

# パルス YAG レーザによる脆性材料の割断加工\*

— Si ウエハ割断における熱応力解析 —

山田 啓司\*\*

西岡 真吾\*\*\*

細川 晃\*\*

上田 隆司\*\*

Cleaving Process of Brittle Materials with Pulsed YAG Laser

— Thermal Stress Analysis in Cleaving Process of Silicon Wafer —

Keiji YAMADA, Shingo NISHIOKA, Akira HOSOKAWA and Takashi UEDA

Laser cleaving process is a prospective technique to divide a thin plate of brittle materials into small pieces, because of its high yield ratio and controllability. In addition, the process is carried out without coolant which causes the environmental pollution and the contamination of the electrical devices etched on the wafer. In this paper, laser cleaving of silicon wafer is conducted with pulsed Nd:YAG laser. The temperature of laser spot is measured by means of the two-color pyrometer with optical fiber and the acoustic emission caused by crack propagation is also observed. When the laser spot is scanned at the appropriate interval and velocity, the crack propagates in sequence by the corresponding laser irradiation. As a result, both high linearity of cleaved edge and fine fractured surface roughness are obtained. The thermal stress distribution induced by laser irradiation is analysed with FEM model, in which the stress intensity factor is calculated at the vicinity of the crack tip in order to clarify the criterion of crack propagation. The analysis and experiments reveal that the maximum tensile stress at the crack tip increases with temperature and the crack propagates when the stress intensity factor reaches the fracture toughness of the material.

**Key words :** Nd:YAG laser, silicon wafer, laser cleaving process, thermal stress, stress intensity factor, FEM analysis, acoustic emission

## 1. 緒 言

ガラス、ファインセラミックス、各種半導体材料など脆性材料を精密に切断する方法として、レーザ照射によって生じる熱応力を利用した割断加工が注目されている<sup>1)2)</sup>。レーザ割断では、切り代が微小で歩留まりが高い、加工液が不必要で加工時のパーティクル発生もないので材料汚染がない、機械的外力が必要としないので材料保持のための段取り作業が少ないなどの利点がある。

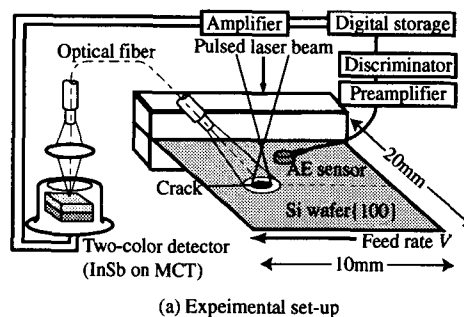
Lumley がレーザ割断加工を紹介して<sup>3)</sup>以来、レーザ割断に関する様々な研究が行われてきた。たとえば、液晶ガラスのレーザ割断における加工品位・能率向上に関する研究<sup>4)</sup>、材料の冷却による加工部熱損傷の軽減技術<sup>5)6)</sup>、特殊な色付きガラスを対象として曲線状に割断加工を行った例<sup>7)</sup>などがある。これらの研究で用いられるレーザはいずれも連続照射であり、表面に電気回路を作製したウエハのダイシング工程で重要な問題となる照射部の熱損傷を抑制するためには、冷却装置を付加する必要がある。

これに対して、筆者らは前報<sup>8)</sup>において、熱損傷の少ないパルスレーザを用いる割断加工法を提唱し、照射条件と照射部温度の関係、き裂進展が誘起される臨界温度、AE 波形観測による副き裂発生<sup>9)</sup>の監視などについて検討した。本論文では、Si ウエハに Nd:YAG レーザをパルス照射して割断加工を行い、き裂進展時の AE 波およびレーザ照射点温度を測定している。測定結果に基づいてき裂先端近傍の熱応力解析を行い、き裂進展条件の詳細について検討する。

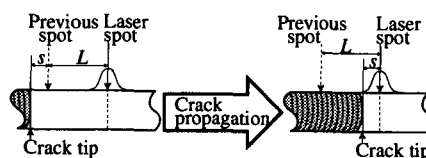
## 2. 割断加工実験

### 2.1 実験方法

実験装置の概略を図 1(a)に、実験条件を表 1 に示す。加工物は、き裂進展方向が Si ウエハの 0.F. と同方向  $\langle 01\bar{1} \rangle$  となるよう、 $\phi 5$  インチウエハから切り出して作製している。ウエハの研磨面に Nd:YAG レーザを照射すると、照射部の温度上昇によって照射点近傍には圧縮、その周囲には引張応力が発生し、引張応力場にある先在き裂が照射点に向かい進展する。パルス周波数  $f$  でレーザ照射しつつ加工物を速度  $V$  で移動させると、一回のレーザ照射ごとに照射点は距離  $L=V/f$  だけ移動することとなる。したがって、図 1(b)に示すように、き裂進展—照



(a) Experimental set-up



(b) Detail of crack propagation

Fig.1 Schematic illustration of cleaving process with pulsed laser

\* 原稿受付 平成14年6月3日

\*\* 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

\*\*\* (株)富士通ゼネラル (川崎市高津区永末1116)

**Table 1** Experimental conditions in cleaving process

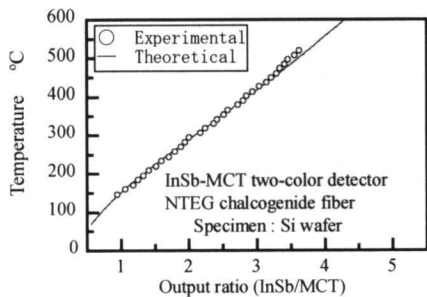
Workpiece			
Material : Si wafer (surface {100} is irradiated)			
Dimension : 10 X 20 X 0.5 mm			
Laser			
Wave length :	$\lambda$	[nm]	1064
Peak power :	$P$	[W]	328~567
Pulse duration :	$\tau$	[ms]	0.7~3.0
Pulse cycle :	$f$	[Hz]	10
Beam radius :	$w$	[ $\mu$ m]	900
Feed rate :	$V$	[mm/s]	3.33~10
InSb-MCT two-color pyrometer			
NTEG chalcogenide fiber : $\phi=300 \mu$ m			
Measuring distance : $t=5$ mm			
AE measuring system			
Sensor : Size $\phi 5 \times 3.2$ mm, Frequency band 1~4MHz			
Preamplifier : Gain 40dB, Frequency band 100~20MHz			
Discriminator : Gain 60dB, Frequency band 20k~2MHz			

射点移動の過程が繰り返しながら、照射点に追従してき裂が進展し、加工物の割断に至る。図中の  $s$  は、き裂が進展を停止したときのき裂先端とレーザー照射点との距離である。今回の実験では、割断ラインは片持ち支持した加工物の自由端から 10mm の位置で、照射開始位置にはビッカース圧子によって初期き裂を導入している。

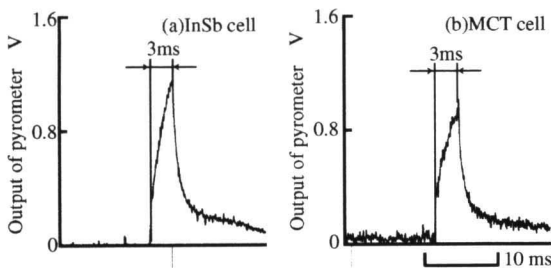
割断加工中、光ファイバ型 2 色温度計<sup>(8)-(11)</sup>を用いて、レーザー照射点の温度を測定している。図 1 (a) に示すように、温度計はカルコゲナイド光ファイバ、集光レンズおよび積層型 2 色素子 (InSb on MCT) から構成されている。図 2 に示す校正実験結果のように、150°C 以上の温度を精度よく測定でき、応答速度は約 100kHz と本実験に十分な速さを有している<sup>(11)</sup>。また、照射ラインから 5mm の位置に AE センサを設置し、割断加工中のき裂進展を監視している。Si 固体中の音速はおよそ 8400m/s と非常に高速なので<sup>(12)</sup>、き裂部で発生した AE 波がセンサに到達する時間は約 0.6 $\mu$ s と短い。したがって、き裂進展とほぼ同時に AE 波は観測される。

**2.2 加工部温度・AE 波観測結果**

Si ウエハをレーザー割断加工した際の、温度測定波形の一例を図 3 に示す。図 (a) が InSb 素子からの出力で、図 (b) は MCT 素子からの出力である。両素子ともに出力はレーザー照射開始か



**Fig.2** Calibration results of two-color pyrometer



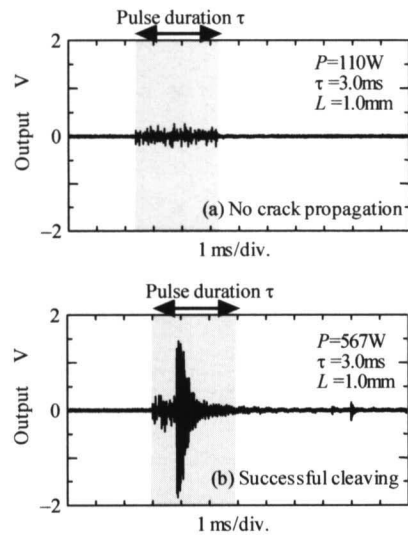
**Fig.3** Output waves of pyrometer in cleaving with pulsed laser ( $P=450$ W,  $f=10$ Hz,  $V=3.33$ mm/s,  $\tau=3.0$ ms)

ら上昇し、照射終了時に最高値に達している。これら両素子の出力の比をとり、図 2 の校正曲線から照射部温度を得ることができる。

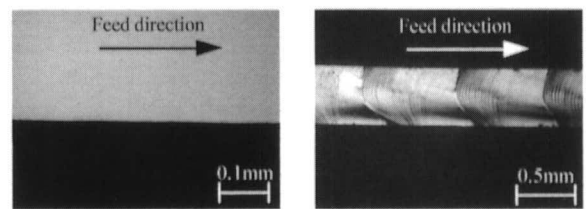
図 4 は、パルス幅  $\tau=3.0$ ms、レーザー照射点間隔  $L=1.0$ mm の場合の AE 測定波形である。レーザーピーク出力が  $P=110$ W と低い場合にはき裂は進展せず、図 (a) に示すように、AE 波形にも明確な出力は見られない。一方、図 (b) の  $P=567$ W の場合には良好な割断加工が行われる。レーザー照射開始からの時間  $T=1.1$ ms において大きな AE 出力が観測されており、このときき裂が進展したことがわかる。次章の熱応力解析においても、き裂進展時 ( $T=1.1$ ms) の応力分布について扱うものとする。また、図 4 (b) と同条件下における照射点温度は、レーザー照射終了時  $T=3$ ms でスポットの平均温度  $\theta_m$  が 400°C、スポット中心温度  $\theta_0$  は約 600°C である<sup>(8)</sup>。き裂進展時 ( $T=1.1$ ms) の照射部温度は、次章の解析によって求めている。

**2.3 き裂進展部の詳細**

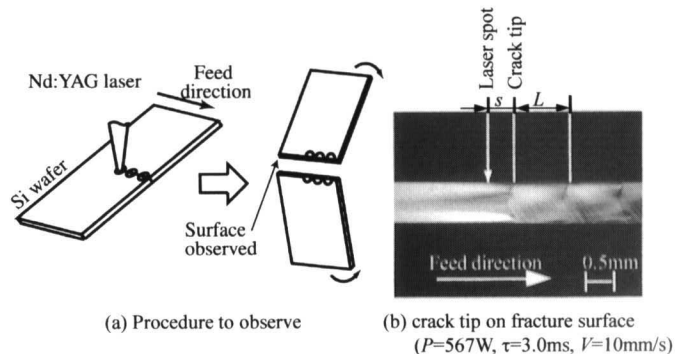
図 5 に、割断加工後のレーザー照射面および割断面の観察例を示す。図 (a) では割断されたエッジ部を照射面側から観察し



**Fig.4** AE signals during laser irradiation in cleaving of Si wafer



**Fig.5** Photographs of silicon wafer cleaved with laser ( $P=328$ W,  $\tau=2.5$ ms,  $V=6.66$ mm/s)



**Fig.6** Investigation of crack tip location ( $P=567$ W,  $\tau=3.0$ ms,  $V=10$ mm/s)

ているが、照射部には熱損傷が原因の照射痕は見られず、直線性も優れていることがわかる。図(b)に示す切断面には、レーザー照射点間隔 $L(=V/f)$ に等しい間隔で縞模様が見られ、切断面あらさは $Ra=2.1\mu\text{m}$ である。

レーザー照射された際のき裂進展条件を明らかにするために、き裂先端の位置を特定する必要がある。そのためには、図1(b)に示した $s$ を調べ、次なるレーザー照射点までの距離 $s+L$ を明らかにしなければならない。そこで、図6(a)に示すように、加工物中央部でレーザー切断加工を止めた加工物に外力を負荷して割り、断面を観察した。図6(b)には、ピーク出力 $P=567\text{W}$ 、パルス幅 $\tau=3.0\text{ms}$ 、照射点間隔 $L=1.0\text{mm}$ の条件下における断面観察例を示す。レーザー切断が行われた箇所には、断続的なき裂進展を示す一定間隔 $L$ の縞模様があるが、外力を与えて機械的に割られた箇所には縞模様は見られない。図から、レーザー照射点とき裂先端の間の距離 $s$ を測定できる。同条件で5回の測定を行った結果、き裂先端とレーザー照射点の距離は平均で $s=0.28\text{mm}$ であった。したがって、上記条件で継続的に切断加工が行われるときには、照射点から $s+L=1.28\text{mm}$ だけ離れた位置に先端のあるき裂が、レーザー照射により生ずる熱応力のために進展することとなる。

### 3. 熱応力解析

#### 3.1 解析モデル

熱応力解析には汎用構造解析プログラムMARCを使用した。解析に用いたFEMモデルを図7に、解析条件を表2に示す。実験に用いた加工物と同じく、外寸 $10 \times 20\text{mm}$  (0.5厚) のモデルが $-x$ 方向に送られながら切断加工が行われるとしている。モデルは、8節点アイソパラメトリック要素を用いて、節点数

Table 2 Conditions in thermal stress analysis

Laser (Nd:YAG)		
Peak power	$P$	567 W
Pulse duration	$\tau$	3.0 ms
Laser spot spacing	$L$	1.0 mm
Beam radius	$w$	900 $\mu\text{m}$
Absorptivity	$\alpha$	63 %
Workpiece (Si wafer)		
Dimension : 10 X 20 X 0.5 mm		
Thermal conductivity <sup>(13)</sup>		156 W/(m K)
Specific heat <sup>(13)</sup>		761 J/(kg K)
Density <sup>(13)</sup>		$2.34 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Expansion coefficient <sup>(14)</sup>		$2.62 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Young modulus <sup>(14)</sup>		117.4 GPa
Poisson ratio <sup>(13)</sup>		0.262
Initial temperature		20 $^{\circ}\text{C}$

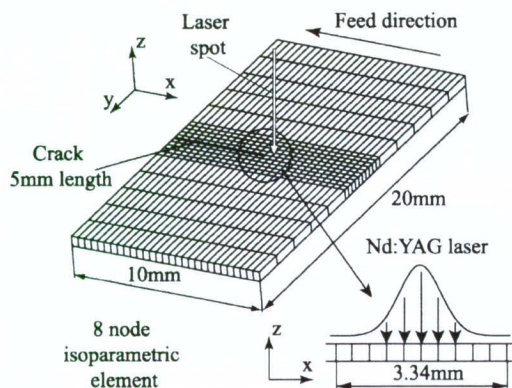


Fig.7 Finite element model in thermal stress analysis

6030、要素数1880に分割している。切断加工が加工物中央にまで進んだ場合に、レーザー照射時のき裂付近における応力分布を求めるため、長辺の中央には長さ5mmのき裂を導入している。このき裂先端から $s+L=1.28\text{mm}$ だけ離れた位置にガウス分布(スポット半径: $w=900\mu\text{m}$ )で近似したレーザー光をパルス照射する。レーザー光吸収率 $\alpha$ は、前章における測定温度と解析温度が一致するように決定した。なお、材料物性値の異方性は考慮していない。

#### 3.2 温度分布・応力分布

図8に、解析によって求めたSiウエハの照射面温度分布を示す。先在するき裂の影響を受けることなく、レーザースポット

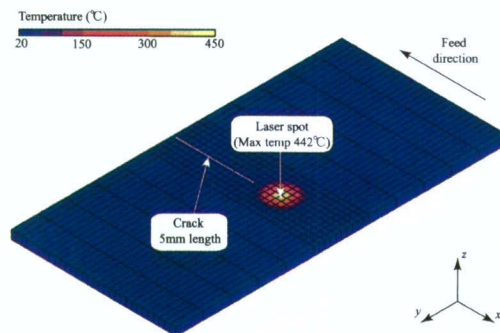


Fig.8 Temperature distribution in Si wafer cleaved with laser ( $T=1.5\text{ms}$ )

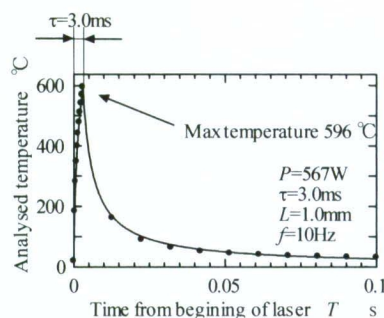


Fig.9 Temperature history at center of laser spot

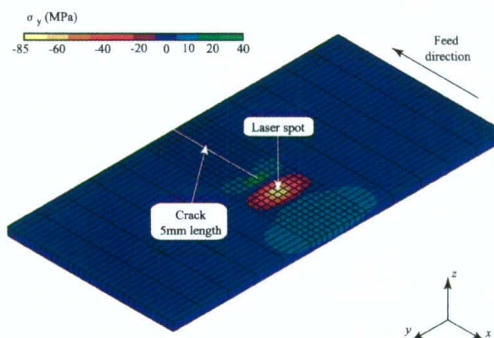


Fig.10 Thermal stress distribution in Si wafer cleaved with laser ( $T=1.5\text{ms}$ )

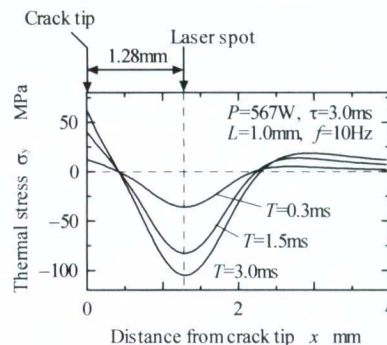


Fig.11 Distribution of thermal stress  $\sigma_y$  in x-direction

中心に対して軸対称な温度分布となっている。

スポット中心の温度履歴を図9に示す。図から、レーザー照射開始からの時間  $T$  が大きくなるにしたがい、レーザースポット中心の温度  $\theta_0$  は上昇し、照射終了時の  $T=3.0\text{ms}$  においては  $\theta_0=600^\circ\text{C}$  に達している。

図10には、き裂を開口する方向の応力  $\sigma_y$  の分布図を示す。レーザースポット中心部には圧縮応力が働き、その周辺には引張応力場が存在している。図から、スポット中心から  $1.28\text{mm}$  の位置の先在き裂先端は引張応力場の中にあることがわかる。

図11は、き裂先端を原点、き裂進展方向を  $x$  軸とした場合の応力  $\sigma_y$  の分布をグラフ化して示している。レーザー照射開始からの時間  $T$  が大きくなるに伴って、発生する熱応力が増大する傾向にある。レーザースポット中心部で圧縮応力は最大となり、引張応力の最大値はき裂先端 ( $x=0$ ) において発生している。また、 $T$  が変化しても、最大応力の生ずる位置は変化しないことがわかる。

#### 4. 切断加工条件の検討

##### 4.1 応力拡大係数の算出

き裂を有する材料に引張応力が負荷されると、き裂先端に応力集中が起こる。前章で定義した座標を用いれば、 $x$  軸上における応力は  $\sigma_y=K_I/(2\pi x)^{1/2}$  と表すことができる<sup>15)</sup>。そこで、熱応力解析結果を元に、応力法によってき裂先端の応力拡大係数  $K_I$  を求めた。

図12は、き裂進展時の AE 出力、レーザースポット中心温度、き裂先端の  $K_I$  の変化であり、レーザー照射開始からの時間  $T$  を

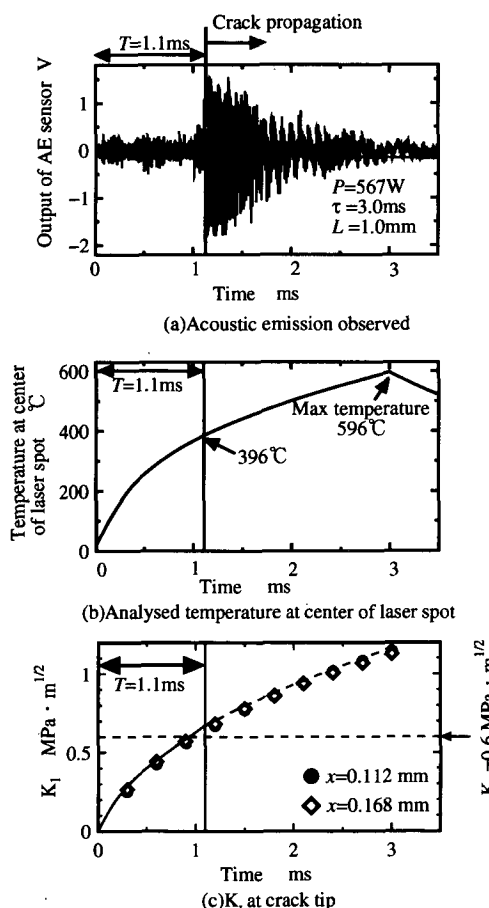


Fig.12 Variation of temperature and stress intensity factor with time in cleaving of Si wafer with pulsed laser ( $P=567\text{W}$ ,  $\tau=3.0\text{ms}$ ,  $L=1\text{mm}$ )

横軸として示している。ここで図(c)に示す  $K_I$  は、き裂先端からの距離が  $x=0.112\text{mm}$ ,  $x=0.168\text{mm}$  の二節点における応力値  $\sigma_y$  を用いて算出したが、両者から求めた  $K_I$  の値に差はなかった。

図(a)に示す AE 波形から、 $T=1.1\text{ms}$  において大きな出力が観察され、き裂が進展する。レーザーが照射されるにともない、レーザースポット中心温度  $\theta_0$  は上昇し、熱応力が増大するため、き裂先端の  $K_I$  も大きくなる。き裂が進展する  $T=1.1\text{ms}$  においては、図(b)より  $\theta_0$  約  $400^\circ\text{C}$ 、図(c)から  $K_I=0.65\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  に達している。圧子押込みによる簡便法 (IM 試験)<sup>16)17)</sup> によって実験材料 Si ウエハの破壊靱性値  $K_{IC}$  を測定した結果、 $K_{IC}=0.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  であり、解析により得られた  $T=1.1\text{ms}$  における  $K_I$  の値とよく一致している。

以上の結果より、 $T=1.1\text{ms}$  においてき裂先端の応力拡大係数が材料の破壊靱性値を越え、き裂が進展したことが解析的にも確かめられたといえる。

##### 4.2 加工条件の検討

図12(b)より、き裂進展後も照射点の温度は上昇しており、同図(c)では、照射終了時にはほぼ  $K_I=1.2\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  にまで増大している。パルス幅  $\tau$  を大きく設定し  $K_I$  が上昇することで、レーザー出力や送り速度の変動に対しても安定した切断加工が可能となるが、同時にウエハへの熱損傷も増大すると考えられる。したがって、パルス幅はき裂進展が始まる  $1.1\text{ms}$  以上であれば十分であるといえる。

図13は、レーザーピーク出力  $P=567\text{W}$ 、送り速度  $V=10\text{mm/s}$  (照射点間隔  $L=1.0\text{mm}$ ) の条件下で切断加工した際の、パルス幅  $\tau$  と照射痕半径  $r_D$  の関係である。図中、き裂が進展し、正常に切断加工が行われた結果を白丸で、き裂が進展せずに加工が行われなかった結果を黒丸で表している。 $\tau$  が増大とともに Si ウエハの照射される時間は長くなり、照射面に残る  $r_D$  は増大する傾向にあるので、熱損傷を軽減するという観点からは  $\tau$  が小さいことが望ましい。しかし、 $\tau$  が  $1.1\text{ms}$  以下と小さい場合には、発生する熱応力が小さく、応力拡大係数  $K_I$  も破壊靱性値を上回らないためにき裂が進展しない。

したがって、 $\tau$  はき裂先端において  $K_I > K_{IC}$  が成り立ち、き裂が進展する最小時間 ( $T=1.1\text{ms}$ ) に設定されるべきである。レーザーピーク出力  $P$ 、照射点間隔  $L (=V/f)$  に関しても、同様にき裂先端の  $K_I$  について検討して、熱損傷を抑制した最適な加工条件を設定することが可能である。

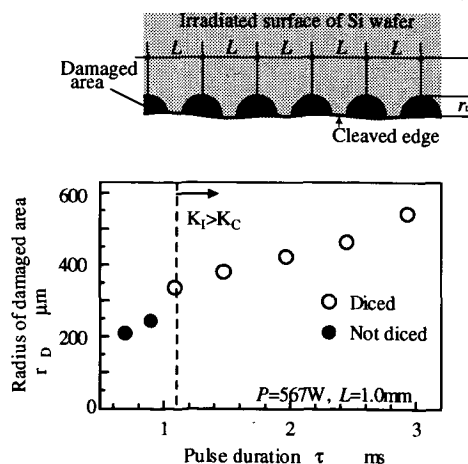


Fig.13 Relation between pulse duration and thermal damages on irradiated surface ( $P=567\text{W}$ ,  $L=1\text{mm}$ )

## 5. 結 言

本論文では、Nd:YAG レーザをパルス照射して Si ウエハの切断加工を行い、照射点の温度と AE 波を測定した。また、実験による測定結果を元に熱応力解析を行うことで、き裂の進展機構について検討した。本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 切断加工時に発生する AE 波を観測することで、レーザー照射中のき裂進展を監視することができる。本実験の条件下では、レーザー照射開始からの時間  $T=1.1\text{ms}$  においてき裂が進展した。
- (2) き裂進展時の熱応力解析結果から、圧縮応力の最高値はレーザー照射点に、引張応力の最高値はき裂先端に発生しており、発生位置はレーザー照射時間が長くなっても変化しない。
- (3) 解析結果から求めたき裂先端の応力拡大係数は  $0.65\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  となり、この値は、IM 試験によって測定した Si ウエハの破壊靱性値  $0.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  とよく一致していた。したがって、パルスレーザーを用いた切断加工について、本解析手法によりき裂を継続的に進展させる加工条件を求めることができる。
- (4) 解析結果の妥当性を確認するため、パルス幅を変化させた加工実験を行った結果、き裂進展が生じるために必要な照射時間は解析結果と一致した。

## 謝 辞

本研究の一部は、平成 12～13 年度文部科学省科学研究補助金（奨励研究(A)，課題番号 12750095）によるものであることを記してお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 沖山俊裕：レーザー切断，精密工学会誌，**60**，2(1994)196.
- 2) 黒部利次：YAG レーザによる精密切断技術，精密工学会誌，**65**，11(1999)1556.

- 3) R. M. Lumley : Controlled Separation of Brittle Materials Using a Laser, The American Ceramic Society Bulletin, **48**, 9(1969)850.
- 4) 黒部利次，松本貴宏：液晶ディスプレイ（STN 方式）用基板ガラスの YAG レーザによる切断，精密工学会誌，**63**，7(1997)1018.
- 5) 黒部利次，市川和浩，永井久司：YAG レーザによるシリコンウエハの切断，材料，**44**，497(1995)159.
- 6) 黒部利次，野口通一，松本貴宏：YAG レーザによるシリコンウエハの精密切断—鏡面冷却二重照射切断—，精密工学会誌，**62**，1(1991)1018.
- 7) 中野康範，池野順一，河西敏雄：レーザーマイクロ加工に関する研究(第 1 報)—レーザーマイクロ切断—，2001 年度精密工学会春季大会学術講演論文集(2001)173.
- 8) 山田啓司，大磯桂一，細川晃，上田隆司：パルス YAG レーザによる Si ウエハの切断機構に関する研究，精密工学会誌，**67**，11(2001)1861.
- 9) 上田隆司，入山孝宏，杉田忠彰：レーザー照射部のフラッシュ温度測定，精密工学会誌，**61**，2(1995)278.
- 10) 山田啓司，小谷祐司，上田隆司：CO<sub>2</sub> レーザ加工における照射部温度と吸収率，精密工学会誌，**65**，1(1999)126.
- 11) 上田隆司，山田啓司，古本達明：YAG レーザによる歯科治療に関する研究，精密工学会誌，**66**，9(2000)1388.
- 12) 国立天文台：理科年表，丸善(1999)496.
- 13) 橋本宇一，谷口紀夫：非金属材料の精密加工法(上)，地人書館(1963)127.
- 14) A. Saimoto, Y. Imai and H. Sawada : Thermal Stress Cleaving of a Thin Strip Using a Point Heat Source, Advances in Fracture Research, ICF9(1997)2095.
- 15) 石田誠：線形破壊力学入門，培風館(1976)371.
- 16) 上田完次，杉田忠彰：セラミックスの破壊靱性，日本金属学会会報，**21**，4(1982)225.
- 17) A. G. Evans, E. A. Charles : Fracture Toughness Determinations by Indentation , Journal of the American Ceramic Society, **59**(1976)371.