帯板のレーザ切断における温度上昇の抑制*

沢田博司** 今井康文*** 才本明秀† 本村文孝†

Restraint of the Temperature Rise in Thermal Stress Cleaving of a Thin Strip Using Nd:YAG Laser

Hiroshi SAWADA, Yasufumi IMAI, Akihide SAIMOTO and Fumitaka MOTOMURA

Brittle materials like semiconductor wafers and ceramic substrates are usually cut by diamond tools, where the generation of microcracks cannot be avoided. Recently, thermal stress cleaving of a thin strip using a point heat source is studied to cut brittle materials without leaving any microcracks on the cleaved surfaces. However, this method often causes thermal damages to the workpieces because of the very high temperature reached around the heating point. It is desirable to cut the electronic substrates, on which precise circuits were already formed, with minimizing the temperature rise. In the present paper, based on the plane thermoelasticity, the time dependent thermal stress intensity factor of a line crack has been obtained for two heating ways: by two point heat sources and a circular zone heat source located symmetrically with respect to the crack line. It was found that a zone heating is better than a point heating in the case of a thin strip cleaving under the restriction of the temperature rise. The most successful cleaving is generally achieved when a radius of a heating region is expanded up to the crack tip. The present calculation was compared with the experimental results and good agreement was found.

Key words: stress intensity factor, point heat source, zone heating, fracture, crack, thermal stress

1. はじめに

半導体ウエハやセラミック基板等のぜい性材料を切断する方法としては、ダイヤモンドブレードにより研削加工を行うダイシング法やローラチゼル、ダイヤモンドポイント等を用いたスクライビングによりき裂を発生させた後、き裂に曲げ応力を作用させることで切断を行うスクライビング法が一般的である。

しかし、微細な電子回路を形成された電子材料を切断する際、従来から行われている加工法では、マイクロクラックやパーティクルの発生が避けられず、製品に悪影響をもたらすことがある。そこで、レーザを用いた点熱源による熱応力切断が研究されており¹⁾、帯板を二等分割する際の非定常温度場と熱応力場の解析により、最大の熱応力拡大係数を発生させる最適加熱位置が示されている²⁾。この方法は熱応力を利用してき裂を進展させる方法であり、マイクロクラックやパーティクルは発生しない。しかし、加熱点の温度が理論上は無限度に上昇する。

実際の加工では、熱源はある程度の広がりを持っており、加熱点の温度は無限度に上昇することはないが、かなり高温になる。特に、加工対象が小さい電子部品の場合、その熱容量も小さいため温度上昇が著しい。電子材料は高温になるとその重要な機能が損なわれることがあり、切断加工の際、極力温度上昇を抑制することが望まれている。

帯板加工時の最高到達温度を抑制するためには積極的に加熱源に広がりを持たせることが有効である。その場合でも、き裂の進展に必要な応力特異性の強さを得るためには、加熱領域の大きさや形状を最適にする必要がある。

本研究では、2点の加熱源がき裂の延長線を対称線とする位置にある場合の熱応力場を解析し、その解を重ね合わせるこ

により、円形領域加熱について、加熱時間に対する加熱領域中心部の温度上昇と熱応力拡大係数を評価し、熱応力拡大係数/上昇温度が加熱領域の変化に対してどのように変わるかを検討し、その値が最大になる領域寸法を決定した。また、電子材料基板を用いた実験を行い、解析結果との比較も行った。

2. 2点加熱時の熱応力拡大係数

2.1 無限板の点熱源による熱弾性場

時刻 $\tau = 0$ から $\tau = t$ まで、初期温度 $T=0$ の薄い無限平板を単位時間、単位厚さ当たり Q の持続点熱源により加熱した場合の温度上昇および熱応力分布を考える。板厚が十分薄い時には板厚方向の温度は均一と見なされ、熱応力場は平面応力状態になる。板表面からの放熱を無視すれば温度場 $T^*(r, t)$ および熱応力 $\sigma_r^*(r, t)$ $\sigma_\theta^*(r, t)$ は次式で与えられる。

$$T^*(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \int_0^t \frac{\exp(-r^2/4\kappa(t-\tau))}{t-\tau} d\tau \quad (1)$$

$$\sigma_r^*(r, t) = -aE \frac{1}{r^2} \int_0^t T^*(r, t) r dr \quad (2)$$

$$\sigma_\theta^*(r, t) = -aET^*(r, t) + aE \frac{1}{r^2} \int_0^t T^*(r, t) r dr \quad (3)$$

ここで λ は熱伝導率、 E は縦弾性係数、 κ は熱拡散率、 a は線膨張係数であり、温度場および熱応力場は加熱点を原点とする極座標 (r, θ) に関するものとする。

2.2 無限板に作用する無限周期点熱源による熱弾性場

図1に示すように幅 $2W$ 、き裂長 c の断熱側壁を有する薄い半無限帯板を左端面から L 、中心軸に対して対称に $2V$ 離れた位置に2点の点熱源で加熱した場合の非定常温度場は重ね合わせの原理に基づいて、図2のような2種類の無限周期熱源による温度場の和として表される。この解法によれば図1の温度場は、点熱源が $(\pm L, \pm 2nW+V)$ と $(\pm L, \pm 2nW+V)$ 、 $(n=1, 2, \dots)$ にある場合の温度場を重ね合わせて得られる。また、2種類の

* 原稿受付 平成10年2月6日

** 正会員 NEC関西(大津市晴嵐2-9-1)

*** 正会員 長崎大学工学部(長崎市文教町1-14)

† 長崎大学工学部

Fig.1 Cutting of a thin strip using two point heat sources

Fig.2 Temperature field in the strip with two point heat sources

無限周期点熱源による無限平板の熱応力場は温度場と同様に、点熱源が $(\pm L, \pm 2nW-V)$ と $(\pm L, \pm 2nW+V)$, $(n=1,2,\dots)$ にある場合の応力場を重ね合わせて得られ、温度場 $T(x,y,t)$, 垂直応力場 $\sigma_x(x,y,t)$, $\sigma_y(x,y,t)$, せん断応力場 $\tau_{xy}(x,y,t)$ は以下のように求められる。

$$T(x,y,t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^2 \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_1 \left(\frac{r_{i,j,n}^2}{4\kappa t} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_x(x,y,t) = \frac{\alpha EQ}{8\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^2 \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ E_1 \left(\frac{r_{i,j,n}^2}{4\kappa t} \right) - \left(1 - e^{-\frac{r_{i,j,n}^2}{4\kappa t}} \right) \left(1 - 2 \frac{X_1^2}{r_{i,j,n}^2} \right) \frac{4\kappa t}{r_{i,j,n}^2} \right\} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_y(x,y,t) = \frac{\alpha EQ}{8\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^2 \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ E_1 \left(\frac{r_{i,j,n}^2}{4\kappa t} \right) + \left(1 - e^{-\frac{r_{i,j,n}^2}{4\kappa t}} \right) \left(1 - 2 \frac{X_1^2}{r_{i,j,n}^2} \right) \frac{4\kappa t}{r_{i,j,n}^2} \right\} \right] \quad (6)$$

$$\tau_{xy}(x,y,t) = -\frac{\alpha EQ}{8\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^2 \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{8\kappa t X_1 Y_{j,n}}{r_{i,j,n}^4} \left(1 - e^{-\frac{r_{i,j,n}^2}{4\kappa t}} \right) \right] \quad (7)$$

ここで、

$$\begin{aligned} X_1 &= x+L \\ Y_{1,n} &= y-2nW+V \\ Y_{2,n} &= y-2nW-V \\ r_{i,j,n}^2 &= X_1^2 + Y_{j,n}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

であり、 $E_1(u)$ は次の積分指数関数¹⁾である。

$$E_1(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (9)$$

この解析は加熱初期のき裂先端まわりの熱弾性場解析を目的としており、加熱時間 t は非常に短いため板表面からの放熱は無視している。さらに、き裂の開口量は小さく、き裂面の開口によって式(4)の温度場が変化しないと仮定した。

2.3 等温応力場の解析

2種類の無限周期点熱源による無限平板の熱応力場を求めたが、この応力場は帯板の端面に表面力が作用する場合に対応しており、自由表面の条件を満足していない。き裂面および境界

Fig.3 Discretization of the boundary for the present BFM analysis

 (a) σ_y along the upper edge

 (b) σ_x along the end

 (c) σ_y along the x-axis

Fig.4 Stress to be superposed along the boundaries and the crack line on the x-axis

が表面力を受けていない自由表面であるようなき裂を有する帯板の熱応力場を得るためには、き裂面および境界での応力を打ち消すような帯板の等温応力場を重ね合わせる必要がある。ところで、無限平板の熱応力場にはき裂は考慮していないので、帯板にあるき裂先端の応力拡大係数はこの重ね合わせるべき等温応力場のみで評価することができる。

半無限帯板の等温応力場の解析には、体積法による二次元汎用解析プログラムを利用した¹⁾。この解析法は、き裂問題に対しては最適の解法であり、高精度の解が容易に得られる。

体積法では、通常の境界要素法と同様に境界をいくつかの要素に離散化するが、ここで用いた要素分割を図3に示す。この時、対称性を利用して半無限帯板の上半分を解析対象とし、境界に線形要素を用いた。上端面は $15W$ の範囲を通常の要素で、残りを1つの半無限要素で表した。

Fig.5 Thermal stress intensity factor versus heating time

Fig.6 The contours of heating location which give the same thermal stress intensity factor

2.4 端面に沿う表面力

加熱位置を図1において $L=W$ とし、色々な V/W の値に対して境界に重ね合わせるべき表面力の分布を計算した。その結果を図4に示す。帯板上端面に重ね合わせるべき表面力は引張になっており、き裂を開口させるように作用する。一方、き裂となるべき位置の x 軸上に2点加熱により生じた応力 σ_x は圧縮であり、き裂面を自由境界とするために重ね合わせる表面力は、き裂面を閉じる方向に作用し、き裂の開口を妨げる。

2.5 熱応力拡大係数

き裂長 c が $c/W > 5$ 以上になると、点熱源により帯板に生じる応力拡大係数は、ほとんどき裂長に依存しなくなる²⁾。そこで、上に示した表面力を受ける $c=5W$ の縁き裂を有する帯板について応力解析を行い、応力拡大係数 K_I を加熱時間の関数として評価した。

図5に、種々の加熱位置に対して得られた K_I の時間的変化

Fig.7 Cutting of a thin strip using a circular zone heating

Fig.8 Temperature in the center of a circular heating zone

を示す。横軸は時間を代表する無次元時間、縦軸は K_I を加熱量 Q 等で無次元化している。同図から加熱点が中央線に近いほど大きな K_I を与え、 V/W が 0.7 を越えるような場合には、加熱初期で K_I が負になることがわかる。

図6に、同じ大きさの K_I を与える加熱位置を線で結んで得られた等強度線を示す。 $K_I=0$ の等強度線は加熱初期では三角形に近く、時間経過とともに外側に膨らんでいく。この等強度線より外側の領域を加熱すると、き裂先端では K_I が負になるため、熱応力割断では有害となる。また、高レベルの K_I に対する等強度線は円形に近く、時間経過とともにき裂先端からわずかに離れていく。

3. 円形領域加熱時の熱応力拡大係数

2点加熱時の結果を利用して、加熱領域が円形に広がった円形領域加熱の場合を解析した。加熱領域を図7に示すように、き裂延長線上に中心を持つ半径 R の円形とし、き裂先端から加熱領域中心までの距離を D 、単位時間、単位厚さ、単位面積当たりの加熱量を Q_0 とした。加熱領域を角度方向に $d\theta = \pi/50$ 、半径方向に $dR = D/20$ の微小領域 $\Delta A = R dR d\theta$ に分割し ΔA の中心に $Q_0 \Delta A$ の点加熱源がある場合のき裂先端の応力拡大係数 ΔK_I と加熱領域中心の温度上昇 ΔT を評価し、加熱領域全体で総和をとることにより、円形領域加熱時の K_I 、 T を計算した。

図8に加熱量 $Q_0 = Q_0 \pi R^2$ が一定、 $c/W=5$ 、 $D/W=1.0$ の場合の、加熱領域中心の温度上昇の計算結果を示す。縦軸は T を Q_0 等で無次元化している。温度上昇は加熱時間にかかわらず、加熱領域半径 R が増加するにつれて減少し、温度上昇を抑制するためには加熱源に広がりを持たせることが有効であることがわかる。また、加熱時間の増加にともない温度が上昇する。

図9には、加熱量 $Q_0 = Q_0 \pi R^2$ を一定とした時の $D/W=0.3, 0.5, 1.0$ での応力拡大係数 K_I の加熱領域の大きさに対する変化を示す。同図も縦軸は K_I を Q_0 等で無次元化している。 K_I は加熱中心位置にかかわらず、 $R/W=0$ すなわち点熱源のとき最大となり、 R/W の増加にともない減少する。この現象は加熱時間が長くな

Fig.9 Thermal stress intensity factor using a circular zone heating versus heating radius

Fig.10 Thermal stress intensity factor - temperature rise ratio versus heating radius

るにしたがい顕著になり、加熱時間が短い場合、加熱領域を大きくしても K_I の減少に与える影響は小さくなる。また、 K_I は加熱中心位置や R/W にかかわらず加熱時間の増加にともない大きくなる。

4. 円形領域加熱時の応力拡大係数温度比

前節で計算した円形領域加熱時の温度と応力拡大係数の結果から温度上昇に対する応力拡大係数温度比 K_I/T が求められる。この値が大きいほど切断時の最高到達温度となる加熱領域中心温度を低くすることができる。

図 10 に $D/W=0.3, 0.5, 1.0$ での応力拡大係数温度比 K_I/T の加熱領域半径 R に対する変化を示す。加熱領域がき裂先端に達するまで広げた場合 ($R=D$)、応力拡大係数は最大値に比べかなり減少していたが、そのとき温度上昇も小さいため、それらの比である応力拡大係数温度比 K_I/T は最大値またはそれに近い値を示している。また、同図の縦軸の分母に $\sqrt{W}$ があるため、幅の狭いものほど切断時の温度が上昇することがわかる。

図 11 には、加熱領域半径を応力拡大係数温度比 K_I/T が最大値またはそれに近い値を示す $R=D$ に設定したときに得られる K_I/T と加熱位置 D の関係を示す。加熱時間が短いほど K_I/T が大きく、加熱時間が $4\kappa t/W^2=0.1$ の場合、温度上昇を低く抑え、効率よく応力拡大係数を発生させるための最適加熱領域は $R=D$ 、 $D/W=0.7$ 近傍にある。加熱時間 $4\kappa t/W^2$ が大きくなると K_I/T が最大となる D/W が小さくなり、最適加熱中心位置がき裂先端に近づくことがわかる。

5. 実験方法

Nd:YAG レーザを用いて、図 12 に示すような配置で帯板の

Fig.11 Thermal stress intensity factor - temperature rise ratio versus heating position

Fig.12 Scheme of the experimental apparatus

切断実験を行った。使用したレーザ発振機は出力が大きいため、絞りにより出力を低減させている。種々の加工条件において、レーザ出力を徐々に上げながらき裂進展に必要なレーザ発振機の最低出力 Q_L と帯板に熱損傷の発生するレーザ発振機の最低出力 Q_U を測定した。ただし帯板の加熱に寄与するそれぞれの実効出力 Q_L' 、 Q_U' は Q_L 、 Q_U に絞りのレーザ透過率および帯板のレーザ吸収率を乗じた値となる。切断時の加熱中心温度を

Table 1 Thermo-mechanical properties of the used strip

κ m ² /s	α 1/K	λ W/mK	E GPa
43.6×10^{-6}	4.56×10^{-6}	65	60.7

局所的に測定することは困難なため、 Q_u/Q_L を余裕度とし、加熱半径に対する変化を調べ、この値が大きいほど低い温度で切断されたとした。 Q_u/Q_L と K_I/T の関係は帯板のレーザ吸収率や材料定数の温度依存性がなければ次のように説明できる。 K_I/T は図10からわかるように c/W 、 D/W が一定のとき

$$\frac{K_I}{T} = f(R/W, 4\kappa t/W^2) \quad (10)$$

なる関数で表される。したがって、

$$T = \frac{K_I}{f(R/W, 4\kappa t/W^2)} \quad (11)$$

となる。また、 T と Q は比例するため、加熱量 Q_L 、 Q_u のときの温度上昇を T_L 、 T_u とすると

$$\frac{Q_u}{Q_L} = \frac{T_u}{T_L} \quad (12)$$

となる。このとき T_u は帯板の融点 T_M と一致する。また、 T_L のとき発生する K_I は破壊じん性値 K_{Ic} と一致する。式(10)~(12)より

$$\frac{Q_u}{Q_L} = \frac{T_M}{K_{Ic}} f(R/W, 4\kappa t/W^2) = \text{const} \cdot \frac{K_I}{T} \quad (13)$$

となり、 Q_u/Q_L から K_I/T の変化が実験的に確認できる。また、帯板のレーザ吸収率や材料定数に温度依存性がある場合でも、 Q_u/Q_L から K_I/T の変化の目安が簡易的に得られる。

使用した帯板の厚さは0.1mm、予き裂長はすべて $c/W=5$ である。表1に実験に使用した帯板の物性値を示す。

6. 実験結果

幅2.2mm、長さ15mmの帯板で $D/W=0.5$ 、 $4\kappa t/W^2=0.288$ （加熱時間2ms）における加熱半径に対する Q_L および余裕度 Q_u/Q_L の変化を図13、図14に示す。図13から加熱半径 R の増加に連れて切断に必要な加熱量も大きくなり、応力拡大係数 K_I が発生しにくくなっていることがわかる。しかし加熱半径が大きくなると、熱損傷の発生する最低出力 Q_u も大きくなるため、図14に示すように Q_u/Q_L は K_I の発生とは逆に R の増加に連れて大きくなる。また、その値は解析結果と同様に $R=D$ のとき最大となる。

図15には幅1.2mm、長さ10mmの帯板で $4\kappa t/W^2=0.969$ （加熱時間2ms）、 $R=D$ における加熱位置 D に対する余裕度 Q_u/Q_L の変化を示す。この場合 $D/W=0.5$ 付近で Q_u/Q_L が最大となり、図11に示す $4\kappa t/W^2=1.0$ の解析結果とよく一致していることが確認できる。

7. 結論

2点の加熱源がき裂の延長線に対称線とする位置にある場合の熱応力場を解析し、その解を重ね合わせるにより、円形領域加熱について、加熱時間に対する加熱領域中心部の温度上昇と熱応力拡大係数を評価し、熱応力拡大係数/温度が加熱領域の変化に対してどのように変わるかを検討し、以下の結論を得た。

(1) 点熱源により、き裂先端に同じ大きさの応力拡大係数 K_I

Fig.13 Minimum heating power required for crack extension versus heating radius

 Fig.14 Q_u/Q_L versus heating radius

 Fig.15 Q_u/Q_L versus heating point

を発生させる加熱位置を線で結んで得られる等強度線を導いた。 $K_I=0$ の等強度線は加熱初期では三角形に近く、時間経過とともに外側に膨らんでいく。

- (2) Q_I が一定の場合、帯板に発生する K_I は加熱中心位置にかかわらず点熱源のとき最大となり、加熱領域半径の増加にともない減少する。
- (3) 応力拡大係数温度比 K_I/T は加熱領域をき裂先端に達するまで広げた場合に最大値またはそれに近い値を示す。
- (4) 加熱時間に対する最適加熱領域を導いた。最適加熱中心位置は加熱時間が長くなるとき裂先端に近づく。
- (5) 解析と実験結果の傾向はよく一致した。

参考文献

- 1) 今井康文, 森田英毅, 高瀬 徹, 古賀博之: ぜい性材料の熱応力による切断加工の可能性, 日本機械学会誌, 55, 509 (1989) 147.
- 2) A.Saimoto, Y.Imai and H.Sawada: Thermal Stress Cleaving of a Thin Strip Using a Point Heat Source, *Advances in Fracture Research*, ICF9, Sydney, (1997) 2095.
- 3) M.Abramowitz and A.Segun: Handbook of Mathematical Functions, 5th ed., Dover, New York, (1968) 228.
- 4) 西谷弘信, 陳玳行, 才本明秀: 体積力法による二次元汎用プログラム, 培風館, (1994).