

波長多重用ファイバーデバイス

重 松 昌 行

近年のインターネットを代表とする通信需要の急増に伴い、波長分割多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 伝送システムや、これに光 add/drop (ADM: add/drop multiplexing), 光クロスコネクットの機能を加えた光波ネットワークの検討が活発である。WDM 伝送システムは北米を中心にすでに導入が図られており、日本においても、光波ネットワークの実証試験が神奈川県下にて実施されている¹⁾。ファイバー型デバイスは伝送路である光ファイバーとの整合性がよいため、これらのシステム/ネットワークにおいても種々のファイバー型デバイスが使用されている。

ここではその中から、Er 添加光ファイバー増幅器 (EDFA: erbium-doped fiber amplifier) およびファイバークレーティングを取り上げ、その開発の現状と動向を述べるとともに、具体的な開発の一例として、「WDM 伝送用ハイブリッド型 EDFA」および「光 ADM 用ファイバークレーティング」について紹介する。

1. EDFA の開発動向

EDFA は、光ファイバーが最低損失を示す波長 1.55 μm 帯で増幅機能を示すことから、研究開発が活発に進められ、1994 年には陸上中継系への導入が、また 1996 年には EDFA を用いた日米を結ぶ太平洋横断ケーブルの運用が開始されるなど、超長距離大容量光伝送システムが実現されるに至った。その意味で、EDFA は光ファイバー通信分野における最近の大きな技術的ブレイク

スルーであり、来るマルチメディア社会の実現に向けてのキーデバイスとなっている。

今後の波長多重化や超高速化によるいっそうの光伝送システムの大容量化に対応して、EDFA にはさらなる高性能化、すなわち低雑音化、高出力化、広帯域/利得平坦化が求められている。

1.1 低雑音化

EDF の励起波長としては、0.98 μm 帯ならびに 1.48 μm 帯が一般に使われているが、励起光から信号光へのエネルギー変換効率や信頼性の観点から、後者が広く用いられてきた。しかし、雑音指数 (NF: noise figure) の点では前者のほうが有利であり、また消費電力の観点からも魅力的である。近年、信頼性の問題は解決する方向²⁾ にあり、今後、0.98 μm 帯励起の EDFA が増えていくものと考えられる。

1.2 高出力化

波長多重することによって波数が増えても伝送品質を劣化させないためには、EDFA の 1 波当たりの出力信号光パワーを保つ必要がある。そのため必然的に、EDFA には高出力化が要求される。

EDF 自体の高効率化は、ファイバー構造やガラス組成の最適化により、ほぼ理論限界に達している³⁾。したがって EDFA の出力を向上させるには、投入する励起光パワーを大きくするほかにない。励起用半導体レーザー/モジュールの高出力化が進められているとともに、複数の 1.48 μm 帯半導体レーザーモジュールを偏波合成および波長多重することにより、出力 +29 dBm を実現した例が報告されている⁴⁾。

また、Nd: YAG レーザーや Nd: YLF レーザー等の高出力な半導体レーザー励起固体レーザーを励起光源と

住友電気工業(株)横浜研究所 (〒244 横浜市栄区田谷町1番地)

E-mail: shige@yklab.sei.co.jp

して用いる試みもある。これら固体レーザーの発振波長が1.04~1.06 μm であるのに対し、EDFの0.98 μm 帯の吸収スペクトルが狭いため、波長1.0 μm 付近でブロードな吸収をもつYbを共添加し、YbからErへのエネルギー伝達を利用するという工夫がなされている⁵⁾。

1.3 広帯域/利得平坦化

今後の波長多重伝送システムの波数増加を考えると、できるだけ広い波長範囲で利得を得られることが望ましい。しかも、多段増幅中継を考慮すると、その波長範囲で極力利得を平坦化することが重要である。

利得を平坦化する方法としては、EDFAの利得波長特性と逆特性をもつ光フィルターを挿入して利得を等化する方法と、EDF自体の特性を改善する方法がある。

利得等化器としては、平面導波路型光フィルター⁶⁾、フアブリー・ペロー・エタロン⁷⁾、ファイバグレーティング⁸⁾等が提案されている。ファイバグレーティングについては第3節で詳しく述べる。利得等化器は基本的に損失媒質であるため、挿入位置によっては利得を低下させてしまうが、損失波長特性を精密に制御できれば、きわめて良好な利得平坦化が実現できる。

一方、EDF自体の特性を改善する方法として、石英系EDFにおいては、Alを共添加することが増幅帯域の拡大に有効であることがよく知られており、Al濃度を増加させたときの利得波長特性も詳しく調べられている⁹⁾。また、Alを高濃度に共添加したEDFを0.98 μm 帯で励起し、良好な反転分布状態を形成するとともに、EDF長、励起光パワーおよび入力信号光パワー等の動作条件を最適化することによって、信号光波長1544~1557 nmにおいて非常に平坦な利得波長特性が得られることが報告されている¹⁰⁾。

さらに広い波長範囲で平坦な利得を得る方法としては、Er添加フッ化物ガラスファイバー(EDFF: erbium-doped fluoride fiber)がある¹¹⁾。ただし、EDFFでは、低雑音が期待できる0.98 μm 帯励起ができないほか、石英系EDFに比べ、製造性・信頼性に劣るという面もある。新たなホストガラスの探索も進められており、Er添加テルライトガラスファイバーにおいて、1530~1610 nmの80 nmにも及ぶ広い波長範囲で20 dB以上の小信号利得の得られることが報告されている¹²⁾。

また、所望の特性を得るため、ガラス組成の異なる2種類以上のEDFを組み合わせるハイブリッド型も種々検討されており、Al添加EDFとAl/P添加EDF¹³⁾、石英系EDFとフッ化物EDF¹⁴⁾の組み合わせ等が提案

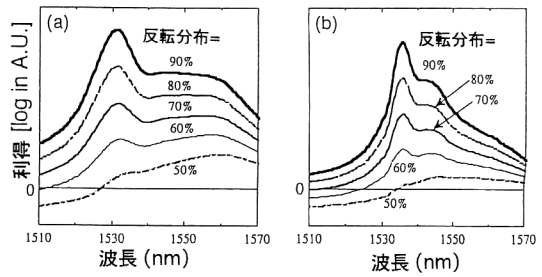


図1 Al添加EDF(a)およびAl/P添加EDF(b)の反転分布を変えた場合の利得スペクトラム(計算例)。

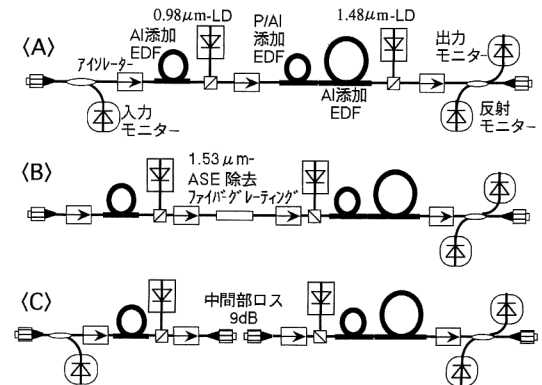


図2 ハイブリッド型EDFAの構成例。〈A〉標準のインラインアンプ、〈B〉プリアンプ、〈C〉光機能部品内蔵型。

されている。そして、Al添加EDFとAl/P添加EDFの組み合わせにおいて、共添加するAlやPの濃度を適切に選ぶことにより、波長域25 nmにわたり、EDFFを用いた場合に匹敵する利得平坦性を実現できることも報告されている¹⁵⁾。次節では、特にAl添加EDFとAl/P添加EDFの組み合わせによるハイブリッド型EDFAを取り上げ、その設計と特性例を紹介する。

2. ハイブリッド型EDFA

2.1 構成の最適化と基本性能^{16,17)}

図1には、Al添加EDFおよびAl/P添加EDFの誘導放出断面積ならびに吸収断面積の実測値から計算した利得スペクトラムを、反転分布状態を変えて示す。1540~1560 nm付近の波長域において、Al添加EDFは正の利得傾斜を示すのに対し、Al/P添加EDFでは負の利得傾斜を示すことから、両者を縦続接続することにより、利得傾斜を相殺することができる。利得スペクトラムは反転分布状態に大きく依存するが、入力信号光パワーや励起光パワー、所要利得等の動作条件に応じて各EDF長を調整することにより、ほぼ任意の動作点にお

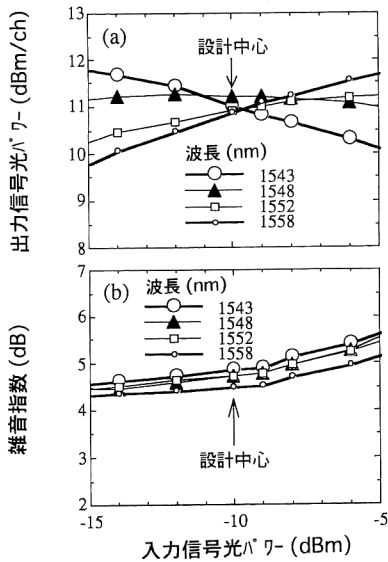


図3 インラインアンプ用ハイブリッド型EDFA(図2(A))の4波一括増幅特性例。各チャンネルの出力信号光パワー(a)および雑音指数(b)の総入力信号光パワー依存性。

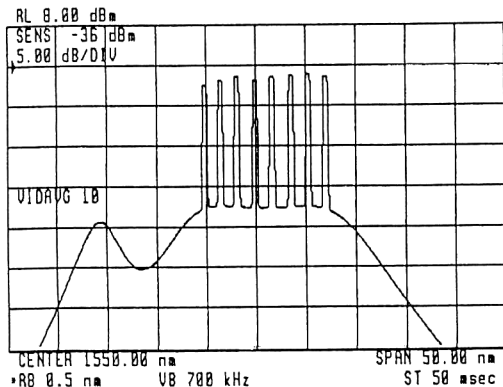


図4 ハイブリッド型EDFAを用いた8波WDM信号5段増幅後の光出力スペクトラム例。

いて利得平坦性の最適化が可能である。

構成は、図2に示すように、3分割構成として設計の自由度を増し、例えば、前段部をA1添加EDFの0.98 μm 帯励起、後段部をA1添加EDFとA1/P添加EDFからなるハイブリッド型EDFの1.48 μm 帯励起とすることにより、低雑音・高出力・利得平坦化を同時に、ほぼ任意の動作点で実現することができる。〈C〉は分散補償器や光ADM、光スイッチ等の機能部品を中間部に内蔵したタイプである。図2(A)の構成での4波(1543~1558 nm)一括増幅時の特性例を図3に示す。設計動作点である総入力信号光パワー-10 dBmでの利

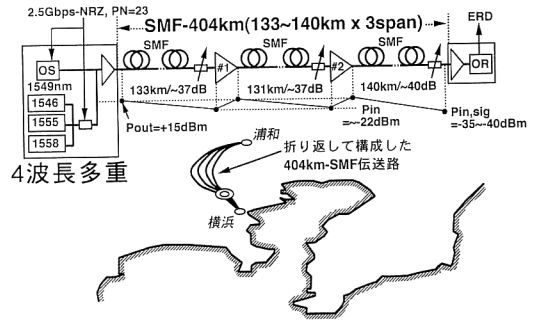


図5 ハイブリッド型インラインアンプを用いた2.5 Gbps \times 4波WDM伝送フィールド実験の構成。

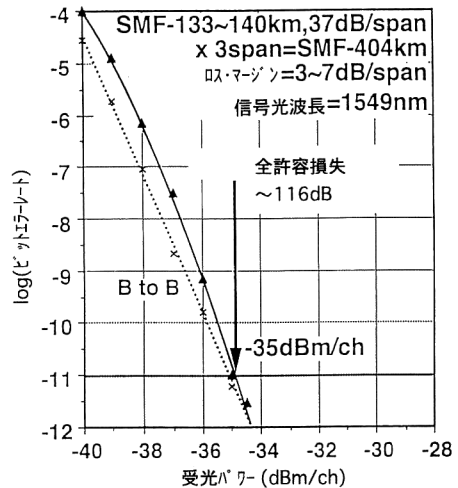


図6 4波WDM伝送フィールド実験における伝送前および404 km伝送後のBER特性。

得偏差は0.3 dB以下、総出力信号光パワーは+17 dBm、NFは5 dB以下である。

2.2 波長多重伝送フィールド実験¹⁸⁾

陸上幹線中継系における波長多重用として、ハイブリッド型EDFAを用いた光増幅中継器(インラインアンプ)が開発されている¹⁹⁾。EDFAの構成は図2(a)とほぼ同様であるが、前段は1.48 μm 帯励起としている。図4には、本インラインアンプを5段用い、8波(1545.5~1557.7)の光信号を多段増幅したときの、光出力スペクトラム例を示す。5段増幅(トータル利得200 dB以上)後でも、最大利得偏差は2 dB以内に抑えられている。

同様のインラインアンプを用い、図5に示す構成にて、実際に敷設された伝送路(シングルモードファイバーケーブル)を使用した2.5 Gbps \times 4波(1546, 1549, 1555, 1558 nm)のWDM伝送実験を行った。3スバ

ン、計 404 km 伝送後も、図 6 に示すような良好な伝送品質が得られていることが確認された。

3. ファイバークレーティングの開発動向

ファイバークレーティングは、GeO₂ 添加コアの紫外光誘起屈折率変化を用いて、紫外光の干渉パターンをファイバー側面より照射することにより、ファイバーコア内にブラッグの回折格子を形成したもので、特定波長のみを反射する反射型フィルターとして機能する。したがって、WDM 伝送システムにおいて、ファイバークレーティングは所望の信号光波長を取り出すフィルターとして用いることができる。

その代表的な作製方法としては、二光束干渉法²⁰⁾と位相格子法²¹⁾が挙げられるが、再現性に富む後者が、最近では広く用いられるようになってきた。また、あらかじめファイバーを水素に浸漬することにより、大きな屈折率変化の得られることが報告され²²⁾、反射率が高く、透過遮断率の大きいファイバークレーティングが短時間で作製できるようになった。

このような高反射率のグレーティングにおいては、伝搬モードから逆進するクラッドモードへのモード変換が顕著となり、これが反射波長の短波長側に挿入損失として観測される。この損失は WDM 伝送システムにおいて、隣接する波長の信号光パワーを減じることになるため、低減することが必要となる。これを解決する方法として、伝搬光のコアへの閉じ込めが強い高 NA (numerical aperture) のファイバー²³⁾や、クラッドにもコアと同等の GeO₂ を添加したファイバー²⁴⁾にグレーティングを書き込むことが提案されている。

ところで、第 1 節で触れた利得等化用のファイバークレーティングは、上記のブラッグ反射型ファイバークレーティングとは異なって、一般に長周期グレーティングと呼ばれるものである。これは、伝搬モードから同方向に進むクラッドモードへのモード変換を行うものであり、その格子周期が一般に数百 μm 程度になることからこの名がある。その損失ピーク波長と半値幅は紫外光照射量やグレーティング長により制御できる²⁵⁾。したがって、複数の長周期グレーティングを組み合わせることにより、EDFA の利得波長特性と逆特性をもつ光フィルターを実現でき⁶⁾、5 Gbps \times 20 波 (1550.4~1561.8 nm)、6300 km の WDM 伝送実験にも成功している²⁶⁾。また最近では、より広い波長範囲で損失スペクトラムを EDFA の利得スペクトラムと精密に合わせ込み、これを 2 段増幅の中間部に挿入して、利得偏差が 5% 以

下となる帯域が 1528~1568 nm の 40 nm にも及ぶ広帯域利得平坦化 EDFA を実現している²⁷⁾。

これらを実用化する上では、その特性の温度依存性と信頼性が問題となる。ブラッグ型ファイバークレーティングの反射波長の温度依存性は 0.01 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 程度であるが、線膨張係数の異なる 2 種の部材を組み合わせた実装構造²⁸⁾や、負の線膨張係数をもった部材へ実装^{29,30)}することにより、温度依存性を 1 桁程度低減できることが示されている。一方、長周期グレーティングの損失ピーク波長の温度依存性は使用するファイバーにより様々だが³¹⁾、伝搬光とクラッドモードの伝搬定数の温度に対する振舞いが互いに異なるため、上記のような実装構造により温度依存性を解決することはできない。そのため、ファイバーの屈折率分布形状を最適化したり³²⁾、コアに B₂O₃ を添加して、コアの屈折率の温度依存性をクラッドと同等とする³³⁾等、グレーティングを書き込むファイバー自体に工夫をすることが提案されている。

信頼性については、特性の熱的安定性について詳しく議論がなされており、あらかじめ適切な温度でアニールを施すことにより、紫外光誘起屈折率変化に寄与するガラス欠陥のうち、不安定な欠陥を除去して、使用温度環境下で十分な熱的安定性が得られることが示されている³⁴⁾。さらに、耐放射線特性についても評価されており、実用上問題のないことが示唆されている³⁵⁾。

4. 光 ADM 用ファイバークレーティング

光 ADM は、各ノードで特定の波長 (チャネル) の引き落としと追加挿入を行うものであり、WDM 伝送システムの構成に柔軟性をもたせることができるため、光波ネットワークを構築する上で重要な技術である。最近の国際標準化の動向では、WDM 伝送の最小チャネル間隔は 100 GHz (波長にして約 0.8 nm) となる見通しであり、特定のチャネルを切り出すフィルターには透過/反射チャネル間の高いアイソレーションが要求されることから、ファイバークレーティングには大きな期待が寄せられている。

光 ADM を実現する方法としては、光サーキュレーターとファイバークレーティングを組み合わせたもの³⁶⁾やアレイ導波路格子合成分波器³⁷⁾を用いたもの等が提案されている。後者は、すべてのチャネルをいったんフィルタリングするため、縦続接続時に透過波長特性が急峻になり、信号光波長変動に対するトレランスが小さくなるという問題がある。前者は、このような問題がないため、現状最も実現性の高い方法であると考えられる。

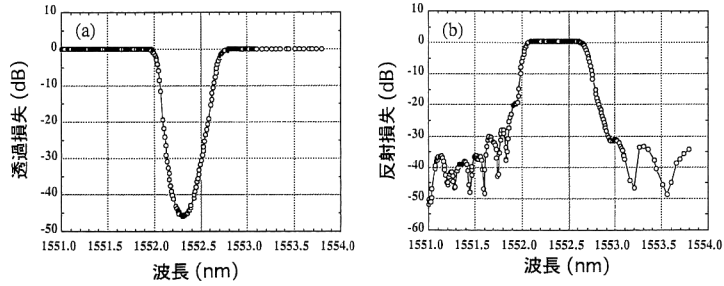


図7 光 ADM 用ファイバグレーティングの透過(a)および反射(b)スペクトラム。

4.1 狭帯域ファイバグレーティング

先に述べたように、光 ADM 用のファイバグレーティングには、透過/反射チャンネル間の高いアイソレーションが要求される。これを実現するため、アポタイゼーションと呼ばれる手法を用いる³⁸⁾。これは、ファイバ長手方向にグレーティングの強度を滑らかに変化させるもので、反射スペクトラムに現れるサイドモードを抑圧することができる。この際、短波長側にファブリー・ペロー共振モードが残留するが、これはグレーティング長手方向の平均屈折率を一様にするにより回避できる³⁹⁾。

図7は、このようにして作製されたファイバグレーティングの透過(a)ならびに反射(b)スペクトラムの一例である。損失ピーク波長である1552.3 nmにおいて、最大透過遮断率は46 dBにも達していることがわかる。また、ファブリー・ペロー共振モードが抑圧された結果、ピーク波長±0.5 nmの波長において、30 dBもの高いアイソレーションが得られた。

4.2 光 ADM 実験⁴⁰⁾

この光 ADM 用ファイバグレーティングを用いて、実際に光 ADM を含む2.5 Gbps×4波(1543.7～1557.7 nm) 320 km シングルモードファイバ伝送実験を行った。図8はその実験系である。第2節の図2(A), (C)で説明したEDFAを用いて320 km伝送を実現した。(C)はあらかじめ光 ADM 等の機能部品を内蔵することを想定した設計になっており、その構成は図9に示した。この際、ファイバグレーティングで落としかねなかった drop 光と add 光との干渉に起因するコヒーレントクロストーク⁴¹⁾が伝送特性上最大の問題となり、drop 光と add 光の波長が一致したとき、最も劣化が大きい。そのため、drop 光の一部を分岐し、これを add 光として伝送特性を評価した。

図10は、add 信号光なし(a)、あり(b)の場合につい

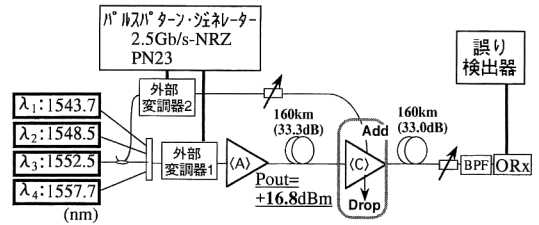


図8 光 ADM を含む2.5 Gbps×4波 320 km シングルモードファイバ WDM 伝送実験系。

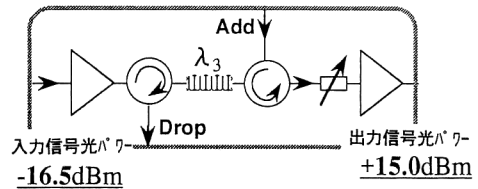


図9 光 ADM の構成。

での光 ADM 出力部の光スペクトラムである。波長分解能は0.1 nmである。ファイバグレーティングのもつ高い透過遮断率により、40 dB以上の消光比がとれていることがわかる。図11には伝送品質特性を示す。Drop 光、add 光ともに、back-to-back 特性に対しペナルティーなく伝送されており、良好な伝送品質が得られていることが確認された。

以上、WDM 伝送システムならびに光波ネットワークを支えるファイバ型デバイスの中から、特にEDFAおよびファイバグレーティングを取り上げ、その開発の現状と動向について、具体的開発例である「WDM 伝送用ハイブリッド型EDFA」および「光 ADM 用ファイバグレーティング」を織りまぜながら概説した。

本文では詳しく触れなかったが、将来の光波ネットワ

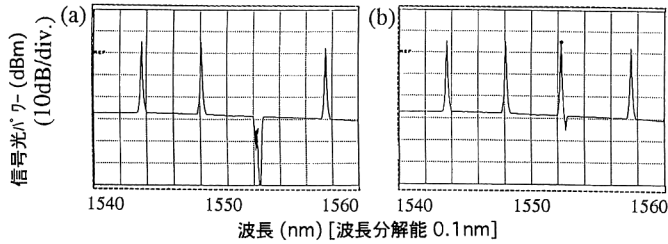


図10 光 ADM 出力部の光スペクトラム。(a) add 信号なし, (b) add 信号あり。

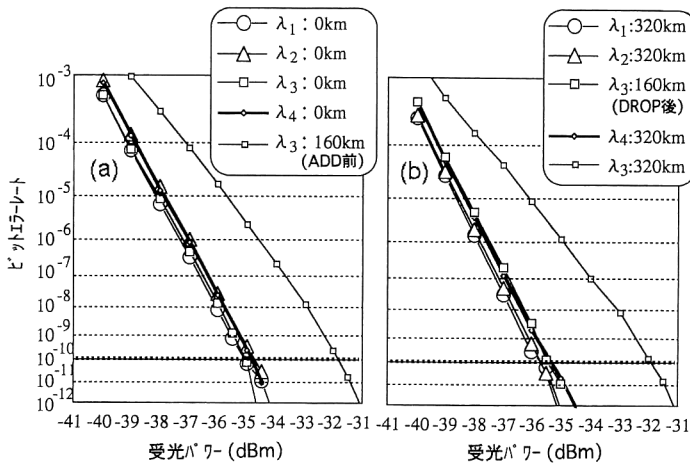


図11 光 ADM 前(a)および後(b)の伝送品質特性。

ークへの EDFA の適用を考えると、光信号チャンネル数の増減に伴う入力信号光パワーの変動等の動作条件の変化に対する EDFA の追従性もきわめて重要な課題である。一般に、入力信号光パワーの変動に伴い利得が変化すると、それに追従して利得波長依存性も変化してしまう。これを回避するためには、利得一定制御が有効であるが、入力の変動に応じて出力が変動するという別の問題も生じる。自動制御可能な光減衰器⁴²⁾や、損失波長依存性を制御できる利得等化器⁴³⁾を用いたり、光学的フィードバックループを利用する方法⁴⁴⁾等が提案されており、今後、インテリジェント化された EDFA の実現を目指した開発が進むと考えられる。

またファイバグレーティングについても、ここで紹介した光 ADM 用狭帯域フィルターや利得等化器のみならず、ファイバ長手方向にグレーティング周期を変化させたチャープグレーティングによる広帯域フィルターや波長分散補償⁴⁵⁾、ファイバグレーティングを半導体レーザーの外部共振器として用いることにより、レーザー発振波長の安定化・発振スペクトラムの狭線幅

化を図ったハイブリッドレーザー⁴⁶⁾等への応用が考えられており、今後の光ファイバ通信網の発展において、重要な役割を果たしていくものと考えられる。

文 献

- 1) M. Fukui, et al.: *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, ThC.3.2.
- 2) S. Ishikawa, et al.: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '95*, ThC3.
- 3) T. Kashiwada, et al.: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **3** (1991) 721-723.
- 4) 田代至男, ほか: “信学会総合大会 (1997) C-3-91.
- 5) S. G. Grubb, et al.: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '92*, FD1.
- 6) H. Toba, et al.: *European Conference on Optical Communication (ECOC) '94*, pp. 263-266.
- 7) H. Taga, et al.: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '96*, PD5.
- 8) M. Vengsarkar, et al.: *Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC) '95*, PD1-2.
- 9) T. Kashiwada, et al.: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '93*, MA6.
- 10) S. Yoshida, et al.: *Electron. Lett.*, **31** (1995) 1765.
- 11) B. Clesca, et al.: *Opt. Fiber Technol.*, **1** (1995) 135.
- 12) A. Mori, et al.: *Optical Fiber Communication Conference*

- (OFC) '97, PD1.
- 13) T. Kashiwada, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '95*, TuP1.
 - 14) M. Semenkoff, *et al.*: *Electron. Lett.*, **30** (1994) 1411.
 - 15) 角井素貴, ほか: 信学会総合大会(1997)C-3-84.
 - 16) M. Kakui, *et al.*: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '96*, SaA3.
 - 17) 角井素貴, ほか: 信学技報, OCS 96-16 (1996).
 - 18) 中里浩二, ほか: 信学会通信ソサイエティ大会(1996) B-1116.
 - 19) 早田叔弘, ほか: 信学会通信ソサイエティ大会(1996) B-1040.
 - 20) G. Meltz, *et al.*: *Opt. Lett.*, **14** (1989) 823.
 - 21) K. O. Hill, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 1035-1037.
 - 22) P. J. Lemaire, *et al.*: *Electron. Lett.*, **29** (1993) 1191-1193.
 - 23) T. Komukai, *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1995) Part. 2, No. 10A.
 - 24) D. E. Bojs, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '95*, PD5.
 - 25) A. M. Vengsarkar, *et al.*: *IEEE J. Lightwave Technol.*, **14** (1996) 58-65.
 - 26) N. S. Bergano, *et al.*: *European Conference on Optical Communication (ECOC) '95*, ThA. 3.1.
 - 27) P. F. Wysocki, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, PD2.
 - 28) G. W. Yoffe, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '95*, W1A.
 - 29) D. L. Weidman, *et al.*: *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, MoB. 3.5.
 - 30) T. Iwashima, *et al.*: *Electron. Lett.*, **33** (1997) 417-419.
 - 31) V. Bhatia, *et al.*: *Opt. Lett.*, **21** (1996) 692-694.
 - 32) J. B. Judkins, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD1.
 - 33) K. Shima, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, FB2.
 - 34) T. Erdogan, *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 73-80.
 - 35) 榎本 正, ほか: 信学会エレクトロニクスソサイエティ大会(1996) C-145.
 - 36) C. R. Giles, *et al.*: *Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC) '95*, ThC 2-1.
 - 37) 岡本勝就: *光学*, **25** (1996) 696-702.
 - 38) B. Malo, *et al.*: *Electron. Lett.*, **31** (1995) 223-225.
 - 39) T. A. Strasser, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD8.
 - 40) 井上 亨, ほか: *応用物理*, **66** (1997) 33-36.
 - 41) E. L. Goldstein, *et al.*: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **6** (1994) 657-660.
 - 42) S. Kinoshita, *et al.*: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '96*, SaA5.
 - 43) M. Fukutoku, *et al.*: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '96*, FA4.
 - 44) J. L. Jackel, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, TuP4.
 - 45) R. Kashyap, *et al.*: *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, ThB. 3.2.
 - 46) 濱川篤志, ほか: 信学会総合大会(1996) SB-11-12.

(1997年4月2日受理)