

半導体素子 Al 電極への高速 Au 線熱圧着*

岩田 誠一** 石坂 彰利** 山本 博司**

Seiichi Iwata, Akitoshi Ishizaka and Hiroshi Yamamoto : High-speed Thermo-compression Bonding of Au Wires to Al Electrodes on Semiconductor Devices.

In the realization of high-speed and highly reliable thermo-compression bonding of Au wire to Al electrodes, the two most important factors were found to be the deformation of Au wire, which breaks the oxide film on Al, and the surface cleanliness of Al. Furthermore, it was found that the bond time (the time during which a load is applied to the bond) could be shortened to about 20 ms (formerly about 200 ms).

The amount of deformation or strain of Au wire was measured, and compared with the bond breaking force. The latter quantity was newly introduced in this study to facilitate the evaluation of bond integrity, and was found to be directly related to the bond failure rate. The bond breaking force was found to increase with the strain, provided the surface cleanliness and the bond time were constant. At the same strain and the bond time, the Al oxide film thickness and the amount of surface contamination were the factors influencing the bond breaking force.

The bond time was found to be determined by the sum of the time required for the plastic deformation of Au and Al and that for the reaction of Au and Al, the former being much greater than the latter. In this study, by increasing the strain rate of Au by applying higher load, the bond time as short as 20 ms was realized.

(Received April 16, 1977)

I. 緒 言

IC や LSI (大規模集積回路) の Al 電極と外部端子との接続には Au 線熱圧着という方法がとられることが多く、これは半導体素子の製作において非常に重要な工程である。LSI では、Photo.1 からわかるように、接続の数が多いため、失敗のない、確実な接続が要求される。それと同時に、最近では、この接続を行なう機械の自動化⁽¹⁾が進み、信頼性だけでなく、接続の高速化も必要となってきた。

このような状況のもとで、本研究は上記接続の高速、高信頼化を計るために行なった。接続は Au 線と半導体素子

上の Al 電極との接合、および Au 線と外部端子との接合の 2 つからなっている。今回の検討では後者の問題はほとんどなかったため、前者の Au と Al の接合について述べる。この熱圧着と呼ばれる接合は、直径数十 μm の Au 細線を、温度約 300°C で、約 $100\mu\text{m}$ 角、厚さ約 $1\mu\text{m}$ の Al 蒸着膜電極に押付けて接合させるものである。接合部が微小であるために、接合状態の観察や接合性の評価が困難であったので、本研究は接合界面の観察⁽²⁾から始まり、つぎに、接合強度の測定法を確立し、この手法を用いて、接合を確実に、速く行なうための必要条件を求めた。

II. 実験方法

1. 試 料

Au 線は純度 99.99% の直径 $38\pm 2\mu\text{m}$ のものを、接合の相手の Al としては、純度 99.99% の Al を蒸発源とし、真空度 2.6 mPa 以下、蒸着速度 $23\pm 2\text{ nm/s}$ で蒸着した厚さ $1.2\pm 0.2\mu\text{m}$ の薄膜 (厚さ 0.25 mm の熱酸化した Si 上) を用いた。なお、Al はこの後 HF (50%) と NH_4F (40.2%) を 1:6 の割合で混合した液に約 30 s 浸漬後、15 min 水洗したものであった。

2. 熱 圧 着

接合には日立製自動熱圧着機 (CABS) を用いた。Fig.1 に示すように、接合荷重 $0.2\sim 2.0\text{ N}$ 、接合時間 (Au が Al に押付けられている時間) $10\sim 200\text{ ms}$ で、温度 $300\pm 5^\circ\text{C}$

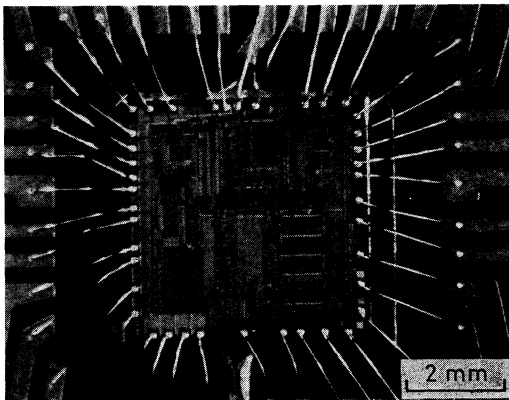


Photo.1 LSI with 40 completed wire bonds.

** 株式会社日立製作所中央研究所 (Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Kokubunji)

* 1974 年 4 月日本金属学会習志野大会および同年 11 月東大阪大会、1975 年 4 月東京大会および同年 10 月札幌大会に一部発表

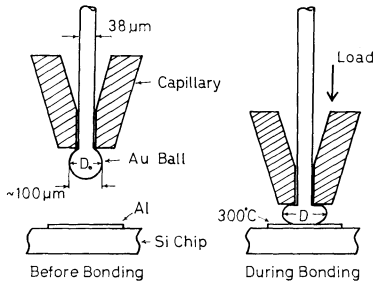


Fig.1 Thermo-compression bonding of Au wire to Al electrode.

の条件で接合した。Au 線の先端が丸いのは、線を酸水素炎で溶融切断するときに行けるため、これをここでは Au 球と呼ぶことにする。

3. 試験方法

従来、接合性の評価には、Fig. 2 に示すように、接続ずみの Au 線を上に引張り、破断に要する力を測定していたが、これでは Au 線が破断する場合がほとんどで、接合の強さが測定できる確率は小さかった。そこで、接合の強さを測定するためにつぎのような方法を考案した。すなわち、市販のテンションゲージ (CORREX, Haag-Streit A.G., 最大荷重約 1.5 N) に先端直径 10 μm の WC (炭化タングステン) 針を取付け、この針の先端で顕微鏡の下で Au 球を静かに横から押し、接合の破断に要した力を求めた。この力を接合破断力 F と定義し、これを用いて接合性を評価した。

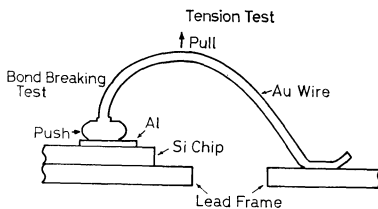


Fig.2 Methods of testing bond strength.

熱圧着では、別報⁽²⁾で詳細を述べるが、Au と Al の塑性変形が Al の酸化被膜を破壊するのに不可欠であるので、ここではその尺度として、つぎのように定義した、Au 球のひずみ ϵ を測定した。

$$\epsilon = 2 \ln \frac{D}{D_0} \quad (1)$$

ここで、 D_0 と D は接合前後における Au 球の直径である (Fig.1 参照)。さらに、上記破断試験後、破断面の観察を行ない、接合によりこの部分に生じた Au-Al 金属間化合物の面積をも測定した。これには化合物の縦横の直径を測定し、化合物がそれらの直径の平均値の直径の円形をしていると仮定して、面積を求めた (Photo.2 参照)。

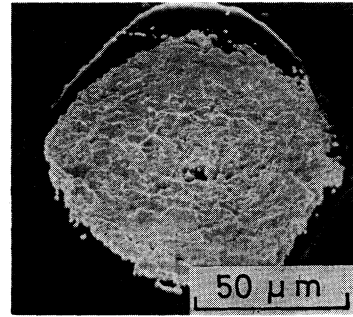


Photo.2 Au-Al Intermetallic compounds formed by thermo-compression wire bonding.

4. Al 表面状態および接合界面の検査

検査には ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) と AES (Auger Electron Spectroscopy) を用いた。ESCA は日立製 E-507 型で、X 線には Al K_{α} を使い、真空度 0.1 mPa で約 1 cm² の面積の試料で測定した。AES も日立製の走査型のもので、これは加速電圧 9 kV、電子線径 2 μm、真空度 1.3 μPa で測定した。なお、接合界面の検査には、接合部のななめ断面研磨により断面を拡大して露出させて、AES で検査した。

III. 結果とその検討

1. 用いた試験法の妥当性

LSI 上の接合の数が多いために、実用上、圧着不良率 (顕微鏡ではがれていると認められた接合数を全接合数で除した値) を 10^{-5} 台かそれ以下にする必要がある。したがって、このように低い不良率の確認にはぼう大な数の接合を行なわねばならない。そこで、本研究では、まず、接合破断力 F から圧着不良率を予測できるかどうかを調べた。同条件の接合の F の分布は正規分布になることを確認し、つぎに、接合破断力の平均値 \bar{F} と圧着不良率との関係を探ると、これも、正規確率紙に図示すると、Fig. 3 に示すように、ほぼ直線関係になることがわかった。なお、本図で各点の \bar{F} は 40 個のデータの平均値を示し、各々の標準

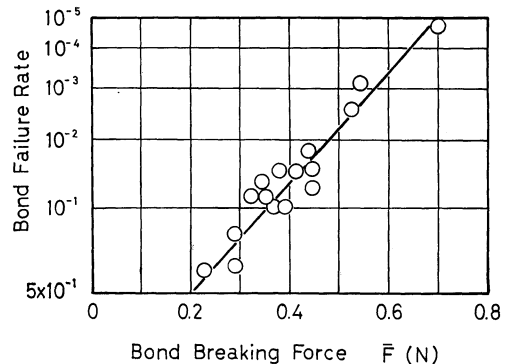


Fig.3 Relationship between bond breaking force and bond failure rate.

偏差は 0.07~0.15 N で、 \bar{F} 依存性は認められず、平均 0.12 N であった。したがって、ある値以下になると熱圧着不良になるような F の値を F_m とすると、不良率 P に対応する \bar{F} の値 \bar{F}_p は

$$\bar{F}_p = F_m + n_p \sigma \quad (2)$$

と書ける。ここで、 σ は標準偏差で、 n_p は P に対応して正規分布の確率密度から求められる値で、たとえば、 $P=1 \times 10^{-4}$ であれば、 $n_p=3.7$ である。Fig.3 から $\sigma=0.12$ N として F_m を求めると、 $F_m=0.20$ N となった。したがって、たとえば、 1×10^5 個の接合の中から 40 個の接合を無作為に抽出し、平均値 \bar{F} を求めて、その値が 0.64 N 以上あれば、不良接合数は 1×10^5 個中 10 個以下になると予想される。

本検討により \bar{F} と不良率との相関が明らかになったので、以後接合性の評価に \bar{F} を用いることにする。

2. Au 球のひずみと接合性との関係

Fig.4 には、接合時の荷重あるいは接合時間を変えて求めた、Au 球のひずみ $\bar{\epsilon}$ と接合破断力 \bar{F} との関係を示す。ここで、 $\bar{\epsilon}$ 、 \bar{F} とともに 40 個のデータの平均値である。 $\bar{\epsilon}$ と \bar{F} の相関はかなり良いが、つぎの 2 点において注意を要する。

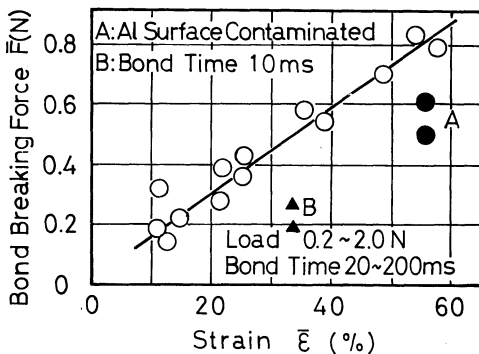


Fig.4 Au ball strain dependence of bond breaking force.

(1) Al 表面に異常があると \bar{F} は低下する (Fig.4 の点 A)。

(2) 接合時間が極度に短く (~10 ms) ても、 \bar{F} は低下する (Fig.4 の点 B)。

Fig.4 からわかるように \bar{F} は $\bar{\epsilon}$ だけの関数ではないので、 \bar{F} との相関性をもっとよい量求めて、つぎに、Photo.2 に示すような破断部の Au-Al 金属間化合物の面積と \bar{F} との相関を調べた。Fig.5 は化合物径の平均値 \bar{D} と \bar{F} との関係を示す。対数目盛で両者の関係を示す直線のこう配を最小自乗法を使って求めると、それは 2.0 になり、

$$\bar{F} = \tau \left(\frac{\pi}{4} \bar{D}^{2.0} \right) = \tau \bar{A} \quad (3)$$

と書ける。ここで、 τ は単位化合物面積あたりの接合破断

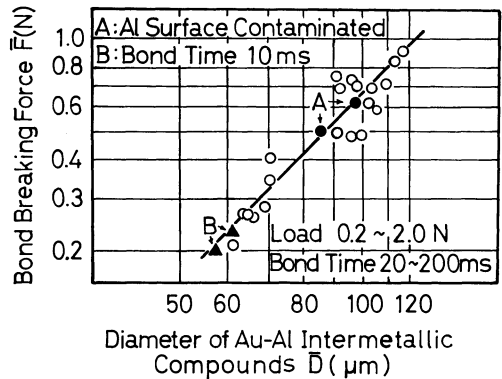


Fig.5 Dependence of bond breaking force on Au-Al intermetallic compound diameter.

に要する力で 87 MPa となり、 \bar{A} は化合物面積である。本図から、Al 表面状態が変わっても、接合時間が短くても、 \bar{A} と \bar{F} との関係は同じであると考えられる。しかし、破断部が金属間化合物内であることを考えると、87 MPa という τ の値は低すぎる。このようになるのは、つぎの 2 つの理由によると思われる。

(1) 金属間化合物はもろく、不均一に形成されているために、応力集中によりみかけ低い応力で破断する。

(2) 別報²⁾で詳細を述べるが、Al 酸化被膜の破壊により Au と Al の新生面が接触できる面積は全接触面積のごく一部であるので、真の接合面積はみかけのもの (上記 \bar{A}) より小さい。

3. 接合性への Al 表面状態の影響

同じ条件で接合した 2 つの異なる蒸着ロットの約 1 cm^2 の Al 蒸着膜の表面を ESCA で検査し、熱圧着を行なうと、Table 1 に示すような結果が得られた。ESCA の測定では酸化した Al と金属状態の Al とを区別でき、表面から数 nm の深さまでの分析ができるので、これらのピーク高さの比 $I_{\text{Al}}/I_{\text{Al-O}}$ は Al の酸化状態 (酸化被膜の厚さ) の尺度となる。ここでは、 $I_{\text{Al}}/I_{\text{Al-O}}$ が小さく (被膜が厚い)、表面にふっ素が多く検出される試料の方が接合破断力 \bar{F} が小さいことがわかった。このようになった原因は $\text{HF} + \text{NH}_4\text{F}$ 処理後の水洗条件のばらつきにあると考えられる。

Table 1 Dependence of bond breaking force on Al surface cleanliness (by ESCA).

Sample lot	$I_{\text{Al}}/I_{\text{Al-O}}^*$	I_{F}^*	Bond breaking force \bar{F} (N)**
1	0.5	1	0.68 ± 0.11
2	0.3	3	0.55 ± 0.13

* I_{Al} , $I_{\text{Al-O}}$, and I_{F} are the electron intensities of metallic Al (2p), oxidized Al (2p), and F (fluorine) (1s), respectively, in an arbitrary scale, as measured by ESCA.

** \bar{F} is the average of breaking forces of 80 bonds, and the error shown is the standard deviation.

以上の結果は Al 表面の平均的な表面状態と \bar{F} との関係であるが、実際には Al の局所的な表面状態の違いにより同じ蒸着膜上でも場所により接合破断力 F は異なる。

Table 2 には同じ試料上の異なる 2 点における表面状態と F との関係を示す。この試料では AES により S (硫黄) が検出され、S と Al のピーク強度 (Peak-to-Peak Height) 比 I_S/I_{Al} の違いにより F が変わった。この試料では接合前に Si を薄くする必要が生じ、そのために Al 表面にエレクトロノワックス (S を含む) を塗布し、裏面の Si を食刻した後のワックス除去が不完全であったので、S が検出されたと思われる。

Table 2 Surface cleanliness and bond breaking force on two different bonding sites (Al) on the same LSI chip (by scanning AES).

Bonding site*	I_S/I_{Al} **	Bond breaking force F (N)
X	0.01	0.60
Y	0.1	0

* The sites X and Y are only 2 mm apart on the same LSI chip.

** I_S and I_{Al} are the peak-to-peak heights for S (sulfur) and Al as measured by AES.

4. 接合の高速化

以上の結果により接合性に諸因子がどのような影響を与えるかが明らかになったので、ここではどのようにしたら接合の高速化が可能であるかを検討する。

本研究が始まるまでは接合時間は 200 ms 程度であったが、この時間をどこまで短くできるかを検討した。Fig. 6 には接合時間 t と Au 球のひずみ $\bar{\epsilon}$ との関係を示す。これらの図から、 t が短くなるとともに $\bar{\epsilon}$ が小さくなり、それに伴い \bar{F} も低下することがわかる。このことから、接合時間の短縮により \bar{F} が低下するのは、Au 球がじゅうぶん変形できないうちに荷重が除去されてしまうためであることがわかる。し

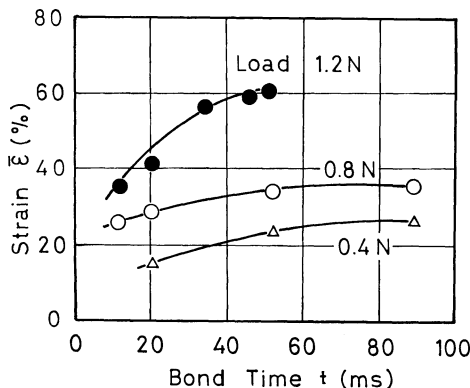


Fig. 6 Time dependence of Au ball strain.

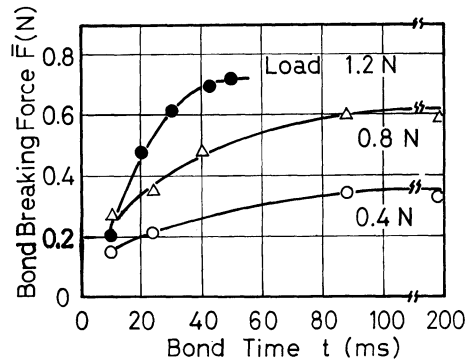


Fig. 7 Time dependence of bond breaking force.

たがって、接合の高速化には Au 球の変形速度を大きくする必要があり、ここでは荷重を従来の 0.8 N から 1.8 N まで増加し、ひずみ速度を 30 s^{-1} 程度にすることにより t を 20 ms まで短縮しても $\bar{F}=0.66 \text{ N}$ (σ は 0.11 N) という良好な接合を得た。ところが、 t を 10 ms にすると良好な接合は得られなかった。すなわち、荷重を 2 N まで上げたら Au 球が変形して $\bar{\epsilon}=34\%$ になり、Fig. 4 によると 0.5~0.6 N の \bar{F} が得られるはずであるのに、 $t=10 \text{ ms}$ では \bar{F} は 0.33 N であった。破断部を観察すると、Au-Al 金属間化合物がじゅうぶん生成していないことがわかった。このことは、Au と Al が変形により接触しても両者の反応する時間が不足すると良好な接合が得られないことを意味し、このことから、反応に必要な時間は 10 ms 程度であると推定した。

5. Au と Al の反応速度

これまで、接合破断力は Au-Al 金属間化合物の面積により決まること、および接合時間を極端に短くすると Au と Al の反応する時間が不足してくることを示した。したがって、ここでは、どのような金属間化合物がどのくらいの速度で接合界面に生成するかを検討する。

これまでこのような検討⁽³⁾⁽⁴⁾はなされていないが、大きい試料を用いた模型実験がほとんどであり、実際の微小接合部における検討は見当たらない。Fig. 8 に示すように、約 1° のななめ断面研磨により厚さ約 $1 \mu\text{m}$ の反応層を厚さ方向に拡大して断面に露出させ、走査型 AES により組成の分布を調べた。AES を用いたのは、その分析深さが 1 nm 程度であり、X線マイクロアナライザなどとは違い、研磨面に露出している層だけからの情報が得られるからである。各測定点における Al-LMM と Au-NOO のオーグメント電子スペクトルのピーク高さ (それぞれ I_{Al} と I_{Au} とする) からつぎのようにして Al の組成 x_{Al} (at%) を求めた。

$$x_{Al} = \frac{I_{Al}/I_{Al}^0}{I_{Al}/I_{Al}^0 + I_{Au}/I_{Au}^0} \quad (4)$$

ここで、 I_{Al}^0 と I_{Au}^0 は純 Al と純 Au のピーク高さであ

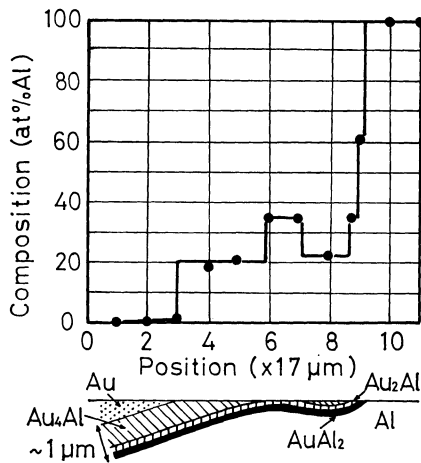


Fig.8 Various Au-Al intermetallic compounds formed by thermo-compression wire bonding.

る。この分析から接合部には Au_4Al 、 Au_2Al および $AuAl_2$ が Fig.8 に示すように生成していることになる。なお、破断部(Al 側; Photo.2 参照)の電子線回折によると、分布はわからないが、 Au_2Al と $AuAl_2$ の存在が確認されたので、上記の AES の結果は信頼できると考える。これまでの報告⁽⁴⁾あるいは状態図⁽⁶⁾からは $AuAl$ や Au_5Al_2 のような相も存在するとされているが、ここではそのような相は検出されなかった。

つぎに、Fig.8 に示したような金属間化合物層の厚さ d (cm) (3層の厚さの合計) と $200\sim 300^\circ C$ での加熱時間 t (s) との関係を求めると、

$$\frac{d^2}{t} = 8.1 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{7.0 \times 10^3}{T}\right) \quad (5)$$

となる。ただし、 T は加熱温度(K)である。前節で接合に必要な Au と Al との反応時間は $300^\circ C$ で 10 ms 程度と推定した。式(5)を用いて、この反応により生成する化合物層の厚さを求めると、10 nm 程度となる。いい換えれば、熱圧着においては、Au と Al が接触しても、反応により 10 nm 程度以上の厚さの金属間化合物層が生成しないと、良い接合は得られないことになる。

6. Au 線熱圧着の機構(まとめ)

Au と Al が接合するためには、まず、両者の塑性変形により両者が接触することで、その部分で Al の酸化被膜が破れると Au と Al が反応して接合する。接合に必要な金属間化合物層の厚さは 10 nm 程度以上であり、接合破断力はこの層の面積によって決まる。この面積(あるいは接合破断力)は Au 球のひずみの関数であるが、Al の表面状態によっても、接合時間が極端に短い場合にも変わる。

接合の律速段階は通常は Au と Al の塑性変形であり、そのため、変形速度の増加により接合時間は 20 ms 程度までなら短縮可能である。

IV. 結 言

IC や LSI などの Al 薄膜電極と Au 細線との、熱圧着と呼ばれる接合において、接合性を支配する諸因子の影響を明らかにし、この接合の高速化の見通しを得た。得られた結果はつぎの通りである。

(1) 本研究で新たに導入した接合破断試験により熱圧着の不良率を予測できる。

(2) 接合にもっとも影響が大きい因子は Au と Al の塑性変形および Al の表面状態である。

(3) 接合の律速段階は、現状では、Au と Al の塑性変形であり、したがって、Au のひずみ速度を $30 s^{-1}$ 程度まで大きくすることにより接合時間を従来の 200 ms から 20 ms まで短縮できた。

(4) 実際の微小接合部における Au-Al 金属間化合物層の厚さ d (cm) と加熱時間 t (s) との関係は、温度 T (K) では

$$\frac{d^2}{t} = 8.1 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{7.0 \times 10^3}{T}\right)$$

と表わせ、良好な接合を得るためには d は 10 nm 程度以上必要である。

今後の課題は接合性のばらつきを小さくすることで、この原因は Al の表面状態などにあると思われ、この問題が解決されれば、接合をさらに高速、高信頼化できると考える。

終りに、熱圧着実験を行なって下さった日立製作所武蔵工場 谷本道夫、山崎 勇両氏および元同所荻野信正氏、ESCA による測定を可能にして下さった同所那珂工場 柴田 淳氏、走査型 AES 装置を使わせて下さった同所中央研究所 早川和延博士、結果についてご討論下さった同所武蔵工場 鴨下源一副工場長、同所 中央研究所 佐藤喜久治、大原秀晴、高橋壮治、嶋田正三 諸博士、また、原稿をお読みいただき、有益なご討論をいただいた東大工学部 堂山昌男教授に深く感謝する。

文 献

- (1) 安江 達, 河合英夫: 電子材料, **5**(1977), 103.
- (2) 石坂彰利, 岩田誠一, 山本博司: 日本金属学会誌, **41**(1977), 1154.
- (3) J.A.Cunningham: Solid State Electronics, **8**(1965), 735.
- (4) E. Philofsky: Solid State Electronics, **13**(1970), 1391.
- (5) M. Hansen: *Constitution of Binary Alloys*, McGraw-Hill Book Co., New York, (1958), 69.