

単一モードファイバーDFB レーザーの開発

電子工学専攻 植田研究室 渥美 貴之

概要

重力波検出用光源(fiber-MOPA)の主レーザーである NPRO に替わる主レーザーとしてファイバーDFB レーザーの開発を目指す。まず、位相マスク法による透明ファイバーへのFBGの書き込みを行い、フルエンスに対するFBGの透過率依存性を測定した。続いてコア中に利得媒質であるYbが添加されたファイバー中にファイバーDFBを作製し、ファイバーDFBレーザー発振実験とその評価を行った。

1. はじめに

重力波検出用光干渉計には高安定、高出力の光源が必要とされており、当研究室では、fiber-MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)による光源開発を行っている。

fiber-MOPAとは、図1に示すような安定な主レーザーをファイバー中で増幅させるシステムであり、現在、fiber-MOPAの主レーザーには発振波長1064nm、500mW出力の半導体レーザー励起モノリシック型Nd:YAGレーザー(NPRO)を使用している。しかし、主レーザー光を自由空間で一度ファイバーに結合する必要があるため、安定性の面で問題がある。そこで、主レーザーにファイバーレーザーを用いることでオールファイバーMOPAシステムが構築可能となり、より一層の光学系の小型化、機械的安定度の向上が見込まれる。

本研究ではNPROに替わる主レーザーとして、単一モードかつ狭線幅の発振が得られるファイバー分布帰還型(DFB:Distributed Feedback)レーザー[1]の開発を目指す。将来的にはスペース重力波アンテナ(DECIGO)への応用も検討中である。

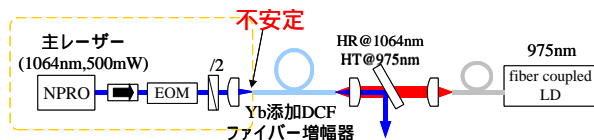


図1 fiber-MOPA システム

2. ファイバーDFB レーザー

ファイバーレーザーには、ビーム品質がよい、冷却効率が高い、狭線幅等の特長がある。一方、共振器長が長いために、マルチ縦モード発振してしまうという問題がある。そのためファイバーレーザーの単一縦モード化には、さまざまな工夫がされているが、構成が大変複雑である[2]。そこで構成が簡単でかつ安定に単一縦モード発振可能であるファイバーDFBレーザーを選択した。ファイバーDFBレーザーとは、アクティブファイバー(コア中に利得媒質である希土類が添加されている)中に書き込まれた回折格子構造(FBG:Fiber Bragg Grating)により発振するレーザーである。ファイバーDFBレーザーは、単に均一なFBGを形成しただけではレーザー発振はブラッグ波長で起こらず、ブラッグ波長から少し離れた2つの周波数で発振してしまう。そこで、図2(b)のようにFBGの中心部分に位相シフト領域を設けることでブラッグ波長のみで単一縦モード発振可能となる。

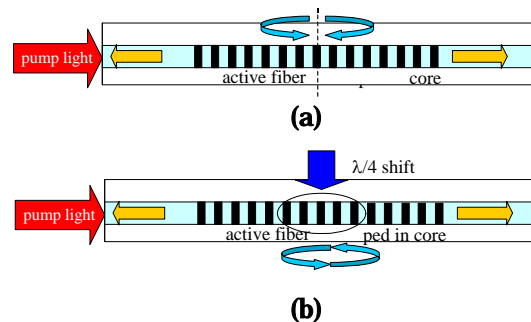


図2 ファイバーDFB レーザー概念図
(a)DFB レーザー (b) $\lambda/4$ シフト DFB レーザー

3. 位相マスク法による FBG 作製

FBG の代表的な作製方法には位相マスク法、2 光束干渉法の 2 つの方法がある。本研究では安定的作製可能、量産性に優れるという点から前者による方法を採用した。

位相マスク法とは UV 光の ± 1 次回折光の干渉を利用し、ファイバーコア中に屈折率変化を書き込む方法である。作製概念図を図 3 に示す。得られる FBG の反射波長 λ_B は位相マスクのグレーティング周期によって下式のように決定される。

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$$

n_{eff} :ファイバーの実効屈折率

Λ :グレーティング周期

Λ_{pm} :位相マスクのグレーティング周期 ($= 2\Lambda$)

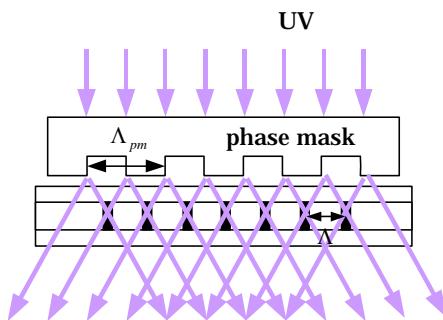


図 3 位相マスク法による FBG 作製概念図

FBG 作製実験図を図 4 に示す。露光光源には波長 1064nm Nd:YAG Q-switch レーザーの第 4 次高調波 266nm を使用した。非線形結晶には β -BaB₂O₄ 結晶を用いている。

まず、長さ 1cm、 $\Lambda_{pm}=1069.60\text{nm}$ の位相マスクを使用し、透明ファイバー-GF4A(GeO₂ 濃度 30wt%) に FBG の書き込みを行い、FBG 作製の条件だしを行った。ビーム径($\Phi 2\text{mm}$)は、ファイバーに対して水平方向は円筒面平凹レンズ($f=-100\text{mm}$)によりひろげ、ファイバーに対して垂直方向は円筒面平凸レンズ($f=200\text{mm}$)により絞って位相マスクに入射している。ファイバーと位相マスクとの距離は約 $400\mu\text{m}$ とし、

透過光を光スペクトルアナライザ (安藤電機、波長分解能 0.01nm) で測定した。位相マスクの破壊閾値は $1\text{J}/\text{cm}^2$ であり、屈折率変化の閾値を測定したところ、フルエンス閾値 (1 パルスあたりのエネルギー密度) は $40\text{mJ}/\text{cm}^2$ であった。

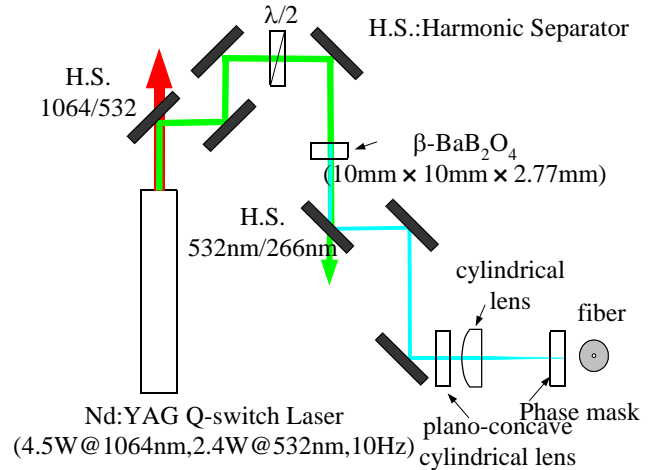


図 4 FBG 作製実験構成図

フルエンス $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ における FBG 透過スペクトルの時間的変化を図 5 に示す。照射時間 50 分において、中心波長 1556.22nm 、半値全幅(FWHM, Full Width at Half Maximum) 0.28nm 、最大反射率 10.8dB が得られた。照射時間とともに、中心波長が長波長側にシフトし、反射率も増加していくことが分かる。中心波長が長波長側にシフトしていくのは、屈折率変化に伴い、有効屈折率 n_{eff} が増加したためである。また、照射時間とともに、反射率の増加が鈍くなり、 10dB 付近で飽和していることが見てとれる。

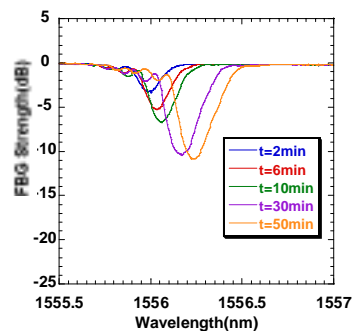
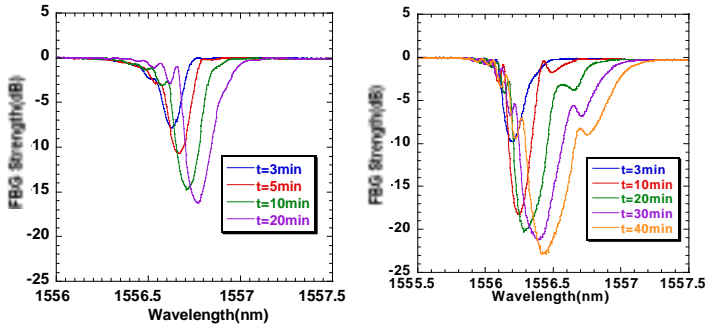


図 5 FBG 透過スペクトル (フルエンス $200\text{mJ}/\text{cm}^2$, 10.8dB , FWHM= 0.28nm)

続いて、フルエンスを 400mJ/cm^2 、 500mJ/cm^2 と変化させた時の FBG 透過スペクトルの時間的変化を図 6 に示す。フルエンス 400mJ/cm^2 、 500mJ/cm^2 において、それぞれ $\text{FWHM}=0.26\text{nm}$ 、 0.85nm 、最大反射率 16.4dB 、 22.9dB の FBG が得られた。



(a) (b)

図 6 FBG 透過スペクトル

(a)フルエンス 400mJ/cm^2 , 16.4dB , $\text{FWHM}=0.26\text{nm}$
 (b)フルエンス 500mJ/cm^2 , 22.9dB , $\text{FWHM}=0.85\text{nm}$

図 5、図 6 より、ドーズ（全照射エネルギー）の変化に伴う FBG の反射率、屈折率変化の推移をまとめたのが図 7 になる。また、この結果は、それぞれのフルエンスにおいて 2 度測定し、その平均をとっている。図 7 よりそれぞれのフルエンスにおいてある一定ドーズにおいて FBG の反射率および屈折率変化が飽和しているのが見てとれる。したがって、最終的に得られる FBG の反射率はドーズではなくフルエンスによって決定することが分かった。同時に 1cm の位相マスクで高い反射率 ($>20\text{dB}$) の FBG を得るためには、フルエンスを 500mJ/cm^2 以上にする必要があることが分かった。

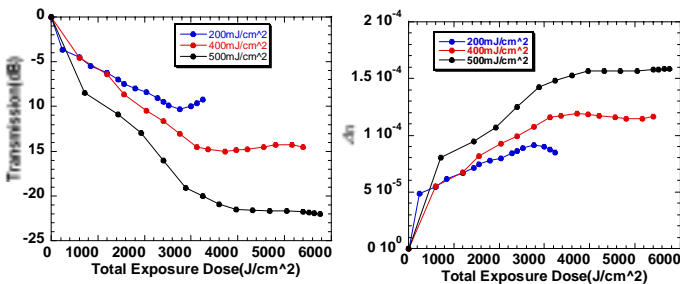
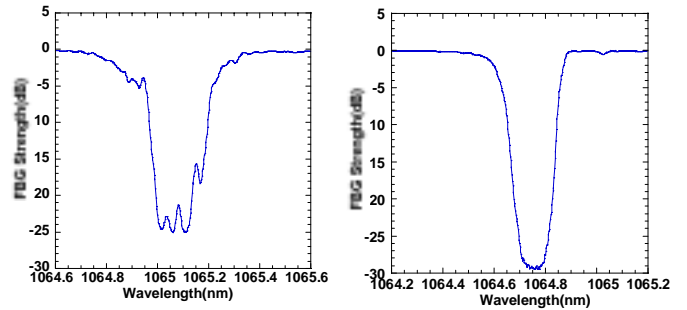


図 7 ドーズに対する FBG 透過率・屈折率変化依存性

4. ファイバー-DFB レーザー

3 章での結果を参考に、長さ 2.5cm 、 $\Lambda_{\text{pm}}=731.70\text{nm}$ の位相マスクを使用し、アクティブファイバー (Yb-fiber) 中へのファイバー-DFB の書き込みを行った。フルエンスは 700mJ/cm^2 とし、UV 光の走査の仕方を (a) ステップ掃引、(b) 連続掃引としたところ、図 8 のようなスペクトル構造のことなる 2 つのファイバー-DFB が形成された。(b) の DFB2 は透過スペクトルがきれいであり、屈折率変化が均一に近い FBG が形成されたと予想されるのに対し、(a) の DFB1 はスペクトルに構造が見られ、屈折率変化のプロファイルに構造が見られることが予想される。



(a) (b)

図 8 ファイバー-DFB 透過スペクトル

(a)ファイバー-DFB1, 25dB , $\text{FWHM}=0.39\text{nm}$
 (b)ファイバー-DFB2, 29.6dB , $\text{FWHM}=0.25\text{nm}$

上図で得られたファイバー-DFB を用いて、ファイバー-DFB レーザー発振実験を行った。実験配置図を図 9 に示す。励起光源には波長 975.4nm 、 200mW 出力の半導体レーザーを使用し、WDM ファイバーカップラー ($975/1064\text{nm}$) を用い、Yb-fiber を励起している。ファイバー端面によるフレネル反射 (4%) を防ぐために、Yb-fiber の端面にはインデックスマッチングオイルをぬり、出力ポート 1 側には 1064nm 用のアイソレーターを融着した。

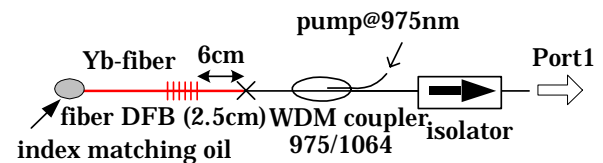


図 9 ファイバー-DFB レーザー発振実験配置図

ファイバーDFB1使用時の発振スペクトルと出力特性を図 10(a)(b)に示す。励起パワー45mWにおいて発振を確認し、最大励起パワー66mWにおいて、50 μ Wの出力を得ることができた。

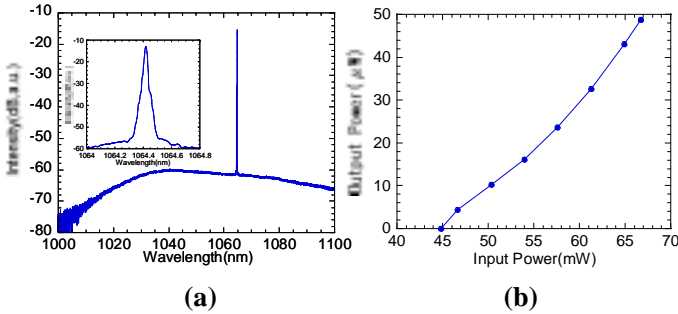


図 10 ファイバーDFB1 使用時における
(a)発振スペクトル (b)出力特性

図 11に示すように自己遅延ヘテロダイン法により、線幅の評価を行った。遅延ファイバーには300 mのHI-1060を使用($\tau=1.5\mu$ s、分解能300kHz)した。自己遅延ヘテロダイン法では線幅が2倍となることと、得られたビート信号が分解能である300kHz以下であったことから、得られたレーザーの線幅は150kHz以下であるということが分かった。尚、信号にはファイバーMOPAによって50 μ Wから約1mWに増幅したものをを使用した。

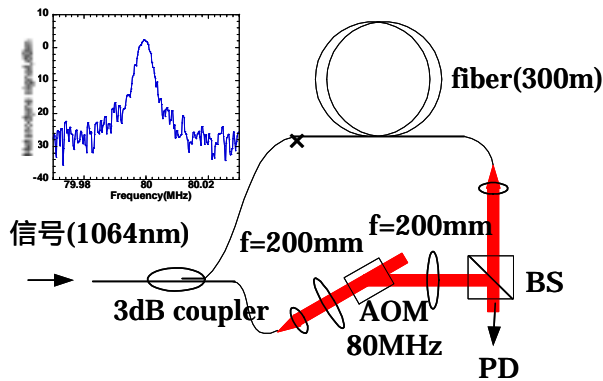


図 11 自己遅延ヘテロダイン法による
線幅測定実験構成図と得られたビート信号

続いて、相対強度雑音を測定した。結果を図 12に示す。

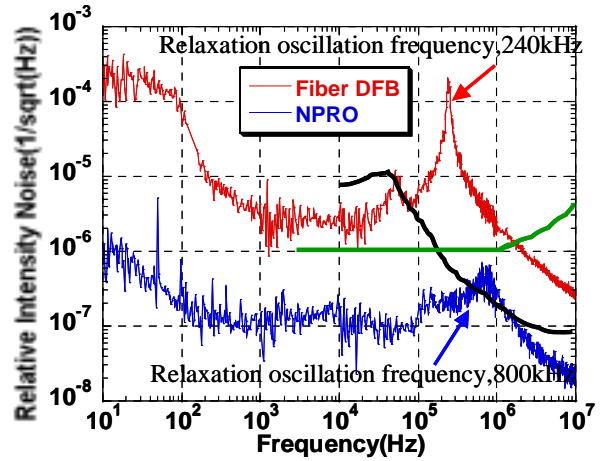


図 12 ファイバーDFB レーザーの相対強度雑音(赤線)と他レーザーとの比較(NPRO:青線,半導体 DFB レーザー:緑線,単一周波数ファイバーレーザー:黒線)

図 12 より、ファイバーDFB の緩和振動周波数のピーク値が NPRO に比べ、急峻になっているのが見てとれる。これは、ファイバーDFB レーザーは高 Q 共振器が構成されているためだと考えられる。また、雑音レベルは NPRO と比較すると 1 桁から 2 桁程悪くなってしまっているが、半導体 DFB レーザー (緑線) や単一周波数ファイバーレーザー (黒線) と比較すると同程度の雑音レベルであるということが分かった。

次に、ファイバーDFB1からファイバーDFB2に変更し、同様の実験を行ったところ、最大励起パワーにおいても発振を確認することができなかった。この理由をDFBレーザー発振条件から考察する。

均一なFBGの κL (FBGの反射率に相当する係数)に対するそれぞれの閾値利得理論値を図 13の青線に示す[3]。Yb-fiberのシングルパスゲインは、小信号利得計測により1.6dBであることから、均一なFBG使用時に、発振に必要な κL は5.1(39dB)となり、ファイバーDFB1,2は共に発振条件を満たしていないことが分かる。

そこで、ファイバーDFB1は均一なFBGではなく、 $\pi/2$ 位相シフトFBGであると考えた。均一なFBGは位相不整合により、ブラッグ波長から少し離れた2つの周波数で発振してしまうのに対し、 $\pi/2$ 位相シフトFBGは位相整合がとれ、ブラッグ波長のみで発振す

るため、発振閾値が低くなる。 $\pi/2$ 位相シフトFBG使用時の閾値利得理論値を図 13の赤線に示す[4]。図 13から $\pi/2$ 位相シフトFBG使用時に必要な kL は3.6 (25dB)となり、ファイバーDFB1はこの理論値を満たしている。よって、ファイバーDFB1は均一FBGではなく $\pi/2$ 位相シフトFBGが形成されたために、発振が起こったと考えられる。図 8のFBGのスペクトルからファイバーDFB2はスペクトル構造がきれいであるのに対し、ファイバーDFB1はスペクトルに構造が見られることから、DFB1は位相シフトFBGであると考えられる。

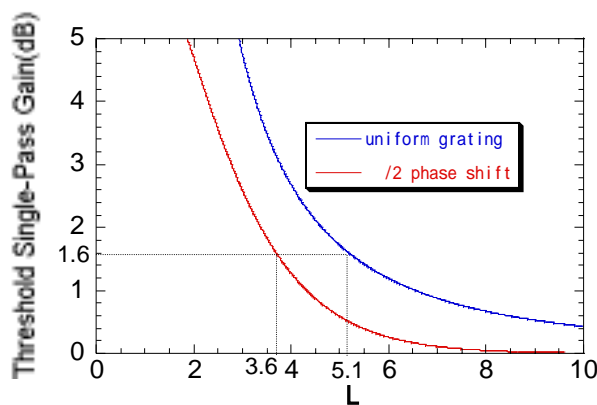


図 13 ファイバーDFB レーザー発振条件

DFBレーザー発振条件より、ファイバーDFB2も位相シフトすることで発振可能である。よって、発振が起こらなかったファイバーDFB2の中心部分をニクロム線によって加熱することで、屈折率の上昇(位相シフト)を引き起こし、発振閾値の低下を試みた。実験構成図を図 14に示す。実験構成図はニクロム線で加熱すること以外図 9と全く同様である。尚、ニクロム線は 200 μm を使用した。

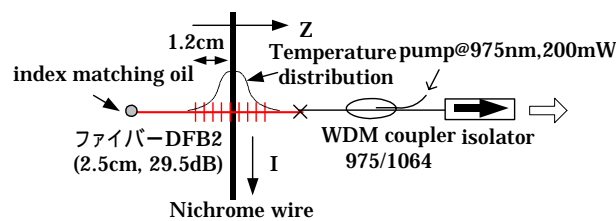


図 14 熱による $\lambda/4$ シフトファイバーDFB レーザー発振実験構成図

図 15(a)(b)に発振スペクトルと出力特性を示す。励起パワー35mWにおいて発振を確認し、最大励起パワー72mWにおいて、最大出力280 μW を得ることができた。しかし、出力は不安定であり、約30%程度変動していた。これは、熱による位相シフトを引き起こしているため、熱が平衡状態になることは難しく、常に位相シフト量が変動してしまうためだと考えられる。

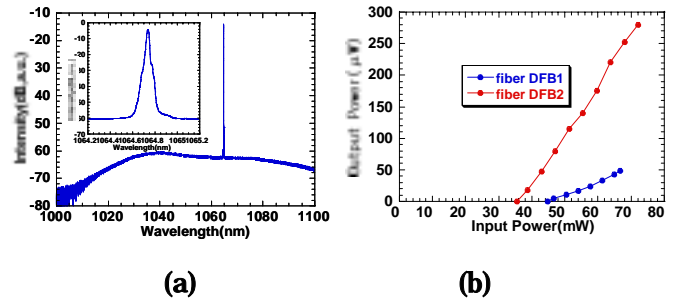


図 15 ファイバーDFB2 使用時における (a)発振スペクトル (b)出力特性

図 15 より、ファイバーDFB2 はファイバーDFB1 と比べ、発振閾値が低下し、出力(スロープ効率)が増加していることが見てとれる。これは、ファイバーDFB1 は $\lambda/4$ に相当する位相シフト量でなかったのが原因だと考えられる。また、ニクロム線のあたる位置を変化させたところ、中心から $\pm 2\text{mm}$ の範囲で発振可能であった。

続いて、熱による位相シフトではなく UV 照射による位相シフトを試みた。これが可能となれば出力が不安定であったファイバーDFB2 の問題点も解消できる。まずは、PS1060(GeO₂ 濃度 10-12wt%)という透明ファイバーに書き込まれた FBG の中心部分に UV 光をあてることで、 $\lambda/4$ シフトグレーティングを作製した。FBG の透過スペクトルの変化を図 16(a)(b)に示す。図 16 から、UV 光の照射により、スペクトル幅が増加しながら、反射率が低下していくのが見てとれる。これは、屈折率変化に伴い反射モードから透過モードへと移行していくため実効的な FBG の長さが短くなったためである。UV 照射 11 分以降、再び反射率が増加していく。これは、位相

シフト量が $\lambda/4$ 以上になったことを示しており、UV照射時間 11 分において $\lambda/4$ シフトグレーティングが形成されたことを確認することができた。

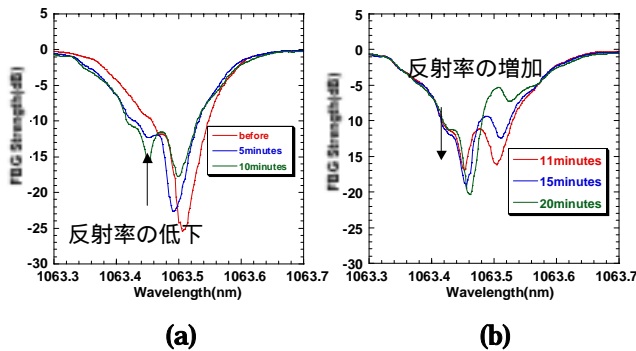


図 16 UV 光照射位相シフトによる FBG 透過スペクトルの変化 照射時間(a)0-11 分(b)15-25 分

以上のことを参考に UV 光照射による $\lambda/4$ シフトファイバーDFB レーザー発振実験を行った。ファイバーDFB には図 17(a)に示すファイバーDFB3 を使用し、最大励起パワーにした状態でファイバーDFB の中心部分に UV 光を照射していった。

照射時間に伴うスペクトルの変化を図 17(b)に示す。図 17(b)より、スペクトル構造の変化(屈折率の変化)は見られたが発振には到らなかった。この原因としては位相シフト量の不足とバックグラウンドロスの増加が考えられる。特に後者の問題が大きく、ファイバーDFB レーザーには Ge、Yb 共に濃度の高い特殊なファイバーが必要であることが分かった。

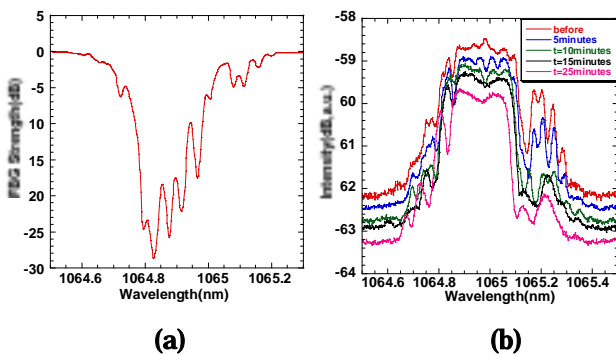


図 17(a)ファイバーDFB3,28.6dB,FWHM=0.32nm (b)UV 光照射によるスペクトルの変化

5. まとめ、今後の展望

重力波検出用光源の主レーザーである NPRO に替わるファイバーDFB レーザーの開発のために、以下のようなことを行った。

位相マスク法による透明ファイバーへの FBG の書き込みを行った。UV 光のフルエンスに対する FBG の透過率依存性の測定し、最終的に得られる FBG の反射率はドーズではなくフルエンスによって決まることを示し、FBG 作製技術を構築した。

アクティブファイバー(Yb-fiber)中へのファイバーDFB の書き込みに成功した。

ファイバーDFB レーザー発振実験とその評価を行った。出力 $50\mu\text{W}$ 、線幅 150kHz 以下、半導体 DFB レーザーらと同等の相対強度雑音レベルである単一周波数 Yb ファイバーDFB レーザーを開発した。

現状では、熱による位相シフトには成功したが、UV 光照射による $\lambda/4$ シフトファイバーDFB レーザーの開発には到っていない。今後は、ファイバーDFB に照射するフルエンスの最適化や屈折率変化の大きい Yb-fiber をすることで UV 光照射による $\lambda/4$ シフトファイバーDFB レーザーが開発可能であると考えられる。また、グレーティング長を長くすることで高出力化も可能である。

参考文献

- [1]M.Sejka,P.Varming,J.Hubner and M.Kristensen, Electron.Lett., **31**, 1445-1446(1995).
- [2]S.Huang,Y.Feng,J.Dong,A.Shirakwa,M.Musha and K.Ueda,Laser Phys.Lett.,**2**,498-501(2005).
- [3]H.Kogelink and C.V.Shank, J.Appl. Phys, **43**, 2327-2335(1972).
- [4]Shinji Yamashita and Gregory J.Cowle,J.Light wave Technol.**17**,509-513(1999).