

紫外 LED を用いた Yb 添加ファイバーの photobleaching

電子工学科 植田研究室 深谷 崇文

1. 序論

今日、Yb 添加ファイバー(YDF)は量子欠損が少なく、濃度消光がおきづらいため、レーザー効率がよく、高出力レーザーなどに多く用いられている。しかし、YDF に対し強励起を行っていると、発振波長域(1 μm 付近)で損失が生じ、レーザー効率が悪くなるため問題となっている。強励起を行っていると可視域で大きな損失が生じるが、この肩が発振波長域での損失に影響をしている。その様子を Fig.1 に示す。これを photodarkning(PD)と呼び、これに対し生じた損失を回復する photobleaching(PB)という現象がある。PB は Nd:YAG レーザーの第三高調波(355 nm)を用いることで、効果が得られることが 2007 年に報告されたが、明確な理由は示されなかった。そのため、現在当研究室では紫外光を出力する半導体レーザー(LD)を用い、クラッド照射により、PB の研究が行われている。しかし、クラッド照射を行う場合、励起光と PB 光を同軸上に重ねる必要があり、実験系が複雑になる。よって、本実験では LD に対し安価で容易に扱える、波長が 385 nm である紫外 LED を側面から照射することで PB が行えるか、実用できるかどうか研究した。

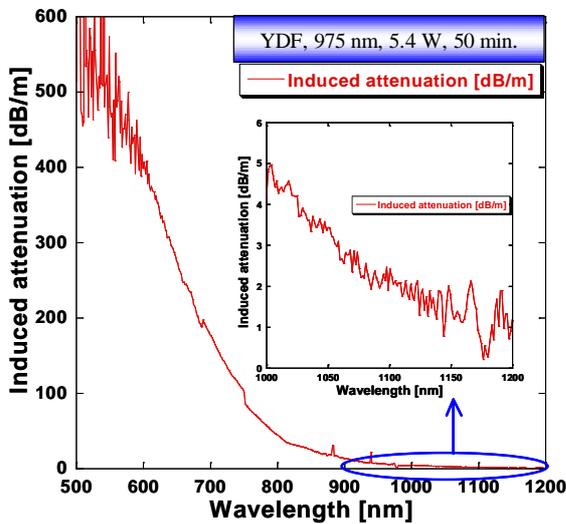


Fig.1 PD 後の YDF の損失スペクトル

2. 原理

PD は Yb イオンの添加濃度によって起こりやすさが異なる。高濃度添加の場合、コアに Yb イオンのクラスタリングができやすく、それにより PD 減少が生じやすい。しかしながら、Yb イオンとイオン半径がほぼ同じである Al イオンを Yb イオンと同時に添加することで、クラスタリングを防

ぎ、PD 現象が生じにくくすることができるという報告がされている。また、一例として Fig.2 に示すように反転分布の 7 乗に比例して PD が生じることが報告されている。そして PD の原理だが、現在仮説は存在しているが、明確なものは示されていない。以下では、仮説について述べる。Yb イオンの準位は準 3 準位であるが、Fig.3 に示すように 2 準位とみなすことができる。その 2 準位のうち上準位に電子が励起されている状態を考える。この状態で励起を行うと、下準位にある電子が 7 つ分のエネルギーを得るという協同アップコンバージョンが起き、ファイバーのホスト材料である石英ガラスの伝導帯まで励起される。その自由に動き回ることができる電子が、安定状態になるために石英ガラスの欠陥サイトに移動し、Yb イオンの価数が 3 から 2 になると同時に、ガラスの構造を変えてしまうことにより損失が起きると考えられている。

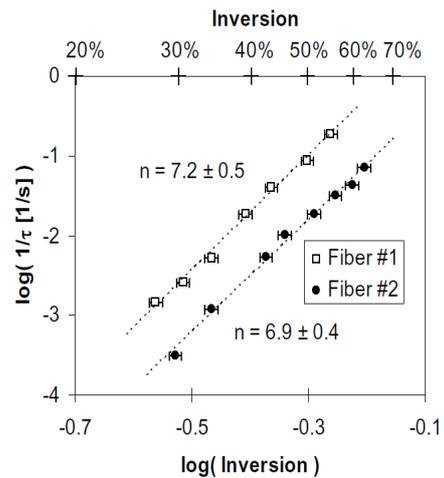


Fig.2 PD の反転分布依存性

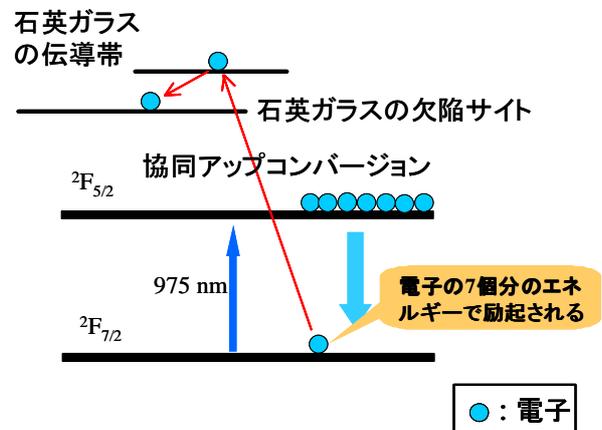


Fig.3 Yb のエネルギー準位図

PBは現在我々の研究室で波長 407 nm の LD を用いて研究を行っている。それにより、PB は 1 光子過程で生じていると考えられている。

3. 実験

3.1 実験に用いた YDF

本実験では YDF を用いたが、コーティングを剥いた状態の断面図を Fig.4 に示す。さらに、YDF の詳細を表 1 に示す。

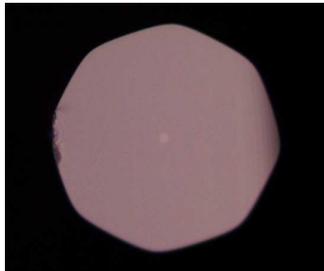


Fig.4 YDF

	YDF
コア形成のための添加材料	Ge
コア径 [μm]	5
クラッド径 [μm]	125
コーティング径 [μm]	250
Yb添加濃度 [wt.%]	1.4

表 1 YDF の詳細

3.2 透過率測定

本実験では側面照射により PB を行ったが、その概念図を Fig.4 に示す。図のように PB 光はコアに照射されるまでにコーティング、クラッドを透過する。クラッドはコアと同じ石英ガラスでできているため、本実験で用いた紫外 LED の光は十分に透過されると考えられた。しかし、コーティングはポリマーでできており、どの程度紫外 LED の光を透過するのかわからなかったため、コーティングの透過率について測定を行った。測定には分光光度計を用いた。また、硬化させることにより、今回用いたファイバーのコーティングと同じポリマーに変化する紫外硬化樹脂を用いた。その測定結果を吸収係数にしたものを Fig.5 に示す。

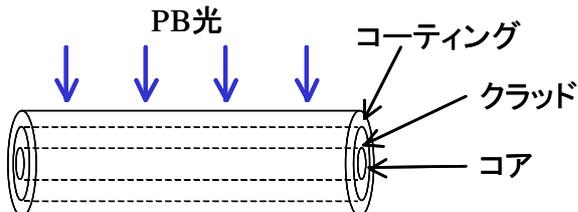


Fig.4 側面照射の概念図

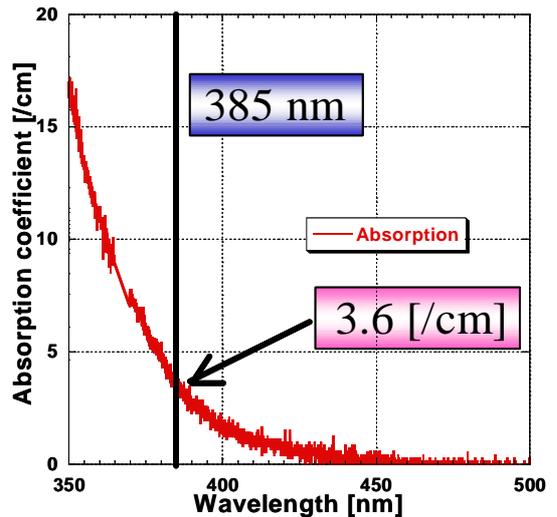


Fig.5 コーティングの吸収係数

吸収係数の測定結果より、波長 385 nm の光に対し、コーティングは 3.6 [1/cm] の吸収があることがわかった。また、本実験で用いたファイバーのコーティングは厚さが 62.5 μm であったので、98% 以上の PB 光を透過することがわかった。

3.3 photodarkening と photobleaching

Fig.6(a),(b)に PD,PB の実験図を示す。Fig.6(a)に示す実験系を用い、未使用の試料ファイバーの透過スペクトルを、白色光源と Optical Spectral Analyzer を用いて測定した。測定後、波長 975 nm の LD で 50 分間励起し PD を起こした。その際 He-Ne レーザーを試料ファイバーに入射し、透過する光強度の時間変化をシリコンフォトディテクター(S.PD)で計測した。その後、PD の起きた試料ファイバーの様々な波長域での透過率を測定するために、白色光を入射し OSA を用いて透過スペクトルを測定した。続いて、十分に PD の起こったファイバーを Fig.6(b)に示す実験系を用い PB する。試料ファイバーの上に LED を設置し側面照射を行いながら、He-Ne レーザーと S.PD を用い透過強度の時間変化を測定した。50 分経った後白色光と OSA で透過スペクトルを計測した。

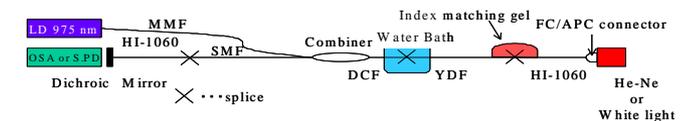


Fig.6(a) PD 時の実験図

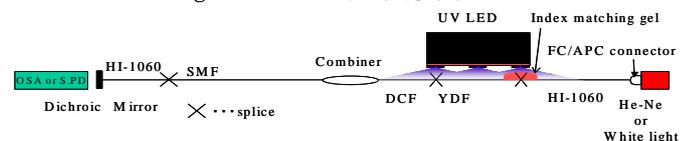


Fig.6 (b) PB 時の実験図

4. 実験結果

5.4 W で PD 後および、照射強度 1.38 W/cm^2 で PB した後のスペクトルの測定結果を Fig8 に示す。右側は発振波長域を抜き出したものであるが、これより PB 後のスペクトルは透過率が回復しているため、PB は行われたものと考えられる。

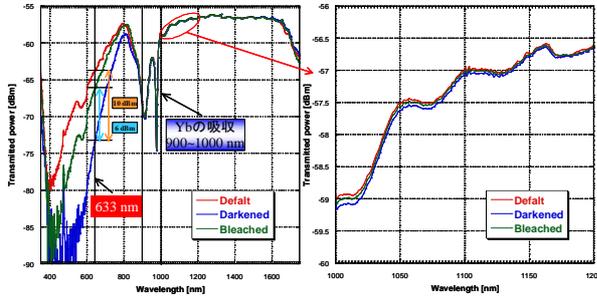


Fig.7 透過スペクトル

続いて PB を行っている最中の吸収係数の時間変化を Fig.8 に示す。これによると、照射強度が大きくなると吸収係数の減少も早く大きくなることがわかった。また、側面照射とクラッド照射どちらの場合においても照射強度がほぼ同じ大きさであれば、同様の PB 効果を得ることがわかった。

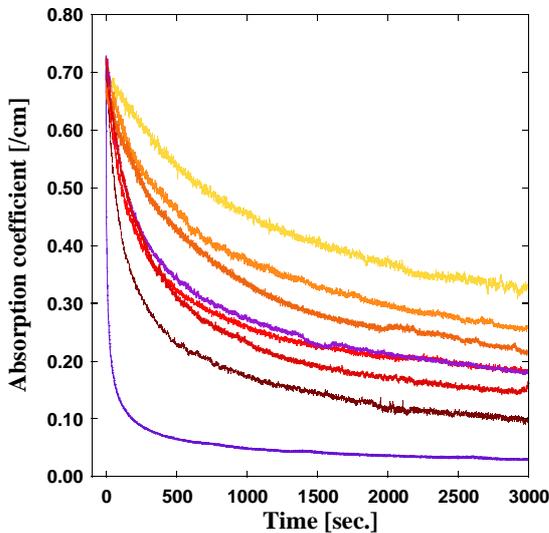


Fig.8 PB 中の吸収係数の時間変化

	光源	YDF-LED 間距離[cm]	出力 [mW]	照射強度 [W/cm ²]
1	紫外LED	1	1200	1.1
2			1800	1.8
3		0.5	1200	4.6
4			1800	7.0
5		0.25	1800	28.2
6			3600	56.3
7	LD		1	7.5
8			16	130.0

表 2 PB 中の吸収係数の時間変化対応表

PB を行った際の、PB の吸収係数の時定数、および吸収係数の最終到達値限界を求めるため、Fig.8 に示したグラフをフィッティングした。その際、一般的に用いられるエクスポネンシャルの式や、ダブルエクスポネンシャルの式ではフィッティングが行えなかったため、以下に示すストレッチエクスポネンシャルの式を用いてフィッティングを行った。

$$\alpha(t) = A(\infty) + [A(0) - A(\infty)] \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right] \quad \dots(1)$$

(1)式において、 $A(\infty)$ は吸収係数の最終到達値限界、 $A(0)$ は初期値、 τ は時定数、 β はストレッチパラメータで $0 \leq \beta \leq 1$ である。ストレッチエクスポネンシャルによりフィッティングした結果を表にまとめたものを表3に示す。表3の値をグラフにしたものを Fig.9 に示す。プロットした点をさらにストレッチエクスポネンシャルでフィッティングを行った結果、最終到達値の限界値が $0.011 / \text{cm}$ であることがわかった。このため、どれだけ照射強度を上げても PB により完全に未使用の状態の YDF と同等に回復させることは不可能である可能性がわかった。しかしながら、まだデータ点がそれほど多くないため、確実なことではない。

	照射強度 [W/cm ²]	最終到達値 A(∞) [1/cm]	時定数 τ [sec.]	β
1	1.1	0.29	1107.1	0.90
2	1.8	0.21	896.6	0.70
3	4.6	0.17	798.8	0.68
4	7.0	0.15	417.9	0.54
5	28.2	0.11	398.8	0.50
6	56.3	0.059	311.4	0.45
7	7.5	0.14	542.4	0.54
8	130.0	0.027	16.1	0.30

表 3 フィッティング結果

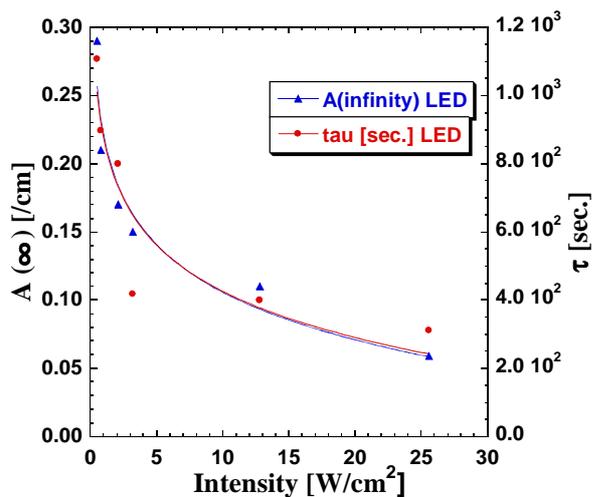


Fig.9 強度と時定数 τ 、最終到達値 $A(\infty)$

フィッティングを行った結果の τ について評価を行う。今回用いたストレッチエクスポネンシャルの式は、2つのパラメータを持っていた。そのため、 τ についてのみ結果を得たかったので β を固定してフィッティングを行った結果を用い、考察を行う。フィッティングにより得られた τ の逆数を対数にしたものを縦軸、照射強度を対数にしたものを横軸にとってグラフにしたものを Fig.10 に示す。

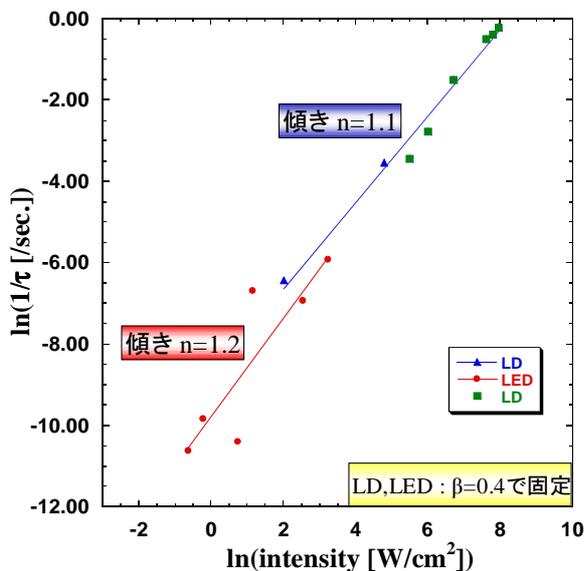


Fig.10 両対数表示による傾き n の評価

この結果において緑のプロット点は、我々の研究室で行われている LD をクラッド照射することによる PB の研究で得られた結果である。

結果を見ると、側面照射の場合も、クラッド照射の場合も傾きはほぼ1であったので、どちらの場合も PB は1光子過程で生じているのではないかと考えられる。よって、側面照射の場合も、クラッド照射の場合も同様のメカニズムにより PB 現象が起きており、側面照射による PB は有用であると考えられる。

5. 結論

紫外 LED を用いた側面照射による PB を行ったが、これにより照射強度が弱くても側面照射による PB が可能であることがわかった。また、側面照射による PB は照射強度に依存するという事もわかった。

そして、吸収係数の変化についてフィッティングを行い考察したことによって、吸収係数の最終到達値には限界値が存在し、どれほど照射強度を上げて PB を行っても、未使用の状態の YDF には完全に回復することができない可能性があることもわかった。今回行った実験によると、最終到達値の限界値は $0.011 / \text{cm}$ であることがわかった。

LD を用いたクラッド照射による PB と紫外 LED を用いて側面照射による PB の結果を比較したところ、どちらの場合も PB は1光子過程で生じていると考えられ、同じメカニズムで PB が行われているものであるとわかった。

今回の側面照射では光を閉じ込めることなく PB を行ったため、光源からの出力に対しファイバーに照射されている光が非常に小さかったため、効率がとても悪かったため、今後の展望としては、照射方法を改善すると同時に照射強度のファイバーに対する均一生を向上させる必要がある。そのために高散乱体を用い、ファイバーを格納し、その中に LED の光を閉じ込めることを考えている。また、今回用いたファイバーは 3.32 cm と非常に短かったため、より長いファイバーに対して同様の結果が得られるのか検証を行う必要がある。さらに、励起を行っている状態の YDF に対し、側面から紫外 LED を同時照射することによって、PB が起こりづらくなるのかを検証する必要がある。