

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 7 日現在

機関番号：53101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560882

研究課題名(和文) 新規レーザー微細加工技術を利用した液晶ディスプレイ用の機能性拡散シートの開発

研究課題名(英文) Development of functional diffusion sheet for liquid crystal display using new laser microprocessing technology

研究代表者

中村 奨 (Nakamura, Susumu)

長岡工業高等専門学校・電気電子システム工学科・教授

研究者番号：10217854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：申請者が開発したレーザー微細穴あけ加工技術を応用して、これまでとは異なった新規手法で、かつ簡便に、指向性を有する拡散光を作り出すことのできる機能性拡散シートの開発を行った。具体的には、パルス幅がナノ秒の紫外線レーザーを使用し、ポリエチレンテレフタレート(PET)やポリフェニレンサルファイド(PPS)などの透明樹脂シートに貫通穴を所定の密度で形成する技術の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The diffusion seat for liquid crystal display was made by using new laser microprocessing technology which was developed by our laboratory. This technique using nanosecond pulse UV laser is simple compared with the conventional production technology. By using this technique, we were able to make reproducible small holes in transparent resin sheets of polyethylene terephthalate (PET) and polyphenylene sulfide (PPS). The resin sheets having through holes with narrow pitch function as the diffusion seat for liquid crystal display.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、材料加工・処理

キーワード：紫外線レーザー ナノ秒パルス 微細穴 拡散板

1. 研究開始当初の背景

ノート型コンピューターを含め、デジタルカメラ、携帯電話、切符販売機、家電製品など多くの用途で液晶ディスプレイが使用されている。液晶は自発発光しないため、液晶ディスプレイには、光源としてバックライトが使用されている。このバックライトには多くの光学フィルムが使用されており、特に拡散シートはほとんどすべての液晶表示装置に必要な不可欠な光学シートとして使用されている。

ノート型コンピューター用薄膜トランジスタ液晶ディスプレイ (TFT-LCD) は、図1に示すような構造を持っている。このバックライトの構成部品は、アクリル導光板、導光板の端にある冷陰極管、これを包むように配置されているランプリフレクタ、導光板の背後にある反射シートおよび導光板上に置かれた数枚の光学フィルタである。これらの光学フィルタは拡散シート、1組のプリズムシートと保護拡散シートから構成されており、垂直方向への光の出力を増し、ディスプレイ表面の光の品位を改善するために使われている。

ノート型コンピューター用導光板から出射される光は、導光板に対し法線方向からランプと逆側に 70~80°傾いた方向を中心に指向性を持った出射特性を持っている。このままでは人間が液晶表示装置を見る方向が暗くなり、見ない方向が明るくなってしまふ。人間が見る正面方向 (導光板に対し法線方向) を明るくするために、拡散シートとプリズムが使用され、導光板から出射された光が拡散シートにより効率の良い出光分布に形成される。

拡散シートは基材、拡散性能の付与の仕方により何種類かに分類できる。基材ではポリエチレンテレフタレート (PET) とポリカーボネイトが使用されている。PET は透明性、色味 (無色透明が望まれている) がポリカーボネイトに比べ劣っている。しかし、熱、湿度によるシートのたわみの発生の恐れが少ない点では PET の方が優れている。このたわ

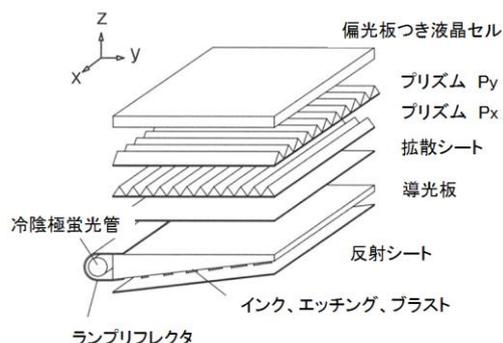


図1 ノート型コンピューター用薄膜トランジスタ液晶表示装置の構造

みは、熱や湿度による基材、コーティング材の伸縮が起因している。液晶ディスプレイの大型化が進む最近では、このたわみの問題から PET 基材の拡散シートの需要が多い。

拡散性能の付加方法としては古くは硫酸バリウムや、酸化チタンなど、無機化合物のコーティングが多かった。しかし、これらは光線透過率が低く、拡散性が必要以上に大きいため指向性も低いという問題点があった。現在これらの点を改善したエンボス品とビーズコーティング品の2種類が市場に出回っているが、ビーズ、バインダー制御を適切に行う必要があり、その工程は必ずしも簡単ではない。

2. 研究の目的

当研究室ではこれまでパルスレーザーを用いた微細穴あけ加工技術を研究してきた。その研究成果として、ストレートやラップ状に広がった貫通穴を形成する技術を確立し、特許出願を行ってきた。本研究の目的は、申請者が開発したこのレーザー微細穴あけ加工技術を応用して、PET や PPS (ポリフェニレンサルファイド) などの透明樹脂シートにストレートな貫通穴を所定の密度で形成し、これまでとは異なった新規手法で、かつ簡便に、指向性を有する拡散光を作り出すことのできる機能性拡散シートの開発を行うものである。

3. 研究の方法

3.1 基礎研究

基礎的データの採取を目的として、フラッシュランプ励起の低繰り返しレーザーを使用し、PETシートへの貫通穴あけを実施した。

今回の実験に使用したレーザーは、フラッシュランプ励起式の Q スイッチ Nd:YAG レーザー、Surelite II-10 である。基本波長は 1,064 nm の赤外光であるが、この基本波を 2 個の非線形光学結晶に通すことにより波長 266 nm の紫外光に変換して照射した。レーザービームの横モードは TEM₀₀ でガウシアン分布をしている。パルスの繰り返し数は 10 Hz であり、パルス幅は 4-6 ns である。波長 266 nm のレーザー光は焦点距離 50 mm の集光レンズにより試料表面に集光した。感熱紙を用いて焦点でのビーム径を測定したところ 18 μm と評価された。試料はスティーピングモーター駆動の精密 XYZ ステージ上に設置した。焦点位置は Z 軸ステージを上下させることにより調節可能である。レーザーの照射中、焦点位置を動かすことはせず、試料表面に固定した。レーザーによる穴あけ加工には、パーカッション穴あけとトレパニング穴あけとの2種類があるが、今回はパーカッション穴あけを使用して貫通穴を形成した。これは同一箇所にてレーザーを複数回照射することにより、穴あけを行う方法である。

一般的にレーザーによって開けられる貫通穴は、入射面側から出射面側に向かってす

ぼまっていくテーパー状となる。そしてこのテーパー穴では、高開口率を得ることはできない。高開口率のシートを得るためには、ストレートに近い貫通穴とする必要があるが、この課題に対しては、当研究室で開発した裏当て加工により対処することとする。

レーザー照射部の概略を図2に示す。被加工材には透明なPETシートを使用した。また貫通穴の形状をストレート、または逆テーパー状に制御するために、本実験では、流動性のある裏当て材として木工用ボンドを使用した。裏当て材は、被加工材の裏面、すなわちレーザービームが突き抜ける面に厚さ1mmで塗布した。これにより、被加工材を突き抜けたレーザー光は裏当て材と反応し、それによりラジカルを含むプラズマが発生し、出射面側穴径の拡大が図られる。

レーザー照射後の試料表面の観察には、デジタルマイクロスコープを使用した。このマイクロスコープは拡大率を450倍から3,000倍まで可変することが可能である。

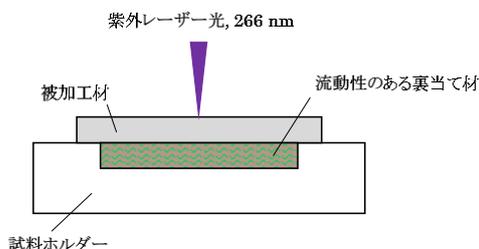


図2 レーザー照射部の概略

3. 2 応用研究

基礎研究ではフラッシュランプ励起のYAGレーザーを使用した。パルス繰り返し数が10 Hzと低いために、多数の穴をあけるには長時間を要し不向きである。そこで応用研究ではkHzオーダーの繰り返し可能な半導体励起固体レーザーを使用してデータ採取を行った。

本実験で使用したナノ秒レーザーを表1に示す。どちらのレーザーも半導体励起固体レーザーである。Awave-355は結晶にYAGを使用しており、発振波長は355 nmである。Awave-266はYVO₄結晶を使用しており、発

振波長は266 nmである。パルス幅は、いずれのレーザーにおいても20 ns以下である。

2台のレーザーはともに発振波長が1.06 μmの赤外光であるが、非線形光学素子によって波長を第3高調波(355 nm)と第4高調波(266 nm)に変換している。一般的に波長が短くなるほど非熱加工の割合が高くなるため、紫外域のレーザー光を使うことにより、より精密で微細な加工が期待できる。またこれらは半導体レーザーで固体結晶を励起するタイプのレーザーであるため、パルスの繰り返し数をkHzオーダーまで高めることが可能であり、生産性の向上が期待できる。

いずれのレーザーシステムにおいても集光レンズ以外は同一の光学ラインを採用した。レーザー光は、ビームエキスパンダによってビーム径を拡大し平滑化したのち、ガルバノスキャナとfθレンズを通して、ステージ上に設置された試料の表面に照射した。ビームエキスパンダでビーム径を拡大することにより、ワーク面でのレーザースポット径を小さくすることが可能となる。ガルバノスキャナとは、X軸とY軸の2枚のミラーをモーターによって動かし、レーザーの照射位置をプログラムにより面的に制御する光学装置である。集光レンズであるfθレンズの焦点距離は、Awave-355で56.0 mm、Awave-266で162.3 mmと53.5 mmのものを使用した。

被加工材には厚さ25 μmのPPSシートを用いた。PPSシートは、長期耐熱性に優れ、成形収縮率、線膨張係数が小さく、吸水性が低いので高温・高湿度下でも優れた寸法安定性を示すなどの優れた特性を持つ熱可塑性スーパーエンジニアリングプラスチックである。本実験ではこのシートに対してナノ秒UVレーザー光を照射し、直径20 μm以下の微細穴加工を施すことを目的とした。

図3に半導体励起固体レーザーであるAwave-355の外観を示す。本レーザー装置は空冷のため、その外観は非常にコンパクトである。図4はガルバノメータスキャナと加工テーブルの外観写真である。ガルバノメータスキャナによりレーザービームを90度真下に向け、加工ステージのX-Y平面上にビームを高速描画させることが可能である。

表1 使用レーザー

パルス幅 < 20 ns

製造会社	型番	固体結晶	波長	パルス周波数
アドバンストオプトウエーブ	Awave-355	YAG	355 nm	~20 kHz
アドバンストオプトウエーブ	Awave-266	YVO ₄	266 nm	~20 kHz

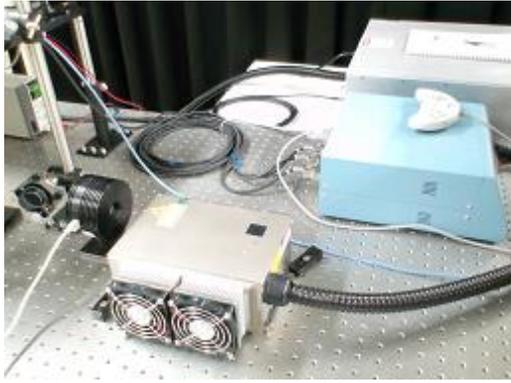


図3 紫外レーザー発振器 (Awave-355)

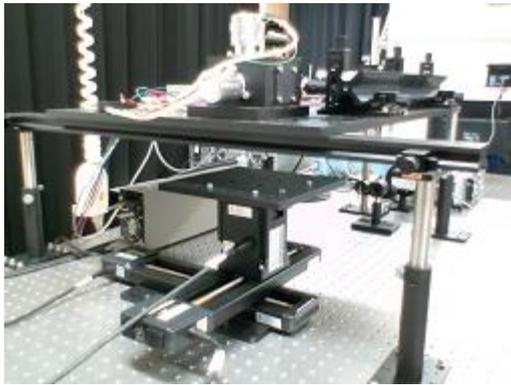


図4 加工ステージ

4. 研究成果

4. 1 基礎研究における成果

透明 PET シートに形成した貫通穴の入射面側と出射面側の光学顕微鏡写真を図5に示す。ここで使用した透明 PET シートは厚さ $40\ \mu\text{m}$ の PET 基材に厚さ $10\ \mu\text{m}$ の光硬化型アクリルハードコートを施したものであり、全体としてのシートの厚さは $60\ \mu\text{m}$ となる。パルスエネルギーは $5\ \mu\text{J}$ であり、この場合、焦点でのエネルギーフルエンスは $2.0\ \text{J}/\text{cm}^2$ となる。図5は裏当て材に市販の木工用ボンドを使用して、一穴当りにレーザーを150ショット、900ショット照射した場合の結果である。写真下部の数値は光学顕微鏡で測定した貫通穴の平均直径を表している。Exit / Entrance ratio は出射面側の穴直径を入射面側の穴直径で除した値である。この値が1より大きければ入射面から出射面に向かって穴が広がっていく逆テーパの貫通穴が形成されていることを示し、1ちょうどの場合にはストレートの貫通穴が、そして1よりも小さな場合には入射面から出射面に向かってすぼまっていくテーパ状の貫通穴が形成されていることを示している。一般的なレーザー加工においては、この値が $0.5\sim 0.6$ 程度を示すのが普通である。図5に示すとおり、木工用ボンドを裏当てし、1穴にレーザーを900ショット照射することにより、出射面の穴直径

は大きく拡大し、Exit / Entrance ratio は1.3となった。

図6に厚さ $60\ \mu\text{m}$ の透明 PET シートにレーザーを900ショット照射して形成した場合の貫通穴の断面 SEM 写真を示す。木工用ボンドを裏当てした結果である。写真上部からレーザービームが入射し、下部から出射している。Exit / Entrance ratio = 1.3 に対応して、入射面から出射面に向けて緩やかに広がっていく逆テーパ穴が形成されている。また壁面もきわめてスムーズに形成されていることがわかる。

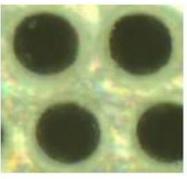
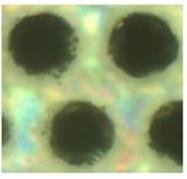
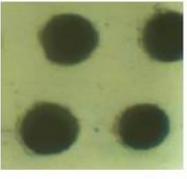
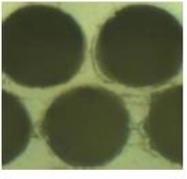
	150shots /hole	900 shots /hole
Entrance surface	 19.0 μm	 19.3 μm
Exit surface	 15.9 μm	 25.2 μm
Exit/Entrance ratio	0.8	1.3

図5 厚さ $60\ \mu\text{m}$ の透明 PET 樹脂に形成した貫通穴の光学顕微鏡写真

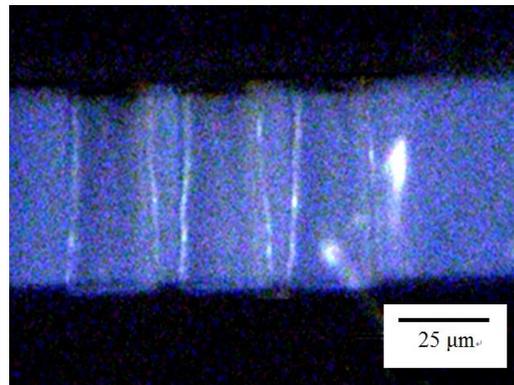
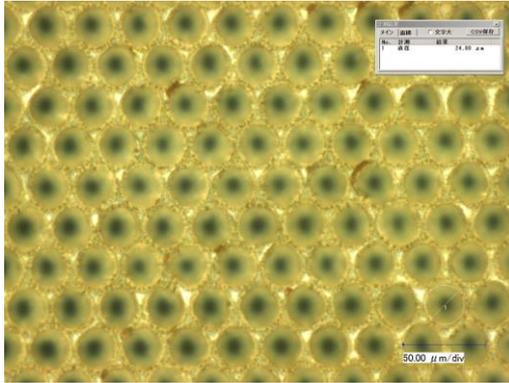


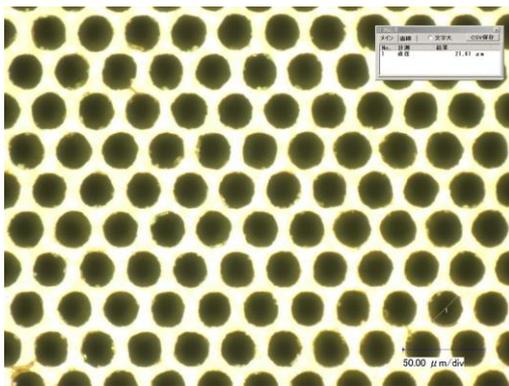
図6 厚さ $60\ \mu\text{m}$ の透明 PET 樹脂に形成した貫通穴の SEM 写真

4. 2 応用研究における成果

応用研究では被加工材として厚さ $25\ \mu\text{m}$ の PPS シートを用いた。図 7 はグリセロールを裏当て材として、1 パルス当りのエネルギーを $3.7\ \mu\text{J}$ とし、一穴当りのレーザーショット数を 1,000 まで増加させた結果である。繰返しパルス周波数は $10\ \text{kHz}$ 、穴ピッチは $28\ \mu\text{m}$ である。この場合、出射面側開口率として 53.4% が得られている。



(a) 入射面側穴径 $24.0\ \mu\text{m}$

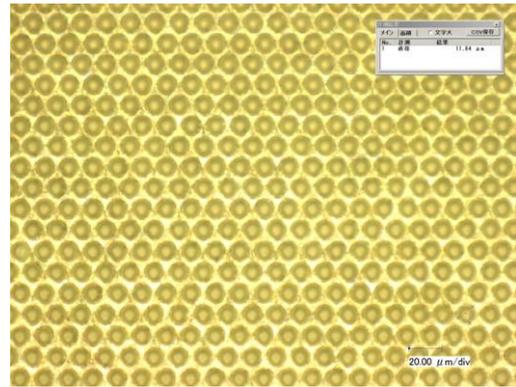


(b) 出射面側穴径 $21.6\ \mu\text{m}$

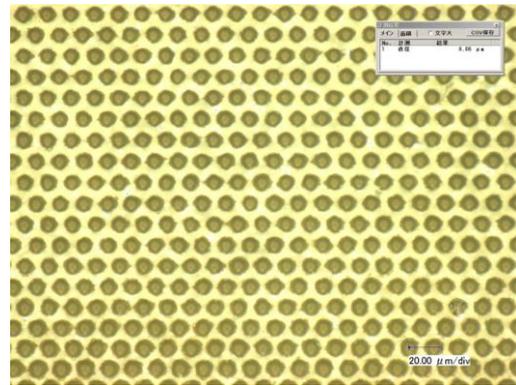
図 7 PPS シートにおける出射面側開口率 53.4% の穴あけ (Awave-266)

ここに示す通り、PPS シートにおいて出射面側開口率で 50% を超える値が得られた。しかしながら、その穴径は $20\ \mu\text{m}$ 台であり $10\ \mu\text{m}$ 台までには微細化できていない。一般的には、集光レンズの焦点距離が短くなるほど微細な点にレーザー光を集光することが可能となるので、穴あけ加工における微細化には、焦点距離の短い集光レンズが有効である。そこでこれまで使用してきた焦点距離 $162.3\ \text{mm}$ の $f\theta$ レンズに替えて、焦点距離 $53.5\ \text{mm}$ の $f\theta$ レンズを使用し、穴径の微細化を試みた。

図 8 は被加工材に厚さ $25\ \mu\text{m}$ の PPS シートを用い、グリセリンを裏当て材として、1 パルス当りのエネルギーを $2.0\ \mu\text{J}$ 、一穴当りにレーザー光を 1,000 ショット照射した場合の結果である。使用した波長は第 4 高調波、 $266\ \text{nm}$ である。穴ピッチは $20\ \mu\text{m}$ である。 $53.5\ \text{mm}$



(a) 入射面側穴径 $11.6\ \mu\text{m}$



(b) 出射面側穴径 $8.1\ \mu\text{m}$

図 8 短焦点 $f\theta$ レンズによる PPS シートの穴あけ (Awave-266)

という焦点距離の短い $f\theta$ レンズを用いることにより、入射面側穴径で $11.6\ \mu\text{m}$ 、出射面側穴径で $8.1\ \mu\text{m}$ の貫通穴を形成することができた。この場合、出射面開口率は 26.2% である。

ここまでの結果は、いずれも一つの穴に対して複数回のレーザー照射を繰り返すマルチショット加工での結果である。小面積の加工に対してならばマルチショット加工でも処理時間が長くかかることはなく十分対応可能である。しかしながら大面積の加工に対しては穴数が膨大となるためマルチショット加工は現実的ではなく、1 発で貫通穴を形成するシングルショット加工で対処せざるを得ない。

図 9 は、パルスエネルギー $100\ \mu\text{J}$ のレーザー光を 1 発 (シングルショット) のみ照射して貫通穴を形成した場合の出射面側写真である。被加工材は厚さ $25\ \mu\text{m}$ の PPS シートであり、Awave-355 レーザーを使用し、 $355\ \text{nm}$ の第 3 高調波を照射している。焦点距離 $56.0\ \text{mm}$ の $f\theta$ レンズを使用し、穴と穴の間隔は光学系の制約から $20\ \mu\text{m}$ とした。パルス周波数は $2\ \text{kHz}$ である。この場合、出射面側で直径 $7.1\ \mu\text{m}$ の貫通穴が形成されており、出射面側開口率は 11.3% となる。透過照明により、各穴は確実に貫通しており、光が通り抜け可能

なことがわかる。

図 10 はこの条件で縦 13.0 mm×横 10.8 mm の 1 ブロックを描画し、これを繰り返すことによって縦 52 mm×横 65 mm の大きさの拡散板を作製した結果である。縦 13.0 mm×横 10.8 mm の 1 ブロックを描画するのに、2 分 57 秒かかっている。さらなる高開口率を得るためには、裏当て材を利用したマルチショット加工ということになるが、これはタクトタイム（処理時間）の長時間化につながる。したがって実際の加工においては、開口率と処理時



(a) 落射照明 穴径 7.1 μm



(b) 透過照明 穴径 7.1 μm

図 9 周波数 2 kHz でのシングルショット加工

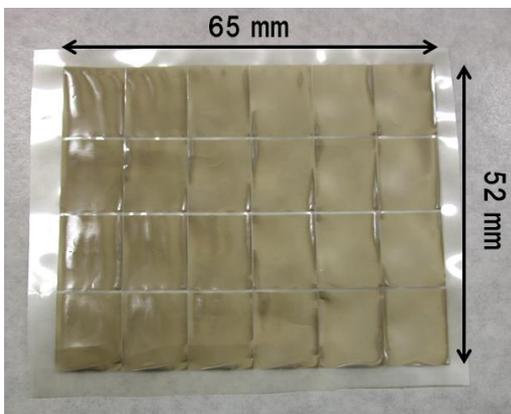


図 10 名刺サイズの拡散板

間を考慮して、照射方法を選ぶことになる。

今回の研究により、第 4 高調波、第 3 高調波ともに PPS シートの穴あけに対して有効であることを確認した。一般的に装置価格は、第 4 高調波のレーザーよりも第 3 高調波のレーザーの方が安価であるので、第 3 高調波での加工はコストメリットが高い。

現状の課題は、加工時間の短縮化を図ることである。ある一定の開口率のもとにおいて、穴径が微細化するほど穴ピッチを詰めなければならず、そのために加工すべき穴数が膨大なものとなる。膨大な穴数を短時間で処理するためには、(1) 繰り返し周波数の高いレーザーの使用、(2) 少ないショット数での貫通穴の形成、の 2 点が必要となる。この二つの課題に対してはピコ秒レーザーが最適であると考えられる。一般的なピコ秒レーザーはパルス繰り返し数が 100 kHz 以上あり、またパルス幅がナノ秒レーザーに比べて 1000 分の 1 以下と短いのでアブレーション効果が高く、より少ないショット数での貫通穴の形成が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① S.Nakamura, K.Itagaki, N.Soma : “Through Hole Forming Method Using a Flowable Backing Material During Pulse UV Laser Radiation”, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 査読有, Vol. 9, No. 1, pp.73-78 (2014).

〔学会発表〕 (計 1 件)

- ① S.Nakamura, K.Itagaki and N.Soma : “Through hole forming method using pulse UV laser”, Online Proceedings of LPM 2013, #13-081: A132 (2013).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 奨 (NAKAMURA, Susumu)
長岡工業高等専門学校
電気電子システム工学科・教授
研究者番号：10217854