

JAERI-Research

2003-035



JP0450265



フレネルゾーンプレートを用いた
ナノスケールX線レーザービームの生成

2004年2月

永島 圭介・加道 雅孝・錦野 将元

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

フレネルゾーンプレートを用いたナノスケールX線レーザービームの生成

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター
永島 圭介・加道 雅孝・錦野 将元

(2003年12月4日受理)

コヒーレントX線を用いた利用研究とそのための光学技術開発は今後期待されている新しい研究分野である。日本原子力研究所では、世界で初めて空間的にフルコヒーレントの軟X線レーザーを開発することに成功した。このX線レーザーは、波長13.9 nmの単色光で、数ピコ秒の時間幅と、発散角0.2 mradという極めて高い指向性を持っている。このX線レーザーをフレネルゾーンプレートで集光して超高強度のナノX線ビームを生成する実験装置を製作した。数値計算によって詳細な集光特性を評価した結果、およそ 5×10^{14} W/cm²のX線強度が得られることが分かった。

Generation of Nano Scale X-ray Laser Beam Using Fresnel Zoneplate

Keisuke NAGASHIMA, Masataka KADO and Masaharu NISHIKINO

Advanced Photon Research Center
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto

(Received December 4, 2003)

Coherent x-ray and its applications are expected as new scientific fields in near future. We have succeeded in developing a soft x-ray laser with full spatial coherence for the first time. This x-ray laser, which is monochromatic light with the wavelength of 13.9 nm, has temporal duration of a few pico-second and remarkable beam divergence of 0.2 mrad. We developed an experimental device for generating nano scale x-ray laser beam using Fresnel zoneplate. From numerical analysis for the focusing property, it is found that this device generates an x-ray intensity of about 5×10^{14} W/cm².

Keywords: X-ray Laser, Spatial Coherence, Nano Scale, Fresnel Zoneplate, X-ray Intensity

目次

1. 序論	1
2. 実験装置	1
3. ゾーンプレートによる集光特性	2
4. 数値計算による解析	5
5. 結論	7
謝辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Device	1
3. Focusing Property of Fresnel Zoneplate	2
4. Numerical Analysis	5
5. Conclusion	7
Acknowledgement	7
References	7

This is a blank page.

1. 序論

現在、SPring-8等に代表される放射光から得られる高輝度なX線は、物質科学、生命科学から産業応用に至る極めて広範な領域で利用されている。さらに、次世代の放射光源としてコヒーレントX線の発生を目指した大規模な研究開発が世界中で進められている [1]。一方、1960年にメイマンによって発明されたレーザーは、その直後から短波長へ向けた研究開発が進められてきた。軟X線からX線領域でのレーザー開発については、1984年に波長21 nm付近でX線の誘導増幅が観測されて以来 [2]、より短波長での発振とレーザービーム特性の改善を目指して極めて多くの研究が行われてきた [3, 4]。特に、レーザー固有の特性であるコヒーレンスを向上することが、最も重要な課題の1つであるが、これまでは十分なコヒーレンスを持つX線レーザーの生成は出来なかった。

日本原子力研究所では、超短パルスレーザー技術を用いた小型装置により、世界で初めて空間的にフルコヒーレントかつ回折限界の軟X線レーザー光を生成することに成功した [5]。このX線レーザーは、波長 13.9 nm の単色光（波長幅は 10^{-4} 程度）で、パルス幅が 8 ps、光源サイズは約 50 μm で、ビーム発散角は 0.2 mrad である。この波長は、軟X線領域で唯一高い反射率の多層膜ミラーが開発されている領域であり、また、現在までに達成されているゾーンプレートの空間分解能（約 20 nm）を実現できる波長である。従って、このX線レーザーを用いることにより、従来にない高度な光学利用が期待できる。その1つとして、高強度で極めて小さいサイズ（ナノメートルオーダー）のX線ビームが考えられる。レーザーの出力強度が飽和強度まで達する場合には、10 μJ 程度の出力エネルギーが得られるので、パルス当りの光子数は約 10^{12} 個となる。このレーザー光を 10 %の効率で集光径が 100 nm まで集光することが出来れば、集光点でのレーザー強度は 10^{15} W/cm² となる。このナノX線ビームを用いることにより、高空間分解能の局所X線分析、極微細領域への局所照射効果、高強度X線場における非線形過程等、従来のX線光源では実現出来なかった応用研究が可能になる。

2. 実験装置

ここでは、X線レーザーを集光してナノメートルオーダーのX線ビームをつくるのにフレネルゾーンプレートを用いる。ゾーンプレートは、ゾーンの数に十分大きな値の場合、焦点位置で無収差回折像の強度分布に一致する。但し、その絶対値は、振幅型ゾーンプレートでは $1/\pi^2$ 倍、位相型ゾーンプレートでは $4/\pi^2$ 倍となる。また、レンズのような通常集光素子に比べて、焦点距離の波長依存性（色収差）が非常に大きいという問題がある。しかしながら、光源としてX線レーザーを用いる場合は、単色性が非常に高いために色収差による影響はほとんど無視できる。波長 13.9 nm のX線レーザーを用いる場合、比較的原子番号の低い固体物質への侵入深さは 100

nm 程度になる。位相型ゾンプレートの方が効率の点から有利であるが、上記の波長で π 程度の位相差をつけるためには、やはり 100 nm 程度の厚みが必要となる。従って、理想的な位相型ゾンプレートを製作することは困難で、位相型と振幅型の中間的な特性を持ったゾンプレートとなる。

図 1、2 に、ナノ X 線ビーム生成のために製作した実験装置の概要を示す。装置は、円形の真空容器、光学機器を設置するための光学ボード、X 線多層膜ミラー、ゾンプレート、ピンホール、及び、これらの光学素子を取り付ける高精度駆動ステージで構成されている。真空容器の変形による歪みが光学機器に影響しないように、真空容器と光学ボードは機械的に絶縁されている。ゾンプレートは英国の Silson 社で製作した。以下に、ゾンプレートの性能仕様を示す。

最内部ゾーン外径	10.5 μm
最外部ゾーン外径	275 μm
最外部ゾーン幅	100 nm
ゾーン総数	686
ゾーン材質 (PMMA) 厚み	170 nm
基盤材質 (窒化シリコン) 厚み	100 nm
焦点距離 (波長 13.9 nm)	1.98 mm

厚さ 100 nm の窒化シリコン基盤の上に 170 nm 厚の PMMA でゾーンが形成されている。真空容器に入射した X 線レーザー光は 2 枚の X 線多層膜ミラーで反射されることにより、ほとんど直線偏光した光 (S 偏光) になる。入射した X 線レーザー光は、ほぼ平行なビームであるが、発散角 0.2 mrad による焦点位置のずれが生じる。この焦点位置のずれは、焦点距離の 0.15 % 程度であり、ゾンプレートの焦点深度 (焦点距離の 0.29 % 程度) の半分程度である。焦点位置に置いたピンホールは、背景光を遮るためのもので、駆動ステージによりレーザー光の伝搬方向及び直角方向に走査することができる。

3. ゾンプレートによる集光特性

ゾンプレートによって集光した X 線を直接測定することは困難なので、ここでは、解析及び数値計算によって、その集光特性を評価する。

まず、光源から出た光 (波動) が開口を通過してある点で観測される場合を考える。光源 S、及び、観測点 R が開口から十分に遠方にある場合、波長 λ (波数 $k = 2\pi/\lambda$) の光の振幅強度は、

$$U(R) = \frac{iA}{\lambda r_0 s_0} \int \exp\{-ik(r+s)\} dQ \quad (1)$$

と近似できる [6]。ここで、 s_0 、 r_0 は開口中心 O から光源及び観測点までの距離、 s 、 r は開口面 Q 上の点 P から光源及び観測点までの距離である。また、 A は強度に比例する定数で、積分は開口面 Q 上での面積積分である。ここでは、開口面は光源と観測点を結んだ直線とほぼ直交しているとした。座標位置を光源 $S(x_0, y_0, z_0)$ 、観測点 $R(x, y, z)$ 、及び、開口面上の点 $P(\xi, \eta, 0)$ とすると、フレネル回折 (ξ, η について2次の項までとった場合)の式は、

$$U(R) = \frac{iA}{\lambda r_0 s_0} \exp\{-ik(r_0 + s_0)\} \int \exp\left\{-ik\left[\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{2r_0} + \frac{(\xi-x_0)^2 + (\eta-y_0)^2}{2s_0}\right]\right\} d\xi d\eta \quad (2)$$

開口に対して平行光が垂直に入射する場合 (光源位置が非常に離れている場合)は、

$$U(R) = \frac{iA_0}{\lambda r_0} \exp(-ikr_0) \int \exp\left\{-ik\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{2r_0}\right\} d\xi d\eta \quad (3)$$

$$A_0 = \frac{A}{s_0} \exp(-iks_0)$$

となる。

開口が半径 a の円形開口の場合、円筒座標を用いて、光源位置を $S(r_0, \phi_0, z_0)$ 、観測点を $R(r, \phi, z)$ 、開口面上の点を $P(\rho, \theta, 0)$ とすると、式(2)は、

$$U(R) = \frac{iA}{\lambda z z_0} \exp\{-ik(z+z_0)\} \times \int \exp\left\{-ik\left[\frac{\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\theta - \phi)}{2z} + \frac{\rho^2 + r_0^2 - 2\rho r_0 \cos(\theta - \phi_0)}{2z_0}\right]\right\} \rho d\rho d\theta \quad (4)$$

点光源が軸上にある場合 ($r_0 = 0$)は、角度方向の積分が簡単に実行できて、

$$U(R) = \frac{2\pi iA}{\lambda z z_0} \exp\left\{-ik\left(z+z_0+\frac{r^2}{2z}\right)\right\} \int_0^a \exp\left\{-ik\left(\frac{\rho^2}{2z} + \frac{\rho^2}{2z_0}\right)\right\} J_0\left(k\frac{r\rho}{z}\right) \rho d\rho \quad (5)$$

さらに、平行光が垂直に入射する場合の式(3)は、

$$U(R) = \frac{2\pi iA_0}{\lambda z} \exp\left\{-ik\left(z+\frac{r^2}{2z}\right)\right\} \int_0^a \exp\left\{-ik\frac{\rho^2}{2z}\right\} J_0\left(k\frac{r\rho}{z}\right) \rho d\rho \quad (6)$$

ここで、ゾーンプレートの n 番目のゾーンの外径を R_n とする。この値は、点光源

S から開口面上の点 P を通って観測点 R までの距離と点光源から観測点までの距離の差 $SPR - SR$ が半波長 $\lambda/2$ の n 倍になる半径であるから、

$$\sqrt{r_0^2 + R_n^2} + \sqrt{s_0^2 + R_n^2} - r_0 - s_0 = \frac{\lambda}{2}n \quad (7)$$

距離 s_0 、 r_0 に比べて R_n は小さいとして展開すると、

$$R_n = \sqrt{n\lambda f} \quad (8)$$

但し、 f はゾーンプレートの焦点距離で、

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{r_0} + \frac{1}{s_0} \quad (9)$$

n 番目のゾーンからの寄与は、

$$\begin{aligned} U(R) &= \frac{iA}{\lambda r_0 s_0} \int_0^{2\pi} \int_{R_{n-1}}^{R_n} \exp\{-ik(r+s)\} \rho \, d\rho \, d\theta \\ &= \frac{2\pi iA}{\lambda r_0 s_0} \exp\{-ik(r_0+s_0)\} \int_{R_{n-1}}^{R_n} \exp\left\{-ik\frac{\rho^2}{2f}\right\} \rho \, d\rho \\ &= \frac{A \exp\{-ik(r_0+s_0)\}}{r_0+s_0} \left\{ \exp\left(-i\frac{k}{2f}R_n^2\right) - \exp\left(-i\frac{k}{2f}R_{n-1}^2\right) \right\} \\ &= \frac{A \exp\{-ik(r_0+s_0)\}}{r_0+s_0} \left\{ \exp(-i\pi n) - \exp(-i\pi(n-1)) \right\} \\ &= 2A_1 \exp(-i\pi n) \end{aligned} \quad (10)$$

但し、

$$A_1 = \frac{A \exp\{-ik(r_0+s_0)\}}{r_0+s_0}$$

ゾーンの総数を N として、偶数番目（または奇数番目）のゾーンからの寄与を足しあわせたもの（振幅型ゾーンプレートの場合）は、

$$U(R) = 2A_1 \left\{ \exp(-i2\pi) + \exp(-i4\pi) + \dots + \exp(-iN\pi) \right\} = NA_1 \quad (11)$$

従って、振幅強度は N 倍、光の強度は N^2 倍になる。位相型ゾーンプレートの場合には、すべてのゾーンからの寄与を足しあわせたものになるので、振幅強度は $2N$ 倍、光の強度は $4N^2$ 倍になる。

平行光がゾーンプレートに垂直に入射する場合を考える。 n 番目のゾーンによる光軸上での寄与は、式(6)を計算することにより、

$$\begin{aligned}
 U(z) &= \frac{2\pi i A_0}{\lambda z} \exp(-ikz) \int_{R_{n-1}}^{R_n} \exp\left(-ik \frac{\rho^2}{2z}\right) \rho d\rho \\
 &= A_0 \exp(-ikz) \left\{ 1 - \exp\left(i\pi \frac{f}{z}\right) \right\} \exp\left(-i\pi \frac{f}{z} n\right)
 \end{aligned} \tag{12}$$

偶数番目（または奇数番目）のゾーンからの寄与を足しあわせたものは、

$$\begin{aligned}
 U(z) &= A_0 \exp(-ikz) \left\{ 1 - \exp\left(i\pi \frac{f}{z}\right) \right\} \left[\exp\left(-i2\pi \frac{f}{z}\right) + \exp\left(-i4\pi \frac{f}{z}\right) + \dots + \exp\left(-iN\pi \frac{f}{z}\right) \right] \\
 &= A_0 \exp(-ikz) \left\{ 1 - \exp\left(i\pi \frac{f}{z}\right) \right\} \exp\left\{-i\pi \frac{f}{z} \left(\frac{N}{2}-1\right)\right\} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\pi \frac{f}{z}\right)}{\sin\left(\pi \frac{f}{z}\right)}
 \end{aligned} \tag{13}$$

光軸上での光強度分布は、

$$I(z) = 4A_0^2 \sin^2\left(\frac{\pi f}{2z}\right) \frac{\sin^2\left(\frac{N}{2}\pi \frac{f}{z}\right)}{\sin^2\left(\pi \frac{f}{z}\right)} \tag{14}$$

平行光の場合、焦点位置近傍で次のように置くと、

$$z = f(1+\Delta)$$

式(14)は、

$$I(z) = N^2 A_0^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\Delta\right) \frac{\sin^2\left(\frac{N}{2}\pi\Delta\right)}{\left(\frac{N}{2}\right)^2 \sin^2(\pi\Delta)} \tag{15}$$

従って、焦点深度（光軸方向の最初のゼロ点）は、 $\Delta_f = 2/N$ で与えられる。

4. 数値計算による解析

本実験装置で用いたゾーンプレートは、位相型と振幅型の間期的な特性を持っている。物質の複素屈折率を次のように置くと、

$$n = 1 - \delta - i\beta \tag{16}$$

振幅強度の透過率は、

$$T = \exp(-k\beta t) \tag{17}$$

位相の変化量は、

$$P = \exp(ik\delta t) \tag{18}$$

で与えられる。従って、各ゾーンからの寄与を計算する場合、上記の透過率と位相差を掛けてやればよい。従って、ゾーンプレートの集光特性については、式(5)を変形した

$$U(R) = \frac{2\pi i A}{\lambda z z_0} \exp\left\{-ik\left(z+z_0+\frac{r^2}{2z}\right)\right\} \sum_{n=1}^N \int_{R_{n-1}}^{R_n} P_n T_n \exp\left\{-ik\left(\frac{\rho^2}{2z}+\frac{\rho^2}{2z_0}\right)\right\} J_0\left(k\frac{r\rho}{z}\right) \rho d\rho \quad (19)$$

を用いて数値計算する。

開口に対して平行光が入射する場合を考えると、前述したように、ゾーンプレートの焦点位置での強度分布は、無収差回折像の強度分布に一致する。従って、この強度分布の径方向の最初のゼロ点は、

$$r_0 = 0.61 \sqrt{\frac{\lambda f}{N}} \quad (20)$$

で与えられ、 $r_0 = 122 \text{ nm}$ である。無収差回折像の場合、この内部に含まれる強度の割合（集光効率）は約 0.84 である。理想的な振幅型ゾーンプレートの場合、その $1/\pi^2$ 倍であるから、集光効率は 0.085 となる。ここで用いたゾーンプレートの中間的な特性について、PMMA のゾーン厚さを変化させた場合の集光効率を図 3 に示した。厚さ 200-300 nm の領域では、理想的な振幅型の場合に比べて 2 倍以上の集光効率が得られている。ゾーンの製作上からは、厚さが薄い方が作りやすいため、実際の厚さは 170 nm となった。この場合の集光効率は 0.16 である。

このゾーンプレートの焦点深度は、式(15)から焦点距離の 0.29 % であり、その絶対値は $5.7 \mu\text{m}$ となる。焦点位置からずれた場合の径方向の強度分布について計算した結果を図 4 に示す。焦点深度の半分だけずれた位置でのピーク強度は焦点位置での値の約 4 割程度まで下がり、径方向に広がっていることが分る。従って、焦点位置に合わせるためには、光軸方向におよそ $1 \mu\text{m}$ の精度で位置合わせを行う必要がある。

実際に得られている X 線レーザーは、有限の発散角 (0.2 mrad) とガウス型の強度分布を持ったビームである。X 線レーザーの光源サイズは $50 \mu\text{m}$ 程度なので、光源から 0.1 m 以上離れた位置にゾーンプレートを置く場合は、遠視野像となり、ほぼ点光源と考えて問題ない。ゾーンプレート位置が光源位置から離れるとともにビーム径は大きくなる ($z_0 = 1.4 \text{ m}$ のところでビーム強度の半値全幅とゾーンプレート外径がほぼ一致する) が、ビーム径がゾーンプレート外径より大きくなると、一部の光しか集光されなくなってしまう。一方、ゾーンプレート位置が光源位置に近い場合は、ビーム径がゾーンプレート外径より小さくなり、有効なゾーンプレート領域も小さくなるため、集光領域が広がってしまう結果になる。従って、出来るだけ大きなピーク強度を得るためには、最適な位置にゾーンプレートを置く必要がある。ゾーンプレート位置を変えた場合の集光径とピーク強度の変化を図 5 にプロットし

た。これから、 $z_0 = 0.7 \text{ m}$ 程度のところで最大のピーク強度が得られることが分った。この時、式(20)に相当する集光径は 153 nm であった。但し、図示したピーク強度の値は、 1 MW の X 線レーザーパワーで光源から 1 m 離れた位置での中心強度の値 $2.2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ で割った値である。この結果、光源位置での X 線レーザーパワーを 1 MW (飽和強度まで増幅した時に得られる値) とした場合、このゾンプレートを用いて得られる最大のピーク強度は $5.4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ になることが分った (窒化シリコン基盤の透過率約 46 % を含めた値である)。

5. 結論

コヒーレント X 線を用いた利用研究とそのための光学技術開発は今後期待されている新しい研究分野である。日本原子力研究所で開発した軟 X 線レーザーは数ピコ秒のパルス幅で、他の光源では得られない極めて高い空間コヒーレンスと回折限界のビームクオリティを有している。この X 線レーザーをフレネルゾンプレートで集光して超高強度のナノ X 線ビームを生成する実験装置を製作した。集光位置での X 線強度を直接測定することは困難なため、数値計算によって詳細な集光特性を評価した。その結果、ゾンプレートを光源から 0.7 m のところに置いた場合、最大の X 線強度 (約 $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) が得られ、その時の集光径は約 150 nm になることが分った。この X 線強度は、X 線領域での非線形現象が十分に期待できる値である。

謝辞

本研究を行うにあたって、多大な協力および有益な議論をいただいた高崎研究所の小林泰彦氏、関西研究所の横谷明德氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] J. Andruszkow et al., Phys. Rev. Lett. 85, 3825 (2000);
V. Ayvazyan et al., Phys. Rev. Lett. 88, 104802 (2002)
- [2] D. L. Matthews et al., Phys. Rev. Lett. 54, 110 (1985)
- [3] B. J. MacGowan et al., Phys. Rev. Lett. 65, 420 (1990)
- [4] A. Carillon et al., Phys. Rev. Lett. 68, 2917 (1992)
- [5] M. Tanaka et al., Opt. Lett. 28, 1680 (2003)
- [6] 光学入門 (宮本健郎著、岩波書店、1995年発行)

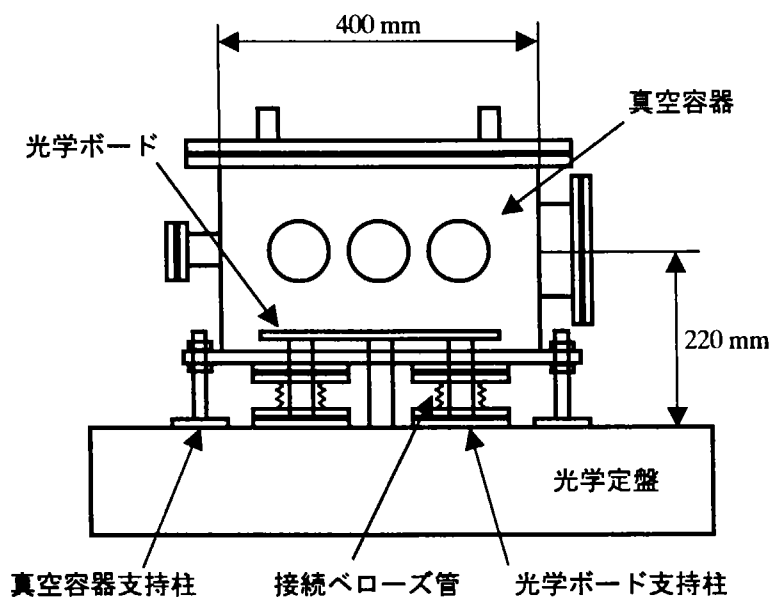


図1 ナノX線ビーム生成のために製作した真空容器

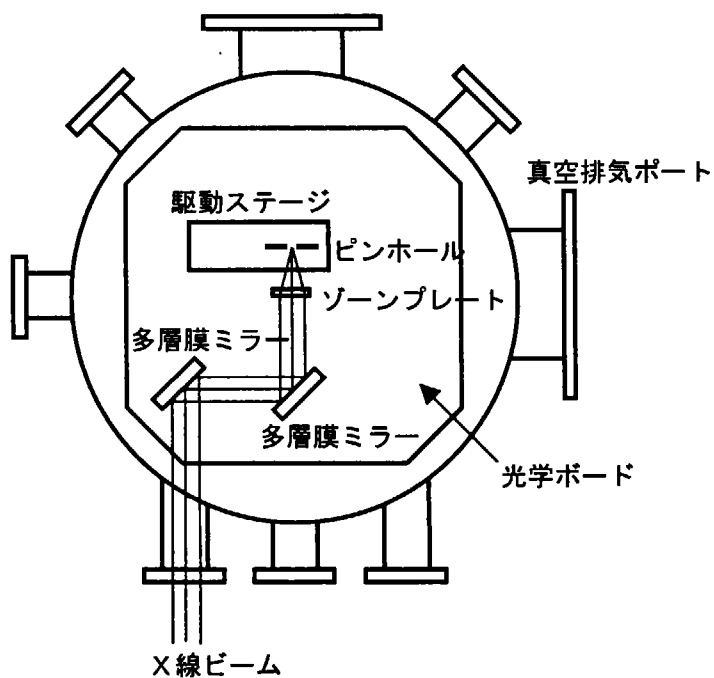


図2 真空容器内の光学機器配置

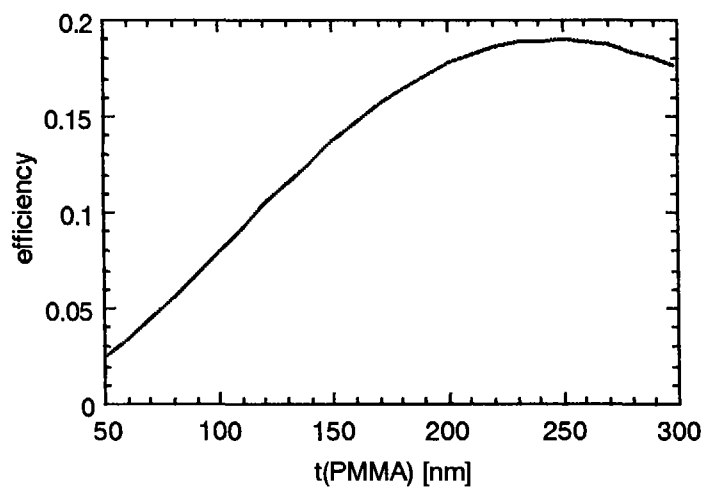


図3 PMMAのゾーン厚さを変化させた場合の集光効率

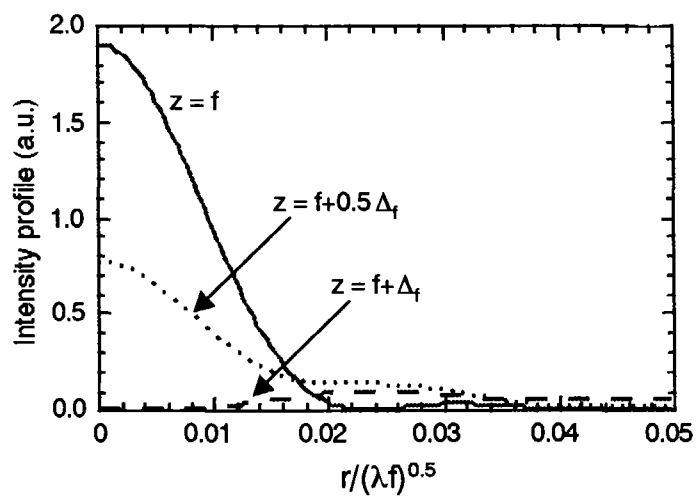


図4 焦点位置からずれた場合の径方向の強度分布

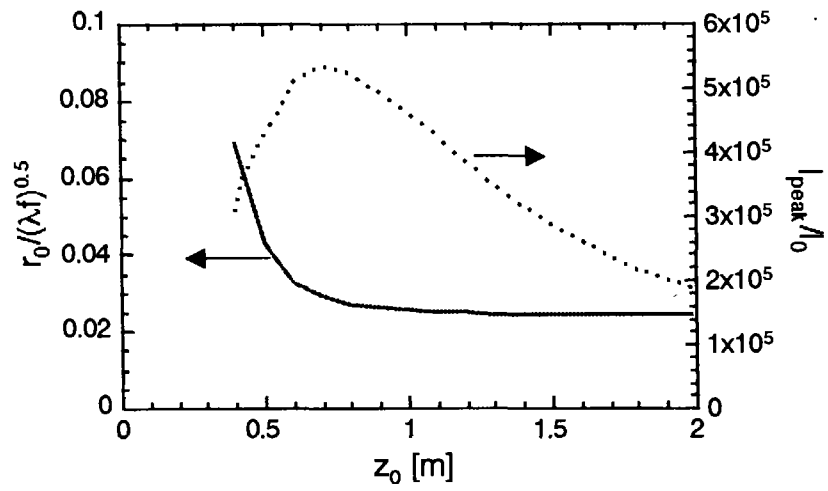


図5 ゾーンプレート位置を変えた場合の集光径とピーク強度の変化

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンテラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オンクストローム	Å
ハン	b
ハール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海甲、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れていない。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
 動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7 50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735 559	14 2233
	0.101325	1.03323	1	760	14 6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻⁴
	6.89476 × 10 ⁻¹	7 03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51 7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4 18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2 77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6 24150 × 10 ¹⁸	
	9 80665	1	2 72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9 29487 × 10 ⁻³	7 23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3 67098 × 10 ⁵	1	8 59999 × 10 ⁵	3412 13	2 65522 × 10 ⁶	2 24694 × 10 ²⁵	
	4 18605	0 426858	1 16279 × 10 ⁻⁶	1	3 96759 × 10 ⁻³	3.08747	2 61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2 93072 × 10 ⁻⁴	252 042	1	778.172	6 58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1 35582	0 138255	3 76616 × 10 ⁻⁷	0 323890	1 28506 × 10 ⁻³	1	8 46233 × 10 ¹⁸	= 735 499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1 51857 × 10 ⁻²²	1 18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2 70270 × 10 ⁻¹¹
	3 7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2 58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

フレネルゾーンプレートを用いたナノスケールX線レーザービームの生成



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています