3〉貫通配線の気密評価

本体基板の表裏方向へ貫通した配線で、信号を外部へ取り出す新しいパッケージレス構造 (セルフパッケージ型) を検討した。センサは真空環境で使用することが多いので、この表裏貫通配線には気密性を持たせた。

Si 基板に結晶異方性エッチングで貫通孔を設け、熱生成酸化膜で基板と絶縁し、その上にスパッタで金属 (Au/Pt/Ti) を成膜して配線する。この時の金属薄膜をダイヤフラムにして貫通孔を塞ぎ、気密構造 (写真 2) としている。貫通表面の開口部はコンタクトホールとして $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ あり、表裏から蒸着されたダイヤフラム部の金属厚みが $4.0 \mu\text{m}$ の時、表裏の圧力差 200KPa (約 2 気圧) に耐えた。気密性も真空リークチェック法で He の漏れ検出限界 ($10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) 以下であった。

〈4-4〉赤外線センサの評価

3 項の製作工程を終了したキャップ基板の裏面に水硝子を 3nm 厚に塗布し、本体基板を真空 ($5 \times 10^{-3} \text{torr}$) 封止した。その後、裏面の表裏貫通配線部の V 溝に半田を埋め込むた

図 4 架橋構造の破壊強度

図 5 水硝子塗布厚と気密特性

め、半田浴槽に Dip した。素子の電気的特性について可否判定を行った後、個々の赤外線センサ素子に分離して、特性評価をおこなった。

〈4-4-1〉CrSi₂ のショットキバリアダイオード (SBD)

複合誘電体架橋構造の中央部にある CrSi₂ の SBD 特性を、パラメータアナライザで測定した (図 6)。また、素子を恒温油槽中に浸漬し、逆方向 1 V にバイアスした時の電流を測定した。この値から SBD の抵抗値を計算しプロットしたのが図 7 で、それによると B 定数は 7700 ~ 8200K あった。一般に、サーミスタ Bolometer で得られる B 定数⁽⁴⁾は 3000 ~ 4000K なので、この新素子は非常に高感度で、かつ非常に高精度のセンサであることが判る。また、この B 定数はアニール温度で制御でき、SBD の理想因子 n は 1.042 ~ 1.049 の値で立派なダイオード特性を持つ素子であった。

〈4-4-2〉赤外線センサの特性

特性評価系の構成を図 8 に示す。アンプとしてはゲイン 100 倍のプリアンプを使用した。また、帯域を規定するためのフィルタは実効帯域幅が 100Hz になるよう設計、製作した。設定すべきパラメータは表 2 にまとめて示した。これらのパラメータを使用して、センサに入射するエネルギーは下記の様になる。

$$\text{黒体から放射されるエネルギー } W_B = \varepsilon \sigma T^4 \text{ (W/cm}^2\text{)}$$

写真 2 表裏貫通配線

図 6 SBD の電流-電圧特性

センサに向かうエネルギー $W_0 = \varepsilon \sigma T^4 - \varepsilon \sigma T_0^4$ (W/cm²)
 赤外線センサへの入射エネルギー $W = W_0 \cdot \pi r^2 / \pi D^2$ (W/cm²)
 σ はステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-12}$ W/cm²·K⁴)、 ε は放射率、 r は絞りの半径、 D は絞りと Bolometer 間の距離 (ただし $r^2/D^2 \ll 1$) を示す。

上記の W にセンサの検知部面積 A (cm²) をかけたものが、赤外線センサへの総入射エネルギーとなる。図 8 のノイズの測定系から得られた値を $N(V)$ 、センサ信号の測定系から得られた値を $S(V)$ とすると、等価雑音パワー (NEP) は次式で与えられる。

$$NEP = N/R \cdot \Delta f^{1/2} \text{ (W/Hz}^{1/2}\text{)}$$

ただし、 $R = S/W \cdot A$ (V/W) より求めた。 Δf は測定に使用したフィルタの帯域幅である。これらの素子測定のパラメータとデータ及び計算結果は表 2 にまとめた。

黒体温度 200 °C、チョッピング周波数を約 9.46Hz とした場合の応答特性を図 9 に示す。既存 Bolometer の応答特性が数 100msec なのに対して、4 msec と 2 桁も速い。

この他、非接触式温度計に使用できるかどうか調べるため、センサとパネルヒータ間の距離を 7.0cm に固定し、センサ周囲温度を一定にした状態で、パネルヒータを 30 °C から 70 °C まで変化させてセンサの出力電流を測定した (図 10)。センサ出力と対象物温度は良い直線関係を表している。また、センサの NETD (雑音等価温度差: Noise Equivalent Temperature Difference) ⁽⁴⁾ を次式によって求めた。

$$NETD = N \cdot \Delta T_p / \Delta V_i \text{ ----- (1)}$$

ここで、 N : ノイズ電圧、 ΔT_p : パネルヒータの温度変化、 ΔV_i : ΔT_p の変化に相当する出力電圧の変化である。センサ温度 24.5 °C におけるノイズ電圧 1.0mV を用いて計算すると、パネルヒータ温度変化が 200 ~ 204.5 °C の時、平

均で NETD は 0.02 °C であった。

5. 考察

〈5-1〉AR 膜の透過率と残留応力

検知部への入射光を多くするため、Si 製キャップに表裏両面から AR 膜を設けた (表 3)。これによりキャップ窓部の透過率は 52% から 93% へ改善できた。また、キャップ窓部の厚みが 100μm 増えても、透過率は約 1.0% 変化しただけだった。

キャップ基板での吸収率は約 1.2% で、蓄熱による赤外線二次放射 (ノイズ発生) の問題はない。また、対象物温度 T_{obj} を測る検知部 T_s と素子自身 (ヒートシンク) の温度を測る検知部 T_H との間は、シール部を設け完全に分離し、迷光によるノイズ発生を低くした。これらのノイズ対策効果は表 2 の NEP 値が、既存の素子値より 1 桁良くなっていることから確かめることが出来る。

AR 膜は、蒸着するときの温度 (約 300 °C) や本体基板に張り合わせるときのアニール温度等、後工程の条件を考慮に入れて、耐環境特性 [剥離試験、耐熱性 (300 ± 5 °C、100min)、煮沸試験 (120min)、耐薬品性 (RCA 洗浄、80 °C、30min)] にも合格した膜である。また膜の残留応力でキャップ基板に "そり" がでると、本体基板との貼り合わせが出来なくなったり気密性が損なわれたりするので応力制御も行った。

AR 膜の総膜厚を T 、単層膜厚を t 、単層膜応力を P とすると、応力比率 ($D = P \times a$) を用いて、AR 膜全体の残留応力 (S) は

$$S = D_1 + D_2 + \dots + D_n \text{ ----- (2)}$$

で与えられる。

ここで、 a は膜構成比率 (t/T)、添え字は膜層数を表す。

各単層膜の残留応力は、三球座法⁽⁸⁾と荷重-たわみ法⁽¹⁰⁾を用いて測定した。

表 3 の例では、AR 膜全体の残留応力は引っ張り応力 (22%)

図 7 SBD の熱特性

・ノイズの測定系

・センサ信号の測定系

図 8 赤外線マイクロセンサの評価系

図9 赤外線マイクロセンサの応答特性

を示し、表面を上にした時凹方向に反った。これは水硝子接合に理想の反り方向である。キャップ基板に付ける AR 膜は、表面は全面に、また裏面は部分的 (図 3) に形成されるので、最終的には反り量が僅かに増える方向となる。

4inch Wafer の場合、本体基板とキャップ基板の水硝子接合アニール後の反り量が 130 μ m 以下の時は、不良率は 10% 以下であり、反り量が 200 μ m 以上になると不良率は急激に悪くなって、65%を越えた。

キャップ基板の窓の部分が 100 μ m くらいでんでるので、水硝子を塗布する時くぼみに水硝子がたまり透過率が悪くなる。この傾向は AR 膜の最終上面が親水性の膜の時顕著に表れる。これを避けるため最終上面の膜は ZnS とした。この AR 膜を持つキャップに水硝子 0.1W% を 3.0nm の厚さに塗布したとき、赤外線 8 ~ 12 μ m 帯の透過率は約 3.0%下がって 90%となった。また ZnS を最終上面としたため表面屈折率は 2.3、熱伝導率や比熱等は表 1 に示す通りである。この値より AR 膜に蓄熱も少なく、二次放射によるノイズ発生原因にはならないことが判る。

〈5-2〉赤外線センサ素子のシミュレーション

一般に非接触式温度計では次の様に表される。

$$T_{obj} = T_H + \kappa (T_s - T_H) \quad \text{--- (3)}$$

表4 各種単層膜の残留応力

膜の種類		限界	圧縮応力						引っ張り応力						
単位= (10 ⁹ dyne/cm ²)		膜厚	-12	-10	-8	-6	-4	-2	+2	+4	+6	+8	+10	+12	+14
架橋構造用膜	薄膜サーミスタ	(μ)													
	熱生成 SiO ₂	0.8													
	Sputter SiO ₂														
	PECVD Si ₃ O ₄ H ₂	6.0													
	ATCVD SiO ₂	1.3													
	LPCVD Si ₃ N ₄	0.13													
	PECVD Si ₃ N ₄ H ₂	1.5													
FHD SiO ₂	80.0														
A R膜	インコネル膜														
	Sputter ZnS														
	Sputter Ge														
	Sputter MgF ₂														
	Sputter TiO ₂

図10 出力電流-黒体炉温度特性

ここで、 T_{obj} : 対象物温度、 T_H : ヒートシンク温度、 T_s : 検知部温度、 κ : センサの熱構造によって決定される値 ($\kappa > 1$) である。

この式では $\kappa = 1$ の時 $T_{obj} = T_s$ となり、接触式温度計の表現も含んでいる。しかし実際は、対象物温度 T_{obj} の方が検知部温度 T_s より高いはずである。即ち、 $\kappa > 1$ は明らかである。また (3) 式から、差温 ($T_s - T_H$) に誤差 Δ が含まれると、 T_{obj} は少なくとも Δ の κ 倍の誤差を含むことになる。

今回の赤外線センサの設計ではこの κ 値を小さくするために、 T_s と T_H を測定する 2 個の素子はできる限り接近して造り、構造も全く対称にした。また、それぞれの検知部は単結晶 Si 部に造り込み、特性のバラツキを抑えた。検知部の熱は架橋部を通してだけ放熱されるよう宙に浮かして真空封止し、架橋部の材質も誘電体膜とする等の対策をした結果、試作した素子の κ 値は 17 であった。

架橋構造を支えている両端の固定部分は Si 基板へ接続されており、Si 基板は素子全体のヒートシンク部になっている。表 1 に示した様に架橋材料である熱生成 SiO₂ の熱伝導率は Si のそれより 2 桁低いので、検知部の熱がヒートシンクである Si 基板へ逃げにくくなっている。即ち、式 (3) の差温 ($T_s - T_H$) が大きな値となる。

ただし、架橋部の強度やたわみ、反り等を考慮すると、SiO₂ だけでは圧縮応力のため架橋部にたわみが出来る。この対策として引っ張り応力を持つ Si₃N₄ 膜を中心に置き、その両側を熱生成 SiO₂ 膜でサンドイッチにする構造にした。この複合誘電体の架橋部全体の残留応力は、式 (2) で計算した。その結果 30% 以下の引っ張り応力になると、橋のたわみやそりは無くなり、歩留まりも向上することが判った。

一方、架橋部を配線する金属も Al より熱伝導率の悪い Ti にした。また Ti 膜も構造的に工夫して、配線幅は最小寸法の 6 μ m に、厚さも

50nm にするなど熱が逃げないよう気を配った。また、複合誘電体膜はその製法に依存する応力や熱膨張係数の違いで、膜にヒビが発生し、架橋構造として使用できなくなる。表4に複合誘電体膜それぞれの使用限界膜厚を示した。

設計時(3項本体基板参照)には、検知部に金黒を付けた方が感度や応答速度特性に有利であると考えた。しかし、実際に素子を製作して金黒の有無を比較すると、金黒なしの応答特性の方が3~4倍速いことが判った。これは金黒の厚さ制御が困難で、どうしても厚くなり、金黒が熱を吸収するのに時間がかかるためと思われる。筆者らは最終的に金黒蒸着を取りやめた。また、この素子の感度特性が優れているのは、検知部に入射した赤外線が底部にある架橋用誘電体膜で反射され、吸収効率が高められたことも一因と解釈している。

6. まとめ

複合誘電体膜を架橋構造にして、超小型のセルフパッケージ型 Bolometer を試作した。架橋部が複合誘電体膜のため、熱コンダクタンスを低くでき高感度の素子が得られた。また、マイクロマシン技術を使用し、小型化したため熱容量も小さく高速応答を実現できた。

これらの特性は今まであった Bolometer の低速応答・低感度というイメージを一新するとともに、マイクロロボット用センサや鼓膜体温計用センサ等への応用の可能性を示すものである。

謝辞

この論文をまとめるに当たり指導頂いた加藤技術顧問、議論に参加していただいた東北学院大学木村教授、実験を手伝ってくれた牧野氏におうところが多く深く感謝いたします。

また本資料の一部は工技院産技プロジェクトの一環として、NEDO から委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として、株式会社フジクラが実施したものである。(平成10年1月23日受付)

参考文献

- (1) P.M.Downey, A.D.Teffries, S.S.Meyer, R. Weiss, F.J.Bachner, J.P.Donnely, W.T.Lindley, R.W.Mountain and D.J.Silversmith. "Monolithic Silicon Bolometer" Applied Optics, Vol.23, No.6, 910(1984)
- (2) W.Lang and K.Kuhl. "A Thin-film Bolometer for Radiation Thermometry at Ambient Temperature" Sensors and Actuators, A21-A23, 473(1990)
- (3) M.Kimura, M.Yoshida and S.Nagasawa. "Schottky Barrier Thermistor" Technical Digest of the 11th Sensor Symposium, 107(1992)
- (4) 遠藤治之、布施武士、田中靖崇、岡田俊一、石田浩之、大森功、木村光照." 遷移金属酸化物を用いたマイクロエ

アブリッジ型非接触温度センサ" 電気学会研究会資料(物理センサ研究会)、PS-97-1~14、13(1997)

- (5) A.Satoh. "Application of Block Technology for the Self-Packaging" The Third International Micromachine Symposium, 163(1997)
- (6) W.P.Maozara, G.Goetz, A.Caviglia and J.B.Mckitterick. "Bonding of Silicon Wafer for Silicon-on-Insulator", J.Appl. Phys., Vol.64, No.10, 4943(1988)
- (7) 前島善文、小日向貢、川崎宏一." 赤外線用ゲルマニウム光学材料" 光技術コンタクト, Vol.28, No.9, 522(1990)
- (8) 日本工業規格 [JIS H0611 (昭和46年10月1日制定) シリコンウエハの厚さ、厚さムラ及び弓りの測定法 (Method of Measurement of Thickness, Taper and Bow for Silicon Wafers)], (財)日本規格協会
- (9) H.J.Quenzer, W.Benecke, and C.Dell. "Low Temperature Wafer Bonding for Micromachanical Application", MEMS'92 Travemunde (Germany), 49(1992)
- (10) (株)フジクラ"機能連結の研究" 平成5年度委託研究成果報告書、983(1995)

佐藤 倬暢

(正員) 1965年3月東京電機大学工学部卒業。CMOSプロセスの開発、電卓用集積回路の設計・製造。ASIC工場建設。医療用センサの開発、物理センサの開発及びマイクロマシン開発に従事。

鈴木 孝直

(非会員) 1986年3月東京農工大学工学部卒業。1990年4月藤倉電線(株)(現(株)フジクラ)入社。半導体圧力センサ、半導体加速度センサ、マイクロマシンの開発に従事。現在に至る。

橋本 広和

(非会員) 1974年3月早稲田大学理工学部卒業。藤倉電線(株)(現(株)フジクラ)入社。光ファイバの開発、半導体圧力センサ、半導体レーザ、マイクロマシンの開発に従事。現在米国 Fujikura Technology America Corp.に勤務。