

ガウシアンビーム光学

2



ガウシアンビーム光学入門	W 2.2
単レンズによるビーム変換と倍率	W 2.6
レンズの選択	W 2.10

ガウシアンビーム光学入門

Introduction to Gaussian Beam Optics

レーザーを用いた大抵の応用では、レンズその他の光学部品を用いて、レーザービームを集光したり、変形、整形したりする必要があります。コヒーレントなガウシアンビームには特異な変換特性があるので、特別に考察する必要があります。特定のレーザーの応用に最も適した光学部品を選ぶためには、ガウシアンビームの基本的な特性を理解しておくことが大切です。本解説では、TEM₀₀モードのような対称的な波面を仮定します。ヘリウムネオンやアルゴンのようにTEM₀₀モードのビームを出力するレーザーは、円柱的な対称性(軸対称性)を有します。しかし、ダイオードレーザーのビームはTEM₀₀モードであることが多いのですが、軸対称ではなく、しかも非点較差があるのが普通ですので、ビームの変換が複雑になります。

結像系に比べて、レーザー用の光学部品の設計と公差は、ある意味では一層厳しいと言えますが、結像系の場合に付随する制約条件の多くが不必要になるので、その分だけ設計が簡単になります。例えば、レーザービームはほとんどいつも光軸上で用いるため、非点収差やコマといった非対称の収差の補正は不要です。色収差の補正は、ある種の変長レーザーでは問題になりますが、単一波長レーザーでは不要です。単一波長レーザーを用いた大抵の応用で問題になる収差は、3次の球面収差だけです。

レーザーを用いたシステムでは、光学部品の表面の欠陥や含有物(異物)、埃、コーティングの損傷などが、インコヒーレント光用の光学系以上に問題になります。照射面の素地の微細な凹凸と反射光のコヒーレント性により発生するスペックルのために、光学系の特性が制約されることもあります。

レーザー光は、かなり大きな空間領域でコヒーレント性を有しますので、インコヒーレント光では難しい、レーザー光ならではの応用分野があります。波面のどの部分も同じ源点から発生したように振る舞うので、出射光の波面が正確に定義されず、正確に定義された波面を用いると、他のどの方法よりずっと正確に集光及びビーム制御ができます。

ガウシアンビームの特性と制約について善く認識するには、レーザーの出射ビームの性質を理解することが必要です。TEM₀₀モードのレーザー出射ビームは、断面の放射強度分布がガウス分布をし、そのビームウエストでは完全な平行平面波になります。実際のレーザーでは、レーザー管の内部形状または光学系の有効径の制約によってガウシアンビームの裾がカットされます。レーザービームの伝播特性を定義し議論するために、ビームの直径を適当に定義する必要があります。通常用いられる定義では、ビームの放射強度がピーク値または光軸上の値の1/e²(13.5%)になるビーム径をビームの直径としています。

ビーム幅、発散

回折現象は、伝播する光波を横に広げる作用をしますので、どこまでも平行な光というのは存在しません。レーザービームの拡散現象は、収差とは全く無関係で、回折理論だけで完全に説明されます。ビームの拡散効果が小さくて気が付かないことも、しばしばあります。以下の公式でビームの拡散効果が正確に記述されますので、レーザービームの特性と制約について理解するのに用いることができます。ここで用いた記号は、レーザーに関する文献で通常用いられるものと同じで、特に、Siegmanの著名な教科書 Introduction to Lasers and Masers(McGraw-Hill)に準じています。

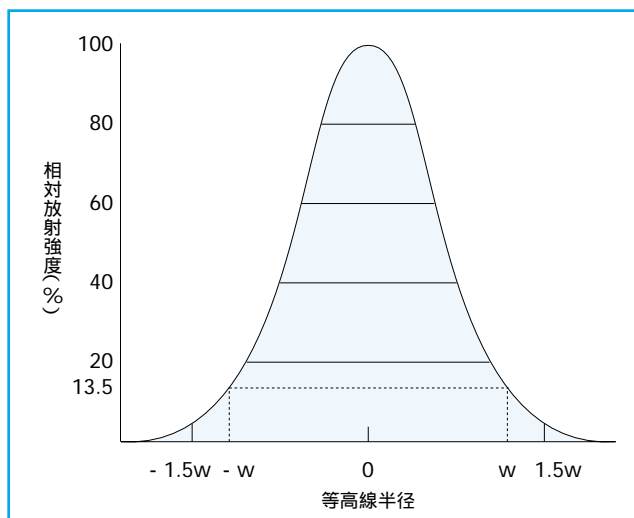


図 2.1 ガウシアンTEM₀₀モードの放射強度分布

ガウシアンTEM₀₀レーザービームの波面が、或る面でフラットになって波面の全ての要素が正確に互いに平行に伝播するとしても、波面は直ぐに次式で与えられる曲率を持って発散するようになります。

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

そして

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

ここで、zはビームウエスト面から測った距離、λは光の波長、w₀はビームウエスト面内の(中心に比べて)1/e²の強度の等高線の半径、w(z)は伝播距離zでの光波の1/e²の強度の等高線の半径、及びR(z)は伝播距離zでの波面の曲率半径です。R(z)は、z=0で無限大で、zが増すに従って、zの或る有限値で最小値を取った後、単調に増加して、zそのものに漸近的に近づきます。

z=0の平面は、ガウシアンビームウエストの位置、つまり波面がフラットになる位置を示します。w₀は、ウエスト半径と呼ばれます。対称型共焦点タイプの共振器(キャビティ)では、ウエストは共振器の中央部に位置します。CVIメレスグリオのヘリウムネオンレーザーに用いられる平面-凹面の擬半球共振器では、平面ミラー表面にウエストが来ます。

ガウシアンTEM₀₀ビームの放射強度分布は、どの距離での断面でも同じで、次式で与えられます。

$$I(r) = I_0 e^{-2r^2/w^2} = \frac{2P}{w^2} e^{-2r^2/w^2} \quad (2.3)$$

ここで、w=w(z)で、Pはビームの全パワーです。分布形状のこの不変性は、z=0でガウシアン分布を仮定したことにより、特別に成り立つことです。もし、z=0で均一な放射強度分布を仮定すると、z=∞での分布はベッセル関数で与えられる見慣れたエアリーのディスクパターンになります。この場合、有限のzでの分布関数は極めて複雑な形状を有します。Born & Wolf, Principles of Optics, 2nd ed (Pergamon/Macmillan)を参照してください。

zの値が大きくなるにつれて、R(z)がzに漸近すると同時に、w(z)は次式に漸近します。

$$w(z) \cong \frac{\lambda z}{w_0} \quad (2.4)$$

ここで、zは w₀²/λより十分大きいと仮定していますので、1/e²放射強度等高線は次式の半頂角の円錐に漸近します。

$$= \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{w_0} \quad (2.5)$$

この値は、ガウシアンTEM₀₀ビームのファーフィールドの発散半角で、光円錐の頂点はウエストの中央に位置します。

ある波長λに対して、距離zでのビーム径と発散角は、1つのパラメータの関数になります。パラメータとしては、ビームウエスト半径w₀がよく選ばれます。

TEM₀₀モードのレーザービームを集光させる場合は、ビームウエストと発散角との間の反比例関係(λ/w₀)を常に考慮する必要があります。この関係により、CVIメレスグリオのヘリウムネオンレーザーは、弱いメニスカスレンズの内側に波長選択性のミラーコーティングが施されたものを、共振器の出射側ミラーとして用いております。共振器は近軸の高F値の系を構成するので、出射側キャビティミラーの収差は殆ど問題になりません。このレンズにより、共振器内のビームウエストより大きな新しいビームウエストが出射瞳近くにできます。この変換されたビームの発散角がかなり小さくなっていますので、大抵の使途で有利になります。本カタログに記載しているのは、この共振器外のウエストの1/e²ビーム径のことです。

ビームウエストと発散角の関係を以下の例で示しましょう。CVIメレスグリオの赤の5 mWのヘリウムネオンレーザー-05 LHR 151は、ビーム径が0.8 mmつまりw₀=0.4 mmです。ファーフィールド領域で、

$$= \frac{\lambda}{w_0} = \frac{632.8 \times 10^{-6}}{(0.4)} = 5.04 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

漸近式を用いて、z = 100 mでのw(z)は、

$$\begin{aligned} w(z) &= z \cdot \left(5.04 \times 10^{-4} \right) \\ &= 50.4 \text{ mm} \end{aligned}$$

これは、w₀の約126倍の値です。

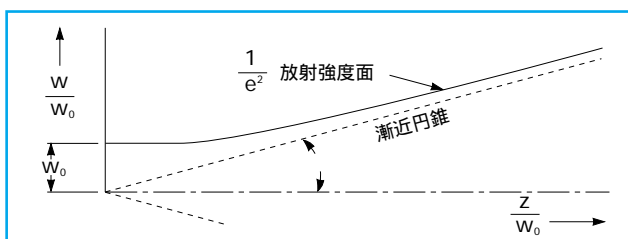


図 2.2 ガウシアンウエストから遠ざかるにつれて1/e²等高線半径が増加する様子

逆に、例えばCVIメレスグリオの09 LBM 013(図 2.3)のような倍率10×のビームエキスパンダーにビームを通して、発散角を小さくすることを考えましょう。エキスパンダーは、その出射端で半径 $w_0 = 4.0$ mmのウエストが生じるようにフォーカスされているものとします。 $1/w_0$ で、定義から の値が10分の1に縮小されていますので、 $z = 100$ メートルで、 $w(z)$ は次のようになります。

$$w(z) = \frac{(10^5 \cdot 5.04 \times 10^{-4})}{10} = 5.04 \text{ mm}$$

拡大されたビームでは、距離 $z = 100$ mでの比 $w(z)/w_0$ は僅か12.6で、ビームエキスパンダーを使わないときの比の値の10分の1になっています。

最適化コリメーション

通常 w_0 は固定値で、与えられた z の値に対する $w(z)$ を前出の表式を用いて計算します。しかしながら、前出の表式で、或る固定の距離 z でのビーム半径 $w(z)$ が最初のビーム半径 w_0 にどのように依存するかを見ることもできます。図 2.4は、 $\lambda = 632.8$ nm、 $z = 100$ mとして、ガウシアンビームの伝播公式を w_0 の関数として描いたものです。

100 m先のビーム半径は、元のビーム半径が4.5 mm程度のときに最小値を取ります。従って、元のビーム半径を4.5 mmに選べば、100 mにわたってビームの径が小さく且つ発散角も小さく(つまり最適のコリメート状態に)なります。それ以外の値では、100 m先のビームサイズがもっと大きくなります。

与えられた z の値についての、最適化された初期ビーム半径の一般的な表式は、次のようになります。

$$w_0(\text{最適化}) = \left(\frac{\lambda z}{2} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

この最適化初期値 w_0 を使えば、距離 z にわたってビーム径とビーム発散角(比 $w(z)/w_0$)の両方とも均衡良く小さくすることができます。前出の例では、図からも明らかなように、 $z = 100$ m、 $\lambda = 632.8$ nmで $w_0(\text{最適化}) = 4.48$ mmです。この $w_0(\text{最適化})$ の値を $w(z)$ の式に代入して、 $w(z) = \sqrt{2} w_0$ を得

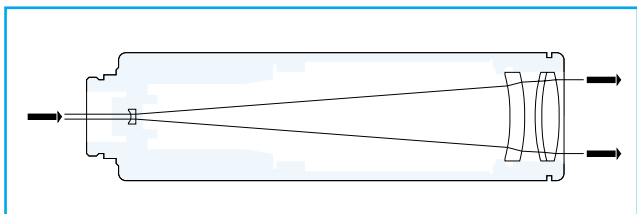


図 2.3 レーザービームエキスパンダー 09 LBM 013 (逆向き望遠鏡)

ます。従って、この例では、 $w(100) = \sqrt{2}(4.48) = 6.3$ mmとなります。

この前出の式を逆にして、レイリー領域(z_R)と呼ばれる、ビーム半径が2倍に広がるまでの距離を次のように定義することができます。

$$z_R = \frac{w_0^2}{\lambda} \quad (2.7)$$

且つ

$$w(z_R) = \sqrt{2} w_0$$

もし(09 LBCや09 LBX、09 LBZ、09 LCMといったシリーズの)ビームウエスト位置を調整できるビームエキスパンダーを使うと、ビームの広がりが小さくなる距離範囲を2倍に広げることができます。図 2.5にこの様子を示しますが、出射時にはビーム半径 $w(z_R) = (\sqrt{2} z_R / \lambda)^{1/2}$ のビームが、距離 z_R で最小値 w_0 となり、距離 $2z_R$ で再び $w(z_R)$ になります。つまり、ビームウエストの位置が距離 z_R に来るようにエキスパンダーの集光点を調整することにより、ビームウエストが最小値 w_0 の2倍以下の距離範囲が z_R の2倍に増加します。

この結果を用いて、100 mの距離範囲でビーム径の広がりを押さえたいだけ小さな径のビームにするための出射ビーム半径を求めましょう。 $2z_R = 100$ つまり $z_R = 50$ および $\lambda = 632.8$ nmで、 $w(z_R) = (\sqrt{2} z_R / \lambda)^{1/2} = 4.5$ mmおよび $w_0 = 3.2$ mmとなります。このように、最適の出射ビームサイズは前に計算したものと同じですが、しかし、ビームエキスパンダーのフォーカシングによって、100 mの距離範囲でビーム径が出射時のビーム径を越えないようになります。

別の見方をすれば、出射ビームのビーム半径 $\sqrt{2} w_0$ を6.3 mmとすると、100 m先で $w_0 = 4.5$ mmのビームウエストになり、200 m先で再びビーム半径が6.3 mmになるようにフォーカシングすることができます。

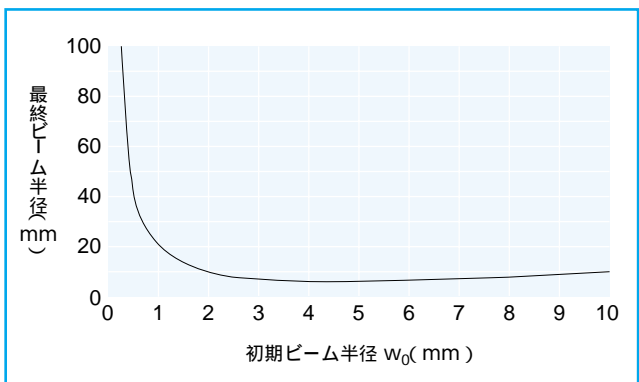


図 2.4 波長632.8 nmのHeNeレーザー光の初期ビーム半径の関数としての、 $z = 100$ mでのビーム半径

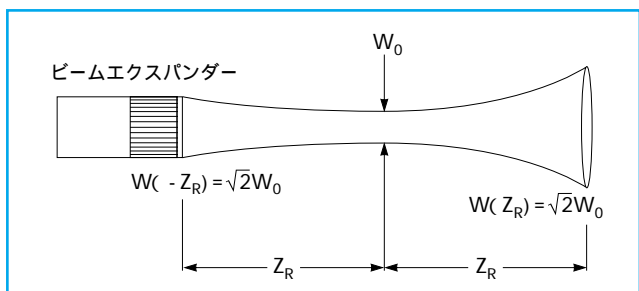


図 2.4 領域の中間にビームウエストが来るようにビームエキスパンダーのピントを合わせることで、領域内のビーム径とビームの拡がりをも最小限にすることができます。

基礎的な公式への M² の要素の組み入れ

以下の内容は、Sun Haiyin Sun, "Thin Lens Equation for a Real Laser Beam with Weak Lens Aperture Truncation," Opt. Eng. 37, no.11(November 1998)]による解析から求められています。理論上のガウシアンビームにおいて可能な最小の発散半角は、式 2.5から

$$w_0 = \lambda /$$

実際のレーザービームにおいては、

$$w_{0M} = M^2 \lambda / > \lambda / \tag{2.8}$$

ここで w_{0M} と M は、各々実際のレーザービームにおけるウエストでの 1/e² ビーム半径、およびファーフイルドの発散半角です。式 2.1と2.2に M² の要素を当てはめた場合下記ようになります。

$$w_M(z) = w_{0M} \sqrt{1 + (z \lambda M^2 / w_{0M}^2)^2} \tag{2.9}$$

$$R_M(z) = \sqrt{1 + (w_{0M}^2 / z \lambda M^2)^2} \tag{2.10}$$

ここで w_M と R_M は、各々ビーム強度の 1/e² 半径、および z におけるビーム波面半径を示します。

レイリー領域の定義(式 2.7)は、実際のビームの場合も同じとなります。

$$z_R = w_{0R}^2 / \lambda \tag{2.11}$$

式 2.9、2.10、および2.11は、薄肉レンズに実際のレーザービームを入射した場合を示します。

レーザーとレーザーシステム



CVIメレスグリオは、研究用およびOEM用と向けに、数多くのレーザー(システム)を製造しています。レーザー&オプティクスガイド(2)には、これらの製品と共に様々なレーザー用アクセサリが掲載されています。レーザーのタイプには、ヘリウムネオン(HeNe)、ヘリウムカドミウム(HeCd)、イオン(Argon、Krypton、およびArgon/Krypton)レーザー、ダイオードレーザー、および半導体励起固体(DPSS)レーザーがラインナップされています。

単レンズによるビーム変換と倍率

Transformation and Magnification by Simple Lenses

ガウシアンビームが幾何光学とは異なる変換則に従うことが、以上の議論から見て取れます。Siegmanは、レンズとミラーを用いたガウシアンビームの伝播の一般的問題を、マトリクス変換法で取り扱っています。Selfは、同じ問題について、厳密性には欠けませんが、多くの面で洞察深い方法を考案しています。[S.A.Self, Focusing of Spherical Gaussian Beams, Appl. Opt. 22(5), 658(March 1983)]Self は、近軸近似のもとで、個々の光学部品の後のレイリー領域とビームウエスト位置を計算することにより、簡単な光学系によるレーザービームの変換の定式化の方法を示しています。これらのパラメータは、よく知られた標準的なレンズの公式と類似の公式を用いて計算されます。極めて有用な方法ですので、以下にその要点を紹介します。

標準的なレンズの公式は、無次元形式で次式で与えられます。

$$\frac{1}{s/f} + \frac{1}{s'/f} = 1 \quad (2.12)$$

ガウシアンビームに対して、Self は、入射ビームのウエストが物体で出射ビームのウエストが像と見做して、上の表式と類似の公式を導出しました。公式は、入射ビームのレイリー領域を用いて表されます。

公式は、通常の表記で、次式で与えられ、

$$\frac{1}{s + z_R^2/(s-f)} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} \quad (2.13)$$

無次元形式では、次のようになります。

$$\frac{1}{(s/f) + (z_R/f)^2/(s/f - 1)} + \frac{1}{(s/f)} = 1 \quad (2.14)$$

$z_R = 0$ のファーフールド極限では、この公式は幾何光学の公式に帰着します。図 2.7の、 (z_R/f) の種々の値に対する (s/f) 対 (s'/f) のグラフは、性質の異なる3つの領域に分かれています。正の薄肉レンズに対しては、これらは各々、実物体と実像、実物体と虚像、および虚物体と実像に対応します。

このようなグラフにも現れる、ガウシアンビーム光学と幾何光学との主要な違いを、以下に要約します。

ガウシアンビームは、像距離に最大値と最小値を有する。

最大の像距離は、 $s=f$ ではなく、 $s=f+z_R$ に対応。

ガウシアンビームの表式では、 (s'/f) 対 (s/f) のグラフは、(有限の) z_R の値に無関係に、共通の点、 $s/f = s'/f = 1$ を通る。正の単レンズの場合、この点は、入射ビームのウエスト位置がレンズの前側焦点に来て、出射ビームのウエスト位置が後側焦点に来る事象を意味する。

z_R/f の値がゼロから増加するにつれて、光学系の焦点距離が恰も短くなるように振る舞う。これをガウシアン焦点距離シフトと見なせる。

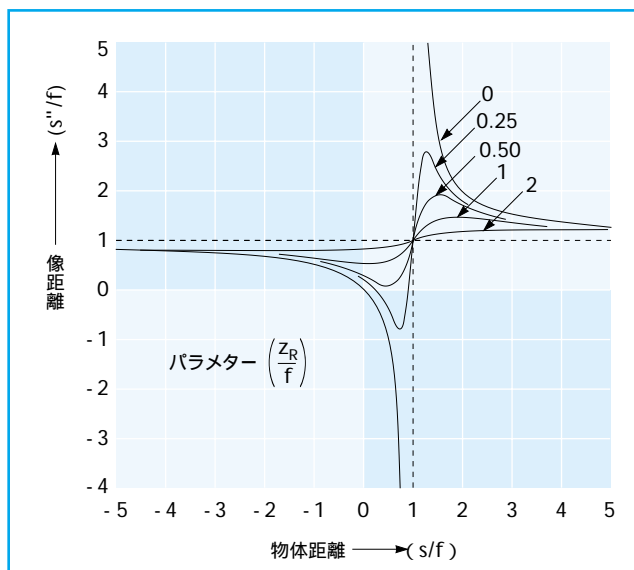


図 2.7 (z_R/f) の値をパラメータとした、ガウシアンビームのレンズ公式のグラフ

Selfは、 z_R 、 w_0 およびその位置を光学系の光学部品の1枚ごとに順番に計算して、全体としてのビーム変換を求めることを勧めています。この方法を実行するには、倍率 w_0'/w_0 について考慮する必要があります。倍率は、次式で与えられます。

$$m = \frac{w_0'}{w_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - (s/f)\right]^2 + (z_R/f)^2}} \quad (2.15)$$

前出の例でも明らかのように、出射ビームのレイリー領域は m^2 に比例し、次式で与えられます。

$$z_{R'} = m^2 z_R \quad (2.16)$$

上の2つの式は、入射ビームのレイリー領域を用いて表されています。幾何光学とは違って、上記の式は、入射ビームと出射ビームのパラメータについて対称にはなっていません。ビームを逆方向に追跡するには、出射ビームのレイリー領域を用いて表わされた、以下のガウシアンビームの公式を用いるのが便利です。

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s + z_R^2/(s-f)} = \frac{1}{f} \quad (2.17)$$

M²とレンズの公式

実際のビームにおいては、M²の要素をレンズの公式に組み込み、式 2.12は以下になります。

$$1 [s + (z_R / M^2)^2 / (s - f)] + 1/2 = 1/f \quad (2.18)$$

また、式 2.14は次式のようにになります。

$$1 [(s/f) + (z_R / M^2 f)^2 / (s/f - 1)] + 1/(s/f) = 1 \quad (2.19)$$

ビームの集光性

前出の式を用いて、ガウシアンビームのスポットサイズと集光位置を求めることができます。s = 0 (入射ビームのウエストがレンズ系の第1主面に来る場合)と s = f (入射ビームのウエストが前側焦点に来る場合)の2つの場合が、特に興味があります。

s = 0 のとき、次式を得ます。

$$s = \frac{1}{1 + (\lambda f / w_0^2)^2} \quad (2.20)$$

$$w = \frac{\lambda f / w_0}{[1 + (\lambda f / w_0^2)^2]^{1/2}} \quad (2.21)$$

s = f のとき、像距離とウエストサイズは次のように簡素化されます。

$$s = f$$

$$w = \lambda f / w_0$$

通常のレンズと通常の入射ビーム径では、 $\lambda f / w_0^2 \ll 1$ となるので、1番目の式のセットは2番目の式のセットで近似されます。このように、通常の場合は、2番目の式のセットが適用できます。

単レンズまたは数枚のレンズの組み合わせで、レーザービームをできる限り小さく集光したい場合がよくあります。CVIメスグリオは、特にこのような目的のための単レンズのシリーズを用意しています。例えば、05 LHR 151レーザーと01 LFS 033集光用単レンズを用いる場合、次のようにスポット半径が計算されます。

$$\begin{aligned} w(z) &\equiv \frac{4 \lambda f}{3 w} = \frac{4 (632.8 \times 10^{-6} \text{ } \phi 7)}{(3 \phi 0.4)} \\ &= 4.70 \times 10^{-3} \text{ mm} \\ &= 4.7 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

上式で、ファクター4/3が係るのは、単レンズで球面収差と回折効果のバランスを取って設計されていることによります。また、比 f/w はレンズのF値に比例しますが、F値そのものではありません。

特に小さなスポットにしたい場合は、能く補正された高い開口数の顕微鏡対物レンズを用いてレーザー光を集光するのが良いでしょう。特に油浸用に設計されたものでない限り、対物レンズを油浸で使わないで下さい。このため、開口数の値が1を越えることはありません。顕微鏡対物レンズは、球面収差が殆ど無い点で、単レンズに優ります。顕微鏡対物レンズを集光目的によく用いますが、このレンズそのものは無限共役のもとで最適設計されてはいません。無限共役の条件で最適化されたレンズを使えば、より効率的にビームを集光できます。CVIメスグリオは、このような特注レンズの設計/製作も承ります。

焦点深度

焦点深度(± z) 即ち集光スポット径が任意に設定された限界値を越えない像空間の範囲は、次の公式から導出できます。

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.22)$$

焦点深度を計算するには、まず、スポットサイズの許容限界を設定します。例えばそれを5%、つまりw(z) = 1.05 w₀と選んで、z = zについて解くと、次のような結果を得ます。

$$z \approx \pm \frac{0.32 w_0^2}{\lambda}$$

この結果を05 LHR 151レーザーと01 LFS 033集光用単レンズの組み合わせに適用すると、次のようになります。

$$\begin{aligned} z &= \pm \frac{0.32 (4.70 \times 10^{-3})^2}{6328 \times 10^{-7}} \\ &= \pm 35.1 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

焦点深度が集光スポット径の2乗に比例し、集光スポット径がF値に比例するので、焦点深度は集光系のF値の2乗に比例することになります。

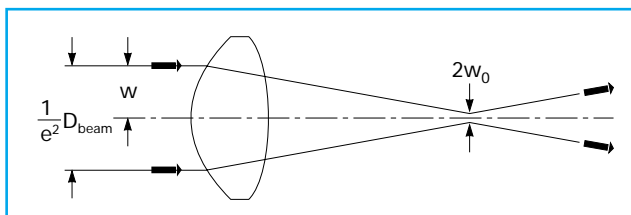


図 2.6 レーザー集光用単レンズによるレーザービームの集光

裾切り(トランケーション)

回折限界性能のレンズによる像スポット径は、

$$d = k \times \lambda \times f / \# \quad (2.23)$$

ここで、Kは裾切り(トランケーション)の割合と瞳の照明の仕方に依存した定数、 λ は光の波長、およびF値はレンズの絞り値です。集光スポットの光強度分布は、レンズの入射瞳を被う入射光の強度分布に強く依存します。均一強度の入射光の場合の像スポットは、エアリーディスク強度分布になります。入射瞳への入射光強度がガウス分布の場合は、像スポットの強

度分布もガウシアンになります。これらの中間の形状の入射光強度分布の場合は、像スポットは混合強度分布になります。

エアリーディスクの場合、直径が $d_{zero} = 2.44 \times \lambda \times f / \#$ のとき強度がゼロになり、これでスポット径を定義します。入射瞳が均一光で照射されない場合は、スポット強度分布がゼロになる点があるので、別の方式でスポット径を定義する必要があります。次の2つの直径の定義がよく使われます。

$$d_{FWHM} = \text{強度が50\%の点}$$

$$d_{1/e^2} = \text{強度が13.5\%の点}$$

次の裾切り比を導入すると便利です。

$$T = \frac{D_b}{D_t} \quad (2.24)$$

ここで、 D_b は $1/e^2$ 強度点で測ったガウシアンビームの径、 D_t はレンズの開口の径です。 $T=2$ であれば、均一照射光に近く、像スポットも古典的なエアリーディスクに近い強度分布になります。 $T=1$ は、ガウシアン分布が $1/e^2$ の径で裾切りされた形状で、スポットの強度分布はエアリーパターンとガウス分布の混成になります。 $T=0.5$ では、裾切りされないガウシアン入射ビームと実質的に見なされますので、スポットの強度分布もほぼガウス分布になります。

これらまたはそれ以外の裾切り比に対するスポット径を計算するには、定数Kの値を求める必要があります。Kは、次の公式を用いて求めます。

$$K_{FWHM} = 1.029 + \frac{0.7125}{(T - 0.2161)^{2.179}} - \frac{0.6445}{(T - 0.2161)^{2.221}} \quad (2.25)$$

および

$$K_{1/e^2} = 1.6449 + \frac{0.6460}{(T - 0.2816)^{1.821}} - \frac{0.5320}{(T - 0.2816)^{1.891}} \quad (2.26)$$

エアリーおよびガウス分布関数は、右の図 2.8と図 2.9に描かれています。K-ファクターは、次頁の図 2.10にプロットされていますので、それを使えば、任意の裾切り比に対する軸上のスポット径を計算できます。

最適の裾切り比は、スポットサイズ、スポットのピーク光強度、およびスポットの全パワーの内どれを優先するかにより異なります。スポットの全パワーの、入射ガウシアンビームの裾切りによるパワーロスの割合は、次式で与えられます。

$$P_L = e^{-\pi(D_t/D_b)^2} \quad (2.27)$$

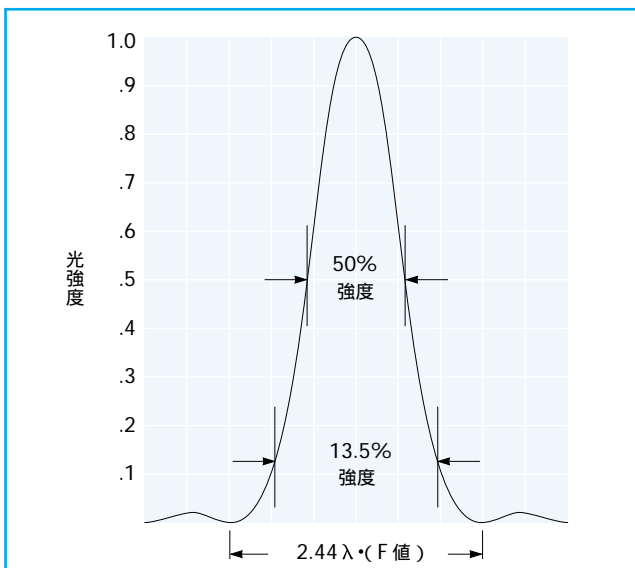


図 2.8 像面でのエアリーディスク強度分布

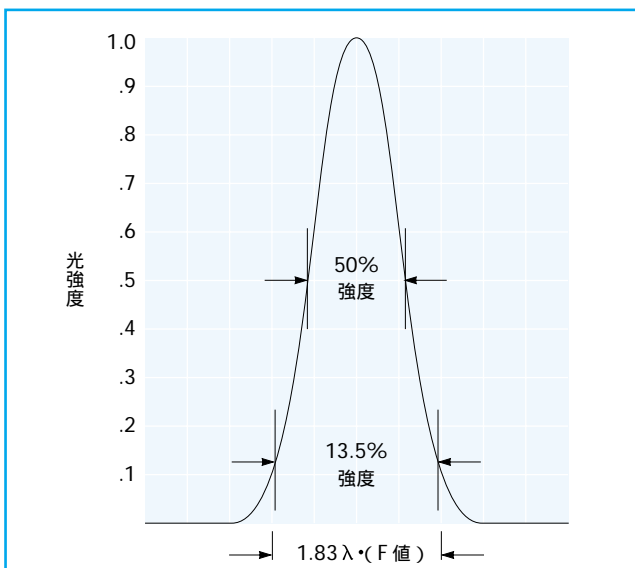


図 2.9 像面でのガウス強度分布

裾切り比が1のとき、パワーロスとスポットサイズのバランスが良いようです。T=2の(ほぼ一様な入射強度分布の)とき、パワーロスの割合は60%です。T=1のときは、 d_{1/e^2} はT=2のときの8.0%だけ大きくなりますが、パワーロスは13.5%で済みます。0.7~1.0の裾切り比ですと、パワーロスが少なめで、スポットサイズが理想値より僅かに大きくなるだけですので、この範囲の値がよく使われます。レーザー光のパワーロスを極力小さくしたい場合は、0.5程度の小さい裾切り比が用いられます。もっとも、このように小さい裾切り比の場合は、レンズの有効開口部のかなりの部分が無駄になってしまいます。

3つの裾切り比に対するスポット径とパワーロスの割合

裾切り比	d_{FWHM}	d_{1/e^2}	d_{zero}	PL
無限大	1.03	1.64	2.44	100%
2.0	1.05	1.69		60%
1.0	1.13	1.83		13.5%
0.5	1.54	2.51		0.03%

空間フィルタリング

光学部品の表面の塵埃によりレーザー光が散乱されて、ホログラフィックゾーンプレートに似た干渉縞が生じることがあります。この散乱光による干渉縞の間隔が密でコントラストが強く出る場合には、干渉計やホログラムのアプリケーションでの信号パターンに大きなノイズとして重畳してしまうため、重大な支障を来します。空間フィルタリングは、簡単な方法ですが、この余計な干渉成分を取り除き、極めて滑らかな放射強度分布を得るのに有効です。散乱光はレーザー光とは違った方向に進みますので、両者はレンズの焦点面で空間的に分離されます。直射ビームの集光スポットを中心に小さな開口を置くことにより、散乱光を遮蔽

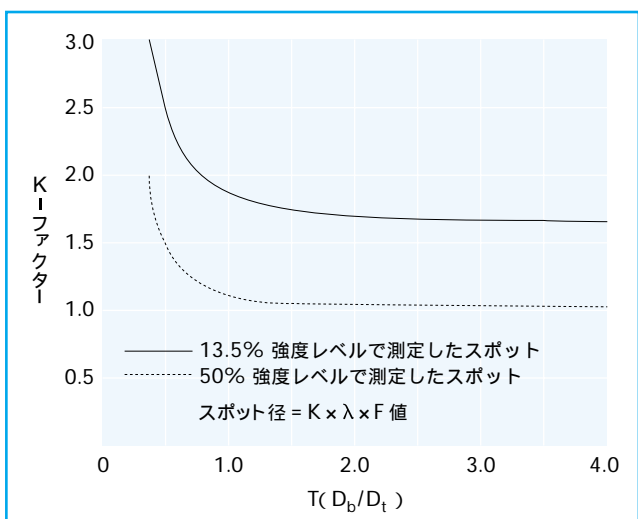


図 2.10 裾切り比の関数としてのK-ファクター

し直射レーザービームのみをそのまま通すことができます。その結果、極めて滑らかな放射強度分布の発散光ビームが得られますが、これをレンズ系を用いて同程度に滑らかな平行ビームに直すことができます。

空間フィルタリングの完璧度と位置合わせのし易さとのバランスを考えると、開口の直径を、集光点での $1/e^2$ 強度の直径の2倍、つまり99%のパワーを包含する直径の1.33倍に選ぶのが最適です。CVIメレズグリオの空間フィルターは、集光レンズとピンホールより構成され、ピンホールの位置をx-y-z方向に微調整できるようになっています。

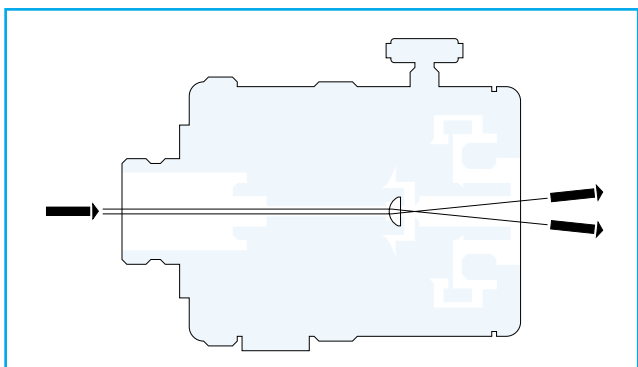


図 2.11 空間フィルターは、滑らかな放射強度分布のビームにします。

アプリケーションノート

モジュール化された多軸の空間フィルター

CVIメレズグリオでは空間フィルターとして、精密マイクロメータ付きの3軸ユニット(07 SFM 701)をご用意しています。この装置は、ビームが装置を透過して出てくる構造になっています。この空間フィルターとそれに組み込む標準タイプの顕微鏡対物レンズおよびマウント付きのピンホールについては、本カタログの「アパーチャーおよびスペイシャルフィルター」の章をご参照ください。

ご自身で空間フィルターを作成される方には、マウント無しピンホールをお勧めします。個々の精密ピンホールは、一般用途の空間フィルタリング向けにご使用いただけます。なお、高エネルギーレーザー用の精密ピンホールは、高いパワーのレーザー光に耐えられるよう特別に造られた製品です。

その他の空間フィルタリングの需要にお応えして、CVIメレズグリオでは、レーザーに直接装着できる種々のモジュールタイプのビームエクステンダーや空間フィルタリング装置も取扱っております。レーザー&オプティクスガイド(2)には、09 LSF 011空間フィルターと、種々の集光レンズ、ピンホールが記載されています。

レンズの選択

Lens Selection

ガウシアンビーム用の光学系の選択の際に用いられる最も重要な関係式は、次の通りです。

集光スポット半径：

$$w = \frac{\lambda f}{w_0} \quad (2.4 \text{ から})$$

ビーム伝播則：

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.2 \text{ から})$$

$$w_0(\text{最適化}) = \left(\frac{\lambda z}{R} \right)^{1/2}$$

$$z_R = \frac{w_0^2}{\lambda} \quad (2.7 \text{ から})$$

加えて、無限共役比のもとでの平凸レンズの球面収差による軸上スポット径の次のような近似式を用いることもできます。

$$(\text{3次の球面収差による}) \text{スポット径} = \frac{0.067 f}{(f/\#)^3}$$

この公式は均一照射光に対するもので、ガウス強度分布に対するものではありません。上式によるスポットサイズは、実際より大きめの値を与えますので、レンズを控え目に選択する場合には有効となります。上式はスポットの直径を与えますが、ガウシアンビームの公式はスポット半径の関係式であることに、注意してください。

例 1: 80 m先で 8 mmのスポット径を得る

CVIメレスグリオのヘリウムネオンレーザー05 LHR 151を用いて、80 m先で8 mm径のビームスポットをつくること。(図 2.12参照)

HeNeレーザーの製品表によると、05 LHR 151のスポット半径は0.4 mmです(表ではビーム直径が記載されていますので2で割ります)。コリメートビームと仮定して、伝播公式を用いて80 m先でのスポットサイズを計算します。

$$w(80 \text{ m}) = 0.4 \left[1 + \left(\frac{0.6328 \times 10^{-3} \times 80,000}{(0.4)^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 40.3 \text{ mm} \quad \text{ビーム半径}$$

つまり、80.6 mmのビーム径になります。これは我々の求める値の10倍大きい値です。 w_0 (最適化)の公式を適用して、80 m先での最適コリメート化ビームの半径を求めると、

$$w_0(\text{最適化}) = \left(\frac{0.6328 \times 10^{-3} \times 80,000}{R} \right)^{1/2} = 4.0 \text{ mm}$$

つまり、ビームウエストの倍率を10倍(4.0 mm/0.4 mm)にすれば、ビーム径8 mmのコリメート化ビームが得られます。真ん中の40 m先でビームウエストが来るようにすると、ビームウエスト w_0 (最適化)=4.0/2 mmで、80 m先で再び8 mmのビーム径になります。CVIメレスグリオのビームエクspander-09 LBX 003または09 LBM 013のどちらかを使えば、10×のビーム拡大率が得られます。

しかしながら、スペースの制約上、レンズ系を、例えば50 mm以下の長さにする必要が有るとしましょう。これは、カタログレンズを使って実現できます。図 2.13に、ビームエクspanderの2つの基本型を示します。ケプラー型は、2枚の正のレンズをお互いの焦点を重ねて配置したものです。ガリレー型は、負の(発散)レンズと正の(コリメート)レンズをお互いの焦点を重ねて配置したものです。どちらの場合でも、光学系の全長は次式で与えられます。

$$\text{全長} = f_1 + f_2$$

倍率は次式で与えられます。

$$\text{全長} = \frac{f_2}{f_1}$$

ガリレー型では、倍率が負の値になりますが、これは倒立像を意味し、レーザービームでは重要なことではありません。ケプラー型では内部の焦点で一度集光するので、空間フィルターにも応用できますが、倍率が同じであれば、ガリレー型の方が全長を短くできます。

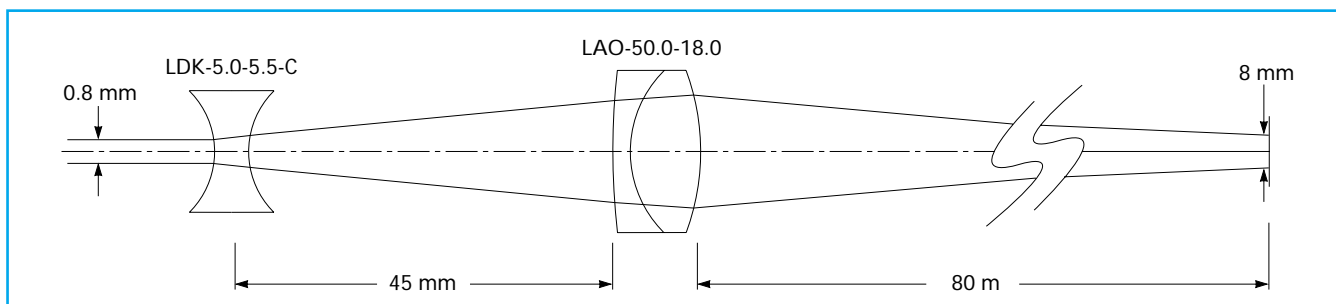


図 2.12 80 m先で望むスポットサイズにするためにレンズの間隔を適当に調整します。

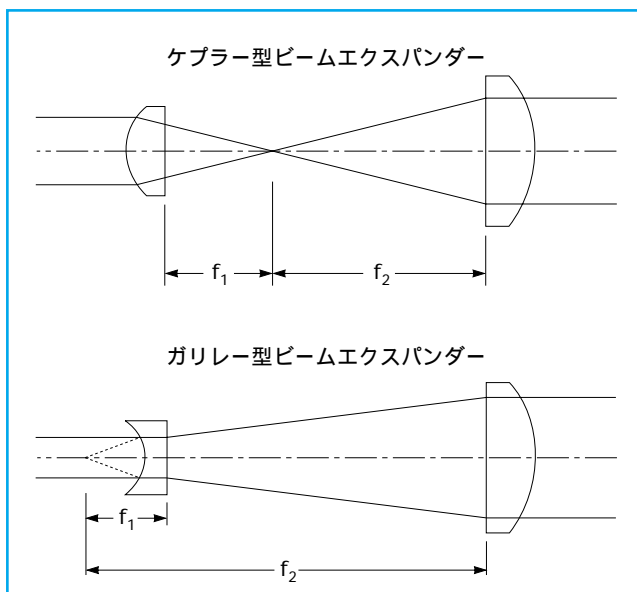


図 2.13 2種類のビームエクスペンダー

エクスペンダー内のレンズの焦点距離を決めるには、次の2つの公式から求めることができます。この場合、

$$f_1 + f_2 = 50$$

および

$$\frac{f_2}{f_1} = -10$$

倍率を負にしていますが、これはガリレー型のエクスペンダーを意味します。上の2つの式から、 $f_2 = 55.5 \text{ mm}$ および $f_1 = -5.5 \text{ mm}$ となります。

球面収差を小さくする意味では、発散レンズに平凸を使う方が良いのですが、カタログの平凸レンズは - 10 mmが最短の焦点距離です。ところが、両凹レンズには - 5 mmのものがあります。両凹レンズは、球面収差的には不利ですが、焦点距離が短くてF値が大きいため、収差の影響は小さいといえます。光線追跡によっても、このことを確認できます。

発散レンズに - 5 mmの両凹レンズを選ぶとして、次は50 mmの焦点距離のコリメート用レンズを選ぶ番です。平凸レンズでよいかどうかを観るために、球面収差の公式を用います。

$$\text{球面収差によるスポットサイズ} = \frac{0.067 \times 50}{6.25^3} = 14 \mu\text{m}$$

一方、回折によるスポット径は、

$$2w_0 = \frac{2(0.6328 \times 10^{-3})50}{4.0} = 5 \mu\text{m}$$

これより、平凸レンズでは不十分であることが判ります。従って、次に試すのは、LAO-50.0-18.0のようなアクロマートでしょう。P1.26に記載のスポットサイズの表から、このレンズが、そのF値では、回折限界特性を有するものと判断できます。このようにして最終的に決まった光学系は、LDK-5.0-5.5-Cと、それから45 mm離して、LAO-50.0-18.0をそのフリントレンズ側をレーザー側に向けて配置したものになります。

例 2: 100 mm以上の距離において10 μmのスポット径を得る

05 LHR 151 ヘリウムネオンレーザーの出力ビームを直径10 μmのスポットに集光すること。ただし、集光光学系の最後の面から集光点までの間が100 mm以上あること。(図 2.14参照)

レンズの焦点距離を100 mmとし、ガウシアンビームの集光の公式を用いて、以下のスポット半径を得ます。

$$w = \frac{0.6328 \times 10^{-3} \times 100}{0.4} = 50 \mu\text{m}$$

つまり、0.8 mm径の入射ビームを焦点距離100 mmのレンズで集光すると、レンズが回折限界特性を有する場合の集光スポット径は100 μmです。望むスポット径を得るには、集光する前に、ビームを10倍に拡大する必要があります。CVIメレスグリオの標準の10×のエクスペンダーでも前出の例の10×のエクスペンダーでも、どちらでも使用できます。

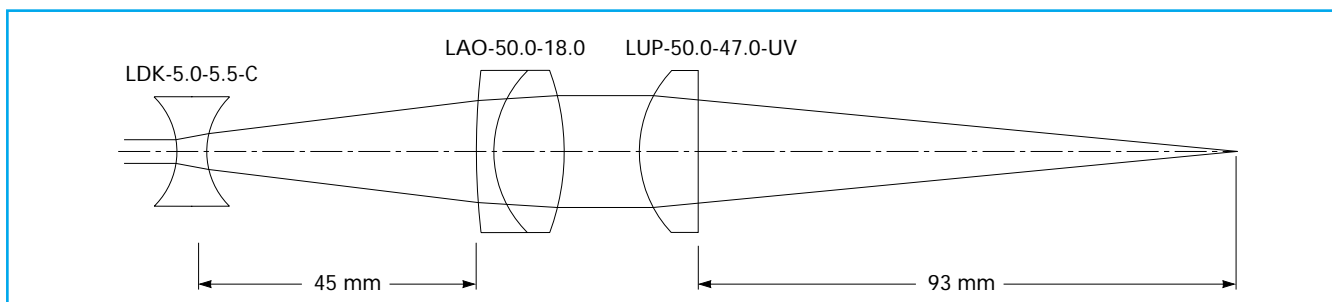


図 2.14 長い作動距離を有するレーザー集光系

さて、この場合、8 mmの直径のビームを100 mmのレンズで集光するので、 $f/12.5$ で用いることになります。この程度のF値であれば、平凸レンズが使いそうです。念のため球面収差を調べると、

$$(\text{球面収差による})\text{スポットサイズ} = \frac{0.067 \times 100}{12.5^3} = 3 \mu\text{m}$$

従って、凸側をビームエキスパンダーに向けた平凸レンズで回折限界性能が得られることとなります。

カタログから標準のレンズを選ぶ際には、製造公差を考慮する必要があります。ビームエキスパンダーの入射レンズについては、入射ビーム径が1 mm以下であれば、このようなレンズの実効開口に対して、レンズの製造公差による波面収差量は波長の数分の1程度と十分小さいので、心配には及びません。しかし、もっと大きなビーム径では、レンズの品質が問題になります。径の大きなビームを精密に取り扱うには、LUP-50.0-47.0-UVのような精密グレードのレンズを選ぶ必要があります。

例3: ダイオードレーザーのコリメート

ダイオードレーザーの出力光を25 mm径の回折限界特性のコリメートビームにすること。出力光の波長は780 nm、発散角(全角)は $60^\circ \times 20^\circ$ とする。(図 2.15参照)

まず最初に、光源から 60° の発散角で広がる光をすべて取り込むのに必要な開口数を計算します。開口数は、発散角の半角の正弦関数で定義されますから、

$$\text{開口数 } NA = \sin 30^\circ = 0.5$$

F値は、ほぼ $1/(2 NA)$ ですので、上式は $f/1$ に当たります。F値が非常に小さいので、アクロマートを含めて単レンズでは所要の特性が得られません。この場合には、0.5の開口数を有するGLC-8.0-8.0-830のような、高度に補正された複数枚構成のダイオードレーザー用コリメーティングレンズの使用をお勧めします。

問題のダイオードレーザーにGLC-8.0-8.0-830を用いると、8 mm \times 2.7 mmの大きさの楕円形状のコリメート光が得られます。次に、ビームの径が小さいとビームの発散が大きくなるの

で、ビームの小さい方の径を大きい方の径まで拡大してやります。楕円状ビームの長径と短径の比が3:1ですので、3倍のアナメルフィックプリズムペアGPA-3X-8.0-830、を用いてビームを拡大します。こうして、直径8 mmの円形コリメート光が得られます。

最後に、25 mmのビーム径にするために、ビームを3.125倍に拡大します。この光学系には長さの制約が課せられていないので、エキスパンダーの全長を長めにして $f/10$ 以上で使うのが球面収差の面で安全です。この程度のF値であれば、単レンズを用いても回折限界特性が得られます。

$f/10$ および直径8 mmの入射ビームですから、コリメーターレンズの入射側に焦点距離80 mmのレンズが必要です。回折限界特性を要求していますので、(LUP シリーズの)精密単レンズから選択します。この場合、ビームの径が比較的大きいため、レンズの製造公差が波面収差に重要な影響を及ぼすので、高精度のレンズを使うのが望ましいのです。

このシリーズで、80 mmに最も近いレンズは焦点距離100 mmのLUP-12.5-47.0-UVです。 $f/12.5$ で用いられ、これが回折限界特性を有することが球面収差の公式を用いて調べても判ります。最後に、焦点距離が $3.125 \times 100 \text{ mm} = 313 \text{ mm}$ のコリメート用レンズが必要です。これにはLAO-349.9-40.0が最適です。アクロマートは一層厳しい公差で製造されていることが利点の一つです。

このようにして、最終的に得られる光学系は、GLC-8.0-8.0-830がGPA-3X-8.0-830に直接に接続され、その後手ごろな間隔を空けてLUP-12.5-47.0-UVがその凸面をダイオードレーザー側に向けて配置されます。一番後にLAO-349.9-40.0が、そのフロントレンズ側をダイオードレーザーに向けて、LUP-12.5-47.0-UVから約444 mm隔てて配置されます。

余談になりますが、LAO シリーズの標準コーティングは、780 nmの波長では減反射特性が良くありませんので、780 nmで最適化された/076 コーティングを指定してください。

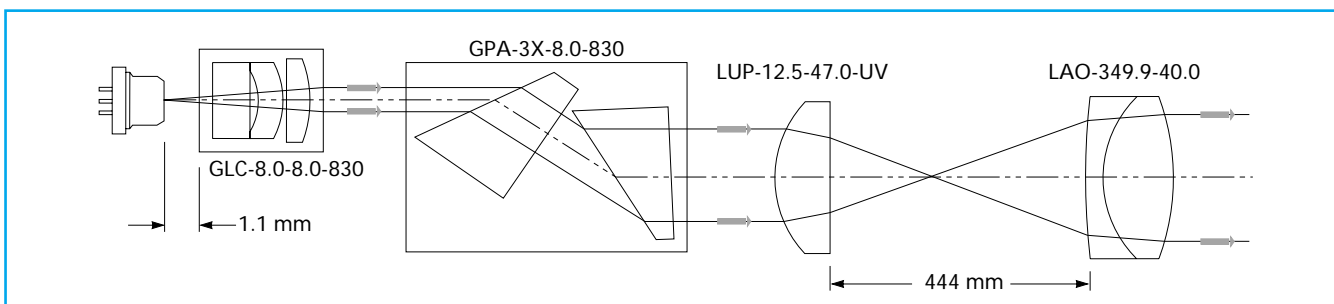


図 2.15 CVIメレスグリオのダイオードレーザー用光学部品を相互に関連して使用した例。