

## 半導体チップのワイヤボンディングプロセスにおける 損傷評価解析\*

池田 徹<sup>\*1</sup>, 工藤 清輝<sup>\*2</sup>, 宮崎 則幸<sup>\*1</sup>  
宗像 健<sup>\*3</sup>, 有田 潔<sup>\*4</sup>, 焼山 英幸<sup>\*4</sup>

### Damage Analysis of Semiconductor Chip during Wire Bonding Process

Toru IKEDA, Kiyoteru KUDO, Noriyuki MIYAZAKI,  
Tsuyoshi MUNAKATA, Kiyoshi ARITA and Hideyuki YAKIYAMA

Wire bonding, which is a process of connecting a semiconductor chip and a lead frame by a thin metal wire, is one of the important processes in electronic packaging. This paper presents the damage estimation of a GaAs chip during the gold (Au) wire bonding process. The Au wire bonding process is carried out by pressing an Au ball made at a tip of the Au wire on a semiconductor chip and vibrating it by ultrasonication. High contact pressure is useful for shortening the process cycle; however, it sometimes causes damage to the semiconductor chip. Elastic plastic large deformation contact analysis is performed and the distributions of the stress in a GaAs chip is investigated. The possibility of fracture under the usual wire bonding pressure is expected in a GaAs chip.

**Key Words:** Combined Stress, Brittle Fracture, Fracture Mechanics, Finite Element Method, Electronic Packaging, Wire Bonding

### 1. 緒 言

LSIなどの半導体チップ上に形成されたアルミ電極と、外部との配線を行うためのリードフレームの間を金属ワイヤで結線する作業は、ワイヤボンディングと呼ばれており、半導体の重要な実装技術である。この金属ワイヤとしては、その作業性や接合性の良さから金(Au)ワイヤが通常用いられている。ワイヤボンディングの手順は、図1に示すようにまずキャピラリと呼ばれるアルミニナ製の押し付け治具の下端からAuワイヤを出し、放電アークによってAuワイヤを溶解してAuの表面張力によってAu Ballを形成・保持する。次にキャピラリが降下してAu Ballを半導体チップ上に蒸着やスパッタリング等により形成されたアルミ電極に押し付け、一定の設定力(ボンディング荷重)で加圧しつつ超音波振動を印加することによって接合を行う。リードフレームとAuワイヤの接合は、キャピラリによってAuワイヤをリードフレームに押し付けることによ

よって超音波熱圧着する。このとき、使用されるAuワイヤの直径は $\phi 20\sim 50\mu\text{m}$ 、ボンディング荷重は0.3~1.0N程度であり、金の接合性を良くするため、作業は、70~200°Cの雰囲気下で行われる。

現在、1ワイヤ当たりのボンディングサイクルの限界速度は、0.13s程度であるが、生産性向上の要求から、さらに高速なワイヤボンディング装置が求められるようになってきている。時間短縮のためには、キャピラリの落下速度の高速化とキャピラリの押し付け荷重(ボンディング荷重)と超音波振動の振幅・周波数を上げることによって超音波印加時間を短縮する必要があるが、これによって半導体チップ中に損傷が生じるため、安易な高速化は不可能である。特に、近年光学半導体などで多用されつつあるガリウムひ素(GaAs)等の化合物半導体の場合は、現在半導体の主流であるシリコン(Si)に比較して、非常に損傷が生じ易く、深刻な問題となっている。したがって、サイクルの短縮のためには、試行錯誤による装置開発に加えて、ボンディング過程における半導体チップ損傷メカニズムの解明と定量的評価が必要と考えられる。一方、リードフレームとの接合では、このような損傷の問題は生じない。

本研究では、第一歩としてキャピラリがAu Ballをアルミ電極に押し付ける際に半導体チップ内部に生ずる応力を有限要素法解析によって解析した。解析においては、金

\* 原稿受付 1995年7月10日。

\*<sup>1</sup> 正員、九州大学工学部(福岡市東区箱崎6-10-1)。

\*<sup>2</sup> NTT(株)(東京都千代田区内幸町1-1-6)。

\*<sup>3</sup> (故)正員。

\*<sup>4</sup> 九州松下電器(株)(福岡市博多区美野島4-1-62)。

の大変形弾塑性と高速に変形する際の降伏応力のひずみ速度依存性を考慮し、GaAs チップについての損傷評価を行った。

## 2. 解析方法

金は、半導体チップ側の材料に比較すると降伏応力がかなり低いため、Au Ball の変形挙動は、半導体チップ側を剛体としてもほぼ同じであると考えられる。そこで、まず、図 2 に示すように Au Ball と剛体壁との大変形弾塑性接触解析を行って、Au Ball と剛体壁の間の接触圧力を求め (Phase 1)，次に図 3 に示すように、接触圧力によって生じる半導体チップ内部の応力を線形弾性問題として解析した (Phase 2)。これにより、大変形弾塑性接触解析の計算時間の負担を軽減できる。

本解析に先立って、荒い要素分割で、Phase 1 と Phase 2 の二つの段階に分けて解析した場合と全体を一段階で解析した場合の比較を行ったが、両者の半導体チップ中の解析応力はほぼ等しいことを確認した。

## 3. Au Ball の接触解析

図 2 に示すように、Phase 1 として、Au Ball と剛体壁との接触解析を行い、Au Ball がキャビラリによって押しつぶされる際の、Au Ball とシリコンチップ上のアルミニ電極の接触圧力を求めた。解析には、汎用有限要素法コードの MARC5 を使用し、軸対称大変形弾塑性接触解析 (Case 1) とこれに降伏応力のひずみ速度依存性を付加した解析 (Case 2) の 2 種類を行った。どちらの解析も、大変形解析にアップデート・ラグランジェ法を、弾塑性解析に Mises の降伏条件と 2 直線近似の応力ひずみ関係を用いた。

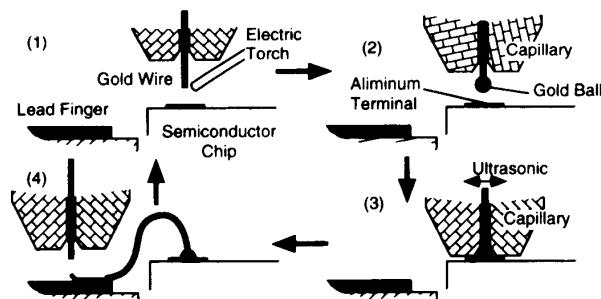


Fig. 1 Wire bonding cycle.

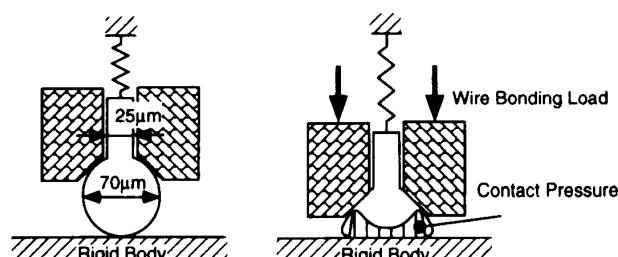


Fig. 2 Phase 1 analysis.

解析に用いた有限要素分割図を図 4 に、金とキャビラリの材料定数を表 1 に示す。

Case 1 の解析では、キャビラリへの荷重の付加を、キャビラリを下方に強制変位させることによってモデル化し、ボンディング荷重を 0 から 0.98 N まで変化させた。

キャビラリには Au Ball を押しつぶすためにボンディング荷重が付加されるが、このときの付加速度は、約 1 ms の間に 0.98 N まで増加するかなり速いものである。このため、Au Ball がキャビラリによって押しつぶされる際のひずみ速度は局所的に 1000 s<sup>-1</sup> 以上の大きな値となり、粘性による降伏応力の上昇の影響が予測される。そこでまず、ホプキンソン棒衝撃試験によって、高ひずみ速度における降伏応力を決定した。図 5 はホプキンソン棒衝撃試験によって求めた、200°C での各ひずみ速度での降伏応力の測定結果を示したものである。1200 s<sup>-1</sup> までのひずみ速度と降伏応力の関係は、ほぼ直線関係を示したので、最小二乗

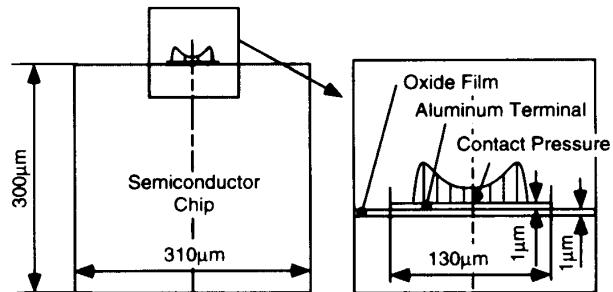


Fig. 3 Phase 2 analysis.

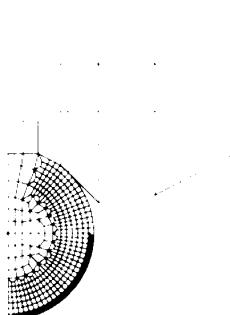


Fig. 4 FEM mesh at phase 1.

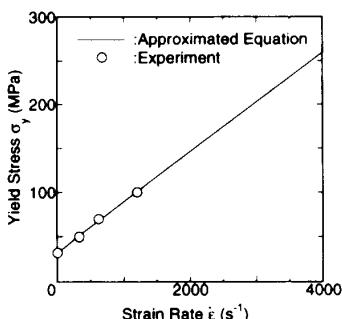


Fig. 5 Results of Hopkinson bar impact test.

Table I Material constants of each materials. (200°C)

Material	Young's Modulus E (GPa)	Poisson's Ratio	Rate of Strain Hardening (MPa)	Yield Stress (MPa)	Notes
Gold	68.6	0.44	1459	32.7	Neglecting Strain Rate Dependence
Gold	68.6	0.44	1459	$32.7 + 0.057\dot{\epsilon}$	Account of Strain Rate Dependence
Capillary	313.6	0.23	-	-	-
Aluminum Terminal	70.3	0.345	-	-	-
Oxide Film	100.0	0.224	-	-	-
GaAs	118.6	0.30	-	-	{111} Plane

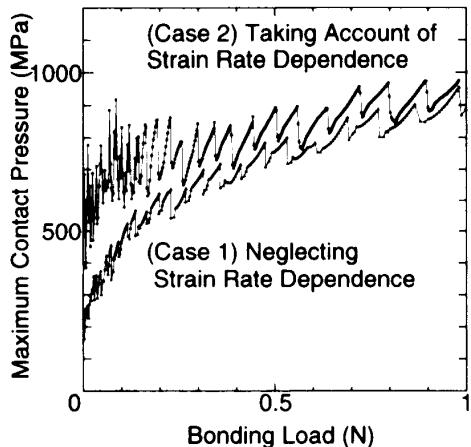


Fig. 6 Maximum contact pressure with wire bonding load.

法により、ひずみ速度と降伏応力の関係を次式のように近似した。

$$\sigma_y = 32.7 + 0.057\dot{\epsilon} \text{ (MPa)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\sigma_y$  (MPa) は降伏応力、 $\dot{\epsilon}$  ( $s^{-1}$ ) はひずみ速度である。この直線を図 5 中に実線で示す。 $\dot{\epsilon} = 1200 s^{-1}$  以上のひずみ速度の領域では、実験結果が存在しないため、便宜的に直線関係が成り立つと仮定して外挿した。

この式(1)を MARC5 の軸対称弾塑性大変形接触解析に組み込んで、降伏応力のひずみ速度依存性を考慮した解析(Case 2)を行った。荷重の付加は、実機の荷重付加条件を参考にして、1 ms の間に 0 N から 0.98 N まで直線的に増加する荷重を直接 キャピラリ に付加することによってモデル化した。

金の降伏応力のひずみ速度依存性を考慮しない Case 1 の解析と、考慮する Case 2 の解析における、ボンディング荷重による最大接触圧力の変化を図 6 に、Case 2 の解析における Au Ball 中の相当ひずみ速度の分布を図 7 に示した。図 6 より Case 2 の最大接触圧力は、低いボンディング荷重において Case 1 よりもかなり高く、ボンディング荷重が 0.5 N を越えるとほぼ等しくなっていることがわかる。この理由としては、Case 2 の解析では、図 7 からわかるように荷重が小さいときの方が Au Ball の接触域外

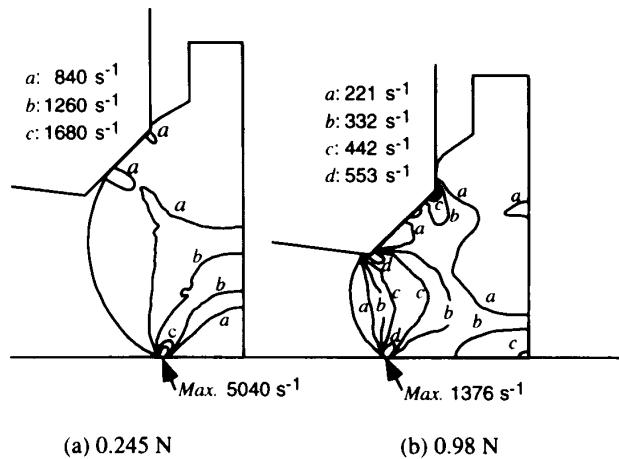


Fig. 7 Distribution of the equivalent strain rate in Au ball (Case 2).

縁部のひずみ速度が大きいために、この部分の金の降伏応力が大きく上昇して剛性が増大し、接触圧力が大きくなっていると考えられる。

#### 4. 半導体チップ内部の応力解析

前章で述べた Phase 1 の Au Ball の接触解析によって求めた接触荷重を、図 3 に示すように半導体チップ上部に負荷することにより Phase 2 の解析を行った。Phase 2 の解析は、軸対称の線形弾性体として行った。この解析における有限要素分割を図 8 に示す。

半導体チップに GaAs チップを仮定して、Phase 1 の Case 1, Case 2 それぞれの接触圧力に対応した Phase 2 の解析を行い、GaAs チップ内部の応力を評価した。解析に用いた GaAs チップ、酸化薄膜、アルミ電極の材料定数を表 I に示す。ここで、GaAs のヤング率とポアソン比は、GaAs のスティッフネスの文献値<sup>(1)</sup>から、面内で等方性となる {111} 面内での値に換算<sup>(2)</sup>して用いた。解析によって得られた応力から、等方性を仮定した場合の塑性変形に関係した量としてミーゼスの相当応力を、また、脆性破壊に関係した量として主応力のうち正の値を持つものの分布を求めた。このミーゼスの相当応力と主応力の分布のボンディング荷重 0.245 N と 0.98 N の例を、図 9, 10 に示す。また、ミーゼスの相当応力と主応力の最大値のボンディング荷重に対

する変化を図11,12にそれぞれ示す。

図9,10を見ると、金の降伏応力のひずみ速度依存性を考慮しない場合(Case 1)とした場合(Case 2)の比較では、ミーゼスの相当応力・主応力ともにその分布状態はほぼ同じであるが、0.254 Nの場合の最大値とその近傍の値が、Case 2の方が高くなっている。ボンディング荷重が0.98 Nの場合は、最大値の値も含めて両者の間にほとんど

差はない。このことは、図6の接触圧力が、ボンディング荷重が低いときには、ひずみ速度依存性を考慮した場合の方がしない場合よりも高くなり、ボンディング荷重が高くなると両者に差がなくなることに対応している。

ミーゼスの相当応力と主応力の最大値は、GaAsチップ上面の接触域端部のやや内側と少し外側に、それぞれ生じている。しかし、ミーゼスの相当応力は広い範囲に大きな値が分布し、ボンディング荷重0.98 Nで500 MPa以上の最大値を示しているのに対して、主応力は0.98 Nの場合でもたかだか26 MPaの最大値しかない点が大きく異なる。200°CにおけるGaAsは、典型的な脆性材料であるため、引張り主応力が破壊発生の粗い基準となると考えられる。主応力の分布より、チップ表面のAu Ballの接触域の少し外側に損傷が発生する可能性が考えられる。

つぎに、GaAsチップの上面を(001)面とした場合の、GaAs結晶のへき開面{110}面<sup>(3)(4)</sup>に対する垂直応力 $\sigma_n$ とそれぞれのへき開面中の最大せん断応力 $\sigma_s$ をテンソル変換を行って求めた。 $\{110\}$ 面に関する垂直応力とせん断応力の最大値はともにGaAsチップ表面に現れた。図13にGaAsチップ表面の{110}へき開面に関する垂直応力と最

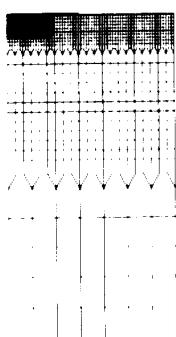
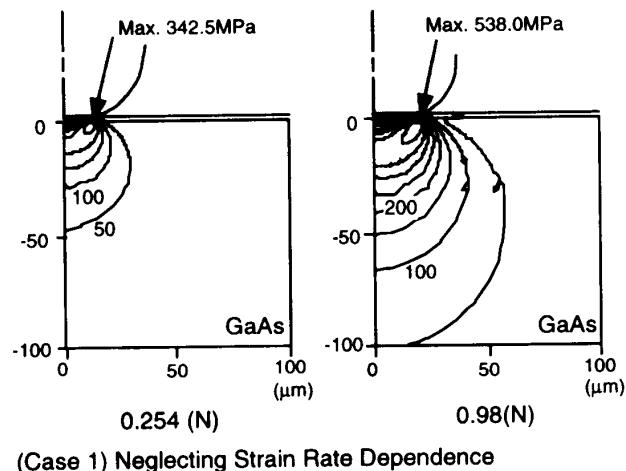
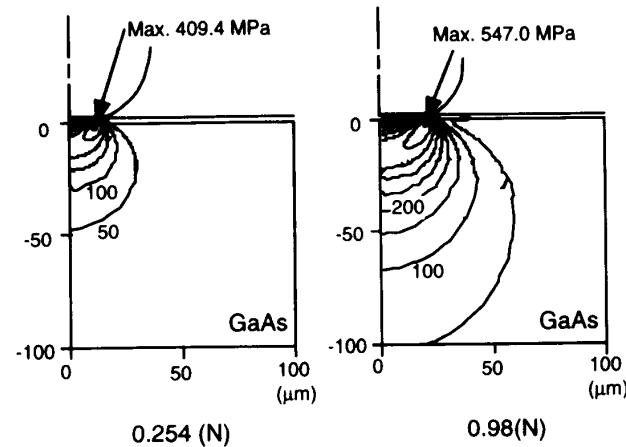


Fig. 8 FEM mesh at phase 2.

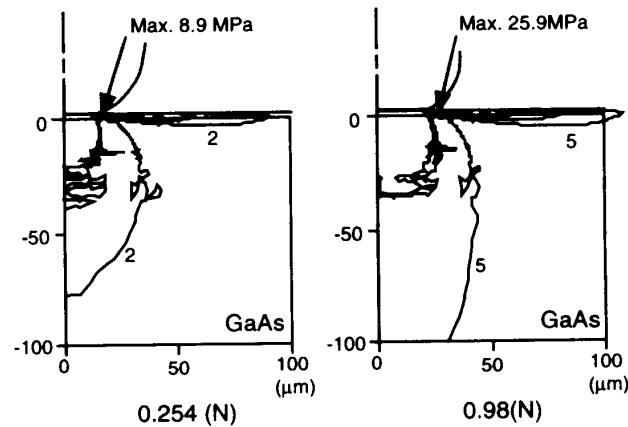


(Case 1) Neglecting Strain Rate Dependence

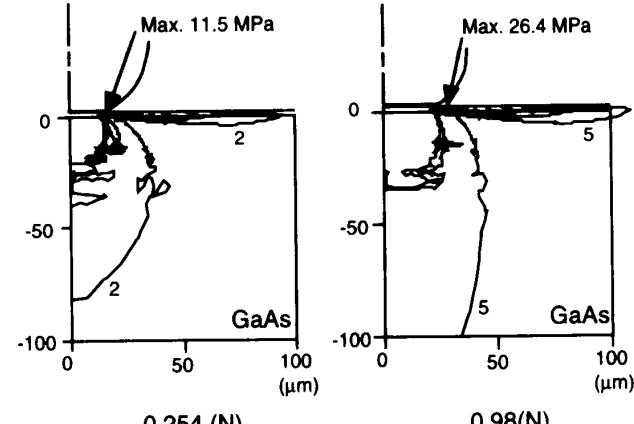


(Case 2) Taking Account of Strain Rate Dependence

Fig. 9 Distribution of Mises equivalent stress.



(Case 1) Neglecting Strain Rate Dependence



(Case 2) Taking Account of Strain Rate Dependence

Fig. 10 Distribution of principal stress.

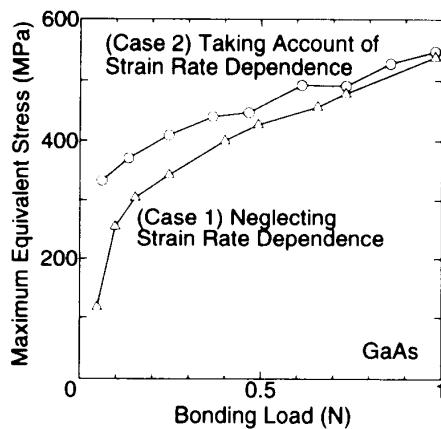


Fig. 11 Maximum Mises equivalent stress in GaAs chip with wire bonding load.

大せん断応力の最大値の分布を示す。へき開面に対する垂直応力は、中心軸から[110], [1̄10], [1̄1̄0], [1̄1̄̄0] 方向の接触域の外側に現れ、その最大値は、ほぼ主応力に等しかった。また、へき開面に関する最大せん断応力は、接触域の外縁部上に生じ、その大きさは、ミーゼスの相当応力の約半分となった。

上記のテンソル変換においては、GaAs チップ中の任意の点において、それぞれ 12 面のへき開面 {110} に対する垂直応力と、最大せん断応力が求められる。この垂直応力と最大せん断応力の組を、GaAs チップ全体にわたって計算し、その存在範囲を調べた結果を図 14 に示す。それぞれのボンディング荷重での、チップ中の全ての点の応力は、図 14 に示した対応する腺の内側に存在している。これより、GaAs チップ内部の応力は、ほとんどの部分でへき開面に対して圧縮の垂直応力が働いている状態にあることがわかる。

Belsinger ら<sup>(4)</sup> は、GaAs 単結晶について、{110} へき開面に対して様々な角度で切り出した試験片を用いて、常温下で 4 点曲げによる破壊試験を行い、破壊時のへき開面に対する垂直応力  $\sigma_n$  とせん断応力  $\sigma_s$  の組の分布を求めた。彼らは、この結果から、常温における GaAs 単結晶の破壊応力の限界値が次式のような梢円で表されることを見いだした。

$$f = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_{n_{cr}}^2} + \frac{\sigma_s^2}{\sigma_{s_{cr}}^2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\sigma_n$  と  $\sigma_s$  は、破壊時のへき開面に対する垂直応力とせん断応力を、 $f$  は、破壊確率に関する Scaling Parameter を、 $\sigma_{n_{cr}}$  と  $\sigma_{s_{cr}}$  は、カーブフィッティングを行った際に求められた定数を示す。破壊試験の結果の平均値より求められた  $\sigma_{n_{cr}}$  と  $\sigma_{s_{cr}}$  は、それぞれ 65.48 MPa と 38.13 MPa であり、 $f=1.0$  を (2) 式に代入すると、平均値に関する破壊限界のカーブが描ける。彼らは、破壊確率に対する  $f$  の値を求めており、たとえば、破壊確率が 20% の場合の  $f$  は、 $f=0.62$  である。Fig. 15 に、平均値 (=1.0) と破壊確率 20% (=0.62) の場合の (2) 式と、Fig. 14 の  $\sigma_n$  と  $\sigma_s$  の組の存在

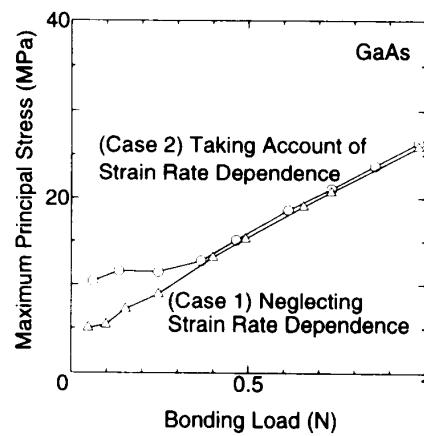


Fig. 12 Maximum principal stress in GaAs chip with wire bonding load.

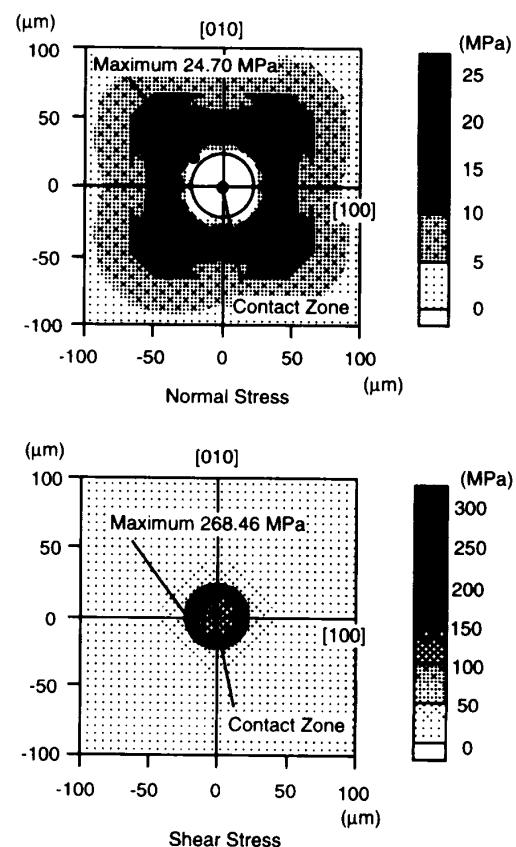


Fig. 13 Maximum tensile normal stress on {110} planes.

範囲のうち、 $\sigma_n$  が正である部分を示した。Belsinger らの試験は、 $\sigma_n$  と  $\sigma_s$  の値が等しいか、 $\sigma_n$  の方が大きな範囲でしか行われていないので、Fig. 15 中の (2) 式の線もその範囲で示してある。また、彼らの試験は、常温下で行われているため、200 °C を仮定しているワイヤボンディングプロセスとは温度条件が異なるが、単結晶の破壊応力が、脆性-延性破壊遷移温度以下の脆性破壊温度域ではほとんど変化しないという事実より<sup>(5)</sup>、200 °C の破壊限界もほぼ同じと考えた。

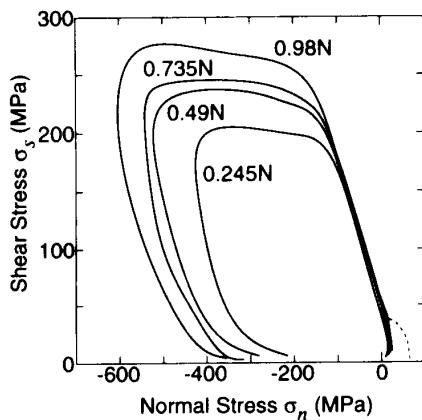


Fig. 14 Limit curves of existance of the pairs of a normal stress and a shear stress.

Fig. 15 よりわかるとおり、Belsinger らの破壊限界線を外挿して、 $\sigma_n$ が正の範囲での破壊限界が楕円で示されるとすると、ボンディング荷重 0.245 N の場合でさえ、ほぼ確実に破壊することになる。しかし、脆性破壊が生じる限界の純せん断応力は、限界の純垂直応力よりもかなり大きいのが一般的であり、圧縮の垂直応力が働けばへき開面の摩擦のためにさらに限界の $\sigma_s$ が上昇すると推測される。したがって、これより $\sigma_n$ が小さな範囲では、破壊限界の $\sigma_s$ が急速に上昇することも考えられるため、Fig. 15 より全てのボンディング荷重で破壊が生じるとすることはできない。Belsinger らの破壊試験データの中で、 $\sigma_n$ が最も小さい $\sigma_n$ - $\sigma_s$ の角度が 45 deg の線上で、破壊確率 20% の破壊限界と、各ボンディング荷重での応力の存在範囲を比較すると、ボンディング荷重 0.98 N での応力の大きさは、20% 破壊限界の約 80% に達していることがわかる。たとえ、 $\sigma_n$ - $\sigma_s$ の角度が 45 deg 以上の領域で破壊限界線の $\sigma_s$ の値が急速に上昇するとしても、高いボンディング荷重の応力は、かなり危険な領域に分布していると言える。実際の製造工程でも、GaAs チップのワイヤボンディングは、0.3N 程度の低いボンディング荷重で行わなければ、ほぼ確実に損傷が生じることが経験上知られている。

損傷が生ずるボンディング荷重を、定量的に判定するためには、へき開面に対するせん断応力が垂直応力に対して大きな、また、さらには、圧縮の垂直応力状態でのせん断応力の破壊限界を調べる必要があるが、そのような領域での破壊試験は、実験技術上かなり困難であり、今後の課題である。

また、現在圧倒的に多く用いられている半導体であるシリコン (Si) の場合は、その常温での脆性破壊応力が 1.2GPa から 6.9GPa 程度<sup>(6)</sup> と GaAs に比較してはるかに大きいため、通常のワイヤボンディング時の押し付け荷重によって破壊が生ずることはないと言える。

## 5. 結 言

ワイヤボンディングプロセスにおける半導体チップ中の応力を解析し、以下の結論を得た。

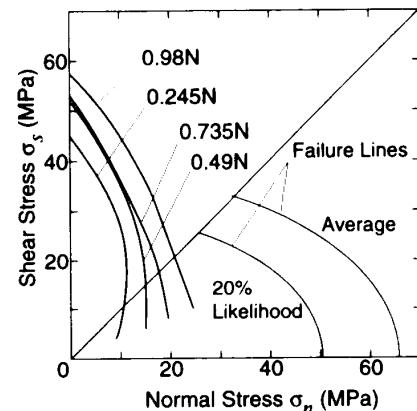


Fig. 15 Failure envelope of GaAs crystal.

(1) 金の降伏応力は、Au Ball が変形する際の大きなひずみ速度によって上昇する。しかし、降伏応力の上昇が半導体チップ中の応力場に与える影響は、低い荷重レベルにおいて顕著であり、半導体の破壊が問題となる荷重レベルにおいては小さいため、結果的に損傷に与える影響は少ない。

(2) GaAs チップ中の応力は、GaAs の組み合わせ応力下での破壊限界に近接しており、高いボンディング荷重においては、破壊を生ずることが予測される。

本論文の連名者である、九州大学名誉教授・宗像 健先生が、平成 7 年 9 月 7 日にご逝去されました。故人のご冥福を心よりお祈りいたします。

本研究において、ホブキンソン棒衝撃試験法による金の高ひずみ速度下での降伏応力の測定を行っていたいた、東京大学先端科学技術研究センターの武田展雄先生と研究室の方々に心より感謝いたします。

## 参考文献

- (1) A. S. Jordan, An Evaluation of the Thermal and Elastic Constants Affecting GaAs Crystal Growth, *J. Crystal Growth*, **49-4**(1980), 631-642.
- (2) W. A. Brantley, Calculated Elastic Constants for Stress Problems Associated with Semiconductor Devices, *J. Appl. Phys.*, **44-1**(1973), 534 - 535.
- (3) K. Yasutake, Y. Konishi, K. Adachi, K. Yoshii, M. Umeno and H. Kawabe, Fracture of GaAs Wafers, *Japanese J. Appl. Phys.*, **27-12**(1988), 2238-2246.
- (4) H. E. Belsinger Jr, B. Wilner, U. Tasch and L. D. T. Topoleski, A Fracture Criterion for Gallium Arsenide Wafers, *Eng. Frac. Mech.*, **48-2**(1994), 199 - 205.
- (5) P. B. Hirsch, 角田 直人訳, 脆性 - 延性遷移の基礎 (Fundamentals of the Brittle-Ductile Transition), 日本金属学会誌, **29-1**(1990), 5 - 17.
- (6) S. M. Hu, Critical Stress in Silicon Brittle Fracture, and Effect of Ion Implantation and Other Surface Treatments, *J Appl. Phys.*, **53-5**(1982), 3576 - 3580.