

Yb 添加ファイバーのフォトダークニング・ フォトブリーチングの研究

植田研究室 井上 雅行

1. 背景と目的

今日、多く用いられている Yb 添加ファイバー (YDF) は、その活性イオンである Yb^{3+} の量子効率ほぼ 1 という量子欠損の少ない系であるため熱の影響も少なく高平均出力が得られる。しかし、その YDF で問題となっているのが、励起をする過程や、レーザー発振を続けることによりレーザー発振波長域 (1 μm 帯) での損失が増加し、レーザーの効率低下が起こるフォトダークニング (PD) である。この PD という現象は、YDF のハイパワーレーザー化でも大きな問題となっており、この PD を解消することができれば YDF の応用は大きく広がるであろう。しかし、PD の原理や解決法などは未だ不確かな状態にあり、世界でもいくつかのグループが PD に関する研究を行っているがその見解はさまざまである。

そこで本論文では、YDF の PD についての研究とともに、その PD により起こってしまう損失の回復や抑制を指すフォトブリーチング (PB) の研究内容を記す。PB に関しては世界的にも研究報告は少ないが、フランスのグループから、波長 355 nm である Nd:YVO₄ レーザーの第 3 高調波の光を照射することにより可視域の損失が回復するという報告があった。しかし、このような複雑なシステムで紫外光を発生させ PD の起こったファイバーに照射することは応用上容易ではない。そこで、我々は、近年さまざまな分野で使用され始めた波長 407 nm の紫色の光を簡単に発生させることができる日亜化学製のレーザーダイオード (LD) を用いることにより PB を起こす、つまり PD により発生した損失を回復

すること、また、PD による損失を抑制するための方法として励起光である 975 nm の光とブリーチング光である 407 nm の光を同時照射することにより PD を抑制する事を目的とした。

2. PD とはどのような現象か

本研究で用いた YDF (ゲルマノシリケート) より求めた未使用時と励起光照射後 (photodarkened) の損失スペクトルの結果を Fig. 1 に示す。波長 900 nm~1000 nm 付近に見られる吸収は Yb による吸収である。励起光は波長 975 nm を用いた。未使用時のスペクトルと比較して励起光照射後のスペクトルは損失が大きくなっていることがわかる。励起光を照射することにより生じた損失スペクトルのピークは Fig. 1 より 400 nm 付近か、もしくはそれ以下であるように見えるが、その吸収の肩が発振波長域である 1 μm 付近にまで伸びているのがわかる。これが、レーザーの効率低下を引き起こす PD である。

PD の生じる原理としては、未だいろいろと議論されている段階で詳しい原理はわかっていない。多く研究者が PD は反転分布に依存するということを言っている。J.Koponen らのグループの仮説によると Fig. 2 より、PD は反転分布に依存し、反転分布の 7 乗に比例するという。つまり共同アップコンバージョンにより 7 個分のエネルギーで伝導帯にまで励起された電子が欠陥サイトにトラップされることによりガラスの構造を変異させた結果、損失が生まれるということのようだ。しかし、

実際のところは未だわからないというのが現実である。

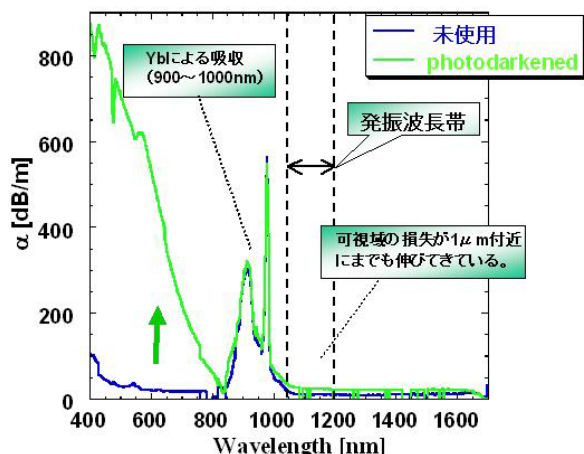


Fig. 1 Yb 添加ファイバーの損失スペクトル

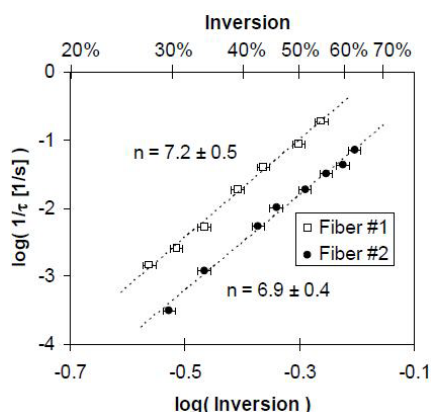


Fig. 2 J.Koponen の反転分布と時定数の関係

3. 研究に用いた YDF について

光ファイバーというのはコアとクラッドがなければ全反射が起こらず光が伝送しない、全反射を起こすためにはコアの屈折率の方がクラッドに比べ高い必要がある。そこでコアのガラスの屈折率を上げるためにゲルマニウムやアルミニウムやリンなどのような添加材料を必要とする。しかしこの添加材料はコアの屈折率を上げるためだけではなく、材料によっては利得媒質を均一にガラスに分布させるなどの役割も果たすためにファイバーメーカーではさまざまな添加材料が研究されている。

本研究に用いたファイバーは Table 1 のように大きく分けて二種類である。一つ目はゲルマノシリケートファイバー (GSF) であり、利得媒質である Yb 以外にコアにゲルマニウムが添加されたファイバーである。もう一方は、アルミノシリケートファイバー (ASF) であり利得媒質以外にコアにアルミニウムが添加されたファイバーである。両ファイバーではクラッド径と Yb 添加濃度の違いがある。断面形状としては、Fig. 3 のようなダブルクラッドファイバーである。

Table 1 ファイバーの詳細

	ゲルマノシリケートファイバー (GSF)	アルミノシリケートファイバー (ASF)
コア形成のための添加材料	Ge	Al
コア径 [μm]	5	5
クラッド径 [μm]	125	130
Yb 添加濃度 [wt%]	1.4	1.6

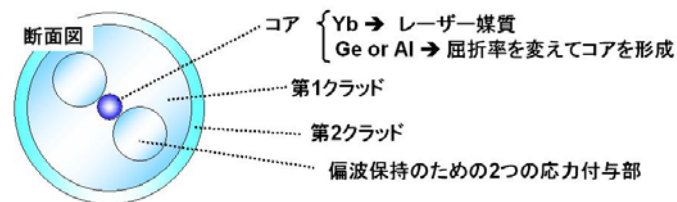


Fig. 3 ファイバー断面図

4. PD、PB 後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 GSF 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 μm 域もしっかりと戻っていた。ASF 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はなく、1 μm 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。

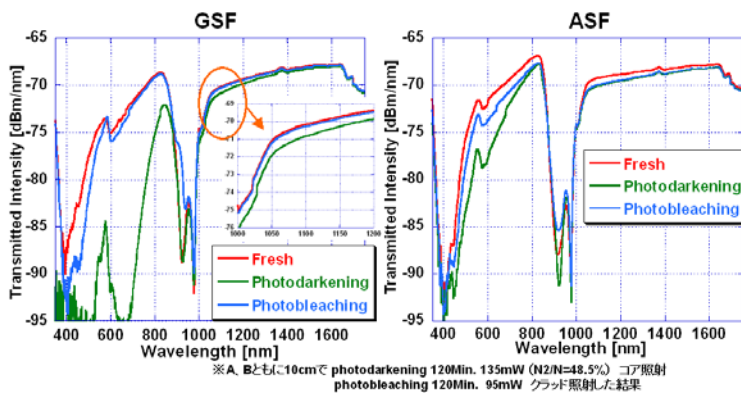


Fig. 4 PD、PB による透過スペクトルの変化

5. PD、PB の時間変化測定について

PD に関して、コア照射では長手方向に均一に励起光をいきわたらせることができなく、励起光の強度を変えても反転分布の値を大きく振れなかったために Fig. 5 のような実験系を組み、励起光のクラッド照射に実験をおこなった。また、PB に関して同じ実験系でブリーチング光をクラッド照射して実験を行った。実験で用いたファイバーは GSF、ASF ともにサンプル長さは 10 cm である。まず、コア照射での実験と同様にプローブ光としては波長 633 nm である He-Ne レーザーを用いた。この光をレンズで集光し、FC/APC の付いたファイバーへとカップリングした後に融着された測定サンプルである YDF へと入る。その後、ファイバーコンバイナーからきているダブルクラッドファイバーを通りコンバイナーを経てシングルモードファイバーを通り Si フォトディテクターによりプローブ光のみ検出されるようになっている。励起光である波長 975 nm の光はファイバー結合 LD3 個をコンバイナーにそれぞれ融着し、コンバイナーを経て YDF へと照射される。またブリーチングを起こすための波長 407 nm の LD も同様にレンズによりファイバーにカップリングされ、コンバイナーを経て YDF へと照射されるよ

うになっている。YDF の融着点の片方が水槽に浸してある理由としては励起光の熱により融着点が燃えやすいため冷却するためである。水はガラスに比べて屈折率が低いために第 2 クラッドであるコーティングをむいた状態のファイバーを水に浸してしまっても全反射は起こるためにクラッドの光が反射しなくなる心配は無い。YDF の融着点のもう片方にインデックスマッチングジェルをつけている理由としては励起光、ブリーチング光共にクラッドの光を除去するためである。YDF のクラッドを通り役割を果たした後は、クラッドからこの光を除去してしまった方が、LD に対する戻り光の心配や、プローブ光との干渉による信号の不安定要素を取り除くことができるためである。さらに検出器である Si フォトディテクターの手前に 407 nm カットフィルターと 975 nm HR ミラーを置いている理由はインデックスマッチングジェルにより取り除ききれなかった残留光を検出前に除去するためであり、これらの工夫により、プローブ光である He-Ne レーザーの光のみを検出し評価することができる。

また同じ実験系で励起光とブリーチング光の同時照射の実験もおこなった。

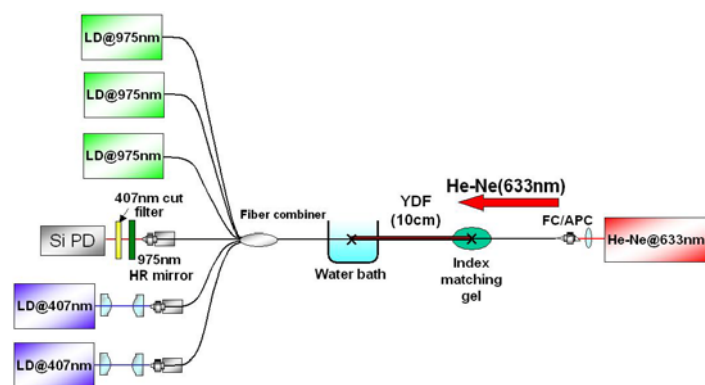


Fig. 5 クラッド照射での実験図

6. 実験結果

GSF、ASF クラッド照射による PD 透過率の時間変化測定結果を Fig. 6、Fig. 7 に記載す

る。

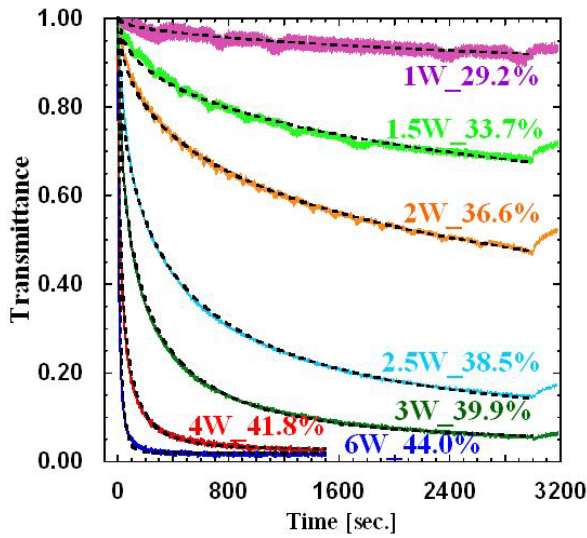


Fig. 6 GSF の PD による透過率の時間変化測定結果

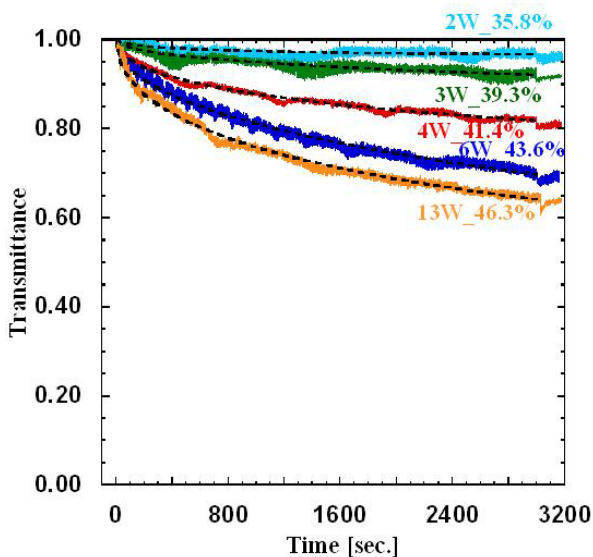


Fig. 7 ASF の PD による透過率の時間変化測定結果

実験から得られたそれぞれの条件でのストレッチエクスponential関数によるフィッティング結果を用いて Fig. 8 の様な形で時定数と反転分布による評価をおこなった。GSF のクラッド励起に関しては直線できれいにフィッティングすることができた。傾きは6.5程度となり J.Koponen が提唱している7乗則に近い値となった。GSF のコア照射の結果もこのラインに近い値となった。ASF

のクラッド励起に関しては、直線でのフィッティングはほとんどできなかった。おそらく ASF に関しては PD が起こりづらく 50 分間の測定ではフィッティングの誤差が大きいことが影響しているかもしれない。ASF のコア照射に関してもクラッド照射のラインとはまったく違う位置に来てしまった。

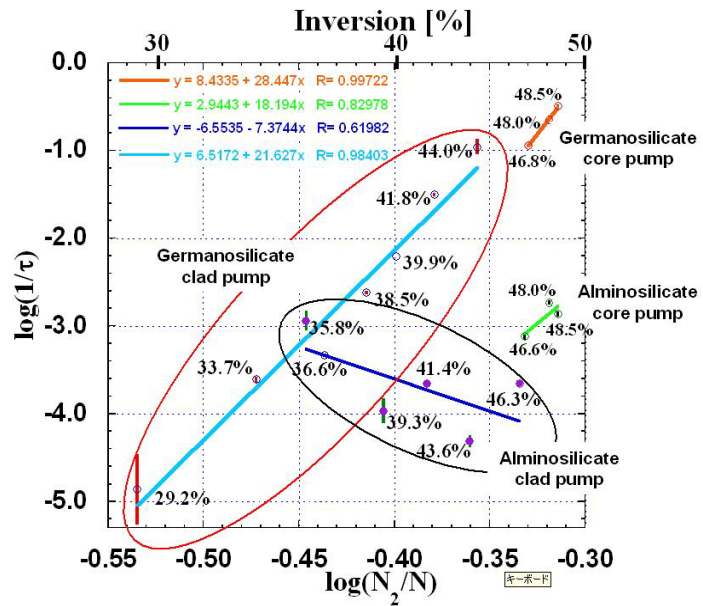


Fig. 8 PD のフィッティングによる時定数と反転分布による評価

GSF、ASF クラッド照射による PB 透過率の時間変化測定結果を Fig. 9、Fig. 10 に記載する。

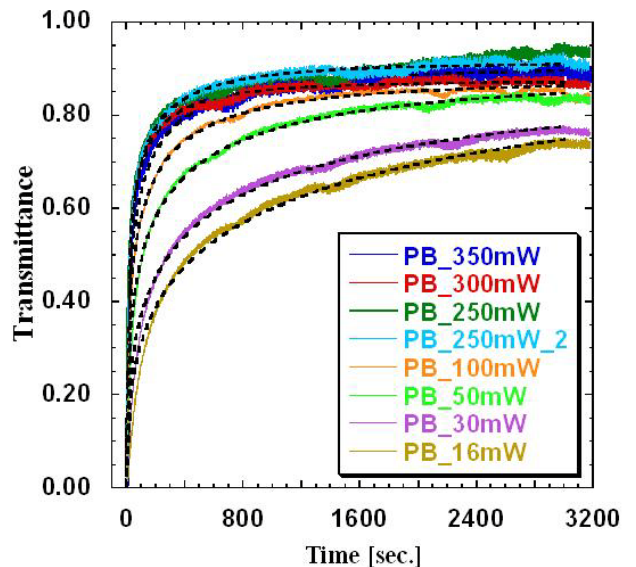


Fig. 9 GSF の PB による透過率の時間変化測定結果

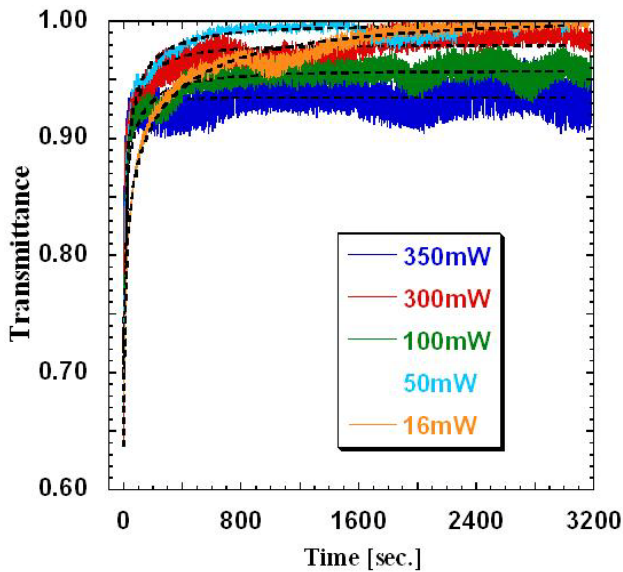


Fig. 10 ASF の PB による透過率の時間変化測定結果

実験から得られたそれぞれの条件でのフィッティング結果を用 Fig. 11 の様な形で時定数と反転分布による評価をおこなった。両結果共に直線でフィッティングすることができ、傾きはそれぞれ 1 に近い値となった。とくに GSF ではプロット数も多いことから傾きが 1.09 という値になり、PB は一光子過程であるということになる。

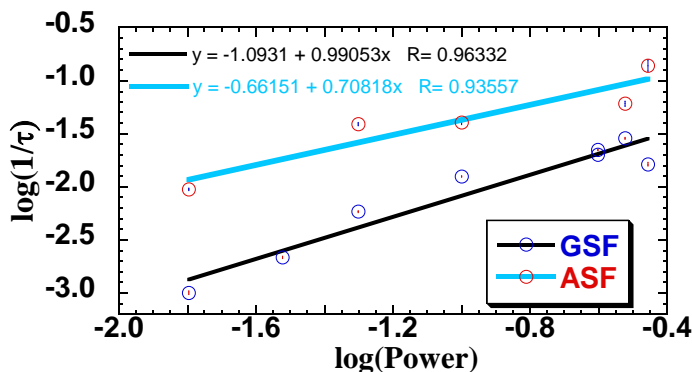


Fig. 11 PB のフィッティングによる時定数と照射強度による評価

次に、同時照射の実験結果より、GSF に関して Fig. 12 より、励起光のみときと比べ今回おこなった全ての条件で時定数 τ を短くす

る事ができた。すなわち、変化を早め、安定状態になるのが早くなるという事である。また、Fig. 13 より、同時照射をする事により励起光のみときと比べて全ての条件で最終到達値 A_{eq} が大きい事から、同時照射により PD を抑制する事ができたとと言える。

ASF の同時照射に関しても Fig. 12 より、励起光のみときと比べ今回おこなった全ての条件で時定数 τ を短くする事ができた。また、Fig. 14 より、励起光のみときと比べて $N_2/N=43\%$ 付近を境に同時照射による抑制がみられた。

どちらに関しても言えるのが励起光のみときと比べて同時照射をおこなった場合は時定数 τ が小さくなる傾向にあり早く定常状態に持っていく効果があるということである。YDF をファイバーレーザーとして長く使用した場合はこのような条件下ではどちらにしても PD は起きるため、同時照射を用いることによって安定な状態に早く到達させて動作させることが可能である。また、ASF での励起強度が 2 W ($N_2/N=35.8\%$) と弱い場合を除いて同時照射をおこなうことによって最終的には PD を抑制できるという結果が得られたことから、YDF を用いる上で励起光により生じてしまう PD に対して、励起光とブリーチング光の同時照射は有効であり、今後の応用に向けてさらに研究を重ねていくべきであると考えられる。

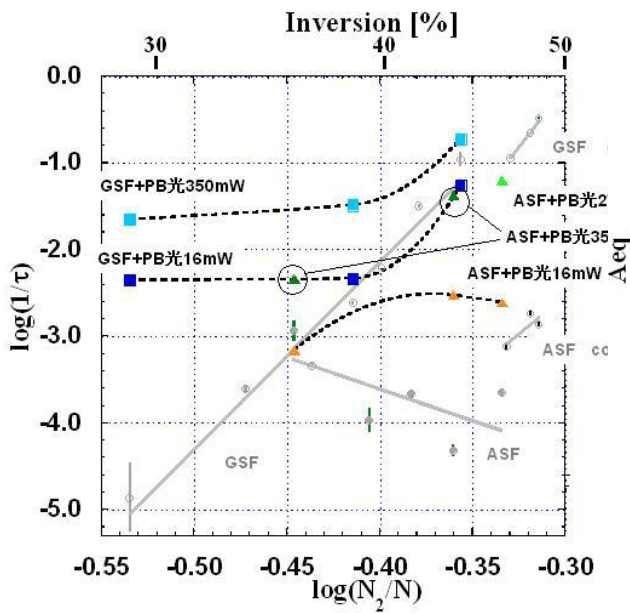


Fig. 12 同時照射のフィッティングによる時定数と反転分布による評価

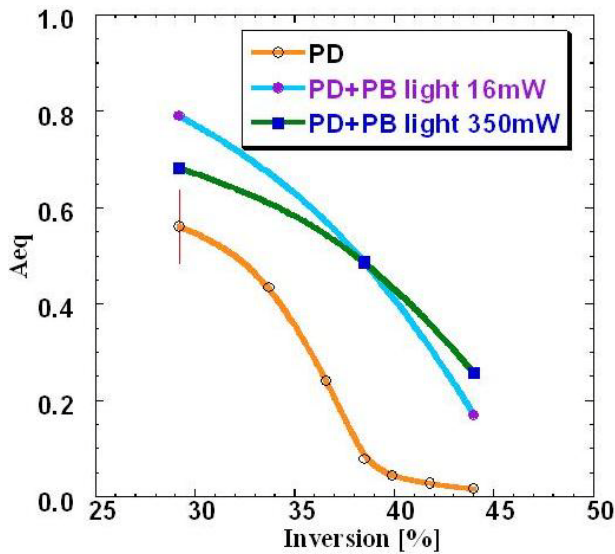


Fig. 13 GSF の同時照射による反転分布と最終到達値の関係

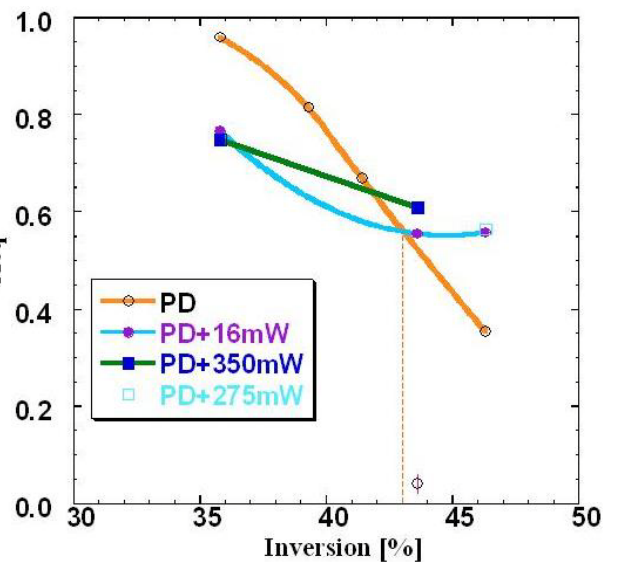


Fig. 14 ASF の同時照射による反転分布と最終到達値の関係

7. まとめと今後の展望

本研究では波長 975 nm の LD を YDF に照射することによる PD という問題に対して波長 407 nm の LD をクラッド照射することにより PD による影響を軽減・解消するというを目的に実験をおこなってきた。

スペクトル測定の結果からわかるように PD による損失の問題は深刻であり、波長 407 nm の LD を用いたブリーチングの効果によりその損失が回復するというのは顕著であることがわかった。

波長 633 nm の He-Ne レーザーをプローブ光として用いた PD、PB による透過率の時間変化測定はストレッチエクスポネンシャルファンクションを用い、フィッティングをかけることによって定量的に評価することができ PB の有用性を示すことに成功した。

また、同じ方法で励起光とブリーチング光の同時照射を評価することによって実用的な PD の解決方法の糸口を見出すことができた。

今後の展望としては、波長 407 nm の LD の強度をさらに上げ、より実用的なレベルで PD を解決する方法を見つけ、その実験を通して PD、PB の原理を探求していきたい。