

位相共役鏡の自発的空間フィルタリング効果による 高出力半導体レーザーの空間ビーム整形

川崎 和彦・加藤 昭宏・尾松 孝茂・長谷川 朗・小倉 馨夫

千葉大学工学部画像工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Beam Clean-Up of High Power Broad Stripe Laser Diode by Self-Organized Spatial Filtering Effect of Photorefractive Phase Conjugator

Kazuhiko KAWASAKI, Akihiro KATO, Takashige OMATSU, Akira HASEGAWA and Iwao OGURA

Department of Image Science, Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

We report self-aligning beam clean-up of a broad stripe laser diode (LD) using a self-organized spatial-filtering nature of a photorefractive phase conjugator. The smoothed output beam was obtained as a phase conjugate beam with a near-Gaussian field pattern. The phase conjugate reflectivity reached 18%. This clean-up scheme requires no additional element for spatial-filtering, except a photorefractive phase conjugator.

1. はじめに

高出力半導体レーザー（以下 LD と示す）は高出力である反面、レーザー光のビームクオリティーが低く¹⁾、その用途は固体レーザーの励起用に限定されている²⁻⁴⁾。特に、高出力 LD のなかでも主流であるブロードストライプ型 LD は、非点隔差が大きいうえに横モードも高次エルミートガウスモードの多モードで発振しており、集光特性が良くなく空間的コヒーレンスも著しく悪い。ブロードストライプ LD の横モードが浄化され、空間的コヒーレンスが向上すれば、固体レーザー励起のみならず、フーリエ変換、相関演算等の光情報処理への応用も可能となり、光学系の集積化に役立つ。

通常、空間的コヒーレンスを高めるには、空間フィルターの使用が一般的である。しかしながら、十分良好な波面を得るには、ピンホール等の光学部品に高いアライメント精度が要求される。また、非点隔差の大きな光源に対しては、非点隔差の補償用の複雑な光学系を必要とし、そのアライメントにおけるわずかな誤差が著しく取出し効率を悪くする。

フォトリフレクティブ効果を利用すると W/cm^2 程度の光強度で 2 光波混合、あるいは位相共役波発生による

非線形光波結合を実現できるため、LD 光でも非線形光学現象を利用したレーザー光のビーム浄化が可能になる⁵⁻⁷⁾。

これまでに、アレイ型 LD のモード浄化に、2 光波混合⁸⁾、あるいは位相共役鏡を外部鏡に用いた複合共振器⁹⁻¹²⁾等を利用する方法が提案されている。アレイ型 LD はビーム品質においてシングルモード LD に劣るが、隣接アレイから出てくる波面には位相に強い相関があり、その遠視野像は双峰的な形状 (TEM₀₁ モード状) となる。この特徴を利用して、上記のモード浄化では、アレイ型 LD 光の複数のストライプが並んだ近視野像から 1 ストライプ分の波面を切り出す、あるいは、双峰構造をもつ遠視野像から片方のスポットを取り出す等の手法を用いて、あらかじめビーム品質を向上させたのち、フォトリフレクティブ結晶へ LD 光を入射させて光波混合を行っている。

これに対して、高出力 LD で最も一般的なブロードストライプ LD では、活性層に沿った各点は互いにインコヒーレントで、遠視野像、近視野像ともに高次エルミートガウスモードが多数混在した構造をしている。したがって、アレイ型 LD で用いられる波面抽出の手法が適用

できない。それゆえ、フォトリフレクティブ光波混合によるブロードストライプLDのビーム浄化は、われわれの知る限りにおいて、報告されていない。

われわれはブロードストライプ型LDを光源として、代表的なフォトリフレクティブ結晶であるBaTiO₃結晶を用いて、自己励起位相共役波発生を行った。その結果、位相共役鏡となるべきBaTiO₃結晶からガウスビーム状に空間的フィルタリングされた波面をもつ反射光が得られることを見いだした。その反射率は18%である。この反射光は位相共役波とまったく同様に、BaTiO₃結晶への入射光の軌跡を逆戻りし、LDに自動的に戻る。このモード浄化はBaTiO₃結晶中の光波結合によるものであり、位相共役鏡（反射波の波面が入射光の波面を厳密に再生するわけではないので位相共役鏡とはいえないが、他に適切な用語がないので、ここでは便宜上位相共役鏡と呼ぶことにする）がもつ自発的な効果である。上述したこれまでの研究報告例⁸⁻¹²⁾では、空間フィルタリングをつかさどる主たる要素は、プリズム、あるいはナイフエッジ等のメカニカルな光学部品であり、2光波混合光増幅、位相共役鏡はフィルタリング後の波面増幅器、あるいはセルフアライメントなフィードバックミラーの役割をしているにすぎない。本研究で報告する空間フィルタリングは位相共役鏡が自発的に行う空間フィルタリングであり、従来の報告例と大きく異なる。

2. ブロードストライプ型LD

2.1 ブロードストライプ型LDの空間的コヒーレンス

高出力LDの主流であるブロードストライプ型LDの活性層は、厚さ数 μm 、幅100~200 μm 、長さ200~300 μm の大きさをもつ。したがって、ブロードストライプ型LDはフレネル数が大きく、横マルチモードで発振するため、コヒーレンスが悪い。さらに、活性層の幅は厚みの10²倍にもなるため、レーザー光の空間的コヒーレンスがビーム断面内で縦方向と横方向では大きく異なる。

まず、われわれはブロードストライプ型LD光の空間的コヒーレンスをLDビーム断面をLD活性層の厚みに沿った方向(V軸)と幅に沿った方向(H軸)に分けて測定した。一般に、空間的コヒーレンスはヤングの干渉計や波面反転干渉計で測定可能であるが、われわれは測定系の簡便さから波面反転干渉計¹³⁻¹⁵⁾を用いた。Fig. 1に測定光学系を示す。測定するレーザー光をハーフミラーによって2つに分けて、一方のビームを他方のビームに比べて奇数回だけ多く反射させることにより波

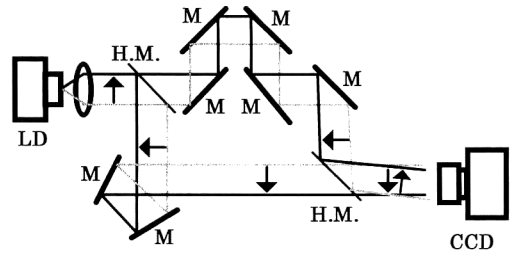


Fig. 1. Reversal-shear interferometer for measuring spatial coherence of LD. M: mirror; H.M.: half mirror.

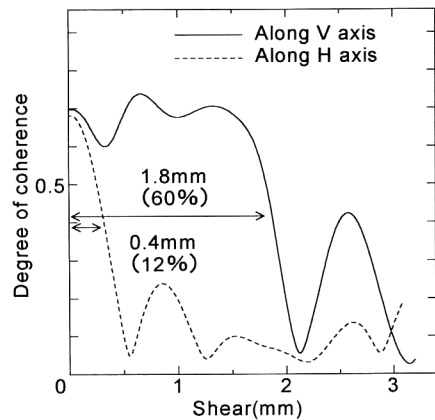


Fig. 2. Spatial coherence functions of broad stripe laser diode beam. Solid and broken lines show them along H and V axis. The laser beam is 3 mm width. We define the coherence width as the shear, at which the visibility decreases down to a half of that at zero shear. The coherence widths along H and V axes are 12% and 60% of the whole beam width, respectively.

面を反転させ、2つのビームを干渉させる。このようにして得られた干渉縞の中央付近に現れるコントラストの高い縞はレーザービーム波面上で空間的に近い位置同士の干渉によるものであり、周辺部の低コントラストの縞は空間的に離れた位置同士の干渉によって得られる縞に相当する。この干渉縞データをフーリエ変換法¹⁶⁾を用いて解析し、空間的コヒーレンスを測定した。使用したブロードストライプ型LDはソニー製302XT(波長810 nmで最大出力は200 mW)である。

実験結果をFig. 2に示す。図中、点線と実線で示されたものはそれぞれレーザービーム面内における H 軸および V 軸に沿った空間的コヒーレンスを表す。 H 軸に沿った方向の空間的コヒーレンス幅は全ビーム幅(3 mm)の12%ときわめて狭い。それに比べて、 V 軸に沿った方向の空間的コヒーレンス幅は全ビーム幅の

60%と比較的広いことがわかる。

BaTiO₃ 結晶のもつポッケルス定数のうち r_{42} , r_{33} は際立って大きい。このポッケルス定数を有効に利用するためには、結晶へ入射する2つの光波がその入射方向と c 軸とのなす面内に干涉縞を作り、かつ、この入射面内にレーザー光の偏光ベクトルが存在しなければならない¹⁷⁾。この条件を言い換えると、レーザー光の偏光ベクトルと干涉縞の K ベクトルが、ともにレーザー光の入射方向と結晶 c 軸のなす面(結晶の ac 面)内に存在することといえる。ブロードストライプ型 LD はビーム断面の H 軸方向に沿って偏光しているので偏光ベクトルに沿った方向の空間的コヒーレンスが悪く、そのままでは光波混合を行うに十分な変調度の干涉縞を結晶中に書き込むことができない。そこで、われわれは位相板を用いて高出力 LD の偏光方向を 90° 回転させ、偏光ベクトルに沿った方向の空間的コヒーレンスを高くするコヒーレンス切替え法を用いた¹²⁾。

波面の相関と偏光は互いに完全に独立であり、位相板で偏光ベクトルを回転させても波面は回転しない。したがって、 $\lambda/2$ 板を LD の光路中に挿入することで、部分コヒーレントな V 軸方向と偏光方向を一致させることができる。高出力 LD ビームの V , H 軸に沿った空間的コヒーレンス領域は全ビーム径に対してそれぞれ 60%, 12% であるから $\lambda/2$ 板の有無により偏光ベクトルに沿った方向のコヒーレンスを部分的コヒーレントあるいはインコヒーレントに切り替えることができる。

2.2 ブロードストライプ型 LD の時間的コヒーレンス

フリーランニングの状態でのブロードストライプ LD は縦マルチモードで発振しており、時間的コヒーレンスもきわめて悪い。ここでは、後述するように LD の縦モード制御を併せて行うため、空間的コヒーレンスの切替えには $\lambda/2$ 板でなく、 $\lambda/4$ 板と偏光ビームスプリッターを用いた。高出力 LD を光学系に対して縦偏光で発振させ、コリメートした高出力 LD の光路上に $\lambda/4$ 板を置いて円偏光にした後、偏光ビームスプリッターによって縦偏光成分と横偏光成分に分ける。レーザー光の横偏光成分を BaTiO₃ 結晶に入射させ、残りの縦偏光成分を回折格子 (900 line/mm) で回折させ、その一次回折光成分を LD に戻す。このフィードバック光学系によって縦モード制御を行う。スペクトル制御された LD は縦シングルモード発振し、そのスペクトル幅は 0.04 nm となる。これは時間的コヒーレンスに換算すると 15 mm である。

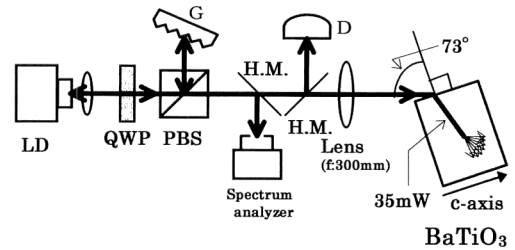
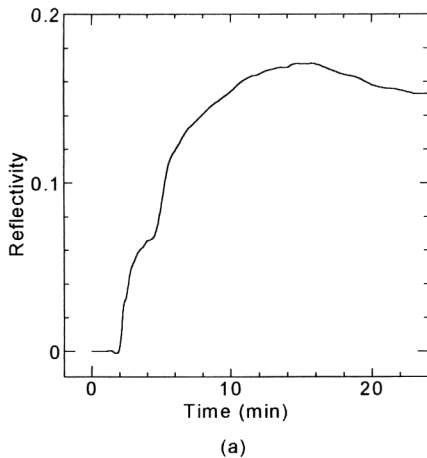


Fig. 3. Experimental set-up for self-pumped phase conjugation. The LD beam is decomposed into two orthogonally polarizing parts by PBS. The part with the parallel polarization to the plane of figure is incident into photorefractive BaTiO₃ crystal. D: power detector.

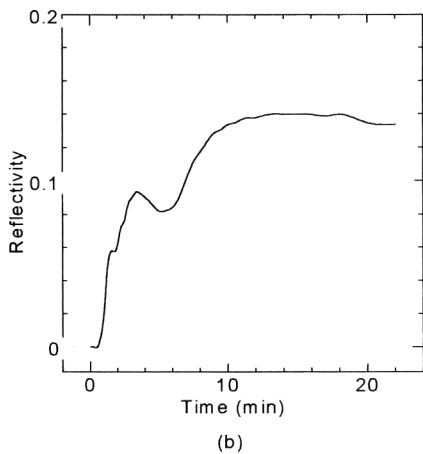
3. CAT 型自己励起位相共役波鏡からの位相共役波状反射光

3.1 反射率の時間変化

CAT 型自己励起位相共役波発生¹⁸⁾の配置で実験を行った。実験配置を Fig. 3 に示す。ここでは、光源に偏光回転によって、偏光ベクトル方向のコヒーレンスを高コヒーレント状態に切り替えたブロードストライプ型 LD を用いている。LD 光は焦点距離 300 mm のレンズで集光して BaTiO₃ 結晶に入射しており、結晶内でのビームは 1 mm である。LD 光の BaTiO₃ 結晶への入射角は 73°, LD 入射光量は結晶中の光量に換算して 35 mW である。また、用いた結晶のサイズは a 軸, b 軸, c 軸方向がそれぞれ 7, 6, 5 mm である。LD 光を結晶へ入射後、1~2 分経て、BaTiO₃ 結晶から位相共役波状の反射光が発生し始める。この反射光は位相共役波と同様に、入射光の軌跡を逆戻りし、自動的に LD へ戻すが、後述するように波面形状は、結晶への入射光とはまったく異なる。そこで、ここでは、以下、この反射光を位相共役波状反射光と呼ぶことにする。この反射光光量の一部分をハーフミラーで取り出し、パワーメーターによって出力を測定するとともに、LD の発振スペクトルをスペクトルアナライザーで観測した。位相共役波状反射光の反射率の時間変化を Fig. 4(a), (b) に示す。(a), (b) それぞれのグラフは回折格子から LD へのフィードバック光の有無に対応しており、それぞれの動作条件下で、LD の発振スペクトルはシングルモードあるいはマルチモードである。LD がシングルモードあるいはマルチモードのいずれの状態でも発振していようと、発振状態にかかわらず、ともに LD 光を結晶に入射させて 1~2 分後に位相共役波状反射光が発生し始める。反射光の反射率が 8% 前後に達したところでいったん減少



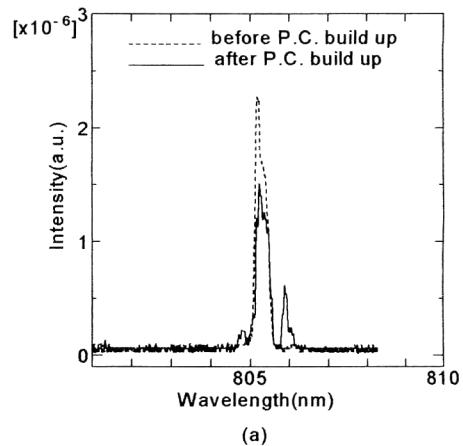
(a)



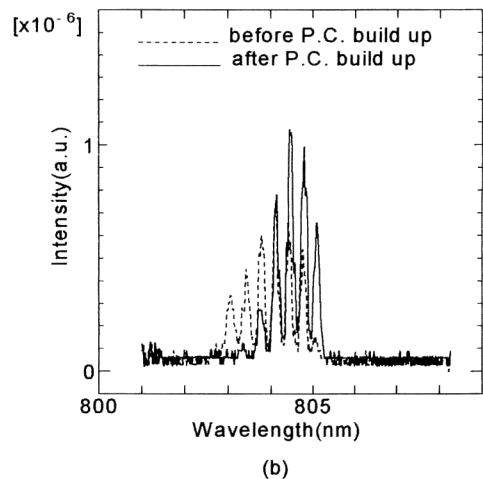
(b)

Fig. 4. Temporal behaviors of phase conjugate reflectivity. (a) with the external feedback by holographic grating. (b) under the free running condition.

し、その後増加に転じて12~13分で最大反射率に達する。最大反射率はシングルモード発振時で18%、マルチモード発振時で14%である。次に位相共役波状反射光の発生前後におけるLDのスペクトル変化をFig. 5 (a), (b)に示す。図中点線で示されたものが、位相共役波状反射光が発生する前のスペクトルで、実線で示されたものが、反射光発生後、反射率が最大値に達したときのスペクトルを表す。回折格子によって、LD波長がシングルモード化されている場合は、位相共役波状反射光発生後も大きなスペクトル変化はみられないが、LDに回折格子を付与しない場合は、波長スペクトルの中心波長が反射光発生に伴い長波長側へシフトしているのがわかる。これは位相共役波状反射光がLDにフィードバックして、LDと位相共役鏡となるBaTiO₃結晶の間で複合共振器が構成されたために起こるLD波長のモード



(a)



(b)

Fig. 5. The spectrums of LD with and without the external grating feedback are shown in (a) and (b) respectively. In these figures, broken and solid lines express spectrum in phase conjugate turning off and on, respectively.

ホップである¹⁸⁾。同様のモードホップは回折格子が付与されているときには顕著に現れない。いま、回折格子(反射率40%)とLD間共振器(共振器長70cm)の内部ロス、位相共役鏡とLD間共振器(共振器長1m)の内部ロスを入挿入されているλ/4の偏光回転に伴う各偏光成分の損失(LDヘフィードバックするときに各直線偏光がそれぞれ円偏光になる結果生じる損失)、各偏光に対する偏光ビームスプリッター(PBS)の反射率、ハーフミラーの反射率、LD端面反射率を、それぞれ50%、100%、50%、30%として計算すると、それぞれ0.025 cm⁻¹、0.028 cm⁻¹となり、両共振器のQ値はほぼ同じになる。結果として、回折格子による波長ロックとモードホップの効果がバランスし、元のスペクトルの

長波長側にわずかなサブスペクトルが現れるにとどまり、大きなスペクトル変化が起こらなかったものと考えられる。モード変化の結果、結晶中に書き込まれる屈折率格子の位相が変化して、位相共役波が立ち上がる時点で記録された屈折率格子がいったん消去されて書き直される。その結果、反射率の極小点が現れてくると考えられる。

また、実験結果から、LDの発振スペクトルが位相共役波状反射光の反射率時間変化、最大値に大きな影響を与えていないことが読み取れる。BaTiO₃結晶内で、光波間の結合をつかさどる屈折率格子として透過型および反射型回折格子がある。本実験におけるLDのコヒーレンス長は、縦シングルモード化した場合でもたかだか15 mmである。この長さは結晶内での光路長に換算すると6.3 mmであり、結晶内に描かれるループ状の光路を經由して戻ってくる後進ポンプ光がシグナル光と干渉するに十分な長さとはいえない。したがって透過型回折格子のみが支配的となる。この限りにおいては、シグナル光と前進ポンプ光、および後進ポンプ光と位相共役波状反射光のつくる屈折率格子が同相でさえあれば、位相共役鏡は成立する。したがって、LDの発振スペクトル構造が位相共役波状反射光の反射率に直接的に影響を与えなかったものと考えられる。

3.2 位相共役波状反射光のビームパターン

BaTiO₃結晶への入射光であるLD光と位相共役波状反射光の遠視野像、および、近視野像（遠視野像を焦点距離300 mmのレンズで集光し、焦点面にできるパターン）をCCDカメラで観測した。その結果をそれぞれFig. 6(a)～(d)に示す。(a)、(b)はそれぞれ入射LD光と位相共役波状反射光の遠視野像、(c)、(d)はそれぞれの近視野像である。LD光のビームパターンにはパターン周辺部にエネルギーが集中する高次横モードの構造がみられる。これに対して、位相共役波状反射光は近視野像、遠視野像ともにガウスビーム状の強度分布をもち、振幅、位相ともにほぼ完全に空間フィルタリングされていることがわかる。また、この空間フィルタリングの効果はLD光の結晶入射角度に敏感ではなく、位相共役波状反射光が有効に発生する結晶入射角度範囲内で、ほぼ同程度の空間フィルタリング効果が観測された。これらのことは、位相共役鏡そのものが空間フィルタリング作用をもつことを示している。したがって、この位相共役鏡による自己空間フィルタリングでは空間フィルタリングのための付加的な光学部品をまったく必要としない。また、この自己空間フィルタリングのもうひとつの

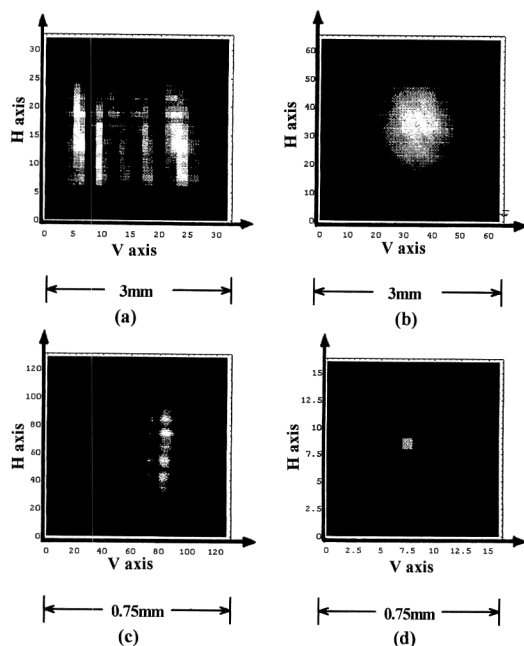


Fig. 6. Field-patterns of broad stripe LD. Far-field patterns of LD and its phase conjugate are shown in Figs. 6(a) and 6(b), respectively. Figs. 6(c) and 6(d) express the near-field patterns of them.

特長は、ビーム浄化された位相共役波状反射光がLDへ自動的にフィードバックする点である。この特長を積極的に利用すれば、LD、位相共役鏡間でセルフフィルタリング複合共振器が構成され、LDの発振モードパターンも低次モードにシフトする可能性がある。しかしながら、今回の実験では、LDのスペクトル、あるいは、LDおよび位相共役波状反射光の出力測定のために挿入した光学部品による位相共役波状反射光光量の損失が大きく、LDにフィードバックする位相共役波状反射光はLD出力の1%程度にすぎず、横モードの顕著な改善は確認できなかった。

これまで、フォトリラクティブ位相共役鏡の自発的な空間フィルタリング効果について述べてきた。CAT型位相共役鏡の内部を伝搬する光波の経路は多数の屈折率格子間の競合で決まり、複雑を極める。したがって、光波間の結合を定量的に取り扱うのはきわめて難しい。ここでは、このフィルタリング効果が誘起される原因について定性的な考察を加えるにとどめる。

CAT型自己励起位相共役鏡では、結晶中に入射したシグナル光がビームファニングを経て前進ポンプ光を形成する(Fig. 7)。いま、便宜的にシグナル光の進行方向に沿って平行な方向に ξ 軸、前進ポンプ光の進行方向

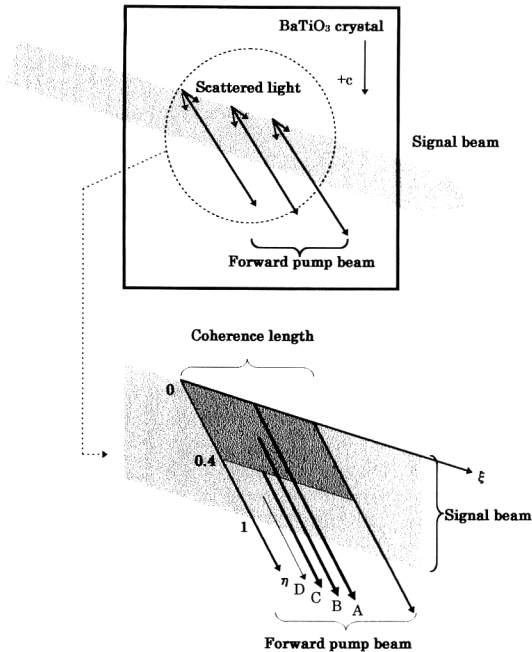


Fig. 7. Model of initial forward propagating pump beam. The A, B, and C rays, scattered inside the region painted dark gray in the figure, become dominant parts of the forward-pump beam, because it travels over the whole effective interaction length. On the other hand, the D, which is scattered outside the dark-gray region and travels only over a part of the effective interaction length, forms the least amount of the pump beam.

向に沿って平行な方向に η 軸 ($0 \leq \eta \leq 1$) とする。ビームファニングの元となる結晶中の光散乱はシグナルビーム断面内のあらゆる箇所で行われるが、このうち相互作用長が長く有効に増幅される散乱光が前進ポンプ光の主たる種となる。実際には、実効的な相互作用長 L が入射光の空間的コヒーレンス C_w で制限されるため、実質的な相互作用長 L は $C_w / \sin \theta$ となり、これより長い経路をシグナル光と相互作用する散乱光が有効に増幅されることになる。本実験の場合をあてはめると Fig. 7 中の $\eta \leq 0.4$ を満たす領域で発生した散乱光が前進ポンプ光の種になる。前進ポンプ光の種となる散乱光はシグナル光波面のコヒーレンス幅より狭い領域から発生したものであるから、その空間的コヒーレンスはもはやシグナル光のコヒーレンスとは異なり、より良好になると予想される（このような部分的コヒーレント光による光波混合の結果増幅光のコヒーレンスが元の光源のコヒーレンスより向上することは、Cronin-Golomb らによって報告されている^{19,20)}）。この前進ポンプ光が結晶端面で

の反射を経て後進ポンプ光となり、結晶中にすでに記録されている屈折率格子で回折され、位相共役波状反射光となることから、位相共役波状反射光のコヒーレンスがシグナル光波面に比べ、向上したと考えられる。

4. ま と め

偏光回転によって空間的コヒーレンス切替えをしたブロードストライプ LD を光源として、BaTiO₃ 結晶による自己励起型位相共役波発生を行った。入射 LD 光は高次の横マルチモードであるのに対して、位相共役鏡となる BaTiO₃ 結晶から発生する位相共役光状反射光は自動的に空間フィルタリングされて、ほぼガウス関数の強度分布をもつ。

この位相共役鏡のもつ空間フィルタリング効果は、通常のピンホールやレンズ等で構成される空間フィルターを用いたビーム整形とビーム品質の点では同じである。しかしながら、ブロードストライプ LD のように、非点収差が大きくビーム品質が良くない光源では、ピンホール、レンズ等のアライメントにはきわめて高い精度が要求され、また、光学部品点数も必然的に多くなる。本論文で示した自発的空間フィルタリングは位相共役鏡となる BaTiO₃ と位相板のみで構成され、アライメントも不要である。この点において実用性がきわめて高い。本研究では、レーザー発振モードのシングルモード化は実現できなかった。しかし、光学部品等による光量損失を改善し、位相共役波の LD への戻り光量を増加させることで、レーザー発振モードの制御も可能であると考えられる。

本研究を行うにあたり LD を提供してくださいました、ソニー(株) 増田久氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) H. Yamanaka, K. Iwamoto, N. Yamaguchi, K. Honda, T. Mamime and C. Kojima: "Progress in super high laser diodes with broad area structure," *Conf. Dig Lasers and Electro-opt.* (Opt. Soc. Am., 1990) CFA 2.
- 2) K. Wallmeroth and P. Peuser: "High power, CW single-frequency, TEM₀₀, diode-laser-pumped Nd:YAG laser," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 1086-1088.
- 3) M. Oka, H. Masuda, Y. Kaneda and S. Kubota: "Laser diode pumped 1 W cw green laser," *Conf. Dig. Laser and Electro-opt.* (Opt. Soc. Am., 1990) CWC5.
- 4) T. Sakaki, T. Kojima, A. Yokotani, O. Oguri and S. Nakai: "Single-longitudinal-mode operation and second harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1665-1667.
- 5) A. E. T. Chiou and P. Yeh: "Beam cleanup using photorefractive two-wave mixing," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 621-623.
- 6) A. E. T. Chiou and P. Yeh: "Laser-beam cleanup using

- photorefractive two-wave mixing and optical phase conjugation," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 461-463.
- 7) S. K. Kwong and A. Yariv: "One-way, real time wave front converters," *Appl. Phys. Lett.*, **48** (1986) 564-566.
 - 8) S. MacCormack and R. W. Eason: "Sequential power transfer between stripes of a diode laser array via photorefractive two-wave mixing in BaTiO₃," *J. Appl. Phys.*, **67** (1990) 7160-7162.
 - 9) R. R. Stephens, R. C. Lind and C. R. Giuliano: "Phase conjugate master oscillator-power amplifier using BaTiO₃ and AlGaAs semiconductor diode laser," *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 647-649.
 - 10) M. Segev, S. Weiss and B. Fischer: "Coupling of diode laser arrays with photorefractive passive phase conjugate mirror," *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 1397-1399.
 - 11) S. Weiss, M. Segev and B. Fischer: "Narrowing and self-frequency scanning of laser diode arrays coupled to a photorefractive oscillator," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 706-708.
 - 12) S. MacCormack and J. Feinberg: "High-brightness output from a laser-diode array coupled to a phase conjugating mirror," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 211-213.
 - 13) V. I. Bespalov, G. A. Pasmanik and A. A. Shilov: "Measurement of the reversed function in radiation reflected from a four-wave hypersonic wavefront reversal mirror," *Sov. J. Quantum Electron.*, **13** (1983) 878.
 - 14) M. V. R. K. Murty: "Interference between wavefronts rotated or reversed with respect to each other and its relation to spatial coherence," *J. Opt. Soc. Am.*, **54** (1964) 1187-1190.
 - 15) T. Omatsu, K. Kuroda, T. Shimura, M. Chihara, M. Itoh and I. Ogura: "Measurement of spatial coherence of a copper vapor laser beam using a reversal shear interferometer," *Opt. Quantum Electron.*, **23** (1991) 477-484.
 - 16) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156-160.
 - 17) P. Yeh: *Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics* (A. Wiley-Interscience Publication, New York, 1993) pp. 21-33.
 - 18) J. Feinberg: "Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 486-488.
 - 19) H. Cong, C. Wu and M. Cronin-Golomb: "Photorefractive two-beam coupling with reduced spatiotemporal coherence," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1183-1185.
 - 20) M. Cronin-Golomb, H. Kong and W. Krolikowsky: "Photorefractive two-beam coupling with light of partial spatio-temporal coherence," *J. Opt. Am.*, **9** (1992) 1698-1703.