

注入同期された半導体レーザー光のBaTiO₃によるビーム結合Beam Coupling of Two Injection Locked Laser Diodes in BaTiO₃

志村 努*・田村 雅之*・黒田 和男*

Tsutomu SHIMURA, Masayuki TAMURA and Kazuo KURODA

1. はじめに

二光波混合はフォトリフラクティブ結晶中に作られた干渉縞とそれにより書き込まれたホログラフィックな屈折率格子を介して2本のビームが結合する現象である。一般にフォトリフラクティブ結晶では干渉縞と屈折率格子の間に位相ずれが生じ、一方のビーム(ポンプ光)のパワーが回折によりもう一方(シグナル光)に乗り移りビームの増幅が起こる¹⁾。増幅率は位相ずれが $\pi/2$ のとき最大となる。これを用いて画像の増幅²⁾、ビーム整形³⁾などの応用が報告されている。

二光波混合ではその原理から結合させる二光波は互いにコヒーレントでなければならない。通常の増幅実験では単一のレーザーの出力光を2つの分けてシグナル光とポンプ光としているが、この場合増幅された光の最終パワーは光源のパワーを越えられず、実質的な光増幅とは言えない。そこで注入同期によりコヒーレントに発振した複数の半導体レーザーによる二光波混合が提案されている⁴⁾。本方式により多数の注入同期されたレーザーを用いてカスケードに増幅を繰り返せば、最終出力の限界は一個の光源パワーには制限されず、結晶の破壊強度まで上げることができる。われわれは縦および横ともに単一モードの半導体レーザーを2台用い、ポンプ波とシグナル波の配置を最適化することにより、高効率のビームの結合を行なった。また単一の光源による二光波混合の結果と本実験の結果について比較を行ったのでこれについて報告する。

2. 半導体レーザーの注入同期

半導体レーザーの注入同期動作は外部からの注入光の項を含む Van der Pol の方程式、

$$\frac{dE_l}{dt} = \left(g_0 - \frac{1}{\tau_p} - \frac{|E_l|^2}{\tau_p |\bar{E}_{sat}|^2} \right) \frac{E_l}{2} + \frac{E_{in}}{2\tau_p} \quad (1)$$

*東京大学生産技術研究所 第1部

で表される⁵⁾。ここで、 g_0 はレーザーの小信号利得、 τ_p はレーザー共振器の光子寿命、 $|\bar{E}_{sat}|^2$ は飽和強度である。 E_b 、 E_{in} はそれぞれ共振器内の光と、外部から注入される光の電場で、

$$E_i = \bar{E}_i \exp[j\{(\omega_i - \Omega)t + \varphi_i\}], \quad i = l, in \quad (2)$$

と表される。 Ω は共振器の共振周波数である。ここで注入光と共振器内の光の位相差

$$\Psi = (\omega_l - \omega_{in})t + (\varphi_l - \varphi_{in}) \quad (3)$$

で定義すると、式(1)の虚部から

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\bar{E}_{in}}{2\tau_p \bar{E}_l} \sin \Psi + \Omega - \omega_{in} \quad (4)$$

が得られ、 Ψ は

$$\frac{\bar{E}_{in}}{2\tau_p \bar{E}_l} \geq |\Omega - \omega_{in}| \quad (5)$$

のとき定常解を持ち、

$$\begin{aligned} \omega_l &= \omega_{in} \\ \varphi_l &= \varphi_{in} + \Psi_l \end{aligned} \quad (6)$$

となる。式(6)はレーザーが注入光と同一周波数で一定の位相関係を保ちながら注入光に対して可干渉に発振することを示している。これが注入同期発振である。式(5)から発振光に対して注入光の電場が大きいほど許容される注入光と共振器の共振周波数の差が大きくなることがわかる。

3. 実験配置

実験配置を図1に示す。親レーザー(master laser)からの光を50%ビームスプリッターで取り出し、さらにもう一つの50%ビームスプリッターにより子レーザー

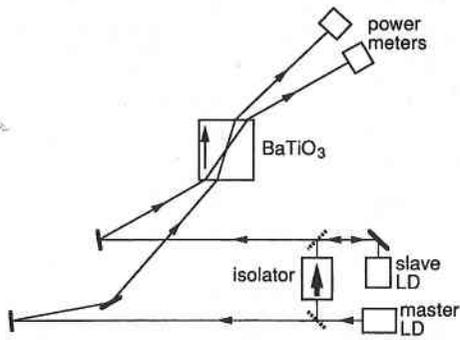


図1 実験配置.

(slave laser) に注入した. 子レーザーからの出力光が親レーザーに入らないようアイソレーター (30dB) を用いた. 二光波混合に関しては, 親・子レーザーからの光をそれぞれポンプ光, プローブ光とした. 干渉縞の可視度を最大にするために, 親レーザーから直接結晶に至る光路と, 親レーザーから2つのビームスプリッターを経由し子レーザーに入って再び射出し結晶に至る光路の光路長を一致させた. 結晶を通過後のビームのパワーは光パワーメーターにより測定した.

半導体レーザーには Sharp 製 LT024MF, 発振波長約 785nm, 最大出力30mW, を使用した. 2つのレーザーの発振波長の差を注入同期の起こる範囲まで近づけるため, 温度と駆動電流を定安化した. 定安度は温度が±0.003°C, 電流が±0.01 mA であり, それぞれ発振光の周波数に換算して±100 MHz, ±35 MHzであった. 光

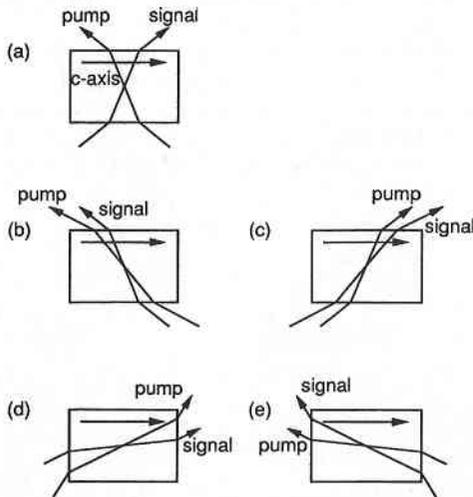


図2 シグナル光, ポンプ光の結晶内での配置. 結晶軸の正の方向により近い角度のビームがもう一方により増幅される.

研究速報
スペクトラムアナライザー (アンリツ, MS9001B1) で発振波長を測定し, 読み取りの限界である±0.002 nm以下の精度で波長を一致させ, さらに駆動電流の微調により注入同期を行った. 注入同期動作は結晶の位置に半透鏡を置き, 干渉縞を観察することにより確認した. 一度注入同期がかかると, 2時間以上その状態を維持できることを確認した.

結晶中でのビームの配置を図2に示す. 使用した結晶の大きさは5×5×7mmである. ここに示す5通りの配置で BaTiO₃ による二光波混合を試みた. このうち(a)および(c), (e)の配置では beam fanning が大きく, そちらにポンプ波のパワーを奪われてしまい, 効率のよいビーム結合は実現しなかった. そこでわれわれは図2(b)と(d)の配置について測定を行った. さらにポンプ光の直径をシグナル光の約1/2とし, 結晶内でポンプ光がシグナル光の幅の中に収まるような配置をとり, パワーが移行する領域を長くし, 結合効率の向上をはかった.

4. 結 果

ポンプ光, シグナル光の結晶への入力パワーをそれぞれ P_{in} , S_{in} , 初期状態として一方のビームのみを入射させたときの出力をそれぞれ $P_{out}(0)$, $S_{out}(0)$ とする. 2本のビームを同時に入射させると回析格子の書き込みが始まり, 二光波混合によるポンプ波からシグナル波へのパワーの移動がおこる. 5-10分程度で定常状態に達し, その時の出力を $P_{out}(\infty)$, $S_{out}(\infty)$ とする. このときポンプ光からシグナル光へのパワー移行率 ϵ を,

$$\epsilon = \frac{S_{out}(\infty) - S_{out}(0)}{P_{out}(0)} \tag{7}$$

で定義する. 各配置での結果を表1に示す. いずれの場合もシグナル光, ポンプ光の入射角はそれぞれ 20° と 42°, 入力パワーは $S_{in} = 6.2 \text{ mW}$, $P_{in} = 6.5 \text{ mW}$ で一定とした. 明らかに(a)に比べ(b)と(d)の配置でよい結果が得られ, 特に(d)で最高のパワー移行率 $\epsilon = 0.72$ が得られた. 最高の出力パワーは10.3 mW であり入力パワーを上回っており, 実質的な増幅が実現している. 本実験では結晶の表裏面でのフレネル反射の防止を行っていないため, 反射防止コーティングを施すことによりさらに出力パワーが向上することが期待できる.

表1 2光波混合の配置とシグナル光出力およびパワー移行率

配置	出力 (mW)	パワー移行率: ϵ (%)
(a)	4.67	6
(b)	7.51	47
(d)	8.38	72

研 究 速 報

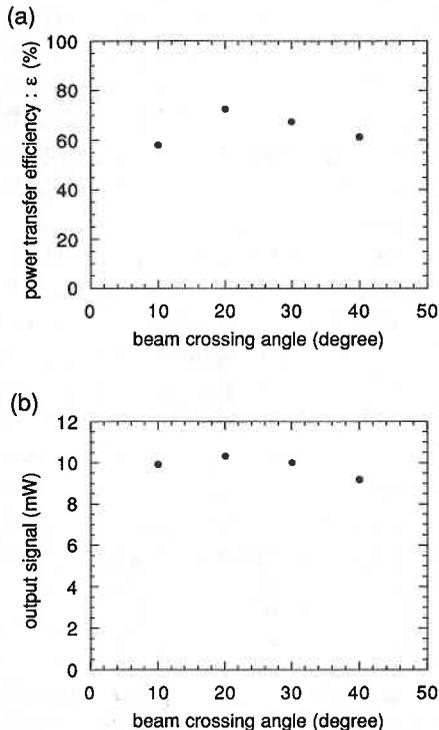


図3 エネルギー移行率と増幅後のシグナル光のパワーのビーム交差角依存性。

増幅されたシグナル光の出力とパワー移行率のビーム交差角依存性を図3に示す。シグナル光の入射角を 20° に固定しポンプ光とシグナル光の結晶外での交差角を 20° から 40° まで変化させて測定を行った。交差角の変化に対してパワー移行率はなだらかに変化し、 20° 付近にピークを持つことがわかった。

比較のために単一のレーザーからのビームを2本に分けてポンプ光、シグナル光とした場合のパワー移行率を測定した結果、パワー移行率は95%以上の結果が得られた。注入同期された2台のレーザーを用いた場合にこれ

が72%に下がってしまう原因は、干渉縞の不安定性にあると考えられる。式(4)からわかるように Ψ_i は子レーザーの共振周波数と親レーザーからの注入光の周波数差の関数であるから、この周波数差の揺らぎが結晶内に作られた干渉縞の揺らぎを引き起こし、書き込まれる回析格子のモジュレーションを低下させることになり、その結果二光波混合の結合定数が小さくなり、パワー移行率が低下する結果になったと考えられる。

5. ま と め

注入同期により互いにコヒーレントに発振させた2台の半導体レーザーのビームのフォトリフラクティブ二光波混合による結合を行った。二光波混合の配置を最適化することにより高効率でのパワーの移行が実現された。さらにパワー移行率を向上させるためには、2台のレーザー間の位相関係を一定に保ち、結晶内の干渉縞を安定化させるようなフィードバック制御を施す必要があると考えられる。今後は大パワーのレーザーの使用と、増幅段数を増やすことにより、最終パワーの増加をめざす予定である。

(1993年2月25日受理)

参 考 文 献

- 1) P. Günter and J. P. Huignard eds, "Photorefractive Materials and their applications I", (Springer-Verlag, Berlin, 1988).
- 2) F. Laeri, T. Tschudi and J. Albers, "Coherent cw image amplifier and oscillator using two-wave interaction in a BaTiO₃ crystal", Optics Comm. vol. 47 (1983) 387.
- 3) A. E. T. Chiou and P. Yeh, "Beam cleanup using photorefractive two-wave mixing", Opt. Lett., vol. 10 (1985) 621.
- 4) J. M. Verdiell, H. Rajbenbach, and J. P. Huignard, "Efficient diffraction-limited beam coupling of semiconductor laser diode arrays using photorefractive BaTiO₃", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 2 (1990) 568.
- 5) 伊藤良一, 中村道治 編, "半導体レーザー" (培風館, 1989) 196.