

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06081

研究課題名（和文）電子デバイス用硬脆材基板のレーザ割断システムの構築

研究課題名（英文）System of laser cleaving process for substrate of brittle materials for electric devices

研究代表者

山田 啓司 (Yamada, Keiji)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：50242532

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：円弧状割断加工におけるき裂進展の逸脱現象を対象として調査し、実験において得た等傾線観察結果から、基板内の主応力方向分布図を得て、加工誤差原因となる応力分布非対称性を明らかとした。また、応力分布非対称性がレーザ走査中に変動するために加工誤差も加工中に変動することを明らかとした。さらに、基板材料の温度変化による光弾性係数の変動に起因する光弾性観察結果への影響を定量化するために、温度センサを内蔵ひずみゲージを使用して検証実験を実施し、影響を補償した観測結果を得るための手法を考案した。また、シリコン等の単結晶基板の割断加工における割断方位の影響を補正する手法を提案し、実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、レーザを熱源として脆性材料基板を切り分ける熱応力割断加工において、加工中の応力分布状態をリアルタイムに観測するシステムを構築し、より高速で高精度な加工を実現することを目的としている。レーザ割断加工法では、加工力による基板材料の損傷を生じないために基板の薄型化に対応可能であり、き裂進展による材料分断は加工くずを発生しないために基板汚損の問題も生ず、高いスループットが期待できる。本加工法の高精度化には熱応力分布制御が必要不可欠であり、従来の理論的熱応力解析では対応できない外乱による分布の乱れを監視する方法の適用は、同加工法の工業化に大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：Deviation of crack was investigated in laser cleaving with circular scanning path, then it was proved from the isoclinic lines observed during the cleaving process that the asymmetrical distribution of stress causes the deviation. And it was also demonstrated that the asymmetry of stress varies during the process. Next, the experiments were conducted using strain gauges with built-in temperature sensor in order to evaluate a fluctuation of photoelastic coefficient by temperature rise in the process, then compensation method was proposed. In addition, a compensation procedure was proposed for the influence of cleaving orientation on the observed stress distribution with single crystal substrates such as silicon.

研究分野：精密加工

キーワード：レーザ加工 熱応力 割断 半導体基板

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

表示デバイス基板に広く使われているガラス基板や電子デバイス用基板等の作製時には、硬脆材基板材料の切断・小片化工程を必要とする。レーザを熱源とした熱応力割断加工(以下、レーザ割断加工と呼ぶ)は、レーザ照射点周りの熱応力を利用して初期き裂を進展させ、所望の形状に硬脆材料基板を分断する方法である。したがって、基板にき裂を進展させるに十分な熱応力を継続的に生じさせることとともに、その分布を適切に維持することが求められる。

そのため、多くの研究者によってレーザ照射条件および照射部近傍の冷却条件の最適化が図られてきた。その研究手法は、実験条件と加工結果の相関関係、あるいは理論的解析結果から、もしくはそれらの両方を併用してき裂進展機構を調査し、支配的な加工条件の推奨範囲を明らかとすることが多い。き裂進展は本質的には応力分布に依存しているため、加工中の応力分布を明らかとすることはもちろん重要であるが、様々な外乱のために理論的に予測された応力分布が得られず、このために加工誤差を生ずることが多い。この対策としては、応力分布の乱れをインプロセスで検知することが第一に求められる。本研究課題応募者は、これまでの研究を通じて、インプロセスで熱応力分布を監視する重要性に着目し、応力場を乱さない観察のため光弾性手法を適用することを着想し、急激な温度勾配を有するレーザ照射点の周囲に存在する、き裂を進展させる応力場を可視化する観測系を開発している (Fig.1 参照)。

2. 研究の目的

本申請課題では、レーザを熱源とした熱応力割断加工において、加工中に応力分布をリアルタイム観測する実験システムを改良し、赤外光源と赤外撮像素子とを組み合わせた観測光学系を新たに増設して従来は観察できなかった硬脆材基板にも提案システムを適用し得るようにする。さらに、このシステムを用いた観察結果を検証し、割断加工の異常検知、加工誤差抑制のための観察結果を蓄積し、提案システムの有効性を確認して、硬脆材基板の割断加工の精度を向上することを目的とする。

3. 研究の方法

既存のレーザ熱応力割断実験装置を改良して、赤外線撮像素子と観測光学系からなる赤外線光弾性観察部を追加構築する。レーザ熱応力割断実験装置の全体構成は、波長の異なる二つのレーザ(観察用光源と応力割断用熱源)を備え、さらに、安定したき裂進展を検知するためのアコースティックエミッション(AE)波観測系を組み込む。

観測光学系には光弾性観察を実施するため ND フィルタ、偏光子、検光子、1/4 波長板、ミラーが組み込まれている。テーブル上に保持された基板には AE センサが圧接されており、AE 波形から割断加工中のき裂進展イベントを監視する。また、基板にはひずみゲージを貼付しており、割断加工中に材料に生じるひずみを計測するために用いる。ひずみゲージは熱電対を内蔵したのを使い、レーザスポットがゲージ近傍を通過する際の温度変化を測定するとともに、測定したひずみの温度補正を行う。

さらに、提案手法を単結晶材料へと拡張するため、結晶方位と割断方向の関係によって生じる観察誤差を保証する方法について検討する。既知の応力分布状態の基板を用いた光弾性観察のために、任意の結晶方位で切り出した基板材料を一軸引張試験するシステムを構築し (Fig.2)、種々の結晶方位に引張応力を付加した条件で光弾性観察を行って、等傾線を取得した。この結果を応用し、レーザ割断加工時の応力分布場を補正する手法を提案する。

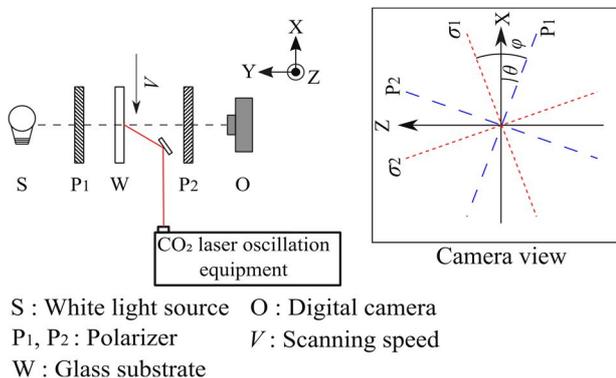


Fig. 1 Experimental system for isoclinic fringe observation in laser cleaving

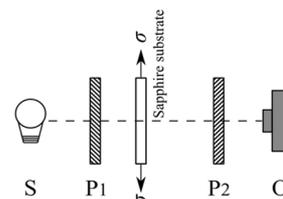


Fig. 2 Experimental system for tensile test

4. 研究成果

Fig.3 には、光弾性観察によって取得できる等傾線ならびに等色線をもとに、簡単な計算式から応力分布図を得る手順を示している。

図示した観察系によって得られる透過光強度は次式で示され、

$$I = A^2 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

式中の位相差 δ は次式のように基板に生ずる主応力差に依存する。

$$\delta = 2\pi d(\sigma_1 - \sigma_2)C/\lambda \quad (2)$$

ここで、 φ は主応力方向と偏光子の光学主軸との角度であり、 d は基板厚さ、 λ は観察光波長、 C は材料によって決まる光弾性係数である。一般的に割断加工に供される基板は薄く二次元応力状態とみなされ、次式がなりたつ。

$$\sigma_x = \frac{E(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_z)}{1 - \nu^2}, \sigma_z = \frac{E(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_x)}{1 - \nu^2} \quad (3)$$

$$\tau_{zx} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \tan(\varphi - \theta) \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{zx}^2}}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (5)$$

これらの簡単な計算と等傾線によって等主応力差の分布図を得られる。これによってき裂進展方向を決定するき裂先端付近の応力分布を観察可能である。

さらに、提案手法 (Fig.3) を単結晶材料へと拡張するため、結晶方位と割断方向の関係によって生じる観察誤差を保証する方法について検討した。既知の応力分布状態の基板を用いた光弾性観察のために、任意の結晶方位で切り出した基板材料を一軸引張試験するシステムを構築し (Fig.2), 種々の結晶方位に引張応力を付加した条件で光弾性観察を行って、等傾線を取得した。この結果を応用し、レーザ割断加工時の応力分布巣を補正する手法を提案した。基板を透過する光の強度は式(1)に従うはずなので、Fig.1 中の角度 θ (主応力方向と入射観察光の偏光方向とのなす角度) がゼロとなる箇所暗線が生ずるはずであるが、結晶方位の影響で複屈折方向がずれてしまうときには、引張試験中の負荷方向と偏光方向を一致させても暗線が生じ

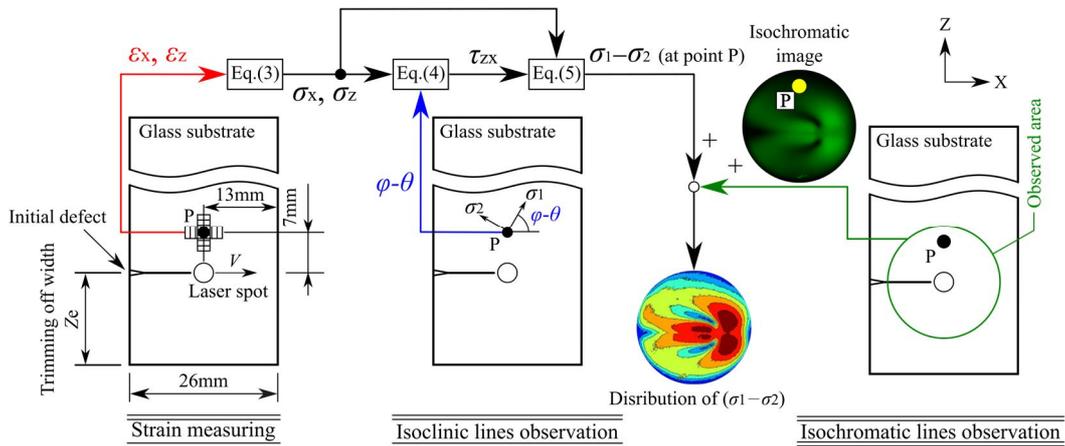


Fig. 3 Procedure to obtain distribution of principal stress difference ($\sigma_1 - \sigma_2$).

ない．したがって引張試験中の基板を観察しながら偏光子を回転させて暗線が生ずる偏光子角度を得れば，これによって複屈折方向のずれ量 (Fig.5 右図中の) を得ることができる．

Fig.4 に示す結果は，円弧状にレーザー光を走査して基板の端部を円弧状に割断した場合の主応力方向分布を示しており，(a)端部から離れた基板中央部と(b)端部に近い割断開始点近くの応力分布状態を比較している．いずれの結果でも実線は発生している主応力の方向を表しており，破線はレーザースポットの走査線である．点線で示されるき裂の進展は，基板中央部では走査線に追従しているのに対して，割断開始直後には，基板エッジの影響によってき裂が走査線からずれてしまうことがわかる．

Fig.5 には，サファイア単結晶基板を実験材料とした引張試験時の複屈折方向のずれと結晶方位の関係を示している．グラフ中の角度記号は Fig.5 中の右図に示す関係となっており，結晶異方性がない場合の複屈折方向は主応力の方向 P_1 に一致するが，単結晶の場合には bir と記されている実験観察によって得られる複屈折方向へとある角度だけずれてしまう．今回，検証に用いた基板では $\approx 7.5^\circ$ のずれが生じたことが分かり，種々の結晶方位に対するずれ角度を得る実験手法を確立できた．最後に，引張試験によって得た複屈折方向のずれを利用して，割断加工中に観察できる主応力分布を補正する手法を提案できた．

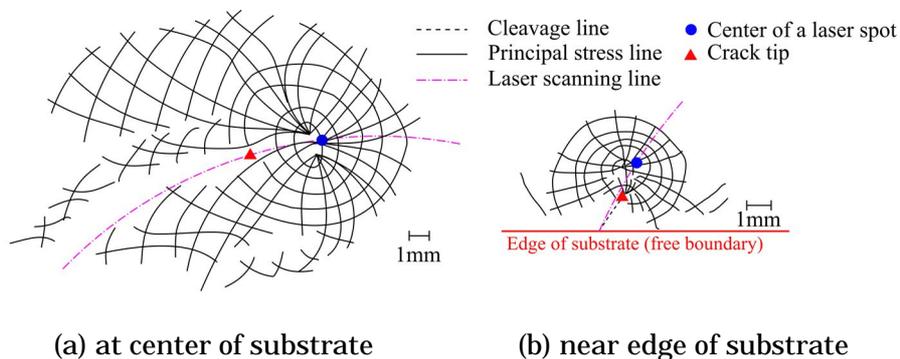


Fig. 4 Influence of crack tip position to distribution of principal stress direction ($V=100$ mm/min).

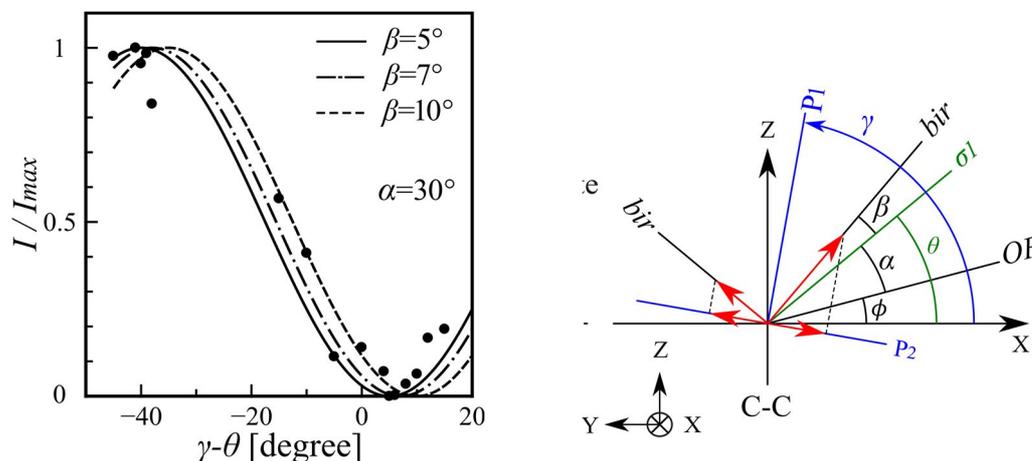


Fig. 5 Birefringence direction in single crystal substrate under unidirectional tension test.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuki Nakajima, Keiji Yamada, Kazuki Fukushima, Ryutaro Tanaka and Katsuhiko Sekiya	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental Study on the Relationship between Direction of Crack Propagation and Thermal Stress Distribution in Laser Cleaving Process for Glass Substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Laser Micro/Nanoengineering	6. 最初と最後の頁 161-167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2961/jlmn.2019.02.0008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田啓司
2. 発表標題 ガラスの曲線状レーザー切断におけるき裂進展方向 と主応力方向の関係
3. 学会等名 2018年度砥粒加工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田啓司
2. 発表標題 光弾性を応用したレーザー切断加工における応力分布評価法
3. 学会等名 2019年度 第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----