



微細加工用パルスファイバレーザ SumiLas™

角井素貴*・玉置 忍・金内靖臣
耕田 浩・田中裕士・岡本康寛
宇野義幸・Brian Baird

Pulsed Fiber Laser “SumiLas” for Micro-Processing — by Motoki Kakui, Shinobu Tamaoki, Yasuomi Kaneuchi, Hiroshi Kohda, Yuji Tanaka, Yasuhiro Okamoto, Yoshiyuki Uno and Brian Baird — In order to meet requirements in next generation micro-processing, the authors have developed a 1.06 μm pulsed fiber laser employing a simple master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. This laser features broad pulse width flexibility (100ps to 20 ns), excellent beam quality ($M^2 \leq 1.3$), and a wide range of pulse repetition frequencies (50 kHz to 1 MHz). With these attributes of the laser, the optimum laser width for processing both amorphous silicon (a-Si) and copper indium diselenide (CIS or CuInSe) types of solar cells were studied. As a result, it was found that the pulse width of 10 to 20 ns gives the best scribing quality on a-Si solar cells while the pulse width around 500 ps leads to excellent results for CIS samples. The scanning speeds of 2500 mm/s and 5000 mm/s have been achieved for a-Si and CIS samples, respectively. In this study, surface texturing of a through-hardening stainless steel, “STAVAX,” for plastic molding was also conducted to demonstrate that the surface roughness and water repellency on the STAVAX surface can be controlled by adjusting the pulse width, number of scans and shielding gas condition.

Keywords: laser, pulse, micro-processing, solar cell, texturing

1. 緒 言

近年産業界全体で、従来の機械的、化学的な加工方法に替わりレーザ加工の導入が進みつつある。その理由には、
(a) 非接触な加工が可能となる。
(b) 光ファイバ導光によって、加工領域の絞込み、自在な位置や角度の調整が可能となる。
(c) 化学的加工方法と比較し環境負荷が軽減できる。
等が挙げられる⁽¹⁾。殊にエレクトロニクス製品を中心とした微細加工の分野では、加工対象の微細化と多様化が急速に進み、レーザ加工の需要が高まりつつある。

但し物質にパルス光を照射した時の光破壊現象は、**図1**の通り、熱的、機械的に複合的に進行するので、理論予測は困難と考えられる⁽²⁾。嘗て熱影響の無い高品質な加工の為にはパルス幅が短い程よいと思われたが、フェムト秒 (fs) パルスでは、**図2**の通り、非線形現象により却って加工品質が悪化するので、経験的には1～100ピコ秒 (ps) のパルス幅が最適との見方が広がっている⁽³⁾。

パルスレーザの実現方法はQスイッチ^{*1}とモードロック^{*2}方式が著名だが⁽⁴⁾、ps領域の短パルス幅は後者のモー

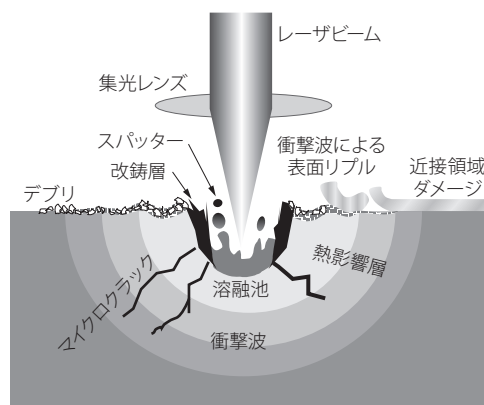


図1 レーザパルスを物質に照射した時、発生する種々の現象の事例⁽²⁾

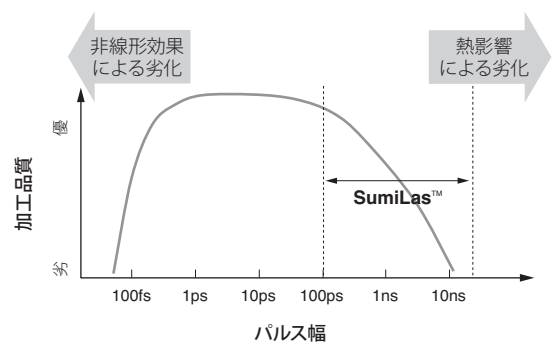


図2 レーザパルス幅と加工品質の相関関係⁽³⁾
SumiLas™は破線範囲においてパルス幅が可変

ドロック式で実現される^{(5)~(7)}。しかし高価で動作も不安定との指摘もあり普及には至っていない。一方Qスイッチ式はパルス幅が数10~数100ナノ秒 (ns) と長く熱影響は避けられないが、安価で最も普及している。更にパルス変調した半導体レーザーダイオード (LD) 出力を光増幅するMOPA^{※3}は、パルス幅が可変という利点を集めているが、今日の市販製品の可変範囲は数ns~数100nsでQスイッチ式と同様熱影響は免れない^{(8)、(9)}。

そこで当社は光通信分野の高速パルス変調技術、低雑音・高利得光ファイバ増幅技術を活用し、パルス幅100ps~20nsの範囲で可変となるパルスレーザーSumiLas™を開発した。SumiLas™の構造は図3の通り簡素なMOPA式であり、Qスイッチ式ファイバレーザと大差ないコストで、モードロック式psレーザ^{(6)、(7)}並の加工品質が期待される。

本論文ではSumiLas™の性能と、これを用いて実施した薄膜太陽電池の導電薄膜除去、即ちPI工程⁽¹⁰⁾、並びに金型材料表面改質^{(11)、(12)}の2つの加工事例を報告する。この結果、CIS^{※4}式薄膜太陽電池の加工でモードロック式psレーザに近い良好な加工品質が実現できた。しかし用途次第では、短パルスによる断熱加工も最良でないことも判明した。更に微細加工を行う上で重要と思われる、波長を1/2に変換したタイプについても報告する。

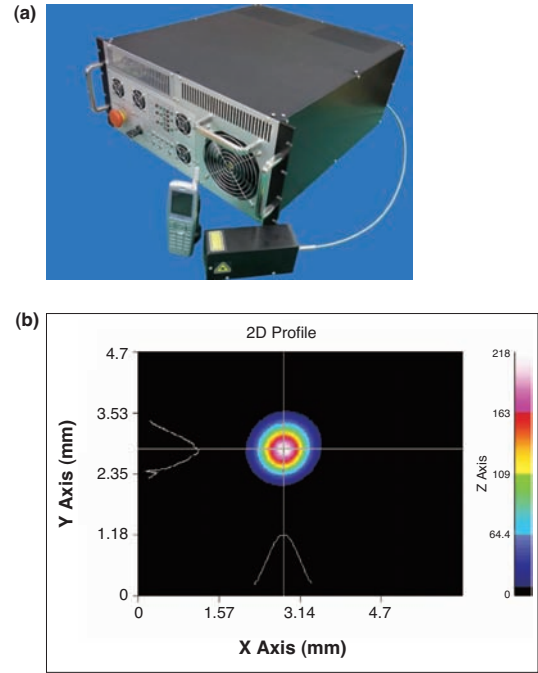


図4 SumiLas™の外観図 (a) と出射ビームプロファイル例 (b)

ンの設定により100MHz迄の動作も可能である。

PG出力パルスの幅を20nsに設定した場合と、パルス幅 ≤ 1 nsに対応する短パルスモードでパルス幅を最短に設定した時の出力パルス波形を各々図5 (a)、(b) に示す。平

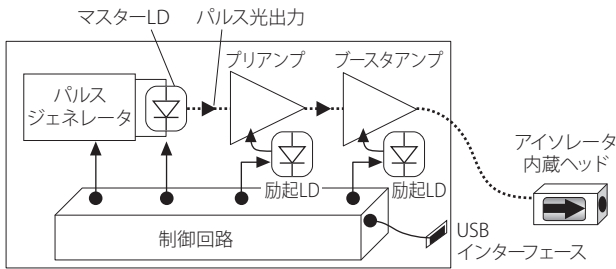


図3 SumiLas™のブロック図

2. SumiLas™の性能

図4 (a) にSumiLas™の外観写真を示す。サイズは500 (奥行き) × 482 (幅) × 200 (高さ) mmで19インチラックに収納可能である。内蔵される中心波長=1060nmのマスターLDは住友電気システムソリューション(株)にて開発されたパルスジェネレータ (PG) で直接変調され、そのパルス光出力は希土類元素Yb添加光ファイバ (YbDF) を用いたプリアンプ並びにブースタアンプにより増幅され、アイソレータ内蔵ヘッド後平均出力は15Wに設定される。出力ビームプロファイルは図4 (b) の通り理想的ガウシアン状であり M^2 ^{※5}典型値は1.1である。繰返し周波数は標準状態で50k~1MHzの範囲で可変であり、更にパルスパター

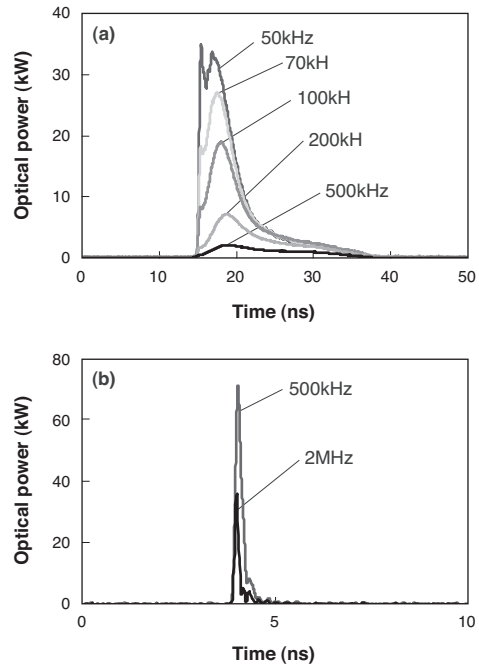


図5 SumiLas™の出力パルス波形。設定パルス幅=20nsの場合 (a) と短パルスモードの場合 (b)

均出力は何れも 15W に設定した。図 5 (a) の通り電気変調パルスの設定幅は光出力パルスの基部の幅と略一致し 20ns 程度だが、光出力パルスの半値全幅は YbDF 内部の過渡応答により、繰返し周波数が下がる程に狭くなり 50kHz では 5ns 程度となる。一方、短パルスモードでの半値全幅は、図 5 (b) の通り 100～200ps であり、パルス基部の幅も 1ns 以内である。

3. 薄膜太陽電池加工⁽¹⁰⁾

現在太陽電池の主流は結晶 Si 式だが、既存の発電技術以下のコストを実現する為、更なる新技術が必要であり一つの候補が 1.1 × 1.4m のガラスパネル上に形成される薄膜型である。これを各セルに分割する為に図 6 の様な P1～P3 の 3 種類のスクライブが施される。殆どの種類の薄膜型太陽電池で、各層の吸収スペクトルの関係で、P1 工程には波長 1060nm のレーザーが、P2以降の工程には、波長 530nm が用いられる。P1～P3 のスクライブ領域は発電には寄与しないので Dead zone と呼ばれ面積縮小が求められる。同時に現在 1000～1500mm/s 程度のスクライブ速度も向上が期待される。1パルス当りの照射スポットは小さく、スクライブ速度は向上したい、という相矛盾した要求を満たす為には、ビーム品質が良好で繰返し周波数が高い MOPA 式ファイバレーザは好適と言える。しかし同時に太陽電池は通常敷設後 25 年間以上の寿命が求められるので、良好な加工品質が実現できるかが重要な課題である。

今回 SumiLas™ の性能を実証する為に以下の 2 種類のサンプルにつき P1 工程の加工を実施した (I)。

- ① 日本板硝子製 NFL3102A2
- ② AGC Solar 製 MOLY

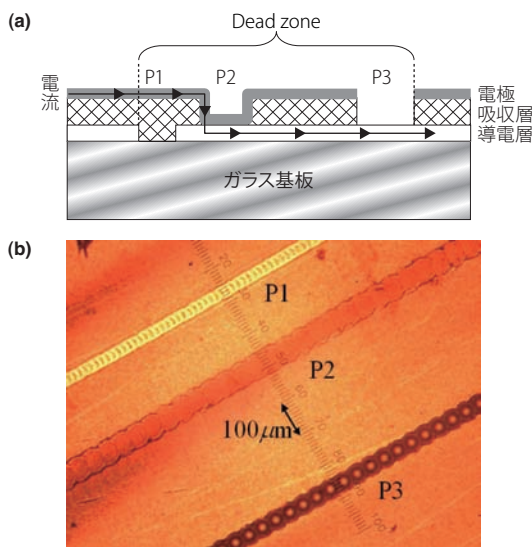


図 6 P1、P2、P3 工程後の断面図 (a) とアメリカ大手メーカー製サンプルの光学顕微鏡写真 (b)

上記①はアモルファス (a-) Si 型または CdTe 型太陽電池用で SnO₂ を主成分とする導電層を備える。一方②は、変換効率の高さから最近注目を集める CIS 型太陽電池用で、モリブデン (Mo) 導電層を有する。基板は何れもソーダライムガラスである。加工実験に際しては SumiLas™ 出射後の 1mm 径のビームをエキスパンダで 5 倍に拡大し、焦点距離 100mm の fθ レンズを取り付けたガルバノスキャナ：ScanLab 社製 HurryScan II-14 に入射させビーム掃引した。レーザは導電層膜の裏面から照射し、焦点位置は導電層膜と一致させた結果、集光スポット径は 34μm であった。

パルス幅は図 4 (a) の 20ns 設定状態と図 4 (b) の短パルスモードの 2 通りとし、掃引速度の目標はサンプル①で 2500mm/s、サンプル②で 5000mm/s と定め、最も良好な加工品質を実現すべく平均パワーと繰返し周波数を調整した。その結果得られた加工条件を表 1 に、加工結果を図 7、写真 1、2、図 8 に示す。サンプル①を 20ns のパルス幅で加工した結果 (図 7) では光学顕微鏡、SEM^{*6} 画像の何れでも TCO 膜やガラス面にクラック等の損傷は認められず、EDX^{*7} による組成分析でもガラス底面に SnO₂ の残渣は見られず、電気抵抗測定の結果、絶縁抵抗は 100MΩ 以上と良好だった。更に光学干渉計 (Zygo 製干渉計 NewView200) による 3 次元解析でも SnO₂ のデブリ、剥離の痕跡は見られなかった。尚 SnO₂ の膜厚は 640nm であった。

表 1 薄膜太陽電池サンプル①,②の加工条件

サンプル 品種	パルス幅 設定 (ns)	平均出力 (W)	繰返し周波数 (kHz)	掃引速度 (mm/s)
サンプル①	20	10	160	2500
	0.2	6.8	150	2000
サンプル②	20	8	250	5000
	0.5	5.7	250	5000

然るに 200ps のパルス幅にてサンプル①を加工した時は、SnO₂ の除去エリアは写真 1 の様に楕円形に縮小し、全スポットでガラス底面上のクラックとフォーミング (泡立ち) が発生した。図 5 (b) に見られる高過ぎるピークパワーが本来透明な筈のガラスの損傷を惹起したものと思われる。図 2 に示された ps 領域パルス幅が最適、という経験則が如何なる場合も成り立つ訳ではない、という一例と言えよう。

一方でサンプル②においては 20ns 幅のパルス照射は写真 2 の通り、Mo 膜に甚大な熱影響が生じさせ、放射状のクラックと剥離が全スポットで生じ、あまつさえスポット間では Mo 膜が捲れ上がった箇所も散見された。一方短パ

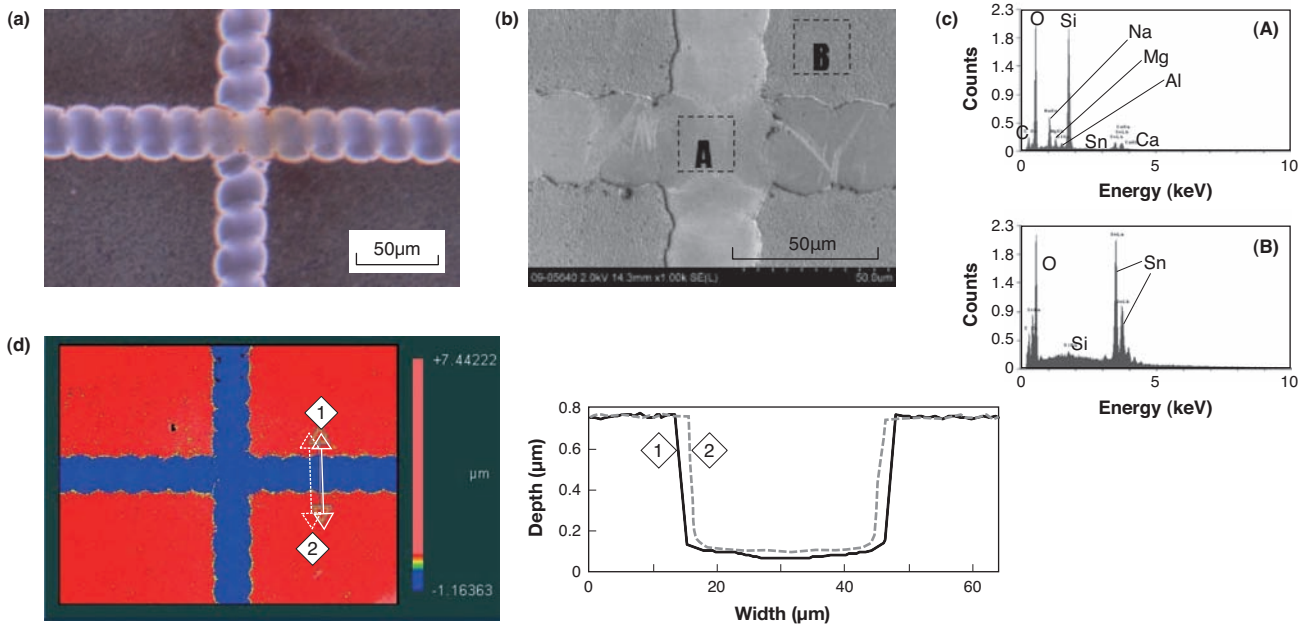


図7 パルス幅20nsでのサンプル①上P1加工結果の光学顕微鏡写真(a)、SEM画像(b)、EDX組成分析結果(c)、光学干渉計による3次元解析結果及び断面図(d)

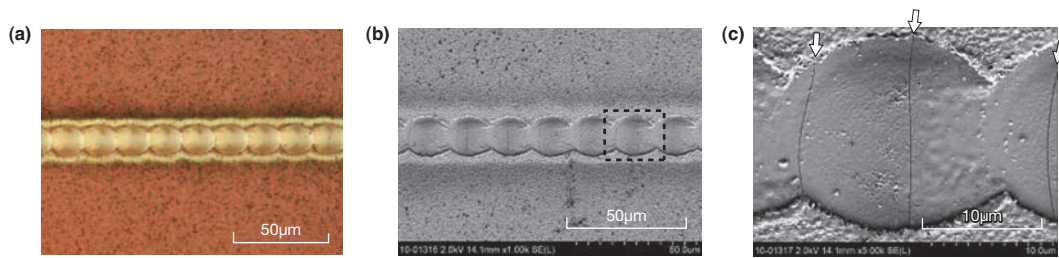


写真1 パルス幅200psでのサンプル①上P1加工結果の光学顕微鏡写真 (a)、SEM画像 (b) 及びその拡大図 (c) 矢印部分がガラス底面のクラックである

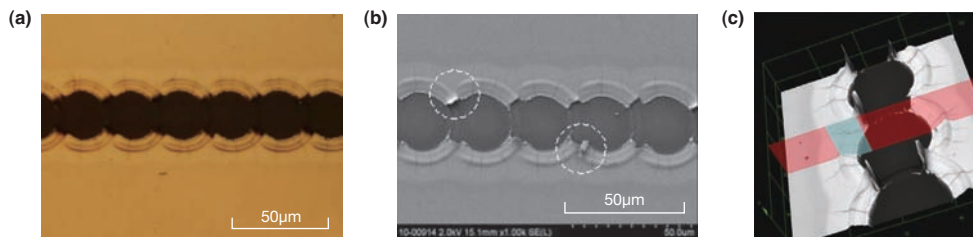


写真2 パルス幅20nsでのサンプル①上P1加工結果の光学顕微鏡写真 (a)、SEM画像 (b)、及びレーザー顕微鏡での3次元解析結果 (c)

ルスモードでの加工時はガラス基板のダメージを根絶する為、パルス幅を500psに微調整した。その結果、図8の通り、光学顕微鏡SEM、レーザー顕微鏡の何れの観察においても、Mo膜のクラック、剥離、デブリ、そしてガラスの損傷も無い良好な加工品質を実現できた。本結果はモードロック式10psパルスによる加工結果^{(6),(7)}と遜色無い様に

思われ、CIS系太陽電池のP1工程は数100ps程度のパルス幅で十分成功できる可能性が示唆される。またMOPA構造のSumiLas™は、文献(6)の様な繰返し周波数30kHzという制約も無い為、5000mm/sの高速掃引が実現できている。

図8 (d) の3次元解析の結果、Mo膜の厚みは400nmで

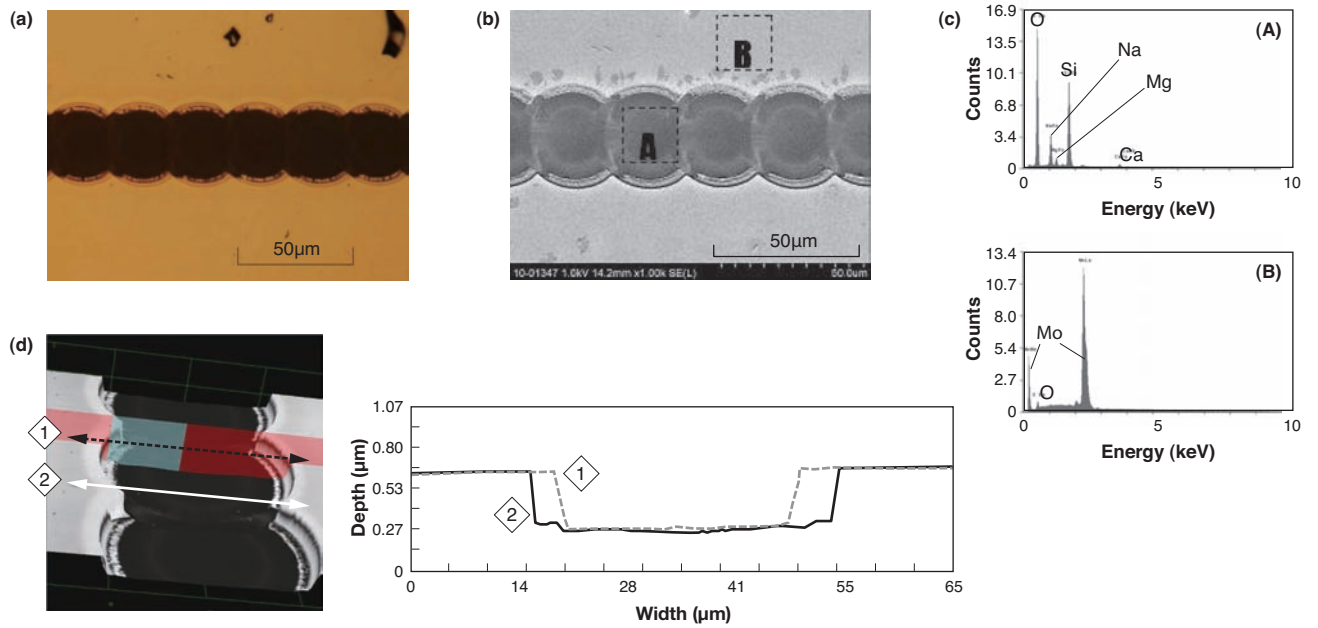


図8 パルス幅500psでのサンプル①上P1加工結果の光学顕微鏡写真(a)、SEM画像(b)、EDX組成分析結果(c)、レーザ顕微鏡での3次元解析結果及び断面図(d)

あったが、ガラスに面する第1層目の厚みは60nmであった。これはサンプル②のMo膜が、ガラスとの密着性を良好にする為の第1層と、導電性を確保する為の第2層より構成される為と思われる⁽¹³⁾。

させた。この結果、加工対象上のスポット径は25µmであった。隣接するスポット間がオーバーラップを0%となる様に、ガルバノスキャナの掃引速度は2500mm/sに設定

4. 金型材料表面改質^{(11)、(12)}

前節で述べた通りQスイッチやモードロック方式と比較したMOPA式パルスレーザーの特徴の一つは、高繰り返し周波数であり、ガルバノスキャナの様な高速ビーム掃引装置と組み合わせれば、スクライブの様なライン状加工に留まらず、所定の面内を覆うエリア状加工も期待できる。こうした加工の一例として表面改質が考えられる。即ち、レーザー照射によって耐磨耗性、耐腐食性、撥水/親水性等、様々な特性が制御できると期待される。

以下にUDDEHOLM社製金型鋼STAVAXの表面改質結果を示す。設定パルス幅は10nsと、短パルスモードの0.7nsを試した。他の照射条件は表2の通りである。本実験の照射光学系としては、SumiLas™射出後の1.6mm径のビームをエキスパンダで5倍に拡大し、焦点距離100mmのfθレンズを取り付けたガルバノスキャナに入射

表2 金型鋼STAVAXの加工条件

パルス幅設定 (ns)	平均出力 (W)	繰り返し周波数 (kHz)	掃引速度 (mm/s)
10	5	100	2500
0.7	3.5	100	2500

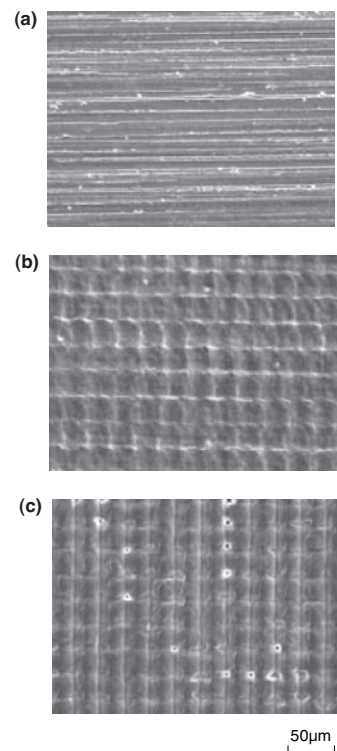


写真3 10nsパルスによるSTAVAX表面改質後のSEM画像
照射前(a)、10回掃引(b)、100回掃引(c)

した。加工対象両側より、窒素 (N₂)、又は圧縮空気をポンペ圧 100kPa で供給した。加工対象の STAVAX 片は、何れもレーザー照射前に平面研削を行い表面粗さ 0.25 μ mRa とした。

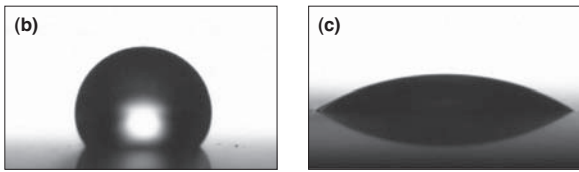
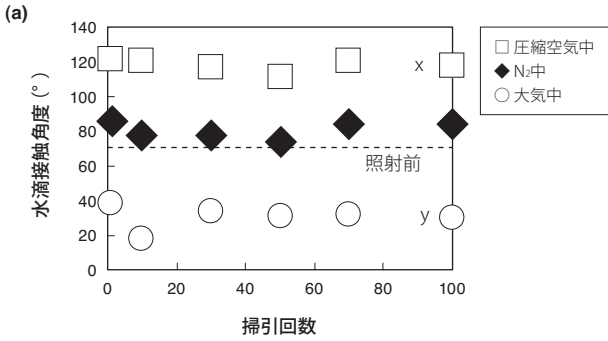


図9 10nsパルス照射時の撥水/親水性と掃引回数の関係(a)、及び(a)中x点の水滴写真(b)、y点の水滴写真(c)

パルス幅 10ns の場合は、写真3の通り掃引回数 10 回で研作痕が消失し 100 回掃引時には深い孔が散見された。しかし撥水性の指標である表面上水滴の接触角は、図9の通り掃引回数 = 1 ~ 100 の範囲で殆ど不変で、N₂、圧縮空気、そして大気中という加工雰囲気のみで決定された。大気中での 10ns パルス照射は、1 回掃引であっても STAVAX 表面に多くの親水基を発生させたと考えられる。

一方、パルス幅 0.7ns では写真4の通り掃引回数 100 回でも表面粗さは 0.25 μ mRa に留まり表面形状への影響は軽微であったことが伺える。一方撥水性は図10の通り、或る程度制御されており、アシストガス供給条件の最適化と合わせて、形状を殆ど変えず表面改質を行える期待が持たれる。

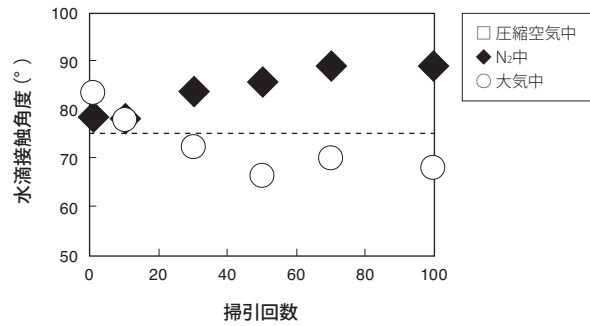


図10 0.7nsパルス照射時の撥水/親水性と掃引回数の関係

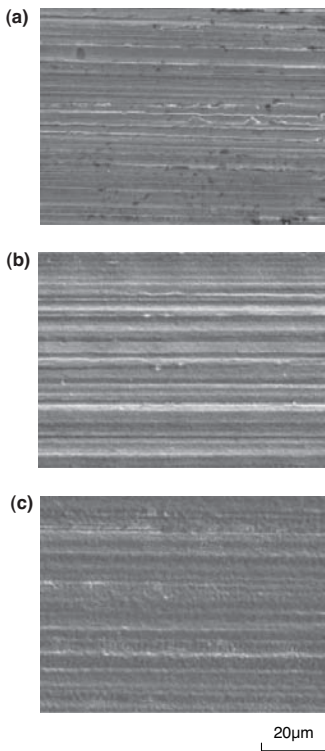


写真4 0.7nsパルスによるSTAVAX表面改質後のSEM画像
照射前(a)、10回掃引(b)、100回掃引(c)

5. 波長変換技術

以上3、4節に述べた加工事例は何れも波長 1060nm で実施したものだが、加工対象の材質によってはこの 1/2 又は 1/3 の波長が必要となる。例えば3節の薄膜太陽電池加工の P2、P3 プロセスは、吸収層以上を除去し導電層は残すという選択的除去が必要になるので、波長 1060nm で加工する P1 工程と異なり、波長を 1/2 に変換した 530nm 帯レーザーを使用するのが一般的である。

この為に SumiLas™ についても、出射光学系に非線形光学結晶を挿入し、波長を 530nm に変換したオプションを開発した。その出力パルス波形とビームプロファイルを図11に示す。現在の平均出力は 5W、パルス幅は 2ns の設定のみだが、平均出力の向上、並びにパルス幅可変範囲の拡大に現在取り組んでいる。

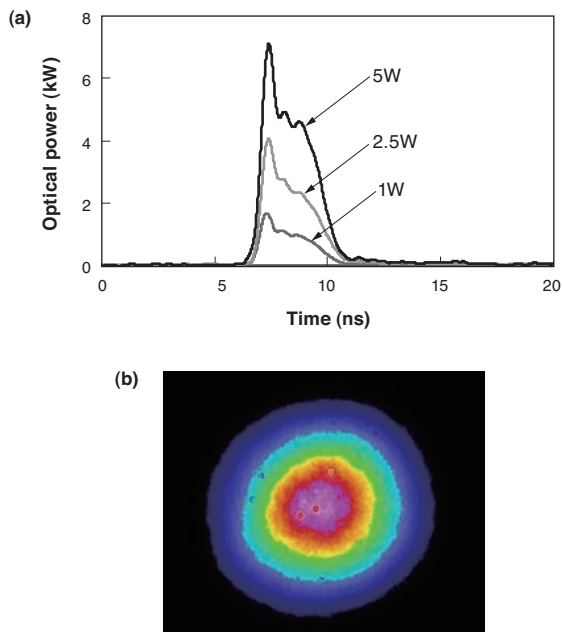


図11 繰り返し周波数300kHz、平均出力=5, 2.5, 1Wの時の出力パルス波形(a)とビームプロファイル(b)

6. 結 言

光通信分野の高速パルス変調技術、低雑音・高利得光ファイバ増幅技術を活用し、パルス幅が100ps～20nsの範囲で可変となるパルスレーザSumiLas™を開発し、薄膜太陽電池加工、金型材料表面改質の2つの加工事例において、短パルスモードでは様相の異なる加工結果が得られることを示した。但し図2に示されるパルス幅と加工品質の相関関係は必ずしも正しくはなく、薄膜太陽電池サンプル①の加工結果の通り、寧ろnsパルスが好適という事例も存在した。現在の産業界では、金属、樹脂、ガラス、セラミック等様々な素材で複合的に構成された加工対象が多く、加工条件の最適化は容易ではない。しかし、加工対象の構造、材料に応じたパルス幅の最適化は必須のプロセスであり、広範囲でパルス幅を可変できるSumiLas™は一つの有用なツールになると思われる。

用語集

※1 Qスイッチ

Q値とは、レーザ共振器における、一周期の間に系に蓄えられるエネルギーを、系から散逸するエネルギーで割ったもので、大きいほど共振器は安定である。Qスイッチとは、共振器内部に光スイッチを挿入し、Q値を増減させて光パルスを発生する方式を意味する。

※2 モードロック

レーザ共振器内部において周期的に存在する複数の光周波数成分の位相を揃えることで、光パルスを発生する方式。ピコ秒からフェムト秒に至る短パルスを発生できる特長がある。

※3 MOPA

Master Oscillator Power Amplifierの略。制御の容易な低出力なパルス光源、即ちMaster Oscillatorの出力を、光増幅器、即ちPower Amplifierで増幅する方式。

※4 CIS

一般にカルコパイライト系と呼ばれる、新型の薄膜多結晶太陽電池。光吸収層の材料としてアモルファスSiの代わりに、Cu、In、Ga、Al、Se、S等の元素から成るカルコパイライト系と呼ばれるI-III-VI族化合物を用いる。材料のバリエーションが豊富で、低コスト品から高性能品まで対応できるのが特長。

※5 M²

ビーム品質の指標。高次の横モードが含まれる程、大きい値をとる。M²=1であることは、ビームが完全なガウスモード(TEM₀₀モード)で集光が容易であることを意味する。

※6 SEM

Scanning Electron Microscope(走査型電子顕微鏡)の略。電子ビームとして対象に照射し、対象物から放出される二次電子、反射電子、透過電子、X線等を検出する事で対象を観察する。

※7 EDX

Energy Dispersive x-ray Spectroscopy(エネルギー分散形X線分光器)の略。全元素範囲の同時分析が可能であり、SEMでの元素分析は、概ねこの方法による。

参 考 文 献

- (1) 丸尾、宮本 編、「レーザ加工の現状と動向」、第3章、p. 399、レーザ熱加工研究会、Aug. (1988)
- (2) K. Zhang, A. A. Milner, I. S. Averbukh, Y. Prior, F. Korte and C. Fallnich, "Femto-second laser material processing", in Proc. of PhAST2005, PThB1 (2005)
- (3) D. Breitling, A. Ruf and F. Dausinger, "Fundamental aspects in machining of metals with short and ultra short laser pulses", in Proc. of SPIE 5339, pp. 49-63 (2004)
- (4) A. Yariv, Quantum Electronics, 3rd Ed., Chapter 20 (1987)
- (5) S-P. Chen, H-W. Chem, J. How and Z-J. Liu, "100W all fiber picosecond MOPA laser", Opt. Express, vol. 17, no. 26, pp. 24008-24012 (2009)
- (6) H. P. Huber, M. Englmaier, C. Hellwig, A. Heisis, T. Kuznicki, M. Kemnitzer, H. Vogt, R. Brenning and J. Palm, "High-speed structuring of CIS thin-film solar cells with picosecond laser ablation", in Proc of SPIE, vol. 7203, 72030R-1 (2009)
- (7) E. Steiger, M. Scharnagl, M. Kemnitzer and A. Lusskin, "Optimisation of the structuring processes of Cl(G)S thin-film solar cells with an ultra fast picosecond laser and a special beam shaping", in Proc of ICALEO, paper M1107 (2009)
- (8) K. T. Vu, A. Malinowski, D. J. Richardson, F. Ghiringhelli, L. M. B. Hickey and M. N. Zervas, "Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system", Opt. Exp., vol. 14, no. 23, pp. 10996-11001 (2006)
- (9) S. T. Hendow, J. Sausa, P. T. Guerreiro, N. Schilling and J. Rabe, "MOPA pulsed fiber laser with controlled peak power and pulse energy for micro machining of hard materials", in Proc. of. ICALEO, paper M209 (2009)
- (10) S. Tamaoki, Y. Kaneuchi, M. Kakui, B. Baird, N. Paudel and K.A. Wieland, "Development of wide operational range fiber laser for processing thin film photovoltaic panels", in Proc of ICALEO, paper M1306 (2010)
- (11) 田中、岡本、宇野、「パルスファイバレーザの高速走査による金型材料の表面改質に関する基礎的研究」、精密工学会中国四国支部山口地方学術講演会、講演番号 115、pp. 29-30、Nov. (2009)
- (12) 田中、岡本、宇野、「パルスファイバレーザの高速走査による金型材料に対する表面性状制御の試み」、砥粒加工学会学術講演会、D37、pp. 399-400、Aug. (2010)
- (13) W. Hempel and W. Wischmann, "Aging of Molybdenum back contact and its influence on ClGS solar cells", EU PVSEC, Poster session, 3BV.2.39, Sept. (2010)

執 筆 者

角井 素貴* : 光通信研究所 光部品研究部
プロジェクトリーダー
光ファイバ増幅器、ファイバレーザの開
発に従事



玉置 忍 : 光通信研究所 光部品研究部
金内 靖臣 : 光通信研究所 光部品研究部 主査
耕田 浩 : 光通信研究所 光部品研究部 主査
田中 裕士 : 岡山大学 大学院 自然科学研究科
岡本 康寛 : 岡山大学 大学院 自然科学研究科 助教 工学博士
宇野 義幸 : 岡山大学 大学院 自然科学研究科 教授 工学博士
Brian Baird : Summit Photonics LLC., Managing Director

*主執筆