

# レーザプロファイル変調によるバックスクライビング技術の革新

東京工業大学 機械系

准教授 伏信 一慶

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015217)

キーワード : Nd:YAG レーザ、スクライビング、ベッセルビーム

## 1. 研究の目的と背景

各種薄膜太陽電池や液晶用薄膜ガラスなどにおける透明導電膜、半導体、金属、ガラス等の積層薄膜の溝状部分除去や、SiC パワー半導体基板、微量試薬検査用のガラス基板などの厚さ数百  $\mu\text{m}$  程度の基板表面への溝加工など、広義の電子機器産業では微細かつ高ロバストなスクライビング技術の開発が急務となっている。例えば薄膜 Si 太陽電池のスクライビングの場合、メカニカルで 500 $\mu\text{m}$  程度、レーザで 50 $\mu\text{m}$  程度の溝幅りとされ、これを溝幅 10 $\mu\text{m}$  程度以下にすればメカニカルスクライビングに比してエネルギー変換効率を 1 ポイント近く向上させる試算となる。微量な試薬や生体試料の検査に用いる Lab on chip デバイスでは、反応性等の要請でガラス基板に数~数百  $\mu\text{m}$  程度の微細な溝切りが不可欠となる。

その際、レーザスクライビングは加工線幅や後処理も含めた加工速度、工具不要等の様々なメリットからメカニカルスクライビングに対してその優位性が際立つが、真に実用に供する技術開発を考えると、導入・維持コストやシステムの安定性から、ロバストで実績のあるナノ秒パルスの Nd:YAG レーザを用いるメリットは大きい。しかし、要求される微細化、スループット、品質をナノ秒パルス Nd:YAG レーザで実現することは従来容易でなく、全く新たなアイデアの創出が不可欠である。

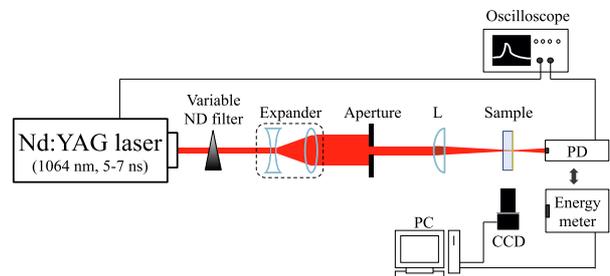
こうした中、申請者らは液体光学素子によるベッセルビーム生成を実現し<sup>2)</sup>、ベッセルビームを用いた試料背面からのレーザスクライビング技術(ベッセル・バックスクライビング技術)を直近に開発し、初期検討で薄膜 Si 太陽電池の透明電極を模した薄膜に線幅 5 $\mu\text{m}$  程度のスクライビングが可能であることを提示した(飯田ほか、2015)。焦点深度が深く、位置決めにも大幅なロバスト性が期待できる。試料背面からのスクライビングによりプラズマブルーム等の加工飛散物とレーザ光の相互作用を回避し、なおかつ、ビームプロファイルに変調を加えてベッセルビームとすることで微細な線幅と深い焦点深度による位置決めのロバスト性を同時に実現するこのベッセル・バックスクライビング技術は、今後、レーザスクライビングにさらなる高度化をもたらすエポックとなることが期待される。

そこで本研究の目的は、プロファイル変調ナノ秒パルス Nd:YAG レーザ光による薄膜・基板のバックスクライビング技術の実験的な実証と加工パラメータ依存性を解明し、バックスクライビング技術に革新をもたらすことにある。

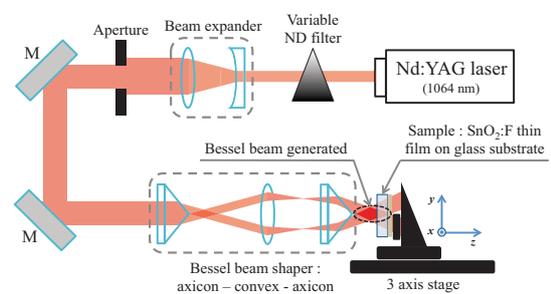
## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置の概要

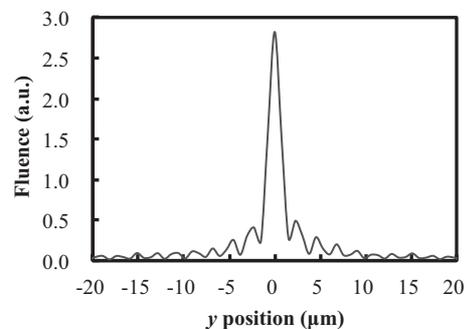
図 1 に実験装置を示す。Nd:YAG レーザは最も取り扱いやすい基本波 1064 nm に固定し、図の光学系で試料に照射する。得られるベッセルビームのプロファイルも図中に示す。なお、比較のためベッセルビームに加工しない通常のプロファイル(ここではガウシアンと称する)の実験も行う。



(a) ガウシアンプロファイルでの実験の光学系



(b) ベッセルビームによる実験の光学系



(c) (b)の光学系で得られる代表的なベッセルビームのプロファイル

図1 光学系と焦点でのベッセルビームのプロファイル

また、表1に実験で用いた各種のパラメータをまとめる。試料にはFTOを用いる。膜厚は600-700 nmの範囲である。

表1 各種パラメータ

| Parameter                   | Unit          | Value   |
|-----------------------------|---------------|---------|
| Wavelength, $\lambda$       | nm            | 1064    |
| Pulse width, $t_p$          | ns            | 5-7     |
| Focal length, $f$           | mm            | 100     |
| Beam radius at focus, $w_0$ | $\mu\text{m}$ | 12      |
| FTO thickness, $h$          | nm            | 600-700 |
| Substrate thickness         | mm            | 1.8     |

### 3. 結果と考察

#### 3.1 ガウシアンでの結果と現象理解

図2にシングルショットのガウシアンでのスクライビングのイメージを示す。図のように、基板側照射（バックスクライプ）の場合はシングルショットで破線の薄膜-基板界面を超える加工が可能であるが、膜側（フロントスクライプ）の場合はパルスエネルギーを増やしてもシングルショットでの薄膜-基板界面まで到達しないことがわかる。

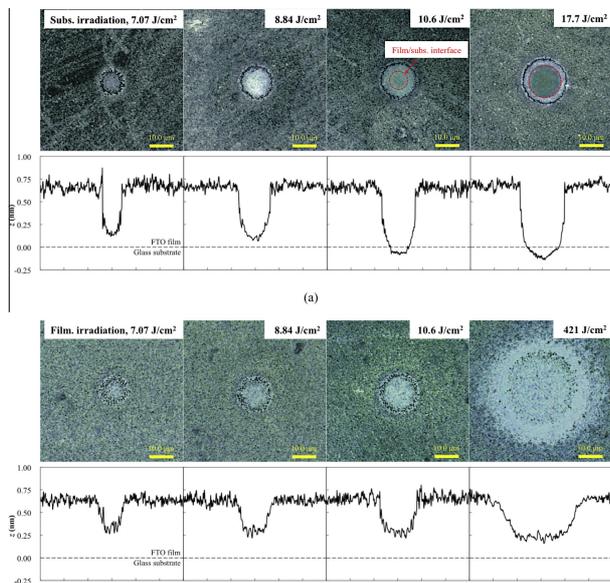
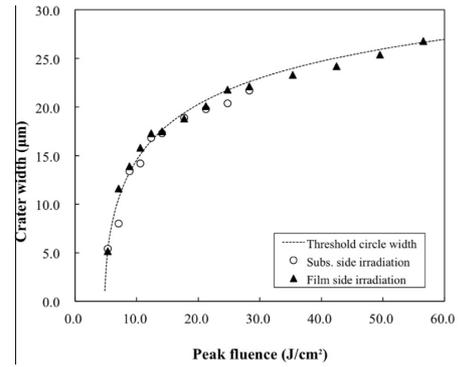
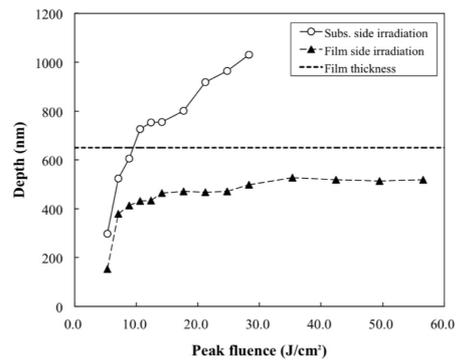


図2 共焦点顕微鏡による拡大画像と表面プロフィール：(a)基板側照射、(b)膜側照射

図3はその際の加工穴径と穴深さを示す。穴径には大きな差異はないものの、穴深さについては顕著な相違があり、特に膜側照射ではシングルショットで500 nm以上の穴深さが得られないことがわかる。



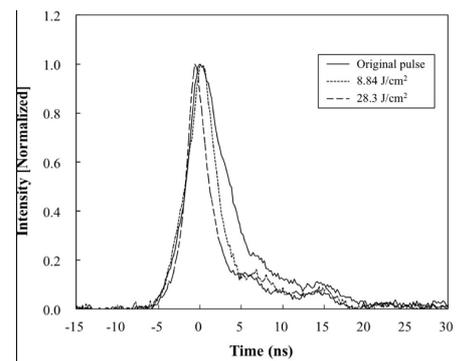
(a) 加工穴径



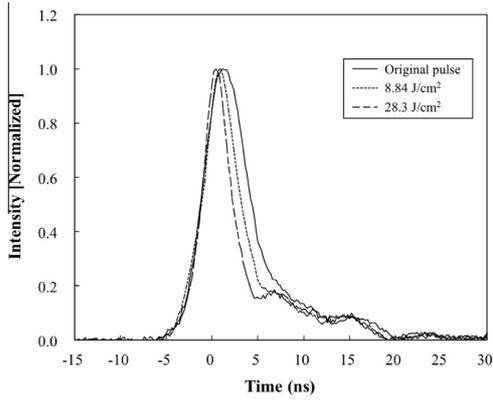
(b)加工穴深さ

図3 加工穴幅と深さのフルエンス依存性: 照射方向の影響

試料背後に設置した CCD カメラで計測した光強度の時間プロフィールを図4に示す。図のようにいずれの場合もパルスエネルギーを増すほどにパルスの後端がより強く減衰する様子が明らかである。



(a) 基板側照射



(b) 膜側照射

図4 パルスプロファイルの時間変化

ここで何が起きているかを理解するために、光吸収と温度上昇とを連成したマルチフィジクス解析を行った。図5はその計算領域であり、温度分布は式(1)で計算する。

$$\rho [c_p + L_m \delta(T - T_m)] \left( \frac{\partial T}{\partial t} - v_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S \quad (1)$$

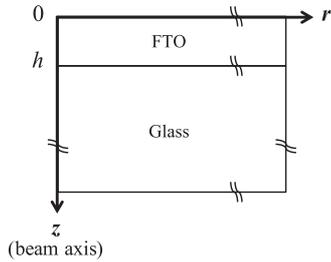


図5 計算領域

図6に温度分布の計算結果を示す。図のように、膜側照射の方が相対的に膜表面で高温になる傾向はあるものの、膜側、基板側照射を問わず、膜全体が平均して温度上昇する様子がわかる。

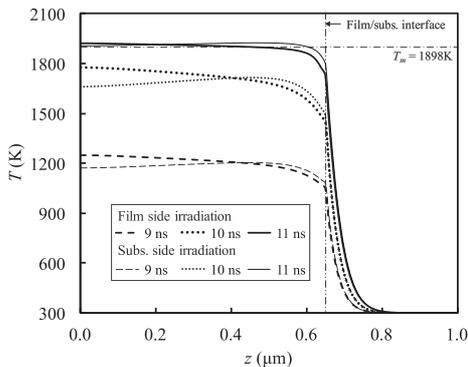


図6 温度分布の計算結果：10.6 J/cm<sup>2</sup>、光軸の中心軸上

この傾向は図7に示す、従来提案されていた膜-基板界面で光吸収に伴う急激な温度上昇が引き起こす相変化により応力起因で膜の除去につながるという考え方と異なり、膜全体の温度上昇が膜の除去に繋がっていることを示唆する。

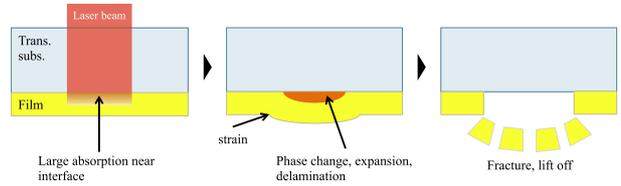


図7 従来提案されていた機構の模式図

すなわち図8に示す通り、照射方向によらず膜全体の温度が上昇するエビデンスから、光吸収も厚さ方向に分布はあるものの全体で吸収が生じ、結果、プラズマブルームが生じる。計測より、試料を透過する光強度はパルスエネルギー増加とともに減少することから、プラズマ生成で放出される物質に起因すると考えられ、特に膜側照射の場合は光透過量の減少が膜に与えられる光エネルギーの減少に繋がり、結果、シングルショットでの加工穴径の頭打ち傾向を説明できると考える。

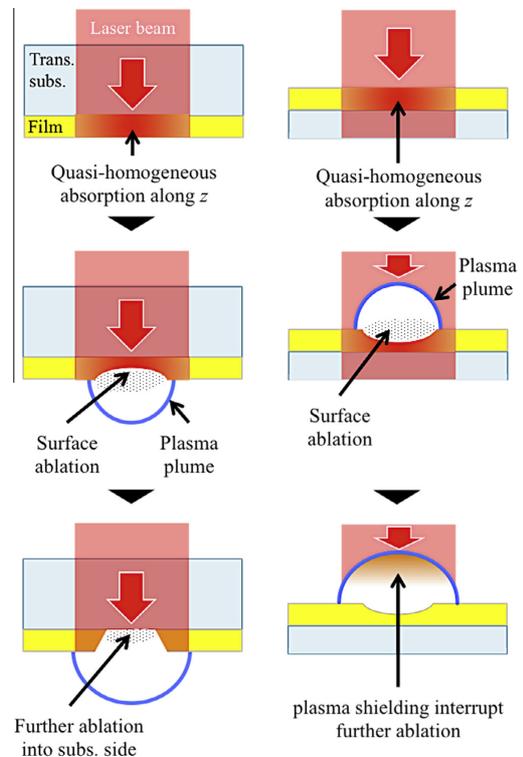


図8 本研究の結果から導かれる機構の模式図

### 3・2 ベッセルビームでの結果と新たな発見

以上を踏まえ、引き続いてベッセルビームでの実験に移る。図9は実際にバックスクライブ加工を行った結果を示す。図9(a)に示す通り、加工線幅約2.3 μmの溝加工が実現できている。また図のように、パルスエネルギー増加とともに溝幅も増加する様子が見て取れる。また図9(c)のように溝の側に1次ローブによると考えられる加工痕が認められることから、適正なパルスエネルギーでのスクライブが重要であることがわかる。

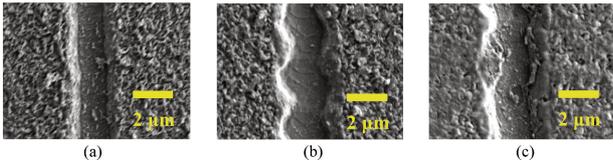


図9 スクライブ加工部のSEM像：(a) 9.0 J/cm<sup>2</sup>、(b) 12.0 J/cm<sup>2</sup>、(c) 15.0 J/cm<sup>2</sup>

図10はベッセルビームでのシングルショットでの加工穴深さを示している。図からわかるように、基板側照射のバックスクライブではシングルショットでの膜の除去が可能であることはガウシアンの結果と同様であるが、十分なパルスエネルギーを与えることで膜側からのフロントスクライブでのシングルショット膜除去も同様可能であることを示している。これはガウシアンでは従来実現できなかった成果であり、膜側をジグに触れることを嫌がるなどの試料取り回しの要請も踏まえると、画期的な発見と言える。

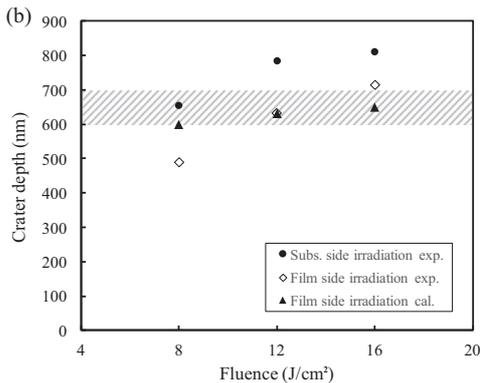


図10 ベッセルビームによるシングルショット加工穴深さ

当初意図したベッセルビームによるバックスクライブの革新を超えて、従来困難とされたフロントスクライブの可能性が見えてきたが、当初予定していなかった発見もあり、現時点で確たる証明につながる実験事実が揃ってい

ない。並行して数値計算による予測を実施しており、ここでは、ベッセルビームの特徴を考慮し、BPMによりレーザ光の波面伝播を膜内で計算し、そこで得られた光強度分布をソースタームとして温度分布を解き、予測される温度上昇から予測される加工穴深さを図10に cal.として示しているが、計算でも同様の穴深さの予測を与えている。すなわち、ベッセルビームの場合、特有の光伝播特性によりプラズマ遮蔽の効果が緩和され、結果、フロントスクライブが適用できる可能性が示唆される。

### 4. 結論

透明基板上的の薄膜のパルスレーザスクライビング技術に革新をもたらすべく、実用上メリットの多い ns パルスの Nd:YAG レーザによるバックスクライビング技術の検証を行った。

比較対象となる従来型のガウシアンビームによるフロント/バックスクライブ実験により、フロントスクライブではフルエンスに対する加工穴深さが頭打ちとなり、膜厚によってはシングルショットでの薄膜除去ができないことを確認できた。従来から言われてきた機構ではなく、薄膜内厚さ方向での光吸収起因の機構が明らかになった。

しかるのちにベッセルビームによる検討を行い、バックスクライブで ns パルス Nd:YAG の基本波で加工線幅 2.3 μm の溝加工が可能であることを示した。また、ベッセルビームではフロントスクライブでのシングルショット加工が実現できる可能性が今回の検討で明らかになり、光伝播を考慮した数値計算から、ベッセルビーム固有の光伝播特性がプラズマ遮蔽効果を緩和している可能性が示された。

以上、ベッセルビームによるバックスクライビングについて、ns パルスレーザで基本波長の2倍強の線幅で加工できることを示し、従来にない全く新たな技術基盤を提案するとともに、ベッセルビーム固有の特性によりフロントスクライビングも実現可能であることを示すことができた。この成果は今後のパルスレーザ加工に大きな貢献を果たしたものと考えている。

### 謝辞

今回、ご提案した研究課題の遂行の過程で、当初計画の成果をあげるだけでなく、ベッセルビームによるフロントスクライビング実現可能性という全く新たな可能性を見出すことができた。この間の貴財団のご支援に心から謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Wang et al., ASME J. Manuf. Sci. Engrg., 135 (2013), 051004
- 2) ドアンほか、機論 B、79-803 (2013), 1354
- 3) 飯田ほか、第 52 回伝熱シンポジウム講演論文集、(2015), I322