半導体センサの金属接合†

藍 光 郎*・土 屋 正 利**・保 川 彰 夫***

Metal Bonding of Semiconductor Sensors

Mitsuo Ar*, Masatoshi TSUCHIYA** and Akio YASUKAWA***

Semi-conductor sensors require such conditions as high bonding strength, stability at repeated stresses and electrical insulation on their bonding parts. But several defects are found in solder materials now generally used, resins, low melting point glasses and gold-silicon eutectic alloys respectively.

This paper presents the investigations concerning the gold-copper-germanium ternary eutectic alloys as solder materials of semiconductor sensors. The alloys have high bonding strength by forming super lattice of gold-copper alloys in the ternary eutectic alloys.

At first, theoretical stress analysis is carried out on the bonding parts with certain assumptions, and the following results are clarified for decreasing the zero point shift and hysteresis of sensors; (1) The materials with high shearing yield strength have to be used. (2) The thickness of solder layers has to be thinned.

After that, the experiments are performed on gold-copper-germanium ternary eutectic alloys. From these experiments, it is found that the tensile strength of ternary alloys increases by forming super lattice of gold-copper alloys in the ternary alloys and reaches 1 GPa when copper contents are 19 wt%.

The liquidus temperatures of the gold-(17-19) wt% copper-(12-15) wt% germanium ternary eutectic alloys, approximately 700 K, are as same as the heat-treatment temperature of cantilevers made of iron-nickel-cobalt alloys, and the performance of semi-conductor sensors containing cantilever will surely be maintained

in the most favorable condition.

Zero point shifts of the sensors are within $\pm 0.1\%$ after 10^7 cycles when repeated stresses of 1.5 times of full scale are applied.

Keyword: sensor, semiconductor, bonding, eutectic alloy

1. はじめに

半導体と半導体、ガラス、セラミックや金属の接合には、従来から、エポキシ樹脂などの有機接着、低融点ガラス接着や金・シリコン共晶接着などが用いられている。しかし、半導体センサの接合部は、(1)接合強度が大きいこと、(2)繰返しひずみが加わってもクリープしないこと、(3)センサはほかの部分と電氣的に絶縁されていること、などが要求される。これに対し、有機接着剤は繰返しひずみの印加により接合部がクリープしやすくなり、しかも高温で使用できない。ガラスは遠心沈降法などでガラス微粒を均一に半導体に積らせ溶融接合させるが、粒子の粒度が均一でなく全面一様に溶融させることが非常に困難である。また、金・シリコン共晶接合は共晶反応が全面で一様でないため、接合が均一にならず、また共晶がシリコンベレット中に部分的に喰い込むため、残留熱応力が偏在し接合強度を低下させる。さらに本法では電氣的絶縁がとれない。このように、従来の接合法は、それぞれ、いくつかの欠点を有し実用上問題がある。

そこで、今回、接合材として金・銅・ゲルマニウムの3元共晶合金を用い、金・銅合金の規則格子化を計ることにより、高い接合強度を得たので報告する。

2. 接合層の応力解析

接合層は外力を忠実に半導体センサに伝達すると共に、外力や熱ひずみなどで降伏したり、クリープしたりしないことが重要である。したがって接合層の構造や強度が半導体センサの特性に大きな影響を与える。そこで、まず、接合層の降伏を考慮した接合部の応力

† 第18回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭54・8)

* (株)日立製作所那珂工場 勝田市市毛 882

** (株)日立製作所日立研究所 日立市久慈町 4026

*** (株)日立製作所機械研究所 土浦市神立町 502

* Naka Works Hitachi Ltd., Katsuta

** Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi

*** Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tsuchiura

(Received August 8, 1980)

(Revised December 2, 1981)

Fig. 1 Calculation model of Si strain gage pellet, solder and canti-lever

Fig. 2 Relation between stress and strain of solder

解析を下記の仮定を与えて行い、接合部の各種パラメータが半導体センサのヒステリシスおよび零点シフトに及ぼす影響を求めた。

(1) 半導体センサはシリコンストレインゲージとし、Fig. 1 のようにカンチレバーの表面ひずみを測

るものとする。

(2) カンチレバーの剛性はシリコンストレインゲージペレット（以下、ペレットと略す）の剛性に比べ、非常に大きい。

(3) ペレットの厚さ方向のひずみ分布に及ぼすカンチレバー曲率の影響は無視できる。

(4) 接合材の応力ひずみ挙動は Fig. 2 のようになる。

(5) 接合材のせん断降伏応力に及ぼす引張りひずみの影響は小さい。

ペレットのひずみは、ペレット接合時点からの温度履歴と、カンチレバーのひずみ履歴に依存する。ここでは、まず接合後の温度低下があり、つぎにカンチレバーのひずみ履歴が加わる場合について検討する。カンチレバーのひずみ履歴としてはフルスケールのひずみと 1.5 倍の過負荷ひずみの両方を考慮した。温度とひずみの履歴を加えた計算結果を、カンチレバーのひずみに対するペレットの平均ひずみの関係として整理すると、概略、Fig. 3 のようになる。すなわち、まず、接合後の冷却により、ペレットには圧縮ひずみが加わっており、図の A の点にある。つぎに、負と正の過負荷をフルスケールの 1.5 倍与えると、B→C→D→G→H のループに安定化する。一方、フルスケールのひずみを印加すると、E→F→G のループを描く。

零点シフトとヒステリシスを図中の ϵ_{FS} , $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$ を用いて

$$\text{零点シフト: } E_2 = \Delta\epsilon_1 / \epsilon_{FS} \quad (1)$$

Fig. 3 Schematic illustration of relation between strain produced on pellet (ϵ_G) and strain applied to cantilever (ϵ_B).

$$\text{ヒステリシス: } E_H = \Delta\epsilon_2 / \epsilon_{FS} \quad (2)$$

と定義し、構成材の各条件をある値に固定して、種々のケースについて計算した。ここで、零点シフトは差圧伝送器を例にとると片側耐圧特性に、 ϵ_{FS} は差圧レンジに相当する。

今、Fig. 1 において、小さな Δx に対して、つぎの関係が成立する²⁾。

$$u_B(x, t) = u_B(x - \Delta x, t) + \{\epsilon_B(x - \Delta x, t) + \alpha_B \Delta T\} \Delta x \quad (3)$$

$$u_P(x, t) = u_P(x - \Delta x, t) + \{\epsilon_P(x - \Delta x, t) + \alpha_P \Delta T\} \Delta x \quad (4)$$

$$\gamma(x, t) = \{u_B(x, t) - u_P(x, t)\} / h \quad (5)$$

$$\tau^* = \tau(x, t - \Delta t) + G \{\gamma(x, t) - \gamma(x, t - \Delta t)\} \quad (6)$$

$$\tau(x, t) = \begin{cases} -\tau_Y (\tau^* < -\tau_Y) \\ \tau^* & (-\tau_Y < \tau^* < \tau_Y) \\ \tau_Y & (\tau_Y < \tau^*) \end{cases} \quad (7)$$

$$\epsilon_P(x, t) = \epsilon_P(x - \Delta x, t) - \frac{k}{E_P \cdot t_P} \frac{\tau(x - \Delta x, t) + \tau(x, t)}{2} \Delta x \quad (8)$$

ここで $u_B(x, t)$ は、時間 t 、位置 x におけるカンチレバーの変位を u_B 表わし、同様に u_P : ペレットの変位、 τ : 接合材のせん断応力、 ϵ_P : ペレットのひずみ、 ϵ_B : カンチレバーのひずみ、 α_B : カンチレバーの線膨張係数、 α_P : ペレットの線膨張係数、 E_P : ペレットのヤング率、 t_P : ペレットの厚さ、 τ_Y : 接合材のせん断降伏応力、 γ : 接合材のせん断ひずみ、 h : 接合材の接合層厚さ、 k : 接合材の付着面積率、 ΔT : 温度変化、である。(8)式の右辺第2項はカンチレバーへの変位印加前後に接合材に発生している平均応力がペレットに伝わって発生するひずみであり、接合材の付着面積率に影響される。また、 $t - \Delta t$ の時点の既知の状態 ($\gamma_{t-\Delta t}$, $\tau_{t-\Delta t}$) に対して、 t の時点で γ_t を与えると τ_t が(6)式によって求められ、(γ_t , τ_t) が知られる

Fig. 4 Relation between shearing yield strength of solder and zero point shift

Fig. 5 Effect of solder layer thickness on zero point shift

ようになる。したがって、これらの式を用い、初期条件、境界条件を入れて計算を繰返すことにより、ペレットに生じるひずみを順次計算できる。接合材のせん断降伏応力および接合層厚さと零点シフトとの関係の計算結果を Fig. 4. 5 に示す。ヒステリシスは 10^{-9} のオーダーで計算誤差以下であり無視できる。図より、零点シフトを小さくするためには、つぎのことが有効であることがわかる。すなわち、要求精度により、その値は異なるが、一般的には、

- (1) せん断降伏応力の高い接合材を用いる。
- (2) 接合層厚さを小さくする。

Fig. 4, 5 の例で零点シフトを 0.1% 以下に押える場合には十分条件として、せん断降伏応力 140 MPa 以上、接合層厚さ $8\mu\text{m}$ 以下となる。

Fig. 6 Phase diagram of Au-Ge alloy system

3. 接合層の組成

半導体の接合材としては、有機接着剤、ガラスや共晶合金があるが、前述のように、それぞれ欠点を有している。半導体センサに用いる場合の応力解析結果からみても、有機接着剤はせん断降伏応力が（金属に比して 1～2 桁）低い。ガラスは接合層厚さを小さくできず、付着面積率も作業条件により大きく変る可能性がある。金・シリコン共晶合金で共晶に必要なシリコンをペレットから供給する場合には、共晶反応が早く起きた部分で金を多く消費し、他の部分では反応が起らず付着面積率が低くなる。また、全面で反応を起させるために、トランジスタや IC などの分野で一般に行われている、ペレットを振動させながら加熱する方法ではペレットの位置決めが困難で、さらにこの方法では作業条件により接合層厚さが不均一になりやすく、また電気的な絶縁は別的手段を考慮せねばならない。拡散形半導体ストレインゲージの場合には、拡散抵抗とペレットの pn 接合に逆方向の電圧を印加し、接合耐圧を利用することにより絶縁を得る方法もあるが、一般には耐圧が低く、工業用としては不十分である^{3), 4)}。

そこで、今回は、共晶合金を接合材として選び、材料として金・ゲルマニウム（共晶温度 629K）を採用した。一般に接合材として用いられる共晶合金には、この他にも金・シリコン（同 643K）や金・すず（同約 550K）などがあるが、後述のように銅を添加することにより共晶温度が上昇する。鉄・ニッケル・コバルト合金製のカンチレバーを用いる場合には、接合温度が 700K を越えないことが望ましい⁵⁾。また、許さ

れる範囲で接合温度の高いほうが接合後の常温付近(393K 以下)の安定性が期待される。この意味で金・ゲルマニウムが最も適しており、以後の研究は同合金のみについて進めた。Fig. 6 に金・ゲルマニウム合金の状態図を示す⁶⁾。

また、電気的な絶縁方法として、ペレットの接合側に二酸化シリコン膜を形成する構造とした。絶縁耐圧は二酸化シリコン膜厚を大きくすることにより、工業的に十分満足するものが得られる。

4. 金・銅・ゲルマニウム3元共晶合金

接合材中で、銅およびゲルマニウムの量が強度に及ぼす影響を3元共晶合金単体で調べた。いずれの試料も金、銅およびゲルマニウムの純金属を配合し、アルミナ質のつばを用いてアルゴン雰囲気中で各2g 溶製した。各試料の共晶および溶融温度は熱分析により求めた。規則格子化の熱処理はシリコンオイル中で行った。組織は研磨後、王水でエッチングした試料について光学顕微鏡で観察した。金・銅合金の規則格子化による強度の変化はマイクロビッカース硬度計(300g)で硬さを測定し、換算推定した。また、ビッカース硬度とせん断降伏応力の間には一定の関係($H_v = 0.4 \sim 0.5 \tau$ MPa)⁷⁾があるので、実験値はビッカース硬さと強度を用いた。

Fig. 7 に金・銅系合金の状態図を示す⁶⁾。本合金は置換形の全率固溶合金であり、組成が1対1のCuAuでは683K 以下で、3対1のCu₃Auは663K 以下で規則格子化する。また上記に近い組成でも規則格子が存在する⁸⁾。したがって、銅が24 wt% (50 at%)

Fig. 7 Phase diagram of Au-Cu alloy system

と50 wt% (75 at%) およびその近傍の組成を溶解後、ラムダ点以下の近い温度に30 min 以上保持することにより規則格子化合金が得られる。実験の組成としては、銅を12~25 wt%, ゲルマニウムを10~16 wt%, 選び、Fig. 8~10 に示す組合せ条件で測定した。

Fig. 8 に金・銅合金および金・銅・ゲルマニウム共晶合金の規則格子化による硬さの変化を示す。金・銅合金は973K, 30 min, 加熱後水冷し不規則状態のものである。また、金・銅・ゲルマニウム共晶合金は溶解後ろつば冷却し、これを473K, 2h 再加熱し規則格子化を行った。金・銅合金および金・ゲルマニウム共晶合金よりも金・銅・ゲルマニウムと3元共晶合金化することにより、硬さが上昇することがわかる。また金・銅合金および金・銅・ゲルマニウム合金とも、銅量が15 wt% 以下では時効処理による硬化は少ないが、銅量をふやすに従って規則格子化が顕著に進み、銅量が19 wt% で硬さが $H_v = 320$ にも達する。これは抗張力に換算すると1 GPa 以上に相当し、カンチレバーの抗張力⁵⁾に匹敵し、接合層の強度としては十分な値である。金・銅合金では、銅量が25 wt% で予測通り最も高くなる傾向を示している。

Photo. 1 に金・12 wt% ゲルマニウム共晶合金および金・19 wt% 銅・12 wt% ゲルマニウム共晶合金の組織写真を示す。金・銅・ゲルマニウム共晶合金はろつば冷却しているため、金・銅合金の初晶(白い部分)が粗大化しているが、カンチレバー接合時には冷却速度も早いので、組織はもっと微細化されると推定される。しかし、Fig. 8 でわかるように、実用的には十分

Fig. 9 Change in hardness measured at room temperature on Au-Cu and Au-Cu-12wt%Ge alloys after isochronal aging, in which the temperature interval and the time were taken as 25K and as 30min respectively

Photo. 1 Micro-structures of Au-12wt%Ge and Au-19wt%Cu-12wt%Ge alloys ($\times 400$)

Fig. 8 Effect of heat-treatment on hardness of Au-Cu and Au-Cu-12wt%Ge alloys

な強度を有している。

つぎに、Fig. 9 に加温時間を一定にし、温度のみ変えた等時効による硬さの変化を示す。銅およびゲルマニウムの組成が変わっても、約 470 K で規則格子化が最も進んでいると見られる。

Fig. 10 は金・(13~19)wt% 銅・(10~16)wt% ゲルマニウム共晶合金の熱分析から求めた共晶線と液相線図である。図からわかるように、銅量が増すに従い共晶線および液相線は上昇する。また銅量にかかわ

Fig. 10 Effect of Ge contents on eutectic and liquidus temperatures of Au-Cu-Ge ternary alloys

ずゲルマニウム 12~15 wt% で溶融温度は最も低く、銅量が 13 wt% で 673 K, 19 wt% で 703 K となり、金・ゲルマニウムの共晶温度 629 K より上昇している。しかし最高でも約 700 K であり、カンチレバー側からの希望条件を満足している。

5. 接合層の組織および強度

これまでに得られた結果をもとにして、鉄・ニッケル・コバルト合金製カンチレバー⁵⁾にペレットを接合した。Fig. 11 にカンチレバーの構造と接合層の構造を示す。ペレット側には、まず、絶縁のための二酸化シリコン膜をスパッタし、二酸化シリコンと結合力の強いクロームを蒸着する。この上にクロームおよび金と親和力の強い銅を蒸着後、金・12wt% ゲルマニウム共晶合金を蒸着する。銅は金・銅合金の規則格子化により接合層強度をあげると共に、クロームとの親和加によりペレットとの結合を強める役割を兼ねている。

一方、カンチレバー側は金・ゲルマニウムがぬれやすくなるよう、表面に金をメッキし、シンタリングする。このように処理したペレットとカンチレバーを 700 K 30 min 加温接合し、その後、473 K, 2 h の時効硬化処理を行った。接合層厚さは、作業条件による厚さバラツキに対する余裕度、およびカンチレバーやペレットの表面状態による付着面積率 $k=1$ の確保を考慮し、最終的に $h=3\mu\text{m}$ とした。

Photo. 2 に接合後の接合層断面の走査形電子顕微

Fig. 11 Schematic illustrations of canti-lever and metal solder layers before bonding

Photo. 2 Line analysis of solder layer after bonding by SEM ($\times 1000$)

Fig. 12 Stability of zero point

鏡によるライン分析写真を示す。接合部は金・銅・ゲルマニウムの均一な 3 元合金になっている。ゲルマニ

ウムがカンチレバー側に偏析しているが、主に、Ni₃Ge の金属間化合物⁶⁾と推定され、強度的には問題ない。

接合後、カンチレバーに過大撓みを与えたときの破壊強度は、すべて 3000 マイクロストレイン以上で、フルスケールひずみの 4 倍以上あった。この破壊モードはすべてペレット割れであり、本接合層の接合力が実用上、十分高いことを示した。

Fig. 12 は本半導体センサにフルスケールの 1.5 倍のひずみを繰返し印加したときの零点の安定性を示す。10⁷ 回印加後も零点シフトは $\pm 0.1\%$ 以下であり、安定した特性が得られている。

6. おわりに

以上、半導体センサの接合材として、金・銅・ゲルマニウムの 3 元共晶合金を採用し、金・銅合金の規則格子化を利用することによって、接合層の高強度化が実現し、クリープやヒステリシスのない安定な半導体センサを得た。本接合法はシリコンと金属のみならず、他の半導体、ガラスやセラミックなどに広く応用できるものである。

最後に、本研究に対し、終始、御指導いただいた(株)日立製作所日立研究所主管研究員 添野 浩博士に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 白水：半導体圧力センサ，応用物理，45-12，1159/1164 (1976)
- 2) 保川，他：異種材料の半田接合部の熱疲労寿命予測，日本機械学会講演論文集，760-2，121/124 (1976)
- 3) ウェンデル・モーガン・ラフキー：半導体型歪み測定器，特許第 442789 号 (1965)
- 4) 柳井，後川：集積回路工学，180/181，コロナ社 (1976)
- 5) 藍，他：計測用低膨脹率合金，計測自動制御学会論文集 17-2，109/113 (1981)
- 6) 長崎：変態図および状態図集，金属データブック (日本金属学会編)，409, 410, 452, 丸善 (1974)
- 7) R. Hill：塑性学，256，培風館 (1954)
- 8) 宮原：金属結晶の物理，190/194，アグネ (1974)