



テクニカルハンドブック 計測用レーザー光源

2022年11月

エーエルティ株式会社

〒176-0014東京都練馬区豊玉南 1-21-10

TEL 03-5946-7336 FAX 03-5946-7316

<http://www.alt.co.jp>

e-mail: info@alt.co.jp

目次

1. レーザースキャンプロジェクター	光アライアンス2022年11月
2. VCSEL 光源ユニットの設計と評価	光アライアンス2022年1月
3. 3次元計測用レーザーパターン光源	光アライアンス2021年5月
4. DOE を用いたレーザーパターン光源	光アライアンス2016年6月
5. 三次元計測用レーザ光源	光アライアンス2014年10月
6. 低ノイズレーザ光源ユニットのレーザ駆動方法	光アライアンス2013年10月
7. レーザライン光源の新しいアプローチ	光アライアンス2011年4月
8. レーザダイオードのスイッチング技術	光アライアンス2011年1月
9. 高出力レーザシステム	光アライアンス2010年2月
10. 小型内面形状測定装置の開発	精密工学会2007年10月
11. レーザライン光源の応用	光アライアンス2006年10月

レーザースキャンプロジェクター

エーエルティール 高野 裕・藤田 修平

1. はじめに

パターンを投影して3次元計測する方法は古くから用いられており、近年ではDMDやLCOSを用いたプロジェクターで高速にパターンを変えることもできるようになった。グレイコードパターン投影法では粗いパターンから密なパターンまで複数のパターンを順次投影する必要があるが、通常のプロジェクターではフレームレートは早く数秒で数10枚のパターンを照射することができ、カメラへ同期信号を送ることで同期して画像を取り込むことができる。

また、位相シフト法では濃淡パターンの位相を変化させながら撮像することで計測分解能を上げることもできる。ただDMDやLCOSによるプロジェクターは通常のプロジェクターと同じくフォーカス位置を検出深度の中央に設定する必要があり深い深度のワークではピントが甘くなりパターンのコントラストが悪くなる場所が出てくる。

また、ワークがゴムのような反射率の低いものでは反射光が少ないのでその分照射パワーを上げる必要が出てくるが、これはプロジェクターの大型、大電力につながり好ましくない。

光切断法は古くからおこなわれて通常はライン光源とカメラが固定でワークがコンベアなどの上を移動することにより3次元形状を測定することができる。これと同原理でワークが固定されてライン光源を動かすことでも3次元データが取得でき、これをライン走査方式と呼びこのスキャナーにはガルバノスキャナーが用いられてきた。

ただ、ガルバノスキャナーは大型で電力も大きくセンサに組み込むには大変であったが近年になり光

MEMSスキャナーが実用化され、この中でも非共振タイプと呼ばれるものはDC駆動ができてガルバノスキャナーと同じような使用ができるようになった。

このスキャナーはMEMSプロセスで作られているので小型、軽量、省電力でセンサに組み込むには適している。レーザースキャンプロジェクターは、中出力の半導体レーザーと均一なラインを作ることができるラインジェネレーター光学系と光MEMSスキャナーを組み合わせたユニットで、レーザーをCW点灯してライン走査方式での使用の他、レーザーをデジタル変調してグレイコードパターン投影法やレーザーをアナログ変調することにより位相シフト法のプロジェクターとして使用することもできる。

2. スキャンプロジェクターの構成要素

2-1 光MEMSスキャナー

光MEMSスキャナーは現在2次元のディスプレイタイプがスマートグラスやヘッドマウントディスプレイに組み込まれている。

現在駆動方式としては主に三つの方式が提案されていてそれぞれメリット、デメリットがある。

古くから作られているのが電磁タイプで、ミラーがマグネット側のムービングマグネットのタイプやミラーがコイル側のムービングコイルのタイプがある。この方式では磁気回路が必要で小型化の障害になる場合があるので起磁力でコイルにある程度の電流を流す必要がある。

次に商品化されているのが静電方式で、ミラーの裏面に形成された櫛歯状の電極で静電力を発生させて駆

動かせる。この方式では小型化はできるが、高い駆動電圧が必要で100~200 Vなどでプッシュ、プル駆動が必要な場合もある。

次はピエゾ方式でピエゾ素子の伸び縮みを利用して駆動する。この方式はピエゾ材料を所定厚さに積層して分極するなど製造工程が複雑である。

共振型でミラーを振るのであれば加振力は少なくても済むが、DC駆動（所定の角度でミラーを止める）にそれなりの力が必要でそのために蛇腹状にアクチュエーターを形成するなど工夫されている。

ディスプレイ用ではミラーサイズは $\phi 1$ mmくらいだがスキャンプロジェクターではもう少し大きなミラーが必要になる。これはライン光源にするラインジェネレーター光学系の後にスキャン系が配置されるためである。

ミラーサイズが大きくなることは共振周波数が下がることで通常数mmのミラーでは共振周波数は600~1,000 Hzに下がってしまう。

非共振タイプ1次元の光MEMSスキャナーとして台湾のULTIMEMS INC. のUM-6004Bでは表1のスペ

表1 仕様

Type	UM-6004B-04
Shape	Rectangular Mirror
Mirror diameter	5.5mm(along rotation axis)×3.6mm
Slow scan	DC driving or 600Hz(resonance)
Typical Mirror Angle(Optical)	± 14.0 deg
Mirror Reflectivity	$> 80\%$ for 400-700nm laser and 0deg incident angle
Driving Voltage	~ 250 V
Driving Current	~ 3 mA
Dimension	21.5 x 12 x 2.95 mm
Operating Temperature	0~60°C
Storage Temperature	-20~60°C

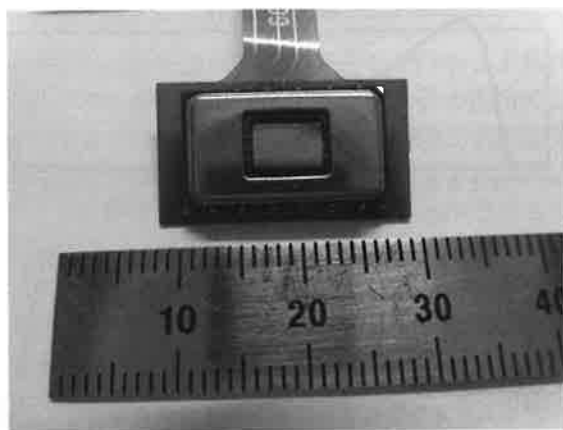


写真1 UM6004

ックのようにミラーサイズは5.5×3.6 mmである。走査方向へのレーザービームの入射角30度とすると機械振り角を考慮しても5.5×2.6 mmくらいの走査アパーチャーを得ることができる。

また、共振周波数は600 Hzなので後述するが駆動波形にはこの周波数を含めないようにしなければならない。外形は写真1のように小型でセンサに組み込むには適している。レーザーの入射方向は走査方向と同一にする必要があり、角度が付くと走査が湾曲する。

2-2 ラインジェネレーター光学系

ライン走査をするためレーザービームをライン状に変換する必要がある。

アナモルフィックの光学系で例えばシリンダレンズやロッドレンズを用いてレーザービームを引き伸ばす方法がある。こちらで生成されるラインは元のビームがガウス分布をしているためラインでのパワー分布は中央が高い分布となる。したがってパワー分布を良くするとレーザーの結合効率が低くなる。

DOE（回折光学素子）でラインを作る方法もある。この場合には多分岐で細かいドットを並べる設計が多いので、入力するビームと使用する作動距離において分岐角が近い場合には良いのだが異なるとビームが離れてリップルが出たり、逆に重なって干渉により分布が悪くなる場合がある。

また、プラスチックベースの製品では近紫外の波長では材料が劣化する場合があるので注意が必要である。均一で高効率のライン光源を作る方法としてデガウスプリズムがある。パウエルレンズとも呼ばれる光学素子は米国のパウエル博士によって発明された。

ガウス分布を均一に分配する形状をもったプリズムで現状標準品としてもいくつかのメーカーから供給されている。この光学素子は設計と実入射ビームが合っている場合には性能を発揮するが、合っていない場合には分布が極端に悪くなる。標準品として販売されているものはヘリウムネオンレーザーの $\phi 1$ mmビームの設計となっているものがあるがこれに通常の半導体レーザーの数mmのコリメート径を入れるとラインの両端が極端にパワーが大きくなる分布となってしまう。

また、アナモルフィック光学系では入射面と直角にビームを入れないとラインが湾曲してしまい、直線性の仕様が厳しい場合には調整機構が必要になる。

2-3 レーザー、コリメーター

ライン幅方向は作動距離を中心とした検出範囲内で変化が少ないことが望ましいが通常のレーザー光学系と同様にビームウエスト径は集光NAに依存するため、細いラインを作ろうとすると作動範囲が狭くなってしまふ。

仕様に合ったコリメート径を作ることが必要であるが、近年検査の高速化から高出力を求められることがある。この場合絞りなどでビーム径を遮蔽するとパワーが低下するので工夫が必要である。

また、高出力では半導体レーザーではマルチモードレーザーとなり発光点サイズが大きくなり、ストライプ方向は発光分布がガウス分布ではなくなる。発光点サイズは光学倍率でそのまま大きく投射されるので設計に考慮する必要がある。

発光点サイズが設計で許容できない場合にはシングルモードレーザーでは100%に近く偏光しているので2本のレーザーをP、S偏光として足し込んで倍のパワーとすることも行われている。

3. 光MEMSスキャナーの駆動方法

3-1 共振モード

ミラーは、質量・構造・バネ定数で決まる固有振動周波数で共振する。

共振を利用すると、小さな加振力で大きくミラーを振ることができ、高速動作が可能となる。複雑な動きはできないため、共振は一定の往復運動で十分な用途に利用される。

共振モードで駆動するためには、ミラーの共振周波数と同じ周波数の正弦波または矩形波の電流/電圧信号を入力する。矩形波を入力した場合でも、ミラーの振れ角は正弦波として動作する。

共振周波数で動作させたときの光学的振れ角は、他の周波数のときの光学的振れ角とは大きく異なり、共振周波数以外で駆動すると、任意の振れ角が得られるように駆動電流/電圧を調整しても、予期しない光学的振れ角となってしまう。

また、駆動電流/電圧に対して、光学的振れ角には位相遅れが生じ、温度依存性があるなどの特徴がある。

共振モードで駆動する場合には、優れた温度安定性をもつ基準信号発生器から生成された駆動信号を用いる必要がある。

3-2 非共振モード

逆に共振を利用しない動作を非共振モードといい、高速動作には適していない。

駆動電流/電圧とミラーの光学的振れ角の関係は通常直線性に優れており、駆動電流に対して高い角度再現性をもっていない。

非共振モードはミラーが共振しないように、ミラー固有の共振周波数よりも低い周波数で駆動する必要があり、通常、共振周波数の1/10~1/5以下の周波数で

駆動させる。

特に高速動作の場合や、共振周波数に近い周波数で駆動する場合は、同じ電流/電圧で駆動していても、共振周波数に近づくと最大光学的振れ角を超えてしまうことがあるので、注意が必要になる。

この共振周波数は単に繰り返しの周波数ではなく、波形に含まれる周波数も含まれる。正弦波では周波数は単一であるが三角波、ノコギリ波、矩形波となるにしたがって高い周波数が含まれるようになる。先ほどのULTIMEMSのUM-6004Bは共振周波数600 Hzなので仮に10 Hzのノコギリ波を入れてもその周波数が含まれるためニアに駆動できない。そのため図1のようにノコギリ波から600 Hz成分を含まない波形として駆動する。この制御信号に対してのドライブ電圧波形はデバイスの構造によっても異なるが、ULTIMEMSでは2chの駆動入力に0度を挟んで両極で駆動する形となっているので図2のような波形を入力する。この場合の駆動電圧は200 V以上になる。

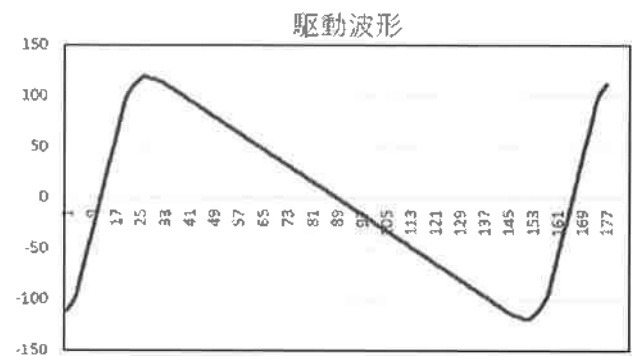


図1 波形

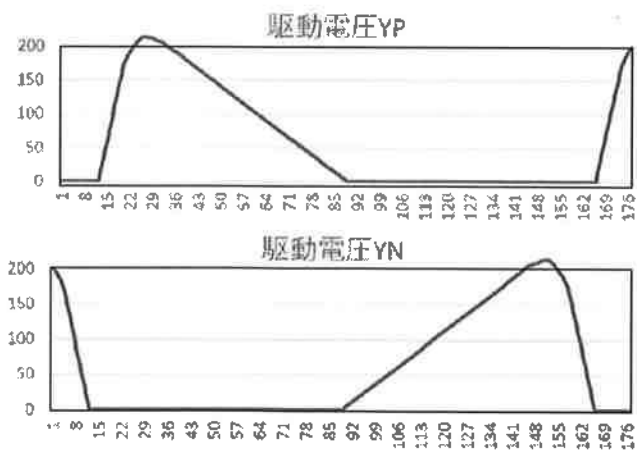


図2 駆動電圧

また、この駆動波形は駆動電流／電圧と振幅のリニアリティーが無い場合には補正した信号を与える必要がある。

4. 半導体レーザーの駆動方法

レーザー स्कャンプロジェクターではレーザーをCW点灯、デジタル変調、アナログ変調することができる。デジタル変調ではレーザーを任意の出力にてON/OFFさせ、高速での変調が可能となるので、任意のグレイコードパターンを投影することが可能である。このドライブにはACCやサンプルホールド形のAPC回路が使用され、駆動電流にもよるが数MHzまでの変調が可能である。

アナログ変調は、デジタル変調よりはAPC回路を使用しているため高速動作には適していないが、任意の波形を入力して、レーザーを点灯することができるので、正弦波の位相をずらしながら投影することで、位相シフト法のプロジェクターとして使用することもできる。変調周波数はこちらも駆動電流にもよるが10 kHzくらいまで可能である。

ただし、レーザーの閾値電流付近では直線性が崩れるため、入力波形の微調整が必要になってくる。

また、高出力レーザーの高速変調には注意が必要である。電流が大きいためレーザーのリードなどがインダクタンスとなり電流の立ち上がりを妨げる。このためドライバ基板とレーザーダイオードを短く繋ぐとすると、放熱ルートの確保が難しくなる場合がある。

光学系の要求、電気回路の要求と放熱の機構要求の整合を取っていく必要がある。

5. スキャンプロジェクターの製作

写真2は当社で製作した例で、センサヘッド形状は60×35×35 mmと光MEMSスキャナーの採用により小型となっている。レーザーの放射角32×38度で波長520 nmの緑でレーザーのスイッチングにより100 kHz以上の変調でラインを形成することができる。照射エリアとしては作動距離400 mmで200 mm角のエリアを3次元係争することができ、フレームレートは100 Hz近くまで可能である。デジタル変調とアナログ変調の組み合わせも可能で正弦波プロファイルの変調波形やさらにその波形の位相シフトなども可能となっている。



写真2 レーザー スキャンプロジェクター

6. おわりに

IoTやスマートファクトリーでセンサの要求は多いが、小型、軽量、省電力、高速サンプル、高精度と仕様を並べられると選択肢が少なくなってくる。

その中で光MEMSスキャナーを利用したセンサは従来できなかったような仕様を実現できる可能性を秘めている。

今後の発展を期待したい。

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役

藤田修平

エーエルティー株式会社

VCSEL光源ユニットの設計と評価

エーエルティール(株) 高野 裕・河村 達也

1. はじめに

VCSEL（垂直共振器面発光レーザー）は従来の端面発光型半導体レーザーがウエハーからレーザーチップを切り出して、共振器となる2面にコーティングをして初めて発光できるのに対して、ウエハー上でレーザー素子が形成されるのでそのままレーザー発振ができる。また二次元アレイ化が容易なため、従来のレーザーと比較して光学的にアレイとしての扱いが必要になってくる。さらに同じようなパワーでは光学構成やパッケージにもよるが、一般的にデバイスコストを下げることが可能である。

近年では携帯電話にも搭載されLiDARとして使用されているように 距離計測用の光源、赤外照明への応用が期待されている。

本稿では最近のVCSEL、半導体レーザー、LEDの動向とVCSELの光学シミュレーションとその実測について述べる。

2. VCSELの原理と特性

従来の端面発光型半導体レーザーの共振器は数100 μm あるのに対して、VCSELは基板の積層方向に共振器が形成されるのでレーザー自身の大きさは数10 μm でピッチ40~50 μm でのアレイ化が可能である。共振器長が短いので発振までの閾値電流も小さくでき単一縦モード動作と高速変調の特徴を持つ。市販のVCSELのチップ形状を図1に示す。

一個の素子としては近赤外域では出力約5 mWで数10度の放射角を持つ素子となっている。従って1 Wで

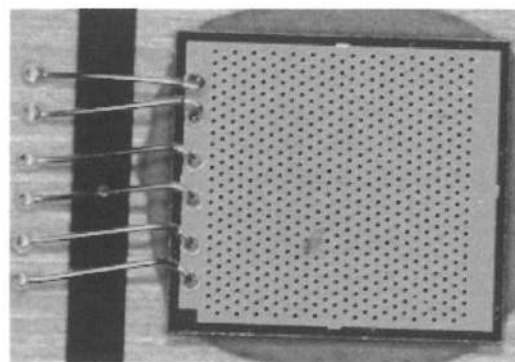


図1

は約200個のアレイとなり全体の発光面の形状としては約500 μm 角となり全体で数10度の放射角となる光源となる。

VCSELと端面発光形レーザーとLEDの比較を比較的効率の良い近赤外域で1 W定格の数値を表1に示す。

電力発光効率は各素子ともここ10年くらいで倍くらいに改善されており、近赤外域ではVCSELが30~60%、端面発光形レーザーが50~70%、LEDが30~50%となり発光効率ではどれも大きな差がなくなってきた^{(1)~(3)}。

ただLEDについてはチップ全体が発光するため放射角としては大きくなり利用効率は下がる。端面発光型レーザーについては、発光点が積層された電流狭窄層から発光するため発光の放射角が縦横で大きく異なるためこちらもロスが出やすい。

VCSELについては放射角が縦横揃っているので光の利用効率としては高くなるが、発光点サイズが大きくなるので端面発光形レーザーと比較して平行度の良い

表 1

		VCSEL	LD	LED
Threshold current	mA	200	250	-
Operating current	mA	1200	1200	1000
Operating voltage	V	2.2	1.8	2.9
Optical operating power	mW	1000	1000	1450
Slope efficiency	W/A	1	0.9	-
Beam divergence θ	deg	22	32	150
Beam divergence \perp	deg	22	6	150
Number of emitter	pieces	203	1	1
emitter power	mW	4.9	-	-
Operating peak wavelength	nm	940	940	940
Spectrum FWHM	nm	1	2	40
Wavelength-Temp tuning	nm/deg	0.07	0.3	0.33
emitter area θ	μm	600	50	1000
emitter area \perp	μm	500	1	1000
Rise time	ns	0.8	0.8	10
Fall time	ns	1	0.8	20
Efficiency of power conversion	%	38	46	50

レーザービームや小さいスポットに集光するには向いていない。

3. VCSELの光学シミュレーション

波長940 nm、光出力4 W、発光エリア約1 mm角のVCSELを搭載した光源ユニットALT-9511を用い5 m先に照射したときのシミュレーションを行った。最小広がり角となる状態で照射した場合の照度分布が図2となる。

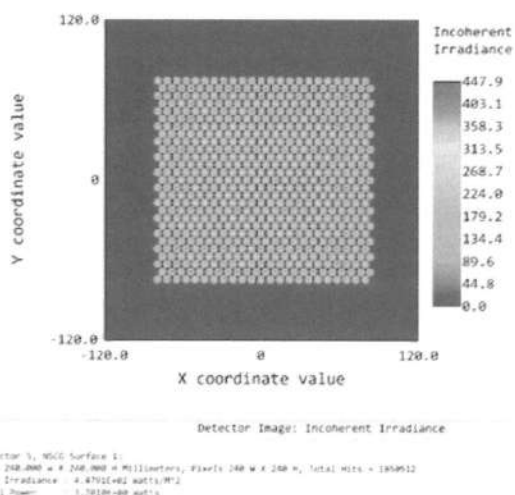


図 2

照射範囲は約160 mm角となっており、広がり角に換算すると約1.8°の照射となる。

また光学系の透過効率率は約92%となっている。

次に拡散板を追加しつつ広がり角を抑え照射した場合のシミュレーションを図3に示す。

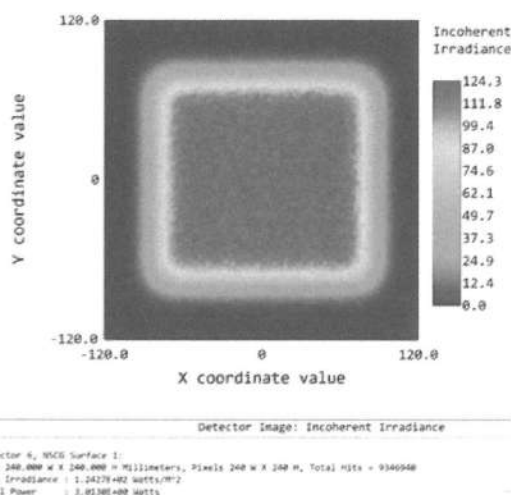


図 3

照射範囲は約200 mm角となっており、広がり角に換算すると約2.3°の照射となる。また光学系の透過効率率は約75%となっている。

4. 実測

次に当社VCSEL光源ユニットALT-9511を使用し上記シミュレーションの検証を行った。VCSELの光出力を1 Wとし、5 m先のターゲット板（1メモリ100 mm）に照射したときの画像が図4となる。また、拡散板を追加したときの照射画像は図5である。

広がり角及び透過効率に関してそれぞれシミュレーションに近い値となった。

- 拡散板なしの時
照射範囲：約160 mm角、
広がり角：約1.8°透過効率：約90%
- 拡散板ありの時
照射範囲：約200 mm角、
広がり角：約2.3°透過効率：約70%

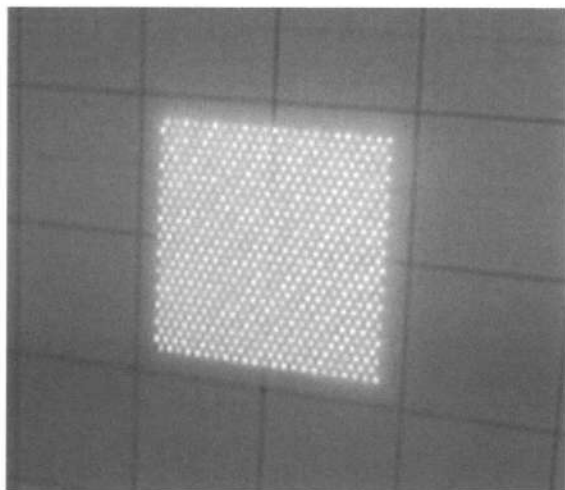


図 4

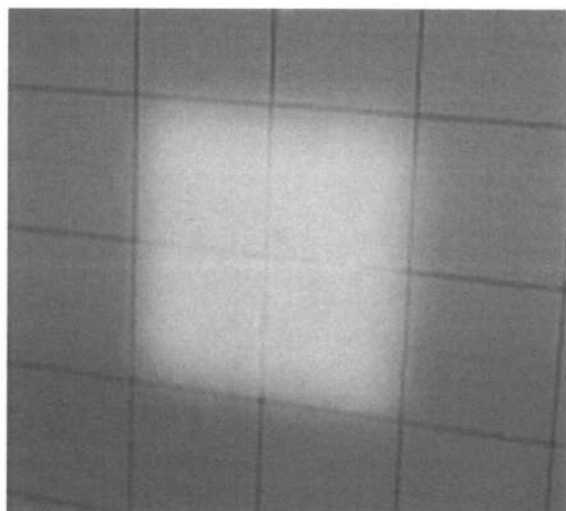


図 5

5. おわりに

VCSEL、半導体レーザー、LEDとも年々色々な工夫により電力変換効率は上がっており、またパッケージの工夫で熱抵抗も低減される方向でより使い易くなってきている。

波長、光出力によってアプリケーションからの要求が異なるが、それぞれ得意な分野でシェアを伸ばすように進化していくと思われる。

カーボンニュートラルからも効率の良い光源は要求され、応用分野も広がっているので今後が楽しみである。

〈参考文献〉

- (1) 岡崎・他：照明用LEDの現状と将来、シャープ技報、99号（2009）
- (2) 能川・他：高効率高出力半導体レーザー、フジクラ技報、133号（2020）
- (3) 岩井・他：低消費電力・高効率1,060 nm面発光レーザー、電子情報通信学会技術研究報告（2009）

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役

河村達也

エーエルティー株式会社 取締役 開発部長

三次元計測用レーザーパターン光源

=用途に応じたレーザーパターンの使用方法=

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

5Gの普及に伴いスマートファクトリーも実現性が高くなってきた。工作機械それぞれに三次元センサが付いて加工品の三次元データをリアルタイムで収集することにより品質、工程管理に大幅な改善が期待されている。このためには色々なワークに対して短時間に高精度に計測できる三次元センサが求められている。

パターンを投射して三次元計測をする試みは1970年代から行われており、古くはキセノンやハロゲンのランプ光源から幻灯機の原理で機械的に作成されたスリットを対象物に投射するやり方だったが、大型、大電力で微細なパターン照射が難しかった。近年ではDMDやLCOSによってプロジェクターとしてパターンが作成される様になり、青の高出力レーザーによって従来よりも明るく短い起動時間や長寿命になったが、光源としてのレーザーは蛍光体で一旦白色に変換されるため、発光点サイズは大きく明るい投射レンズで照射されるため、被写界深度は大きく取れない。

これに対してレーザービームを用いたものはフォーカスフリーと言われる、距離によってビーム径が大きく変わらないのでピントが合う深度を広く取ることができる。これにより三次元計測では高さ方法の計測範囲が拡大できるが、実現するためにはいくつかの条件が必要となる。

本稿では、ワンショットアクティブステレオのパターン光源とグレーコードや位相シフトで使用されるスキャン型のパターン光源について紹介する。

2. DOE (回折光学素子)

DOEは、レーザーの回折を利用したホログラフィック光学素子で、コンピュータによって計算された形状を作成することで色々なパターンを作ることができる。機能としては光学レンズ機能、分岐機能、強度分布変換機能、波長フィルター機能があるがパターン光源には分岐機能と強度分布変換機能が用いられる。

(1) 分岐機能

分岐機能は、入力レーザービームを所定の角度や強度パターンに変換する機能である。マイクロソフト社のKinect v1は近赤外のランダムパターンを用いており、水平57度、垂直43度の範囲でモーションデテクターなどに使用されている。DOEを2段階で1段階目で入射ビームを9分岐し2段階目でランダムパターン化することにより広照射エリアと0次光の低減を行っている。

(2) 強度分布変換機能

強度分布変換機能は、入射ビームの強度分布を変換するもので、ディフューザーのようにも使用され細かいことはできないが0次光の無いパターンを作ることができる。この設計では入射ビームは平行光でも設計できるがコリメーターレンズの無い半導体レーザーの発散光でも設計できる。

最近では新しい設計手法で三次元のパターンに変換することもでき、0次光の無い、かつウェスト範囲を伸ばすような三次元設計もできるようになってきた⁽¹⁾。

分岐タイプでは入射ビームは一般的にレーザーの平行光で設計されるものが多く、分岐後のビームの伝搬の様子は入射ビームの1本と同様になる。レーザービームは伝搬法則からある程度のビーム径になると広が

らないでフォーカスフリーが実現できる (図1)。ただ細いビームでは広がるので使用距離範囲で必要なビーム径を算出する必要がある。

実際には特定の距離で小さいスポットになるフォーカスビームとなるが (図2)、この場合にはビームウエストがDOEを中心に円弧状になり像面湾曲が発生する。また、分岐ビームは一つのレーザー光源から出ているので、波面が揃っているのにビームが重なると干渉によってドットの輝度分布に影響する。

計測分解能は、ドット間隔またはライン間隔とカメラの解像度と関連するが、分解能を上げようとするときドットサイズを小さくしなくてはならないのでビームウエスト範囲が狭くなる。ラインパターンでは設計上の注意が必要で、入射ビーム径、波長から使用する距離でのパターンでの隣接するビームとの間隔 (放射角) を設定する必要がある。したがって標準DOEとして販売されているものもレーザー光源の射出ビーム径とビームウエストのビーム径によっては性能が出ない場合がある。

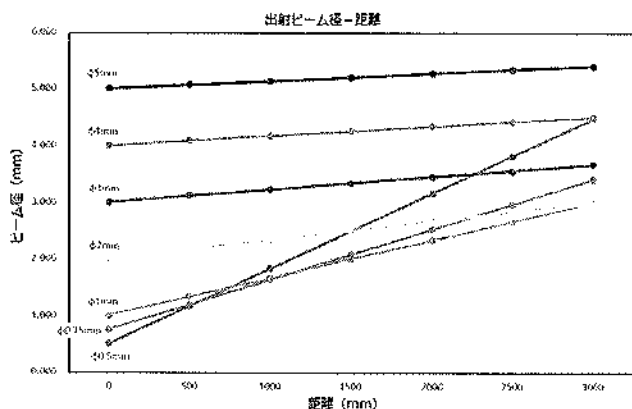


図1 ビーム径

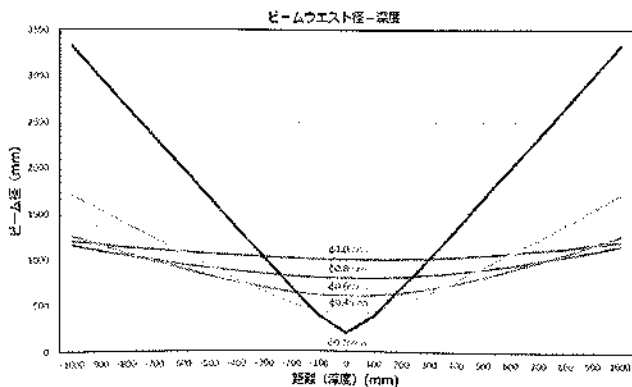


図2 ビームウエスト径

3. DOEの特性

DOEの特性として回折効率、分岐角、0次光、ノイズ、多次ゴーストがある。

回折効率について設計、製造法としてシングルレベルとマルチレベルがあるがマルチレベルのレベル数が大きくなれば回折効率が向上する。理論上ではシングルレベルでは40%であるがマルチレベルの8段階では95%となる⁽²⁾。

分岐角は製造上の最少加工ピクセルに依存する。構造ピッチが小さいほど分岐角が大きく取れる。設計に際してはどのようなプロセスで製造するかを設定する必要がある。シングルレベルはバイナリーとも呼ばれるが、一般的にはパターンが点対称のミラーイメージとなるためパターンに制限が出る。現状での構造ピッチは0.5~3 μmくらいで、構造高さは0.9~1.8 μm程度である。

0次光は入射ビーム方向に発生するスポットで通常0.5%くらい発生するが、これは設計波長からの波長偏差によっても変化する。半導体レーザーではロットによって波長偏差が±10 nmあり、また、APC制御をかけていても周囲温度によっても波長が変化する。この温度によつての変化は40 degで2~3 nmあり、波長変化は分岐角にも影響するので精密測定用のパターン光源ではバルチェ素子などによる半導体レーザーの温調が必要になってくる。0次光は設計波長で最適化されるので他の波長で使用すると0次光が増加する。また、分岐角は波長に依存するので波長が長くなると分岐角が大きくなり、パターンは大きくなる。レーザ

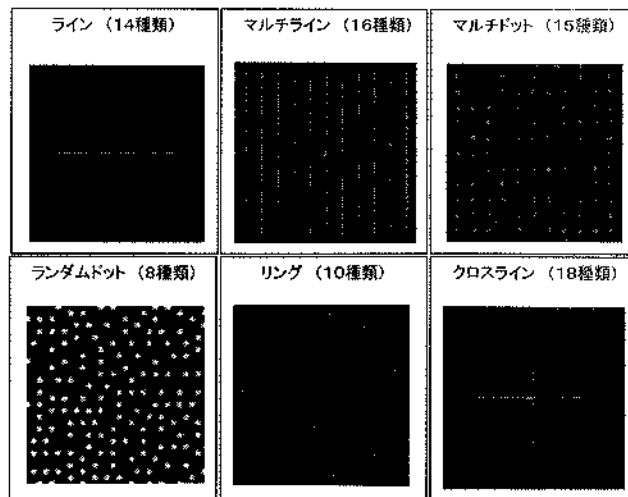


図3 DOE種類

一安全クラスで問題となるのが0次光で、仮に0.5%として許容最大パワーを1 mWとすると入射パワーの最大は200 mWと計算される。

ノイズは分岐ビームの間に出る拡散光で製造プロセスでの設計形状からの誤差によって生じる。分岐数が多い場合や分岐角度が大きい場合に発生しやすい。

多次ゴーストは通常のパターンの周りに薄くパターンが出る現象でこれも製造プロセスでの設計形状からの誤差によって生じる。可視光帯では肉眼では見えるが実際にはパワーとしてはかなり低い。

DOEによって製作できるパターン例を図3に示す。

4. DOEパターンによる三次元計測

DOE応用として現在もっとも用いられているのは、三次元計測である。

標準品のマルチドットやマルチラインは簡単に使用できるが、画像処理として特異点が見つげにくい。ランダムパターンは多く使用されているが解像度を上げようとすると分岐点数が増えて、1ドット当たりのパワーが低下してコントラストが悪くなる場合がある。

一般的に使用できるのは発光点サイズの小さなシングルモードレーザーでパワーが大きいものについてはマルチモードで発光点サイズが大きく、ドットサイズが大きくなることがあるので注意が必要である。

特殊なDOEパターンを用いることでワンショットでの三次元計測ができることが報告されている⁽³⁾。高速カメラを用いると連続的な三次元データが得られる。これに用いるパターンは図4のように波型格子で特異点を見つけやすいパターンとなっており、分岐角も対角70度で分岐数約12万により実現されている。また、

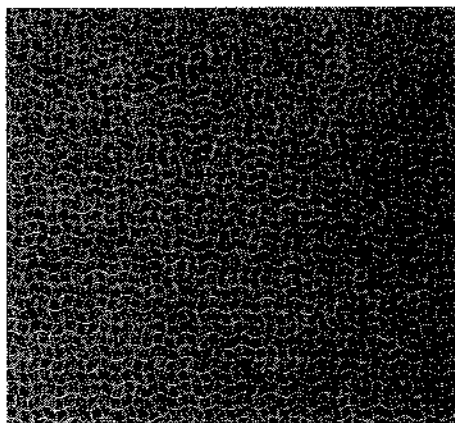


図4 波型格

小型で光源を製作できることから内視鏡カメラと組み合わせて体内の三次元計測を行う試みも行われている⁽⁴⁾。これに使用されているDOEの光源ユニットはファイバー光源であるが先端の形状は $\phi 2.6$ mmで長さ12 mmの超小型で内視鏡の鉗子用パイプ内を通すことができる。

5. 二次元プロジェクター

光MEMSスキャナーを使用した小型プロジェクターがピコプロジェクターとして販売されている。これは二次元の超小型スキャナーによって主走査側は共振で副走査側は非共振で解像度720P、20FPSで30ルーメン程度が販売されている。

このプロジェクターは、レーザービームの広がり角と画像の広がり角を近く設定することでフォーカスフリーとなっている(WVGAの例 図5)。WVGAの横方向の解像度は848ピクセルあるので500 mmの距離で1 mmピッチのグレーコードが可能になる。

光MEMSスキャナーのメーカーから三次元センサとして照射角度 44×66 度、分解能0.2 mm、計測距離0.05~1.5 m、レーザー940 nmで提供されている⁽⁵⁾。光MEMSスキャナーのミラーサイズが約1 mmのため出射ビームの制御に制限あるのと、大きなパワーが入られないので測定ワークに制限が生じる。

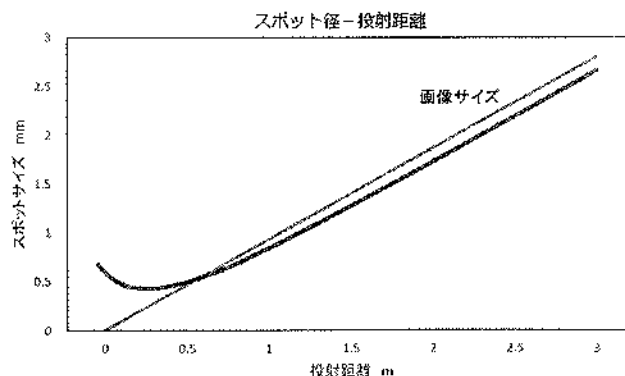


図5 ピコプロ

6. スキャンプロジェクター

前述ディスプレイ用光MEMSスキャナーは主走査周波数が22 kHz位になるので大きいミラーサイズが取れないが、低い周波数では共振周波数を下げることが

できるので共振型、非共振型のいずれでも $\phi 5$ mmくらいのミラーサイズが製作できる。

さらに大きいミラーサイズが必要な場合にはガルバノスキャナーやレゾナントスキャナーで数10 mmのミラーアパーチャーを設定することもできる。これによりある程度の距離があっても細いラインを作れることから、所定の距離で解像度を上げることができ、大きなパワーのレーザーも走査できる。

構成としてはレーザー光源にラインジェネレーターの光学系を通し機械スキャナーで偏向する。駆動する角度信号とレーザーの点灯信号を同期してデジタルでレーザーをスイッチングすればグレーコードで使用する縞パターンが生成できる。アナログの正弦波でレーザー強度を変調すれば位相シフト用の正弦波の強度変調パターンが生成できる。

通常スキャン状態でスキャナーからの同期信号でカメラのシャッターを切り、1スキャン1画面で取り込んで画像処理する。

スキャンプロジェクターには通常の光切断の延長で、低速または非共振形で角度の異なる複数画像から三次元計測することで廃炉でのデブリ形状計測に使用できることが報告されている⁽⁶⁾。このセンサの特徴としては一本のライン光源を動かして計測するので蒸気などで散乱光がある状態でも計測できることである。

7. スキャンプロジェクターのレーザー

スキャンプロジェクターのライン幅の深度方向の変化は前述のレーザービーム径の変化と同様で分解能を上げようとしてライン幅を狭くとると深度が取れなくなる。

また、レーザーのスイッチング速度も分解能を上げると高くなり、グレーコードのデジタルスイッチングでは100 MHz近くまで変調可能であるが、位相シフトのアナログ変調では変調ドライバの周波数特性と通常DAコンバーターによって変換される周波数に注意が必要である。レーザーの波長はカメラの波長感度によるが不可視の赤外では人間の目に見えないので監視などに使用されることもある。

計測速度を上げようとするともフレーム時間が短くなるので大きいパワーのレーザーが必要になってくる。近年車載などで高出力の青色(波長445 nm)が出ており、マルチモードであるが3 Wくらいまで商品化されている。ただこれらは動作電流が3 Aくらいあるのでこれを高い周波数で駆動するには、レーザーのリー

ドインダクタンスを少なくするためレーザーとレーザードライバー回路の物理的な距離を近くしなければならない。さらに発熱も大きいので放熱設計も必要でレーザー光学系とレーザードライバー回路、レーザーの放熱と配置での設計難易度が高くなる。高出力のレーザーでは前述のように発光点のストライプサイズが大きくなりライン幅が広がるので発光点サイズを考慮した光学シミュレーションが必要である。

また、レーザーの安全クラスによっては遮光が必要となり作業性が悪くなる場合がある。

スキャンプロジェクターのレーザーの安全クラスは日本工業規格 JIS-6802:2014、追補1:2018が発行されているが安全なクラスはクラス1 Mで可視光ではクラス2 M、条件によってはクラス3 Rが適用できる。

走査レーザーではスキャナーが故障した場合にも安全クラスを確保する必要があるのでシステム上の考慮が必要である。

8. スキャンプロジェクターのスキャナー

スキャン速度はガルバノスキャナーや非共振の光MEMSスキャナーにおいては駆動信号に三角波やノコギリ波を用いてリニア部分で使用するのであれば等速性が保たれるが、高速にスキャンする時に正弦波を用いる場合にはその速度はコサインとなるので走査の広い範囲で使用して等間隔でレーザーを点灯すると実際に投射されるラインは等間隔にならない。これを補正するためにレーザーの点灯クロックを走査の周辺は高く、中央で速度に応じて低くしようとするとそのためのクロックの源発信周波数はかなり高くなる場合が多いので検討が必要である。

スキャンプロジェクターのスキャナーはガルバノスキャナーが多く用いられる。各社ミラーサイズによってスキャナーをシリーズ化しているが、ミラーサイズが大きくなればトルクが必要となりローター側のイナーシャも大きくなるので駆動周波数が低下する。

スキャンするミラーは使用波長によってコーティングを選択する必要があり、金コートでは緑よりも短い波長帯は反射率が下がるので可視光から近赤外では銀やアルミコートが使用されている。高速で走査する場合にはレゾナントスキャナーが使用できる。ミラーサイズ $\phi 7$ mmで光学10度を12 kHzでスキャンするものもある。レゾナントスキャナーは共振を利用しているので共振周波数の個体差があり制御系と同期する場合には制御系で調整する必要がある。

スキャン速度、ミラーサイズが自由に選択できるのがポリゴンスキャナーである。ポリゴンミラーの面数、面間寸法、面厚はカスタマイズできるし、モーターの回転数も設定することができる。ただ回転方向が一方向で定回転に達するまでに時間がかかり、面倒れや面分割といった機械加工上の誤差を考慮しなくてはいけないのと、2,000rpm以下の低い回転数では回転ジッタが悪くなるので選択には注意が必要である。

近年では光MEMSスキャナーが開発されてスキャナーが小型で省電力になりセンサユニットには有利である。共振形と非共振形が販売されており共振形はミラーサイズφ3 mmで500 Hz、光学振角50度が入手できる。この共振周波数もレゾナントスキャナーと同様に個体差がある。

非共振形はφ2.6 mm、非共振最大100 Hz、光学振角30度が入手できる。非共振光MEMSスキャナーでも共振点は存在し一般的に共振周波数の5分の1以下で使用することが推奨されている。

ここで注意しなくてはならないのが駆動波形である。正弦波は単一周波数で問題ないが走査がリニアでないので使いにくい。そこで三角波やノコギリ波が使用されるが波形の折り返し点は高い周波数が含まれるのでリングングなどが発生する場合がある。折り返しの波形も最大周波数以上を含まない滑らかな波形で繋ぐ必要がある。

9. レーザースキャンプロジェクターの製作

図6は当社で製作した例である。センサヘッド形状は60×35×35 mmと光MEMSスキャナーの採用により小型になっている。32度×38度の放射角で波長520

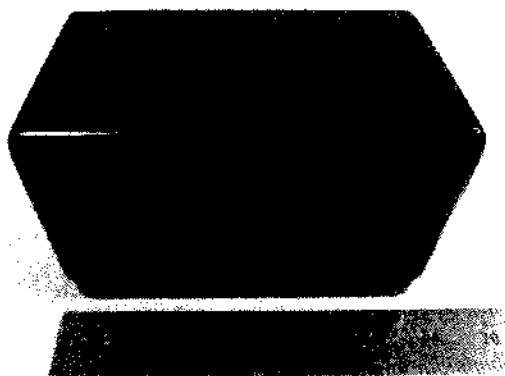


図6 LSP

nmの緑のラインをレーザーのスイッチングにより100 kHz以上で変調してラインを形成することができる。

作動距離400 mmで200 mmのエリアを三次元計測することが可能である。

10. おわりに

現在レーザーを使用した三次元計測は少ない枚数の画像から高速に検出するアクティブステレオ法と、複数枚のグレーコードと位相シフトを組み合わせた高精度に計測できるシステムと、TOFカメラによるシステムが増えてきているように見える。

色々なデバイスの開発によってこの先それぞれ進化していくと思われるが、それぞれのメリット、デメリットによって使い分けされていくように感じられる。

〈参考文献〉

- (1) スペースフォトン ウェブサイト
<http://www.spacephoton.jp/>
- (2) (社)応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ：回折光学素子入門 増補改訂版、オプトロニクス社 (2006)
- (3) (国研)産業技術総合研究所 佐川氏
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120802/pr20120802.html
- (4) (大)九州大学 川崎氏
<http://www.cvg.ait.kyushu-u.ac.jp/ja/research/endoscopesystem.jp.html>
- (5) OPUS MICROSYSTEM ウェブサイト、3D Depth Camera
http://www.opusmicro.com/3d_cam_en.html
- (6) 亀尾・他 (三菱重工工業株)：三次元形状計測装置の開発、日本ロボット学会誌、Vol.35、No.9 (2017)

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー㈱ 代表取締役

DOEを用いたレーザーパターン光源

=DOEの使用方法和応用=

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

パターンを投射して三次元計測をする試みは1970年代から行われており、古くはキセノンやハロゲンのランプ光源から幻灯機の原理で機械的に作成されたパターンを対象物に投射する方式で、大型、大電力で微細なパターン照射が難しかった。

近年ではDMDやLCOSによってパターンが作成されるようにはなったが、光の利用効率が悪いのと通常のプロジェクターではパターン画像を対象面に転送することからピント合わせが必要となり計測での深度の確保が難しいという問題があった。これに対して近年実用化されてきた回折光学素子：DOE (Diffractive Optical Element) でのパターン光源は結合効率が90%以上でフォーカスフリーの設計ができ、半導体レーザーと組み合わせることで小型、省電力の三次元計測システムを構築することが可能でロボットビジョンなどの応用が期待されている。

本稿ではDOEの原理と応用について最近の動向を報告する。

2. DOEの種類

DOEは歴史的にはホログラフィーの波面再生原理を応用したホログラフィックオプティクスと半導体のリソグラフを応用したバイナリーオプティクスから発展したが、現状ではコンピュータで計算された形状を作成することではその範囲は曖昧で両者を含む総称として用いられている。機能としては、

- ① 光学レンズ機能
- ② 分岐機能
- ③ 強度分布変換機能
- ④ 波長フィルタ機能

がある。

① 光学レンズ機能は光ディスク用ピックアップやレーザープリンタで一部実用化されており、従来のレンズにDOEを付加することで収差などの低減を図っている。

② 分岐機能がパターン光源に用いられる機能で入力レーザービームを所定の角度や強度パターンに変換する機能である。

マイクロソフト社のKinect v1は近赤外のランダムパターンを用いており、水平57度、垂直43度の範囲でモーションデテクターなどに使用されている。

DOEを2段階けて1段目で入射ビームを9分岐し2段目でランダムパターン化することにより広照射エリアと零次光の低減を行っている。

③ 強度変換機能は入射ビームの強度分布を変えるもので、レーザーのガウス分布をした強度分布をトップハットに変換することにより加工精度を向上するものがレーザー加工機などで使用されており、ビームシェイパとも呼ばれている。

またこの設計では通常の波動光学的なビームウエストよりも長くウエスト範囲を取るような設定も可能で、この特性でも加工精度の向上に寄与している。

④ 波長フィルタ機能はDOEを用いて従来の誘電体多層膜にない特性の無反射や狭帯域のバンドパスフィルタができることが研究されている。

分岐機能でのパターン作成には設計手法として入力レーザービームを所定の分岐数、分岐角度に分岐する方法と入力レーザービームを所定の角度分布内にランダムに配光する方法がある。分岐タイプでは入射ビームは一般的にレーザーの平行光で設計されるものが多く、分岐後のビームの伝搬の様子は入射ビームの1本と同様になる。従って入射ビームがコリメートビームの場合には分岐後のビームもコリメートとなりフォーカスフリーが実現できる。実際には小さいビーム径を入射し特定の距離で小さいスポットになるフォーカスビームとなるが、この場合にはビームウエストがDOEを中心に円弧状になり像面湾曲が発生する。

また分岐ビームは1つのレーザー光源から出ているので波面が揃っているのでビームが重なると干渉によってドットの輝度分布に影響する。ベタパターンでは分岐タイプ、配光タイプとも設計上の注意が必要で、入射ビーム径、波長から使用する距離でのパターンでの隣接するビームとの間隔（放射角）を設定する必要がある。

配光タイプについて入射ビームは平行光でも設計できるが半導体レーザーの発散光でも設計できる。この場合には通常使用するコリメータレンズが不要となりシステムがシンプルになるが特定の距離でのパターン設計となるのでフォーカスフリーは実現できない。

3. DOEの特性

DOEの特性として回折効率、分岐角、0次光、ノイズ、多次ゴーストがある。

回折効率について設計、製造法としてシングルレベルとマルチレベルがあるがマルチレベルのレベル数が大きくなれば回折効率が向上する。理論上ではシングルレベルでは40%であるがマルチレベルの8段階では95%となる⁽¹⁾。

分岐角は製造上の最少加工ピクセルに依存する。構造ピッチが小さいほど分岐角が大きく取れる。設計に際してはどのようなプロセスで製造するかを設定する必要がある。

シングルレベルはこの意味では有利であるが一般的にはパターンが点対称のミラーイメージとなるためパターンに制限が出る。現状での構造ピッチは0.5~3 μmくらいで、構造高さは0.9~1.8 μm程度である。

0次光は入射ビーム方向に発生するスポットで通常0.5%くらい発生するがこれは設計波長からの波長偏差によっても変化する（図1）。

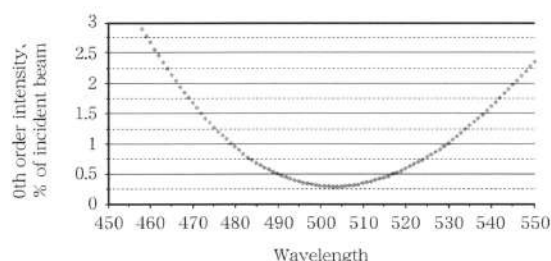


図1

半導体レーザーではロットによって波長偏差が±10 nmあり、またAPC制御をかけていても周囲温度によっても波長が変化する。この変化は40degで2~3 nmあり、波長変化は分岐角にも影響するので精密測定用のパターン光源ではペルチェ素子などによる半導体レーザーの温調が必要になってくる。0次光は設計波長で最適化されるので他の波長で使用すると0次光が増加する。また分岐角は波長に依存するので波長が変わるとパターンの大きさが変化する。表1は51×51のマルチドットの場合で波長が長くなると分岐角が大きくなる。

表1 DOE波長偏差

Wavelength	Pattern Size @ 100 mm Distance				Pattern Angles			
	a	b	c	d	α	β	γ	δ
450 nm	38 mm	27 mm	0.54 mm	27 mm	22°	15.5°	0.31°	15.5°
515 nm	44 mm	31 mm	0.62 mm	31 mm	25°	17.7°	0.35°	17.7°
532 nm	45 mm	32 mm	0.64 mm	32 mm	25°	18.3°	0.37°	18.3°
635 nm	55 mm	39 mm	0.77 mm	39 mm	31°	22°	0.44°	22°
650 nm	56 mm	40 mm	0.79 mm	40 mm	31°	22°	0.45°	22°
730 nm	64 mm	45 mm	0.89 mm	45 mm	35°	25°	0.50°	25°
780 nm	68 mm	48 mm	0.96 mm	48 mm	38°	27°	0.54°	27°
808 nm	71 mm	50 mm	1.00 mm	50 mm	39°	28°	0.56°	28°

レーザー安全クラスで問題となるのが0次光で、仮に0.5%として許容最大パワーを1 mWとすると入射パワーの最大は200 mWと計算される。

ノイズは分岐ビームの間に出る拡散光で製造プロセスでの設計形状からの誤差によって生じる。分岐数が多い場合や分岐角度が大きい場合に発生しやすい。多次ゴーストは通常のパターンの周りに薄くパターンが出る現象でこれも製造プロセスでの設計形状からの誤差によって生じる。可視光帯では肉眼では見えるが実際にはパワーとしてはかなり低い。

4. DOEの設計

DOEの設計ではLightTrans社のVirtualLab⁽²⁾が広く使用されている。優秀なツールでシミュレーションから最終加工データまで出力することができる。

前述のように製造上の精度や干渉しないための分岐角は設定する必要があるが、0次光やノイズなどの設計でのシミュレーションは可能である。顧客の要求として分岐角は広く、分岐数は多く、0次光、ノイズは少なくともどの要求でトレードオフの要素が多いが、これらのシミュレーションでシミュレータ自体のアルゴリズムの制限も出てきている。

そのため独自の計算アルゴリズムによってトライするメーカーも出始めている⁽³⁾。またDOEの設計では量産時の数量によりプロセスを選択する必要がある。プロセスは大きくはガラス材料にリソグラフでパターンニングする方法と電子ビームなどにより型に刻まれたパターンを紫外線硬化樹脂などにより転写するリプリントと呼ばれる方法がある。

ガラス材料でのパターンニングはダイシングで任意の形状に切り出すことができ、一回のプロセスはそれほど高価ではない。それに対してリプリントは量産でのコストは低減できるがイニシャルコストが高価になる。

5. DOEの応用

DOE応用として現在もっとも用いられているのは三次元計測用である。

標準品のマルチドットやマルチラインは簡単に使用できるが、画像処理として特異点を見つけにくい。通常アクティブステレオ方式では高速で三次元計測できる特徴があり、精度を上げるためには空間コード法でコードパターンを増やしたり、位相シフト法で画像位相をシフトしていく方法が用いられている⁽⁴⁾。

特殊なDOEパターンを用いることでワンショットでの三次元計測ができることが報告されている⁽⁵⁾。高速度カメラを用いると連続的な三次元データが得られる。これに用いるパターンは図2のように波型格子で特異点を見つけやすいパターンとなっており、分岐角も対角70度で分岐数約12万により実現されている。また小型で光源を製作できることから内視鏡カメラと組み合わせて体内の三次元計測を行う試みも行われている⁽⁶⁾。DOEは特定のパターンでなく分岐方向は自由に設定できるので 文字、マークなども照射することができる。

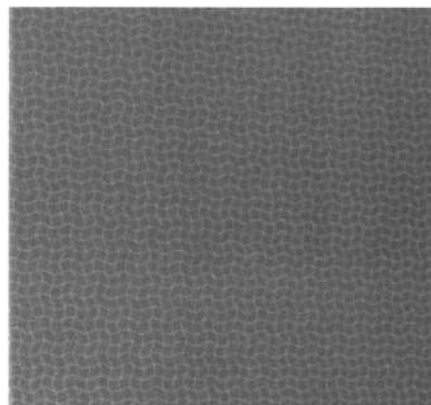


図2 波型格子

図3はマルチレベルによる例で0次光に対して非対称のパターンが実現できる。

シングルレベルでは図4のように投射パターンはミラーイメージとなる。

図5は配光タイプの例で路面に照射された侵入禁止のマークであるが0次光がない設計となっている。

また光学系と組み合わせることによりレーザークラ



図3 侵入禁止



図4 ALERT



図7 救助中



図5 マーク

ス2Mで周囲照度数100 Lx以下の環境で300 m離れた場所にメッセージを投射することができ、UM3アルカリ電池4本でも12時間以上の連続使用ができる（図6、図7）。

当社では計測用標準パターン光源としてALT-7600シリーズ（図8）をリリースしておりマルチドット、マルチライン、マルチリング、クロスライン、ドットライン、ドットリング、ランダムなど各種のパターンを取り揃えている。現在では640 nmの赤、520 nmの緑、450 nmの青、405 nmの青紫と人間の目に見えない近赤外など色々な波長が半導体レーザーで入手できるようになったため、アプリケーションへの対応が容易になりつつある。



図8 ALT7600

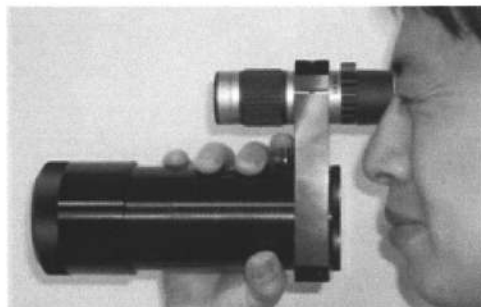


図6 メッセージプロジェクター

6. おわりに

DOEによるパターン照射は半導体レーザーの単一波長性を利用しており原理は古くから考えられていたが近年デバイスおよび半導体製造プロセスの発展と共に実用化が進んでいる。

またロボットビジョンや自動搬送車から小型の三次元センサも要求されているし、東京オリンピックに対して交通システムやセキュリティーシステムからも色々な表示の要求がある。

今後のDOEを用いたレーザーパターン光源の発展を期待したい。

<参考文献>

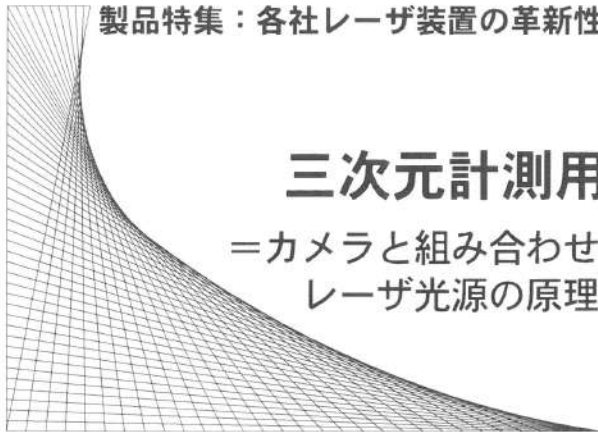
- (1) (社)応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ (監修): 回折光学素子入門, オプトロニクス社 (1998)
- (2) ウェーブオブト ウェブサイト
<http://www.waveopto.com/?p=9>
- (3) スペースフォトン ウェブサイト
<http://www.spacephoton.jp/>
- (4) 吉澤徹 (編): 最新光三次元計測, 朝倉書店 (2006)

- (5) 産業総合研究所 佐川氏
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120802/pr20120802.html
- (6) 鹿児島大学 川崎氏
https://www.jsps.go.jp/j-jisedai/data/life/h25_jishi/LR030.pdf

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役



三次元計測用レーザ光源

＝カメラと組み合わせたステレオ法による
レーザ光源の原理と応用と解説＝

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

レーザ光源を使用した三次元計測は工業計測において部品やユニットの形状検査に用いられることが多いが、3D CADによって三次元データの作成が容易になり、3Dプリンタの普及によって出力が簡単になったことによりさらに分野が広がっている。

人体の体形計測や足型計測で自分にあつた服や靴を作ることや歯科医療や整形外科への応用、遺跡の調査など電子部品の0.001 mm分解能から建物、車両の10 mを超える測定範囲まで実用化は進んでいる。さらに従来の静止している測定対象からマイクロソフト社のキネクト⁽¹⁾のようなモーションキャプチャーなどの動の対象物に広がり、ロボットビジョンや車両の前、後方センサへの展開も期待されている。

レーザを用いた三次元計測にはレーザをパルス変調または位相変調して時間計測する方法や光コム法を利用してポイントで距離計測できるタイプもあるが、本稿ではCCD、CMOSの二次元、二次元センサとレーザ光源を組み合わせた三次元計測について述べる。

これらの測定原理は三角測量法に基づいたアクティブステレオ法が用いられることが多いが計測方法や使用用途によってレーザ光源への要求される性能が異なる。

本稿では代表的な事例とそれらに必要なレーザ光源について述べる。

2. レーザの照射方法

三角測量の原理は図1のようであり対象物が1点であればポイントのレーザと一次元のCCDやPSDセンサで対象物までの距離を計測することができる⁽²⁾。

三次元計測を行うためにはレーザを二次元に照射する必要があり、この方法としては

- ① レーザから二次元に照射する
- ② ライン光源または高速一次元スキャンする光源にもう1方向のスキャンを行う
- ③ レーザをラスタースキャンなどの方法で二次元スキャンする

3通りの方法がある。

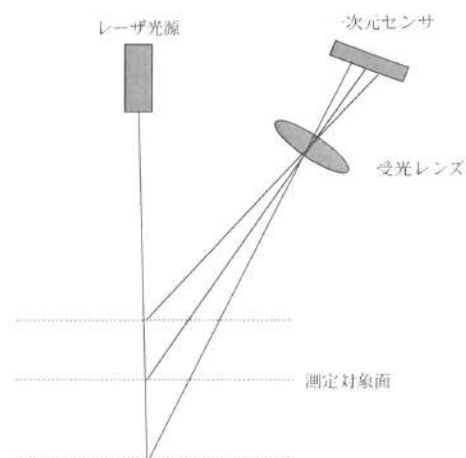


図1

三次元計測では高速性と高精度は通常トレードオフの関係があるが、最近のマシンビジョンなどでは両方の性能を求められるので、上記スキャン方法ではスキャン周波数はシステムの数に十分に間に合うことが必要になってくる。

3. 二次元パターン照射

二次元パターン照射はワンショット法と呼ばれる1枚の画像データから三次元データを算出する方法と複数の画面から三次元データを計算する方法がある。

前述のキネクトはランダムパターンと呼ばれる二次元にランダムに配置されたドット群から三次元データを計測する方法で、当社でもランダムパターン光源ユニットALT-7220として販売している⁽³⁾。

従来この方法にはOA用のプロジェクターを使用することがあったが、測定深度が取れない、大型、大消費電力、ランプ寿命などで問題が多かった。当社ではDOE（回折光学素子）を用いることによりどこでもピントが合うフォーカスフリー、高効率、省電力を実現することが可能となった。

ワンショット法のパターンとしてはこの他に格子パターンやマルチドット、マルチラインが使用されているが、計測精度がパターンの繰り返しピッチになるので高速ではあるが精度が低下する場合があった。格子パターンALT-7210のパターンを図2に示す。

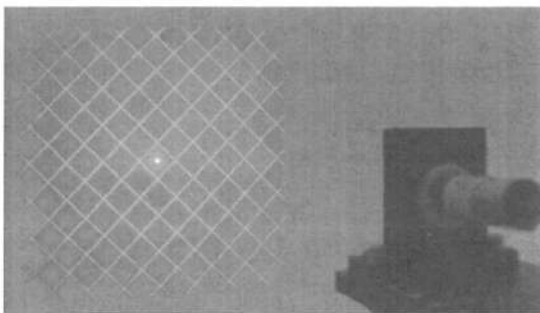


図2

これに対してユニークなパターンで両者を実現しようとする試みもされており、産総研ではユニークな波型格子パターンを使用している⁽¹⁾。

また高精度に計測する場合に複数の画面を用いる場合がある。

グレーコードパターン法で複数のストライプパターンを用いるものや位相シフト法で画面上に正弦波にレーザパワー変調されたパターンを投影しこの位相を変えながら複数の画面を観測する⁽⁶⁾。

これらの光源は初期には幻灯機のパターンを機械的に切り替えたりして行っていたり、プロジェクターを使用する他にレーザのライン光源をスキャンする方法も行われていた。このスキャナとしてはガルバノスキャナやポリゴンスキャナが使用されていたがガルバノではスキャン周波数が数10 Hz位まで、ポリゴンスキャナでは数kHzであり高速で使用できないのとスキャナ形状が大きいのでセンサの小型化の障害になっていた。

近年では小型のMEMSスキャナが入手できるようになり、半導体レーザもRGB各波長が入手できるのでデジタル変調、アナログ変調でこれらの要求に答えられるようになった。概念を図3に一次元MEMSスキャナのスペックを表1に示す。

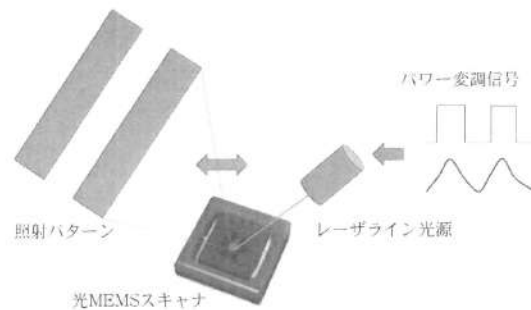


図3

表1 スペック

型番	BA0050	LBO2000
スキャン速度	500 Hz	2.0 kHz
ミラーサイズ	2.5×3 mm	4×1 mm
スキャン角度	±26°	±40°
スキャン波形	正弦波	正弦波
ジッタ精度	0.1%以下	0.07%以下
ミラー反射	>90%@650 nm	>90%@650 nm
実用温度	0~60 °C	0~60 °C
実用湿度	10~85%	10~85%
音響ノイズ	30dB以下	30dB以下
駆動方式	静電方式	静電方式
消費電力	50 mW以下	100 mW以下
パッケージサイズ	10 mm×10 mm	14 mm×14 mm
パッケージ	PLCC	CLCC

光MEMSスキャナは現在共振型と非共振型が提供されており使用方法が異なる。

共振型は共振周波数で使用し比較的高い周波数で振幅も大きく取ることができる。

これに対して非共振型（メーカーによってはリニアタイプとも呼ばれる）はガルバノスキャナと同様にDCから使用でき任意の場所でミラーを止めることもできる。使用に際しては共振周波数に影響の無い低い周波数、場合によってはローパスフィルタを使用して共振周波数にかからない駆動が必要で一般的には共振型と比較して最大振幅が小さくなっている。

4. ライン光源による光切断法

現在広く行われているのがライン光源を用いた光切断法であり、二次元の走査はワークの移動で行うと検査ラインのベルトコンベアなどが使用できラインでの検査が可能となる。概念は図4のようでありレーザビームはラインジェネレータでライン状に変換され、高速の二次元スキャナも使用する場合もある。

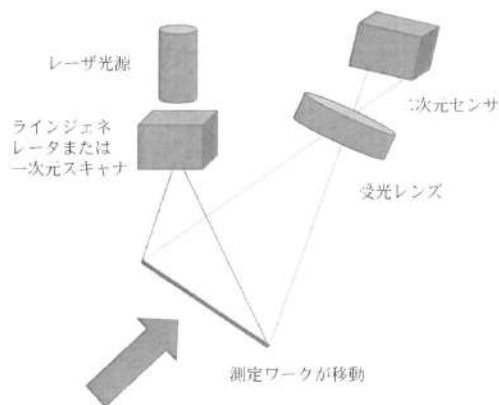


図4

ラインジェネレータは通常ロッドレンズのようなアナモルフィック光学系や、パウエルレンズと呼ばれる光学プリズムやDOEが用いられる。

レーザビームは通常ガウシアン分布をしているので単に広げるだけだと中央部が明るく、周辺が暗くなってしまいます。理想的にはラインのパワー分布が一定のトップハット形か受光レンズのディストーションを補正するために周辺パワーはやや高いものが要求されるが、これを補正するためにデガウスの光学系やフィルタが

使用される。パウエルレンズやDOEについてパワー分布は補正されているものが多いが設計上の入射ビームから外れると特性が悪くなるので注意が必要である。

光切断法はレーザシート光源により対象物が光切断されるのでレーザ光源とCCDなどの撮像カメラとの設置角度が既知として高さ情報を画像上の変位から計測する方法である。

このときの変位計測の誤差となるのがライン幅であり、微細計測において倍率の高いレンズで撮像された画面上でラインを特定するには微細なライン幅が求められる。

これらの要求に対して当社ではALT-7703において4 μm (13.5%) のライン幅と3 mmのトップハット型ライン光源を開発した⁽⁶⁾。

ただ微細なライン幅を実現するためには大きなNAで絞り込まなくてはならず、これは深度方向でのビームウエスト範囲の減少によりワーク搬送系の搬送精度が必要になったり、作動距離の減少によってレーザ光源とカメラとの位置関係の許容が少なくなったりするなど、システムでの対応も必要になってくる。

通常のラインジェネレータは前述のようにビームを広げる役割をするのでレーザ光源から放射状に照射される。ただこの光源で測定対象に高い部分があるとその影となる部分はラインが消えて測定できない部分が生じてしまう。これを回避するためにはラインを平行光で照射することが必要でテレセントリックと呼ばれる光学系が必要になる。

当社ではALT-7500としてライン幅35 μm 、ライン長16 mmをリリースしている⁽⁷⁾。

また検査のタクト時間縮小からライン長の拡大も求められるが、これはライン幅やラインのパワー均一性にも影響してくる。さらに同様の理由でライン光源の高出力化も求められるが、こちらも諸性能とトレードオフの関係になる場合が多い。

単一レーザ光源でライン仕様を満足しない場合には複数のライン光源を並列に並べてライン長を拡大する方法がある。この場合にはライン分布と光源の間隔で合成したライン光源のパワー分布が一定になるような設計が必要である。また設置調整に対しては、それぞれのレーザ平面を合わせる必要があるので3軸の位置の他にチルト角度の調整が必要になってくる。

ライン微細化で問題になっていくパラメータとしてワーク表面でのスペckル干渉がある。

特に50 μm 以下のライン幅で問題になるケースがあり、これについてはレーザ駆動の高周波重畳で低減できる。

高周波重畳はレーザに数100 MHzの重畳電流を付

加することによりシングルモードレーザをマルチモード化させる技術で当社製品ではすべての製品にオプションで設定できる。

一次元スキャン型ではレーザビームを走査するので原理的にはラインパワー分布は変わらないがスキャン角度によってのコサイン則や走査速度変化から単位長さあたりのパワー変化が生じる場合がある。ただアナモルフィック光学系によるものと比較してライン幅に対してライン長は取りやすくなるのと、光MEMSスキャナを使用した場合には小型化できるメリットがある。

5. 二次元スキャン方式

DOEパターン照射のデメリットは自由なパターンが作れないことで、OA用のプロジェクターが使用される場合がある。プロジェクターはDMD (DLP) と呼ばれるマイクロミラーアレイかLCOSと呼ばれる液晶アレイの画像にハロゲンや高輝度LEDの光源を照射して画像を照射面に転送する構成となっている。このため照射面に対してフォーカス調整が必要となり、三次元の奥行方向での測定範囲がプロジェクター側で制限される場合が多い。また光源は常に素子面に照射する必要があり輝度を上げると光源の消費電力は大きなものになってしまう。

これに対して二次元スキャン型のディスプレイはレーザのビームをスキャンしており、スキャン角度とビームの広がり角を合わせることでフォーカスフリーが実現できる。

またレーザは必要なときだけ点灯するので省電力が実現できる。

光MEMSスキャナを使用したレーザプロジェクターが近年実用化されており、また照度が低く使用できる範囲は限られているが、今後出力拡大とともにこの分野での展開に期待が持てる。

現状入手可能なのは720Pと呼ばれる1,280×720ドットで画像のリフレッシュは60 Hz程度である。スキャン照射系とカメラの受光系は同期が必要で、同期が無い場合には画像中に輝度ムラが発生してしまう。

通常はスキャン照射側の垂直同期信号をカメラのシャッタートリガ信号とし、決まったフレームレート分カメラで取り込む構成となる。

6. 特殊な三次元計測

上記通常の三次元計測の光源を述べてきたが、それ

らで適応できない分野もある。

パイプなどの内径計測では計測面が内側であるので通常のライン光源が使用できない。ただこれらについても三角測量の原理は適用でき⁽⁸⁾、当社ではリング光源ユニットALT-4300をリリースしている (図5)。

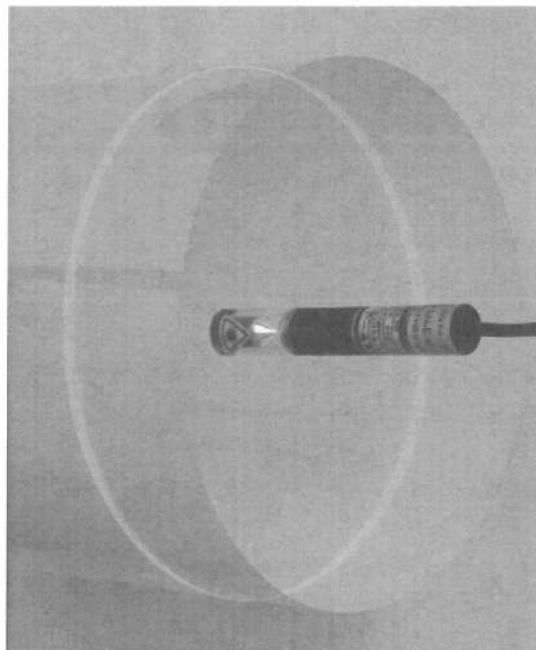


図5

このリングジェネレータはセラミックを精密加工し表面にアルミコーティングを施した円錐ミラーで先端加工精度と斜面角度精度で高精度なレーザ平面を実現している。

7. レーザの波長、出力、偏光

シングルモードのレーザは単一波長ではほぼ100%偏光しているのでこの特性を生かして画像のコントラストを上げることができる。

現在レーザの波長は375 nmの紫外から1,000 nmを超える赤外まで選択することができる。ただレーザの安全クラスでのクラス2は可視光の設定で人間の目の嫌悪反応により安全を確保するので波長が400~700 nmの範囲で1 mW未満と規定されている。通常のライン光源はレーザが広がる方向となるので、こちらに

フについてはクラス2Mの適用となりレーザーの射出パワーはレーザーの広がり角に応じて上げることができる。この波長にはDVDで使用される635 nmや650 nmやBDの405 nmがあるので比較的安価に入手することができる。

シングルモードのレーザーでは中心波長に対して製造での波長バラツキ及び温度での波長シフトがあるので±10 nmを考慮する必要がある。

カメラレンズにこの波長帯だけを透過するバンドパスフィルタ (BPF) を追加することによりバックグラウンド光の影響を低減して、画像のコントラストを得ることができる。

ここで注意が必要なのはBPFのバンド幅は入射角度が0度の場合で入射角度が大きくなると中心波長が短波長側にシフトしてくる。

三次元計測ではレーザーの照射角度とカメラの撮像角度を満足する入射角度が必要なので、こちらを考慮してBPFのバンド幅を決める必要があり、バンド幅が足りない場合には画像周辺が暗くなる現象となる。

また対象ワークの波長反射率が決まっている場合にはこの波長を選択することが望ましい。

ワークの移動が速く高速で画像を取り込まなければならぬ場合や、太陽光などバックグラウンド光が大きい場合にはレーザーの出力を上げる必要がある。

太陽光のバックグラウンドノイズは波長特性を持っており530 nm付近がピークで800 nm付近では65%となる。また空気の吸収もあるので部分的に低下している波長もあり910 nm付近では20%となり近赤外波長が有利である。

高出力レーザーはレーザーの発光部がストライプ構造で点光源となって無いものが多いので光学系とのマッチングを確認する必要があり、場合によってはレーザーに合わせて光学系を設計する必要がある。

またレーザーの偏光特性を利用して上記のBPFの他に偏光フィルタを追加して画像のコントラストを上げることができる。

650 nm以上の半導体レーザーはTEモードになっており活性層と垂直方向が偏光方向となっているが635～640 nmについてはTMモードで偏光方向が90度回転したTMモードになっている。

通常ラインジェネレータはライン幅を狭くする場合には活性層と垂直方向が絞込めるのでライン幅方向が偏光方向となる。

ライン長を長く分布を優先する場合には90度回転方向となるのでライン長方向が偏光方向となる。ただ同一メーカーでも640 nm付近の波長帯ではTEモードの製品もあるので偏光が寄与するシステムでは確認が

必要である。緑、青についてはTEモードとなっている。

またこちらもワークの反射によっての偏光特性を確認する必要があるのと、BPF、偏光フィルタ自身の透過率があるので全体のバランスが必要である。

8. ライン光源の仕様

ライン光源の仕様と構成パラメータについて述べる。名称、仕様はメーカーによって定義が異なる場合がある。

8-1 ライン長

ラインの長さをピークパワー値の13.5% ($1/e^2$) で表す。

パワー分布が規定されている場合にはその規定による。

単位は通常mm

一般的にはライン長広げるとライン幅も大きくなる傾向

8-2 ライン幅

ラインの幅をピークパワー値の13.5% ($1/e^2$) で表す。

単位は通常 μ m

光学系を用いたものまたはスキャンタイプも中央と周辺とで光路長が異なるので

像面湾曲から周辺は太くなる傾向となる。

8-3 作動距離 (WD)

ライン幅が規定されるレーザーから照射面までの距離。

単位は通常mm

一般的に同一光学系ではWDが長ければライン幅とライン長は広く、ウエスト範囲が大。短ければライン幅、ライン長狭く、ウエスト範囲短くなる。

8-4 パワー分布

規定ライン長の中で最大のパワーを100%としたときに最小の値。

通常%、場合によっては平均値から±で表示する場合もある。

パワー分布が厳しくなるとレーザーのカップリングが下がり、出力パワーが低下する傾向となる。

8-5 出力パワー

レーザー射出端でのパワーで規定されることが多い。

単位mW

ただし照射面で規定する場合には単位長さあたりmW/cmで規定する場合もある。

9. おわりに

CCD、CMOSカメラは高解像度、高フレームレートと高精度、高速化が進み、画像処理システムもCPUやGSPの処理速度が向上している。さらに画像処理アルゴリズムとソフトウェアの開発環境も進化し、以前と比べるとコストパフォーマンスは数倍に向上している。

ただ対象物による取り込み画像の変化は大きくまだまだ改良の必要がある。

今後もシステムに適応したレーザ光源の開発を進めていきたい。

<参考文献>

- (1) Xboxウェブサイト
<http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>
- (2) 吉澤徹編著：最新、光三次元計測、朝倉書店（2006）

- (3) ALT-7220 エーエルティー株式会社ウェブサイト
<http://www.alt.co.jp/product/three-dimensional-measurement>
- (4) 産総研 ウェブサイト
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120802/pr20120802.html
- (5) 井口征士・佐藤宏介：三次元画像計測、昭晃堂（1990）
- (6) ALT-7703 エーエルティー株式会社ウェブサイト
<http://www.alt.co.jp/product/laser-light-source>
- (7) ALT-7500 エーエルティー株式会社ウェブサイト
<http://www.alt.co.jp/product/laser-light-source>
- (8) 精密工学会：小型内面形状測定装置の開発（2007年10月）

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー株式会社 代表取締役

低ノイズレーザ光源ユニットの レーザ駆動方法

エーエルティール(株) 高野 裕

1. はじめに

半導体レーザは光ディスクCD用として波長780 nmの近赤外、DVD用として650 nmの赤、BD用として405 nmの青と発展してきたが緑については532 nmのDPSSが主流であった。近年ダイレクトの510~525 nmの緑レーザが開発され商品化できるようになり、また赤についても高出力の638 nmや青の445 nmが開発されレーザディスプレイなどに応用されるようになった。

将来期待されているスーパーハイビジョン(4K、8K)については従来のLCDのハイビジョンと比較して解像度が上がるだけでなく色再現性が良くなる規格となっているため、RGBの規格については630 nm、532 nm、467 nmとなりレーザへの期待が大きい。

ただ緑や青のレーザは従来の赤外や赤と仕様が異なるため従来の駆動回路が使用できなかつたり、画像上のスペckルノイズが問題になった場合の対応を駆動回路に求められることがあつたりする。

また工業用途では光切断法による三次元計測が使用されているが、こちらについても数10 μm 以下のライン幅ではスペckルノイズによる影響がでて、計測精度が低下する場合がある。

このような用途においてもレーザの駆動回路に高周波重畳を加えることによりノイズ低減することができる。

さらに計測用では投光光学系と受光光学系が同軸配置される場合があり、この場合には投光レーザの一部が受光系から反射されて再び半導体レーザに戻ることで戻り光ノイズを発生する場合がある。

このような用途においてもシングルモードの半導体レーザを高周波重畳により干渉性を下げることによってノイズを低減することができる。

本稿では最近の半導体レーザの特性を紹介するとともに、その駆動回路と目的について説明する。

2. 半導体レーザの特性とスペック

レーザの駆動方法の説明にはある程度レーザの基本特性を理解する必要があるので一般的な構造を図1に示し、以下に規格と定義とRGBレーザの代表的な数値を示す。

2-1 光出力 (P_o)

絶対最大定格で一般的には連続動作(CW)にてキック(動作電流と光出力の特性で曲がりがない)がな

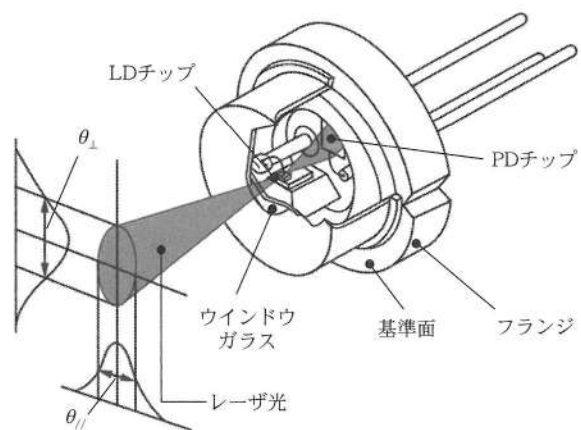


図1

い領域とされており、特にパルス駆動などの但し書きがない限り、この値を越えないようにしなければならない。光学的にはキंक領域では横モードの制御が不安定となりチップ端面でのビーム放射である近視野像（ニアフィールドパターン：NFP）が変化し、結果としてスポットサイズが変化する。実使用時の光出力は最大定格から数10%はディレーティングして使用するのが望ましく、そうすることによって低温での点灯開始時のドループ特性によって最大定格を越えることもない。ただしあまり高出力の半導体レーザーを小出力で使用することは発振モードが安定しないこともあり光出力の安定度が低下することがある。また半導体レーザーが静電気やサージに弱いといわれるのもこの定格で、応答性の良いことから少しの電荷で最大光出力を越えてチップ端面が瞬時光学損傷（COD）を起こして劣化してしまうことがある。

2-2 LD逆電圧 (Vop)

半導体レーザーは電気的にはPN接合のダイオードであり逆方向に電圧を加えると局部的に電流が流れPN接合が破壊されてショートとなることがある。一般的に2 V程度の値で規定されている。

2-3 PD逆電圧 (Vr)

半導体レーザー内には一般的に光出力モニタ用のフォトダイオードが内蔵されており、830 nm以下ではシリコンPINフォトダイオードが使用され、1.2 μm以上ではゲルマニウムやInGaAsP PINフォトダイオードが用いられる。これらは通常応答度を早めるため逆電圧をかけて使用されるが、あまり高い電圧をかけるとブレイクダウン電圧に達して電氣的にショートしてしまう。通常ブレイクダウン電圧に半分の15~30 Vで規定されている。

2-4 動作温度 (Tc)

半導体レーザーを動作させるときのケース温度で規定されている。ケースの形状、仕様によって異なるが、一般に-10~60℃となっている。車載用では-10~80℃、通信用では-20~70℃というものもある。動作温度は絶対最大定格ではあるが少しでも越えると劣化するものではない。しかし温度が高くなると故障率が上昇し10℃の温度上昇でMTTF（平均故障時間）は約半分となるのでできるだけ低い温度で使用するの望ましい。通常機器では使用周囲温度に対して機内温度、光学ユニット温度と上昇していくことがあるので注意が必要で、特にコリメータレンズのユニットを放熱器として使用することが多いので熱設計に考慮する必要がある。

2-5 保存温度 (Tstg)

半導体レーザーのチップをヒートシンクに接続する部

分などに比較的融点の低い金属などが使用されているため、温度範囲をはずれると特性が劣化することがある。通常-40℃から80℃でパッケージによっても異なる。

2-6 しきい値電流 (Ith)

半導体レーザーは自然放出光からレーザー発振を始めるため、半導体レーザーに流す電流を横軸に光出力を縦軸にとると図2のようになる。この特性は電流のIと光出力のL (Light Output) からI-L特性とも呼ばれ、この折れ曲がる点がしきい値電流でレーザー発振を始める点である。しきい値電流はしきい電流、発振開始電流とも呼ばれ自然放出光領域の直線とレーザー発振の領域の直線の交点で定義されるが、しきい値電流が50 mA以下の半導体レーザーについては発振領域の外挿点としてもそれはどの誤差はない。I-L特性の交点が不明確であったり高精度に測定しなかったりする場合には曲線の微分をとる方法が用いられている。しきい値電流でもっとも注意をしなければならないのは図2で示されるように温度によって変化することで、チップ温度を特性温度と呼ばれるもので割った指数関数となっている。一般的にしきい値電流は標準値20~40 mAで最大値が仕様書にて規定されている。最小値は規定されることが多くスイッチング特性の改善のため、しきい値電流以下でバイアス電流を流す場合にはメーカーへの確認が必要である。しきい値電流の温度係数は実験式として $I_{th} = C * \exp(T_j/T_0)$ で表される。T_jは活性層の温度、Cは係数、T₀は特性温度と呼ばれる。特性温度は室温から約70℃の範囲で780 nm帯のAlGaAsの半導体レーザーでT₀=100-160 K、1 μm帯のTnGaAsPの半導体レーザーでT₀=70 K程度

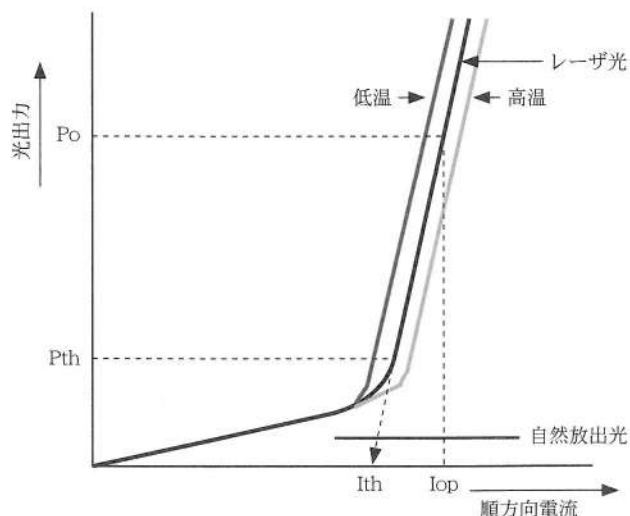


図2

である。

しきい値電流は最大出力が上がれば上昇し、緑、青についてはまだ高い傾向にある。

2-7 動作電流 (Iop)

I-L特性(図2)で定格の光出力を出すための電流値であり25℃の値である。動作電流もしきい値電流と同じく温度によって変化し、しきい値電流の温度変化とスロープ効率の温度変化によって変わる。これは周囲温度だけでなく自己発熱によっても同じであり、一定の光出力を得ようとすれば光出力をモニタしながら電流を調整する必要がある。これをAPC (Automatic Power Control) と呼ぶ。図2からも明らかなように一定電流で駆動した場合温度が低くなる方向で光出力が増加する。ドループ特性もこの要因であり、チップの温度が低い電流投入時に光出力が大きくなっている。また波長安定性や雑音の点からも高精度な安定性が必要な場合には、半導体レーザを一定温度に制御する方法が行われている。通常のヒーターや電子冷却素子(ペルチエ素子)とサーミスタ等の温度検出素子を用いて制御するもので、通信用や高出力の半導体レーザには各素子が組み込まれたものもある。動作電流は通常最大光出力より低い定格出力時の電流であらわれ50~60 mAであるが、高出力のタイプは出力に応じて上昇する。

2-8 動作電圧 (Vop)

定格出力時の半導体レーザの両端電圧を動作電圧と呼ぶ。赤外、赤では2 V前後の値をとるが緑、青では5~7 V程度となる。従来のレーザドライブ回路やドライブICは最大電圧5 Vが多くこれらでは緑、青を駆動することができない。温度特性は赤外、赤では通常のダイオードと同様に温度が上昇すると約-1 mV/℃で下降するが、APC動作をしている場合には駆動電流を増加させなくてはならないのでこの割合が約1.2 mV/℃となるため全体ではばらつきがあるものの相殺する関係となっている。動作電圧は電源が確保されているシステムではさほど問題とはならないパラメータではあるが、電池駆動のように限られた電圧の中で動作させる場合には重要なファクタとなる。仕様書では標準値と最大値が規定されることが多く、最小値についてはメーカーのデータを参照する必要がある。

2-9 スロープ効率 (Sd)、微分効率 (η)

しきい値電流を越えたあとの単位電流あたりの光出力増加分をスロープ効率であらわす。単位はmW/mAで、制御する側ではあまり高いと制御電流が小さくなったり、ノイズの影響を受けやすい。一般的に0.3~0.5程度で波長が長くなると光子エネルギーが小さくなるのでスロープ効率は小さくなる。またメーカ

一によっては微分効率と呼ぶ場合もあるが、厳密には外部微分量子効率 η は注入された電子数に対して放出された光子数であるので単位はパーセントとなり $\eta = Sd * q / h\nu$ の関係がある。スロープ効率の定義はメーカーによってまちまちであるが、最大出力の約50%出力をそれを中心とした電流差で割っている。スロープ効率の温度特性は温度が上昇するとしきい値電流が高くなることより注入キャリア密度が増加し、それによっても自由キャリアの吸収が増えることにより内部損失が高くなり低下する傾向となっている。波長780 nmの半導体レーザで-0.001 mW/mA/℃程度の値となっている。

2-10 モニタ電流 (Im)

モニタ電流は半導体レーザチップの外部に取り出す反射面の反対側から取り出した光を、PINフォトダイオードによって受光することによって得られる。定格出力時に規定のバイアス電圧をかけたときの値をmA単位で示し、通常0.1~3 mA程度が得られる。仕様書では標準値、最大値、最小値で記載されているがレーザチップの後面反射膜の透過ばらつき及びPINフォトダイオードの位置ばらつきによって標準に対して最大最小が50%以上変動することが多く、設計では注意を要するパラメータである。一般的に高出力のタイプは半導体レーザのモニタ側の反射率を上げているものが多くモニタ電流は低くなっている。また直径5.6 mmや3 mmのパッケージのものはPINフォトダイオードの形状が小さくなっていることから低い傾向となっている。バイアス電圧は低いと光出力とモニタ電流が比例しなくなったり応答度が悪くなったりするが、近年半導体レーザの単一電源使用が増えていることから低バイアス化の傾向となっている。また負荷抵抗が大きいと同様に比例関係が悪くなることから負荷抵抗を記載する場合もある。モニタ電流の温度特性はPINフォトダイオードの温度特性となり、せっかくAPC回路で光出力を安定させても基準となるモニタ電流が変動しては意味がなくなってしまう。幸いなことに780 nmではシリコンPINフォトダイオードの温度係数は平均でほぼ0となっている。ただし温度特性のばらつきは品種によってことなり、通常0.2%/℃程度は考慮する必要がある。温度係数は波長が780 nmより短くなるとマイナス方向となり、長い方ではプラス方向となる。

また温度特性には波長変化による後面反射膜の透過率変化もあるが精度の要求される仕様ではメーカーに確認する必要がある。

2-11 暗電流 (Id)

半導体レーザが発振していないときにモニタフォトダイオードに流れる電流をいう。バイアス電圧5~15

V、負荷抵抗0.1~1 kΩの条件でシリコンPINフォトダイオードでは0.1 nA以下程度の値となっている。

2-12 発振波長 (λ₀)

ファブリペロー型の半導体レーザはチップの両端面を共振器としていることは述べたが、780 nmでチップの縦モード側の長さが250 μmのAlGaAsでは2,269個の定在波がたつてその中から780 nmに近いものが発振している。マルチモードではそれらが同時に発振しているが、そのときの最大光出力がピーク発振波長であり1/2に光出力が低下する波長をFWHM：スペクトル半値幅 (Δλ₀) と呼ばれる。縦モード1本のスペクトル幅は0.3~1 nmオーダーの小さなもので、隣あった縦モードの間隔は0.3 nm程度である。シングルモードの半導体レーザでは温度と発振波長の関係は図3のようになり、不連続点で縦モードが別の縦モードに移っている。これをモードホッピングと呼び、全体では長波長側にずれていく。1つの縦モード内の温度係数は約0.07 nm/°Cであるが全体の平均としては0.2~0.3 nm/°C程度の温度係数を持つ。この関係はチップの温度上昇であるので光出力 (駆動電流) でも同様の関係となる。またモードホッピングは1%程度の光出力ノイズを発生することがあるので雑音の点で問題となることがある。

FWHMはスペックルノイズと関連し、最近の緑、青では2~3 nmのものもありスペックルの低減に寄与している。

また緑、青レーザでは電流を上げて出力を上げると波長が短波長側に遷移していく。これはブルーシフトと呼ばれ色再現性で問題となる。要因は活性層内のピエゾ電界であるがプロジェクター系のアプリケーションには注意が必要である。

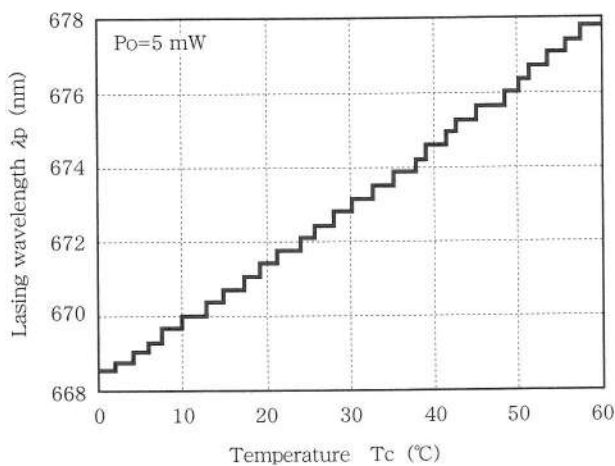


図3

2-13 ビーム放射角 (水平θ_∥、垂直θ_⊥)

半導体レーザの活性層から放出されるレーザビームはチップの端面では近視野像として放射されるが、距離が離れるにつれ回折して広がり遠視野像 (ファールドパターン：FFP) となる。この放射特性を30~100 mmの位置でピークの光出力の50%となる角度幅をはかったのがビーム放射角で、通常水平方向で6~20deg、垂直方向で25~45deg程度の値となっている。光学設計では重要なパラメータであるがばらつきも大きいので注意する必要がある。垂直放射角を水平放射角で割ったものを楕円比またはアスペクト比と呼び、1に近い方が円に近くビーム形状や光学系の効率としては望ましいが通常2~3の値となっている。

2-14 非点隔差 (As : Astigmatic difference)

垂直方向の放射角と水平方向の放射角の仮想光源位置は異なり、これを非点収差 (アスチグマチズム) と呼びこの距離を非点隔差という。非点隔差は光学的に重要な数値であり定格出力時に利得導波型で通常5 μm以下、利得導波型では20~30 μm程度の値である。非点隔差は標準値または最大値で規定されることが多いが、光出力が低い場合には値が大きく、ばらつきも大きくなる傾向があるので高精度の光学系の場合には考慮が必要である。

2-15 発光点精度 (角度 (水平) Δθ_H、(垂直) Δθ_V、位置Δxyz)

半導体レーザのパッケージの基準面に対して放射角の光軸ずれを水平方向、垂直方向に対して角度であらわす。またパッケージの機械的中心からの発光点のずれを位置ずれとしてμmであらわす。高精度な光学系では考慮しないと量産時に性能を満足できないものが発生することがある。通常角度ずれで2~3deg以下、位置ずれで±50~80 μm以下程度の規格値である。

2-16 偏光比 (TE/TM)

理想的な半導体レーザは単一横モードでは接合面に平行な成分の直線偏光になっている。しかし自然放光が含まれるため垂直方向の成分も含まれるので光出力に依存し出力が大きくなると値は大きくなる。650 nm以上の半導体レーザはTEモードになっており活性層と平行方向 (放射線の狭い方向) が偏光方向となっているが635~640 nmについてはTMモードで偏光方向が90度回転した方向になっている。

ただ同一メーカーでもTEモードの製品もあるので偏光が寄与するシステムでは確認が必要である。緑、青についてはTEモードとなっている。

2-17 内部接続

半導体レーザの内部回路は大きく分けて図4のようになっている。レーザダイオードとPINフォトダイオ

ードの共通端子はパッケージと接続されているので、パッケージをグランド接続基準として(a)タイプを正電源用 (P接続、C-COM) (b)タイプを負電源用 (N接続、A-COM) (c)タイプを正負2電源接続 (M接続 G-COM) と呼ぶことがある。また接続方法は単に電気的な接続だけでなくチップをヒートシンクであるパッケージにのせる方法であるので、活性層に近い面をマウントに接着する方向が下か (アップサイドダウンマウント) 上か (アップサイドアップマウント) で熱抵抗に関する性能が異なる場合がある。また赤や近赤外では各接続が選べるが、青、緑では(c)タイプの接続のみという波長によっての違いもある。そのほかに4端子でレーザダイオードとPINフォトダイオードが独立しているものや、3端子であるが共通端子がパッケージから絶縁されているものもある。

単電源で使用する場合にはA-COMではレーザを絶縁しないとケースは+電源に接続されることになるので取り付けマウントがシャーシに落ちている場合などシャーシグラウンドからショートする場合がある。

また単電源でG-COMタイプを使用する場合モニタフォトダイオードが無バイアスになり回路構成によってはAPCが不安定になることがある。

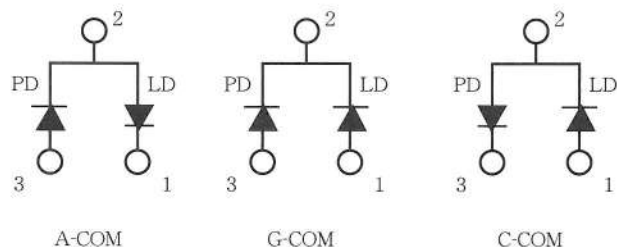


図4

2-18 パッケージ

半導体レーザのパッケージはφ5.6 mm丸型が主流であるがφ9 mmやφ3 mmもある。φ9 mm及びφ5.6 mmのパッケージ寸法はメーカーによる差はほとんどないので機構的な互換性はあるがキャップの高さや発光点位置が違うものがあるので注意が必要である。最近では小型化でφ3 mmがでていますがこちらはφ3.3 mmとφ3.8 mmで互換がない、またこちらもφ3.8 mmであってもキャップ形状が異なる場合がある。

その他にチップキャリア型や通信用のモジュール型、大出力でパワートランジスタのTO-3に似た外形のものもある。

パッケージの熱抵抗は単体ではφ9 mmで100 °C/W程度、φ5.6 mmで300 °C/W程度あり、φ3 mmでは

さらに大きくなるので動作電流の低減のためにも熱設計が大切である。

2-19 寿命

半導体レーザの寿命は平均故障時間: MTTF (Mean Time To Failure) であらわされることが多い。半導体レーザへのダメージはサージ破壊によるようなハードダメージの他にチップ端面の反射膜の劣化や内部活性層の劣化により徐々に電流が増加するソフトダメージがある。

定出力時に電流が初期と比較して20%上昇したところを寿命として、ワイブル分布からMTTFを計算する。MTTFではそのロットの63.2%が不良になる確率と言い換えることもできる。

通常は周囲温度25 °Cで規定されるがMTTFは温度依存性が高いので、加速試験のために高温で行われることもある。

赤レーザでは使用周囲温度やディレーティングにもよるが10,000~50,000時間は問題なくなっている。

3. 光出力の安定動作

3-1 光出力の安定動作

半導体レーザの変動要因としては、温度によるもの、電圧変動によるもの、発光周期によるもの、レーザ自身の雑音によるものが考えられる。

レーザの雑音については量子雑音、モードホッピング雑音、戻り高雑音がある。温度によるものは制御回路の温度ドリフトがあり基準電圧などには注意が必要である。またまれには半導体レーザのモニタフォトダイオードに温度特性が生じる場合があり、要因としては端面コーティングによるものでロットによって温度係数も変化することもある。

電圧変動についてはDC成分で基準電圧や制御系の安定度を確認する必要があるが、AC成分で特に周波数の高いサージ電圧の考慮が必要である。半導体レーザは応答性が良く、サージによって破壊することがあるのでドライブラインにノイズが入らないような考慮が必要である。

発光周期によるものはドループのようにレーザチップの温度に起因するものもあるが、高速スイッチングでは半導体レーザのリードインダクタンスなどによる共振が発生することがあり、特定の周波数でオーバーシュートやリングングが発生するので周波数やデューティを可変して確認する必要がある。

3-2 量子雑音

半導体レーザの雑音の最低レベルでキャリアの自然

発光による再結合が不規則に起きることによる。しきい値電流付近で大きく動作電流付近では 10^{-15} 以下のレベルである。通常は問題とならないが横モードが不安定でキングが生じている場合には大きな値がでる場合がある。また半導体レーザによっては低出力で屈折率導波型であっても利得導波型との中間的な動作をして自励振動（セルフパルセーション）起こす場合がある。この場合光出力で平均値の数パーセント以上の雑音が発生することがあり、周波数は数100 MHz以上である。

3-3 モードホッピング雑音

シングルモードの半導体レーザが温度変化で縦モードが次のモードに移るときに2本以上の縦モードが交互にランダムに発振を繰り返すことで生じる。光出力で平均値の数パーセント程度で周波数は数10 MHz以下である。これを低減するには半導体レーザの温度制御を行ったり、外部にミラーを設けたりすることにより縦モードの制御をきつくした干渉型のようにシングルモードを安定にする方法がとられている。また安定なマルチモードにする方法もあり200 MHz以上の高周波を重畳したり、半導体レーザ自身を1 GHz程度でパルス発振させたりするセルフパルセーションがある。

3-4 戻り光雑音

光ディスクのように半導体レーザの光がディスクに当たって再び戻ってくるものはファブリペローの共振器に光が帰還されることとなり特性が変動する。これにより引き起こされる雑音を戻り光雑音と呼び戻り光量が1%以下でも問題となることがある。同軸の投受光系で問題となることが多く、変動として数パーセント以上が認められることがあり、周波数は数100 kHz以下である。

3-5 自動光出力制御：APC制御

半導体レーザは光出力を検出して駆動電流を制御するAPC回路が主流であるが、光検出方法としてはパッケージに内蔵のPINフォトダイオードを用いる方法と外部にPINフォトダイオードを設ける方法とがある。内蔵のPINフォトダイオードを用いるのが一般的であるが、光学系の経時変化やレンズ系の汚れによる光出力の低下をレンズ系の後に配置したPINフォトダイオードで補正したり、高速に制御するため内蔵のPINフォトダイオードでは応答度が足りない場合などで外部の光検出器が用いられる。

また $\phi 3$ mmのディスプレイ用の赤、緑、青レーザは外部フォトICを用いるため、モニタフォトダイオードが内蔵されていない。

APC回路の基本は基準電圧とモニタフォトダイオ-

ドの検出電流を比較して差分を駆動電流として制御する。光出力の調整は基準電圧を変化させるかPINフォトダイオードの電流-電圧変換のゲインを変化させることにより行う。また電源投入時に制御ループが立ち上がらない場合に半導体レーザに過大な電流が流れる場合があるのでこれを防止するスロースタート回路や半導体レーザの駆動電流を制限してトラブルを防止する電流リミッタ回路、しきい値電流以下の電流をあらかじめ流しておき特性の改善をはかるバイアス電流回路、電源からのサージ、ノイズを防止するサージ吸収回路も必要に応じて追加される。

制御帯域としてはフィードバック制御があるので高速でも1 MHzくらいまでで、レーザプリンタなどではAPPC回路内にサンプルホールド回路を追加して高速スイッチング時には制御を切る方法も行われている。また高速スイッチングでも周期が変わらない場合にはモニタダイオードの平均値をとってAPCをかける方法もある。

レーザの安全規格ではレーザクラスが上がるとインターロックが必要となるので、これに対応したイネーブル入力も必要な場合がある。

3-6 自動電流制御：ACC制御

基準電圧から定電流で駆動する方法でAPC制御では波長変動やモードホッピングノイズが問題になる場合や高速スイッチングが必要な場合に用いられる。

帯域としては数100 MHzまで可能であるが温調をしないとレーザのパワーが変化してしまう。

またモードホッピングについては設定電流がホッピング点にかかっていないか電流を微調整して確認する必要がある。

3-7 高周波重畳制御

戻り光ノイズ、モードホッピングノイズやスペckルノイズを低減する方法として高周波重畳が用いられる。

スペckルノイズは干渉の一つで投射レーザビームと投射対象の表面の微細構造からの反射光との干渉で発生するノイズでディスプレイでは画像品質を低下ずるとして色々な対策がとられている。

実際には200~400 MHzの変調信号をレーザダイオードの駆動電流に重畳させる。原理としてはレーザダイオードの電流を急速に変化させた場合、過渡的に利得が広い波長範囲で損失を上回り複数本の縦モードが発振されシングルモードレーザがマルチモードになることによる。

重畳率は駆動平均電流に対してどの程度の変調電流を与えるかの割合であるが、駆動電流が大きくなると重畳電流、重畳率の最適化が必要になってくる。変調

周波数は高くなれば効果が増す場合もあるが、この周波数はEMCでの雑音源ともなるし使用する駆動デバイスの特性もあるのでメリットがでにくい。

4. レーザドライバー回路

前述のようにレーザードライバー基板は半導体レーザーの波長、接続や色々な機能により回路のバリエーションが生じる。

ただ当社のコリメーションユニットでALT-3800シリーズ（写真1）では外形φ12 mm、長さ50 mmと小型のため、内蔵するプリント基板は8×26 mmの制限があり、従来は機能に応じてプリント基板を用意しなくてはならず煩雑であった。この度、専用ドライバーICを採用することや携帯電話の発達で小形部品が入手できるようになったことから上記のほとんどの機能を盛り込んだドライバー基板を開発した。機能としては表1の通りである。



写真1

新ドライバー基板については当社低ノイズコリメーション光源ALT-3800シリーズ、低ノイズレーザーライン光源ALT-7800シリーズに順次搭載されている。

5. おわりに

レーザーディスプレイでは色再現性のためにRGBレーザーを数10 MHzでデジタル変調し、それぞれの光出力は10～12bitで制御する必要があり、今後の4 K、8 Kに向かってさらに周波数が高くなっていく。

光ディスクやレーザープリンタのようにレーザードライ

表1

動作電圧	赤、赤外	3～5 V単一
	緑、青	上記以外に6～12 Vを外部供給可能
レーザー接続	A-COM、C-COM、G-COM対応	
レーザー駆動電流	最大300 mA	
制御方法	APC、ACC対応	
インターフェース	デジタル変調	C-MOSレベル
	アナログ変調	0～5 V
	イネーブル	C-MOSレベル 正/負論理変更可能
エラー出力	電流オーバー、温度オーバー	
スイッチング周波数	APC：デジタル変調、1 MHz以上	
	APC：アナログ変調、10 kHz以上	
	ACC：デジタル変調、100 MHz以上	
電流リミット	内部固定抵抗にて設定可能	
高周波重畳	重畳周波数	250～500 MHz
	重畳電流	20～100 mA

バーを含めた周辺回路はASIC化されていくものと予想されるが、通信用途と異なってアプリケーション側から小形、軽量化を求められる場合があり、パッケージや配線方法も工夫が必要になってくると思われる。

日本の技術でこれらの問題を解決していくことを期待したい。

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー㈱ 代表取締役
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL：03-5946-7336 FAX：03-5946-7316
E-mail：htakano@alt.co.jp

レーザライン光源の新しいアプローチ

エーエルティイー(株) 高野 裕

1. はじめに

レーザライン光源は光切断法による三次元計測が普及するにしたがって高精度化、高速化の要求から新しいアプローチが試みられている。高精度化ではラインの細線化が進みライン幅が10 μm を下回るものが要求されるようになってきた。

これは携帯電話などにおける高密度実装でのパンプ計測などに用いられ、パンプが小さくなるにつれて分解能も小さくなることから細線が要求される。

当社では4 μm ($1/e^2$)も実用化しているがこのレベルになると測定物の表面のスペックル干渉が問題となってくる。

また光切断法ではCCDカメラで撮った画像を通常エッジ抽出から2値化して計算するが、この場合ラインのパワー分布やライン幅が異なるとラインが切れて測定精度が落ちる場合がある。

この為にはパワー分布が一様で、ライン幅が均一な光源が求められるが、従来の単純なシリンダリカルレンズでは単純にガウス分布のレーザを伸ばすだけで不十分な場合が出てきた。

さらに通常の1ラインの光切断法ではワークを移動するか、ライン光源をスキャンすることが必要であったが、測定時間の短縮化やリアルタイム処理から少ない画面での三次元計測がアプローチされている。

このためには従来の1ラインのレーザ光源では足りず、マルチライン、マルチドット、格子ラインなど複雑なラインが求められるようになりつつある。

このためには複数ライン光源を組み合わせる場合もあるが、従来イニシャルコストが高く産業用では使用で

きなかったDOE（回折光学素子）がシミュレーションソフトの改良や製造機械の進化により使用できるようになってきた。

2. 高周波重畳による低スペックルレーザライン光源

スペックルは干渉の1つで投射レーザビームと表面の微細構造からの反射光との干渉で発生する。これを低減する為にはレーザの干渉性を下げることが必要で、この方法の1つとして高周波重畳が従来から光学ディスクのピックアップで行われている。

ピックアップではレーザダイオード光源と検出ディスク面が共役になる為、ディスク面でのレーザ反射光が投光レーザに戻り、戻り光ノイズを発生して読み取りエラーを発生するための対策である。

実際には200～300 MHzの変調信号をレーザダイオードの駆動電流に重畳させる。原理としてはレーザダイオードの電流を急速に変化させた場合、過渡的に利得が広い波長範囲で損失を上回り複数本の縦モードが発振されシングルモードレーザがマルチモードになることによる。

重畳率は駆動平均電流に対してどの程度の変調電流を与えるかの割合であるが、レーザダイオード駆動電流が大きくなると重畳電流、重畳率の最適化が必要になってくる。

変調周波数は高くなれば効果が増す場合もあるが、この周波数はEMCでの雑音源ともなるし使用する駆動デバイスの特性もあるのでコスト、スペースでメリットが出にくいと思われる。

図1は当社での高周波重畳しているレーザダイオードの光出力の波形である。

図2は当社レーザコリメーションユニットで重畳無しALT-3301と重畳ありのALT-3850のレーザ光をコピー紙に照射したもので、レーザダイオード素子、光学系はまったく同じものでレーザドライバ回路に重畳あるものと無いものとのスペクル差である。

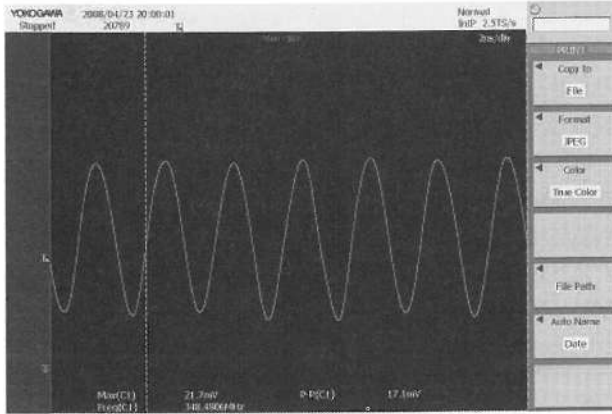


図 1

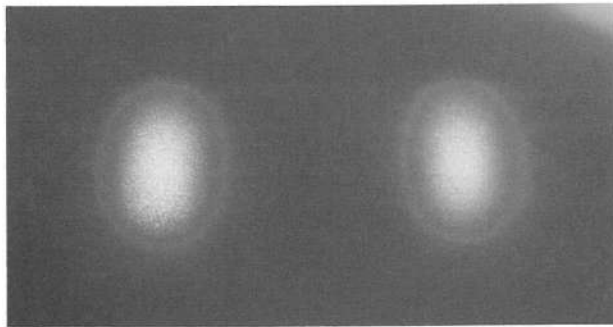


図 2

図3はこちらも当社レーザライン光源で重畳無しのALT-7100と図4は重畳ありのALT-7810をワークに照射しCCDカメラで撮った場合のデータである。こちらもレーザダイオード、光学系は同じであるがノイズが数分の1に低下している。

高周波重畳の特徴としては光学系に特別の工夫をしなくて良いことであり、コリメーション光源、ライン光源、リング光源に適用できる。

また同軸系で戻り光ノイズが問題になるセンサ系にも有効であるし、精密測定でモードホッピングノイズが問題になる場合にも有効である。

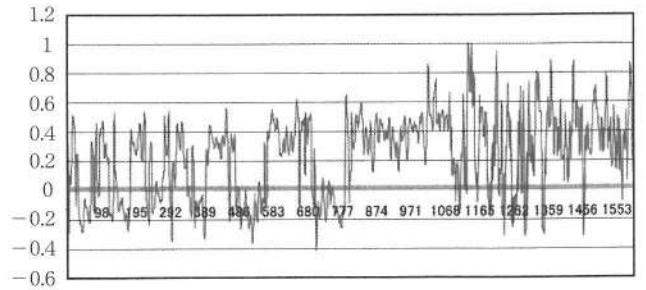


図 3

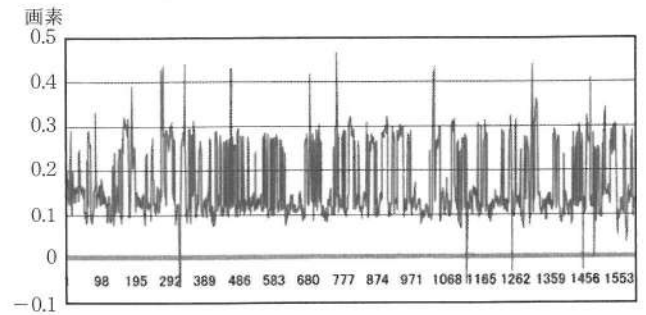


図 4

3. レーザライン光源の光学系

ライン光源に求められる特性としては

- ① 必要なワーキングディスタンスにおいて必要なライン長が確保されていること
- ② ライン長内でのパワー分布は均一又は受光レンズのディストーションを考慮した分布となっていること
- ③ ライン長内でのライン幅は一定のこと
- ④ レーザダイオードとの結合効率が良く高出力なラインが得られること
- ⑤ ワークに照射されるレーザビームが平行であること

があるが、それぞれがトレードオフの関係となる場合がある。

従来のライン光源の構成は図5⁽¹⁾のような構成でレーザの放射光をコリメータレンズで平行光とし、これにロッドレンズやシリンドリカルレンズを配置してアナモルフィックにライン長方向を拡大している。

この場合ライン長を長くしようとするとライン長方向の放射角を大きくするか、ワーキングディスタンスを長くする方向となる。

この時ライン幅方向ではワーキングディスタンスを長くするのはライン幅が広がる方向になってしまう。

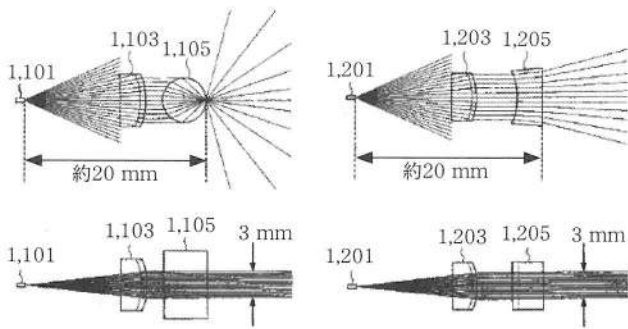


図5

また均一なパワー分布のラインを得ようとしてライン長方向の放射角を大きくすると、必要なライン長に対してのレーザパワーの割合が少なくなり、結果として大きなパワーのレーザダイオードが必要になってきたりする。

ワークに照射されるレーザビームは平行であれば光切断時に影がでらず、良好な画像を得ることができる。これらのテレセントリック光学系はライン長以上のレンズ口径が必要であるので短いライン長については対応可能であるが、ライン長が長くなるとコストの面で難しい場合が多い。

図5のような単一素子ではライン長方向の放射角はレンズの曲率と屈折率によるので、曲率が大きいロッドレンズでも硝材の屈折率を上げればさらに放射角を大きくすることができる。

また図6⁽²⁾のように複数レンズを組み合わせることによって200度以上の放射角度を得ることもできる。

ただこれらについては建築用のレーザ墨出器のように照射面が同じようなワーキングディスタンスを持っているものについては良いが、産業用の平面に投射するものについては像面湾曲によりライン幅が一定にできない。

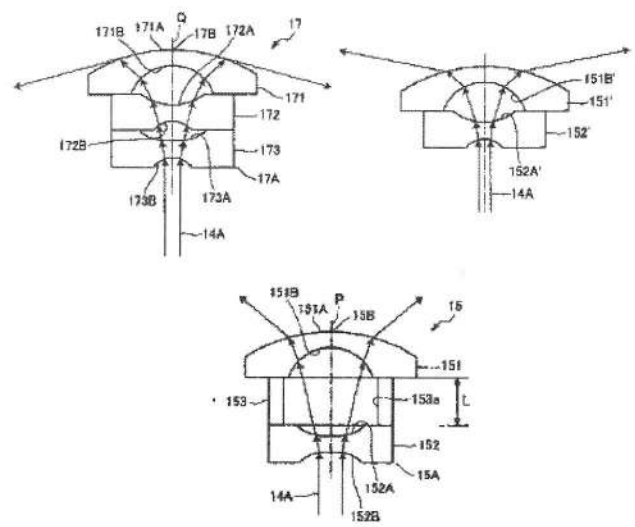


図6

図7⁽¹⁾は従来のライン光源を改善する提案でナルックス楕からガラス自由曲面レンズの構成で実現されている。

これは従来のレーザダイオードからコリメータレンズ+アナモルフィックレンズの構成でなく、自由曲面レンズ2枚の構成で必要なワーキングディスタンスにおいて均一なパワー分布、均一なライン幅とレーザダイオードからの高結合効率を提供している。

特に検査タクトの短縮や低反射ワークの対応から高出力のライン光源の要求は多いが、従来の光学構成ではレーザダイオードの結合効率は20～30%になることが多い、これに対してこの構成では80%程度が見込まれる。

また通常のCCD用レンズはディストーションにより周辺光量が低下して、照射面の照度が均一でも取り込んだ場合に画像周辺が暗くなる場合がある。

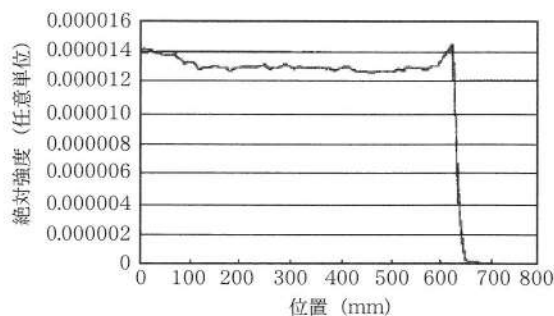
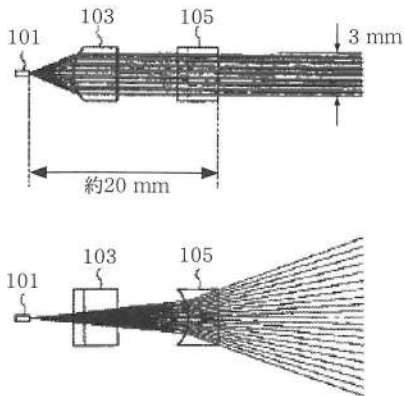
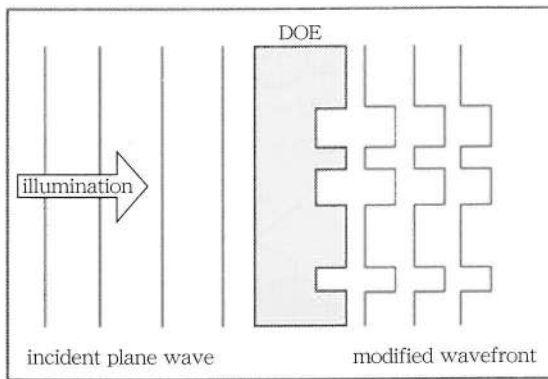
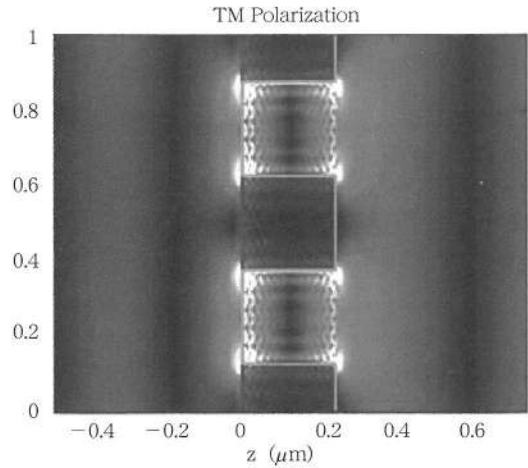


図7

波長オーダーの素子構造を持つ場合、スカラー解析理論では、正確に解析現象を解説できず、結論としてマクスウェルの方程式を解く手法＝厳密解析理論を用いる必要がある。



スカラー解析理論
偏光の定義なし
構造のエッジによる定義なし



厳密解析理論
FMM, RCWA, FDTDなど

図8

このレンズシステムではこのためにレンズにあわせて割合でレーザの分布をコントロールすることが可能である。

このレンズシステムのデメリットとしては全ての仕様が同一構成で出来ないことと、自由曲面ガラスレンズの製作に関してイニシャル費用がかかることである。

ただ従来民生用にしか使用できなかった非球面、自由球面が産業用に展開されてきたのは今後の発展が期待できる。

4. マルチライン光源用DOE

DOE (回折光学素子) は Diffractive Optical Elementの略で、 μm 以下の構造により光を干渉で制御する素子である。

その機能としては

- ① レンズ機能
- ② 分岐／合波機能
- ③ 光強度分布変換
- ④ 波長フィルタ機能

があり、ディスク用ピックアップレンズ⁽³⁾、デジタルムービー、LED照明などに用いられている。

これらの設計には従来の幾何光学的な光線追跡では対応できず、スカラー回折理論を用いる場合もあるがこれも構造が波長オーダーになると正確なシミュレーションができない場合がある。

これに対して厳密回折理論では光束を三次元のベク

トルと定義してマクスウェル方程式を解くことにより、DOE構造のエッジに対してのシミュレーションも可能になる (図8⁽⁴⁾)。

これらのシミュレーションソフトも市販されているものでVirtualabがある⁽⁵⁾。

設計には実際にどのような方法で製造するかを考慮しなければならないが、レーザ描画、Eビーム描画、機械加工などがあり、量産時にレプリカで製造する場合には転写マスター及び転写時の制限も設計に織り込む必要がある (図9⁽⁴⁾)。

DOE素子自体はベースの厚さはあるが表面素子であり、非常に薄く小型化できる。

また分岐素子でも繰返しパターンの中で分岐を行うので素子のアライメントも調整機構を必要としないメリットがある。

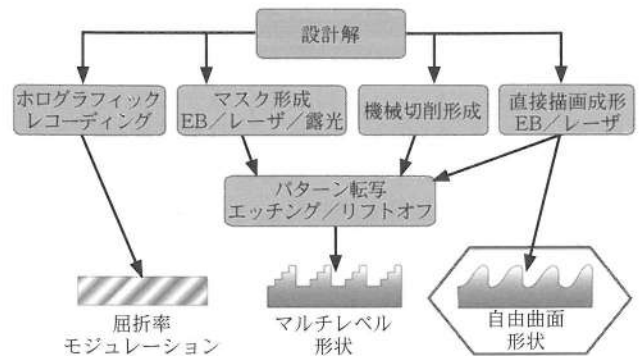


図9

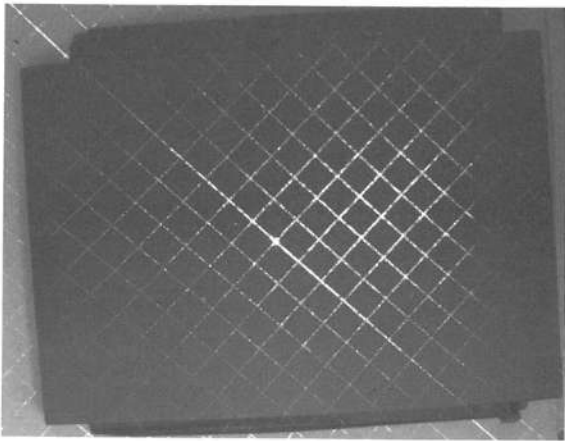


図10

実際に設計製造された例を図10に示すが、0次光の処理、ノイズの処理、湾曲補正など製造技術と設計との連携が必要である。

また同様に民生用のコリメータレンズでは非球面やレーザプリンタ用などでのトロイダル非球面やバーコードリーダーなどでの自由曲面、デジタルムービーなどでのDOEなど性能は良いがイニシャルコストで産業用の対応が難しかった。

今後どこまで少量多品種の産業用に対応できるか難しい面もあるが、仕様の共通化などである程度の数量が見込まれれば対応が出来るようになりつつある。今後の発展を期待したい。

＜参考文献＞

- (1) 公開特許情報：特開2010-278437
- (2) 公開特許情報：特開2006-317720
- (3) 回折光学素子入門：応用物理学会他、オプトロニクス社
- (4) (有)ウェーブオプト提供
- (5) ライトトランス社web：http://www.lighttrans.com/

5. おわりに

民生用のディスクのピックアップではノイズ低減で高周波重畳は従来から用いられてきたが、産業用では数量が少なく駆動デバイスの提供を含めてなかなか適用が難しかった。

【筆者紹介】

高野 裕

エーエルティー㈱ 代表取締役
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL：03-5946-7336 FAX：03-5946-7316

— 初歩と実用シリーズ —

ステンレス鋼の基礎と
上手な使い方

— ステンレス鋼の本質・製造・使用法 —

B5判・128頁・定価2,625円(税込) 著者 根本 力男

お求めは

日本工業出版(株) 販売課 netsale@nikko-pb.co.jp

フリーダイヤル ☎ 0120-974-250



レーザダイオードのスイッチング技術

エーエルティー(株) 菅原 義之

1. はじめに

半導体レーザーは20数年前迄は、かなり高価なものであり、ようやく波長も赤外域から可視光域(680 nm 近辺)が製造可能となり市場に出始めた頃だったと記憶している。しかし近年に至っては光ヒップアップ、レーザープリンタ、バーコードリーダを始め、様々な分野で数多く使用されるようになり価格もかなり安価になってきた。以前は日本国内の大手電気メーカーは競うように短波長レーザーの開発に取り組んできたものだったが、最近に至っては海外メーカーとの価格競争が激しくなり、特殊な仕様の物や付加価値のあるものを除いては撤退してしまったメーカーが多い。

その半導体レーザーはLEDと同じように制限抵抗のみで発光させることができない。半導体レーザー単品では温度変動による光出力の変動が大きいからだ。その為、光出力が一定となるようなドライブ回路が必要になってくるのだが、一般的に連続点灯や低周波でスイッチング点灯させる場合にはAPC (Automatic Power Control) 方式でドライブすれば光出力変動は抑えられる。高い周波数でスイッチングさせる場合はACC (Automatic Current Control) 方式でドライブしてレーザー自体をペルチエ素子などで一定温度となるように温調する方式を使う方法もある。

ここでは半導体レーザーが搭載されている比較的高速でスイッチングする必要のあるレーザーの駆動、レーザーの安全規格等について触れてみたいと思う。

2. レーザディスプレイ

最近小型のレーザーディスプレイが注目を集めている。近い将来ノートパソコンや携帯電話等の小型の携帯端末等に搭載されることが期待されている。レーザーディスプレイはRGB (RED, GREEN, BLUE) 3色のレーザー光と主走査方向(水平方向)と副走査方向(垂直方向)の二次元方向に光を走査することが可能な二次元MEMSスキャナ又は、一次元MEMSスキャナ2組で構成されている。レーザー光は主走査方向のスキャン周波数と副走査方向のスキャン周波数に同期させて変調する必要がある。

仮に画面解像度XGA (1,024×768)をMEMSスキャナで実現する時のレーザーの変調周波数を計算してみる。画像は左から右方向のスキャンのみ使用する前提で計算する。

- ① フレーム周波数(副走査方向): 60 Hzとした場合の水平方向の走査周波数(主走査方向)
 $768 \times 60 = 46.08 \text{ kHz}$
- ② MEMSスキャナが1走査に必要なとする時間は
 $1 \div 46080 \div 2 = 1.085 \times 10^{-5} \text{ 秒}$
- ③ 1走査の50%を画像有効エリアとした場合のレーザーの照射時間は
 $0.00001085 \div 2 = 5.425 \times 10^{-6} \text{ 秒}$
- ④ 1ピクセルに発光するレーザーの時間は
 $0.000005425 \div 1024 = 5.297 \times 10^{-9} \text{ 秒}$
- ⑤ これをレーザーの変調周波数に変換すると
 $1 \div (5.297 \times 10^{-9}) = 188.79 \text{ MHz}$

レーザーは188.79 MHzで変調できる能力がなければならない。

188 MHzという、通常のAPCではドライブが難しいのでサンプルホールドAPCという方式が使われることが多い。サンプルホールドAPCとはレーザーを発光していない時にピークパワーをサンプルして、発光時はAPCを一次的に停止させて高速でスイッチングする。また画像出力にはそれぞれのピクセルを輝度変調する必要があり、通常はウエイトを持った電流加算でレーザーパワーを制御する。6ビットの電流源で64階調が表現されるが、時間分割でパルス幅の制御と併用している場合もあり、変調周波数がさらに高くなるので注意が必要である。

3. 加工用・情報出力用高出力レーザーシステム

数10～200 W程度のハイパワーレーザーの発光となるとレーザードライバはACCの方式を採用する場合が多い。スイッチング周波数はAPC方式に比べて、比較的早く数MHzで変調も可能だ。ハイパワーレーザーはかなり発熱する為、レーザー自体を冷却する必要がある。その方法としてはペルチエ素子により冷却する方法やチラー（水冷）による冷却が一般的である。

このレーザードライバの特徴としては数100 nsオーダーで数10～100 A以上をスイッチングしなければいけなく、駆動周期も一定でないのでCW駆動にも対応していなくてはならないことである。

これには高速FETのドライブ回路が必要な他に、伝送にも配慮しないと所定の特性を得ることができない。

マイクロ波においてプリント基板上でマイクロストリップラインがよく使われている。片側がGNDパターンで誘電体（基板材料）を挟んで、ある程度距離をおいたところに信号パターンを配置する。信号ラインを最適な特性インピーダンスに合わせ込むには信号パターンの導体厚さや幅、それと誘電体の誘電率によって決めなければならない。この合わせこみにより、信号デレー等を抑えることができるが、ただ周波数が高くなってくると、信号ライン上表面の電界はエッジに集中して特性インピーダンスは高くなってくる。このマイクロストリップラインの特性は、高い周波数でレーザーダイオードをドライブしたい場合のスイッチングにも有効である。写真1はレーザードライバとレーザーの接続をDEI社純正のマイクロストリップラインで直接接続したものの。写真2はマイクロストリップラインとレーザーダイオードとの接続部を拡大したもの。

図1、図2は、写真1、写真2の接続条件において入力パルス1 μsec 及び、5 μsec でレーザーダイオードに

50 Aの電流を流したときの入力信号波形と電流モニタ波形だが、どちらの結果も電流立ち上がり時間は55 nsec程度で、立下り時間は550 nsec程度となった結果を示している⁽¹⁾。

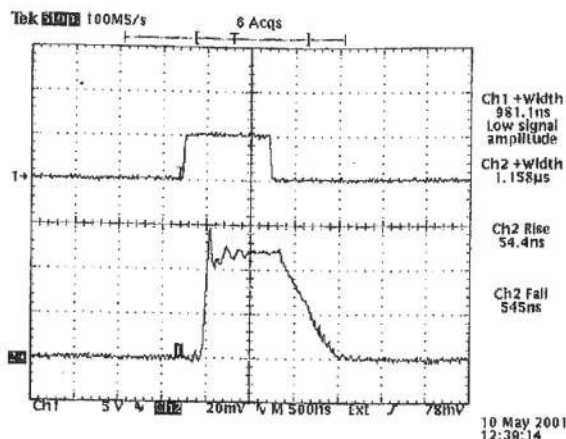


図 1⁽¹⁾

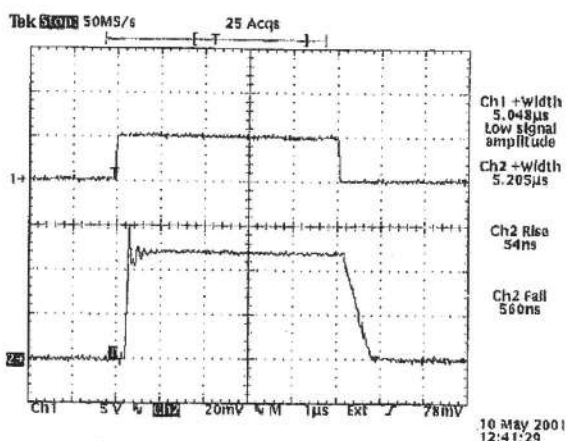


図 2⁽¹⁾

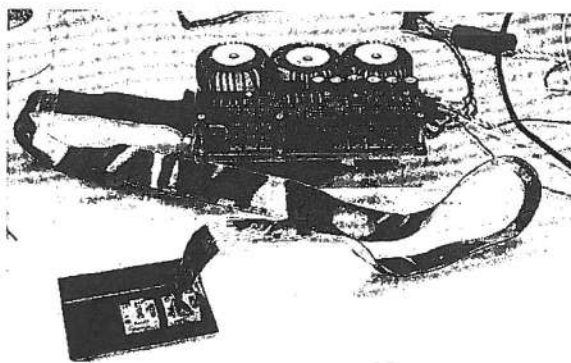


写真 1⁽¹⁾

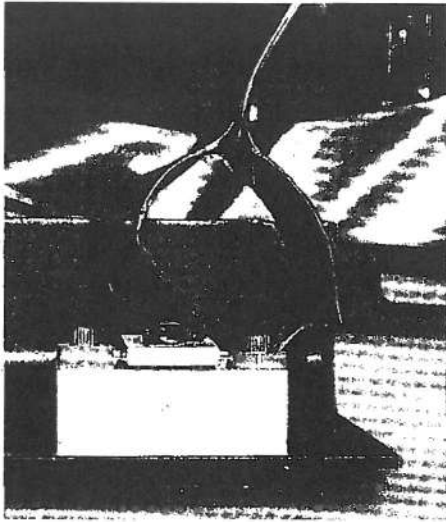


写真 2 (1)

写真 3 はレーザーダイオードに直接接続していたストリップラインを外してレーザーダイオードとの間に 6 インチ (15.24 mm) の電線を入れた接続にしている。マイクロストリップラインで直結したのと同様、1 μ sec 及び、5 μ sec でレーザーダイオードに 50 A の電流を流したときの入力信号波形と電流モニタ波形だが、どちらの結果も電流立ち上がり時間は 450 nsec 程度で、立下り時間は 4 μ sec 程度という結果となっている (図 3、図 4)。

両者の結果を比較するとマイクロストリップラインを使用したほうが電流モニタの立ち上がり、立下りとも 10 倍近く早いという結果となっている。マイクロストリップラインを使用したことにより信号伝達のロスが少なく、入力信号に近い電流をレーザーに供給できているという効果が充分確認できるものだ。

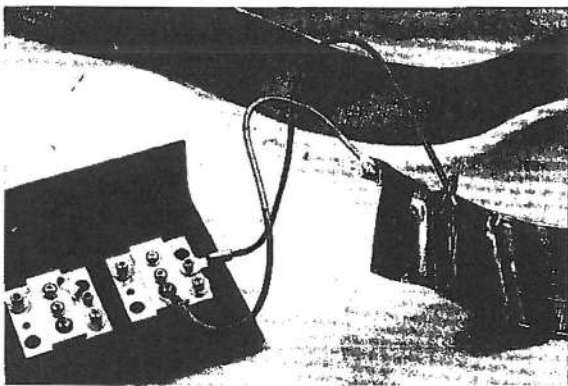


写真 3 (1)

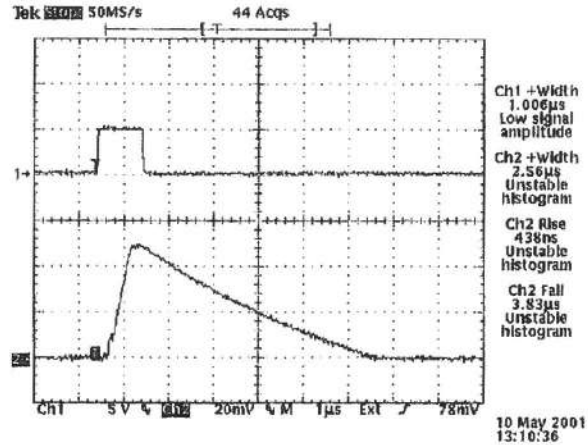


図 3 (1)

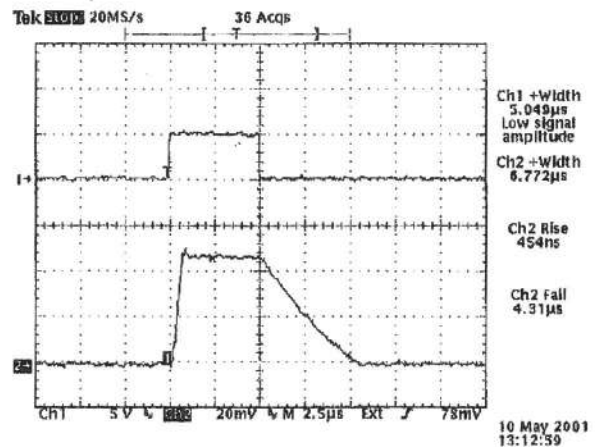


図 4 (1)

4. 干渉性の低減

レーザーダイオードの干渉性の低減は戻り光ノイズ対策として高周波重畳が CD や DVD などの光ディスクで採用されている 650 nm 近辺の半導体レーザーに使用されているのが代表的な使用例だ。そもそも半導体レーザーが普及され始めた初期の頃は、発振波長幅は狭いものの、中心波長の近辺に縦モードの発振波長が立っているマルチモード (又は、ゲインガイド) がほとんどだった。しかしながらマルチモードレーザーは、非点角差が大きいという特徴と消費電流が高く寿命が短いという欠点があった。これに対して、現在出回っている半導体レーザーの多くは発振波長が単一のシングルモード (又は、インデックスガイド) はマルチモードに比べて非点角差が小さい、消費電流が少ない、長寿命と

いう特徴がある。ただしシングルモードは干渉性が高く戻り光ノイズが大きいので光ディスクでは読取エラーが問題になる。光アイソレータで戻り光を低減することは出来るが、コンシューマー製品では高価な部品を使用することはできず、高周波重畳で干渉性を低減させている。

高周波重畳のドライブ方法はレーザードライブ回路に高周波重畳用の専用ICを組込むか、高周波重畳機能が内蔵されているレーザードライブ用ICを使うのが比較的簡単である。ところで、なぜ高周波重畳をかけるとスペckルノイズが減るのか。半導体レーザーは発光が安定するスレッシュ電流 (Ith) を超えた直後はすぐに単一波長で安定して発光しておらず、中心波長付近に他の波長が存在する。その安定していな状態を維持する為、高速でON/OFFしてLEDの発光に近い状態を作る為、高周波重畳のような方法を使っている。

高周波重畳の信号はレーザーとレーザーの駆動源の間に重畳信号を印加することで発振させる。APC回路でドライブした場合、回路の応答時定数は遅いので100 MHz以上である重畳周波数は早すぎてAPCの動作にはまったく影響しない。弊社ではこれまでに100~450 MHzの重畳周波数でオペレーション電流が100 mA迄のレーザーをドライブした実績がある。図5は405 nmの青色レーザーに高周波重畳をかけたものを発光させて、高圧電源とアバランシェフォトダイオードで構成されたディテクタユニットで受けた光出力波形。重畳周波数は350 MHzで重畳振幅はレーザーのピークパワーに対して50%程度のものである (図5)。

また干渉性が高いことはスペckルノイズにも現れる。

スペckルノイズはレーザーと反射表面での反射光が

干渉するもので、CCDカメラでの画像計測などでは悪影響を生じることがある。

特にバンプ計測のように細線のライン光源を用いて光切断法で計測する場合、スペckルノイズでCCDのピクセル単位で値が変動する場合があります、この場合にも高周波重畳は有効でデータの変動が1桁減った事例もある。

白のコピー用紙等に照射し、比べてみると肉眼でも違いを確認することが出来る。

重畳がかかっていないレーザーは照射された一番明るい付近を見ると照射した表面が非常にギラギラしている。それに対して、重畳がかかっているレーザーはギラギラしていない。画像だと少し分かりにくいかもしれないが、重畳ありと無しのレーザーを白紙に照射させたものを画像として記載しておく (左は重畳無し、右は重畳あり) (写真4)。

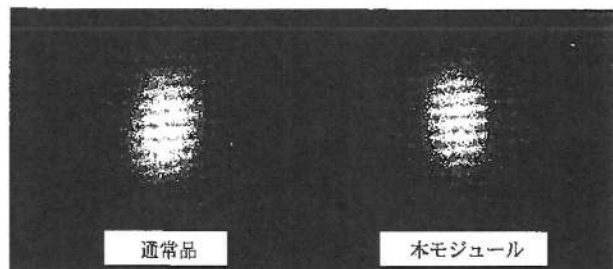


写真4 反射ビームの写真

5. パルスレーザーの駆動

LRF (レーザーレンジファインダ) はレーザービームによって距離を測定するシステムの総称である。変調したレーザーの位相差を検出する方法又は、パルスレーザーの受信までの時間差を検出する方法がある。最近ではパルスレーザーの時間差方式が多く用いられるようになり、レーザーをパルス発光させたタイミングから対象物の反射により戻って来た散乱光を受光素子で受け、その時間差を計測し光の速度から距離に換算する方法を用いる。光の速度はおおよそ1 nsecのズレ量を0.3 mで換算する。

レーザーは遠方での計測が可能のように単発的に高出力発光が可能パルスレーザーを使用する機会が多いが、このドライバーの特徴としてはパルス幅と繰返し周期で損失が決められていることである。通常は数10 nsパルス幅でデューティ0.1%ぐらいの設定となつて

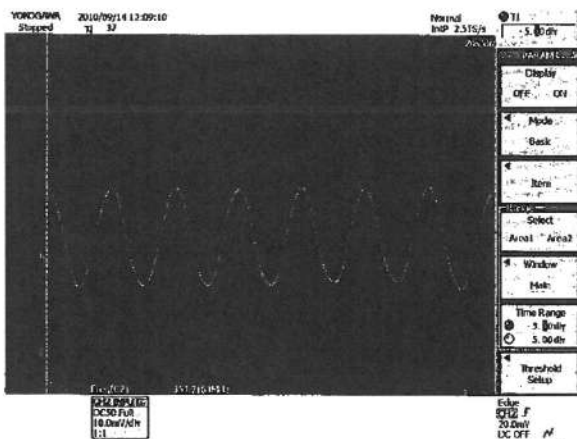


図5

いるのでQスイッチのようなチャージタイプのドライバを使用することもできる。

レーザーの発光については人体に照射されることを想定している場合が多い為、日本規格協会のJIS C6802で定められているクラス1に適合する要求が多い。基本的にクラス1は人体に照射されても安全なレーザーと位置付けられている。

クラス1のAEL（被ばく放出限界）は、下記で計算している①、②、③各(a)～(c)でエネルギー計算した値の中で最も厳しいものを適用しなければならない。仮の条件で計算してみる。

表1

中心波長 (λ)	905 nm
発光パルス時間 (t)	60 nsec
点灯周波数	1,000 Hz
放出持続時間 (T)	10秒
視角 (α)	1.4 mrad

計算の際に使用する補正係数は規格から下記が適用される⁽²⁾。

$$700 \sim 1,050 \text{ nm} : C_4 = 10^{0.002(\lambda - 700)} \rightarrow 2.57$$

$$400 \sim 10^6 \text{ nm} : C_5 = N^{-1/4} \rightarrow 0.1$$

$$400 \sim 1,400 \text{ nm} (\alpha_{\min} < 1.5 \text{ mrad}) : C_6 = 1$$

$$700 \sim 1,050 \text{ nm} : C_7 = 1$$

＜AEL（被ばく放出限界）の計算＞

(1) 単一パルスに対するAEL

波長：700～1,050 nm、露光時間：1～100nsの条件下においては下記の式が適用される。計算式

$$2 \times 10^{-7} \times C_4 \times C_6 \text{ (J)}$$

$$2 \times 10^{-7} \times 2.57 \times 1 = 5.14 \times 10^{-7} \text{ (J)}$$

これを光出力に換算すると

$$5.14 \times 10^{-7} \div (6 \times 10^{-8}) = 8.566 \text{ (W)}$$

…単一パルスの最大出力

この平均光出力は

$$8.566 \times (6 \times 10^{-8} \div 10^{-3}) = 0.0005139 \text{ (W)}$$

…平均光出力

(2) 放出持続時間Tに対するAEL

波長：700～1,050 nm、露光時間：0.35～10 secの条件下においては下記の式が適用される。計算式

$$7 \times 10^{-4} \times T^{0.75} \times C_4 \times C_6 \text{ (J)}$$

$$7 \times 10^{-4} \times 10^{0.75} \times 2.57 \times 1 = 0.01011 \text{ (J)}$$

これを光出力に換算すると

$$0.01011 \div 10 = 0.001011 \text{ (W)}$$

…平均光出力

この単一パルス出力は

$$0.001011 \times (10^{-3} \div (6 \times 10^{-8})) = 16.85 \text{ (W)}$$

…単一パルスの最大出力

(3) 単一パルスに対するAELに補正係数C5を乗じた値

$$\text{計算式} : AEL_{\text{train}} = AEL_{\text{single}} \times C_5 \text{ (J)}$$

$$AEL_{\text{train}} = 5.14 \times 10^{-7} \times 0.1 = 5.14 \times 10^{-8} \text{ 以下であること}$$

これを光出力に換算すると

$$5.14 \times 10^{-8} \div (6 \times 10^{-8}) = 0.8566 \text{ (W)}$$

…平均光出力

この単一パルス出力は

$$0.8566 \times (10^{-3} \div (6 \times 10^{-8})) = 14276.6 \text{ (W)}$$

…単一パルスの最大出力

(1)～(3)の計算結果から(1)の条件が一番厳しい。

よって(1)の結果を適用しなければならない。

8.566 (W) …単一パルスの最大出力

0.0005139 (W) …平均光出力

クラス1に適合させる為にはレーザーの最大パワーを

8.566 mW以下に抑えなければならないが、これらの計算や規格はIECの変更によりJISも改定されるので最新版で確認する必要がある。

6. おわりに

半導体レーザーは価格が安価になったままでこそ色々なアプリケーションにおいて採用されるようになった。その中でも最近、MEMSスキャナとの組み合わせによるスキャンシステムが普及し始めた。レーザーディスプレイ、測距システム、レーザープリンタは代表的なものだが、これまではレーザースキャンと言えばポリゴンスキャナやガルパノとの組み合わせが多かった。磨耗が無く製品寿命の長いMEMSへ移行していくのは当然の流れだと思う。これから本格的に普及していこう。また、今後別のアプリケーションへの展開にも期待したいと思う。

＜参考文献＞

(1) Directed Energy, Inc. (An IXYS Company, IXYS Colorado)

日本総代理店：ゼネラル物産㈱

(2) JIS C6802 2005年版

【筆者紹介】

菅原義之

イーエルティー㈱ 開発部 電気設計グループ

〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10

TEL：03-5946-7336 FAX：03-5946-7316

高出力レーザシステム

=小型化へのアプローチ=

エーエルティー(株) 河村 達也

1. はじめに

近年、数10~100 W程度の高出力半導体レーザモジュールが比較的安価にかつ手軽に取り扱えるようになってきたことから、マーキング、樹脂溶着、金属微小部分の焼入れなど様々な用途に使用されている。また従来、室内で使用されていたこれらの装置をフィールドで使用する場面も増えてきており目的や場所に合わせた形状、小型軽量化が望まれている。本稿では高出力レーザシステムを構成する機器の特徴及び小型化について述べる。

2. 高出力半導体レーザ

このクラスの高出力半導体レーザモジュールでは複数のエミッターが搭載されており、エミッター各々にマイクロオプティクス (SAC, FAC) を備え1本のファイバに結合されるファイバカップリング型と複数のエミッターを出射平面に1ラインで並べられたアレイ型がある。更に高出力が必要な用途にはアレイを10段以上積重ね数kWの出力が得られるスタック型もある。波長及び構成により若干異なるが双方共に電気-光変換効率が50%前後の高効率なものとなっている。

2-1 ファイバカップリング型

対象物にレーザを照射する際には所定のエネルギー密度にする必要があるが、その時の重要な特性として光出力は勿論であるがファイバのコア径とNAがある。

900 nm帯で比較すれば従来、光出力100 Wタイプのものでファイバコア径400 μm 、NA0.16程度であったものが現在では同等の光出力で105 μm 、NA0.15⁽¹⁾ (>20

MW/cm²sr) という高密度、低NAタイプの半導体レーザも実現されており光学系の小型化に大きく寄与している。仮に作動距離200 mmにおける必要なビーム径が400 μm であるとき具体的に数値を当てはめてみると、前者は ϕ 64 mm程度の光束を透過させる事のできる光学系が必要となるが、後者は ϕ 15程度の光束となり格段に光学系の小型化が可能である事が分かる。

また、ファイバカップリング型は照射ヘッドと半導体レーザ+冷却系を分離する事ができるためレイアウトの自由度が大きい。メンテナンス性においてもファイバコネクタにより光学系の再調整無しで半導体レーザの交換が可能である事も大きなメリットとなっている。

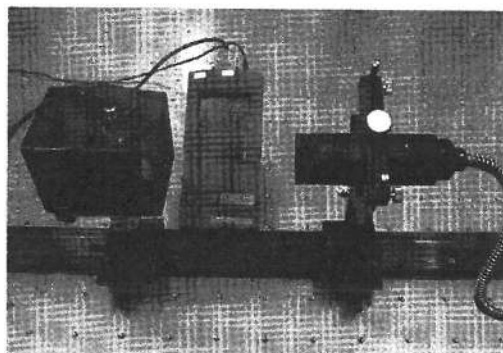


写真1 100 Wレーザ照射ヘッド (エーエルティー社)

2-2 アレイ型

アレイ型では1~2 Wのエミッターを数10個、1ラインに並べた構造となっており、発光部全長が10 mm程度と長く、ファイバタイプのようにスポット状に集光させる用途には不向きである。

また、半導体レーザー+冷却系と光学系を分離する事ができないため、状況に合わせた形状の最適化が難しい場合もある。

しかしながらこれらの複数のエミッターを1つの光源として見立てた光学系の場合、作動距離を長くはとれないが照射形状はファイバタイプでは得られない高輝度のライン(図1)となり、更に長手方向をスキャンすれば一度に広範囲を照射する事ができるため都合がよい場合もある。

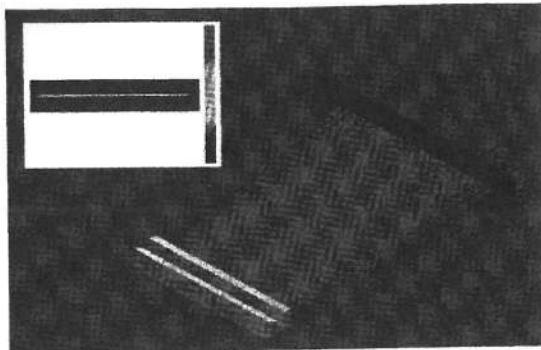


図1 アレイ型半導体レーザー照射光学系

3. ドライブ回路

半導体レーザーは温度コントロールされるので、定電流制御(ACC)のレーザードライブ回路を使用する。

動作電流が大きければ半導体レーザーに直列に挿入される素子の順方向電圧降下に留意しなくてはならず、ドライブ素子の選択も不利であるが、その点ファイバタイプは複数のエミッターがカスケード接続されており、順方向電圧は高いものの動作電流は比較的低い電流で高出力のレーザーパワーが得られるため有利である。50 Wクラスではファイバタイプが動作電圧17 Vで動作電流5.8 Aであるが、同じクラスのオープンヒートシンクでは動作電圧2 Vに対して動作電流は59 Aに達する。

近年加工用途や情報出力装置で半導体レーザーを連続点灯(CW)だけでなく、パルス点灯や任意にスイッチングする使用方法も増えているが、この場合にも電流の低いことは有利となる。

またドライブ回路も熱損失が発生するので後述のペルチェ素子の冷却と同様に放熱の考慮が必要である。

4. 冷却系

4-1 半導体レーザー冷却の現状

半導体レーザーを冷却する際には、適切な温度コントロールを行うためにペルチェ素子を利用することが多いが、吸熱面から奪った熱だけでなく、ペルチェ素子自身で発生するジュール熱もあるため、放熱面から多大な熱を放出する。

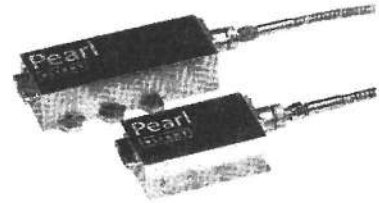


写真2 半導体レーザーの例 (nLIGHT社)⁽²⁾

例えば効率50%で50 W出力の半導体レーザーは50 Wを熱として放出するが、これを冷却するためのペルチェ素子のジュール熱は200 W以上となる場合があり、合計で250 Wを越える冷却が必要となる。半導体レーザーの温度制御を効率よく行うためには、ペルチェ素子の放熱面の温度をなるべく低くする必要がある。吸熱面と放熱面の温度差が大きいほど吸熱できる熱量が減るためである。

また、先の例では250 Wの放熱をする必要があるが、これを空冷で行う場合は相当な大きさのヒートシンクと、十分な風量を確保するだけのファンが必要になる。

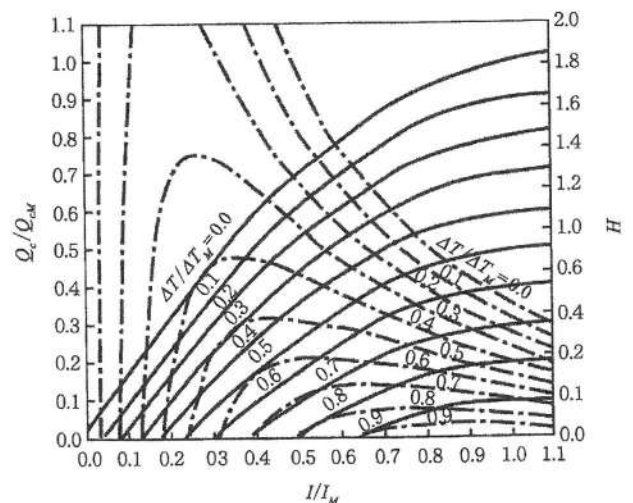


図2 ペルチェ素子の特性図⁽³⁾

ΔT_M : 最大温度差、 I_M : 最大電流、 Q_M : 最大吸熱量
温度差が大きいほど同じ電流で冷却できる吸熱量が減る

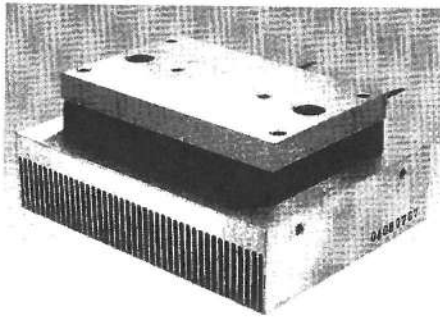


写真3 ペルチェ素子を組み込んだ冷却ユニットの例
(フジタ製 FEC-1175NP)⁴⁾

中央の黒い部分にペルチェ素子が組み込まれている。上が冷却ステージ、下が放熱ヒートシンク。

また、ヒートシンクの大きさが十分であっても、半導体レーザー素子の大きさやペルチェ素子の面積は限られているため、ヒートシンクの大きさを生かし切れない可能性がある。したがってペルチェ素子の選定はもちろん、放熱面をいかに冷却するかが重要になってくる。これらを考慮すると250 Wの出力のあるペルチェ素子の放熱面を、外気温が25℃のときに50℃程度に冷却するためには、幅200 mm奥行き180 mm高さ80 mm程度のヒートシンクと、80 mm角32 mm厚のファンが2個必要になる見込みである。この時の占有体積は $2,880 \text{ cm}^3 + 409.6 \text{ cm}^3 = 3,289.6 \text{ cm}^3$ となる。

4-2 冷却部の小型化

半導体レーザー素子やペルチェ素子の冷却方法として、フィンのあるヒートシンクを密着させ、直接外気中に熱を放出させる空冷方式と、金属ブロック内部に流路があり、冷却液を循環させたヒートシンクを密着させ、一旦冷却液に熱を伝えた後にその熱を別な場所で外気中に放出させる液冷方式がある。どちらの場合も熱の最終処分場が外気であることに変わりはないが、途中の経路が異なる。各冷却方式で冷却対象である素子の温度を決定する要因として下記が挙げられる

空冷: 外気温、ヒートシンクの形状、風量・風速、各部の熱抵抗など

液冷: 外気温、冷却液の流量、外気への熱放出部の特性、各部の熱抵抗など

空冷の場合はコントロールできるパラメータが限られているため、冷却対象である半導体レーザー素子の温度は外気温による影響を大きく受ける。液冷の場合は一旦冷却液に熱を伝えて別な場所へ移送して熱を処理できるため、コントロールできるパラメータが増え、温度のコントロールがやりやすくなる。半導体レーザー素子近辺のスペースが限られている場合も、装置の中で比較的スペースに余裕がある場所へ熱を移送して、そこで外気中へ熱

交換するといったことが可能になる。ただし、空冷で用意する必要があるのがヒートシンクとファン程度であるのに対し、液冷の場合はそれらに加え流路やポンプ、熱交換部などの部材が必要になる。単純に考えると必要な部材が多い分、液冷の方がスペースが多く必要になるが、冷却に必要な熱量がある程度大きくなってくると空冷では大型のヒートシンクが必要となり、しかも冷却対象である素子の直近に配置しなければならないので、設計に大きな制約となってくる。

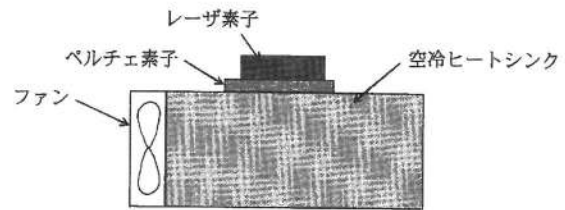


図3 空冷システムの場合の構成部品

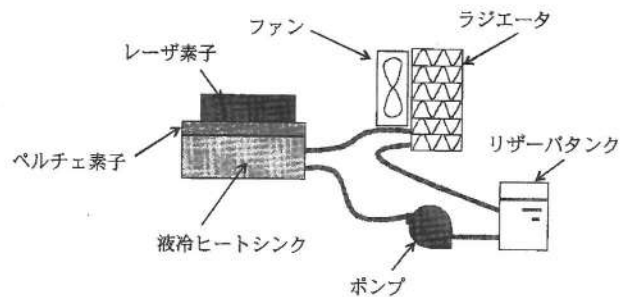


図4 液冷システムの場合の構成部品

250 W程度の冷却で液冷を用いた場合、受熱部（ヒートシンク）は厚み10 mm程度の金属プレート内部に流路を形成したもので、面積はペルチェ素子とほぼ同じで良い。放熱部は150 mm角で厚み30 mm程度のリザーバタンク付きラジエータに120 mm角で25 mm厚のファンを取り付け、冷却液の流量が1.5 L/min程度確保できるポンプ（62 mm角32 mm厚）の組み合わせで冷却水の温度は室温プラス20℃程度に落ち着く。

従って外気温が25℃の時にペルチェ素子の放熱面温度を50℃以下にすることが可能となる。この場合で占有体積は $32 \text{ cm}^3 + 675 \text{ cm}^3 + 360 \text{ cm}^3 + 123 \text{ cm}^3 = 1,190 \text{ cm}^3$ となる。このほかに配管スペースや空気の流れを確保するためのスペースを考慮する必要があるが、空冷に必要なスペースと比較すると大幅な小型化ができる見込みがある。また、放熱部の形状が受熱部の影響をほとんど受けないので、大きさや設置する場所の最適化が可能となり、ファンの選択肢が広がり静音化も可能となる。

ただし水漏れが発生した場合は致命的な損傷となる場合があったり、装置の複雑化によるメンテナンス性の悪化やコストアップなどのデメリットがあるため液冷を採用するには慎重な検討が必要となる。

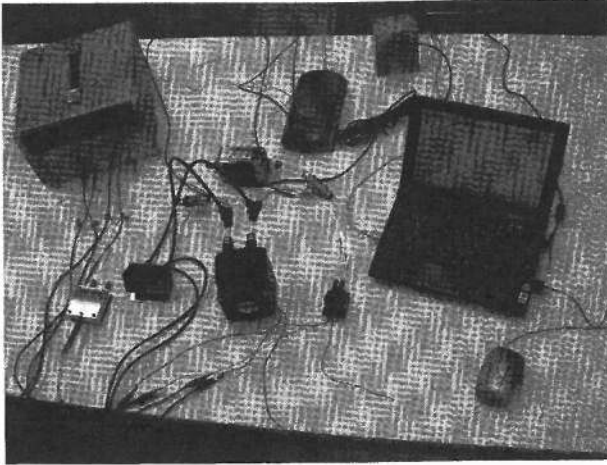


写真4 液冷システムの評価

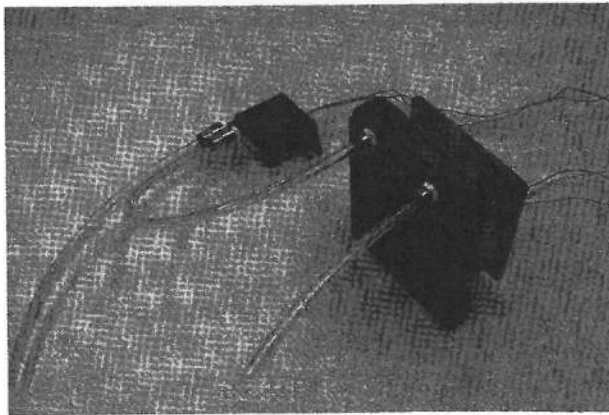
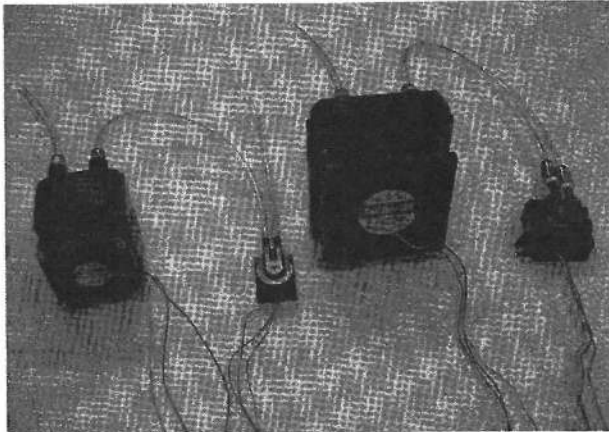


写真5 ファン、ラジエータ、ポンプの組合せ例

5. おわりに

高出力半導体レーザーシステムを構成する機器の特徴及び小型化について述べた。

今後、更なる各デバイスの進化により様々な用途に使用が広がっていく事が考えられる。それに伴い使用場所での安全性の確保やオペレーターの教育についても十分な留意が必要である。

謝辞

冷却系の実験においてご協力頂いたキーナスデザイン株式会社・橘氏に謝意を表します。

〈参考文献〉

- (1) Scott R. Karlson, R. Kirk Price, Mitch Reynolds, Aaron Brown, Ron Mehl, Steve Patterson, Robert J. Martinsen: "100 W, 105 μm , 0.15NA Fiber Coupled Laser Diode Module", Proc SPIE 7198-29 (2009)
- (2) <http://www.nlight.net/diodes/details/53~Pearl-SolidState-Laser-Pump-Series>
- (3) 熱設計技術・解析ハンドブック：石塚勝監修、三松株、p.606
- (4) <http://www.fujitaka.com/peltier/products/products3.html>

【筆者紹介】

河村達也

エーエルティー株 開発部

〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10

TEL: 03-5946-7336 FAX: 03-5946-7316

小型内面形状測定装置の開発

Development of a compact inner profile measuring instrument

若山俊隆, 高野裕*, 吉澤徹
T. Wakayama, H. Takano*, T. Yoshizawa

埼玉医科大学, エーエルティ株式会社*
Saitama Medical University, ALT INC.*

1. 緒論

内面形状測定は自動車用の各種部品をはじめとして、パイプや配管に関して、欠陥検査とともに強い要望がある。最近の例では、ガス管の老朽化に伴う破損事故が社会問題として取上げられた¹⁾。この老朽化したガス管は全国に約3万8千キロにわたって埋没されており、各種パイプの検査は急務となっている。内面形状測定の要望は工業分野にとどまらず、医・歯学では咽喉内、胃内部また口腔内の測定など多くある。これまでに、物体の内面を機械的に接触して測定する方法やエアゲージの応用、あるいはファイバースコープを用いて観察する検査方法が提案され²⁾、その他にいくつかの光学的な手法も発表されている³⁻⁶⁾。しかしながら、これらの方法は欠陥検査や小径測定が中心であり、一般的に内面形状の測定を可能とする方法とは言い難かった。

このような背景から我々は光学的な手段により非接触で物体内面の形状を測定することを目的としてリングビーム素子を用いた手法を開発した^{7,8)}。これは円錐ミラーと半導体レーザーで構成されたデバイスであり、これにより円盤状の光のシートを物体の内面に照射し、物体内面の光セクションングを可能とした。そして、CCDカメラと一体化させた小型内面形状測定装置を開発したので報告する。

2. 内面形状測定の原理

図1に内面形状測定装置の原理を示す。1は円盤状の光のシートを生成する光源部であり、2は光源からのシート光を捉えるためのカメラである。この円盤状シート光は測定対象物体の内面3に光セクションングによる断面像を形成する。この光セクションングされた面をカメラで捉えれば、内面上の点A, Bなどの座標を下記により算出することができる。

まず、光源部1から照射される光がその軸に直角である場合、物体内面の点Aにシート光が照射される。その点Aをカメラ2により捉えれば、そのときに見込まれる角度 ϕ が得られる。これによりカメラ2と光源1の間の設定距離を l とすれば、図1の距離 $QA=r$ が算出できる。ここで光源部の基準位置をP、カメラの基準位置をCで表し、カメラと光源部の軸間距離は Δz だけ離れているとする。また、光学系の調整が厳密でない場合を考える。このとき出射する光は光軸に直角でなく θ の角度で出射し、光は点Aではなく、点Bに到達する。図1に示したように点Aではなく、点Aから Δr かつ Δl だけ離れた点Bを測定することになり、図1から

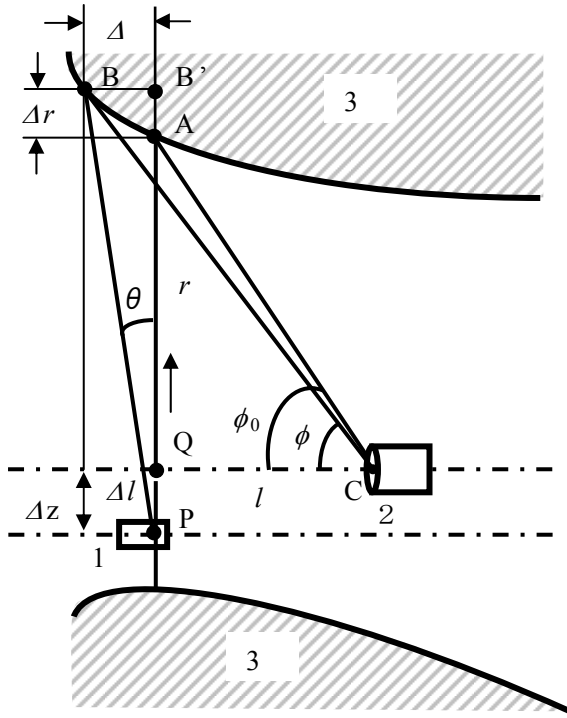


図1 内面形状測定 の原理

$$\tan \theta = \frac{\Delta l}{r + \Delta r + \Delta z} \quad (1)$$

$$\tan \phi = \frac{r + \Delta r}{l + \Delta l} \quad (2)$$

が得られる．ここで ϕ は点 B をカメラから見込む角度であり， $\angle APB = \theta$ ， $QC = l$ や $PQ = \Delta z$ は設定値として既知である．カメラ軸から点 B の距離 $r + \Delta r$ は式(1)と式(2)から，

$$r + \Delta r = \frac{\tan \phi [l + \Delta z \tan \theta]}{1 - \tan \theta \tan \phi} \quad (3)$$

となる．一方，図1から容易に判るように，

$$r = l \tan \phi_0 \quad (4)$$

の関係があるので，式(3)と式(1)から Δr と Δl は，

$$\Delta r = \frac{\tan \phi (l + \Delta z \tan \theta)}{1 - \tan \theta \tan \phi} - l \tan \phi_0 \quad (5)$$

$$\Delta l = (r + \Delta r + \Delta z) \tan \theta \quad (6)$$

となる．これは式(3)から判るように， $\theta = 0$ であれば，式(4)になる．ここで， θ をできる限り小さくできれば，式(5)と(6)は

$$\Delta r = \theta \tan \phi_0 \left[\frac{\Delta z + l \tan \phi_0}{1 - \theta \tan \phi_0} \right] \quad (7)$$

$$\Delta l = (r + \Delta r + \Delta z) \theta \quad (8)$$

として近似できる．もちろん，ビームが光軸に直角に出射するようになれば，式(7)と(8)において $\theta = 0$ となるので， $\Delta r = \Delta l = 0$ となり，正確な内径 r が測定できる．以上より，実際的な応用のためには θ をできるだけ微小として， Δr や Δl を生じさせないことが重要である．

さらに，カメラの光軸と光源部光軸との軸間距離 Δz も小さくするような配置を行えば，内径が小さい場合でも測定装置を挿入しやすくなり，かつ，光源部によって光セクションされた面がケラレることを防止できる．これは Δz が小さい場合に相当し，さらに光源部の出射光の誤差 θ も小さくできれば，式(4)によって点 A までの距離，すなわち内径や内面形状を知ることができることを意味している．

3. 小型内面形状測定装置

図 2(a)に試作した小型内面測定装置を示す。これは半導体レーザ（波長 655nm）と直径 8mm の円錐ミラーそして、小型 CCD カメラで構成されている。装置の寸法は図 2(b)に示したように直径 18mm，全長は 170mm である。半導体レーザ，円錐ミラー，そして CCD カメラはガラス製のパイプによって連結されている。カメラの画角は 83°であり，測定のダイナミックレンジは $\phi 120\text{mm}$ である。

本装置の有効性を調べるために，リングゲージ（ミットヨ製： $\phi 50$ ）を使用して精度検定を行った。リングゲージ内に本装置を挿入し，光セクションした様子を図 3 に示す。リングビームによってリングゲージ内面を光セクションしている。内面測定では得られた画像を x 軸および y 軸でスキャンして光強度の最大画素位置を求めた。ここでは測定によって得られたリングの半径とリングゲージの公称値の半径から差を求め，その標準偏差を装置の測定精度とした。本方法で得られた結果は半径 $R=24.8\pm 0.57\text{ mm}$ となり，メーカー公称値の半径 25mm と良く一致した結果が得られた。この結果は装置のダイナミックレンジが 120mm と大口径のサンプルに対応していることを考えて，その性能は誤差をダイナミックレンジで除算した相対精度の概念で捉えることとすれば，約 0.005 となった。

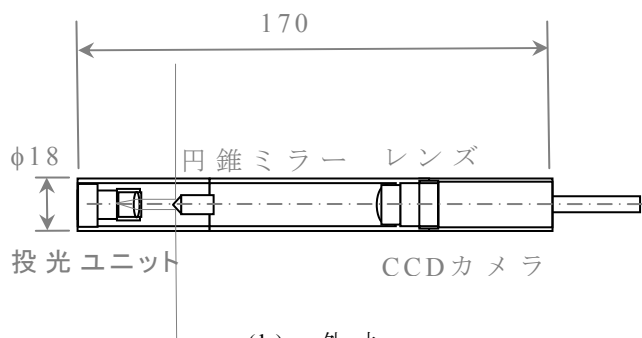
4. 内面形状測定の応用実験

応用実験としてパイプの内面形状測定を行った。このパイプは 2 つのガスを混合させるために，特徴ある形状になっている。これは突合せ溶接によって接合されているが，ハイドロフォーミング加工による一体成形が望まれている。

図 4 に光セクション画像を解析したパイプの形状測定結果を示す。パイプの上下部分におけるわずかな変化はパイプの溶接痕である。内面測定装置を 2mm ずつ動かしながら画像を取得し，パイプの内面形状を復元した結果を図 5 に示す。



(a) 装置外観



(b) 外寸

図 2 試作小型測定装置

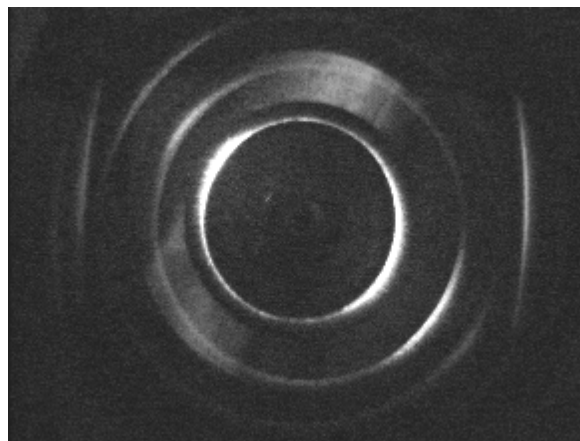


図 3 光セクションの様子

図 3 光セクションの様子

図 5(a)と(b)は 3次元像を異なる角度(30°と 190°方向)から見た結果である。ノイズが多少残るが、パイプの内面の様子が良く解り、センサー用の穴位置が確認できる。さらに、溶接部をはっきりと映し出している。以上の実験から本計測法および装置が各種部品の内面形状測定に有効なことが示された。

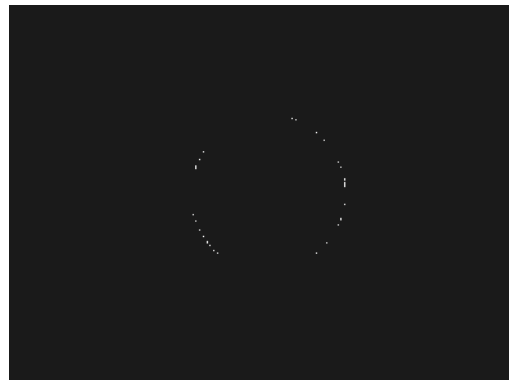


図 4 断面形状解析結果の例

5. 結論

リングビームデバイスを用いた小型内面形状測定装置の開発を行った。さらに小型な装置を目指して、外径が数ミリの試作品が製作されつつある。

長岡技術科学大学における研究報告に関して同学・吉田昌弘氏のご好意に感謝する。

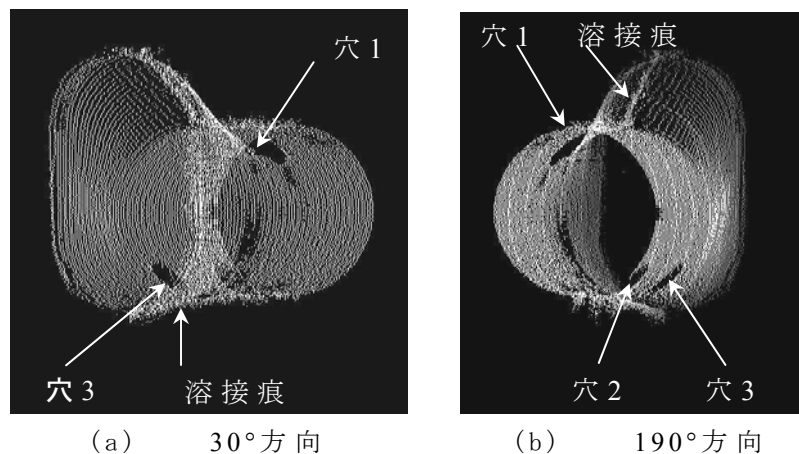


図 5 自動車部品の内面形状測定結果

参考文献

1. 朝日新聞,43382号,1,2007年1月20日
2. 高尾,河野,佐野,中山:微小円筒形状測定技術と装置の開発,山梨県工業技術センター研究報告(1999)
<http://www.yitc.go.jp/Houkoku/data2/H11/takao.pdf>
3. 田中:光切断法による細管内面の損傷計測(第3報,損傷寸法計測プログラムの開発),広島市工業技術センター研究報告(2001).<http://www.yitc.go.jp/Houkoku/data2/H11>
4. 沖田,小野,佐藤:パターン投影像の画像処理による動圧軸受けなどの内径測定機の開発,光計測シンポジウム2006論文集,57-60(2006).
5. 秋山,小林,エカリット,吉田,桑原:小径穴内面形状計測装置の開発,精密工学会誌,vol.68,7,967-970(2002).
6. エカリット:スポット光投影方式小径穴内径および内面形状の計測に関する研究,博士論文(2003年),長岡技術科学大学.
7. T.Yoshizawa, M.Yamamoto, T.Wakayama: Inner profile measurement of pipes and holes using a ring beam device, Proc. of SPIE Vol.6382, 63820D-1~6(2006).
8. 吉澤徹:特願2006-113713.

レーザライン光源の応用

＝レーザダイオードを使用したライン光源の原理と応用＝

エーエルティー(株) 高野 裕

1. はじめに

レーザライン光源はレーザ光をライン状に放射するように設計された光源であり、シート光源と呼ばれる場合もある。用途としては光の直線性を利用してレーザのケガキを行い、目視で位置決めしたり、CCDカメラで3次元計測などに利用されている。また、レーザの透過光量を測定することにより、変位測定や数量測定に用いられることもある。

光によるケガキは歴史が古く、ランプの時代から行われていたが、1960年代にHeNeレーザができると簡単なアナモルフィックのレンズ系を付けた赤のライン光源が商品化され、石材、木材の切断用のガイドとして用いられるようになった。1970年代には医療用、バーコードなどに応用が広がり、1980年代後半には建築用のレーザ墨出し器が商品化されたが、大きなレーザチューブを抱いて現在とはかけ離れた製品であった。1990年代になって可視光の半導体レーザが開発されると、省電力、小型、安価から応用が広がるようになった。現在の製品例を写真1に示す。

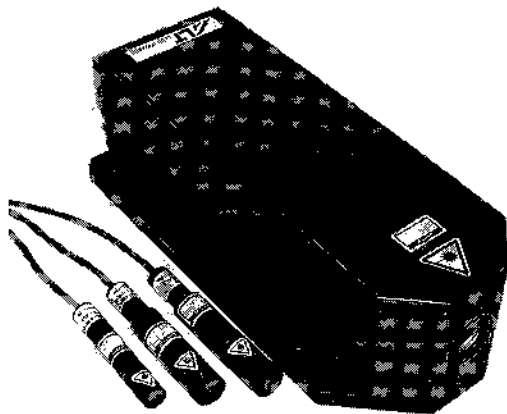


写真1

2. ライン光源の種類と原理

2-1 パラメータ

ライン光源の光学構成は使用方法により異なるので、用語の説明を行う。

- ライン長：ラインの長さ。最大パワーの50%または13.5%強度の長さ
- 広がり角：ラインが広がる角度（定義は上記と同じ）
- ライン幅：ラインの幅（定義は上記と同じ）
- 強度分布：ライン長内でのパワーのばらつき（測定アパーチャの定義が必要）
- ラインの曲がり（ポー）：ラインの曲がり。ライン長の両端と中央で評価
- ラインの傾き（スキュー）：ラインの傾き。基準位置に対しライン両端の座標で評価
- 深度：ラインがビームウエストの場合には前後でライン幅が太るので、位置に対してライン幅で規定

2-2 拡散タイプ

最も簡単な構成で墨出し器にも用いられているのが当社ALT-7100に用いられている構成で（図1）、半導体レーザの後にコリメータレンズを配置しその後にシリンダレンズやロッドレンズなどのアナモルフィック光学系を置く構成である。広がり角では100°以上が可能であるが、ラインの分布はレーザの放射を広げただけなのでガウス分布をしていて均一にはならない。

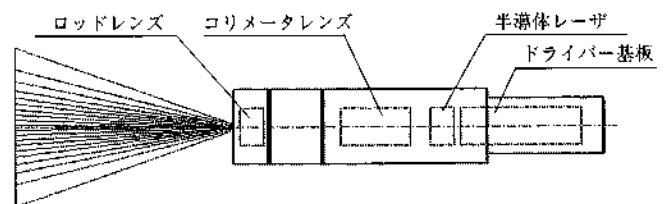


図1

2-3 テレセントリック、デガウスタイプ

CCDカメラでの画像計測ではラインの光強度分布はフラットな分布またはカメラレンズのディストーションを考慮して周辺がやや高い分布が望ましい。

通常のレーザーの発光分布ではガウス分布と呼ばれる、中央から徐々に周辺に対して強度が低下していく分布となっている。この分布を変える方法として、デガウス、ホモジナイザーと呼ばれる光学系や素子を用いてビームの分布を変える方法や複数の光源を重ね合わせて分布を均一にする方法がある。デガウスの方法としてはフォーカス面で光学的に均一分布とする設計や専用のプリズムを用いる方法があるが、近年はDOEと呼ばれる干渉型光学素子で自由度の高い設計もできるようになった。

また、光切断法ではレーザーの光束が平行でない画像に影ができて計測できない場所ができるため、テレセントリックと呼ばれる平行光のレーザー光源の方が高精度である。

2-4 微細ラインタイプ

被測定物が数 $10\mu\text{m}$ になってくるとライン幅の微細化が要求される。ただライン幅が1桁になるとライン幅分布の裾にサイドロープと呼ばれるピークが発生して画像に悪影響を与えることがある。現在 $3\mu\text{m}$ 近くまで実用化しているが使用部材の加工精度、組立調整精度に考慮が必要である(図2)。

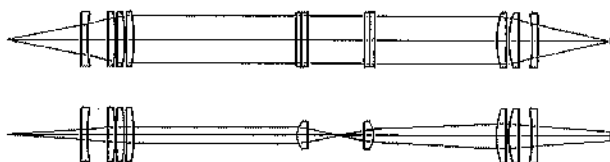


図2

また、照射物質によっては表面の微細構造によりスペックル干渉が発生する場合があります、これもラインが滲んだように見えることから画像に悪影響を与えることがあります。これについてはマルチモードレーザーやレーザーダイバーに高周波重量を用いることによって低減することができます。

2-5 全方位タイプ

円錐ミラーを使用して全方位のライン光源を作ることができ、土木用のレベラーや管内検査に用いられる(図3)。墨出し器では放射角度精度が秒のオーダーなので通常の機械加工では精度を出すことが難しい、ジルコニアなどのセラミックの加工に光学コートすることにより高精度のミラーを製作することができる。

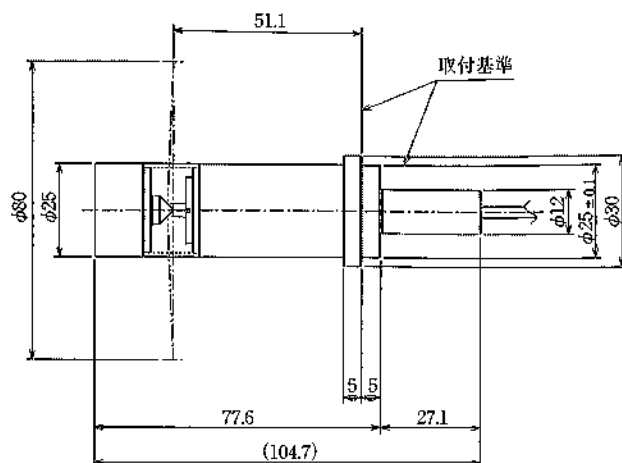


図3

3. おわりに

近年、半導体レーザーはディスクから短波長の開発がすすんでいるが、レーザーケガキでは比視感度から635nmの高出力、光切断では検査タクトの短縮やCCDの高倍率化で650nmや808nmの高出力レーザーダイオードが必要で、これに対応する製品も開発されている。一般的にワーキングディスタンスが長く、ラインが長く、パワーが大きく均一でラインが細く、深度変化が小さいスペックが要求されるが、各パラメータがトレードオフの関係にあるので優先度をつけて開発しないとなかなか収束しない場合がある。

今後もフィールドの要求に応えるべくレーザーライン光源の開発を行っていく。

【筆者紹介】

高野 裕 (昭和26年3月24日生・東京都出身)

エーエルティー(株) 代表取締役

〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10

TEL : 03-5946-7336 FAX : 03-5946-7316

E-mail : hakano@alt.co.jp

<主なる業務歴および資格>

光洋電子工業(株)にてセンサの開発、コンビ(株)にて脈拍センサの開発、コバル電子(株)にてレーザープリンタの開発、1992年よりレーザー応用製品、レーザーシステム、LBP検査システムの開発、製造、販売でエーエルティー(株)を設立、現在に至る。

2-3 テレセントリック、デガウスタイプ

CCDカメラでの画像計測ではラインの光強度分布はフラットな分布またはカメラレンズのディストーションを考慮して周辺がやや高い分布が望ましい。

通常のレーザの発光分布ではガウス分布と呼ばれる、中央から徐々に周辺に対して強度が低下していく分布となっている。この分布を変える方法として、デガウス、ホモジナイザーと呼ばれる光学系や素子を用いてビームの分布を変える方法や複数の光源を重ね合わせて分布を均一にする方法がある。デガウスの方法としてはフォーカス面で光学的に均一分布とする設計や専用のプリズムを用いる方法があるが、近年はDOEと呼ばれる干渉型光学素子で自由度の高い設計もできるようになった。

また、光切断法ではレーザの光束が平行でない画像に影ができて計測できない場所ができるため、テレセントリックと呼ばれる平行光のレーザ光源の方が高精度である。

2-4 微細ラインタイプ

被測定物が数 $10\mu\text{m}$ になってくるとライン幅の微細化が要求される。ただライン幅が1桁になるとライン幅分布の裾にサイドロープと呼ばれるピークが発生して画像に悪影響を与えることがある。現在 $3\mu\text{m}$ 近くまで実用化しているが使用部材の加工精度、組立調整精度に考慮が必要である(図2)。

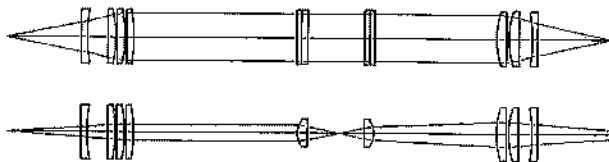


図2

また、照射物質によっては表面の微細構造によりスペckル干渉が発生する場合があります、これもラインが滲んだように見えることから画像に悪影響を与えることがあります。これについてはマルチモードレーザやレーザドライバに高周波重畳を用いることによって低減することができます。

2-5 全方位タイプ

円錐ミラーを使用して全方位のライン光源を作ることができ、土木用のレベラーや管内検査に用いられる(図3)。墨出し器では放射角度精度が秒のオーダーなので通常の機械加工では精度を出すことが難しい、ジルコニアなどのセラミックの加工に光学コートすることにより高精度のミラーを製作することができる。

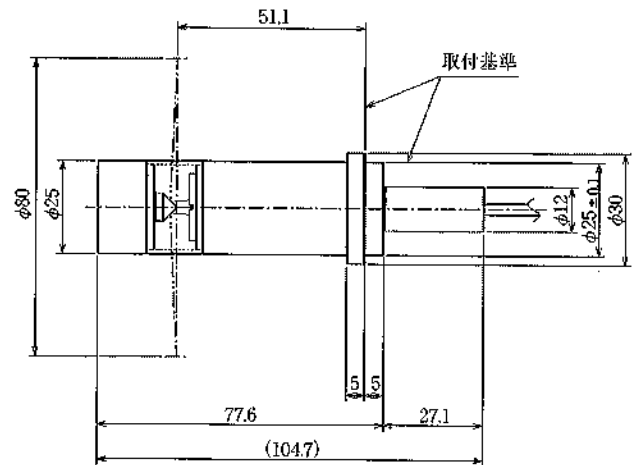


図3

3. おわりに

近年、半導体レーザはディスクから短波長の開発がすすんでいるが、レーザケガキでは比視感度から635nmの高出力、光切断では検査タクトの短縮やCCDの高倍率化で650nmや808nmの高出力レーザダイオードが必要で、これに対応する製品も開発されている。一般的にワーキングディスタンスが長く、ラインが長く、パワーが大きく均一でラインが細く、深度変化が小さいスペックが要求されるが、各パラメータがトレードオフの関係にあるので優先度をつけて開発しないとなかなか収束しない場合がある。

今後もフィールドの要求に応えるべくレーザライン光源の開発を行っていく。

【筆者紹介】

高野 裕 (昭和26年3月24日生・東京都出身)

エーエルティー(株) 代表取締役

〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10

TEL : 03-5946-7336 FAX : 03-5946-7316

E-mail : hakano@alt.co.jp

<主なる業務歴および資格>

光洋電子工業(株)にてセンサの開発、コンビ(株)にて脈拍センサの開発、コバル電子(株)にてレーザープリンタの開発、1992年よりレーザ応用製品、レーザスキャンシステム、LBP検査システムの開発、製造、販売でエーエルティー(株)を設立、現在に至る。