



プリント基板加工用全 ZnSe 製 Fθレンズ

All-ZnSe F-Theta Lens for Printed Wiring Board Processing

荒木 高志*
Takashi Araki

矢島 國光
Kunimitsu Yajima

佐藤 直樹
Naoki Sato

布施 敬司
Keiji Fuse

プリント基板加工用 CO₂ (炭酸ガス) レーザドリルマシンには、高速・高精度・高スループットの微小穴あけを実現するために高性能 Fθレンズが用いられる。セレン化亜鉛 (ZnSe) とゲルマニウム (Ge) は Fθレンズのレンズ素材として優れているが、Ge は ZnSe に比べて CO₂ レーザに対する吸収率が高く、温度変化に伴う屈折率変化が大きい。そのため、穴加工の高密度化やレーザ高出力化による Fθレンズへの入力パワー増大に伴って、加工の不安定や品質低下を招きやすい。そこで、当社は ZnSe 素材から完成品までを一貫生産する光学部品メーカーとしての強みを活かし、全ての構成レンズと DLC (ダイヤモンドライクカーボン) コートカバーウィンドウに ZnSe を用いた新しい Fθレンズを開発した。ここでは、その技術概要を紹介する。

High-performance f-theta lenses are applied to CO₂ laser drilling machines of printed wiring boards to drill micro-via holes with high precision, high speed, and high throughput. F-theta lenses are generally made from zinc selenide (ZnSe) or germanium (Ge), but Ge is more temperature sensitive and has higher absorption than ZnSe. Therefore, as laser power increases, deterioration in the stability and quality of laser drilling tends to occur. Taking advantage of our strength as a comprehensive optics manufacturer that produces a complete range of products from ZnSe materials to finished laser optics products, we have developed a new f-theta lens using ZnSe for all lens elements and a cover window with a diamond-like carbon (DLC) coating. Here, we provide the technical outline of the development.

キーワード：Fθレンズ、ZnSe、レーザドリル、プリント基板、炭酸ガスレーザ

1. 緒言

スマートフォンやノートパソコン、5G 基地局やデータセンター用サーバ、AI や IoT、自動車の電動・電子化や自動運転…と、身近な機器から最新技術まで小型軽量化・高性能化・高速化のニュースは枚挙にいとまがない。これらの背景には半導体素子の高集積化・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・多様化があり、素子や部品をプリント基板に実装する技術の進歩も大きく寄与している。プリント基板の製造では、そのキーテクノロジーとして、CO₂ (炭酸ガス) レーザドリル加工が 1990 年代から急速に普及した。この技術により製造されたビルドアップ基板は、IVH (Interstitial Via Hole) と呼ばれる微小な非貫通穴の加工によって多層化が可能となることから、配線の高密度化が進展した⁽¹⁾。

レーザドリルマシンの原理を図 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制御されたスキャンミラーで高速に振り、プリント基板上の目標の位置へ Fθレンズで集光することにより加工を行うものである⁽²⁾。最近のレーザドリルマシンでは、プリント基板を載せた XY ステージがガルバノスキャナと同期制御されるようになっており、加工速度が向上している。プリント基板加工用レーザドリルマシンでは、通常、φ30~200μm の穴加工が行われている。当初は、1,000 穴/秒程度の処理能力であったが、ガルバノスキャナの高速化やステージ制御の改善等により、現在は 3,000 穴/秒を超え

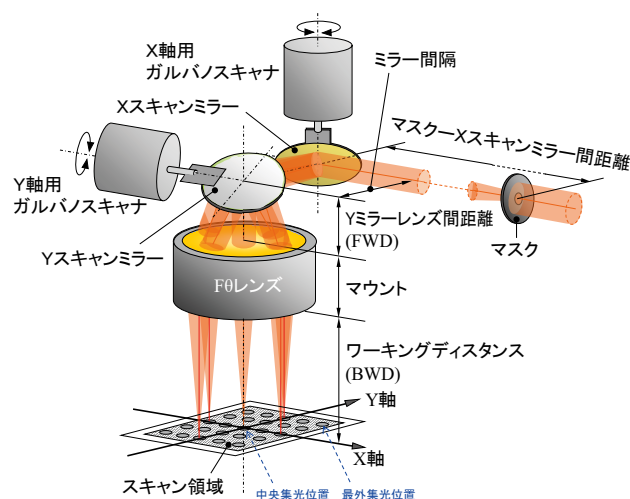


図 1 Fθレンズを用いた穴あけ加工の概要

る加工速度も珍しくない。また、なかでも半導体パッケージ基板では、微細化に伴い、穴の高密度化要求により、穴径が縮小した。最先端分野では、この 10 年間に φ75~90μm から φ50μm 程度へ約 40% も小さくなっているため、単純計算で同一面積あたり約 3 倍の穴数増となる⁽³⁾。さらに、使用されるレーザも当初 0.2kW 程度の平均パワーであったが、種々の材料の加工を可能にするため、

現在は0.4kW程度が主流で、稀に1kWクラスのパワーレーザも使われている。

このように、穴加工の高速化・高密度化およびレーザパワーの高出力化によりF θ レンズに入力するパワーが増大するため、F θ レンズ自体のパワー吸収は僅かとはいえ、F θ レンズの温度上昇に伴う加工特性の変化が問題になっている。原因は、F θ レンズを構成するレンズ素材の屈折率が温度上昇で変化し、焦点距離や透過率が変化するためである。F θ レンズを水冷・空冷または温調することもあるが、十分な効果を得られないことが多い。

本稿では、より本質的で強力な解決方法として、F θ レンズのレンズ素材に温度依存性の大きいゲルマニウム (Ge) を使用せず、セレン化亜鉛 (ZnSe) のみで構成する「全ZnSe製F θ レンズ」を提案する。F θ レンズにはDLC (ダイヤモンドライクカーボン) コートカバーウィンドウが必要だが、従来はGe基板のため吸収が大きく透過率が低かった。新規にZnSe基板を使えるように技術開発が進展し、この欠点も克服した。これについても説明する。

2. 光学設計

光学設計の具体的な考え方や方法は、既報⁽⁴⁾を参照頂きたい。ここでは、CO₂レーザ用レンズの素材として一般的に用いられる、ZnSeとGeの物性を紹介し、それらを用いて光学設計されたF θ レンズを比較し、全ZnSe製F θ レンズの有用性を示す。

2-1 F θ レンズの光学設計

光学設計とは、与えられた仕様を満足するレンズ構造を公差含めて決定するプロセスである。F θ レンズで重要な特性は、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である。さらに、小さなテレセントリックエラーや長いワーキングディスタンスも求められる。しかしながら、広いスキャン領域を得ようとすると一般にスポット径は大きくなる等、殆ど全ての特性はトレードオフの関係にある (図2)。高性能又は高機能的な要求仕様を満たすため、構成するレンズの枚数を増やしたり、非球面を用いたり、レンズ素材の組み合わせを検討したりと、ありとあらゆる手段を講じる。ま

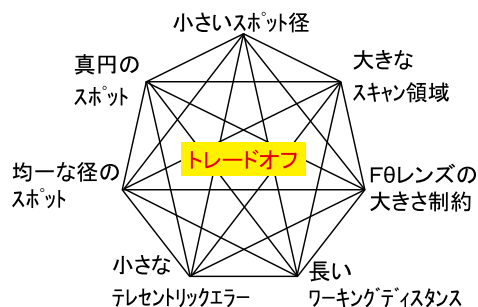


図2 F θ レンズの特性拮抗を示す模式図

た、2軸ガルバノ系の非対称性に合わせて、スキャン領域を長方形化することでスキャン領域全域での収差を低減し、実質の仕様を維持して実現したりもする (例、30mm×30mm→15mm×60mm; 面積はいずれも900mm²)⁽⁵⁾。

しかしながら、得られた設計解は一般に製造誤差に敏感な解であることが多い。その結果、試作ではたまたまうまく使用できるF θ 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やすい。そこで、当社では製造の実力値を把握して、光学設計の条件に織り込み、公差に余裕のある解を得ることで、高精度且つ製造誤差にロバストなF θ レンズを実現している。

2-2 全ZnSe製F θ レンズの光学設計

表1に、ZnSeとGeの光学的な物性の違いを示す。Geに比べてZnSeは屈折率が低いので、同じ設計条件では一般に解を得る難度が高くなるため、前述のような手段の多用が必要となる。また、得られた解については、Geを含むF θ レンズに比べ全ZnSe製F θ レンズの方が温度依存性が小さい一方、波長依存性は大きくなると予想される。ZnSeの吸収係数が小さい⁽⁶⁾ことから、Geを含むF θ レンズに比べて高透過率となる。

表1 ZnSeとGeの光学的な物性の違い

	ZnSe	Ge	Geを基準としたZnSe特性
屈折率 n	2.410	4.006	約1/2倍 (空気との屈折率差n-1で比較)
屈折率温度依存性 dn/dT (deg ⁻¹)	5.7×10 ⁻⁵	42×10 ⁻⁵	約1/7倍
屈折率波長依存性 dn/dλ (μm ⁻¹)	-5.4×10 ⁻³	-1.1×10 ⁻³	約5倍
吸収係数 (cm ⁻¹)	0.4×10 ⁻³	12×10 ⁻³	1/30倍 (波長10.6μmで比較)

表2に焦点距離100mmの全ZnSe製F θ レンズの設計結果を、表3にその特性を示す。スポット径の均一性、真円度ともに良好で、テレセントリックエラー (像面に入射するビームの傾き) も小さい。図3は、このF θ レンズでφ4mmマスク像を縮小転写した場合の結像解析結果をスキャン領域内の主要点について示したものである (ピーク強度の30%、13.5%、5%の強度の等高線を示す。それぞれ76μm, 93μm, 110μmの径に相当)。スキャン領域の全域で真円度の高い結像スポットとなっている。

表2 F θ レンズの代表的な設計結果

No.	項目	仕様	備考
1	波長	9.4 μ m	
2	入射ビーム径	ϕ 25mm	入射瞳径
3	マスク-Xミラー間距離	4000mm	
4	スキャンミラー間距離	31mm	
5	Yミラー-レンズ間距離 (FWD)	35mm	
6	焦点距離 (FL)	100mm	
7	スキャン領域	50mm角	
8	マウント外径	ϕ 130mm L67.5mm	ウインドウセル含むサイズ
9	素材	ZnSe	
10	カバーウインドウ	標準装備	ウインドウセルは脱着可 AR/DLCコート ZnSeウインドウ

表3 ϕ 4mm マスクを像転写した場合の特性

No.	項目	特性	備考
11	ワーキングディスタンス (BWD)	93.2mm	
12	スポット径	ϕ 92 μ m	ピーク強度の13.5%にて
13	スポット径バラツキ	\pm 0.3%	(max-min)/min \times 100 \div 2 ピーク強度の13.5%にて
14	スポット真円度	99%	ピーク強度の13.5%にて
15	最大テレセントリックエラー	3.2deg	

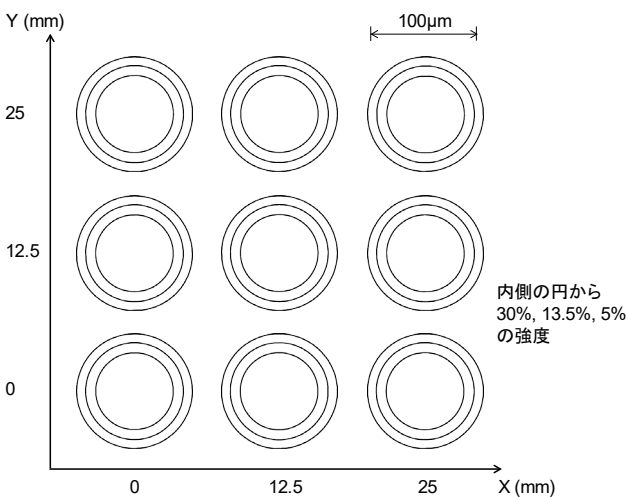


図3 結像解析

2-3 光学設計結果の評価

表2と同じ仕様で素材のみ変更した3タイプのF θ レンズを設計した(表4)。構成レンズ枚数は同じで、各特性や収差レベルが同等となるよう、非球面使用枚数を調整した。スキャン領域内で真円のスポットを得るためには、焦点面を平坦に(像面湾曲を小さく)する必要があるので、像面湾曲は同程度に小さくなるよう設計した。以下、これらを

表4 設計したF θ レンズ

F θ レンズのタイプ		全ZnSe製	ZnSe/Ge 混合型 ^(#)	全Ge製
素材	レンズ	ZnSe	ZnSe, Ge	Ge
	カバーウインドウ	ZnSe	Ge	Ge

[#]当社従来型

比較する。

(1) 温度依存性

温度が均一に変化したと仮定して、焦点距離 (FL) と最外集光位置の変動を計算した結果を表5に示す。F θ レンズの温度が上昇した際、全ZnSe製F θ レンズの方が焦点距離や集光位置の変動が小さい。実際使用時も温度依存性が小さいと予測される。

表5 温度依存性の比較

F θ レンズのタイプ	全ZnSe製	ZnSe/Ge 混合型	全Ge製
焦点距離の変化率 Δ FL/FL	-0.005%/deg	-0.019%/deg	-0.017%/deg
最外集光位置 ^(*) の変化量	1.4 μ m/deg	8.2 μ m/deg	7.0 μ m/deg

* (X, Y) = (25mm, 25mm) の位置

(2) 波長依存性

プリント基板の材料の吸収率が高いことから、CO₂レーザの発振波長は9.3または9.4 μ mが選択される。それ以外にも発振波長としては10.2、10.6 μ m等があり、それらが低パワーだが混入することがある。9.4 μ m光用F θ レンズに10.2 μ m光が混入した場合、波長毎に集光位置が僅かに異なる。表6に、3タイプのF θ レンズについてスキャン領域の最外集光位置の差異を計算した結果を示す。

表6 波長依存性の比較

F θ レンズのタイプ	全ZnSe製	ZnSe/Ge 混合型	全Ge製
波長9.4 μ mと10.2 μ mの 最外集光位置 ^(*) の差	130.5 μ m	75.8 μ m	12.9 μ m

* (X, Y) = (25mm, 25mm) の位置

波長により集光位置が変わるため、結果的にメインの穴の近くにゴーストのような穴が出現したり、2つの穴が繋がって楕円穴になったりする。残念ながら、全ZnSe製F θ レンズは最も異波長混入の影響を受けやすい。異波長混入の少ないレーザを選ぶのがベストだが、それが困難な場合は不要な波長の除去が可能な、図4に示すダイクロイックミラーを使用する。レーザドリル光学系では多くのバンドミラーを用いてビームを伝送するので、そのうちの1枚を

ダイクロイックミラーに交換することで、不要波長が除去できる。こうして、波長依存性の課題を回避できる。

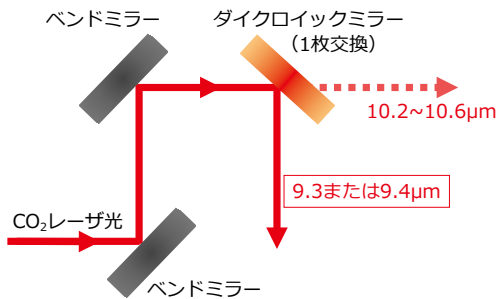


図4 ダイクロイックミラーによる異波長除去

そのため、これらのFθレンズに使われる非球面は、球面からのずれを表すサグ差(図6参照)が大きくなる。また、サグ差が大きい非球面を含むFθレンズでは、形状が複雑なことから製造が難しいだけでなく、製造誤差に鋭敏となるので、製造公差を厳しくする必要がある。表7は、ZnSe/Ge混合型Fθレンズを基準として、公差の一例をサグ差と共に比較したものである。

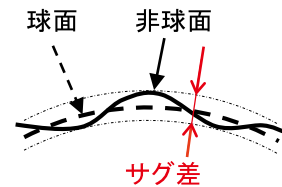


図6 サグ差

(3) ペッツパール和

光学の教科書では、像面湾曲をなくすには以下の式(1)で算出されるペッツパール和(P)をゼロにする必要が説かれている⁽⁷⁾。焦点距離がプラスのレンズには高い屈折率の素材を使用し、焦点距離がマイナスのレンズには低い屈折率の素材を使用することが、ペッツパール和を小さくするには効果的である。ZnSe/Ge混合型Fθレンズでは、そのように素材を選択できる。

$$P = \frac{1}{n_1 f_1} + \frac{1}{n_2 f_2} + \dots + \frac{1}{n_k f_k} = \sum_k \frac{1}{n_k f_k} \dots\dots (1)$$

ここで、 n_k はk番目のレンズの屈折率、 f_k はk番目のレンズの焦点距離である。

図5は、3タイプのFθレンズでペッツパール和と像面湾曲量を算出し、グラフ化したものである。ペッツパール和は、全ZnSe製Fθレンズ或いは全Ge製Fθレンズで大きい。それに関わらず、3つのFθレンズで像面湾曲を同程度に小さくできているのは、非球面を用いてレンズ中央部分と外周部分の実質の焦点距離を変化させているからであ

表7 サグ差と公差(相対値)

Fθレンズのタイプ	全ZnSe製	ZnSe/Ge混合型	全Ge製
サグ差	2.709mm	0.030mm	0.316mm
曲率半径公差	0.08	1	0.23
芯ずれ公差	0.20	1	0.43

以上、まとめると、全ZnSe製Fθレンズは製造は非常に難しいものの、温度依存性が小さいメリットがある。ZnSe/Ge混合型Fθレンズは製造は比較的容易であるものの、温度変化に弱い。全Ge製Fθレンズは製造難易度が高い上に温度変化に弱い。

3. Fθレンズの生産技術開発

全ZnSe製Fθレンズは、【ZnSe素材合成→加工→コーティング→組立→検査】の工程で製造される。当社は全工程の要素技術を保有しており、一貫製造を実施している⁽⁸⁾。ここでは、2つの生産上のポイントを説明する。

3-1 高精度非球面レンズ

非球面は、超精密切削加工技術(Single Point Diamond Turning: SPDT)で作り込む。切削条件の最適化・NCプログラムの開発・治工具の改善等により、サグ差の大きい大口径非球面レンズの高精度製作が可能になった。

代表例を写真1に示す。レンズ面に映った背景の様子からサグ差の大きな非球面であることが見て取れる。この非球面の形状測定結果を図7に示す。設計値からのずれを示す形状精度は0.075μmと、高精度球面と遜色ない。

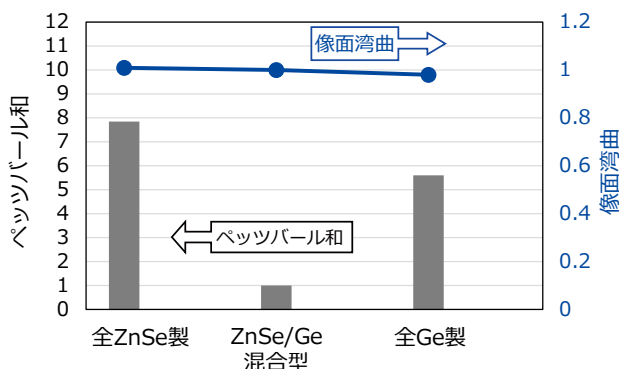


図5 3タイプのFθレンズでのペッツパール和と像面湾曲量(相対値)



写真1 サグ差の大きい非球面レンズ

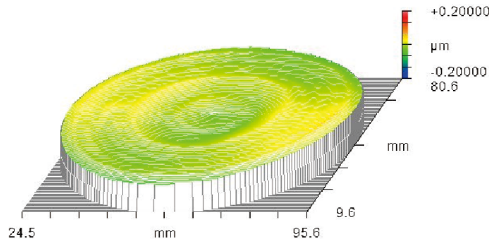


図7 非球面の面形状測定結果

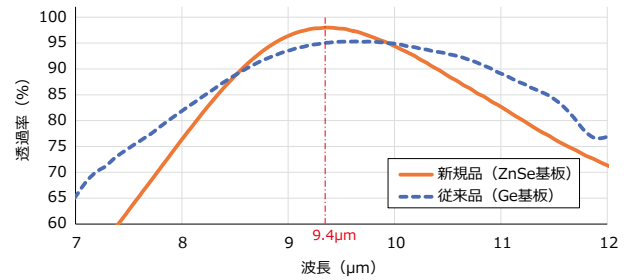


図8 カバーウインドウの透過スペクトル実測値

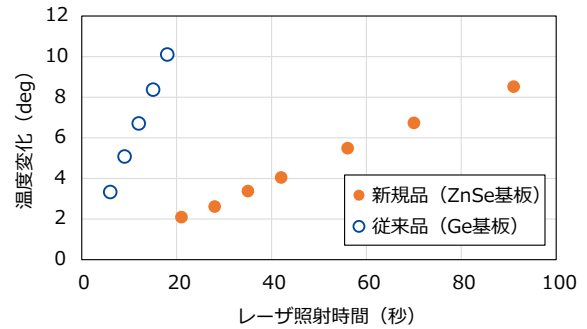


図9 CO₂レーザー照射時のウィンドウ温度変化

3-2 DLCコートZnSeウィンドウ

レーザードリルマシンでプリント基板を加工すると、溶融物やガスが飛散し、一部はFθレンズの射出側表面に付着する。そこで、レンズの射出面側にカバーウィンドウを装着してレンズ本体を保護するとともに、適宜クリーニングして透過率低下を防ぎ、高精度な加工特性を維持している。従来はGe基板表面にクリーニング時の摩擦負荷に耐える硬さのDLC膜をコートしたウィンドウが使われてきた。しかし、Ge基板はレーザー光の吸収率が高いためレーザー照射によって温度が急激に上昇すること、温度上昇と共に吸収率が增大してさらに昇温が加速する熱暴走を起こすことが知られており⁽⁹⁾、レーザードリル加工精度が悪化したり、投入レーザーパワーを高くできない問題があった。これらを解決するため、吸収率の低いZnSe基板にDLC膜をコートしたカバーウィンドウを開発した。

10μm帯でのDLC膜の屈折率は2.1で、偶然にもGeの屈折率4.0の平方根に近い値となっているため、単層DLC膜で反射防止 (AR) 膜を容易に形成できた。一方、ZnSeの屈折率は約2.4であり、単層DLC膜ではAR膜にならないため、最表面のDLC膜を維持しつつ多層膜を新規に設計、開発した。

開発したウィンドウの透過スペクトルを図8に示す。従来品 (Ge基板) よりもピーク波長で高い透過率が得られている。また、ウィンドウ小片 (φ38.1mm×t5mm) を断熱状態とし、120Wの連続波CO₂レーザー光を照射した時の温度変化を図9に示す。この温度変化から10μm帯での吸収率は、従来品の5.6%に対し新規品 (ZnSe基板) では0.7%と計算され、従来比で約1/8の吸収率に抑制できた。従来品は、上記の条件で30秒以上レーザー照射すると熱暴走

を起こして焼損に至るが、新規品は適切な冷却を行えば、出力の大きなレーザー加工機への適用も可能と考えられる。

4. 性能評価

4-1 集光特性

集光特性を評価するため、全ZnSe製Fθレンズで透過波面収差 (光学的な歪み) を測定した⁽¹⁰⁾。スキャンミラーを振ることで、スキャン領域50mm角相当内の各点において測定し、得られた透過波面収差データからPSF (Point Spread Function; 点光源の像面での強度分布) を計算した。図10に示す結果から、スキャン領域の中央と最外位置で、同様な分布をしていることがわかる。その他の中間位

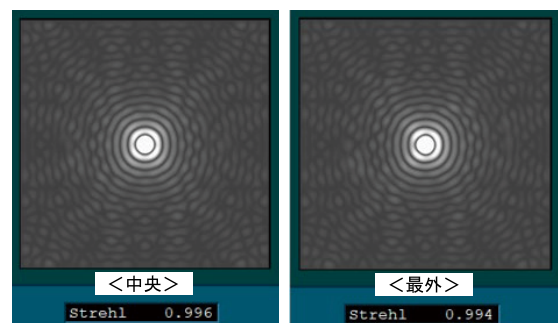


図10 PSF (スキャン領域の中央、最外位置)

置でも同様な結果であった。図10のようにストレール比^{*1} (strehl ratio) は、中央でも最外位置でも0.99以上あり、非常に良好な集光特性を持っていることがわかる。この結果から、スキャン領域全域で良好な加工特性も保有していると判断される。

4-2 温度依存性

(1) 焦点距離

全ZnSe製F θ レンズとZnSe/Ge混合型F θ レンズで、実際に2-3(1)項に示した違いがあるか調べてみた。熱容量と大きさを考慮した面状ヒータを各F θ レンズに巻き付けて温度を上昇させ、各温度での焦点距離 (FL) を倍率法⁽¹¹⁾により測定した。図11に結果を示す。ZnSe/Ge混合型F θ レンズでは $\Delta FL/FL$ の温度変化率は-0.018%/degである。光源出力や測定環境温度のふらつき等に依ると思われるデータのばらつきが多少認められるものの、表5に示した計算結果とよく一致している。一方、全ZnSe製F θ レンズでは $\Delta FL/FL$ が横軸にほぼ平行であり、焦点距離が温度変化に依存しないことがわかる。

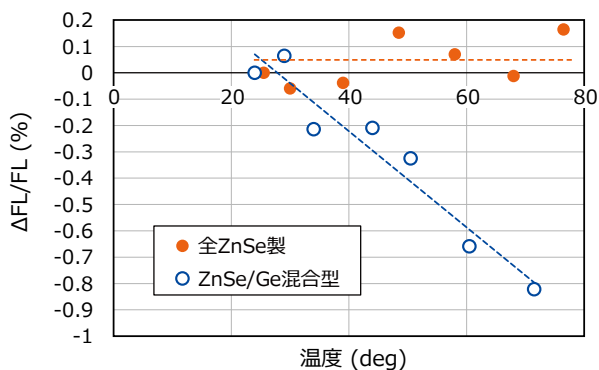


図11 焦点距離 (FL) の温度依存性

(2) 透過率

上記同様に透過率の温度依存性を測定した結果を図12に示す。全ZnSe製F θ レンズでは温度が上昇しても透過率が殆ど変わらない結果が得られている。実際の穴あけ加工に使用した場合も、加工点には安定したパワーが投入されると期待される。一方、ZnSe/Ge混合型F θ レンズでは、明らかにGe素材の熱暴走によると思われる透過率の急激な減少が見られる。Geを含むF θ レンズを高精度に使いこなすには、空冷や水冷等の温度対策が必須である。

4-3 ビーム透過性

室温において、全ZnSe製F θ レンズ、ZnSe/Ge混合型F θ レンズ全体の透過率を測定したところ、それぞれ96.0%、91.1%であった。このように、全ZnSe製F θ レンズの透過率が約5%高いことを確認した。

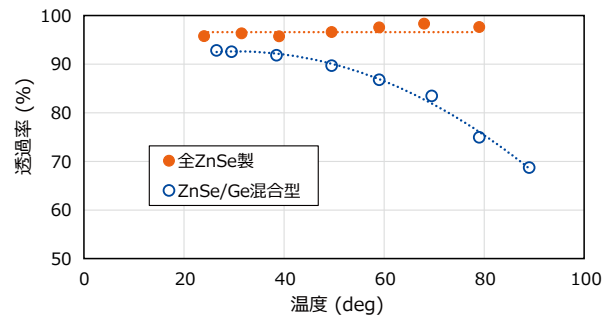


図12 透過率の温度依存性

4-4 実装評価

レーザドリルマシンに全ZnSe製F θ レンズを搭載して、穴あけ加工実験を行った結果を図13に示す。実験手法は銅ダイレクトBVH (ブラインドピアホール) 加工である。加工物のプリント基板は、表面の銅層に酸化銅皮膜を形成して、レーザの吸収率を高めたものである (黒化処理基板)。スキャン領域の中央でも最外位置でも充分な真円度を持つ $\phi 115\mu\text{m}$ の穴が得られている。

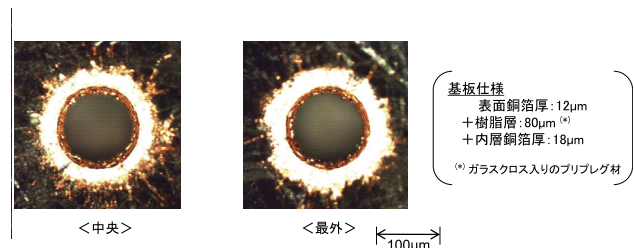


図13 穴あけ実験結果

以上のように、全ZnSe製F θ レンズは従来のZnSe/Ge混合型F θ レンズに比べて、温度依存性が小さく環境変化にロバストであること、透過率が高いことを確認した。また、実装評価を行い、精度良くプリント基板穴あけ加工ができることを確認した。

5. 結 言

全ZnSe製F θ レンズでは、低い温度依存性と高い透過率が得られるので、従来より高密度穴あけ加工ができたり、加工の適用分野が広がると考えている。焦点距離100mmの全ZnSe製F θ レンズを中心に紹介したが、既に従来のZnSe/Ge混合型F θ レンズ⁽¹²⁾と同様に、焦点距離50~150mmのラインナップを完了している。

プリント基板加工用途以外でもZnSeがCO₂レーザ光の吸収が少ないことを利用して、全ZnSe製F θ レンズが使わ

れている。3Dプリンタやフィルム切断の加工では、最大500WのパワーをF θ レンズに入力し、広いスキャン領域を加工する。写真2(右)は、スキャン領域250mm角仕様のフィルム切断用F θ レンズで、比較のため写真2(左)にはプリント基板加工用を示す。前者のマウントの径は ϕ 200mmと大きく、構成レンズも大きい。今後さらに入力するパワーが増大して行けば、レンズに低吸収率コーティング⁽¹³⁾を施すことも必要になると考える。



写真2 プリント基板加工用(左)とフィルム切断用の全ZnSe製F θ レンズ(右)

当社は工業用にZnSeを供給できる、世界でも数少ないメーカーのひとつであり、今後もZnSeの優れた特性を活かした光学部品を製造していく。当社は、今回紹介した赤外(CO₂)レーザー用だけでなく可視・紫外レーザー用に至る幅広い波長域で、多種多様な光学部品の製造・開発を行っている。今後も、これらを通して、レーザー加工業界の発展に寄与していく所存である。

用語集

※1 ストレール比

当該レンズの集光スポットと、理想的な回折限界スポットのピーク強度の比。レンズ性能を評価する指標の一つ。理想値は1で、一般に0.8以上は優れたレンズであり回折限界特性と呼ばれる。

参考文献

- (1) 剣持裕治、「高速信号を扱う際、知っておきたい多層基板の基礎」、Design Wave Magazine 2007 June、p79-80
- (2) 道上典男 ほか、「超高密度多層配線を実現する高性能プリント配線板製造装置」、日立評論、2011年2月号、p43-47 (2011)
- (3) 「第1章 プリント配線板技術ロードマップの総論」、[第2章 応用市場と基盤技術]、2019年度版プリント配線板技術ロードマップ、一般社団法人 日本電子回路工業会、p1-235 (2019)
- (4) 荒木高志 ほか、「レーザ穴あけ加工用f θ レンズの開発」、SEIテクニカルレビュー第154号、p89-95 (1999)
- (5) 住友電工ハードメタル、荒木高志、「レーザ加工方法及びレーザ加工装置」、特許第5429670号 (2013-12-13)
- (6) Proceedings of SPIE, Specification of infrared materials for laser application, vol.607, p22-35
- (7) 岸川利郎、「ユーザーエンジニアのための光学入門」、pp. 104-112、オプトロニクス社 (1990年)
- (8) 荒木高志、京谷達也、「レーザ学会産業賞を受賞して一赤外レーザードリル用f θ (エフシータ) レンズ」、レーザー研究、第39巻8号、p639-642 (2011)
- (9) 宮田威男、「大出力CO₂レーザー用透明光学部品の開発」、精密機械、49巻10号、p1333-1339 (1983)
- (10) 平井隆之 ほか、「レーザ加工用f θ 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)
- (11) 村中昌幸 監修、「[新] 光学レンズ技術～高度な製品仕様を実現させる設計ノウハウと材料・加工・評価」、pp. 395-396、サイエンス&テクノロジー(株) (2013年)
- (12) 荒木高志、「プリント基板加工用f θ レンズの開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、p23-29 (2010)
- (13) 楠幸久 ほか、「Thフリーコートレンズの開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、p114-119 (2010)

執筆者

荒木 高志* : 住友電工ハードメタル(株) 担当主幹



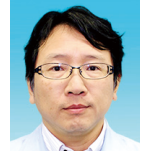
矢島 國光 : 住友電工ハードメタル(株) 参与工学博士



佐藤 直樹 : 住友電工ハードメタル(株) 主査



布施 敬司 : 住友電工ハードメタル(株) 室長



*主執筆者