

# Yb 添加ファイバーの photodarkening に対する photobleaching の研究

植田研究室 井上 雅行

## 1. 背景と目的

今日、ファイバーレーザーとして多く用いられている Yb 添加ファイバー(YDF)は、励起をする過程や、レーザー発振を続けることにより起こる photodarkening (PD) が問題となっている。この現象により YDF は、発振波長域(1 $\mu$ m 帯)での損失が増加し、レーザーの効率が下がってしまうという重大な問題を抱えている。PD に対して、それを軽減・解消する photobleaching (PB) という現象が Nd:YAG レーザーの第 3 高調波で起こるといった報告が出されている。そこで、本研究では Nd:YAG レーザーに比べて取り扱いが容易で応用のしやすい紫外域のレーザーダイオード(LD)を用いた PB 技術の確立を目的とし、PB の研究を行った。

## 2. photodarkening とはどのような現象か

一般に Yb 添加ファイバーレーザーは励起波長に 0.9 ~ 1.0  $\mu$ m、発振波長に 1.0 ~ 1.1  $\mu$ m 付近を用いる。そこで、未使用の Yb 添加ファイバーに励起波長である 975nm の光を照射し、照射前と照射後の損失スペクトル(図 1)を見てみると 600nm 付近の可視域にピークを持つ損失が生じていることがわかる。この可視域の損失が発振波長域である 1  $\mu$ m 付近にまで伸びてしまうことにより、レーザーの効率が下がり時間経過と共にレーザーの強度が下がってしまう原因となり Yb 添加ファイバーレーザーを使う上で大きな問題とされており、未だ良い解決策がないという状況である。

この現象は、Yb 原子がファイバーの中でクラスタリングを起こしている程生じやすく、励起された数個の原子のエネルギーなどにより伝導帯にまで励起された原子が Yb イオンの価数を Yb<sup>3+</sup>から Yb<sup>2+</sup>に変異させ、それに付随してガラスの構造を変えてしまい、可視域にピークを持つ吸収、カラーセンターができるかと現在は考えられている。

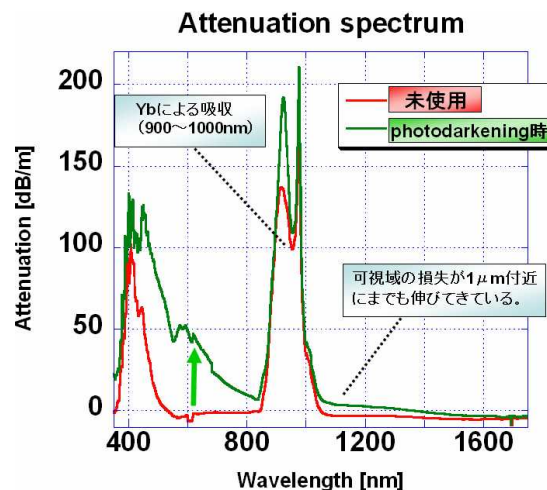


図 1 975nm 照射後の損失スペクトル

### 3. 研究に用いた Yb 添加ダブルクラッドファイバーについて

本研究では、二種類のファイバーについての実験を行った。屈折率を変化させ、コアを形成するための添加材料として Ge を用いたゲルマノシリケートファイバーと Al を用いたアルミノシリケートファイバーの二つで、ゲルマノシリケートファイバーは PD が起こりやすく、アルミノシリケートファイバーは PD が起こりにくいと言われている。その理由としては、Al を添加したほうが Yb のクラスタリングを防ぎ均一に Yb を添加できるためである。その他の詳細は表 1 に示す。

	ゲルマノシリケート ファイバー	アルミノシリケート ファイバー
コア形成のための添加材料	Ge	Al
コア径 [ $\mu\text{m}$ ]	5	5
クラッド径 [ $\mu\text{m}$ ]	125	130
Yb 添加濃度 [wt.%]	1.4	1.6

表 1 ファイバーの詳細

### 4. photodarkening、photobleaching 時の透過スペクトルの測定結果

両ファイバーについて未使用時、PD 後、PB 後の透過スペクトルを観測するために、PD を起こす際は、波長 975nm のファイバー結合 LD を用いコアに照射し、PB を起こす際は、波長 407nm のマルチモード LD を用いクラッドに照射した。結果は図 2 の様になりやはりゲルマノシリケートファイバーは PD が起こりやすいという結果になったが、PB の効果も大きく、未使用時に近い値までスペクトルが戻り、問題とされている 1  $\mu\text{m}$  域もしっかりと戻っていた。アルミノシリケートファイバーは比較的に PD は起きにくいことがわかったが PB をしても完全には戻ることなく、1  $\mu\text{m}$  域も相関はあり、戻ってはいるが 600nm 域の 1/25 程度しか戻らなかった。

どちらのファイバーに対しても LD を用いた PD は可能であるという結果が得られた。

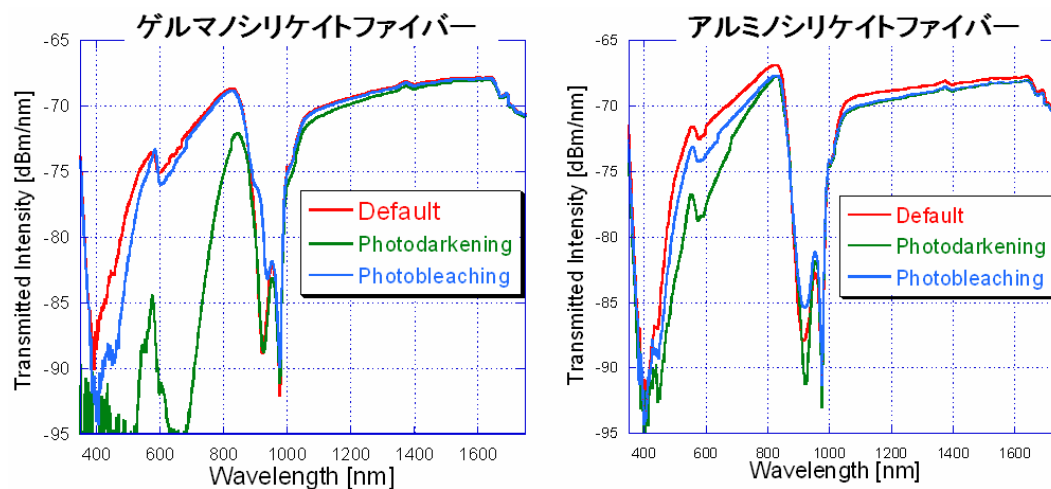


図 2 PD、PB による透過スペクトルの変化

## 5. photodarkening、 photobleaching の時間変化測定について

先ほどの透過スペクトルの結果より両ファイバー共に 600nm 付近の透過強度の変化が最も大きいことから時間変化の測定の際に使用する参照光として波長 632.8nm の He-Ne レーザーを用いて実験を行った。(図3)

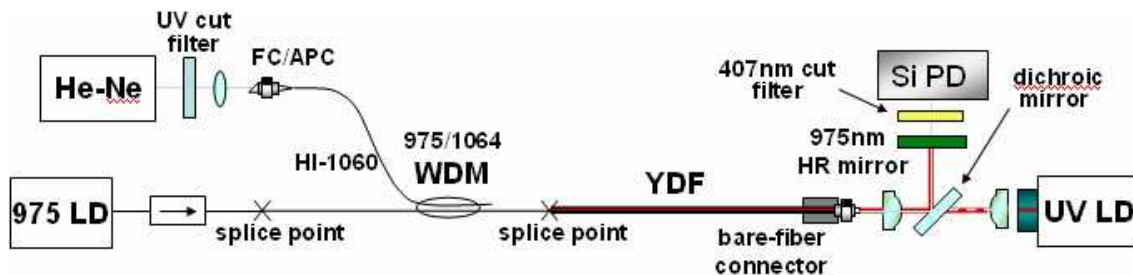


図3 時間変化測定の実験系

PDの際には、LD@407nm に光が入らないようビームブロックをした。また、フォトダイオードでは He-Ne レーザーの光のみを受光できるように、ミラーやフィルターを用いて工夫した。

## 6. 実験結果

両ファイバー共に PB、PD と強度を変えて透過強度の時間変化を測定した結果(図4)よりゲルマノシリケートファイバーはPDでは急速に進み、PBではゆっくりと進むことがわかった。逆に、アルミノシリケートファイバーは、PDではゆっくりと進みPBでは急速に進むことがわかった。PDの際には全ての強度で吸収飽和を起こしている条件で計測を行った。

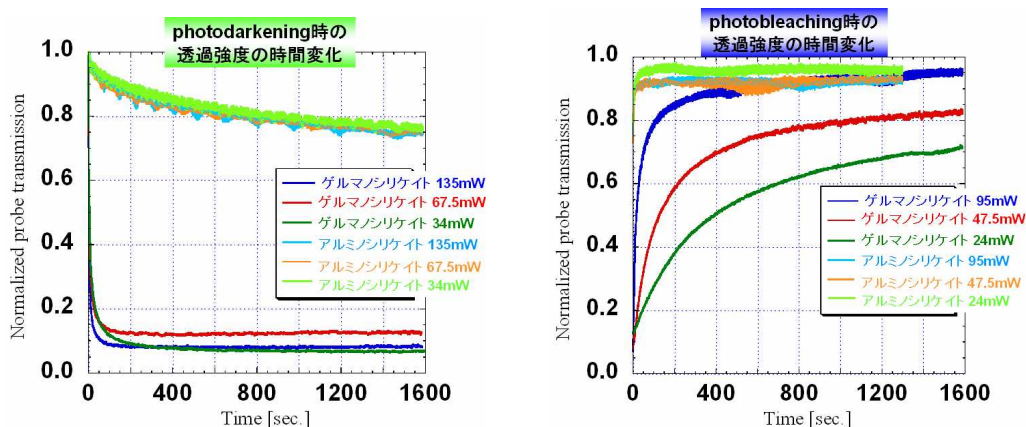


図4 透過強度の時間変化測定の結果

また、この結果より stretched exponential function (式1)を用いてフィッティングをかけ時定数 を求め評価した。

$$\alpha(t) = (\alpha_0 - \alpha_{eq}) \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right] + \alpha_{eq}$$

$\alpha_0$  : 初期値  
 $\alpha_{eq}$  : 最終到達値  
 $\tau$  : 時定数  
 $\beta$  : ストレッチパラメータ  
 $(0 \leq \beta \leq 1)$

式1 stretched exponential function

その結果、時定数は図5のようになり、ゲルマノシリケートファイバーはPD時には強度依存性はあるが比較的小さく、PB時には強度依存性が大きいことがわかった。また、アルミノシリケートでは逆の結果が得られた。

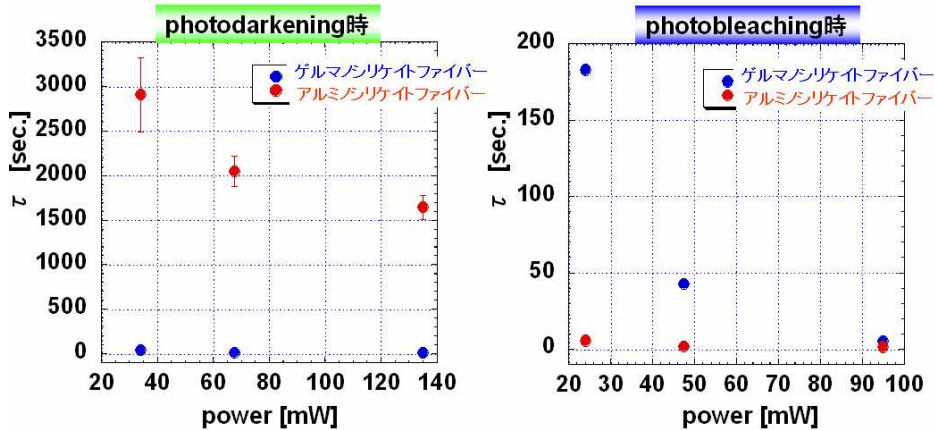


図5 強度と時定数の関係

PD、PBは強度の何乗に比例するのかを求めるために図5の結果の縦軸の逆数を取り両対数で表すと図6のような結果が得られた。先ほども述べたようにPD時は吸収飽和している条件での測定なので、この結果より、PDは反転分布の割合だけに依存すると言われていたが強度にも依存することがわかった。また、同じファイバーでもPD、PBで傾きが違うということはPBとPDでは原理が異なるということが言える。

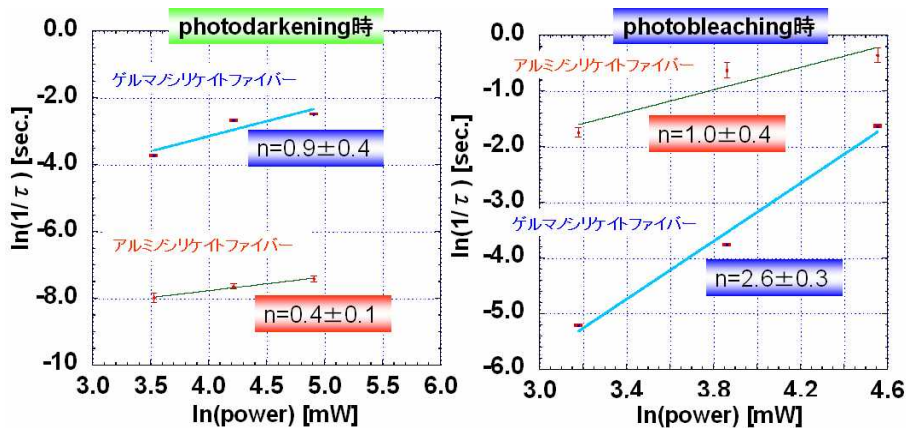


図6 両対数表示による傾き n 結果

## 7. まとめと今後の展望

ゲルマノシリケートファイバーのPB結果より400nm帯のLDをもちいたPBは有用であり、強度依存性も大きいことから、照射強度を上げることによりPD解消への応用に期待ができる。また、PDは反転分布だけではなく強度やファイバーの種類により現象が異なることがわかった。PD、PBは同じファイバーでも図6の傾きnの違いから現象の原理が異なることがわかった。今後は、さらに強度を落とし、吸収飽和していない強度での時間変化の測定を行い、PDの強度と反転分布の依存性について検証しPD、PBの物理を探索していく。