

UV レーザ用 $f\theta$ レンズの開発

荒木 高志*・平井 隆之・京谷 達也

Development of F-Theta Lens for UV Lasers — by Takashi Araki, Takayuki Hirai and Tatsuya Kyotani — In order to improve the performance of electronic equipment and reduce its size and weight, UV laser drill machines are highly required, with which small holes within $\phi 50\ \mu\text{m}$ in diameter can be provided during printed wiring boards (PWBs) processing. To meet such demand, Sumitomo Electric Hardmetal Corp. has developed an f-theta lens for UV lasers with the diffraction-limited performance over an entire scan field of $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$.

Test results by transmission wavefront measurement have confirmed that the f-theta lens has excellent properties in accordance with designs. According to laser drilling experiments, the holes were $\phi 23\ \mu\text{m}$ in diameter and showed uniformity throughout the $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ scan field.

Keywords: f-theta lens, UV Laser, laser drilling, PWB, transmission wavefront

1. 緒 言

携帯電話・ノートパソコン等の先端電子機器では、小型軽量化・高機能化・高速化が進んでいる。この背景には半導体素子の高集積度化・高速化とこれを搭載するプリント基板の高密度化・多層化・多様化がある。この動きに対応するため、プリント基板穴あけ加工には、小径化だけでなく、穴の真円度の向上のほか、種々の基板材料に加工できることが要求されつつある。

この分野では、比較的大きい穴あけ加工はマイクロドリルで為され、比較的小さい穴あけ加工やビルドアップ基板の加工等はレーザドリルで為されるという棲み分けがされている。基板材料や加工条件等にも依るが、レーザドリルは概ね $\phi 50 \sim \phi 200\ \mu\text{m}$ の加工に用いられる^{(1)~(3)}。

レーザドリルマシンの概要を図1に示す。発振器からの

レーザビームを、2軸のガルバノスキャナで高速に制御されたスキャンミラーで振りプリント基板上の目標の位置へ $f\theta$ レンズで集光することにより加工を行うものである。実際のレーザドリルマシンではプリント基板はXYステージに載せられておりガルバノスキャナの動きとあいまって、広い面積を加工出来るようにシステム化されている。

現在のところの主役は、スピードと加工コストの点で優位である炭酸ガスレーザを用いたレーザドリルマシンであるが、先端分野向けでは、 $\phi 50\ \mu\text{m}$ 以下の小径化の要求がますます強まっている。そのためには、炭酸ガスレーザ用 $f\theta$ レンズの焦点距離を小さくする（正確にはFナンバーを小さくする）ことが必要であり、当社はその開発も進めている。スキャン領域全域にわたる良好な穴形状の確保が厳しく要求されるため、 $f\theta$ レンズには従来に増して取差（光学的な歪み）の抑制が必要とされ、レンズ枚数の増加や従来以上の高精度な製造が必要となる。

この小径化を実現する、もう1つの方法が波長の短いレーザを使う方法である。例えば、UVレーザの波長は $0.355\ \mu\text{m}$ であり、炭酸ガスレーザ光の波長（ 9.4 又は $10.6\ \mu\text{m}$ ）の約 $1/30$ である。従って、UVレーザを用いる方が原理的に小スポット化に有利である。さらに、熱的な加工が支配的である炭酸ガスレーザドリル加工とは違って、非熱的な加工がメインとなるUVレーザドリル加工では、多様な基板材料や複合材料に対して加工が可能であり、プリント基板加工以外に、太陽電池向けの加工にも使用され始めている。そのため、UVレーザドリルの研究開発が活発に進められている。

ここではこのようなUVレーザ用 $f\theta$ レンズの開発の現状について、その設計、製造、性能評価を報告する。

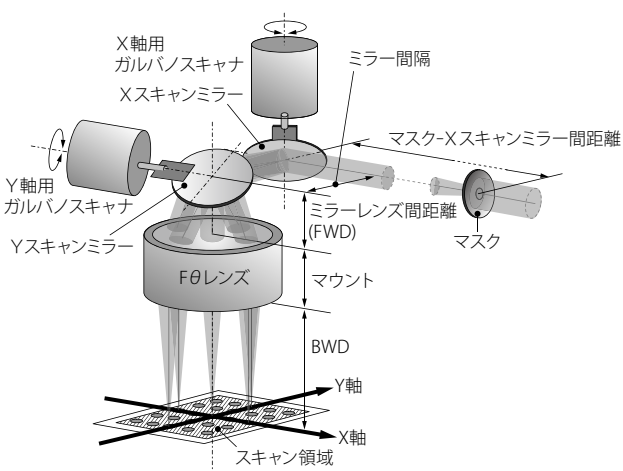


図1 $f\theta$ レンズを用いた穴あけ加工の概要

2. 光学設計

光学設計の具体的な考え方や方法は、既報⁽⁴⁾に譲り、ここでは、炭酸ガスレーザ用fθレンズと比較することで、UVレーザ用fθレンズの特徴を明確化して、その設計上のポイントを概説する。

2-1 fθレンズの仕様 表1に炭酸ガスレーザ用fθレンズとUVレーザ用fθレンズの要求仕様を示す。炭酸ガスレーザ用fθレンズの要求仕様は、一般的な場合で示してある。UVレーザ用fθレンズの要求仕様は市場での注目度の高い典型的な値を示してある。UVレーザの波長は短いため、ことさら入射ビーム径を大きく又は焦点距離を短くせずともスポット径を小さくできる。実際、表1ではUVレーザ用fθレンズの方が焦点距離が長く、また入射瞳径も小さいが、スポット径は、炭酸ガスレーザ用fθレンズφ88μmに対し、UVレーザ用fθレンズではφ7.2～25μmとかなり小さくなる。(注：ここではエアリディスク径を計算し、スポット径とした。実際の加工径とは異なる)

表1 fθレンズの要求仕様

No.	項目	fθレンズ要求仕様		備考
		炭酸ガスレーザ用	UVレーザ用	
1	波長	9.4μm	0.355μm	
2	入射瞳径	φ26mm	φ7～12mm	
3	マスク-Xミラー間距離	2000mm	1500～4000mm	
4	スキャンミラー間距離	37mm	23.7mm	
5	ミラーレンズ間距離(FWD)	37.8mm以上	19.4mm以上	ミラーからレンズマウント端面までの距離
6	焦点距離	100mm	100～200mm	
7	スキャン領域	50mm角	50mm角	
8	カバーウインドウ	標準装備	標準装備	

従って、UVレーザ光学系では入射瞳径を小さくできることが多く、ガルバノミラー系がコンパクトになる。これにより、一般に次のような効果がある。

- ・テレセントリックエラー（像面へのビーム入射角）を縮小できる。
- ・fθレンズの近くでミラーをスキャンできるので、同じミラー振り角でも構成レンズの直径を小さくできる。
- ・ミラーが小さく軽いので、高速にミラーを駆動でき、穴あけ加工速度が向上する。

同じく焦点距離をある程度長くできることはワーキングディスタンスを長くできることに繋がり、加工時のワークからの飛散物によりfθレンズが汚れて透過率が低下するのを軽減できる。

2-2 fθレンズの光学設計 光学設計とは、表1のように与えられた仕様を満足するレンズ構造を、公差を含めて決定するプロセスである。

fθレンズは、広いスキャン領域と小さなスポット径及びスキャン領域全域にわたっての真円且つ均一なスポット形状が求められる。従って、光学的にはスキャン領域全域にわたって回折限界の集光特性が必要となる。さらに、小さなテレセントリックエラーや良好なスキャン線形性等の機能も求められる。しかしながら、広いスキャン領域を得ようとするとき一般にスポット径は大きくなる等、これらの多くの特性はトレードオフの関係にある。そのため、光学設計解を得ること自体にノウハウが必要とされるが、得られた解も一般に製造誤差に敏感な解となることが多い。その結果、試作ではたまたまうまく使用できるfθレンズを製造できても、いざ量産してみると特性ばらつきが大きく、事実上使えないということが起こり得る。

ここで重要となるのは、製造の実力値を十分に把握して、光学設計の条件に織り込むことである。当社では、図2のように、公差に余裕のある解を得る光学設計⁽⁵⁾を行い、構成レンズの素材や枚数を選択し必要に応じて非球面も導入した上、高精度なレンズ加工と組立を行っている。その結果、高精度且つ製造誤差にロバストなfθレンズを実現している。

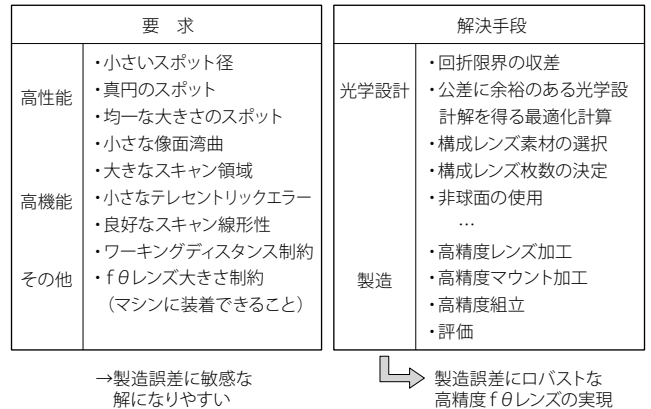


図2 要求と解決手段

炭酸ガスレーザ用とUVレーザ用fθレンズを比較した場合、前節で指摘したように、後者の方が入射瞳径を小さく又は焦点距離を長くでき、要求特性を実現するには有利な方向である。一方で、それぞれに使用できる素材は、一般に前者ではZnSeとGe、後者ではSiO₂に限られており、表2に示すように後者の素材の方が圧倒的に屈折率が小さい。また、高精度な非球面創製は、超精密切削加工技術(Single Point Diamond Turning, SPDT技術)^{(6),(7)}を駆使できるZnSeやGeに比べて、SiO₂では加工が難しい。従って、UVレーザ用fθレンズの方が構成レンズ枚数が多くなる。また、加工面の面精度は、仮に使用波長の1/20

表2 レンズ素材の比較

	炭酸ガスレーザー用		UVレーザー用
	ZnSe	Ge	SiO ₂
屈折率	2.410	4.006	1.457
非球面創製	○	○	△
面精度をλ/20とした場合の公差(例)	0.47μm	←	0.018μm

が必要とすると、波長が短い分だけUVレーザー用の方が公差が厳しくなる。

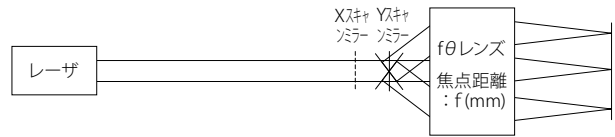
2-3 光学設計結果と検証 UVレーザー用fθレンズの設計結果を表3に、その特性を表4に示す。スポット径の均一性、真円度ともに良好で、像面湾曲も小さくテレセントリック性にも優れている。このfθレンズは汎用性を持たせるべく、図3(a)のように入射ビームが平行光であるfθレンズとして設計した。図4にこのfθレンズのPSF (point spread function) コンター図を示す。コンター図はfθレンズによる集光ビームの強度分布をスキャン領域内の主要点において、算出したものである。スキャン領域内

表3 fθレンズの設計結果

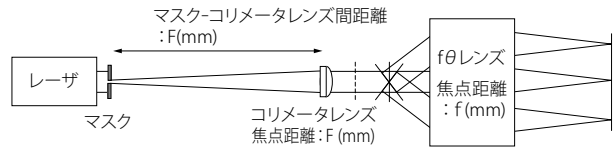
No.	項目	仕様	備考
1	波長	0.355μm	
2	入射瞳径	φ13mm	
3	入射ビーム発散角	0mrad	コリメータレンズ使用を前提
4	スキャンミラー間距離	23.7mm	
5	ミラーレンズ間距離(FWD)	29mm	
6	焦点距離	160mm	
7	スキャン領域	50mm角	
8	マウントサイズ	φ120mm 110mm L	ウインドウセルを含むサイズ
9	カバーウインドウ	有り	脱着可

表4 平行光を集光した場合の特性

No.	項目	特性	備考
10	入射ビーム径	φ8.7mm	1/e ² 径 (ガウスビーム)
11	ビームが蹴られない領域	53mm角	
12	ワークディスタンス(BWD)	213.1mm	
13	スポット径	φ8.9μm	ピーク強度の13.5%にて
14	スポット径バラツキ	±0.38%	{max-min}/min × 100 ÷ 2(%) ピーク強度の13.5%にて
15	スポット真円度	99%	ピーク強度の13.5%にて
16	スキャン線形性	0.3%以下	
17	像面湾曲	±2.6μm	面内36ヶ所から算出した計算値
18	最大テレセントリックエラー	1.6deg	



(a) 平行ビームを集光する系 (設計条件)



注) 縮小率は f/F

(b) マスク像を転写する系

図3 代表的なレーザー穴あけ光学系 (Yスキャンミラーを振った場合を示す)

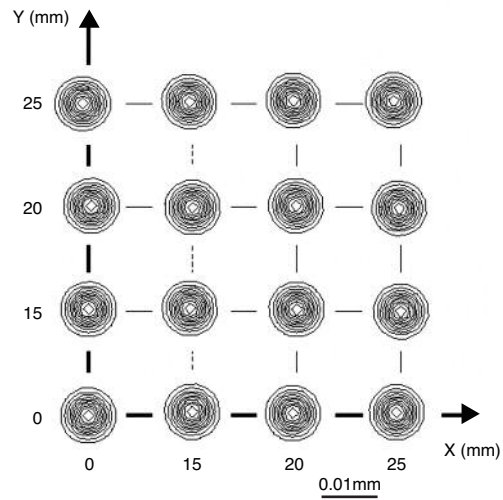


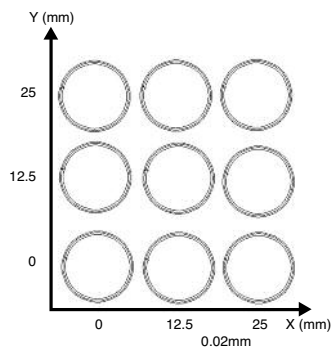
図4 PSFコンター図

の各点において描かれている同心円状の円は中央の強度を100%として、9.09%ずつ低下する円である。実際の加工では、加工しきい値は充分低いと考えられるので、コンター図上のかかなり外側の円の大きさ・形状が重要となる。この図からスキャン領域全域で真円度が良好で均一な大きさのスポットを確認でき、充分良好な特性を有していることがわかる。

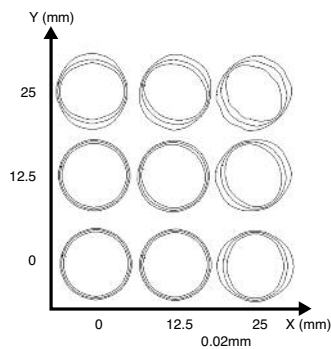
このfθレンズを使って、マスク像を転写する場合は、図3(b)のようにコリメータレンズを併用する。表5は、φ0.6mmのマスクと焦点距離2000mmのコリメータレンズを使ってマスク転写した場合の特性である。図5(a)はその場合の結像解析結果(このコンター図では、同心円状の線が密になるので、13.5%、30%、60%の強度のみ示した)であるが、スキャン領域全域で良好な特性を有しているのが確認される。なお、コリメータレンズを用いない場合は、像面湾曲が大きくなり、図5(b)のようにスポットも楕円化してしまう。

表5 $\phi 0.6\text{mm}$ マスクを像転写した場合の特性

No.	項目	特性	備考
19	マスク-コリメータ レンズ間距離	2000mm	
20	コリメータレンズ 焦点距離	2000mm	
21	スポット径	$\phi 48.3\mu\text{m}$	ピーク強度の13.5%にて
22	スポット径バラツキ	$\pm 0.10\%$	$\{\text{max-min}\}/\text{min} \times 100 \div 2(\%)$ ピーク強度の13.5%にて
23	スポット真円度	99%	ピーク強度の13.5%にて



(a) コリメータレンズ有り

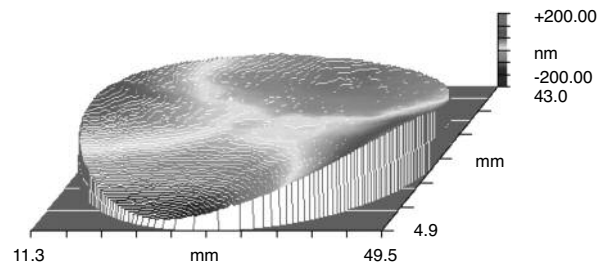


(b) コリメータレンズ無し

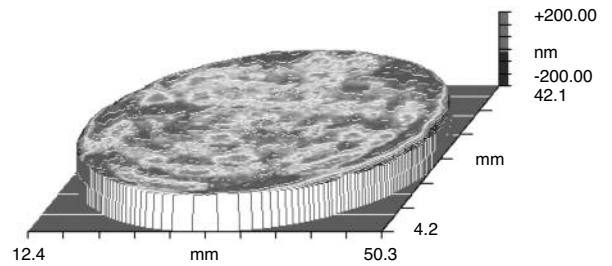
図5 結像解析

3. f θ レンズの製造

UVレーザ用f θ レンズの性能を左右する製造品質の1つは、それを構成する複数枚の石英レンズの形状精度である。石英レンズの研磨加工は目新しいものではないが、f θ レンズでは通常の単レンズ等とは異なり、曲率半径・厚さ・面精度等の各品質項目で非常に厳しい公差が要求される。厚さ/直径の比の小さいレンズでは特に面精度の制御が難しく、図6 (a) のような形状になってしまうことが多かった。加工条件や貼付条件を最適化した新研磨技術によって、図6 (b) のように面精度 (PV 値) を従来比40~60%減とし且つ形状に分布の少ないものにするのが可能となり、これを適用している。



(a) 従来研磨方法



(b) 新研磨方法

図6 研磨加工面の面精度



写真1 製作したUVレーザ用f θ レンズ

製作したUVレーザ用f θ レンズの写真を写真1に示す。各構成レンズが、アルミ合金製のマウント内部に高精度に組み付けられている。

4. 性能評価

製作したf θ レンズの性能を評価する方法としては、次の3つがある。

- ①製作したf θ レンズを何らかの光学的測定により評価する方法 (透過波面測定、MTF 測定等)。
- ②製造工程で採取した製造実績データから特性をシミュレートする方法。
- ③製作したf θ レンズをレーザドリルマシンに搭載して実加工により評価する方法。

今回3個のf θ レンズ (A, B, Cレンズ) を製作したが、これらの方法で評価した結果を以下に示す。

4-1 透過波面測定及び特性シミュレーション f θ レンズそのものの光学特性を評価する指標として、透過波面収差（光学的な歪み）を測定した。図7のように、フィゾー式干渉計に用いられる光学系を応用して、f θ レンズに入射するレーザー光とf θ レンズを透過後に参照球面原器で反射されたレーザー光によって生じる干渉縞の歪み量を測定した⁽⁸⁾。

製作した3個のf θ レンズ（A, B, C レンズ）において、スキャンミラーを振ってスキャン領域50mm角相当内の数点において測定した結果を図8に示す。3個のf θ レンズ（A, B, C レンズ）の測定結果と設計結果は良く一致しており、所望の光学特性が得られている。スキャン領域50mm角相当の透過波面収差測定値から、3個のf θ レンズ間のバラツキは4.6%であり、充分小さいと判断している。

ここで、図8中の点線は、C レンズの製造実績データより特性をシミュレートした計算結果である。製造実績データとは、厚さ・曲率半径等の構成レンズの測定値やディセンタ・レンズ間隔等の組立作業時の採取値で、面精度はZernike多項式の係数を求め、入力した。C レンズのシミュレーションデータも設計値と良く一致していることは、製造が充分制御されて実施されていることを裏付けている。

設計値からのズレがどの程度までなら実際の加工で問題なく使用できるかについては、加工材料・加工条件やレー

ザ発振器・ビーム伝送系等の光学的条件等々により一概には決められず、個々のレーザドリルマシンとその加工条件によって決めて行かなければならない。今回、製造した3個のf θ レンズについては設計値からの測定値のズレは最大7.0%であったが、次節に述べた加工評価において有意差は認められず、いずれも良好に使用できた。

4-2 実装評価 2個のf θ レンズ（A, B レンズ）を実装評価をした結果を図9（a）、（b）に示す。加工条件は次のように、マスク転写ではなく、集光である。

レーザーパワー：1.5W
周波数：120KHz
照射時間：1ms
ワーク：アルミ蒸着ガラス板（1.82mm厚）

ここでは、スキャン領域50mm角の中央、中間、最外位置でデフォーカス量（DF）を+0.05,0,-0.05mmとしたデータを示している。スキャン領域中央でも真円の穴になっていない理由は、使用したレーザービームの特性の影響と推測される。デフォーカス時やミラースキャン時に、その傾向を持ちながら穴の形状が少しずつ変化しているのはf θ レンズとガルバノミラー系の特性によるものと考えられる。2つのf θ レンズの穴あけ加工結果に有意な差は認められないことは、前節の透過波面収差測定結果を裏付ける。なお、スキャン領域中央での穴径は ϕ 23 μ mである。比較のため、図10には従来レンズ（従来の当社設計・製造レベル）での加工実験結果を示すが、スキャン領域最外での穴の品質が良くない。このf θ レンズを使用した場合には、穴品質

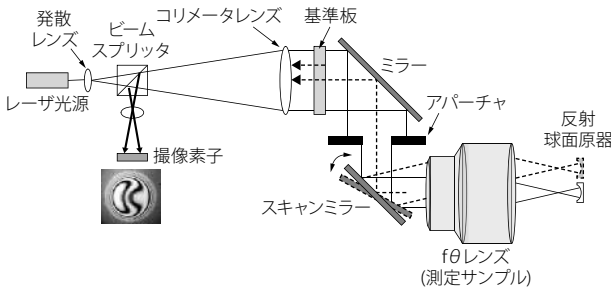


図7 f θ レンズ透過波面測定概要

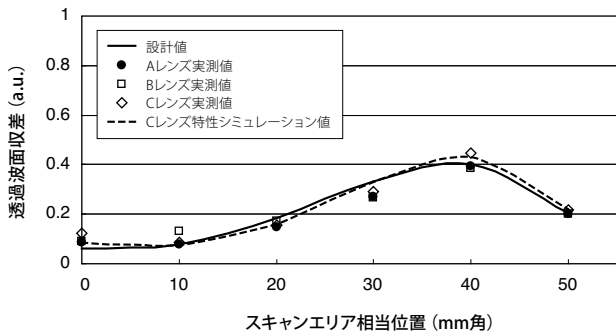
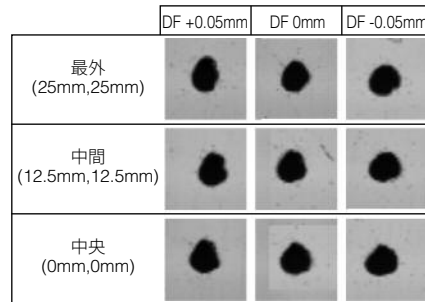
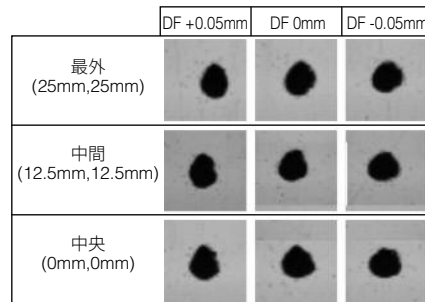


図8 透過波面収差測定結果



(a) Aレンズ加工評価



(b) Bレンズ加工評価

図9 実装評価結果

確保のため実施する加工によっては、スキャン領域を30mm角等に絞らざるを得ないことがわかる。

最後に、図9、図10の穴の位置とデフォーカス量から、スキャン領域50mm角最外でのテレセントリックエラーを求めた結果を表6に示す。今回製作したAレンズとBレンズの方が、従来レンズよりテレセントリック性も良好であることがわかる。なお、テレセントリックエラーの設計値は、X方向0.46deg、Y方向1.71degであり、測定誤差を考慮するとほぼ一致していると判断される。

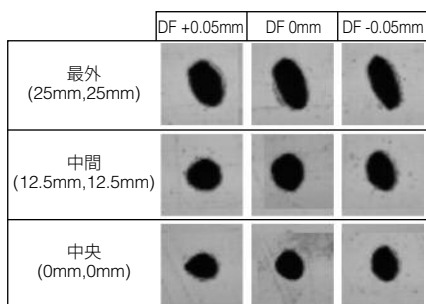


図10 実装評価結果（従来レンズ）

表6 実装評価結果から求めたテレセントリックエラー

		X方向	Y方向
今回開発した fθレンズ	Aレンズ	0.80	1.40
	Bレンズ	0.75	1.46
従来レンズ		0.32	2.83

(単位：deg)

5. 結 言

高精度のUVレーザ用fθレンズを製作し、その性能を透過波面収差測定と加工実験結果により確認した。この光学的评价データと、加工結果の相関をとることで、加工性能の高いfθレンズを市場に供給していくことも可能となる。

スキャン領域拡大・短焦点距離化等の高性能化についても検討中で、この際も透過波面収差測定結果を、設計へフィードバックして開発を加速させている。

UVレーザドリルは、プリント基板加工だけでなく、

- ・グリーンシート加工
- ・シリコンへの穴あけ加工
- ・透明電極のスクライブ
- ・樹脂シートの切断

等々に応用が拡がりつつある^{(9)、(10)}。

また、YAGレーザ基本波(1.064μm)用fθレンズ・2

倍波(0.532μm)用fθレンズ等UVレーザより波長の長いものについても同様に開発・製作が可能で、今後その分野にも展開していく。

小径加工が可能で、ますます応用分野が広がる短波長レーザ用fθレンズの発展に、今後とも寄与したい。

参 考 文 献

- (1) 「第7章 ディフィカルトチェンジ」、2007年度版日本実装技術ロードマップ プリント配線板技術編、社団法人 電子情報技術産業協会、p130-284 (2007)
- (2) 中井出ほか、「プリント配線板のレーザ高速穴あけ装置」、第35回レーザ熱加工研究会誌、vol.2、No.2、p.199-206 (1995)
- (3) 北泰彦ほか、「CO₂レーザ銅ダイレクト加工の技術動向」、第23回エレクトロニクス実装学会 (2009)
- (4) 荒木高志ほか、「レーザ穴あけ加工用fθレンズの開発」、SEIテクニカルレビュー、第154号、p89-95 (1999)
- (5) 住友電気工業、布施敬司、「レンズ及び光学系の設計方法」、特許第3006611号 (1999-11-26)
- (6) 京谷達也ほか、「CO₂レーザ用Moコート放物面鏡」、住友電気、第138号、p162-167 (1991)
- (7) 平井隆之ほか、「高出力ファイバーレーザ用放物面鏡加工ヘッドの開発」、第71回レーザ加工学会講演会 (2008)
- (8) 平井隆之ほか、「レーザ加工用fθレンズの透過波面測定法の確立」、SEIテクニカルレビュー、第175号、p68-71 (2009)
- (9) 成田知徳、「TSV用レーザー・ドリリング及び薄型ウエハのダイシング」、Proceedings xm-07-043.0 STS Japan (2007)
- (10) 青柳裕治ほか、「UVレーザを用いた微細穴加工に関する研究」、福井工業技術センター、NO.399 (2005)

執 筆 者

荒木 高志*：シニアスペシャリスト
住友電気ハードメタル(株)
光学部品開発部 主幹
レーザ加工用光学部品の開発に従事



平井 隆之：住友電気ハードメタル(株) 光学部品開発部 主査
京谷 達也：住友電気ハードメタル(株) 光学部品開発部 部長

*主執筆者