

筒面鏡を用いたチェレンコフ放射型導波路  
S H G 出力光のコリメート特性

Collimation of Cerenkov-SHG Lightwave with Cylindrical Mirrors

王 明 和田 修己 古賀 隆治

Ming WANG Osami WADA Ryuji KOGA

岡山大学工学部

Faculty of Engineering, Okayama University

Described is the collimation of the crescent-shaped lightwave radiated from a Cerenkov SHG device by using a cylindrical parabolic mirror, or a simple cylindrical mirror. These collimating configurations have the advantage of compensating the aberration due to the anisotropy of SHG crystal. Experimental collimation with a cylindrical mirror shows good agreement with the analytical results. Focusing the collimated lightwave using a lens with focal length 5.3mm and NA 0.5, we got a beam with spot size about  $2\mu\text{m}$  in collimation direction.

1. まえがき

より短波長の小型レーザ光源を得るためのチェレンコフ放射型導波路 S H G \*素子から出射された第二高調波は、その出射方向の断面が円弧状になっている<sup>(1)</sup>。そのような S H 光を筒面鏡光学系を用いてコリメートすることができる<sup>(2) - (6)</sup>。ここでは、理想的な放物筒面鏡および簡単な円筒面鏡を用いた S H 光コリメート系の特性ならびにそれらの最適コリメート条件について述べる。また、円筒面鏡を用いたときの測定結果について報告する。

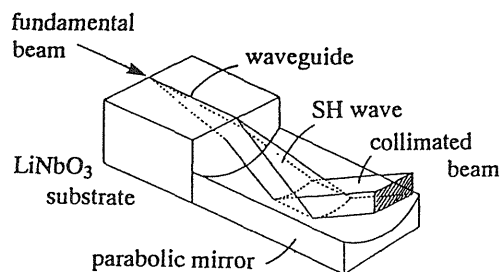


Fig.1 Cylindrical mirror system to collimate the crescent shaped light wave from a Cerenkov SHG. Length of the waveguide used here is assumed 18cm, and the width  $2\mu\text{m}$ , depth  $0.4\mu\text{m}$ .

2. 素子の異方性を考慮した筒面鏡コリメート系

チェレンコフ放射型導波路 S H G 素子は、非線形光学結晶 (Z-cut  $\text{LiNbO}_3$  基板) とその上に作製したチャンネル導波路からなる。図1に示すように、基本波源として赤外半導体レーザ光をチャンネル導波路に入射すると S H 光は基板中に放射される。その放射パターンは、導波路を中心軸としてチェレンコフ角  $\alpha$  (図2) を頂角とした円錐面に沿うような円弧状になる。

2.1 放物筒面鏡によるコリメート系

図1に示すように、基板中に放射された S H 光は素子の出射端面で一度屈折して空气中に放射される。基板が等方性媒質であるとした場合、素子端面での屈折を含む放射は、図2中に破線で示すように、線波源  $O'L$  から空气中への放射と幾

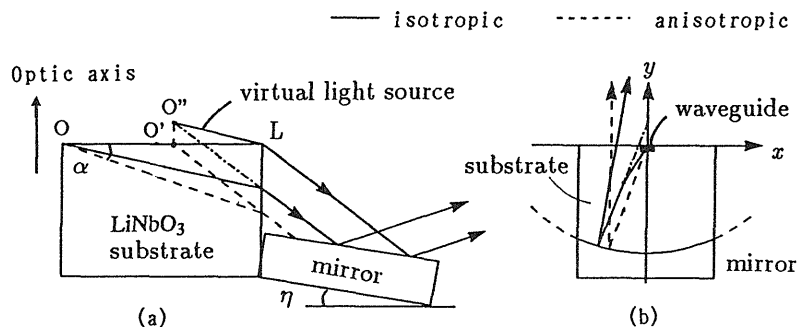


Fig.2 Deviation of virtual light source due to the anisotropy of the substrate.  $\alpha$  is Cerenkov angle,  $\eta$  declining angle. For an isotropic substrate, the virtual light source is  $O'L$ , and  $\eta$  zero.

\*S H G : Second Harmonic Generation; 第2高調波発生。

何光学的に等価と考えられる。このため、等価線波源 $0^\circ\text{L}$ を焦点軸とした放物筒面鏡を用いれば空气中に放射された円弧状のSH光をコリメートすることができる<sup>(2)-(6)</sup>。

一般には、SHG素子が異方性結晶なので、SH光は異方性媒質中に放射される。その結果、SH光の等価線波源 $0^\circ\text{L}$ は見かけ上導波路軸より上にずれたように見える。

このような素子異方性の影響は、図2に示すように鏡を角度 $\eta$ だけあおることにより補正できる。それは、鏡をあおりその焦点軸を等価波源 $0^\circ\text{L}$ に近づけたからである。ただし、等価波源 $0^\circ\text{L}$ は線とはならないため、あおり角 $\eta$ は、一意には決まらず、鏡で反射した後のSH光の強度分布と位相分布を考慮して決定する必要がある。つまり、ビーム強度の大きいところでの位相分布が平坦になるようにすべきである。

## 2.2 円筒面鏡用いたコリメート系

図1の光学系において、SH光のほとんどは導波路の下方向に放射されるため、理想的な放物筒面鏡の代わりに簡単な円筒面鏡が使えると考えられる。

円筒面鏡でSH光ビームをコリメートするとき、ビーム周辺部に対して集光ぎみの効果が現れる(図3)。それに対して、円筒面鏡をその法線方向に平行移動して補正を行った。その移動量を $\Delta$ として、導波路を含む基板の真下方向の断面において、円筒面鏡の焦点軸が素子の異方性による等価波源軸 $0^\circ\text{L}$ に一致するとき $\Delta = 0$ とする。

このように、放物筒面鏡または円筒面鏡を用いることにより、SHG素子の異方性を考慮に入れて、円弧状のSH光をコリメートすることができる。ただし、円筒面鏡を用いた場合、ビーム周辺部の集光気味を補正するために、鏡をその法線方向へ移動することが必要である。

本研究では、筒面鏡のあおり角 $\eta$ とその法線方向への移動量 $\Delta$ を調節し系の最適化を図る。ただし、ここでの最適化は、コリメートビームの強度分布を波面収差と合わせて考えている。

解析において、導波路の基本波に対する減衰定数は $2.8\text{dB/cm}$ とした。また、解析と実験両方とも、基本波の波長は $0.83\mu\text{m}$ で、SH光の波長 $\lambda$ は $0.415\mu\text{m}$ であり、筒面鏡の焦点距離は $6.49\text{mm}$ である。

## 3. 放物筒面鏡系のコリメート特性

放物筒面鏡のあおり角 $\eta$ を変化させた場合について、コリメート後のビーム断面におけるSH光の強度分布と位相分布を光線追跡により求めた。

その結果、波面収差が波長の $1/4$ 以内となる範囲内に含まれるパワーを最大にするための、あおり角 $\eta$ の最適値は $5.7^\circ$ であった。

一方、ビームの強度がピーク値の $1/e^2$ 以上の範囲内における波面収差の標準偏差RMS (Root Mean Square) で評価すると、あおり角 $\eta$ の最適値は $5.5^\circ$ となる。そのときのRMSは最小値が $0.06\lambda$ であり、マレシャルの評価基準<sup>(7)</sup> ( $0.07\lambda$ )を満たす。

このように、素子の異方性を補正するためのあおり角 $\eta$ の最適値は一意的に決まらず、実際に使われるところでの光強度分布がその使用目的に適合するように決められるべきである。

図4-(a)は $\eta$ を $5.5^\circ$ にして素子の異方性を補正したコリメートビームの強度分布の一例を示す。この図は、SHG素子から放射された円弧状のSH光は全幅が約 $4\text{mm}$ にコリメートされたことを示している。

さらにコリメートされたビームを集光したときの解析結果は図4-(b)に示す。この図より、集光したビームのスポットサイズの最小値は、 $x$ 、 $y'$ 方向でそれぞれ $0.90\mu\text{m}$ 、 $0.86\mu\text{m}$ であり、波面収差がない理想ビームを集光したときの回折限界での最小スポットサイズ ( $0.74\mu\text{m} \times 0.88\mu\text{m}$ ) にかなり近づいている。

## 4. 円筒面鏡系のコリメート特性

円筒面鏡を用いたコリメート系において、放物筒面鏡系にならって、素子の異方性を補正したSH

光のコリメート特性について解析を行った。

結果として、まず、あおり角 $\eta$ の最適値は $5.5^\circ$ と得られた。そして、その最適あおり角において、ビーム周辺部の集光気味を補正するための鏡法線方向への移動量 $\Delta$ は次のように二通りの最適値が得られた。

イ) 波面収差が波長の $1/4$ 以下となる範囲に含まれるビームのパワーが最大になるための、 $\Delta$ の最適値は $36\mu\text{m}$ である。その範囲内のパワーが全体パワーの約92%であった。

ロ) コリメートビームの強度がそのピーク値の $1/e^2$ 以上の範囲内における波面収差のRMSが最小になるための $\Delta$ の最適値は $24\mu\text{m}$ となる。そのとき、RMSの最小値約は $0.08\lambda$ であり、約90%のパワーが含まれている。

図5-(a)は、あおり角 $\eta$ が $5.5^\circ$ 、 $\Delta$ が $24\mu\text{m}$ のとき、円筒面鏡によりコリメートされたときのSH光の強度分布の解析結果を示す。それを図4-(a)と比べて分かるように、円筒面鏡系において

Fig.3 Compensation for the focusing effect of the cylindrical mirror, by raising the mirror by  $\Delta$  along its normal ray.  $f_M$  is focal length of the cylindrical mirror.

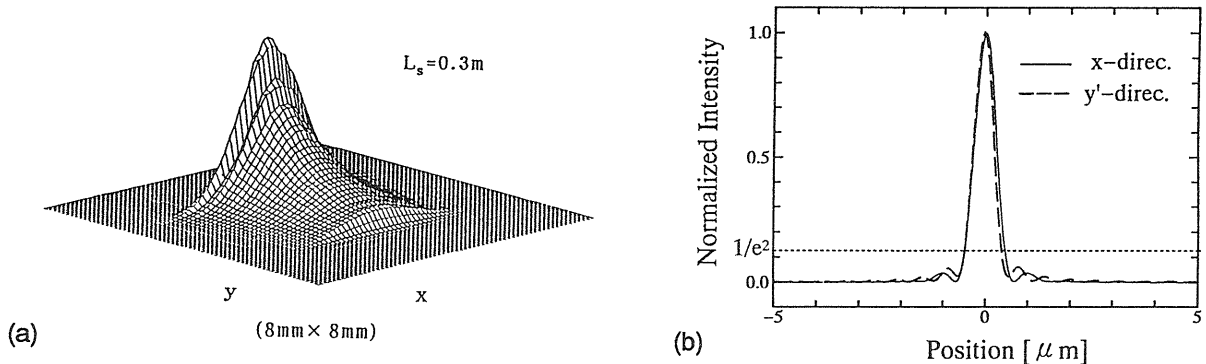
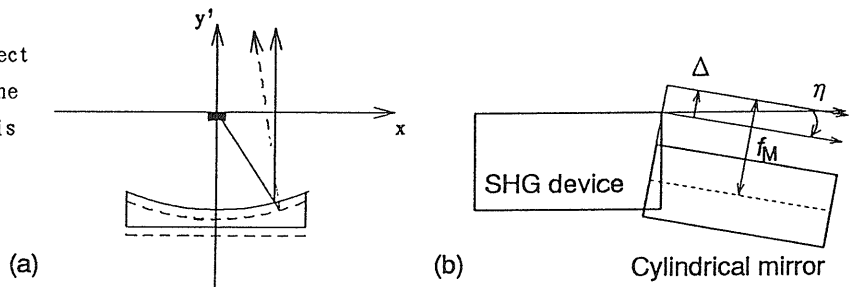


Fig.4 Calculated intensity profiles of the collimated lightwave(a) and its focused beam spot(b) in the parabolic mirror system with  $\eta = 5.5^\circ$ . The distance from mirror to observing screen is 300cm. Focal length of the focusing lens is assumed 5.3 mm.

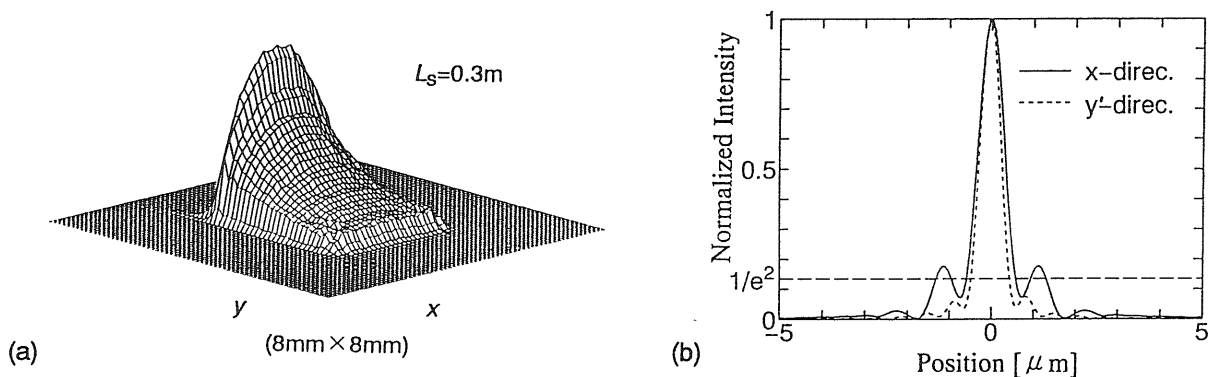


Fig.5 Intensity profiles of the collimated lightwave(a) and its focused beam spot(b) in the cylindrical mirror system, calculated by the same procedure as that of Fig.6 besides raising the mirror by  $\Delta (24\mu\text{m})$ .

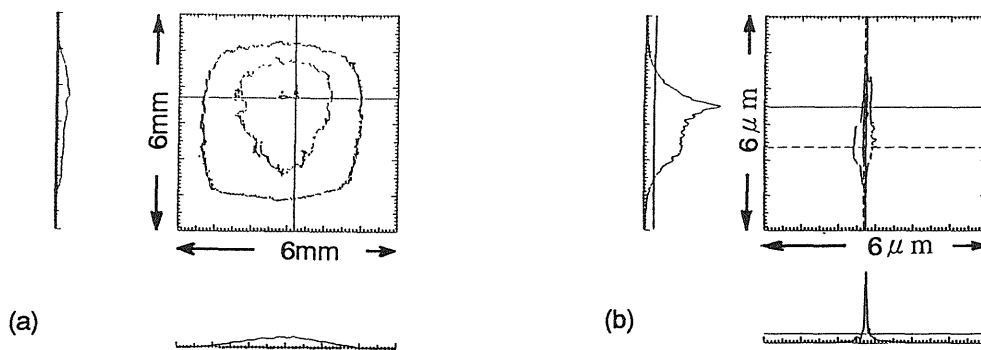


Fig.6 Measured intensity profiles of the collimated lightwave(a) and its focused beam spot(b). Focal length of the focusing lens is 5.3 mm, and NA 0.5.

も放物筒面鏡系と同じコリメートビームが得られる。

また、円筒面鏡系で得られたコリメートビームを集光したときの解析結果は図5-(b)に示す。図4-(b)と比べて、x方向においてサイドローブが生じており、メインローブのスポットサイズが $1.18\mu\text{m}$ であり、放物筒面鏡系のよりやや大きい。また、y'方向でのスポットサイズは $0.91\mu\text{m}$ であり、放物筒面鏡系のとほぼ同じである。

#### 5. 円筒面鏡を用いたコリメートの実験

チェレンコフ型導波路SHGの出力光を円筒面鏡を用いてコリメートする実験を行った。素子から円弧状に放射されたSH光をコリメートして得られたビームの断面強度分布を図6-(a)に示す。これは、円筒面鏡を用いた場合、解析どおりに幅が4mmのコリメートビームが得られたことを示している。

さらに、そのコリメートビームを対物レンズ(焦点距離: 5.3mm、NA: 0.5)で集光した。その結果を図6-(b)に示す。図5と比べて、x方向においては、サイドローブまでを計算して、スポットサイズは約 $2\mu\text{m}$ で、ほぼ解析結果と同じであった。一方、y'方向での集光はできなかった。それは光源のLDへの戻り光の影響によるものと考えている。

#### 6. まとめ

筒面鏡光学系によるチェレンコフ放射型導波路SH光のコリメート特性を解析した。鏡をあおることにより、SHG素子の異方性を補正できることを明らかにした。理想的な放物筒面鏡系に比べて、円筒面鏡を使ったとき、ビームの集光効果が見られる。それに対して、円筒面鏡をその法線方向に平行移動して補正できることを示した。

今後、光源への戻り光の影響の抑制と、光源の波長変動への対策などにより、スポットサイズが $1\mu\text{m}$ 以下のビームを目標にしている。

#### 参考文献

- (1) 谷内他: 応用物理, 56, 12, pp. 1637-1641(1987).
- (2) 水畑他: 信学技報, OQE89-139, pp. 31-36(1990).
- (3) 甲本他: 日本光学会光学連合シンポジウム京都'92, pp. 123-124(1992).
- (4) 広瀬他: 信学技報, OQE90-158, pp. 43-48(1992).
- (5) 甲本他: 信学会第5回超高速量子エレ研究会, (1992).
- (6) 王明他: 信学会春季全国大会, C261(1993).
- (7) 早水: 《光機器の光学II》, pp. 500--512(1989).