TR-O-0107

29

波長1.06μm帯ネオジウム添加光ファイバ増幅器

宮崎　哲弥

1996. 3. 6

ATR光電波通信研究所

波長1.06μm帯
ネオジウム添加光ファイバ増幅器

テクニカルレポート

（株）エイテイアール光電波通信研究所
無線通信第一研究室
宮崎　哲弥

概要

本レポートは新たに開発した波長1.06μm帯で動作する光ファイバ増幅器の技術情報に関してまとめたものである。光ファイバ増幅器においては光がファイバの中を進むうちに数100倍以上にも強度が強められる（増幅される）。現在波長1.5μm帯で動作する光ファイバ増幅器が光ファイバ通信のキーデバイスとして実用化されているが、古くから使われているＹＡＧレーザ光源の波長帯である波長1.06μm帯で動作する光ファイバ増幅器はまだ開発されていなかった。

今回開発した1.06μm帯ネオジウム（Nd）添加光ファイバ増幅器（NDFA）のプリアンプとしての基本増幅特性、高利得低雑音増幅特性、またブースタアンプとしての高出力化についても紹介する。さらに設計の時に役立つ理論解析モデルを付録に記載した。

目次

1．背景　1

2．光プリアンプ　1
　2－1　構成　1
　2－2　最適ファイバの選択　2
　2－3　高利得低雑音増幅特性　3

3．光ブースタアンプ　3
　3－1　偏波合成された複数励起ＬＤによる高出力化　3
　　3－1－1　構成　4
　　3－1－2　増幅特性　4
　3－2　ダブルクラッドファイバによる高出力化　6
　　3－2－1　構成　6
　　3－2－2　解析モデル　8

4．ＮＤＦＡの将来展望　9

5．参考文献　10

6．付録　ＮＤＦＡの解析モデル　11

１．背景

単一モードNd:YAGレーザ光源[1]は、高いコヒーレンス（線幅数kHz）を持ち、光周波数および光出力安定度も高く、自由空間光伝送[2]、光計測等広範な適用分野を有している。Nd:YAGレーザ光源用の光増幅器は、それぞれの用途における大容量化、高出力化、高感度化などの性能向上を進める際に有用である[3]。1.06μm帯の光増幅器としてこれまで固体レーザ型光増幅器が開発されてきたが[4]、光学系が大きいため振動の影響を受けやすく、また偏波依存性も大きい。

1.06μm波長帯で増幅動作するネオジミウム（Nd）ドープ光ファイバ増幅器（NDFA）は、ファイバ中に添加されているNdが理想的な４準位系であるため低雑音増幅特性を有し、また励起光源として微分量子効率の高い（0.75 mW/mA[5]程度以上）0.8μm帯AlGaAs半導体レーザ（LD）を用いることができるため、30 dB以上の増幅利得を3 dB付近の雑音指数とともに達成することができる。従ってNDFAをレーザレーダ[6]や各種ファイバセンシングシステム[7]における光プリアンプとして適用することが可能である。一方衛星間光通信などの自由空間伝送システムの光送信系においては、所望の光出力まで高速変調された信号光を増幅する光ブースタアンプとしての動作も期待される。特に1.06μm波長帯は自由空間伝送システムのビーム捕捉追尾センサとして不可欠なＣＣＤセンサの検出可能上限波長であるため[8]、NDFAによる高出力光ブースタアンプは光プリアンプとともに宇宙空間におけるギガビット光リンク実現のための必須デバイスとなる。

２．光プリアンプ

２－１　構成

Nd^{3+}イオンのエネルギー準位は図１に示す様な４準位系となっている。信号光波長帯においてレーザ下準位からの吸収がないため低雑音な増幅動作が期待でき、また励起光源は市販のLDモジュールを用いることができる。

図２にNDFAの構成および評価系を示す。信号光源は単一縦モード1.06μmNd:YAGレーザを用いた。高出力化に有利な後方励起方式を採用し、励起光源は発振波長0.808 μmの単一モードLDモジュールを用いた。入出力段に１個ずつ設けた光アイソレータの信号光波長における挿入損失は2 dB、アイソレーションは30 dBであった。励起光と信号光との合波モジュール（WDM）の挿入損失は、信号光波長1.064 μmで1 dB、励起光波長0.808 μmで0.34 dBであった。この他に融着部による損失は合計約１dBであり、従って信号光波長における増幅装置全体の過剰損失は６dBであった。この値は今後光アイソレータの材料及び融着条件の最適化により低減の余地がある。ここでは増幅利得を増幅装置出力においてNdドープファイバの着脱で生じる信号光スペクトル強度差として光スペクトラムアナライザ（OSA）により評価した。また信号光入出力強度および自然放出光雑音強度はNdドープファイバの入出力点において、また励起光強

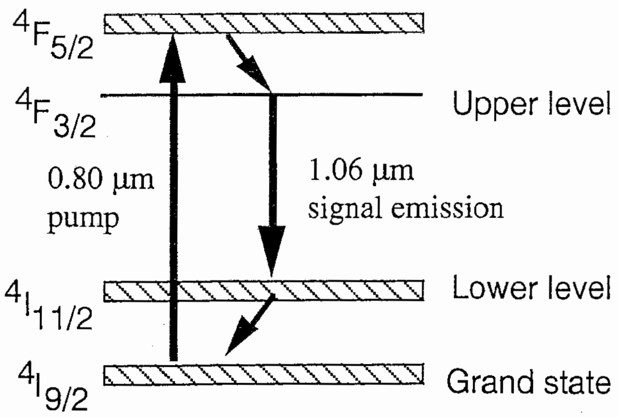


図１　Nd^{3+}イオンのエネルギー準位図

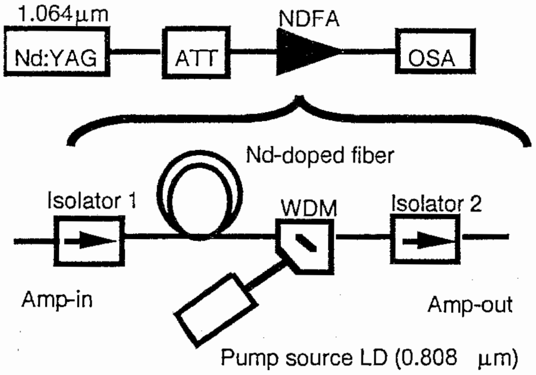
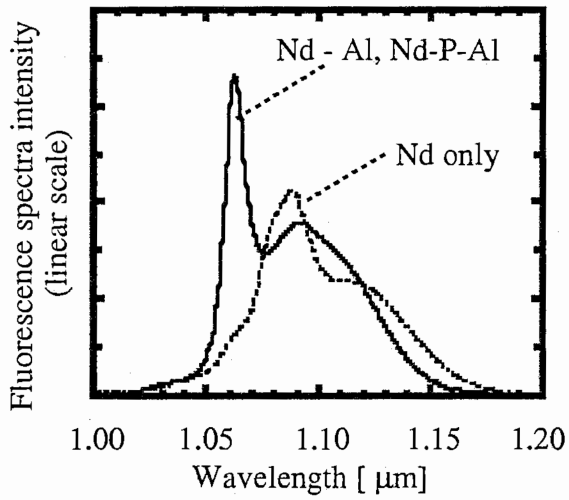


図２　NDFAの構成および評価系

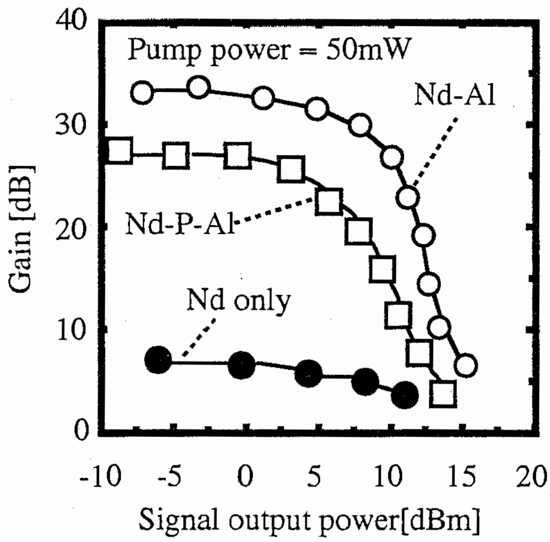
度はWDM部のNdドープファイバ側出力ポートにおいて規定した。

２－２　最適ファイバの選択

図３にNdドープ光ファイバの蛍光スペクトル形状（図３（a））及び利得飽和特性（図３（b））を、Ndのみ添加した場合、4000 ppmのAlのみを共添加した場合、同濃度のAlと0.1mol%のPを共添加した場合について示す。ただしNd濃度条長積はいずれの場合も4 kppm*mとした。蛍光スペクトルは、Ndのみ添加の場合（点線）はピーク波長が1.08 µmであるのに対し、Alのみ共添加及びPとAl共添加の場合（実線）は、ほぼ同一形状であり、いずれもピーク波長は1.06 µm付近にシフトし、より急峻（半値全幅14 nm）となることがわかった[9]。また励起光強度50 mWにおける小信号利得は、Alのみ共添加の場合（白丸）が32 dBで最も高く、次いでPとAl共添加の場合（四角）が27 dB、Ndのみ添加の場合（黒丸）は7 dBであった。これらの結果から1.06µm帯増幅器用Nd添加ファイバとしてAlのみを共添加したファイバを採用した。表１に採用したNdドープ光ファイバーの諸元を示す。



(a)



(b)

図3　蛍光スペクトル（a）、及び利得飽和特性（b）におけるAl及びP共添加の効果

Nd 添加濃度	175 ppm
ファイバ長	23 m
P共添加濃度	0.1 mol%
Al 共添加濃度	4000 ppm
カットオフ波長λ_c	0.75 μm
比屈折率差ΔN	0.96 %

表１　Ndドープ光ファイバーの諸元

光増幅器構成	励起光強度 [mW]	小信号利得 [dB]	利得係数 [dB/mW]	偏波依存性 [dB]
本研究 (NDFA)	38	27	0.81	< 0.2
固体レーザ光増幅器	2 000	52 (12 pass)	0.025	大

表２　1.064 μm帯NDFAの試作結果と従来の固体レーザ型光増幅器の性能の比較。

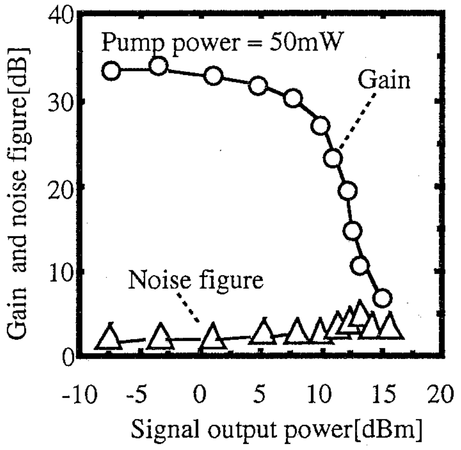


図４　Alのみ共添加の場合の利得及び雑音指数

２－３　高利得低雑音増幅特性

図４にAlのみ共添加の場合の利得及び雑音指数の信号光出力依存性を示す。雑音指数は偏光消去法[10]による測定結果を用いて算出した。3 dB付近の雑音指数が達成されており、Alのみ共添加したNDFAは1.064μm帯において高利得かつ低雑音な光プリアンプとして最適であることがわかった。表２に今回の試作評価結果を従来のNd:YAG固体レーザ型光増幅器[4]とともに示す。この固体レーザ型光増幅器の場合、2Wの励起光をNd:YAG結晶に照射し、信号光を１２回に亘って結晶中を通過させることにより50 dBの利得を得ているが、利得効率は低くまた入力する信号光の偏光状態をあらかじめ調整してから入力する必要がある。一方、NDFAは、1.06 μm波長帯における小型、高効率かつ偏波無依存な特徴を有することがわかる。

３．光ブースタアンプ

３－１　偏波合成された複数励起ＬＤによる高出力化

高出力光ファイバー増幅器は自由空間、光ファイバー伝送系における送信器や、短光パルス発生器等における高出力化に不可欠である。希土類添加光ファイバの高出力化の一般的な方法として希土類が添加されているコア領域約（10μm径弱）に入射する励起光パワーを増大させるために、励起用高出力ＬＤ光源２台ずつ各々を偏波合成し信号伝搬の順方向および逆方向から励起する、即ち偏波合成された複数励起ＬＤに

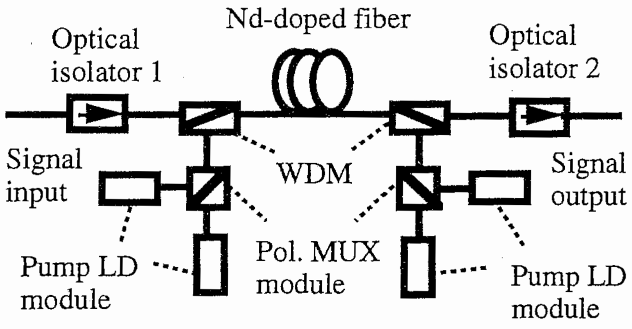


図５　偏波合成された複数励起ＬＤによる
光ブースタアンプの構成。

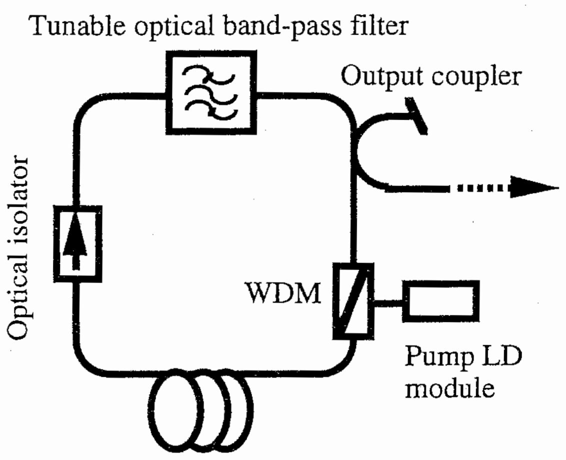


図６　Ndドープファイバリングレーザ (NDFL)

よる高出力化[11]が進められて来た。開発したＮＤＦＡについて、まずこの方式による高出力化を採用した場合の増幅光出力特性について検討を行った。

３－１－１　構成

図５に４個の励起LD光源を用いたNDFAによる光ブースタアンプの構成を示す。４個の励起用LDモジュールの平均光出力は68 mW、発光波長は0.81～0.813μmである。最終的に得られた励起光強度は前方向、後方向各100mWずつの合計200 mWであった。NDFAの増幅特性の励起光強度依存性の測定を以下の構成で行った。励起光強度が60 mW以下の測定は単一の励起LDモジュールによる後方励起方式とし、励起光強度100 mWの場合は２個の励起LDモジュールの偏波多重による後方励起方式とし、励起光強度200mWの場合は合計４個の励起LDモジュールによる双方向励起方式とした。信号光源は波長1.064 μmのNd:YAGレーザ光源の他に図６に示すNdドープファイバリングレーザ（NDFL）も使用した。NDFLは波長0.81μm光出力40 mWの励起LDモジュール、濃度条長積4 kpm*mのNdドープファイバ、光アイソレータ、励起光合波器（WDM）、信号光出力用カップラ、透過波長幅33 GHz、FSR3930 GHz（約14 nm）チューナブル光バンドパスフィルタ（OBPF）により構成される。

３－１－２　増幅特性

図７にNDFLを用いて測定した、励起光入力強度50 mWにおける小信号利得の信号光波長依存性を示す。信号光入力強度（$P_s(0)$）は -45 dBm、濃度条長積（Ntot * L）は4 kpm*mとした。20 dB以上の高利得動作が1.06～1.12 μmの波長範囲の60 nmもの広帯域において得られることが分かる。以降NDFLを用いる場合、動作波長をチューナブル波長フィルタにより利得ピーク波長である1.062 μmに設定する。図８に信号光波長（λ_s）1.064 μmにおける小信号利得の励起光強度依存特性を示す。$P_s(0)$ = -35 dBm、Ntot * L= 4 kpm*mとした。図中○印は後方励起方式、□印は双方向励起方式による測定結果であり、実線は前節の後方励起方式に対応する理論計算結果（付録参照）である。

図９にP_p = 200 mWにおける利得の出力信号光強度特性をλ_s = 1.064μm、1.062μmの

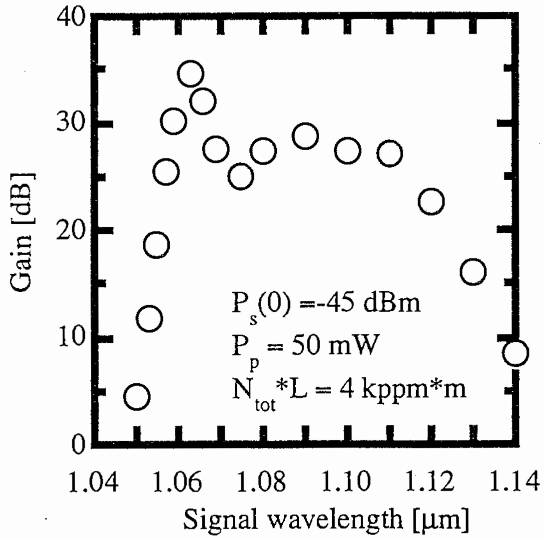


図 7　小信号利得の信号光波長依存性

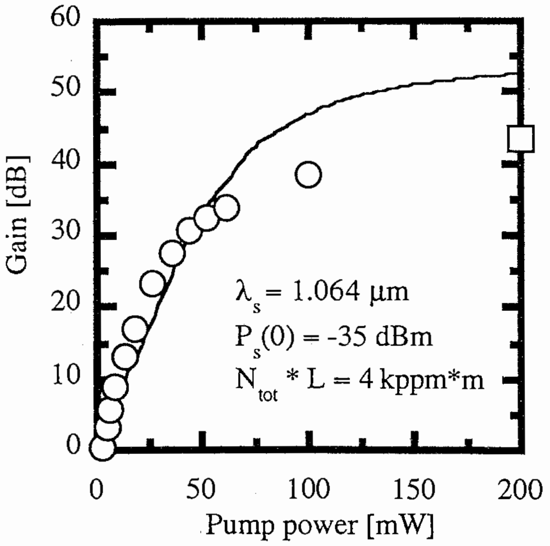


図 8　小信号利得の励起光強度依存特性
○印：後方励起方式、□印：双方向励起方式、実線：理論計算結果

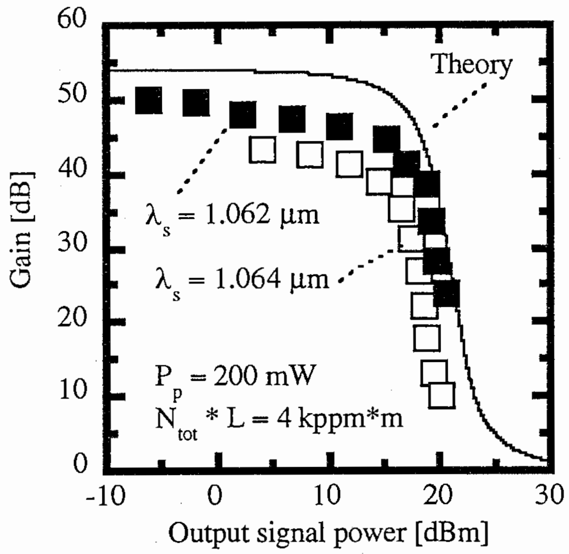


図9　利得の出力信号光強度依存特性

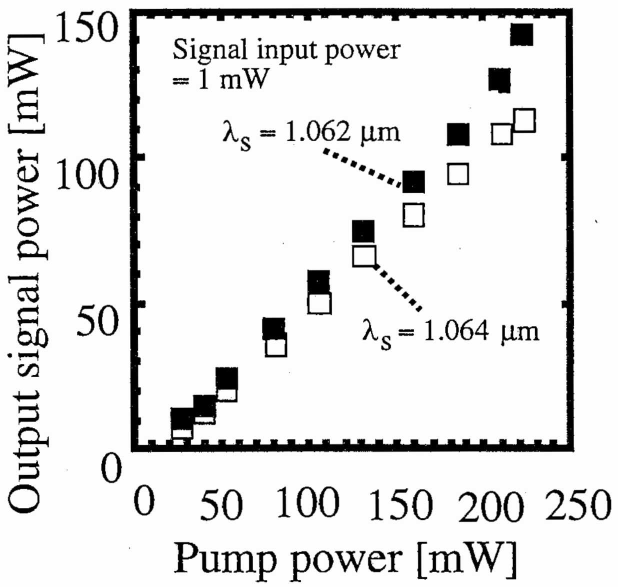


図10　出力信号光強度の励起光強度依存特性

各場合について測定した結果を示す。実線は理論計算結果である。λ_s = 1.064μm、1.062μmの各場合における最大増幅利得は各々、44.5 dB、50.1 dBであり、飽和光出力100 mWを与える増幅利得は各々10 dB、24 dBであった。λ_s = 1.064μmの場合は小信号入力時において利得ピーク波長付近である1.062μmにてレーザ発振が頻発するが、λ_s = 1.062μmの場合は安定な増幅動作が得られた。図10に入力信号光強度が1 mWにおけ増幅光強度の励起光強度依存性をる図 9 同様に各波長について示す。最大増幅光強度は利得ピーク波長付近である1.062μmにて140mW、λ_s = 1.064μmの場合は115 mWを得た。

３－２　ダブルクラッドファイバによる高出力化

波長1.06μm帯のNd（ネオジウム）添加光ファイバーレーザにおいては、ダブルクラッドファイバ（以下DCFと記す）を用いた出力5 Wの単一モード動作が実現されている[12]。これはNdが４準位系でありかつ波長1.06μm帯においては励起準位間吸収や基底吸収が存在しない事を利用している。即ちNdが添加されているコアの周囲の比較的広い第１クラッド領域（300×100μmの方形）に高出力励起光（15 W）を入射させると、第１クラッド領域をマルチモード伝搬する励起光による側方励起効果が得られ、効率的なレーザ増幅動作が可能となる。

この方式の特徴は、励起光の結合領域が拡大するため（100μm径以上）アレイＬＤなどの発光領域幅が広い高出力ＬＤ光源を励起光源として採用することができ、偏波合成された複数励起ＬＤを用いる方式に比べ、増幅器構成を簡略化することができる点にある。

ここでは特に波長1.06μm帯のNd添加光ファイバーレーザに於ける高出力化の手段として実績のあるDCFを用いた、ＮＤＦＡの高出力化について検討を行う。その際必須となるDCFの構造を提案しそれを用いた増幅器構成について検討する。さらにNd添加DCF光ファイバー増幅器の設計指針を得るための解析モデルを提案し、励起光強度、ファイバー長、添加濃度等の設計パラメータに対する増幅動作特性を明らかにする。

３－２－１　構成

図１１（a）に従来のDCF、図１１（b）に提案するDCFの構成図を示す。図１１（a）に於いてDCFはコア、第１クラッド、第２クラッドにより構成され、外側の構成要素ほど低屈折率となる。コア、第１クラッドまでの材料として石英、第２クラッドの材料としてポリマーを用いた場合を図示する。

従来のDCFに信号光を直接入射する際、信号光が第１クラッド領域をマルチモード伝搬する場合があるため、単にDCFの出射端において透過光パワーをモニタするだけ

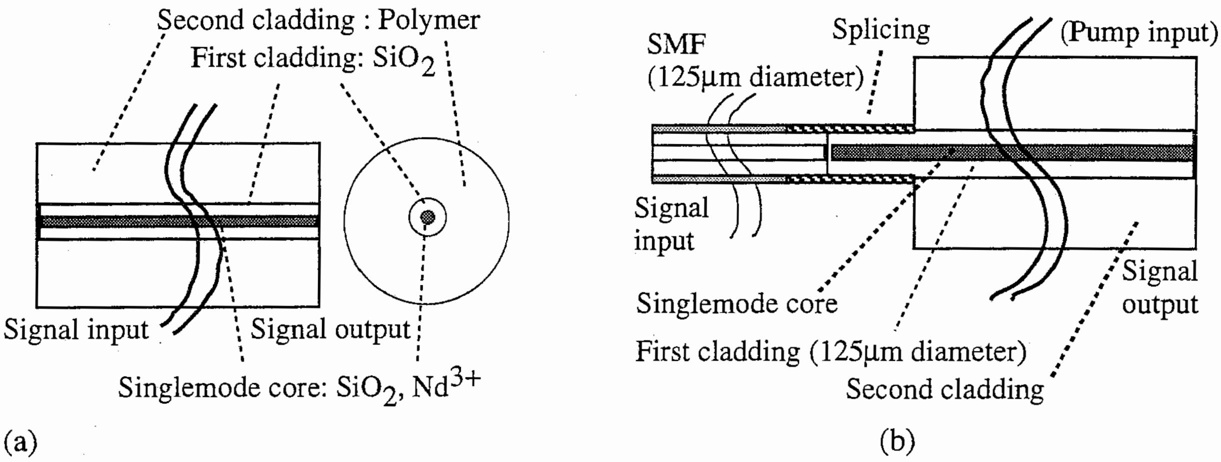
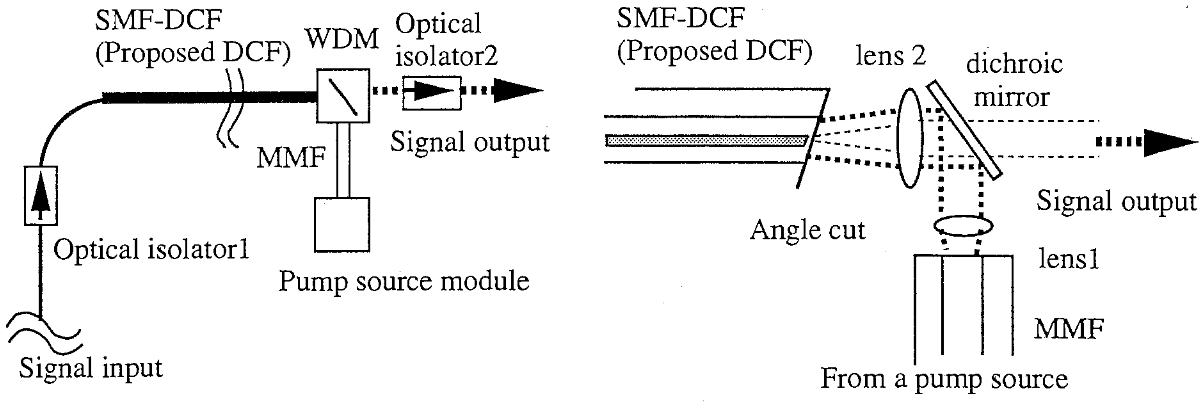
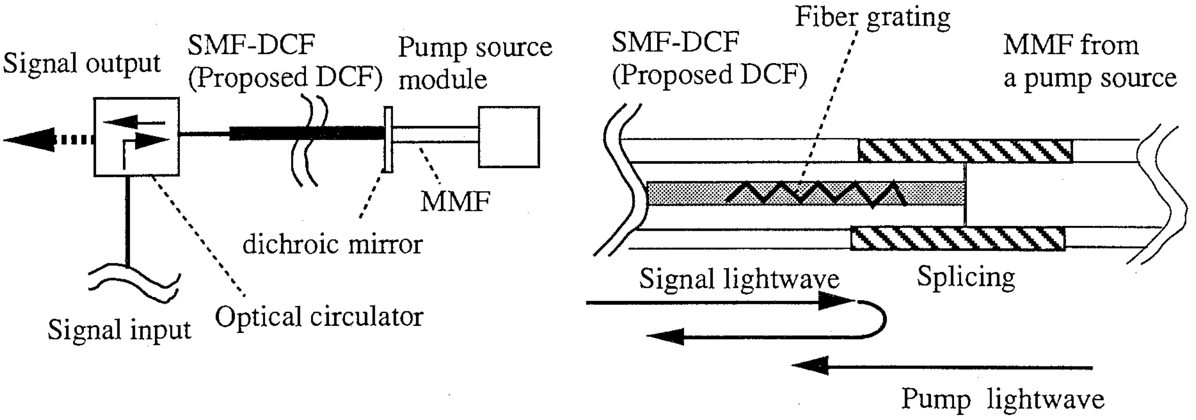


図１１　DCFの構成図
（a）従来のDCF、（b）提案するDCF。



(a)構成要素　　　　　　　　　　　　　　(b)WDM部

図１２　後方励起方式



(a) 構成要素　　　　　　　　　　　　(b) ファイバグレーティングによるダイクロイックミラー

図１３　反射ダブルパス励起方式

では、信号光のDCFコア領域への確実な入射結合調整をすることができない。

この問題点を解決するために本論文では図１１（b）に示す様な片端にシングルモードファイバ（SMF）が接続されたDCF（以下SMF-DCFと記す。）を提案した。信号光を一旦SMFへ入射させることにより、クラッドに入射した信号光はSMF部において除去され、コアをシングルモード伝搬した信号光のみがDCF部へ到達し、DCF内に於いては第１クラッドへ洩れることなく（クラッドモードとなることは無しに）コア領域をシングルモード伝搬する。従って信号光のコア領域への入射結合調整がDCFの信号光出射端（励起光入射端）において透過光パワーをモニタするだけで可能となる。励起光はDCFの信号光出射端から口径125μmの第１クラッド領域へ入射させる。この様なSMF-DCFは第２クラッドの材料としてポリマーを用いる場合、以下の方法により構成することができる。DCFのコア径は信号光波長においてシングルモード条件となる口径とし、第１クラッド径は通常のシングルモードファイバ（SMF）のクラッド径125μmと同一とし、さらにその外周を低屈折率ポリマー等をかぶせて第２クラッドとする。最後に信号光入力側は適当な長さに亘って第２クラッドのポリマーを除去した後SMFと融着する。

提案したSMF-DCFを用いた光増幅器の励起方式として図１２に後方励起方式を、ま

また図１３に反射ダブルパス励起方式を示す。ここではワットクラスの光出力が得られる高出力励起光源として、半導体レーザアレイの出力光を口径100～200μm程度のマルチモード光ファイバ（MMF）に結合した励起光源モジュールの採用を想定する。後方励起方式においては図１２（a）に示す様に光アイソレータ１、光アイソレータ２、SMF-DCF、WDM、励起光源モジュールが構成要素となる。図１２（b）に示す様にWDM部に於いてはMMFから出射した励起光はコリメートレンズ1を通過した後、励起光波長に於いては高反射、信号光波長に於いては低反射のダイクロイックミラーを介してSMF-DCFの第１クラッドへ結像される。信号光は信号光入力側光アイソレータを経てSMF-DCFに入射し、コア部において増幅されコリメートレンズ2により平行ビームとして出射される。SMF-DCFの励起光入射端（増幅光出射端）はレーザ発振を抑圧するため斜め研磨する。またアイソレータ２により、外部から反射帰還する光は除去され、反射帰還光の影響を受けずに安定な増幅動作が維持される。

３－２－２　解析モデル

次にNd添加DCFに対応する解析モデルについて検討する。提案したSMF-DCFの第１クラッド領域（125μm）にワットクラスの高強度の励起光を入射した場合を想定する。Nd原子の励起光吸収効率は励起光の照射方向によらず一定とすると、第１クラッド領域をマルチモード伝搬する励起光に対する吸収効率は同一パワーの励起光がコア領域のみを伝搬する場合に比べて、全ファイバ長に亘りコア領域と第１クラッド領域の面積比分だけ一様に減少すると考えられる。そこでDCFの励起光吸収断面σ^{dcf}_{abs}として通常のNd添加SMFの励起光吸収断面積値σ_{abs}にDCFのコア径aと第１クラッド径d1の２乗比を乗じた値

$$\sigma^{dcf}_{abs} = \sigma_{abs} (a / d_1)^2 \qquad (1)$$

を導入する。また励起光吸収断面積以外の1.06μm帯NDFA固有の物性パラメータ（η_s、η_p、σ_s、λ_s、λ_p、τ、a等）は付録に示した値を用い、Nd添加濃度、励起光パワー、ファイバー長等を設計パラメータとして計算を行った。

図14に利得のDCF長依存性の計算結果をNd添加濃度N_{tot}=175（点線）、1750（実線）[ppm]、信号光入力強度$P_s(0)$= -30、10 [dBm]の各場合について示す。但し、第１クラッド領域へ入射される励起光強度$P_p(0)$は$P_p(0)$=1 [W]とした。Nd添加濃度を１０倍に増加させることにより、ほぼ１／１０のDCFファイバー長によるものと同等の利得が達成され、DCF構造とすることによる励起光吸収効率の低下は、Nd添加濃度の高濃度化及びDCFファイバーの長尺化により補償可能であることがわかる。N_{tot}= 1750 [ppm]の場合DCFファイバー長が100 [m]付近から利得が飽和し、信号光入力強度が10 [dBm]（10 mW）の場合には、ファイバ長100[m]において利得13 [dB]、即ち23 [dBm]（200 mW）程度の増幅光出力が得られることが分かる。

図15にNd添加DCFによるNDFAの利得飽和特性の計算結果を第１クラッド領域へ入射される励起光強度$P_p(0)$が$P_p(0)$ =1、5、10 [W]の各場合について示す。但しN_{tot} =1750[ppm]、DCFファイバ長は100[m]とした。本研究の解析モデルに自然放出光の端面反射による利得飽和の効果を考慮すると、小信号利得の値はいずれの場合も40～45 dB付近に抑圧されることが予想される。利得が20 dBとなる増幅信号光出力を飽和

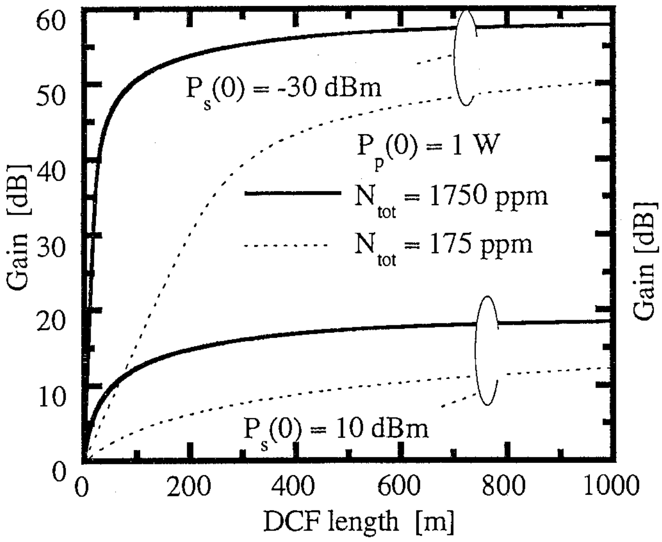


図14　利得のDCF長依存性の計算結果

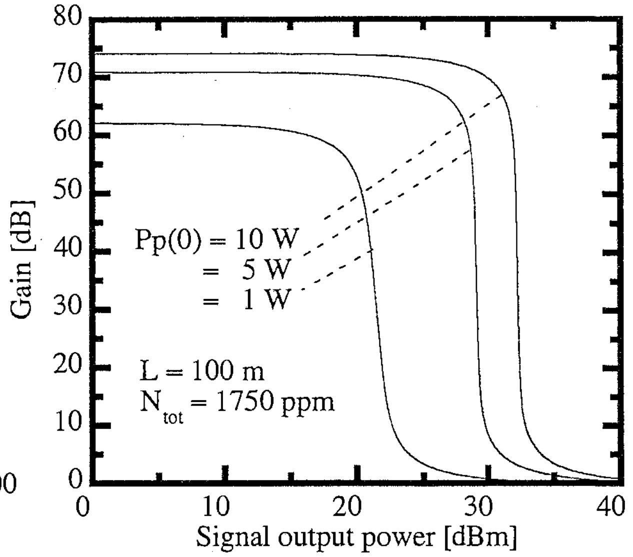


図15 Nd添加DCFによるNDFAの
利得飽和特性の計算結果

光出力として定義すると、Pp(0)=1、5、10 [W]の各場合の飽和光出力は22[dBm]（160 [mW]）、29.5 dBm（890 [mW]）、32.5 dBm（1.8 [W]）であり、励起光の増幅信号光への変換効率は約20%であることが分かる。Nd添加濃度を可能な限り増加し、さらに第1クラッド領域内に屈折率差を設けてGrated-Index（GI）構成として励起光の強度分布を最適化することにより、より短いファイバー長で高利得高出力動作が実現可能となるであろう。

4．ＮＤＦＡの将来展望

光プリアンプとしては狭帯域光フィルタ（帯域幅1nm以下）と組み合わせることにより、1μw(-30dBm)～ 0.1μW(-40dBm)程度の微弱光の高感度検出に現状の性能で充分対応可能である。数10nW(-50dBm)以下の微弱光の検出には増幅器内部の過剰損失を低減すること、および増幅後の信号処理系の検討が必要となるであろう。最近波長1.06μm帯において挿入損失が1.0dBを切る低損失光アイソレータが入手できるようになり[14]、現状の過剰損失は3 dBであるため入出力光アイソレータ１個ずつにつき2dB、合計4 dBの過剰損失低減が可能となる。また測定系等を伝送してきた空間伝送ビームを単一モード光ファイバへ結合するための簡便且つ高結合効率を有する結合光学系の開発も重要である。MITのリンカンラボのグループにより、光結合とコヒーレント光検波を組み合わせたFiber NutatingReceiver[15]が開発されている。またフォトリフラクティブ２光波混合効果を用いた、自律的な光結合系[16]も電気制御を用いない結合系として、ポテンシャルがあると思われる。光ブースタアンプとしては現状で複数励起ＬＤによる高出力化により100 mWを超える光出力が得られており、今後サブワットクラスのシングルモードファイバ出力の励起用AlGaAsＬＤモジュールが開発されれば、この方式において1 Wもしくは1W弱の信号光出力が期待できる。0.98μm

励起光源においては500mWシングルモードファイバ出力のモデルが近々SDL社から発売され[17]、0.8μm帯もこれに続く可能性は大きい。またダブルクラッド構造の採用は増幅系の簡易化という点で　魅力的であり、現在問題となっている散乱損失の低減に成功すれば数ワットクラスのＮＤＦＡを実現することができるであろう。

５．参考文献

[1] T.J.Kane, et al., Opt. Lett., vol.12,pp.175-177, 1987.

[2]A.E.Marini, et al., Proc.SPIE, vol.1417, pp.200-211, 1991.

[3]宮崎、他　信学技報　OCS94-70, pp.55-60,1994.

[4]T.E.Olson, et al, IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 6, no. 5, pp. 605-608, 1994.

[5]例えば、SDL Product Catalog,pp.40-41, 1995., SDL Inc.

[6]E.V.Browell, The Review of Laser Engineering, vol.23, no.2,pp.135-141,1995.

[7] 山下、他　Optoronics、 no.9、 pp.132-140、 1994.

[8]飯田、Optoronics, no.6、pp.118-123、1995.

[9]T.Miyazaki, et al., Electron. Lett., vol.30, no.25, pp.2142-2143, 1994.

[10]J.Aspell, et al., Technical Digest of OFC '92, vol. 5, ThA4, pp. 189-190, 1992.

[11]J.C.livas, et al., Electron. Lett., vol.30, no.13, pp.1054-1055,1994.

[12]H.Po, et al., Electron. Lett., vol. 29, no.17, pp.1500-1501, 1993.

[13]K.O.Hill, et al., " Appl. Phys. Lett.,vol.62, no.10, pp.1035-1037, 1993.

[14]H. Kawa, et al., Digest of INTERMAG '95, HE-02, 1995.

[15]E.A.Swanson, et al., Proc.SPIE, vol.1218, pp.70-82, 1990.

[16]宮崎、他　信学技報　OCS94-93, pp.55-60,1995.

[17]SDL Product Catalog, 1996., SDL Inc.

[18]S.Yamashita, et al., Electron. Lett.,vol.28, no.14, pp.1323-1324,1992.

6．付録　ＮＤＦＡの理論解析モデル

ここではファイバ中の信号入力端からの距離zにおける４準位系のレート方程式において、解析モデルの簡略化のため、信号光、励起光の光強度分布及びNdの添加分布はコア内において一様であるとし、誘導放出および吸収の信号光波長依存性は考慮しない。また信号光及び励起光のファイバー内における散乱及び吸収は充分小さいとして無視する。順方向励起のNDFAの場合、レート方程式[6]は以下の(A1)～(A5)式の様に導出できる。

$$\frac{dN_2(z)}{dt} = W_p(z)[N_{tot} - N_2(z)] - W_s(z)N_2(z) - \frac{N_2(z)}{\tau} \qquad (A1)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -P_p(z)\sigma_{abs}[N_{tot} - N_2(z)] \qquad (A2)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = P_p(z)\sigma_{abs}[N_{tot} - N_2(z)] \qquad (A3)$$

双方向に伝搬する自然放出光成分$P_{ASE}{}^{\pm}(z)$を考慮し、

$$\pm\frac{dP_{ASE}{}^{\pm}(z)}{dz} = \left(h\frac{c}{\lambda_s}\Delta\nu_{ASE} + P_{ASE}{}^{\pm}(z)\right)\eta_s\sigma_s N_2(z) \qquad (A4)$$

$$W_s(z) = \frac{P_s(z) + P_{ASE}{}^{+}(z) + P_{ASE}{}^{-}(z)}{h\frac{c}{\lambda_s}a}\eta_s\sigma_s \qquad (A5)$$

$$W_p(z) = \frac{P_p(z)}{h\frac{c}{\lambda_p}a}\eta_s\sigma_{abs} \qquad (A6)$$

ここでzは全長LのNd添加ファイバに於ける信号光入射端を起点とする位置を示し、$N_2(z)$、$P_s(z)$、$P_p(z)$、$W_s(z)$、$W_p(z)$は各々位置zに於ける上準位Nd原子濃度、信号光パワー、励起光パワー、誘導放出遷移確率、誘導吸収遷移確率である。またN_{tot}は全Nd原子添加濃度、η_s、η_pはそれぞれ信号光及び励起光のコアへの閉じ込め係数、σ_sは誘導放出散乱断面積、σ_{abs}は励起光吸収断面積、λ_s、λ_pは信号光及び励起光の波長、aはコア断面積であり、η_s =0.5、 η_p =1 、σ_s= 4.5×10^{-24} [m^2]、σ_{abs}=1x10^{-21} [m^2]、λ_s= 1.064 [μm] 、λ_p= 0.808 [μm]、a=5 [μm]、$\Delta\nu_{ASE}$ = 2 nmとして計算した。レーザ上準位寿命τ及びNd原子添加濃度N_{tot}、Nd添加ファイバ長Lは先に試作したNDFAの実測値τ = 370 [μs]を用いた。これら(A1)～(A6)を連立し、セルフコンシステント条件[18]を満たすまで繰り返し計算を行った。ダブルクラッドファイバの場合は３－２－２(1)式に示す様にσ_{abs}を設定して計算を行った。