

### 応用7：レーザー光をシングルモードファイバにカップリング

レーザー光をシングルモードファイバにカップリングする場合は、これまで使用してきた幾何光学ではなく、ガウシアンモードマッチングの問題を考える必要があります。ガウシアンレーザービーム光学の問題については、P484以降を参照してください。この応用例もそこに含まれており、光ファイバへの光のカップリングについて詳しく説明されています。

コリメートされ、 $1/e^2$ 位置での直径Dのレーザービームからの波長の光をカップリングするためには、次のような焦点距離のレンズが必要です。

$$f = D(\pi\omega/4\lambda)$$

NewportのF-915ファイバカプラを使用して、HeNeレーザーR-30992 ( $\lambda = 633\text{nm}$ 、 $D = 1.2\text{mm}$ )からの光をF-SVファイバ ( $\omega = 4.3\text{m}$ )にカップリングする場合を考えてみます。この場合の焦点距離は

$f=6.4\text{mm}$ です。ここでは、これに最も近い  $f = 9\text{mm}$  のNewport M-20X対物レンズを使用します。

カップリング効率は、入射レーザービームのガウシアンモードと、ファイバの近似基本ガウシアンモードの重なり積分によって決定されます。この重なり積分は、入力モードがこれら2つのモードの大きい方でも小さい方でも同じです。M-20Xの焦点距離は必要な焦点距離よりも1.4倍長く、M-40Xでは0.7倍短いので、この場合はM-20Xのほうが適しています。

## シリンダリカルレンズによるビーム形成

### Beam Shaping with Cylindrical Lenses

シリンダリカルレンズは、1軸方向のみに光を集束または拡散させます。これらのレンズは、光計測、レーザースキャンニング、分光測定、レーザーダイオード、音響光学、光学プロセッサなどの用途において、光を細い線にフォーカシングするのに利用されます。また、レーザーダイオードの出力を対称ビームに拡大する場合にも使用されます。

### 応用8：コリメートされたレーザーから線状光を生成

図10にシリンダリカルレンズの一般的な応用例を示します。コリメートされた半径 $r_0$ のレーザービームが、焦点距離 $f$ の平凸シリンダリカルレンズに入射しています。この図では、見やすくするためにレーザービームの半径が大きく示されています。レーザービームは $r_0/f$ で示される角度 $\theta$ で拡散されます。レーザービームは、レンズ入射面側の虚焦点を中心として拡散しているように見えます。レンズ出射側の距離 $z$ の点には、太さ $2r_0$ （ガウシアンビームの拡大は無視します）の線が生成され、その長さは次の式で表わされます。

$$L = 2(r_0/f)(z+f)$$

$f$ に対して $z$ が大きい場合、拡大率は $z/f$ に非常に近くなります。これは像の投影ではありません。ここでは、特定の距離にレーザービームを線として投影しています。線の長さは、 $z$ に単純に比例します。

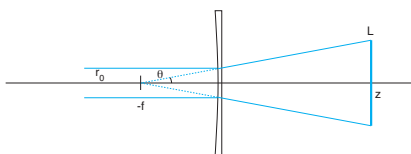


図10

できるだけ細い線が必要な場合は、焦点距離が $z$ にほぼ等しい平凸シリンダリカルレンズを、平凹レンズの直前または直後に2枚目のレンズとして挿入します。この平凸レンズを平凹レンズに直行させて置くとレーザーはスクリーン上にフォーカシングされ、前記の応用1の原理に従ってこのスクリーン上に線が投影されます。

場合によっては、シート光が必要となる場合があります。図10において投影されたビームもシート光と考えることができますが、正方形または矩形ではありません。この場合に得られる形状は、スクリーンに投影された線と、 $\theta$ で与えられる角における最大角度光とによって形成される二等辺三角形です。

### 応用9：レーザーダイオードからのビームを円形にする

レーザーダイオードの出力は非対象パターンに拡散し、ビームのコリメーティングを難しくします。シリンダリカルレンズを使用すれば、このビームを円形にすることができます。今、ビームの拡散角が $\theta_1 \times \theta_2 = 10^\circ \times 40^\circ$ のレーザーダイオードを考えます。球形レンズを使用してこのビームをコリメートした場合、コリメートできるのは一つの方向に限られ、他の方向ではビームは拡散または集束してしまいます。シリンダリカルレンズを使用すれば、2つの1次元問題としてこれを扱うことができます。最も簡単な解決方法は、1つの方向のビームを1つのシリンダリカルレンズでコリメートし、次に直交方向のビームをもう1つのシリンダリカルレンズでコリメートすることです（図11参照）。

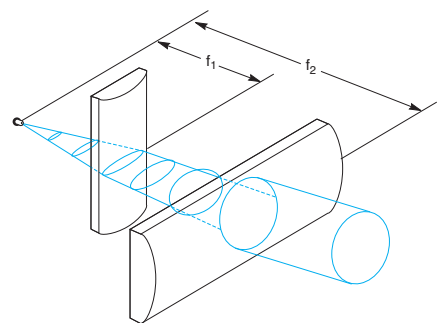


図11

レンズの選択と配置については、いくつかの指針があります。

- 1) 対称形のビーム形状を得るには、レンズ同士の焦点距離の比を、ビーム拡散の比とほぼ同じにする必要があります。

$$\theta_1/\theta_2 = 10^\circ/40^\circ = f_1/f_2$$

- 2) 方向を1つに限定した場合、レーザーダイオードは点光源で近似することができますので、コリメート出力を得るには、光源からそれぞれの焦点距離に等しい距離にレンズを置く必要があります。

- 3) 2つのレンズの主平面は、両者の焦点距離の差 $f_2 - f_1$ に等しい距離だけ離す必要があります。レンズ平面間の実際の距離は、 $BFL_2 - BFL_1$ です。球面レンズの場合は、収差を少なくするために凸面をコリメート光側に向ける必要があります。

4) レーザーダイオードビームの拡散角は大きいので、ビーム幅が各レンズの有効開口よりも大きくならないように注意する必要があります。各レンズは、レーザーダイオードから焦点距離だけ離れた位置に置かれているため、各レンズ位置におけるビームの最大幅 ( $d_1$ および $d_2$ ) は、次の式で求めることができます。

$$d_1 = 2f_1(\tan(\theta_2/2)),$$

$$\text{and } d_2 = 2f_2(\tan(\theta_1/2))$$

この例に最も適したレンズはNewport CKX012 ( $f_1 = 12.7\text{mm}$ ,  $\text{BFL}_1 = 7.49\text{mm}$ ) とCKX050 ( $f_2 = 50.2\text{mm}$ ,  $\text{BFL}_2 = 46.03\text{mm}$ ) です。他の要素を考慮に入れなければ、レンズ平面間の距離は $\text{BFL}_2 - \text{BFL}_1 = 38.54\text{mm}$ です。最初のレンズにおけるビーム直径は、次の式で求められます。

$$d_1 = 2(12.7 \text{ mm})\tan(20^\circ) = 9.2 \text{ mm}.$$

2つめのレンズにおけるビーム直径は、

$$d_2 = 2(50.2 \text{ mm})\tan(5^\circ) = 8.8 \text{ mm},$$

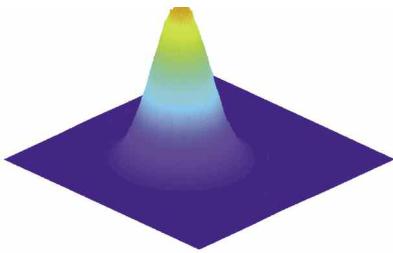
わずかに非対称形状とはなるものの、標準レンズの簡単な組み合わせによって、大幅な改善を得ることができます。

## ガウシアンビーム光学

### Gaussian Beam Optics

ガウシアン分布は半径方向に対称な分布で、その電界変化は次の式で表わされます。

$$E_s = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)$$



$R$ はビーム中心からの距離として定義されます。 $\omega_0$ は、軸上の頂点の $1/e$ となる場所の半径です。

このフーリエ変換もやはりガウシアン分布になります。フラウンホーファー近似を使用せずにフレネル積分を直接解こうとすると、ガウシアン光源の分布は、光学系の伝播光路上ではどの点においてもガウシアン分布となります。これにより、光学系の任意の点における電界分布を特に簡単に表わすことができます。光の強度もやはりガウシアン分布になります。

$$I_s = \eta E_s E_s^* = \eta E_0 E_0^* \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right)$$

\*Denotes complex conjugate

現在ではガウシアン強度分布を持つ光源、すなわちレーザーは身近なものとなったため、この関係は単なる数学的興味以上の意味を持っています。ほとんどのレーザー波動における電界は、本来ガウシアン分布です。また、基本ガウシアン分布には特殊な多項式乗算が適用されることもあります。その場合でも変換結果はガウシアン分布のままです。これらの電界分布は高次モードと呼ばれ、ほとんどのレーザーにおいては、設計によって回避するのが普通です。

ガウシアンビームには、開口直径などのように、特性に影響する寸法について明確な境界はありませんので、ガウシアンビームのサイズはある程度任意に決定することができます。図1は典型的なHeNeレーザーのガウシアン強度分布を示したものです。

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right)$$

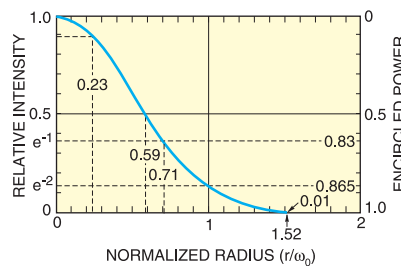


図1

パラメータ $\omega_0$ は通常ガウシアンビーム半径と呼ばれ、強度が軸上における値、すなわちピーク値の $1/e^2$ または0.135まで減少する半径を表わします。留意すべきもう一つの点は、最大強度の半分、すなわち強度が50%となるのが $0.59\omega_0$ の位置であるということです。 $2\omega_0$ すなわちガウシアン半径の2倍の位置における強度はピーク値の0.0003となり、通常はほとんど無視することができます。

半径 $r$ 以内に包含される出力 $P(r)$ は、0から $r$ までの強度分布を積分することによって簡単に求めることができます。

$$P(r) = P(\infty) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \right]$$

ワット数で表わしたビームの全出力 $P(\infty)$ に対してこれを正規化すると、強度曲線と同じ曲線が求められますが、縦軸の方向は逆になります。半径 $r = 2\omega_0$ の中には、ほとんど100%の出力が包含され、 $0.59\omega_0$ 内には50%、強度が10%低下する $0.23\omega_0$ 内ではわずか10%になります。ビームの全出力 $P(\infty)$ ワットは、中心軸上の強度 $I(0)$  (watts/m<sup>2</sup>)の関数となり、次の式で求められます。

$$P(\infty) = \left( \frac{\pi\omega_0^2}{2} \right) I(0)$$

$$I(0) = P(\infty) \left( \frac{2}{\pi\omega_0^2} \right)$$