

# 有機樹脂材料の光デバイス応用への展開

研究分担者 尾江邦重  
大学院 工学科学研究科  
電子システム工学部門 教授

## 【研究目的】

近年、光通信の分野では、安価で透明性、加工性に優れた有機樹脂材料による光部品の開発が注目されている。我々は、この有機樹脂材料を光通信用の光デバイスに展開し、広く応用の可能性を探る研究を行っている。第一歩として、感光性透明ポリイミド樹脂を用いた自己形成導波路作製技術について検討し、光ファイバと導波路を接続する新しい光接続技術を研究・開発する。さらに、有機色素を用いた光集積回路用光増幅器作製の可能性を探り、無機材料では不可能であった高機能光デバイスを有機樹脂材料で実現すべく、広く有機樹脂材料の可能性を追求することを目的としている。

## 【研究成果】

### 1. 自己形成導波路

感光性透明ポリイミド樹脂に光ファイバを伝搬してきた光を照射すると、樹脂は照射強度の強い光軸上から選択的に感光し屈折率に勾配が生じる。そして、これにより光閉じ込め効果が誘発され光が伝搬し、伝搬した光はさらにその先の樹脂を感光して、伝搬光自らが導波路を形成しながら進む。これは自己形成導波路と呼ばれている。本研究はこの現象を用いて感光性透明ポリイミド中に自己形成光導波路を作製し、光ファイバと導波路を接続する新しい光接続技術を研究・開発することを目的としている。

#### 1.1. 緒言

近年、光デバイスのラフアライメント技術として、感光性樹脂を用いた自己形成導波路が注目されている。本来、光ファイバからの出射光は回折もしくは光ファイバの開口数(NA : Numerical Aperture)に応じて拡がって伝搬する。これを光重合性ポリマーである感光性樹脂に埋め込み、出射を行った場合、出射光強度の大きい光軸上から光重合によりポリマーの屈折率が増加する。結果として、出射光は感光部分である光軸上に閉じ込められ、さらに照射を続けることによってその先の部分が感光し、出射光に光軸上の先の部分まで閉じ込められる。このように出射光自身が導波路を形成しながら伝搬していくことから自己形成導波路と呼ばれている[1, 2]。我々は、新規の感光性ポリイミド (PSPI) を用いることにより、デバイス応用に重要な全固体型の自己形成導波路を簡易なプロセスで作製できることを示してきた。ここでは、その形成メカニズム、PSPI 材料の光学特性と導波路自己形成の関係、長尺化のための手法、単一モード動作可能な自己形成導波路作製等について行ってきた研究について述べ、この感光性ポリイミドを用いた全固体型の自己形成導波路の光アライメント技術としての有用性を示す。

#### 1.2. 感光性ポリイミドによる自己形成導波路の作製

##### 1.2.1 PSPI の特徴

本研究で使っている PSPI は、レジストの機能を持った光導波路用ポリイミドとして開発され、光導波路として耐熱性に富み (ガラス転移温度 330 度以上)、低損失伝搬特性を示す (0.4 dB/cm) [3]。また、この PSPI は光が当たった部分の屈折率が当たらない部分のそれに比べて増加するというホトブ

リーチング効果を持つ。自己形成導波路作製は、この現象を利用して光ファイバの一端を PSPI で埋め込み、他端からレーザ光を照射して、レーザ光の当たった部分（コア部）の屈折率を上昇させ、3次元の導波路を形成していく。全固体型の自己形成導波路を得るためには、レーザ光の当たらないクラッド部分の屈折率をコア部に比べて、小さく保ったまま固体化する必要があるが、この PSPI は熱を加えるサーモセッティング処理によりこれが可能となり、簡単なプロセスで低コストの光モジュール作製を実現する可能性を有している。

### 1.2.2 自己形成導波路の作製

この PSPI はフッ素化ポリアミド酸 (fluorinated polyamic acid) と光増感剤としての ジヒドロピリジン誘導体 {(1,4)-dihydropyridine} からできている。PSPI の自己形成導波路を作製するプロセスは、PSPI を光ファイバが置かれているガラス板上に被せ、100 度で 15 分間プリベークする。その後、488-nm 線のアルゴンレーザ光を光ファイバ他端から入れる。図 1 は、このレーザ光による露光中の様子を示したものである。この光ファイバはコア系 50  $\mu\text{m}$  の屈折率分布型多モードファイバであり、レーザ光パワーは 1 mW である。また、ファイバからのレーザ出力光のニアフィールドはガウス分布を示す。図 1 (a) (b) は、光増感剤なしの PSPI にレーザ光を照射したときの直後と 5 分後の状態を示す。どちらの場合もレーザ光は広がったままで、光閉じ込め効果のある導波路は形成されていない。これに対し光増感剤のある PSPI では、照射直後からレーザ光放射角が狭窄化されており {図 1 (c)}、5 分後には直径一定のコアを持つ自己形成導波路が出来ていることが分かる

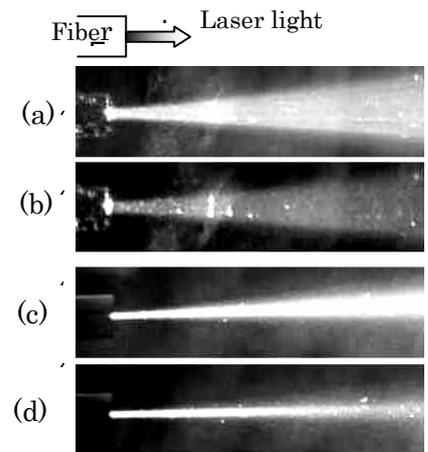


図1 多モードファイバからポリイミドへの Ar レーザ光出射の様子 (a)光増感剤なし・照射直後 (b)光増感剤なし・照射 5 分後 (c)PSPI への照射直後 (d) PSPI への照射 5 分後

{図 1 (d)}。この形成メカニズムとしては、PSPI にレーザ光が当たった時、光増感剤があるとそれが触媒のような役割を果たし、その部分のイミド化を促進すると共に、その化学反応により PSPI の光学的性質を変化させ、屈折率が上昇するものと考えている。この屈折率差は、この状態でも、書きこみ用の 488-nm 線のアルゴンレーザ光に対しては、光閉じ込めに十分な大きな値であるが、光通信に使用する赤外波長域ではさほど大きくない。PSPI をさらに 180 度 20 分間のポストベークを施すことにより、赤外波長域で十分な閉じ込めが得られる程屈折率差が大きくなる。このサーモセッティング処理により全固体化の導波路形成が可能になる。

### 1.2.3 自己形成導波路を用いたファイバ間接続

この自己形成導波路技術を使って、2 本のマルチモードファイバ間の接続損失低減化を試みた。V みぞを持つ石英基板上に 2 本のマルチモードファイバを少し離して置き、そのままの状態と自己形成導波路を作った状態での挿入損失の変化を見た。図 2 は、3 種類のファイバ間ギャップに対する挿入損失を示したものであるが、いずれの場合でもポストベーク後のギャップ挿入損失は、空気のギャップのまま

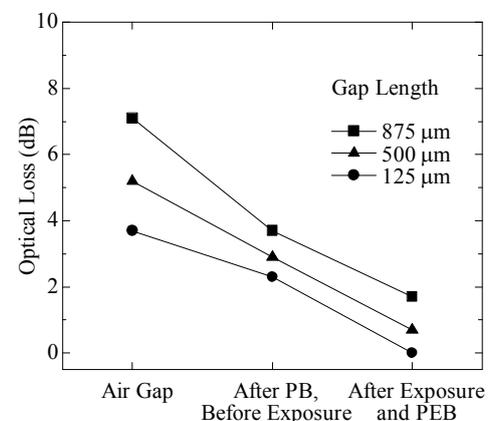


図2 2 本の多モードファイバ間のギャップ挿入損失

まに比べて大きく減少していることがわかる。プリベークの状態でも、損失がかなり減っているのは、屈折率が増加したことによるマッチングオイルのような効果によるものである。このように、このレーザ光による自己形成導波路は、ファイバ間の接続損失の低減化に有望である[4]。

### 1.3. 自己形成導波路の長尺化

PSPI 自己形成導波路のデバイス応用の可能性を広げるためには、自己形成導波路長を拡張する必要がある。そのために、導波路書き込みレーザ波長や感光剤濃度を変えることにより長尺化を試みたが、材料そのものによる書き込み光の吸収が大きく、劇的な変化は見られなかった。そこで、感光剤そのものに注目し、PSPI の感光剤であるジヒドロピリジン誘導体(DHPs)の光化学反応について検討し、種々のDHPsを持つPSPIの光吸収特性を調べた。図3は、DHP-AとDHP-Bの2種類の感光剤を持つPSPIの吸収係数の488-nmアルゴンレーザ光照射量に対する変化を示している。DHP-Aを持つPSPIでは、露光前の最初の吸収係数は $\sim 12 \text{ cm}^{-1}$ であったが、光照射により吸収係数は露光量と共に単調増加し、 $\sim 17 \text{ cm}^{-1}$ に達した。この吸収係数から推測される488-nmアルゴンレーザ光の浸入長は $\sim 580 \mu\text{m}$ であり、この材料を用いた自己形成導波路長にはほぼ等しい。より長い自己形成導波路を得るためには、露光により吸収係数が小さくなる光化学反応を示す材料を必要とすることがわかる。図3中のDHP-B感光剤を持つPSPIはこの目的で開発されたものであり、露光前の最初の吸収係数は $\sim 17 \text{ cm}^{-1}$ と大きな値であったが、光照射により吸収係数は露光量と共に単調減少していることが分かる。この性質は長い自己形成導波路を作製するには好ましいことであり、これにより $\sim 2 \text{ mm}$ 以上の自己形成導波路を作製できることを確認した[5]。

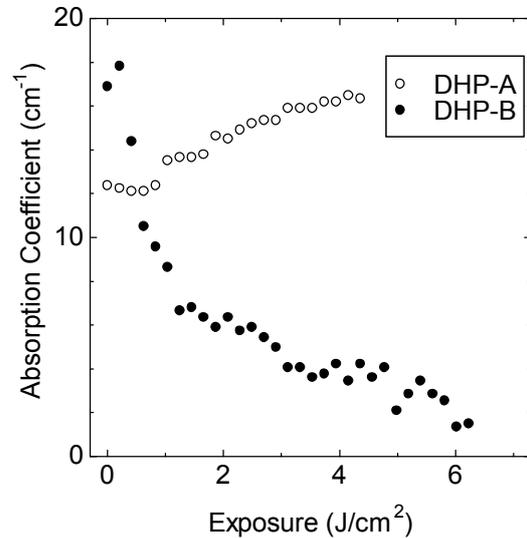


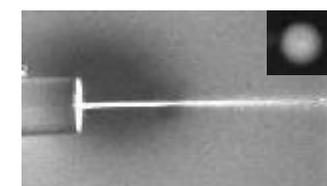
図3 PSPIの488 nm Arレーザ光照射に対する吸収係数の変化

### 1.4. 自己形成導波路の単一モード動作

この自己形成導波路を単一モード動作可能にすることは実用上非常に重要であるが、通常の光通信用単一モードファイバ(SMF)では書き込み光波長で高次モードが発生し、自己形成導波路作製のために理想的なガウシアン形状を持った光強度分布が得られないという問題点がある。これを解決するため、高次モードを制御して自己形成導波路のコア径を一定とする簡便な作製手法を考えた。PSPI ワニスを用いた自己形成導波路作製過程の様子を図4に示す。コア径 $9 \mu\text{m}$ の通常の光通信用単一モードファイバ( $9 \mu\text{m}$ -SMF)を用いた場合[図4(a)]、露光に用いた488nmのレーザ光はマルチモード動作をする。そのため、挿入図のニアフィールドパターン(NFP)に示すように、ファイバ端での光強度分布はスペckルなものになる。高次モードの存在は書きこみ光の自己閉



(a)  $9 \mu\text{m}$ -SMF 未使用時



(b)  $9 \mu\text{m}$ -SMF 使用時

図4 光通信用単一モードファイバ(SMF)からPSPIへのArレーザ光照射時の様子

じ込め効果を妨げ、作製される自己形成導波路はある広がり角を持ったテーパ状のものとなってしまう。この問題を解決するために、コア径  $3\mu\text{m}$  の  $488\text{nm}$  で単一モード伝搬するファイバ ( $3\mu\text{m-SMF}$ ) を導入した。 $3\mu\text{m-SMF}$  と  $9\mu\text{m-SMF}$  を市販の FC コネクタでカップリングすることにより、 $9\mu\text{m-SMF}$  端面での NFP は、理想的なガウシアン形状のパワー分布を示した[図 4 (b)]。写真に示すように、この手法により自己形成導波路のコア形状を微細でしかも均一なものとする事ができた。

この方法で作製した自己形成導波路に  $1.55\mu\text{m}$  の赤外光を導入したところ、自己形成導波路端面からの NFP も単一モードであることが確認できた。また、出射光の遠視野分布の広がり角より見積もられた実効的なコア径は  $8.3\mu\text{m}$  と SMF のコア径と同程度であった[6]。これらのことより、本研究の自己形成導波路新規作製手法は単一モード導波路間の接続に非常に有効であると思われる。また本手法では、 $9\mu\text{m-SMF}$  へのレーザ光導入に市販の FC コネクタを使用できるため、再現性良く単一モード自己形成導波路を作製することができる。

## 1.5. 自己形成導波路研究のまとめ

感光性ポリイミドを用いて全固体型の自己形成導波路を簡易なプロセスで作製する我々の研究について、レーザ光による導波路自己形成の原理、長尺化のための手法、シングルモード動作可能な自己形成導波路作製等、今まで行ってきた研究成果について述べた。この技術は、現在光通信技術の中でボトルネックとなっているモジュール内の光接続に対して新しい展開を与えるものと考えられ、今後の進展が期待される。

## 2. 有機樹脂材料の光増幅器への応用

### 2.1. 緒言

光通信では、光ファイバを伝搬中に光が減衰し、受信端では光検出器の感度限界に近い微弱光になっている。そのため、中継器として光増幅器を用意することが望まれる。

現在、実用化あるいは研究開発されている光増幅器には、大きく分けて光ファイバ増幅器と半導体光増幅器がある。前者には希土類添加光ファイバ増幅器とラマン増幅器がある。特に、希土類添加光ファイバ増幅器のなかでも、エルビウム (Er) を添加したエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) では、光ファイバの最低損失帯である  $1.55\mu\text{m}$  帯で光増幅特性を示し、雑音特性も優れているため、光通信システムで現在広く用いられている。しかし希土類を添加する場合、濃度消光が大きいという欠点があり、それによりファイバ中に低濃度にしか分散できないため距離を長くすることで利得を稼ぐ必要があり、集積化は困難である。実際、EDFA ではデバイスサイズが数~数十 m と大きくなってしまふ。一方、半導体光増幅器では、端面の無反射コート処理が必要であり、それにかかるコストが高いという問題と、ファイバや石英導波路との屈折率整合性が悪いためパッケージングが困難という問題点がある。以上のことから、現在のところ、集積型の光増幅器は未だ実用化に至っていない。しかし、光通信網の拡大や光情報伝達分野の多様化に伴う次世代の光エレクトロニクス技術として集積型デバイスが重要となるため、これらに変わる光増幅デバイスが必要と考えられる。

そこで本研究では、活性媒体としては新しい材料である有機色素材料に注目し、集積型の光増幅デバイスの実現を目指す。有機色素材料はポリマーなどの母材に高濃度で分散可能、発光波長の調整が可能、比較的低温でデバイス作製可能という特徴を持ち、これを用いることにより安価で高利得な集積型光増幅器が実現可能と考えられる。まず、材料及び構造の側面から集積型光増幅デバイス実現に向けたアプ

ローチを行うために、色素材料の光学特性と光増幅特性の関係を求めた。そして導波路型光利得構造の作製を行い、デバイス型の光増幅効果の検証を行った。

## 2.2. 導波路サンプルの製作

市販で入手が可能である有機色素材料を用いることにより利得評価を行った。有機色素材料は

4-[4-[4-(Dimethylamino)phenyl]-1,3-butadieny]-1-ethylquinolinium perchlorate (NK-2807) である。また、別の色素

2-[7-(1,3-Dihydro-1,3,3-trimethyl-2H-indol-2-ylidene)-1,3,5-heptatrieny]-1,3,3-trimethyl-3H-indolium iodide (NK-125) も比較対照のために使用した。薄膜サンプルは、利得の濃度依存性を調べるためスピコート条件を 2000 rpm 10 sec に固定し、色素ドープ濃度を 0.2 - 2.0-wt% と変えて作製した。完成した薄膜サンプルの膜厚は < 2  $\mu\text{m}$  であった。

次に、チャンネル導波路型サンプルを作製した。RIE により作製した石英基板をチャンネル導波路型サンプルとして用いた。導波路幅は順に、1, 2, 5, 10, 20, 50, 100  $\mu\text{m}$  であり、それらのパターン溝の深さはすべて 10  $\mu\text{m}$  である。この基板に対して、色素分散ポリマー薄膜を形成し、チャンネル導波型サンプルを作製した。このサンプルの導波路幅 100  $\mu\text{m}$  部にポンプ光 (波長 565 nm) を照射すると、導波路幅 100  $\mu\text{m}$  部にのみポンプ光照射による発光が見られ、導波路部に光が閉じ込められて導波している様子が確認できた。

## 2.3. 光増幅利得評価

まず、薄膜サンプルを用いて ASE 閾値測定を行った。発光強度の励起強度依存性のグラフを図 5 に示す。ここでいう発光強度とは、励起強度が最大の条件下で ASE スペクトルがピークを示す波長 800 nm における発光強

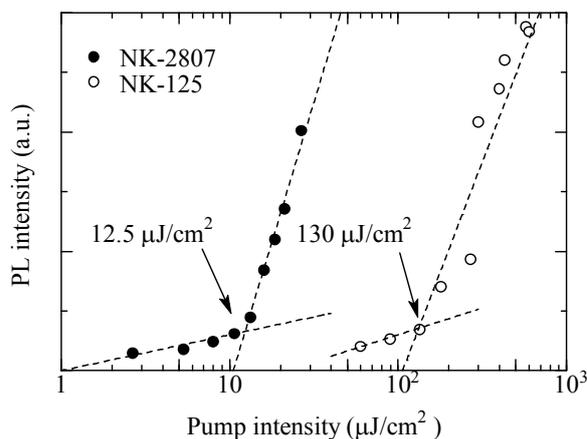


図 5. 発光強度の励起強度依存性 (薄膜サンプル, 色素ドープ濃度 1.0-wt%, 膜厚 1.4  $\mu\text{m}$ , ポンプ光長 565 nm, 励起長 5 mm)

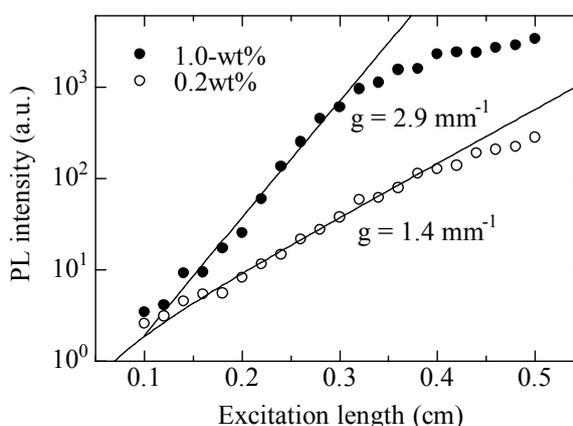


図 6. NK-2807 発光強度の励起長依存性 (薄膜サンプル, 色素ドープ濃度 1.0-wt%, 膜厚 1.4  $\mu\text{m}$ , ポンプ光長 565 nm, ポンプ光強度 73.1  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ )

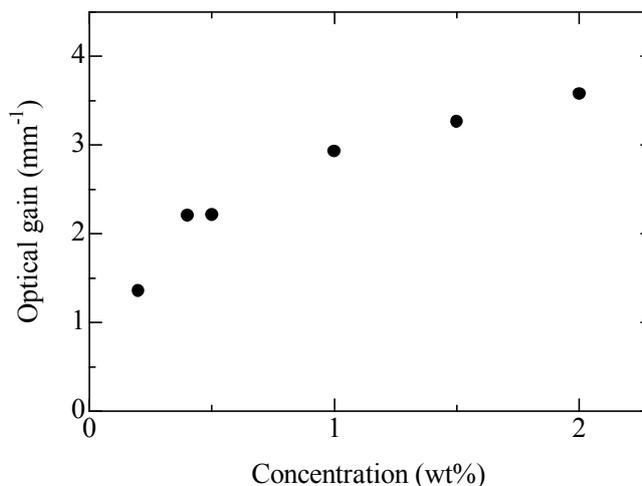


図 7. 利得の濃度依存性 (薄膜サンプル, 膜厚 1.4  $\mu\text{m}$ , ポンプ光波長 565 nm, ポンプ光強度 73.1  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ )

度を指している。ポンプ光強度が弱い場合はポンプ光強度に比例して発光強度も増加するが、あるポンプ光強度以上になると、ポンプ光強度に対して発光強度が非線形に増加することが分かる。この境界のポンプ光強度が ASE 閾値である。図 5 より、NK-125 の ASE 閾値は  $130 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、NK-2807 の ASE 閾値は  $12.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  とそれぞれ得られた。したがって、今回使用した色素 NK-2807 では、NK-125 よりも ASE 閾値が  $\sim 1/10$  に低減できたことになる。

続いて NK-2807 の光増幅利得を測定した。波長 790nm における発光強度の励起長依存性のグラフを描くと図 6 のようになった。これによって濃度 1.0-wt%、0.2-wt% のときの利得係数はそれぞれ  $2.9 \text{ mm}^{-1}$ 、 $1.4 \text{ mm}^{-1}$ 、と得られた。しかし、ここで注意する点として、濃度 1.0-wt% の場合励起長が  $\sim 3 \text{ mm}$  以上になるとフィッティング曲線から実測値がはずれていっていることが分かる。これは利得飽和の存在を示している。同様の測定を、色素ドーパ濃度を変えた薄膜サンプルを用いて行うことで、利得の濃度依存性を調べた。その結果を図 7 に示す。利得は濃度に線形比例して増加するはずであるが、増加の割合はそれよりも小さくなっている。この結果は NK-2807 を用いた場合でも濃度消光が現われることを示している。しかし、ドーパ濃度 0.5-wt% のとき利得係数は  $2.2 \text{ mm}^{-1}$  であり、既報の材料に比べ、十分に大きい利得を有していると言える(7)。

## 2.4. 導波路構造と光増幅利得

有機色素材料を用いた光増幅効果をデバイス応用するためには、材料だけでなく導波路構造も重要である。この節では、導波路構造が利得係数に及ぼす影響を調べ、チャンネル型光導波路構造の作製を行う。続いてチャンネル導波路構造に対して色素分散ポリマーを充填し、光増幅特性評価を行った。

チャンネル導波路構造における表面ポンプによる閾値は  $41.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  と得られた。この値は、薄膜サンプルを用いた場合の表面ポンプによる ASE 閾値  $12.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  より大きかった。原因としては、ポンプ光をストライプ状に照射する際に、絞ることができる限界の幅が  $\sim 200 \mu\text{m}$  程度であり、一部がロスとなっているため ASE 閾値が増加したと考えられる。しかし、チャンネル導波路構造の場合の ASE 閾値も、NK-125 の ASE 閾値  $130 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  の  $\sim 1/3$  程度に低減できており、低閾値化できているとも言える。ポンプ光の照射方法を改善することにより、ASE 閾値はさらに低減できるものと考えられる。

デバイス型の光増幅として、表

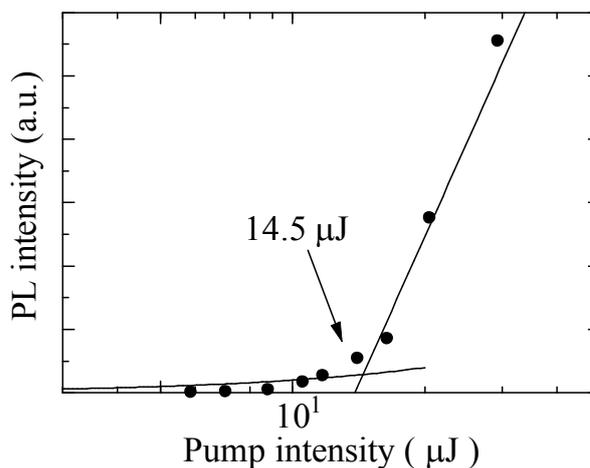


図 8 導波型ポンプによる ASE 閾値  
(薄膜サンプル,色素ドーパ濃度 1.0-wt%,膜厚 4  $\mu\text{m}$ )

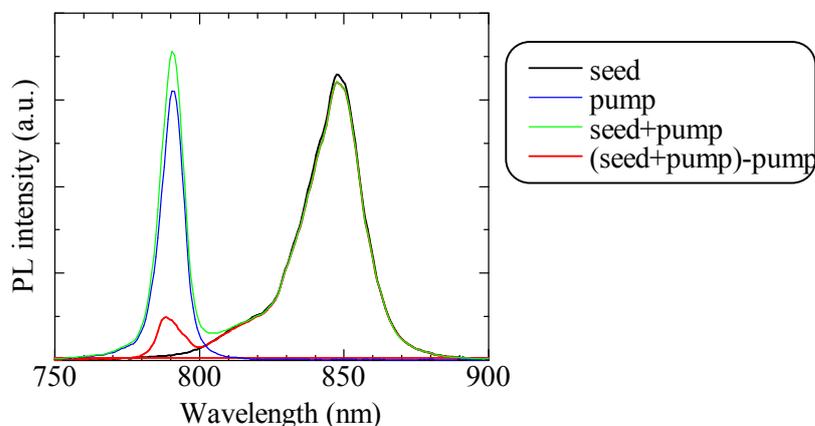


図 9:導波路入力光の光増幅

面ポンプではなくサンプル端面からポンプを行う導波型ポンプ法を用いることによる ASE 閾値測定を行った。まず色素ドーパ濃度 1.0-wt%, 膜厚 4  $\mu\text{m}$  の薄膜サンプルを用いて, ASE 閾値測定を行った。ポンプ光波長は 565,540,520 nm に設定して照射を行った。そのときの 565 nm 光源励起の強度依存性を図 8 に示す。同じ条件である波長 565 nm を使用した場合の表面ポンプ/導波型ポンプの ASE 閾値を比較してみる。導波型ポンプの閾値は 14.5  $\mu\text{J}$  であるのに対し, 図 5 より表面ポンプの場合の ASE 閾値は 12.5  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  であり, トータルパワーに書き直すと 1.88  $\mu\text{J}$  である。導波型ポンプの閾値の方が大きい, 結合効率を改善する方法を考えることで, 導波型ポンプの適用により, ASE 閾値をさらに低減できる可能性がある。

## 2.5. 導波路入力光の光増幅

チャンネル型光利得構造を用いることにより, 外部から赤外の信号光をチャンネル端面から入力し, 表面ポンプ (波長 565nm) による入力光の増幅効果を検証した。

この測定結果を図 9 に示す。凡例の「seed」とは種光, つまり入力信号光の導波光を指し, 「pump」とはポンプ光照射による発光を指す。信号光のみ入力した場合の光強度 (seed) に対して, ポンプ光と信号光を同時に入力した場合の光強度 (seed+pump) が大きくなっていけば, 増幅が起こったことになるが, 増幅率を計算するためにはポンプ光のみを照射した場合の発光強度 (pump) を差し引いておく必要があるため, 図中の seed と 「(seed + pump) - pump」のスペクトルを比較する必要がある。この結果, 確かに入力光の増幅が起きていることが確認できる。

今回用いた実験系では, ポンプ光にはパルス光源を, 入力信号光には CW 光源を用いたため, この結果を用いて入力光増幅率を求めることができなかったが, 有機色素材料を用いた入力信号光の増幅に初めて成功した。

## 2.6. 光増幅器のまとめ

本研究では, まず近距離通信で重要である近赤外に発光帯を持つ有機色素材料 NK-2807 を活性媒体として赤外光の増幅現象を詳細に調べ, ASE 発光の低閾値化を実現する材料特性を検討した。また, 利得と導波構造の関係性を調べることを目的として, 薄膜スラブ構造とチャンネル導波路構造の 2 つの導波路構造を用いて増幅効果の検証を行った。そして, デバイス型の光増幅効果の検証を, チャンネル導波路構造を適用することにより行った。

さらに有機樹脂材料の優位性を検証すべく, これを用いた安価で高利得な集積型光増幅器への応用を念頭に, 光 LAN に用いられている 0.85  $\mu\text{m}$  波長帯での光増幅実現に向けて研究を進めた。この波長帯で優れた増幅特性を持つ NK2807 有機材料を用いて, 従来の材料より一桁小さい誘導放出閾値を実現した。

### 【今後の展開と見通し】

得られた成果を基に, 自己形成導波路の実際の光回路実装への適用を考えた問題点の抽出とその解決策を考えていく。また, 安価で透明であり, 加工性に優れたこれらの樹脂材料の特徴を生かした光機能素子創製への可能性を追求していく。また, 光集積回路用光増幅デバイスの研究では, そのデバイス化研究を進め, 波長 0.85  $\mu\text{m}$  での信号光増幅を実現・検証すると共に, 光通信の本命である波長 1.3  $\mu\text{m}$  帯の光増幅のため, 新色素を用いた薄膜導波路の検討, 光増幅特性の把握を行っていく。さらに, 自己形成導波路技術を光増幅器デバイス研究に取り込み, 挿入損失の小さい接続による光増幅器を開発していく。

## 参考文献

- (1) Kagami, M. Yamashita, T. and Ito, H.: Light-induced self-written three-dimensional optical waveguide, *Appl. Phys. Lett.*, 79, 8, (2001), 1079.
- (2) Shoji, S. Kawata, S. Sukhorukov, A. A. and Kivshar, Y. S.: Self-written waveguides in photopolymerizable resins," *Opt. Lett.* Vol. 27, pp. 185-187, Feb. 2002.
- (3) Mune, K. Naito, R. Fukuoka, T. Mochizuki, A. Matsumoto, K. Yurt, N. Meredith, G. Jabbour, G. and Peyghambarian, N.: Fabrication of low loss optical waveguides using a novel photosensitive polyimide, *SPIE* 4997(2003), 103.
- (4) Yamashita, K. Hashimoto, T. Oe, K. Mune, K. Naito, R. and Mochizuki, A.: Self-written waveguide structure in photosensitive polyimide resin fabricated by exposure and thermosetting process, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 16, 3, (2004), 801.
- (5) Yamashita, K. Kuro, T. Oe, K. Mune, K. Tagawa, K. Naito, R. and Mochizuki, A.: Fabrication of self-written waveguide in photosensitive polyimide resin by controlling photochemical reaction of photosensitizer, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 18, (2004), 3962.
- (6) Yamashita, K. Kuro, T. Oe, K. Mune, K. Hikita, T. and Mochizuki, A., : Propagation-mode-controlled fabrication of self-written waveguide in photosensitive polyimide for singlemode operation, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 17, 4, (2005), 786.
- (7) T. Kobayashi, J-B. Savatier, G. Jordan, W. J. Blau, Y. Suzuki and T. Kaino: "Near-infrared laser emission from luminescent plastic waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, pp185-187, (2004)