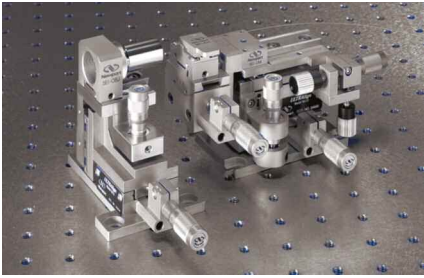


ファイバオプティックカップリング

Fiber Optic Coupling



光ファイバへのカップリングに関する問題は、2つに分けて考えることができます。1つはマルチモードファイバへのカップリングの問題で、これには前のセクションで説明した幾何光学を使用できます。もう1つのケースはシングルモードファイバへのカップリングで、この場合は基本的に別の問題が生じます。この場合は、入射レーザーのモードをファイバのモードに合わせる必要があります。これは、幾何光学によるアプローチでは解決することはできず、ガウシアンビーム光学の概念が必要になります (P484を参照してください)。

応用5：マルチモードファイバへのカップリング

良好にコリメートされたレーザービームの光をマルチモードの光ファイバにカップリングする場合は、図5に示される状況を考えます。ここでは、ファイバコアの半径が y_2 になります。カップリング時は、レンズを使用して、このパラメータよりも小さいスポットサイズにビームをフォーカシングする必要があります。さらに重要な制約条件は、レンズからファイバへの角度 θ_2 は、光ファイバのNAよりも小さくなければなりません。

NewportのHeNeレーザーR-30990をFMSDファイバにカップリングする場合を考えてみます。このレーザーの直径は0.81 mmで拡散角は1.0 μrad です。ファイバのコア直径は50 μm で、NAは0.20です。ここでは、NewportのF-915またはF-915TファイバケーブルにM-20X対物レンズを使用して、ビームからファイバへのカップリングを行う場合を考えます。

この対物レンズの有効焦点距離は9 mmです。この場合、フォーカシングされたビームの直径は9 μm で、最大角度光の角度は0.05となります。これらの値は、いずれもファイバのパラメータ範囲内です。

一般に、良好にコリメートされたレーザー光源からマルチモードファイバへのカップリングは、難しい問題ではありません。フォーカシングされたビームの最大角度光がファイバのNA内となることを保証できる場合は、有効なカップリングを行うことができます。

応用6：拡散光源からの光をマルチモードファイバにカップリング

前のセクションに示した応用例は、コリメートされた光源からの光をファイバの端面にフォーカシングするものでした。この新しい応用例では、分散光源からの拡散光をファイバの端面に投影します。これは、分散光源からの光を小さい点にフォーカシングした応用4と同様の問題です。ここでは、ファイバを使用して光源からの光を集めます。拡散光においては、光は光源からあらゆる方向に放出されますが、光の強度は方向に左右されません。白熱灯または蛍光サンプルがその例です。

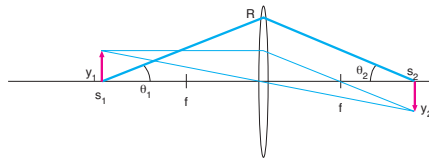


図9

図9は、光源からファイバに1:1の投影を行う場合を示します。ガウスのレンズ公式から、この図においては $s_1 = s_2 = 2f$ という関係が得られます。 y_2 は被投影側のファイバの直径であることから、光源の半径 $y_1 = y_2$ の範囲内の光だけが集光されることになります。ファイバにカップリングされる光線の最大角は $\theta_2 = \text{NA}$ に制限されます。これは、1:1の投影問題なので、光源からサンプリングされる光線の最大角度もやはり $\theta_1 = \text{NA}$ となります。したがって、どれだけの量の光を集めることができるかは、レンズではなくファイバによって決まることとなります。十分に小さいFナンバーのレンズ、すなわち $f/\# < 1/(2\text{NA})$ の条件を満たすレンズを選択する限り、最大限の光を光源からファイバに集めることができます。

ここで、レンズを取り去ってファイバを移動し、直接光源に接続したらどうなるかを考えてみましょう。すなわち、ファイバと光源のバットカップリングです。この場合ファイバは、半径 y_2 、角度NAの範囲内の光

を集めます。しかし、これは1:1の投影における結果とまったく同じです。拡散光源からファイバへの光を集める投影システムは、バットカップリングの場合よりも多くの光を集めることはできません。

実際のところ、これはまったく以って普遍的な結論です。図7に示すような場合についてさらに考えてみましょう。今度は、たとえばファイバ端面に $y_1 = 5y_2$ の比率で光を集めるとします。この場合は、ファイバ面積の25倍の面積から光を集めることとなりますが、光学的不変量から $1 = \text{NA}^2$ となるため、固体素子からの光も同様に1/25に縮小されることとなります。したがって、集められる光の合計「照射量×面積×立体角」は、一定となります。レンズ系によって実現し得るのは、ファイバを拡散光源から離れた位置に置かなければならない場合に、バットカップリング時の効率を引き出すことだけです。したがって、最大の効率を得るには、コア直径と開口数ができるだけ大きいファイバを選択する必要があります。

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 の平凹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 θ 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。

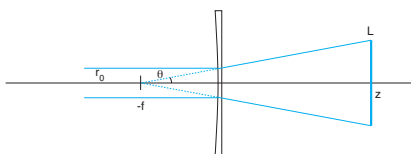


図10

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、 θ 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）。

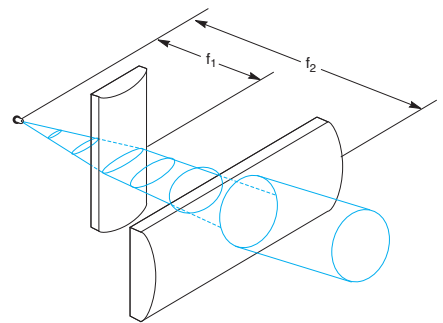


図11

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。