

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760082
 研究課題名 (和文) 光ファイバ伝搬光によるシリコンの次世代スライシング法の開発
 研究課題名 (英文) Slicing of silicon by direct irradiation of laser beam transmitted through optical fiber
 研究代表者
 比田井 洋史 (HIDAI HIROFUMI)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
 研究者番号：60313334

研究成果の概要 (和文)：

太陽電池や半導体はインゴットと呼ばれる塊をスライシングにより薄片化し、その後表面に回路などを作ることで製造されている。この薄片化には硬質の微粒子をかけながら、ワイヤをこすりつけるワイヤソーを用いて切断している。この時の切り代が大きく材料の半分程度が無駄になっている問題がある。本研究では光を使うことでの切断を試みた。インゴットのような深い溝底部に光を供給するために光ファイバを用いて光を供給する手法を主に検討した。

研究成果の概要 (英文)：

Solar cells and semiconductor substrates are manufactured by sliding ingots. Nowadays ingots are sliced by wire saw. Kerf loss by the slicing was approximately half of the ingots and the reduction of kerf loss is strongly required. In this project the reduction of kerf loss was tried by using the laser light delivered through optical fibers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：レーザ, ファイバ, スライス

1. 研究開始当初の背景

単結晶シリコンなどの半導体基板用結晶材料は、単結晶インゴットをスライシング後、研磨してウエーハを得ている。シリコンの場合、スライシングにはワイヤソーが用いられているが、このスライシングによって切りくずとなるシリコンの無駄、すなわちカーフロ

スの大きいことが問題視されている。この材料の無駄を減らすために、ワイヤの細線化が試みられているが、ワイヤの機械的強度には限界があり、これ以上の細線化は極めて難しい。そこで、より小さい反力で加工でき、ワイヤソーのワイヤほど機械的強度を必要としない、プラズマ、放電加工などによるスラ

イシングが提案されている。

2. 研究の目的

本申請では、図1に示すように光ファイバの端面から光を出射させ、このファイバをバンドルする方法や、側面からレーザー光を漏出させ、この光によってエッチングを促進させてシリコンをスライシングする、次世代のスライシング技術を提案し、その可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) デリバリ方法

インゴットのようなアスペクト比の大きい切断では切断部の奥まで光を届かせるのは容易ではない。従ってファイバを使用して光を導入する。その導入手法は図1に示す2通が考えられる。

(a)は端面よりレーザー光を照射するもので、照射エネルギーは大きなものが得られるが、照射領域は小さい。これに対し、(b)に示すファイバ側面から照射する方式では、エネルギー密度で劣るものの、照射点を広くできる。ファイバ側面から照射するためには、ファイバに加工を施し、光を漏らす必要がある。そこで、図2に示すようにファイバの側面にUVレーザー光を照射しクラッドを除去することで側面からの漏出を検討した。

(2) レーザの選定

加工物であるシリコンの光吸収係数が大きく、光ファイバで伝送可能であることを考慮し、連続発振のアルゴンイオンレーザー(波長488nm, 514nmなど)ならびにパルス発振のNd:YLF レーザ第2高調波(527nm)を選んだ。試しに、光ファイバの伝送効率の高いNd:YAGレーザーの基本波で同様の装置を用いて照射を行った。しかし、同一出力での除去速度で上記のレーザーを下回る結果しか得られなかった。アルゴンイオンレーザーは、マルチライン出力で使用した。レーザー光のパワーはファイバの出射端で測定した。

(3) 光ファイバと腐食液の選定

シリコンの腐食は、六フッ化硫黄(SF₆)、塩素(Cl₂)等のガスを用いるドライプロセスと、フッ化水素酸やアルカリ系の水溶液を用いるウェットプロセスの2種類に大別される。一般的にウェットプロセスの方が単位体積あたりの腐食イオンが多いので反応速度が大きい。エッチングレートが高く、作業性の高い腐食剤としてフッ化水素アンモニウム(NH₄HF₂)、水酸化カリウム(KOH)が知られる。フッ化水素アンモニウムとシリコンは光を照射することにより反応し、レーザー光照射部でのみ選択的に除去が行える。また、同じ出力のビームを照射した場合、アルカリ系の腐

食液に比べ、エッチングレートが高い。しかし、ガラスを溶解するため石英ファイバの使用ができず、耐許容エネルギーの小さいプラスチックファイバを使用することになる。プラスチックファイバを用いると、耐許容エネルギーは1W程度でエッチングレートは最大で6μm/min程度と低く、さらにファイバがシリコンと接触すると、ファイバの照射端面が溶融して安定した除去が行えないことがわかった。

石英ファイバを用い、出力5Wで照射した。石英ファイバは照射開始直後から多量の気泡を発生して溶解し、レーザー光がファイバの先端で乱反射して、除去が行えなくなった。以上より、石英ファイバを用いて高い出力のレーザー光を供給して、安定した除去が期待できるアルカリ系の腐食液で、特に高い除去率の水酸化カリウムを採用することにした。水酸化カリウムはシリコンと直接反応し、レーザー照射部以外でもエッチピットが多数発生する。そこで筆者らは、酸化剤としてH₂O₂を添加することでシリコン表面に酸化膜を常時生成し、レーザー光照射部でのみ選択的に除去を行えるようにした。

光ファイバには、作業性を考慮してコア径200μmクラッド径220μmのマルチモードステップインデックス型の石英ファイバを用いた。ファイバへのビームの入射には焦点距離6mmの対物レンズを用いた。また、ファイバをステージに固定して、シリコンとファイバ端面が接触するようにした。指定の無い限りファイバは初期位置に固定したままとし穴への送り込みは行っていない。

加工物には厚さ0.5mmのシリコンウェーハを用いた。シリコンのウェットエッチングでは、腐食液の金属汚染がエッチングレートや加工形状に影響を与えることが報告されている。そこで、シリコンをテフロン製の治具に固定し、ポリプロピレン性の浴槽を用いて腐食液に浸した。

以上のレーザー実験条件の詳細を表1にまとめる。

4. 研究成果

(1) 側面からの漏出

そこで図2に示すように、ファイバの一端よりLD光を導入し、他端でこれを受光するシステムを作り、この状態でファイバにレーザー光を照射した。Nd:YAGレーザーを集光しないで照射した結果が図3(a)、集光したフェムト秒レーザーによりファイバの一部を加工した結果を同図(b)、(c)に示す。同図(a)の場合で異なった照射エネルギー密度で照射パルス数を変化させた場合の漏れ光の割合、すなわち(導入光量・受光量)／導入光量の関係を図4に示す。これより照射パルス数を選ぶことによりファイバ側

面から漏出する光量を制御できることがわかる。なお、直径 0.1mm の光ファイバには 200W 程度のレーザー光を導入できることから、漏出面積を精度良く作り出すことによって高エネルギー密度のレーザー光を加工点に照射できるものと考えている。

(2) 漏出光による加工

図 1 (a) の端面からの照射の結果を主に説明する

① レーザの違いによる形状の違い

ファイバをシリコンに接触させ、平均出力 5W で照射した。このときファイバのダメージは確認されなかった。両レーザーともシリコンウェーハに貫通穴をあけることができ、アルゴンイオンレーザーで 40 分、パルスレーザーで 4 分 30 秒を要した。どちらのレーザーの場合も、穴の内壁は滑らかでエッチピットは見られない。図 5 にその SEM 像を示す。

同図 (a) に示す連続発振レーザーによる穴はすり鉢状で、かつ四角い形状となった。このとき照射部の穴径 (四角の対角線で測定) は 430 μm で、ファイバのコア径の 2 倍近くであった。水酸化カリウムとシリコンの反応は熱により促進される。照射時間が長くなったことで熱が拡散し、照射部周辺でもシリコンの溶解が起きるようになり、穴径が大きくなったと予想できる。また、四角い形状は、KOH とシリコンの反応が結晶方位により依存し、(111) に対し (100) の反応速度が数十倍高いため、(111) が表れた結果である。

一方、同図 (b) に示すパルスレーザーによる穴はテーパが小さく、エッチング速度の結晶方位依存性の影響がほとんど認められない。このとき穴の直径は 260 μm である。パルスレーザーでは短時間で穴あけが行えるため、加工形状の改善につながったと言える。

② 除去能率の違い

平均出力と加工速度の関係を調べ、その結果を図 6 に示す。すべての出力でパルスレーザーの方が連続発振レーザーを上回っており、例えば平均出力 5W では 20 倍ほどである。

連続発振レーザーでは出力が 8W 以上になると、加工速度が 40 $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度で飽和する傾向がみられる。これに対してパルスレーザーでは加工速度は単調に増加する傾向がみられる。また、図 7 にパルスレーザーを使用し平均出力 11W で得られた貫通穴を示す。1 分足らずで貫通穴を得られたが、このように出力を上げて加工速度を増しても、穴の内壁は図 2 と同様に滑らかである。出力の増加することにより、更なる加工能率の改善が期待できる。

③ 切断

当初の目的であるスライスについては、側面から漏出させる方法では光の強度が不十分

分で加工速度が遅く、実際に実現できていない。また、端面から出射方法では十分な加工レートが得られた。スライシングに適用するにはファイバを直線状にならべて加工することで実現できると考えられるものの、現有する発振器では強度が不十分であった。そこで、ファイバを走査することで切断を試みた。走査方法を図 10(a) に、レーザー光の照射方向からの SEM 像を図 10(b) に、断面を図 10(c) 示す。断面は、製作した溝の端部からシリコンの端部までの約 1mm を切断し、切断による影響の少ないと考えられる溝の中央部を観察した。また、ファイバは図の点線のように、レーザー光を照射しながら走査した。このとき、出力を 10W とし、ファイバを固定し穴が貫通するまでの時間を考慮し切断に十分な時間の照射が行えるように (ファイバのコア径 200 μm を合計 2 分照射)、ステッピングモータを使って 0.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ で 300 回走査を繰り返した。切断示し、断面は、シリコンの表面から底面まで滑らかな形状を維持できることがわかった。

(3) まとめ

本研究では光ファイバで伝送したレーザー光を直接利用した、ウェットプロセスによるアシストエッチングのシリコンに対するスライシングを試みた。本研究を通して以下のことがわかった。

- 1) レーザ光照射によりファイバ側面から光を漏出できる。
- 2) 本手法では連続発振レーザーに比べ、パルスレーザーを用いると除去速度が大きく加工形状も滑らかである。
- 3) 本手法で厚さ 3mm のシリコンに 40min で穴をあけることができた。
- 4) ファイバを走査することで切断できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① 山下祥宣, 細野高史, 比田井洋史, 戸倉和 : 光ファイバ伝送レーザー光を直接利用したシリコンのレーザーアシストエッチング加工, 精密工学会誌, **74**, 5 (2008), 463-467, 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

比田井 洋史 (HIDAI HIROFUMI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号 : 60313334

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者
なし

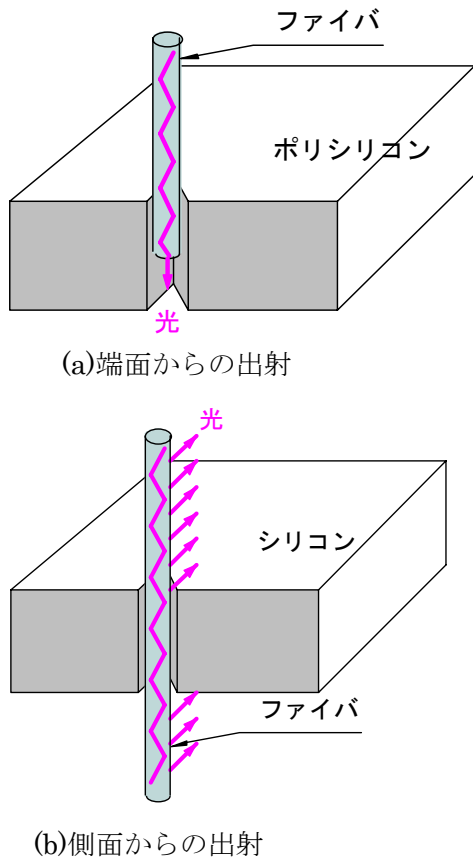
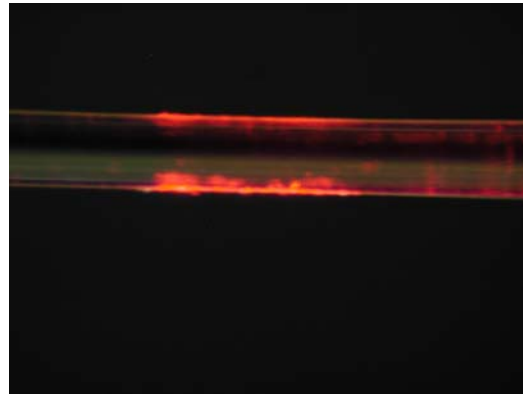
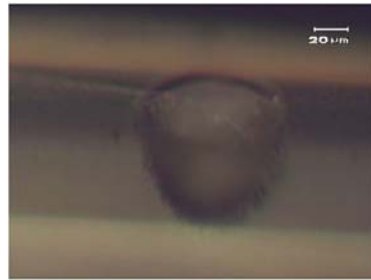


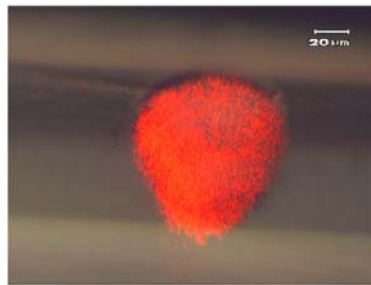
図1 加工模式図



(a) ファイバ全面から漏出する光



(b) ファイバー部への加工



(c) ファイバー部から漏出する光

図3 加工後のファイバから漏出する光

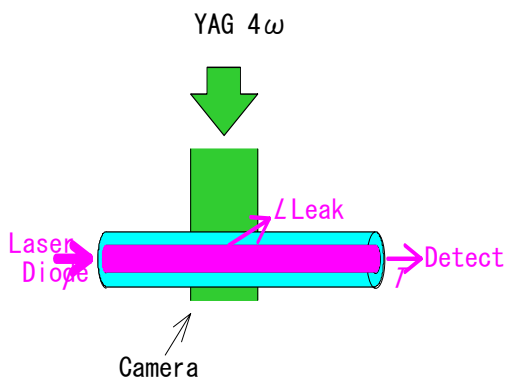


図2 側面から漏出されるための加工方法

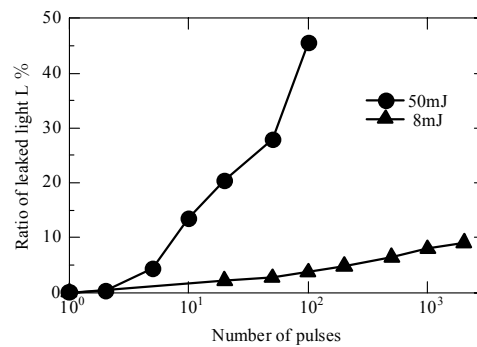


図4 照射パルス数と漏出光の関係

Table 1 Experimental conditions

Laser	
CW Ar-ion laser	
Wavelength	multiline (514nm,488nm,etc.)
Nd:YLF laser (2 ω)	
Wavelength	527nm
Repetition rate	10 KHz
Pulse width	330 ns
Etchant concentration	
KOH + H ₂ O ₂	20wt% + 0.5wt%
Optical fiber	step-index multimode glass fiber
ϕ core, ϕ cladding	200 μ m, 220 μ m

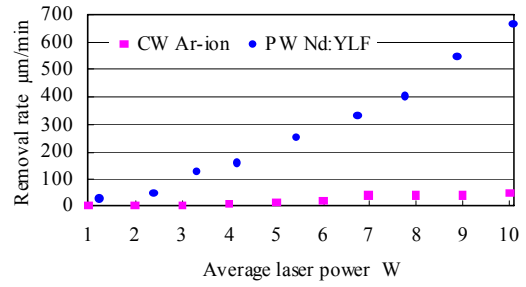
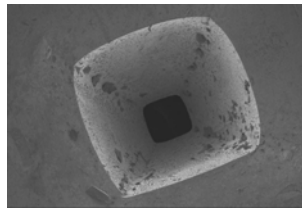
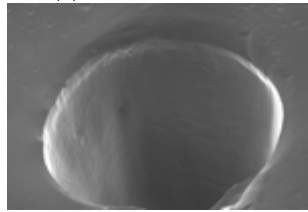


図 6 出力と除去量の関係

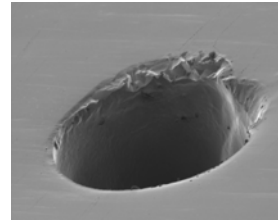


(a) CW Ar-ion laser



(b) PW Nd:YLF laser

図 5 加工後の SEM 像



100μ

図 7 加工穴

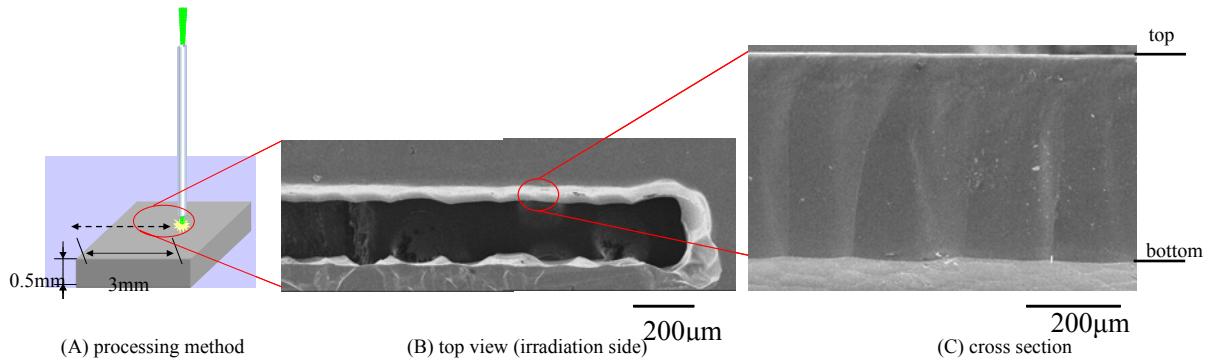


図 8 スライス結果