

ナノ構造の創製と光デバイスの構築

平成15年度～平成18年度

「重点領域研究推進プロジェクト」

最終報告書



平成19年3月

研究代表者

堤直人

大学院・工学科学研究科

高分子機能工学部門・教授

京都工芸繊維大学

目次

1. はしがき	1
2. 研究成果	3
3. 研究論文等リスト(平成15年度)	69
4. 研究論文等リスト(平成16年度)	77
5. 研究論文等リスト(平成17年度)	85
6. 研究論文等リスト(平成18年度)	91
7. あとがき	103

はしがき

光半導体デバイスの研究に携わっている先生方と有機光電子機能に携わっている先生方との融合を図ることによって、それぞれに発達してきた技術に磨きがかかり、新たな方向へ発展すると考え、京都工芸繊維大学の学内公募の教育研究推進事業・重点領域研究推進プロジェクト研究「ナノ構造の創製と光デバイスの構築」(平成15年度～18年度までの4ヵ年)(研究代表者 堤直人)を立ち上げた。

有機分子そのものは、もともと分子レベルでその機能を発現する能力を持っており、分子レベルですでにナノ構造体である。しかしながら、その機能をいかんなく発揮させるには集合体としての凝集構造の制御などを的確に行い、それを活用して機能を発現させていく必要がある。有機材料のもつフレキシビリティとシリコンを中心とする無機半導体デバイスで培われてきた技術の融合と発展により、今後の光デバイスへの新たな提案を求めて本プロジェクトを推進してきた。本研究の推進により、着実に有機材料フィールドとシリコンテクノロジーフィールドとの距離は近づいてきており、今後の一層の発展が期待できる。

本最終報告書では、平成15年度～18年度に実施した本研究プロジェクトに係る7つの研究成果をまとめた。

- (1) ナノメートルサイズでの制御された構造を基盤とする新規光デバイスの構築
- (2) ナノ領域光・電子融合集積回路のコンピュータ支援設計
- (3) 有機半導体材料の設計とハイパフォーマンス光源
- (4) 有機樹脂材料の光デバイス応用への展開
- (5) 導波路の光デバイスへの応用 — 光・電子融合回路デバイスの回路モデル開発 —
- (6) 光デバイス用新規半導体・絶縁体材料の創成
- (7) ホログラフィの超高速3次元イメージングへの応用

研究組織は、以下のように学域・部門・専攻の枠を越えて横断的に組織した。

研究組織

研究代表者

堤 直人 高分子光電子機能 大学院・工芸科学研究科・高分子機能工学部門・教授

研究分担者

廣木 彰 半導体工学 大学院・工芸科学研究科・電子システム工学部門・助教授

堀田 収 光電子機能材料の創製 大学院・工芸科学研究科・高分子機能工学部門・教授

尾江邦重 光通信工学・光エレクトロニクス 大学院・工芸科学研究科・電子システム工学部門・教授

裏 升吾 光波電子工学・回折光学 大学院・工芸科学研究科・電子システム工学部門・教授

吉本昌広 半導体工学 地域共同研究センター・教授

栗辻安浩 応用光学・光情報処理 大学院・工芸科学研究科・電子システム工学部門・助教授

研究成果

ナノメートルサイズで制御された構造を基盤とする新規光デバイスの構築

研究代表者 堤直人

大学院 工学科学研究科

高分子機能工学部門 教授

【研究目的】

ナノメートルサイズで制御された構造を基盤とする新規な光デバイスの構築を目指して、以下のテーマを推進した。

【研究成果】

1. 有機半導体レーザーデバイスの構築

1. 1. 分布帰還型(Distributed Feedback, DFB)有機レーザー発振素子

DFB レーザー発振では、前進波から後退波への（あるいはその逆の）反射帰還は共振器の長手方向全体にわたって連続的に起こり、この前進波と後退波との結合は媒質の屈折率または光利得係数が空間的に波長オーダースケールの周期変化によって起こる。¹⁾ このため DFB レーザーは、通常のアブリペロー型の共振器ミラーによるレーザー発振と比較して、はるかに優れた波長安定性を示す。この安定性は、レーザーモードが導波路内半波長の整数倍が屈折率（あるいは利得）摂動の空間周期 Λ に一致するような周波数で発振することに起因している。¹⁾ 従って、DFB レーザー素子では、光の波長オーダーの周期的な構造（マイクロキャビティ）を誘起あるいは構築することによって達成される。ここで、有機材料や高分子材料のもつフレキシビリティが生かされてくる。

有機 DFB レーザーデバイスでは、周期構造誘起型と周期凹凸構造型との2種類のレーザー発振デバイスを構築することができる。周期構造誘起型（ホログラフィックグレーティング法）のD

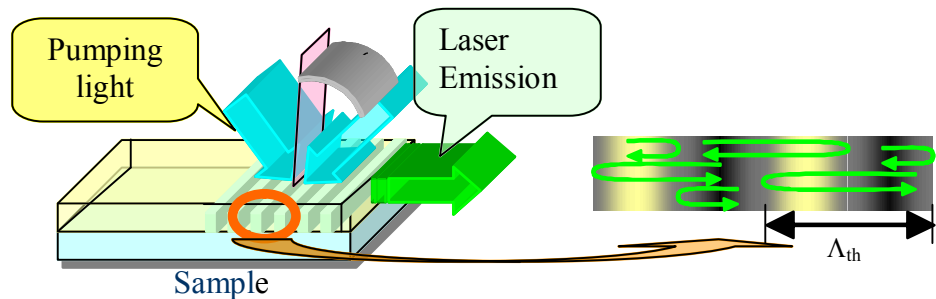


図1 周期構造誘起型DFBレーザー発振

FBレーザーデバイスの模式図を図1示す。干渉露光を簡便に達成させるために考案されたLloyd Mirrorの概略図を図2に示す。これを用いてレーザー色素含有の光導波路試料表面で干渉露光を行う。光導波路内に誘起されたピッチ間隔が数百ナノメートルの周期構造のマイクロ共振器中で利得変調あるいは屈折率変調のレーザー増幅が選択的おき、光導波モードのレーザー発振が起こる。Lloyd Mirrorの軸を回転させることによって θ を変えることができ、(1)式に従い発振波長を可変できる。

$$\lambda_L = \frac{2n_{eff}\Lambda_{th}}{m} = \frac{n_{eff}\lambda_p}{m \sin \theta} \quad (1)$$

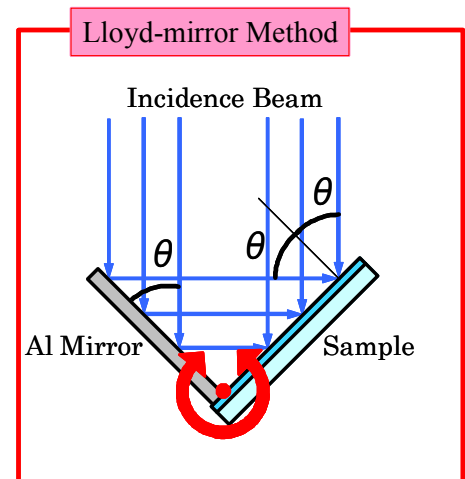


図2. Lloyd Mirror の概略図

ここで、 λ_L ：発振波長、 Λ_{th} ：ピッチ間隔、 n_{eff} ：導波層の実効屈折率および m , $m = 1, 2, 3, \dots$ ：グレーティング（格子）モード数である。波長可変で低閾値のレーザー発振を求めて、Lloyd mirror を用いたダイナミックホログラフィックグレーティング法による共役化合物 1,4-bis[2-[4-[N,N-di(p-tolyl)amino]phenyl]vinyl]benzene (BTAPVB) をポリスチレン (PS) に分散させた BTAPVB/PS 有機光導波路からの DFB 波長可変レーザー発振の結果を図 3 に示す。ミラーの回転に合わせて、BTAPVB の amplified spontaneous emission (ASE) 波長域²⁾で波長可変のレーザー発振にしている。³⁾ その他、[3-(2-benzothiazolyl)-7-(diethylamino)coumarin e] (Coumarine 6) および 4-(Dicyanomethylene)-2-methyl-6-(4-dimethylaminostyryl)-4H-pyran (DCM) などをポリビニルカルバゾール (PVCz) , Tris(8-quinolinolato)aluminum (Alq) などのマトリックスに分散させた有機光導波路からのレーザー発振を検討した。^{4,5)}

図 4 に周期構造凹凸型 DFB レーザー発振デバイスの模式図を示す。予め、ピッチ間隔数百ナノメートルの凹凸構造をもつクラッド層を作製する。その上に厚さ数百ナノメートルのレーザー色素を有する活性導波層をスピんキャストで製膜し、3層薄膜導波路を作製する。ここで重要なことは、レーザー色素からの誘導放出が起こる波長域にレーザー発振波長域を設定させることである。以下に DFB 有機レーザー素子のファブリケーションを示す。光感光性ポリマーである SU-8[®]表面上に連続した周期的な凹凸構造を有するクラッド層を作製する。連続した周期的な凹凸構造は、Nd:YAG レーザーの第 3 次高調波 355 nm を用いたロイドミラー法による干渉露光後、ベーキング、現像処理ならびハードベーキング処理を経て作製した。周期的な凹凸構造は走査型プローブ顕微鏡である原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、定量的に評価する。図 5 にピッチ間隔 190 nm 前後、ピッチ高 1 nm 程度の周期構造の AFM 像を示す。このクラッド層の上に PVCz, Alq, DCM を PVCz/Alq/DCM = 69/30/1 の割合で混合した活性層をスピんキャストして、数百ナノメートルの薄膜活性光導波層を製膜する。この場合は $m = 1$ で発振する。 $m = 2$ で発振させる場合は、ピッチ間隔を 380 nm 前後に設定したクラッド層を作製し、その上に薄膜活性光導波層を製膜する。図 6 に、Nd:YAG レーザーの第 3 次高調波 355 nm でポンピング励起したときの DFB レーザー発振パルス

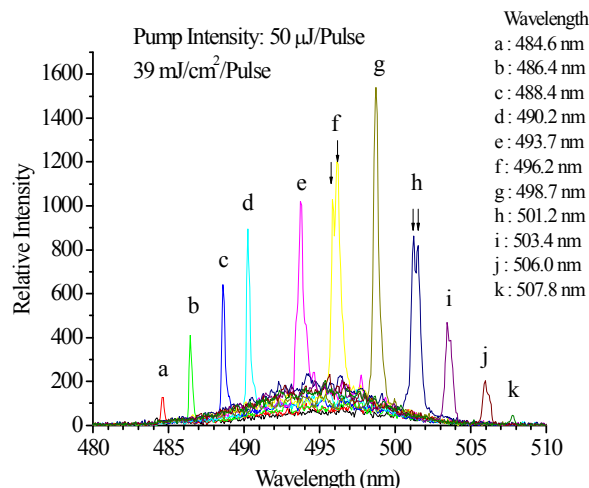


図3. 波長可変レーザー発振

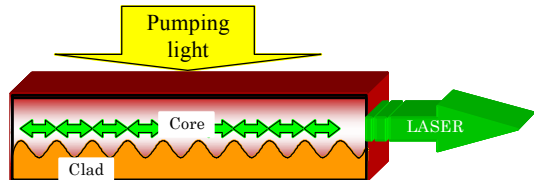


図4 周期凹凸構造型DFBレーザー発振

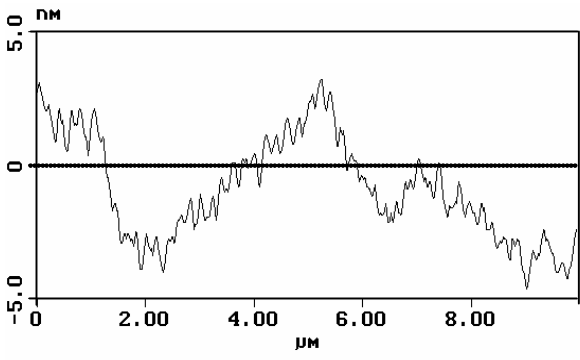


図5. 入射角 69.9° の2光束干渉で作製した周期構造のAFMによる断面図。周期構造の高さは約1nmでピッチ間隔は189nm。

およびそのときの閾値測定結果を示す。半値幅は 0.2 nm 前後であり十分に単色光化した TE モード (s 偏光) のレーザー発振が起きていることがわかる。周期構造誘起型の DFB レーザー発振には簡便に干渉露光が行えるロイドミラーを用いた。これを用いて光導波路内に誘起されたピッチ間隔が数百ナノメートルの周期構造のマイクロ共振器中で、利得変調あるいは屈折率変調のレーザー増幅が選択的おき、光導波モードのレーザー発振が起こる。⁶⁾

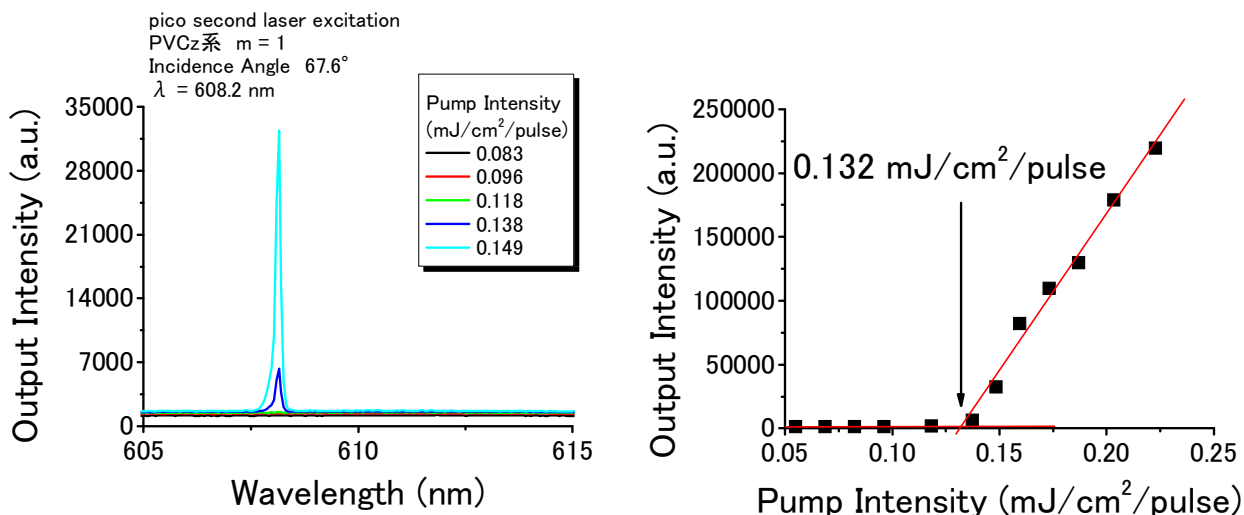


図6. (a) $m = 1$ でのレーザー発振スペクトル
(b) 閾値測定, レーザー発振ピーク強度のポンプエネルギー依存性

有機DFBレーザー発振で当面解決すべき課題の一つは、レーザー発振の閾値を下げることである。解決策としては、低閾値で発振するようなレーザー色素を開発するか、あるいはエネルギー移動を介する光アンテナの手法を利用して、励起エネルギーをレーザー色素に集中させる手法などが考えられる。簡便に行える材料設計の観点から、後者のエネルギー移動を利用した低閾値化を図った。その結果、PVCz や Alq をホストマトリックスとすることで低閾値化を達成できた。^{4,5)} レーザー色素には Coumarin 6 および DCM を用いた。Coumarin 6 は 450 nm に吸収極大をもつが、Nd:YAG の励起レーザーの波長 532 nm および 355 nm いずれにも吸収が小さく非常に励起効率が悪い。355 nm に吸収を有する PVCz を用い、Förster の双極子-双極子相互作用によるエネルギー移動を介して効率よく励起エネルギーを Coumarin 6 に集中させることができ、エネルギー移動が期待できないポリスチレン (PS) をホストマトリックスとしたときの閾値 $7.3 \text{ mJ cm}^{-2} \text{ pulse}^{-1}$ (680 nJ

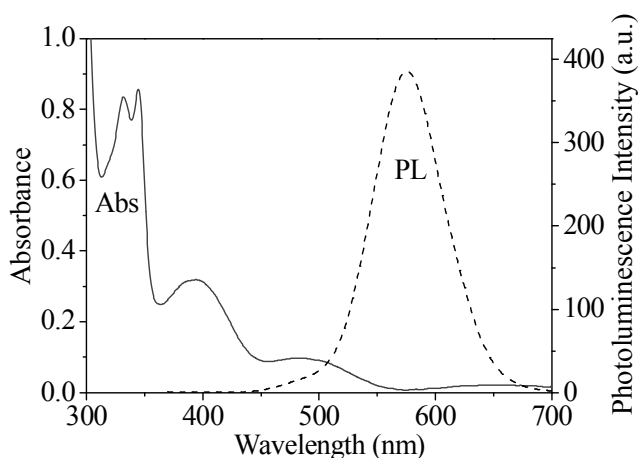


図7. DCM/Alq/PVCz系の吸収・発光スペクトル

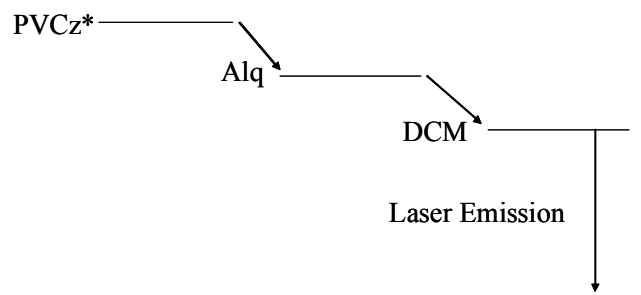


図8. DCM/Alq/PVCz系のエネルギーダイアグラム図

pulse⁻¹)に対して 0.3 mJ cm⁻² pulse⁻¹ (280 nJ pulse⁻¹)まで下げることに成功した。⁴⁾ さらに、半永久的なグレーティングを作りこんだ素子では 0.13 mJ cm⁻² pulse⁻¹ (120 nJ pulse⁻¹)までの低閾値に成功した。DCM は 470 nm に吸収極大をもつが、Coumarin 6 同様に Nd:YAG の励起レーザーの波長 532 nm および 355 nm いずれにも吸収が小さく非常に励起効率が悪い。この系では、PVCz と Alq とをホストマトリックスとしたカスケード型励起エネルギー移動による低閾値化を試みた。その結果、355 nm 励起で 40 μJ cm⁻² pulse⁻¹ (38 nJ pulse⁻¹)まで閾値を下げることに成功した。⁵⁾

1. 2. 分布ブラッグ反射鏡(Distributed Bragg Reflector, DBR)を用いた光・電子デバイス

有機 DFB レーザーは光導波モードを利用しているため、導波端からのレーザー発振であるが、面内からのレーザー発振を可能にする方法もある。一つの方法にストップバンドをもつ 1 次元フォトニック結晶の多層膜を用いた DBR を利用する方法がある。2 種類の屈折率 (n) の異なるポリマーフィルムをスピコーティング法を活用して、交互に積層させる。このとき、屈折率差が大きいとストップバンド幅も大きくなる。反射させたい中心波長 (λ) にストップバンドをもたせるためには、1 層の厚みを $\lambda/4n$ に正確にコントロールする必要がある。ここで、研究室で行なった DBR の作製法の要点をまとめてみる。スピコーティング法では、溶液濃度とスピン回転数が膜厚を決める重要な実験因子となる。膜厚は原子間力プローブ顕微鏡 (AFM) を用いて調べ、ある溶液濃度に対するスピン回転数と膜厚との具体的な関係式を最小自乗法を用いてより正確に求めておく。酢酸セルロース (CA) ($n_{589}=1.475$) と PVCz ($n_{589}=1.683$) とを用いて DBR の作製を試みた。波長 589 nm にストップバンドをもつように条件を決定し、39 層までの積層を行い、結果を図 7 に示す。この結果ストップバンドの中心は目標とした 589 nm から 542 nm へ 47 nm シフトしており、単純計算で PVCz 層がおおよそ 7 nm、CA 層がおおよそ 8 nm ほど目標の膜厚より小さくなったと考えられる。今後はこの素子を用いた有機レーザーデバイスなどを構築していく。

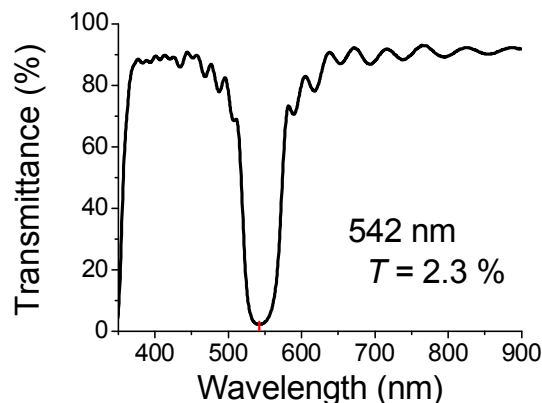


図 7. CA/PVCz 多層膜による DBR 素子の透過スペクトル

この結果ストップバンドの中心は目標とした 589 nm から 542 nm へ 47 nm シフトしており、単純計算で PVCz 層がおおよそ 7 nm、CA 層がおおよそ 8 nm ほど目標の膜厚より小さくなったと考えられる。今後はこの素子を用いた有機レーザーデバイスなどを構築していく。

1. 3. 今後の展望

有機レーザーのみならず、有機発光ダイオード (OLED)、有機トランジスタや有機太陽電池などの研究も着実に進んでおり、Paint-on Optoelectronics の波は全世界的に広がりつつある。今までエピタキシャル成長に依存して発展してきた無機半導体を凌駕する日もそう遠くはないと考えられる。

2. 光ポーリングによる有機光デバイスの構築

オプティカルポーリング (光ポーリング) 法は、パルスレーザー光のみを用いてアモルファス材料中に非中心対称性の $\chi^{(2)}$ 構造を誘起するユニークな手法である。オプティカルポーリングによる光誘起 $\chi^{(2)}$ 構造は、基本波と 2 倍波との混合波の 3 次の非線形光学効果によって生じる周期的に変調する空間電場に沿って分布する。材料の所定の点 M における誘起 $\chi_{ind}^{(2)}$ は、その場での基本波と 2 倍波との混合光の 3 次の非線形光学効果により生ずる時間平均しても零にならない空間電界に比例する。すなわち、試料のある点 M において ω と 2ω との混合光の光電場を $E(M,t) = E_{\omega}(M,t) + E_{2\omega}(M,t)$ とすると、光誘起 $\chi_{ind}^{(2)}$ は (2) 式のように表される。^{7,8)}

$$\chi_{ind}^{(2)} \propto \langle E^3(M, t) \rangle_t = \langle (E_\omega(M, t) + E_{2\omega}(M, t))^3 \rangle_t \quad (2)$$

よって $\langle E(t)^3 \rangle_t$ の空間電場により，配向分極が誘起される。

ポーリング媒体は基本波に対しては透明であり，2倍波に対する吸光係数を α とすると，(2) 式は (3) 式のように示すことができる。

$$\chi_{ind}^{(2)} \propto \langle E^3(M, t) \rangle = (E_\omega^2 E_{2\omega}^* \exp(-i\Delta k \cdot M) + E_\omega^* E_{2\omega} \exp(i\Delta k \cdot M)) \exp\left(-\frac{\alpha}{2} z\right) \quad (3)$$

ここで， $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$ は ω と 2ω の波数ベクトル差 (k_ω ， $k_{2\omega}$ はそれぞれ ω ， 2ω 光の波数ベクトル)， E_ω および $E_{2\omega}$ はそれぞれ ω および 2ω の振動数での複素振幅を示す。 z は試料前面を原点としたときの伝搬方向座標である。

$\Delta\Phi$ を 2 本の書き込みビーム間の相対的位相差とすると，(3) 式は

$$\chi_{ind}^{(2)}(z) = \chi_{eff}^{(2)} \cos(\Delta\Phi + \Delta k \cdot z) \exp\left(-\frac{\alpha}{2} z\right) \quad (4)$$

となる．ここで $\chi_{eff}^{(2)} \propto \|E_\omega^2 E_{2\omega}^*\|$ である。

これを，基本波 ω のレーザー光で読み出すと，次のような偏光第 2 次高調波を発生する。

$$P_{2\omega}(M) = \frac{1}{2} \epsilon_0 \chi_{ind}^{(2)} E_\omega^2 \quad (5)$$

この第 2 次高調波は

$$I_{2\omega}^{SHG}(z=l) = \|E^{SHG}(z=l)\|^2 = \frac{\omega^2 d_{eff}^2 I^2}{4n^2 c^2 10^{OD}} I_\omega^2 \left[1 + \text{sinc}^2\left(2\pi \frac{l}{l_c}\right) + 2\text{sinc}\left(2\pi \frac{l}{l_c}\right) \cos\left(2\Delta\Phi + 2\pi \frac{l}{l_c}\right) \right] \quad (6)$$

と表され，ここで $d_{eff} = \chi_{eff}^{(2)}/2$ ， l はサンプル厚， l_c はそのコヒーレント長 ($\Delta k \cdot l_c = \pi$ ， $l_c = \frac{\lambda_\omega}{4\Delta n}$; Δn

は ω ， 2ω での屈折率差)， OD は 2ω における吸光度である． sinc 関数は $\text{sinc}x = \frac{\sin x}{x}$ となる関数である。

厚い試料 ($l \gg l_c$) では，

$$I_{2\omega}^{SHG} = \frac{\omega^2 d_{eff}^2}{4n^2 c^2 10^{OD}} I_\omega^2 I^2 \quad (7)$$

となり，これは位相整合材料での SHG に相当する。

図 8 にオプティカルポーリングの模式図を示す。⁹⁾ オプティカルポーリングは 10 秒間の基本波 (ω 光) と 2 倍波 (2ω 光) との混合波の同時照射による $\chi^{(2)}$ 構造の書き込み過程 (a) とそれに続く ω 光のみの照射による $\chi^{(2)}$ 構造からの SHG の読み出し過程 (b) をコンピュータ制御で連続的に交合を行った。ここで，見やすくするために図中の基本波と 2 倍波をずらして示しているが，実際両者は同軸上にある。

分子ガラス薄膜の光ポーリングを検討した。ここで用いる材料は有機 DFB レーザー発振で用いた 1,4-bis[2-[4-[N,N-di(p-tolyl)amino]phenyl]vinyl]benzene (BTAPVB) であり，BTAPVB 薄膜をスピコーティング法で作製して，光ポーリング試料に供した。パルス幅 30 ps，波長 1064 nm，繰り返し周波数 10 Hz のピコ秒パルスレーザーを励起光源とした。光ポーリングでは，光電界振幅 E_ω を有する基本波 (ω) と

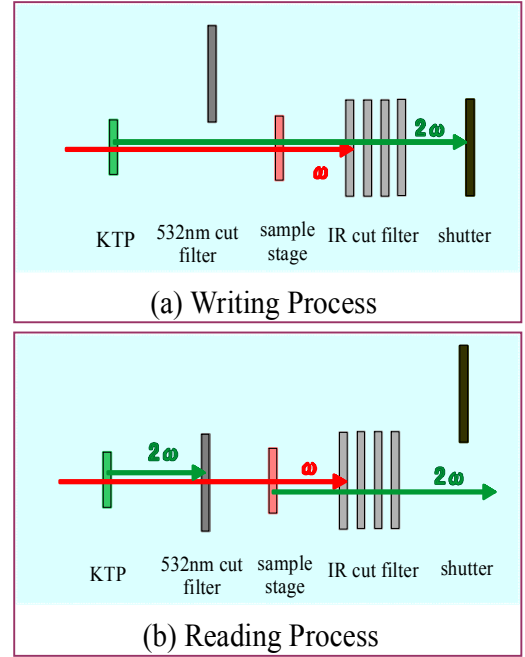


図8 オプティカルポーリングの書き込み過程 (a) と読み出し過程 (b)

光電界振幅 $E_{2\omega}$ を有する 2 倍波 (2ω) とを同時照射しながらポーリングを行った。図 9 に示すように得られた $\chi^{(2)}$ 分極は $E_{\omega}^4 E_{2\omega}$ とよい直線関係にあり、2 光子 ($\omega + 2\omega$) および 3 光子 ($\omega + \omega + \omega$) 同時励起過程による同一電子準位への励起を経て $\chi^{(2)}$ 分極が光誘起されていくことを示した。試料を光軸周りに回転させたときに得られる $(I_{2\omega}^{SHG})^{1/2} \chi^{(2)}_{\Delta\Delta\Delta}$ を回転角に対して測定した結果を図 10 に示す。 $(I_{2\omega}^{SHG})^{1/2} \propto \chi^{(2)}_{\Delta\Delta\Delta}$ より (8) 式を用いて dipolar 成分と octupolar 成分の寄与率を求めることができる。^{7,8)}

$$\chi_{\Delta\Delta\Delta}^{(2)} = \frac{N\beta_{III}}{\epsilon_0} \left[A_3 \cos^3 \delta + \frac{3}{5}(A_1 - A_3)\cos \delta \right] \quad (8)$$

ここで、 A_1 : 1 次のオーダーパラメーター (dipolar 成分), A_3 : 3 次のオーダーパラメーター (octupolar 成分) である。フィッティングの結果, $A_1 / A_3 = 8 / 2$ となり, dipolar 成分のみならず octupolar 成分も光ポーリングに寄与することが示された。¹⁰⁾

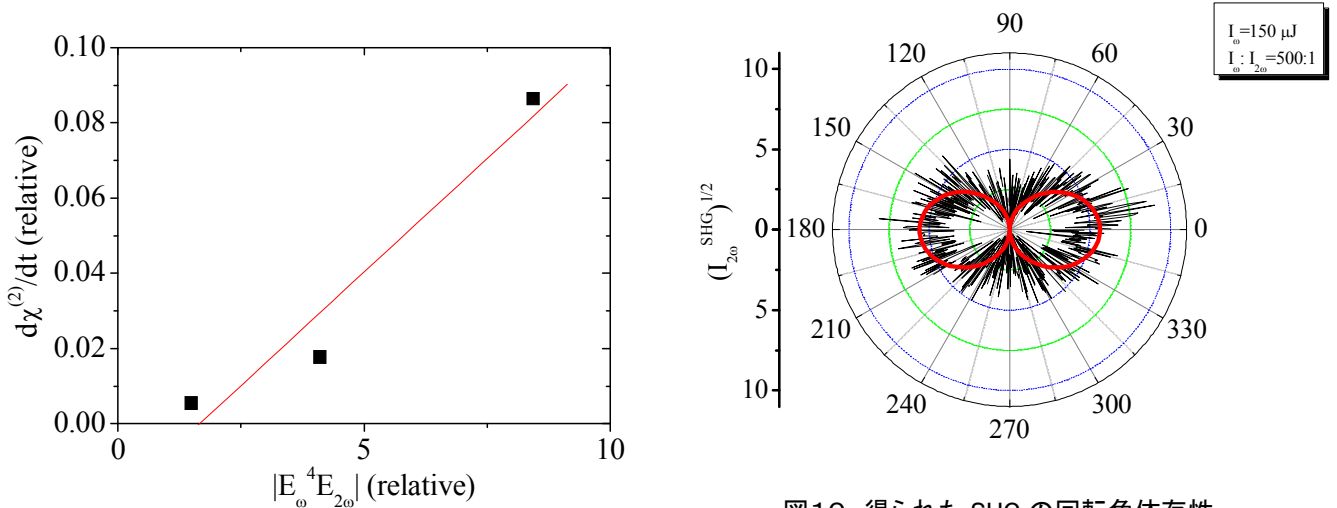


図 9 $\chi^{(2)}$ の初期成長速度 vs. $E_{\omega}^4 E_{2\omega}$

図 10 得られた SHG の回転角依存性

図 11 に非同軸 (ω と 2ω ビームがそれぞれ別の軸) オプティカルポーリングによる体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録の模式図を示す。同一波長の 2 光波による体積ホログラム光記録では再生照明光と再生光の波長は同一である。それに対して、オプティカルポーリングによる体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録では再生時の読み出し光 (再生照明光) の ω 光に対して回折光の波長は 2ω となる。すなわち、非同軸の ω 光と 2ω 光との間で $\chi^{(2)}$ グレーティング構造が形成され、回折光として SHG が観測される。この $\chi^{(2)}$ グレーティング構造の中にページデータ (2 次元平面画像) を光記録させることによって、体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録が可能となる。

$\chi^{(2)}$ ホログラフィの原理は次のように説明できる。¹¹⁾ (9) 式のように電場の 3 乗に比例して非線形感受率

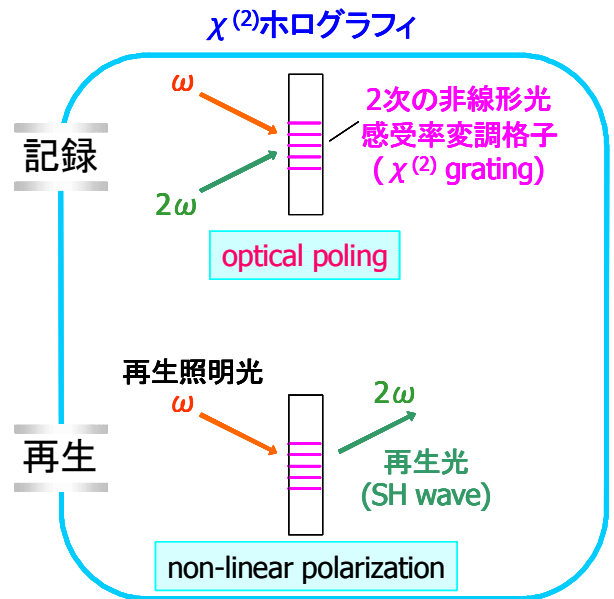


図 11 非同軸オプティカルポーリングによる $\chi^{(2)}$ ホログラフィ

$\chi^{(2)}$ が誘起されるような非線形媒質を考える。

$$\chi^{(2)} = \alpha \langle E^3 \rangle \quad (9)$$

ここで α は定数、 $\langle E^3 \rangle$ は E^3 の時間平均である。

《記録》

いま、もし周波数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ の3つの光ビームが媒質中に入射するとすれば (図12参照)、このときの光電場は次式で表される。

$$E = \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^3 E_j \exp[i(\omega_j t - \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] \right\} \quad (10)$$

ここで、 E_j は j 番目の場の振幅であり、 ω_j は周波数、 \mathbf{k}_j は波数ベクトルである。

非線形性の結果、媒質の $\chi^{(2)}$ は次式で表される ((10)式を(9)に代入)。

$$\chi^{(2)} = \frac{1}{4} \alpha \{ E_1 E_2 E_3^* \exp[i(\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r}] + \text{c.c.} \} \quad (11)$$

ここで、 c.c. は複素共役を表す。このように3つの場の波面の情報は $\chi^{(2)}$ 格子 (またはホログラム) として記録される。この波面の情報は以下のように読み出すことによって再生できる。

《再生》

E_3 を再生するためには、 $\chi^{(2)}$ ホログラムに E_1 と E_2 を同時に照射する。その結果、次式で表される非線形分極が発生する。

$$P^{\text{NL}} = \chi^{(2)} E_R^2 \quad (12)$$

ここで読み出しビームの電場 E_R は次式で与えられる。

$$E_R = \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^2 E_j \exp[i(\omega_j t - \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] \right\} \quad (13)$$

(13)式の $\chi^{(2)}$ を用いて次式を得る。

$$P^{\text{NL}} = \frac{1}{8} \alpha \{ |E_1 E_2|^2 E_3 \exp[i(\omega_3 t - \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r})] + \text{c.c.} \} \quad (14)$$

上記の表現式を見ると、 $|E_1 E_2|$ が定数ならば、 P^{NL} が $E_3 \exp[i(\omega_3 t - \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r})]$ に対する波動方程式を満足することがわかる。したがってこのような非線形分極は効率よく放射し、 $E_3 \exp[i(\omega_3 t - \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r})]$ を発生する。

同様に、 E_2 と E_3 (または E_1 と E_3) を $\chi^{(2)}$ ホログラムに照射することによって E_1 (または E_2) を再生することができる。位相共役波の波面も逆方向を進む波でこのホログラムを読み出すことによって作り出すことができる。 $\chi^{(2)}$ ホログラムからの SHG 発生は、上記の特別な場合、すなわち $\omega, \omega, 2\omega$ の3光が寄与する場合であると考えられる。また、この $\chi^{(2)}$ グレーティングを用いた光パラメトリック増幅などの応用も可能となる。

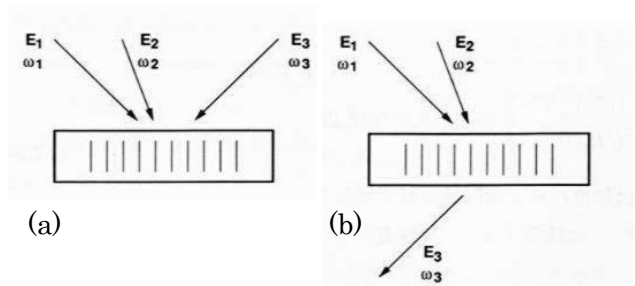


図12 (a) $\chi^{(2)}$ ホログラム媒体中の3ビーム干渉を用いたホログラムの記録. (b) $\chi^{(2)}$ ホログラムにビーム E_1 と E_2 を照射するとビーム E_3 が再生される¹¹⁾

非線形光学色素 betain-C8/PVBu フィルムをサンプルに用いて体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録を行った。実験では、異なる3通りの光学配置（図13のケース1，ケース2およびケース3）でオプティカルポーリングを行った。²¹⁾ 書き込みビーム ω と 2ω を同軸上に照射するものをケース1，非同軸で照射するものをケース2，両者を同時に行うものをケース3とした。ケース1は従来のオプティカルポーリングである。ポーリング後，サンプルに基本波を照射し，ポーリングにより形成された $\chi^{(2)}$ 構造からの SH 波の光強度を光電子増倍管（PM1 および PM2）を用いて測定した。また，IR カードを用いて ω ビームの強度を調べた。さらに，10 秒の書き込み（オプティカルポーリング）と 2 秒の読み出し（SHG 測定）を交互に行うことで，ポーリングにより形成されていく $\chi^{(2)}$ 構造の成長を評価した。その結果，ケース2およびケース3において読み出し基本波照射に対して SH 回折光が成長増大し数分間でほぼ一定になることを観測した。このことは，非同軸オプティカルポーリングで体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録が起きていることを示している。同軸および非同軸オプティカルポーリングで形成される $\chi^{(2)}$ 構造を図中の丸の中に斜線で示す。

非線形光学色素 betain-C8/PVBu フィルムをサンプルに用いて体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録を行った。¹²⁾ その結果，期待通りに $\chi^{(2)}$ グレーティングが形成され，読み出し基本波照射に対して SH 回折光が成長増大し数分間でほぼ一定になることを観測した。このことは，非同軸オプティカルポーリングで体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録が起きていることを示している。

		SH wave 2ω (PM)	Reading wave ω (IR card)
ケース1		8200	○
		~ 0	×
ケース2		~ 0	○
		4500	×
ケース3		11000	○
		~ 0	○
(a) 書き込み過程		(b) 読み出し過程と読み出し結果	

図13 ホログラム光記録の3パターン

ケース1: 通常のコ軸オプティカルポーリング，ケース2: 非同軸オプティカルポーリング(体積 $\chi^{(2)}$ ホログラム光記録)，
ケース3: 同軸，非同軸の同時オプティカルポーリング

3. 新規な体積ホログラム光記録材料の開発

3. 1. はじめに

光記録デバイスと言えは，まず音楽分野でそれまでの針式レコードに完全に取って替わったコンパクトディスク（CD）が挙げられる。この CD は音楽分野のみならず，パーソナルコンピューター（PC）の超高速化とメモリーの大容量化ならびにフロッピーディスクに替わる大容量ディスクの要求に伴って PC 用メディアに不可欠のものとなっていった。そして光記録デバイスは大容量時代に入っていった。

CD の容量は 700M バイトほどが限界であるが、動画の記録・再生が可能な数ギガ (10^9) バイトのデジタル多用途ディスク (DVD) が開発され、さらには数十ギガバイトの記録容量を格納できる Blu-ray 用の次世代 DVD へと発展してきている。

しかしながら、現在の CD や DVD (次世代 DVD を含む) は 1 ビット分のデータを記録層の表層部分のみに記録する方式であり、可視光領域での回折限界もあってその記録密度には限界があり、2010 年以降に要求されるテラバイト (10^{12}) メモリーには到底対応できるものではない。従って、新たな技術提案が必要である。

テラバイト級の光記録媒体ではページデータ記録が可能な体積ホログラム記録デバイスがその解決策の候補として有力である。ホログラム記録の利点は、点 (ビット) ではなく面 (ページデータ) で情報が扱えるために、飛躍的に記録容量を上げることができ、かつ高速化も可能であり、1 秒あたりテラバイトあるいはギガバイトのデータ記録が期待されている。体積ホログラム光記録デバイス用材料としては、フォトポリマー、フォトクロミックポリマー、無機および有機のフォトリフラクティブ材料がその候補として挙げられるが、それぞれ一長一短がある。われわれは、その中で有機フォトリフラクティブ材料を用いた体積ホログラム光記録デバイスへの展開を検討している。

有機ポリマーのフォトリフラクティブ現象は 1991 年に初めて報告され¹³⁾、その後の精力的な研究展開の先鞭となった。無機結晶と比較した有機ポリマー材料の利点は、無機材料よりも誘電率が低いために大きな空間電界の形成が可能である、材料選択の自由度が大きい、成膜・加工性に優れる、ポーリングにより大きな非線形光学特性を持たせることができる、などが挙げられ、それゆえに高性能化が期待されている。最近では、無定型低分子ガラス¹⁴⁾、液晶¹⁵⁾、ゾルーゲル材料¹⁶⁾ などにおけるフォトリフラクティブ性が報告され、有機フォトリフラクティブ材料の多様性が展開されている。これらの有機フォトリフラクティブポリマー材料では、ポッケルス効果を生み出すためには十分な空間電界の形成が必要であり、そのためには効率よい光キャリア生成が求められ、高電界印加は必須条件とされてきた。しかしながら、数キロボルトの電圧を常時材料に印加しておかないと、フォトリフラクティブ記録、保存、再生ができない。この高電界印加はデバイス化に際して大きな負の要因となる。従って、フォトリフラクティブ材料にとって低電圧化あるいは無電圧化がその応用へのキーポイントとなる。ここ 2、3 年の研究動向を見ると、無電界下での回折効率や非対称なエネルギー移動などの報告¹⁷⁻¹⁹⁾ がなされており、フォトリフラクティブ効果発現に必須とされてきた電界印加は必ずしも必要でないことが示されてきた。私の研究室でも、5 年ほど前に無電界下で駆動する有機フォトリフラクティブポリマー材料の開発に成功した²⁰⁾。

本報告では、私たちが見出した無電界下で駆動する有機フォトリフラクティブ複合材料を中心にそれらの体積ホログラム光記録デバイスへの応用を念頭に置いた現在までの研究をまとめる。

3. 2. 無電界フォトリフラクティブポリマー材料

光導電性ポリマーとして有名なポリビニルカルバゾール (PVCz) をホストマトリックスとして、電子受容体 (増感剤) のトリニトロフルオレノン (TNF)、非線形光学色素 (NLO 色素) ならびに可塑剤を適材量配合した PVCz/TNF/NLO 色素/可塑剤を混合調製した。このフォトリフラクティブ複合材料に対して、2 光波混合測定法を用いて非対称なエネルギー移動測定および光学利得測定、ならびに縮退 4 光波混合測定法による回折効率測定を行った。材料中に分散させたそれぞれの成分の配合比率が、非対称なエネルギー移動、光学利得、回折効率などのフォトリフラクティブ性の発現の鍵を握る。特に、無電界下でのフォトリフラクティブ性発現に至る過程でのブレークスルーは、従来から試された複合材に比

較して増感剤の濃度を非常に多くしたことにある。その結果、無電界下で 224cm^{-1} の光学利得および 88% の回折効率を達成できた。²¹⁾ これらの結果は、従前から検討されている PVCz/TNF を基盤とする電界印加型フォトリフラクティブ材料に匹敵する性能である。光の干渉縞に対して屈折率変調は位相がほぼ 90° ずれており、理想的なフォトリフラクティブ効果を発現していると考えられる。可塑剤の種類を変えることによりガラス転移温度が広範囲に制御できる。光学利得、回折効率ならびにそれらの応答速度はガラス温度におおきく依存した。無電界下での非対称エネルギー移動や回折効果発現は、光イオン化を経て生成した光キャリアが拡散移動して屈折率変調構造を生成したためと考えられる。この機構は、従来型の光キャリアによる空間電界形成とポッケルス効果を介する非線形屈折率変調による電界印加型フォトリフラクティブ材料の発現機構とは異なると考えられる。

3. 3. 無電界フォトリフラクティブ分子ガラス

図 14 に示すカルバゾール誘導体である Tris および Tetrakis の分子ガラスマトリックスをベースにしたフォトリフラクティブ複合材料を検討した。これらの複合材料の無電界下での回折効率測定や非対称なエネルギー移動測定および光学利得測定を行った。上記の PVCz 複合体とほぼ同じような性能を示すことが判明した。可塑剤の種類を変えることによりガラス転移点を 10 から -40°C まで変化させることができ、それに対応して非対称エネルギー移動による光学利得および回折効率が増加した。分子ガラスの場合は、 $-10 \sim 0^\circ\text{C}$ 付近で比較的良好なレスポンスを得ることができた。²²⁾

ホログラム記録方式には透過型と反射型の 2 通りの方法がある。反射型配置では、He-Ne ($@632.8\text{ nm}$) レーザー光を用いて格子間隔を二百ナノメートルオーダーにさせることができ、数ミクロンの格子間隔

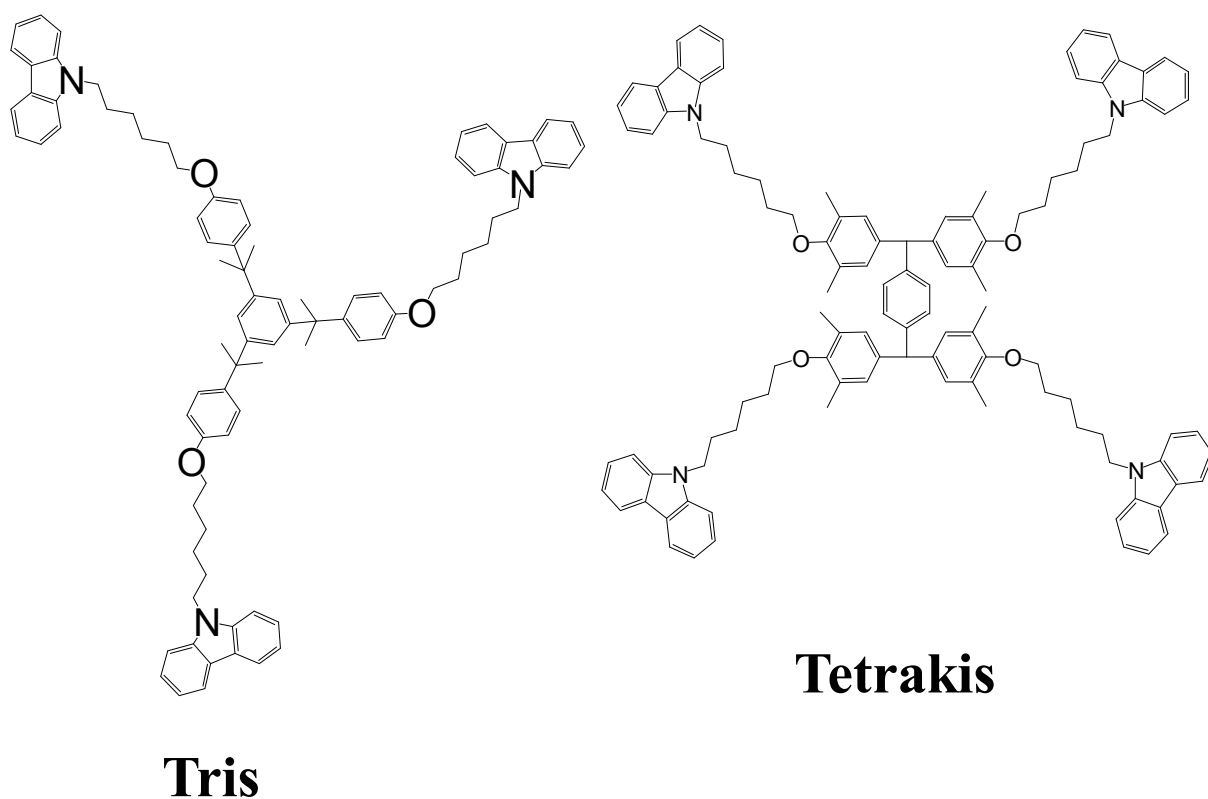


図14 分子ガラスの化学構造式

となる透過型に比べて格子間隔を一桁小さくすることができる。これを用いて、無電界下フォトリフラクティブ性の高速応答性を狙うことができる。反射型配置では材料の吸収が小さいことが条件となる。反射型配置を用いて、Tetrakis/TNF/NPP/BBP (55/20/20/5) において、 216cm^{-1} の光学利得および 46.4% の回折効率ならびに高い応答特性が達成できた。²³⁾

3. 4. 2光子励起光電流測定

多光子励起プロセスを利用するホログラム光記録を目的として、有機フォトリフラクティブポリマー材料の光電流の入射光強度依存性を検討した。照射源として、パルス幅 30 ps, 波長 1064 nm, 繰り返し周波数 10 Hz のピコ秒パルスレーザーおよびパルス幅 100 ns, 波長 800 nm のフェムト秒パルスレーザーを用いた。フェムト秒パルスレーザーの繰り返し周波数は 80 MHz と 1 kHz の 2 通りを試した。光キャリア生成の目安となる光電流測定において、2 光子励起では入射光強度の 2 乗、3 光子励起では入射光強度の 3 乗に比例して光電流が増加することとなる。材料には、光導電性ポリマーの PVCz, 増感剤の TNF, 非線形光学色素 (NLO 色素) の (s)-(-)-1-(4-nitrophenyl)-2-pyrrolidine-methanol (NPP), 4-azacycloheptylbenzylidene-malonitrile (7-DCST), あるいは NPP-OCH₃, 可塑剤の n-butyl benzyl phthalate (BBP) とを混合させた PVCz/NLO 色素/BBP/TNF (49/10/40/1) を用いた。光電流はレーザー光強度の 2 乗に比例して増加した。これにより 2 光子励起による光キャリア生成が確認できた。このときに得られる光電流は 1 光子励起で得られる光電流に匹敵することも確認でき、2 光子励起によっても効率よく光励起できることが判明した。

参考文献

- 1) A. Yariv, "Optical Electronics in Modern Communications", Oxford Press, New York, 1996. 多田邦雄, 神谷武志 監訳"光エレクトロニクス", 丸善, 2000.
- 2) N. Tsutsumi, T. Kawahira, W. Sakai, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 2533-2535 (2003).
- 3) N. Tsutsumi, A. Fujihara, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 16011(3pages) (2005).
- 4) N. Tsutsumi, M. Yamamoto, *J. Opt. Soc. Am., B* **23(5)**, 842 (2006).
- 5) N. Tsutsumi, A. Fujihara, D. Hayashi, *Appl. Opt.*, **45(22)**, 5748 (2006).
- 6) N. Tsutsumi, M. Takeuchi, W. Sakai, *Thin Solid Films*, submitted.
- 7) C. Fiorini, F. Charra, J. M. Nunz, P. Raimond, *J. Opt. Soc. Am. B* **14**, 1984 (1997).
- 8) A. C. Etile, C. Fiorini, F. Charra, J. M. Nunzi, *Phys. Rev. A* **56(5)**, 3888 (1997).
- 9) N. Tsutsumi, Y. Ikeyama, W. Sakai, *Nonlinear Opt.* **22**, 63 (1999).
- 10) N. Tsutsumi, K. Nakatani, *Opt. Commun.* **259**, 852 (2006).
- 11) P. Yeh, Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics (Wiley-Interscience, New York, 1993) Chapter 12, p.377-391.
- 12) N. Tsutsumi, T. Shingu, *Chem. Phys. Lett.* **403**, 420 (2005).
- 13) W. E. Moerner, *et al.*; *Phys. Rev. Lett.* **66**, 1846 (1991); *J. Opt. Soc. Am.* **B11**, 320 (1994)
- 14) P. M. Lundquist, R. Wortmann, C. Geletneky, R. J. Twieg, M. Jurich, V. Y. Lee, C. R. Moylan, and D. M. Burland,; *Science* **274(15)**, 1182 (1996)
- 15) I. C. Khoo, H. Li, and Y. Liang,; *Opt. Lett.* **19**, 1723 (1994)
- 16) B. Darracq, M. Canva, F. Chaput, J.-P. Boilot, D. Riehl, Y. Levy, and A. Brun,; *Appl. Phys. Lett.* **70(3)**, 292 (1997)

- 17) P. Cheben, F. del Monte, D. J. Worsfold, D. J. Carlsson, C. P. Grover and J. D. Mackenzie, *Nature* **408**, 64 (2000)
- 18) J. -W. Lee, J. Mun, C. S. Yoon, K.-S. Lee, and J.-K. Park, *Adv. Mater.* **14**, 144 (2002).
- 19) J. Jeong, K. Ohnishi, H. Sato, K. Ogino, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42 Part2 No. 2B**, L179 (2003).
- 20) 特願 2002-129159 「フォトリフラクティブ材料およびその製造方法, ならびにそれを用いたホログラム」 平 14-04.30, 堤直人, 清水裕介 (科学技術振興事業団, 京都工芸繊維大学)
- 21) N. Tsutsumi and Y. Shimizu, “Asymmetric two beam coupling with high optical gain and high beam diffraction in external field free polymer composites” *Jpn. J. Appl. Phys.* **43(6A)**, pp.3466-3472 (2004).
- 22) N. Tsutsumi, J. Eguchi, W. Sakai, “Asymmetric energy transfer and diffraction efficiency of novel molecular glass with carbazole moiety” *Optical Materials*, **29** pp.435-438 (2006).
- 23) Naoto Tsutsumi, Yusuke Shimizu, Junya Eguchi, Takehiro Murao, Yoshito Nakajima and Wataru Sakai, “Photorefractive Performances in Polymeric and Molecular Glass Composites for Optical Memories” *Proceedings of SPIE*, **6343** 63432V (14 pages) (2006).

ナノ領域光・電子融合集積回路のコンピュータ支援設計

研究分担者 廣木 彰
大学院 工学科学研究科
電子システム工学部門 助教授

【研究目的】

2010年以降に実現されるユビキタス社会では、テラビット級の情報処理・情報伝達が要求されている。このユビキタス社会を実現するキーテクノロジーの一つに集積回路技術がある。この集積回路技術では、数十テラの素子集積度、ナノ領域の素子サイズおよびピコレベルの動作速度が要求される。一方、情報伝達の分野では、高速・大容量の光配線技術が電子機器間の配線に実用化されている。最近では、電子機器内の配線の一部に光配線が用いられようとしている。したがって、2010年以降には、光配線技術を取り込んだ光・電子融合集積回路が電子システムの基幹部品になる。現在、集積回路はコンピュータ支援設計により高効率・高精度な設計を行っている。しかしながら、光・電子融合集積回路を効率よく設計するコンピュータ支援設計技術は確立していない。

本研究では、光・電子融合集積回路を効率よく設計するコンピュータ支援設計技術を研究・開発することを目的としている。本プロジェクトでは、この研究目的達成のための基礎研究として、ナノ領域素子に特有の物理現象である量子効果をモデリングし、ナノ領域光・電子融合集積回路設計支援のためのシミュレーション技術を研究することを目的とした。

【研究目標】

本研究で目標としたナノ領域光・電子融合集積回路設計支援のためのシミュレーション技術は、半導体デバイス物理モデリング技術、デバイスシミュレーション技術、回路シミュレーション技術、デバイス解析モデリング技術から構成される。半導体デバイス物理モデリング技術は、反転層量子効果モデルと非平衡輸送を解析する粒子モデルからなる。ナノ領域の半導体素子であるMOS型電界効果トランジスタ(MOSFET)では、そのゲート酸化膜厚が2nm程度に微細化されるため、電子が流れる反転層の量子効果が電流特性に影響する。そのため、この反転層量子効果を高精度に計算し、その電気特性への影響を解析する必要がある。また、ナノ領域MOSFETでは、実効ゲート長が数十nmになり電子のエネルギーが熱平衡状態からずれて移動度が劣化し、電気特性に影響する。粒子モデルは電子のエネルギーを計算し、非平衡輸送を解析するモデルである。デバイスシミュレーション技術は、電子輸送を流体モデルで近似し、半導体デバイスの電気特性を計算する技術である。反転層量子効果を流体モデルに組み込んだ密度勾配モデルを検討し、デバイスシミュレーションの量子補正モデルを構築する必要がある。回路シミュレーション技術は、回路素子モデルと等価回路モデルからなる。ナノ領域デバイスの特性をモデル化した回路素子モデルを組み込んだ回路シミュレーションと、光・電子融合システムを解析するための等価回路モデルを開発する必要がある。また、これらの回路シミュレーションの精度を向上させるため、デバイス解析モデリング技術が必要である。

本プロジェクトでは、ゲート酸化膜厚が2nm以下のMOSFETの電子濃度分布を解析する反転層量子効果モデル、ゲート長が50nmのMOSFETの電子エネルギーを解析する粒子モデル、ゲート長が50nmのMOSFETの反転層量子効果をモデル化した密度勾配モデルとデバイスシミュレーション技術、光・電子融合回路の受光部の回路素子をモデル化した回路シミュレーション技術、ゲート長が

45nm 以細のMOSFETの電気特性を解析するデバイス解析モデルを研究・開発することを目標とした。

【研究成果】

(1)半導体デバイス物理モデリング

反転層量子効果モデルは、MOSFETの反転層に発生する量子効果を解析するモデルである。このモデルはシュレディンガー方程式とポアソン方程式をセルフコンシステントに解き、反転層内の電子濃度分布と静電ポテンシャル分布を求める。

本モデルを用いて、ゲート酸化膜厚が 1.5nm のMOSFETの電子濃度分布を計算した。計算結果を図1に示す。

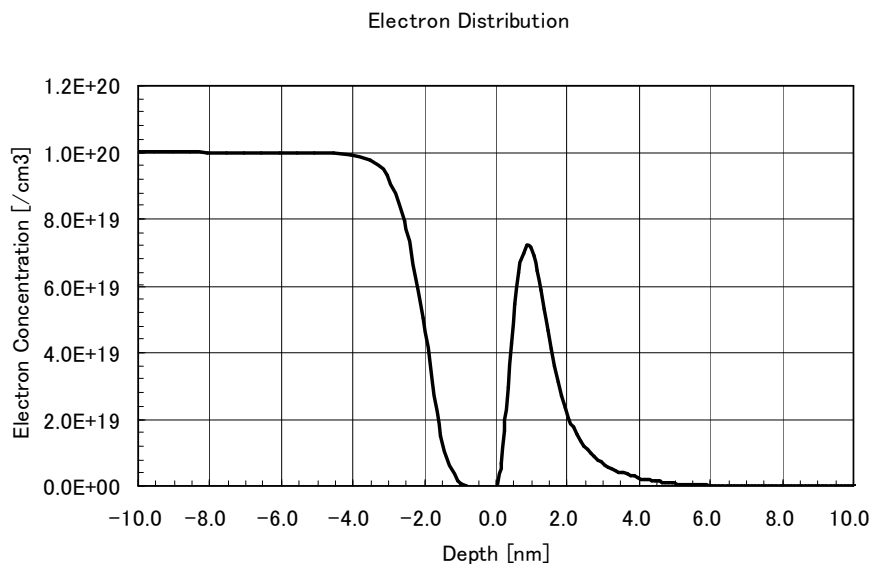


図1, ゲート酸化膜厚 1.5nm のMOSFETの電子濃度分布

ゲート酸化膜とシリコン基板の界面を深さ方向の原点にとっている。負方向には、1.5nm のゲート酸化膜を介してポリシリコンゲート電極がある。この結果から、ゲート酸化膜とシリコン基板の界面から深さ方向に 1nm のところに反転層電子濃度のピークがあることがわかる。反転層量子効果により、電気的な実効酸化膜厚は物理的なゲート酸化膜厚にくらべて増大している。このことから、物理的ゲート容量(設計値)に比べ、実効ゲート容量が減少し、電気特性を劣化させることが定量的に解析可能である。図2に、ゲート酸化膜厚を変化させた場合の実効ゲート容量の計算値を示す。ゲート酸化膜厚が薄くなるにしたがって、実効ゲート容量(実線)の理想ゲート容量(破線)からのずれが増大することがわかる。

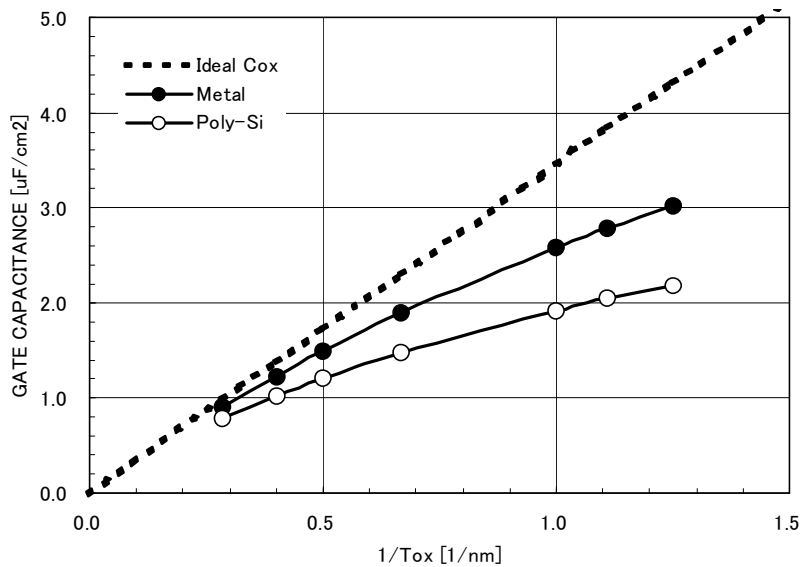


図2, 実効ゲート容量のゲート酸化膜厚依存性

粒子モデルは、電子のエネルギーを計算し、非平衡輸送を解析するモデルである。電子の音響フォノン・光学フォノン、不純物による散乱確率を量子力学的に計算している。この粒子モデルを用いて、サイズが 100nm 以下の素子、ナノ領域素子、で顕著に現れる電子の非平衡輸送を解析することができる。本粒子モデルにより、ゲート長が 50nm の MOSFET の電子エネルギーをシミュレーションし、電子の非平衡輸送現象を解析評価した。

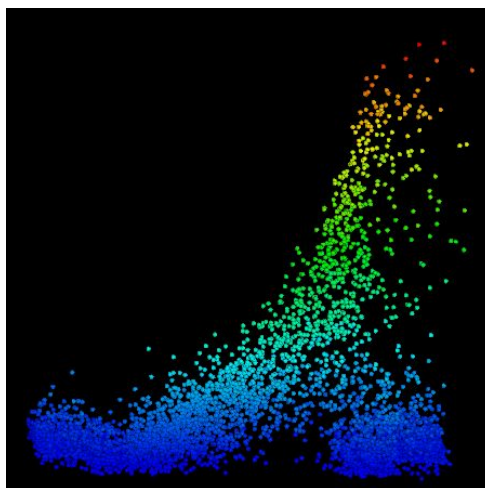


図3, 粒子モデルによるゲート長 50nm の MOSFET の電子エネルギー

図3に、電子エネルギーのシミュレーション結果を示す。横軸がチャネル方向で左側のソースからドレインへ向かっている。縦軸は電子の運動エネルギーをあらわす。また、粒子の色でも運動エネルギーを

あらわしている。青色は運動エネルギーが低い電子，赤色は運動エネルギーが高い電子である。この結果から，ドレインに近づくにしたがって，電子のエネルギーが高くなり，ドレイン近傍で，高エネルギー電子が多数存在していることがわかる。

(2) デバイスシミュレーション技術

本プロジェクトのデバイスシミュレーション技術では，スタンフォード大学と共同研究で開発したナノ領域素子対応のデバイスシミュレータを本学のコンピュータ上に導入し，その動作環境を立ち上げた。このシミュレータは，電子輸送の量子効果を考慮した物理モデルである密度勾配モデルが組み込まれており，量子効果の電気特性への影響を解析・評価することができる。

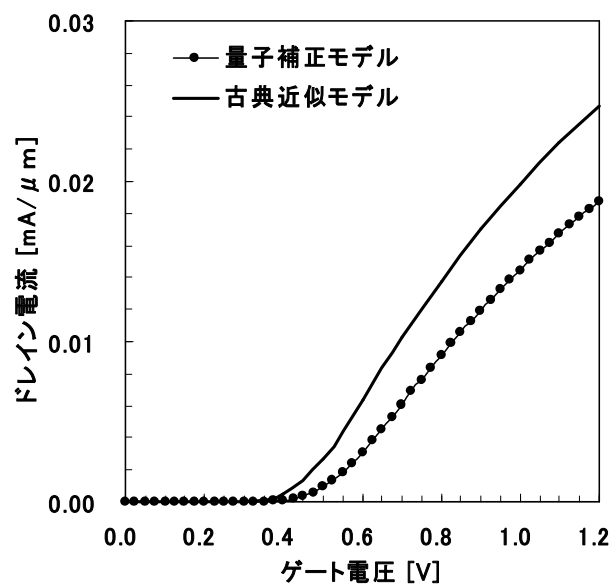


図4, デバイスシミュレーションによるゲート長 50nm のMOSFETの電気特性解析

図4に本デバイスシミュレータによる 50nmMOSFET の電気特性のシミュレーション結果を示す。量子効果によりドレイン電流の立ち上がりであるしきい値電圧が約 70mV シフトしていることが分かる。これらのデータをもとにナノ領域の素子設計を高精度に行うことが可能となる。

本デバイスシミュレータをゲート絶縁膜厚が 1.5nm のMOSFETに適応し，密度勾配モデルの評価を行った。反転層の電子密度分布のシミュレーション結果を図5に示す。本モデルの結果とシュレディンガー方程式をポアソン方程式とともにセルフコンシステントに解いた結果（厳密解）を比較している。本モデルのシミュレーション結果は厳密解とよく一致していることが分る。特に，電子密度のピークがゲート絶縁膜とシリコンの界面から 0.9nm の深さに位置しており，本モデルが反転層量子効果を高精度にシミュレーションしていることが分る。このとき，モデルパラメータは， $bn=1.92 \times 10^{-20}$ [Vm²]であった。この結果を次々世代MOSFETに適応した。図6に 45nmMOSFETの電気特性のシミュレーション結果を示す。本モデルの結果と量子効果を考慮していない従来モデルとを比較している。本モデルの飽和電流値($V_D=1.0V$)は 0.499mA であった。一方，従来モデルの飽和電流値は 0.716mA であり 43% 過大評価している。このずれは素子設計上無視することができない大きさであり，従来モデルによるナノ領域素子の設計は困難であることを示している。

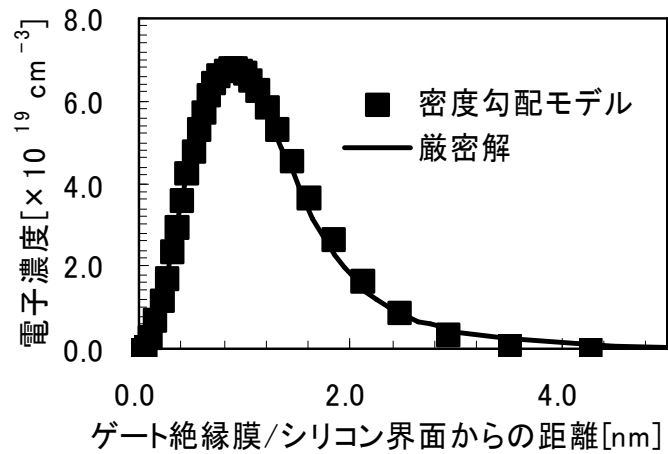


図5, 反転層の電子密度分布

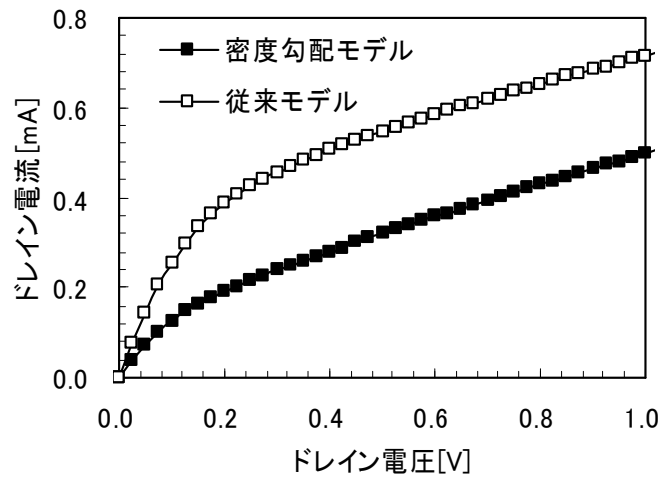


図6, 45nm MOSFET電気特性

(3)回路シミュレーション技術

光・電子融合回路の受光部は、受光素子と増幅回路から構成される。高速動作と低消費電力に対応するため、増幅回路は先端CMOSが使用される。本研究では、前項のシミュレーション結果をもとに、次々世代のCMOSを用いた受光部の入出力特性をシミュレーションした。図7に本モデルを用いた結果、図8に従来モデルを用いた結果を示す。動作温度を0から70℃に変化させている。従来モデルを

用いたシミュレーション結果は、動作温度を0から70℃に変化させても、きれいに信号が伝達されていることが分る。しかし、本モデルを用いた結果は、動作温度が上昇するに従って信号波形が歪んでいる。このことは、従来モデルを用いて回路設計を行うと、量子効果が考慮されていないため、動作マージンを大きく設定しなければならず、高精度な回路設計が困難であることを示している。

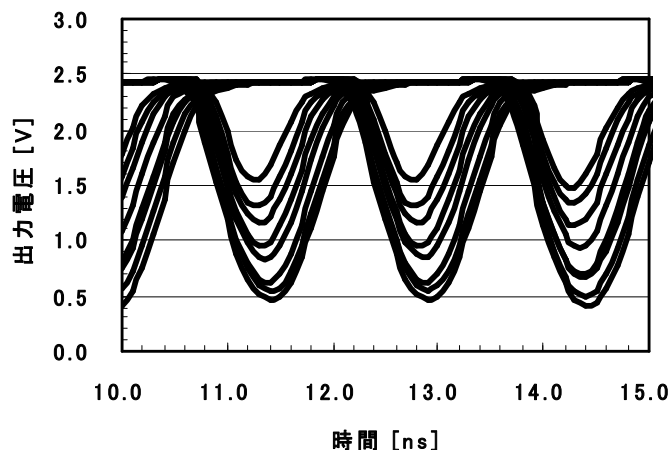


図7, 受光部の入出力特性, 本モデル

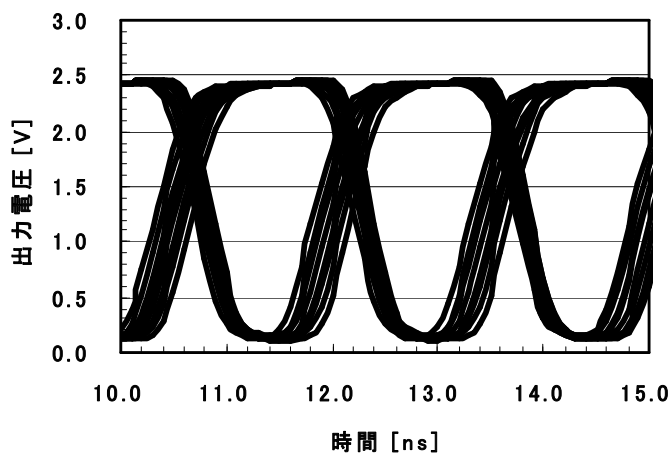


図8, 受光部の入出力特性, 従来モデル

(4) デバイス解析モデリング

回路設計において、MOSFET 解析モデルは、BSIM などの MOS 回路モデルに比較してモデルパラメータ数が少なくモデルパラメータの抽出が容易で、モデルの解析的な取扱いが簡便なため、回路動作の解析や回路特性の予測に良く用いられている。現在では、65 から 45nm 世代の L S I 開発が進められ、32nm 世代以細のデバイスの研究開発が行われている。回路設計や回路解析のためには、これらの領域のデバイスに対して、デバイス解析モデルを構築する必要がある。

本研究で新規に提案したデバイス解析モデルは、 α 乗則モデル[1]に加えてドレインコンダクタンスに

関するパラメータ λ にゲート電圧依存性を考慮したものである。

本モデルの精度を評価するために、本モデルにより計算した I_D - V_{DS} 特性をゲート長が 65nm 以下の MOSFET の実測値と比較した。ここで用いたテストデバイスは、ゲート長が 20nm、酸化膜厚が 1.3nm の SRAM Cell 用に開発された n チャネル MOSFET[2]、ゲート長が 45nm、酸化膜厚が 2.0nm の低コスト、低消費電力 CMOS のために開発された n チャネル MOSFET[3]、ゲート長が 65nm、酸化膜厚が 1.6nm の高周波 CMOS のために開発された n チャネル MOSFET[4]である。参考として、ゲート長が 250nm、酸化膜厚が 8.6nm の n チャネル MOSFET[1]も用いた。本モデルのパラメータは、LM法[5]を用いて抽出している。

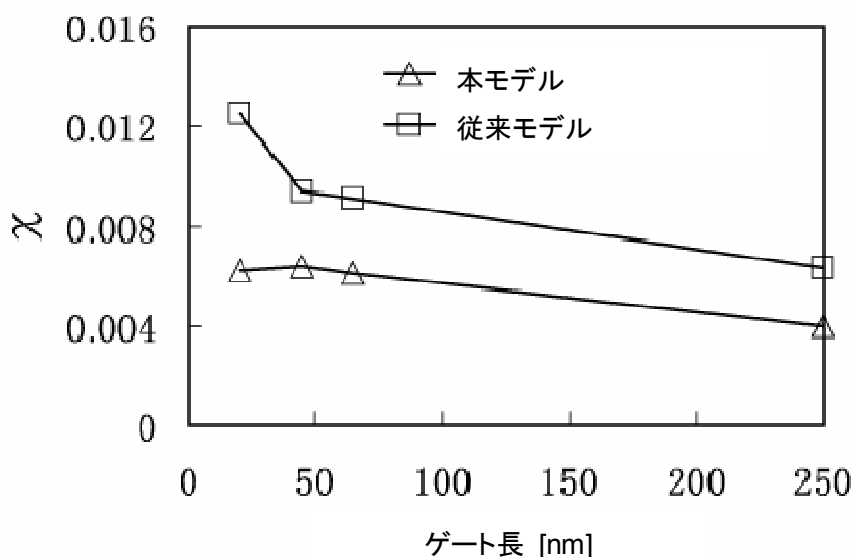


図9. 本モデルと実測との誤差 χ のゲート長依存性

本モデルと実測との誤差を図9に示す。比較のため、 α 乗則モデル（従来モデル）の誤差も示している。本モデルは、ゲート長が小さくなっても、実測値との誤差はあまり増大していない。特に、ゲート長が 20nm の MOSFET では誤差が 0.006 であり、増大が抑えられていることが分かる。一方、 α 乗則モデルは、ゲート長が小さくなるにしたがって、実測値との誤差が増大し、特に、20nm の MOSFET では、誤差が急激に増大している。以上から、本モデルは、ゲート長が 20nm の MOSFET まで、高精度に I_D - V_{DS} 特性をモデル化可能であることが分かる。

このことから、45nm 以下の MOSFET の電気特性を解析する場合、ドレインコンダクタンスのゲート電圧依存性を考慮することが重要であることが明らかになった。

【まとめと今後の課題】

本プロジェクトでは、ナノ領域光・電子融合集積回路設計支援のためのシミュレーション技術として以下の研究・開発を行った。

- 半導体デバイス物理モデリング技術として、シュレディンガー方程式とポアソン方程式をセルフコンシステントに解く反転層量子効果モデルを開発し、ナノ領域 MOSFET の実効ゲート容量を定量的に解析した。

- 半導体デバイス物理モデリング技術として、電子の散乱機構を量子力学的に計算する粒子モデルを開発し、ゲート長が 50nm の MOSFET の電子エネルギーを定量的に解析した。
- デバイスシミュレーション技術として、スタンフォード大学との共同研究で開発したナノ領域素子対応のデバイスシミュレータを本学のコンピュータ上に導入し、動作環境を構築した。
- 半導体デバイス物理モデリング技術で開発した反転層量子効果モデルを用いて、デバイスシミュレーション技術で開発した量子補正モデルのモデルパラメータを定量的に決定した。
- ゲート長が 50nm の MOSFET の電気特性を量子補正モデルでシミュレーションし、しきい値電圧が約 70mV シフトすることを定量的に示した。
- 回路シミュレーション技術として、デバイスシミュレーション技術の結果を基に、光・電子融合回路の受光部の入出力特性のシミュレーション技術を検討し、0 から 70°C の温度変化による出力特性の変化を解析した。その結果、量子効果によるしきい値シフトの効果を取り入れることが重要であることを示した。
- デバイス解析モデリング技術として、新規にゲート長が 20nm の MOSFET に対する、回路設計のための MOSFET 解析モデルを提案した。本モデルと実測を比較することにより、本モデルの精度を明らかにした。

今後は、光・電子融合集積回路を設計するための等価回路モデルを開発し、集積回路としての特性解析に応用する。また、各モデリング、シミュレーション技術の連携を強化し、より高精度なシミュレーション技術を研究開発する。さらに、このシミュレーション技術のユーザインターフェースを開発し、応用展開する。

【参考文献】

- [1] T. Sakurai, and A.R. Newton, "A simple MOSFET model for circuit analysis," IEEE Trans. Electron Devices, vol.38, no.4, pp.887-894, April 1991.
- [2] H.-Y. Chen, C.-Y. Chang, C.-C. Huang, T.-X. Chung, S.-D. Liu, J.-R. Hwang, Y.-H. Liu, Y.-J. Chou, H.-J. Wu, K.-C. Shu, C.-K. Huang, J.-W. You, J.-J. Shin, C.-K. Chen, C.-H. Lin, J.-W. Hsu, B.-C. Perng, P.-Y. Tsai, C.-C. Chen, J.-H. Shieh, H.-J. Tao, S.-C. Chen, T.-S. Gau, and F.-L. Yang, "Novel 20nm hybrid SOI/bulk CMOS technology with $0.183 \mu\text{m}^2$ 6T-SRAM cell by immersion lithography," 2005 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, pp.16-17, June 2005.
- [3] F. Arnaud, B. Travel, L. Pain, J. Todeschini, M. Jurdit, Y. Laplanche, F. Boeuf, F. Salvetti, D. Lenoble, J.P. Reynard, F. Wacquant, P. Morin, N. Emonet, D. Barge, M. Bidaud, D. Ceccarelli, P. Vannier, Y. Loquet, H. Leninger, F. Judong, C. Perrot, I. Guilmeau, R. Palla, A. Beverina, V. Dejonghe, M. Broekaart, V. Vachellerie, R.A. Bianchi, B. Borot, T. Devoivre, N. Bicaïs, M. Denais, K. Rochereau, R. Difrenza, N. Planes, H. Brut, L. Vishnobulta, D. Reber, P. Stolk and M. Woo, "Low cost 65nm CMOS platform for low power & general purpose applications," 2004 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, pp.10-11, June 2004.
- [4] C.H. Chen, C.S. Chang, C.P. Chao, J.F. Kuan, C.L. Chang, S.H. Wang, H.M. Hsu, W.Y. Lien, Y.C. Tsai, H.C. Lin, C.C. Wu, C.F. Huang, S.M. Chen, P.M. Tseng, C.W. Chen, C.C. Ku, T.Y. Lin, C.F. Chang, H.J. Lin, M.R. Tsai, S. Chen, C.F. Chen, M.Y. Wei, Y.J. Wang, J.C.H. Lin, W.M. Chen,

C.C. Chang, M.C. King, C.M. Huang, C.T. Lin, J.C. Guo, G.J. Chern, D.D. Tang and J.Y.C. Sun, "A 90nm CMOS MS/RF based foundry SoC technology comprising superb 185 GHz f_T ReMOS and versatile, high- q , passive components for cost/performance optimization," Technical Digest - International Electron Devices Meeting, pp.39-42, 2003.

- [5] H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, and W.T. Vetterling, Numerical Recipes in C[日本語版], 技術評論社, 東京, 1993.

有機半導体材料の設計とハイパフォーマンス光源

研究分担者 堀田 収
大学院 工学科学研究科
高分子機能工学部門 教授

重点領域研究推進プロジェクトの遂行に当たって、新規の有機半導体材料を設計し、そのハイパフォーマンス光源としての利用を研究した。この結果、超高彩度のフルカラー光源を構築する指針を確立した。ここでは、特に材料設計と設計指針に沿って得た種々の新奇材料に関してまとめる。

1. 緒言

近年、有機半導体材料の開発とデバイス化の研究が活発に行われ、実用化も間近の観がある。半導体材料の代表的かつ特徴的な性質は電気伝導性と発光特性である。それぞれの特長を生かして様々なデバイスが設計されることは無機半導体の場合に対応する。

本稿では、有機半導体の材料設計とハイパフォーマンス光源としての利用可能性について、過去および最近の研究動向に基づいて考察、検討する。

2. 有機半導体材料のいろいろ

有機半導体は、骨格に動きやすい π 電子をもった共役二重結合の存在に特徴付けられる材料である。一部、骨格に σ 電子をもつ化合物（ポリシラン等）もある。ここでは、主に前者の材料を扱う。有機半導体材料は、さらに低分子系のものと高分子系のものとに大別でき、中間的な分子量をもつものとしてオリゴマー系のものである。

低分子ないしはオリゴマー材料の一例として、天然に存在する芳香族炭化水素化合物がある。赤松ら¹⁾が世界に先駆けて臭素をドーブしたペリレン[図 1 (e)]が $\sim 1 \text{ S/cm}$ 程度の導電率を示すことを明らかにした（1954 年）のが、事実上の有機半導体研究の始まりである。高分子材料はポリアセチレンやポリチオフェンに代表され、白川ら²⁾のポリアセチレン薄膜の合成以来、導電性高分子として種々のものが提案・開発された。最近研究開発が活発に行われている高分子材料やオリゴマー材料の多くは、合成によるものである。有機半導体材料のいくつかを図 1（低分子・オリゴマー材料）および図 2（高分子材料）に掲げる。

有機半導体材料は、不純物をドーブすることによってキャリアを発生させることができ、高導電化する。不純物として電子受容体（アクセプター）および電子供与体（ドナー）をドーブして、それぞれ、**p** 型半導体および **n** 型半導体として働く。上述の臭素ドーブペリレンは、**p** 型半導体である。不純物の存在しない半導体は真性半導体であり、一般に導電性は低い。これらの名称は、無機半導体の場合に準じる。以上、分子量から見た区別および不純物の有無による性質の違いから見た区別を図 3 に示す。

図 1 において化合物 (a) ~ (h) はドーブによって **p** 型半導体になりやすく、(i) ~ (k) は **n** 型半導体³⁾ になりやすい。一般にドーブ状態にある有機半導体の化学的安定性は高くなく、特にデバイスに用いる場合は真性半導体として用いることが多いことを注意すべきである。

有機半導体に優れた伝導性や発光特性を付与するために材料の設計指針が重要になる。この材料設計指針は、有機材料の特徴である優れた加工性と両立するものであることが求められる。半導体特性は、分子を構成するユニットの化学種（モノマー）とその個数および配列に支配されるので、それらを最適

化することがポイントである。

分子中の、①モノマー種、②その個数および③配列の組み合わせは無限にあるとあってよく、それを如何に最適化するかは、かなりの程度試行錯誤や経験に頼る必要があるので、種々の発想に基づいた材料開発が不可欠である。例えば、図 1 の化合物 (g) は、元来、電子写真の材料として開発された。この開発の経緯からトリフェニルアミン骨格が良好なホール輸送材料として働くことが良く知られているので、このセグメントを他のモノマー種と組み合わせて化合物 (h) ⁴⁾ のような材料が開発された。これらの化合物は、電界発光 (Electroluminescence: EL) 材料として検討されている。EL 材料には透明性が要求されるので、化合物 (g) や (h) ではメチル基等を側鎖に導入して結晶化を防ぐことにより、この要求を満足させる。

ポリアセチレンやポリチオフェン (図 2) のような材料は、モノマー種だけで構造が決まるように思えるが、分子量分布や様々なコンフォメーションの存在まで考慮すると、それらを制御する材料設計指針の確立が必須である。図 2 (d) の化合物は F8T2⁵⁾ と略称される。この材料はピチオフェンとフルオレンとが分子内で複合化された構造をもち (コポリマー)、これに応じて優れたキャリア輸送特性と発光特性とを両立する。ポリチオフェン誘導体を例にとると、図 4 のような材料がこれまでに開発されている。トランスに配置した 2 つのチオフェン環からなる並進周期 (0.78 nm) を変えずにレジオレギュラータイプのもの ⁶⁾ (b) もしくは、PEDOT⁷⁾ と略称される化合物 (c) とすることができる。化合物 (b) は側鎖のヘキシル基によって可溶性が付与される。ヘキシル基の存在は一見、導電性にとっては阻害要因と思われるが、インターディジテーション (入れ子構造) による主鎖配列の向上によってむしろ導電性が向上することは注目すべきである。PEDOT はドープ状態が安定であり、様々な用途に供されている。

3. 有機半導体材料の分子設計と結晶構造設計

前節で有機半導体材料の設計指針の概略を述べた。ここでは近年筆者らが開発した新規の有機半導体材料を例にとり、分子設計による構造規制について、より具体的に説明する。新規材料は、チオフェンとフェニレン (ベンゼン) を構成要素とする一連のコオリゴマー材料であり、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー (TPCO) ⁸⁾ と名付けた。図 5 において、化合物群を (i) 末端フェニル置換オリゴチオフェン、(ii) 末端チェニル置換オリゴフェニレン、(iii) ブロックコオリゴマーおよび (iv) 交互コオリゴマーに大別してある。これらの材料は、分子長と構成要素の配列様式の違いによって様々な分子形状と結晶構造を系統的に生み出す ⁹⁾。

分子形状は図 5 に模式的に示すように直線、擬直線、ベント (ブーメラン)、ジグザグおよび飛行機翼形など、様々なバリエーションがある ⁸⁾。これに応じて結晶形態も独特のものが見られる ⁹⁾。BP1T の結晶 ^{9b)} では、分子軸が結晶底面 (*ab*-面) にほぼ直立し、分子軸と結晶底面の法線とのなす角度は 1.0° である。BP *n*T (*n* = 2~4) の対応する角度も、2.6° またはそれ以下と小さい ^{9a)}。これらは、直線分子からなる結晶における対応する角度 (~20°) ¹⁰⁾ と比べると極めて小さい。

オリゴマー材料の特徴は、分子サイズと形状を厳密に制御できるところにある。また、目的や要求に応じて結晶性の高い材料および低い材料 (アモルファス) に設計することも容易である。また、置換基による修飾は、異なった結晶形態を生み出すことにも注目すべきである。例えば、BP1T の分子両末端にメトキシ基を導入して斜方晶に属する結晶とし、分子軸の厳密な直立が実現できる ¹¹⁾。これらの結晶構造設計は、有機ハイパフォーマンス光源の開発にも密接に関係する (次節)。また、このような置換基の導入は、分子内の電子エネルギーの調節を通して有機半導体の機能に多様性を与えることにも寄与

する。

4. 有機ハイパフォーマンス光源

有機材料を光学材料と見たとき、大きな特徴の一つは発光色の多彩にある。有機材料は、人間の可視域波長（400～700 nm）の光を容易に発生させることが出来るので、特に応用上のメリットが高い。分子材料の発光色は、主に分子の HOMO（最高被占軌道）および LUMO（最低空軌道）のエネルギー準位差で決まる。一般に π 共役系の延長が大きいほどこのエネルギー差は小さくなり、発光は長波長シフトする。このことは、有機半導体において分子サイズを変えたり、適当な置換基を導入することで容易に達成され、可視域の全波長帯をカバー（フルカラー化）することも可能である。

前節で述べた TPCO はこの目的に打って付けの材料である。分子サイズに加えてチオフェンとフェニレンの分子内配列を変えて（図 5）、HOMO および LUMO 準位を随意に調節できるので、フルカラー化に特に適する。

ハイパフォーマンス光源としての要因の一つに色再現がある。これは、色度図¹²⁾と呼ばれる、 xy 平面に座標化した色領域のうち、ヨットの帆形の内部領域を（緑の部分も含めて）どの程度広くかつ忠実に表現できるかという問題である。特に、辺縁部は最も彩度の高い単色光（線スペクトル）に対応する。帆形の部分の左端と右端とは、それぞれ、380～410 nm（紫）および 700～780 nm（真紅）の波長の光に対応する。このため、それらの両端を含む全ての波長での線スペクトルをもつ光を発生させることができれば、最良の色再現が出来たことになる。帆形の内部の全ての色は、これらの線スペクトルをもつ光の混合で再現可能である。

このように見ると、有機半導体材料からどのような波長の線スペクトルが得られるかを調べるのが優先課題となる。筆者らは、これに関していろいろな TPCO 結晶をレーザー励起して発光スペクトルを克明に解析した。

筆者らは、P6T¹³⁾および BP1T¹⁴⁾単結晶に関して、前者では 689 nm、後者では 466 および 493 nm 付近に縦マルチモードに帰属されるレーザー発振の明瞭な線スペクトルを観察した。BP1T 結晶では、短波長側のモードの方がより大きい強度を示した。また、BP1T 結晶の長手の軸（ b 軸）に平行な偏光をもつレーザー光で励起したときの方が軸に垂直な偏光をもつレーザー光励起の場合よりも発光強度が大きい。半波高全幅値（FWHM）は、P6T および BP1T に対して、それぞれ 38 pm および～70 pm であった。モード間隔は、P6T および BP1T に対して、それぞれ 121 pm および～630 pm であった。

市川ら¹³⁾ および清水ら¹⁴⁾ は、それぞれ P6T および BP1T の単結晶における一組の平行結晶端面がファブリー・ペロー共振器として機能することを指摘している。現在のところ、単結晶の品質（特に平行結晶端面の品質）の良しあしや、単結晶におけるレーザー照射部位をわずかに変えることなどによって、レーザー発振が観測されないことがある。ただ、この場合でもレーザー発振に相当する波長域に、微細構造はないものの狭線化したスペクトルが観測される。これは、自然放射増幅光（Amplified Spontaneous Emission: ASE）に帰属され¹⁵⁾、FWHM は数 nm 程度である。

これらのレーザー光や ASE は色度図で辺縁部の右端および左端近くに対応する。P6T および BP1T という 2 種類の材料に限っただけでも、このように高彩度の発光が実現できたことの意義は大きい。TPCO では、これらの材料以外でも可視光域のいろいろな波長で ASE を示す材料が多く見出されているので¹⁵⁾、高彩度のマルチカラーを産み出すのに好適の材料系である。

TPCO 結晶における分子軸の直立配置は、遷移電気双極子モーメントを結晶底面（ ab 面）に直立させることに寄与する。この配置は、結晶端面からの誘導放射（レーズンングおよび ASE）に有利に働くと

いうことを意味する⁹⁾。

5. デバイス化と将来課題

以上、ハイパフォーマンス光源としての TPCO の優位性を解説した。次のステップは、これらの材料のデバイス化である。発光デバイスの形態としては、EL に用いられる 2 電極型のデバイスおよび電界効果トランジスタ (Field-Effect Transistor: FET) に代表される 3 電極型のものが挙げられる。著者らは、これまでに TPCO を用いて両タイプのデバイスを検討し、共に良好なデバイス特性を得た^{16,17)}。本稿では、発光トランジスタ (Light-Emitting Transistor : LET) について現状を整理し、将来を展望する。

LET のデバイス動作原理は、ソースおよびドレイン電極から極性の異なるキャリア (ホールと電子) を個別に注入してチャンネル部分でこれらを合体 (再結合) させるところに特徴がある。図 6 に、有機半導体結晶を用いたボトム・コンタクト型のデバイス構造を示す。

ベル研の Schön ら¹⁸⁾ による電流注入レーザーデバイスをはじめとする LET に関する発表データに対して疑惑が発生して以来、LET に関する研究は暫くの間、停滞していた。2003 年に、Hepp ら¹⁹⁾ はテトラセン[図 1 (c)]を用いて FET 構造上で電流注入による発光を観察し、この分野に新たな進展をもたらした。その後、Muccini ら²⁰⁾ は、p-型半導体としてクインケチオフェン[図 1(a)]、n-型半導体としてペリレンテトラカルボキシリックジイミド[図 1 (k)]のジトリデシル誘導体を用いて“p-n 接合”タイプの LET デバイスを作製した。彼らは、このデバイスにおいてゲート電圧を最適化してデバイス中での電子とホールとのバランスを調整し、発光デバイスとすることができるとしている。このデバイスは、キャリア注入バランスを最適化して発光デバイスおよび非発光デバイスの双方に作り分けることができる。

安達ら²¹⁾ は、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー (AC'5) 薄膜を用いて LET を作製した。デバイス形態は、Hepp ら¹⁹⁾ と同じくボトム・コンタクト型 FET である。ソース・ドレイン間の距離 (チャンネル長) が 9.8 μm のデバイスでは、(発光性を示さない) 通常の FET 特性が得られ、ドレイン電流は高いドレイン電圧領域で飽和する (ピンチオフ)。しかしながら、チャンネル長が 0.8 μm のデバイスではこのようなピンチオフは観測されず、ドレイン電圧の増加と共に、ドレイン電流が単調に増大し、AC'5 薄膜からの顕著な発光につながるとしている。キャリアの再結合領域はドレイン電極のごく近傍に限られ、短チャンネルデバイス (チャンネル長 : 0.8 μm) ではこの付近の電場が著しく増大してドレイン電極からの電子注入とキャリア再結合 (即ち発光) を促進するとしている。

これまでの有機発光デバイスの主流は 2 電極型の EL デバイスである。この場合も、発光は両極から注入されたホールと電子との再結合に基づく。このため、3 電極型の LET デバイスは、ゲート電極を備える点で一見して構造的な冗長さをもつように思える。ところが、LET デバイスの優位性は以下の点に存する。(i) 2 電極デバイスと異なり、FET における電荷の注入は原理的にゲート絶縁膜からなるキャパシタの充電によってなされるので、ショットキー障壁の形成に付きまとう電極材料に対する制約は大きな問題にならない。(ii) ゲート電極に印加する電圧に比例した量の電荷が注入されるので、電荷・電流密度を増大させるのに有利である。

有機半導体結晶の中に 10 cm^2/Vs を超える移動度を示すものがあり²²⁾、優れた電荷輸送性能と発光特性を組み合わせる電流注入型の有機レーザーを実現する試みは、有機光電子デバイスの性能を測るベンチマークとしても極めて挑戦的である。

6. まとめ

以上、有機半導体材料の設計とハイパフォーマンス光源としての利用について述べた。特に、TPCO材料をケーススタディとして高彩度フルカラー光源を構築する可能性を探った。この材料や他の有機半導体材料および関連の光電子デバイスは、来るべきプラスチックエレクトロニクスおよびフォトニクス時代を切り拓くための有力なツールを提供するものと信じる。

7. 参考文献

- (1) H. Akamatu, H. Inokuchi, and Y. Matsunaga, *Nature* **173**, 168 (1954).
- (2) T. Ito, H. Shirakawa and S. Ikeda, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.* **12**, 11 (1974).
- (3) (a) Y. Inoue, Y. Sakamoto, T. Suzuki, M. Kobayashi, Y. Gao, and S. Tokito, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 3663 (2005). (b) S. Ando, R. Murakami, J. Nishida, H. Tada, Y. Inoue, S. Tokito, and Y. Yamashita, *J. Am. Chem. Soc.* **127**, 14996 (2005).
- (4) Y. Shirota, *J. Mater. Chem.* **10**, 1 (2000).
- (5) H. Sirringhaus, R. J. Wilson, R. H. Friend, M. Inbasekaran, W. Wu, E. P. Woo, M. Grell, and D. D. C. Bradley, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 406 (2000).
- (6) R. D. McCullough and R. D. Lowe, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1992**, 70.
- (7) X. Crispin, S. Marciniak, W. Osikowicz, G. Zotti, A. W. Denier Van Der Gon, F. Louwet, M. Fahlman, L. Groenendaal, F. De Schryver, and W. R. Salaneck, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* **41**, 2561 (2003).
- (8) (a) S. Hotta, S. A. Lee, and T. Tamaki, *J. Heterocyclic Chem.* **37**, 25 (2000). (b) S. Hotta, H. Kimura, S. A. Lee, and T. Tamaki, *J. Heterocyclic Chem.* **37**, 281 (2000). (c) S. Hotta, *J. Heterocyclic Chem.* **38**, 923 (2001). (d) S. Hotta and T. Katagiri, *J. Heterocyclic Chem.* **40**, 845 (2003).
- (9) (a) S. Hotta, M. Goto, R. Azumi, M. Inoue, M. Ichikawa, and Y. Taniguchi, *Chem. Mater.* **16**, 237 (2004). (b) S. Hotta and M. Goto, *Adv. Mater.* **14**, 498 (2002).
- (10) S. Hotta and K. Waragai, *J. Mater. Chem.* **1**, 835 (1991).
- (11) S. Hotta, M. Goto, and R. Azumi, *Chem. Lett.* **36**, 270 (2007).
- (12) 金子隆芳, *色彩の科学*, 岩波新書, pp. 93–98 (1988).
- (13) M. Ichikawa, R. Hibino, M. Inoue, T. Haritani, S. Hotta, K. Araki, T. Koyama, and Y. Taniguchi, *Adv. Mater.* **17**, 2073 (2005).
- (14) K. Shimizu, Y. Mori, and S. Hotta, *J. Appl. Phys.* **99**, 063505 (2006).
- (15) (a) M. Nagawa, R. Hibino, S. Hotta, H. Yanagi, M. Ichikawa, T. Koyama, and Y. Taniguchi, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 544 (2002). (b) M. Ichikawa, R. Hibino, M. Inoue, T. Haritani, S. Hotta, T. Koyama, and Y. Taniguchi, *Adv. Mater.* **15**, 213 (2003).
- (16) M. Suzuki, M. Fukuyama, Y. Hori, and S. Hotta, *J. Appl. Phys.* **91**, 5706 (2002).
- (17) M. Ichikawa, H. Yanagi, Y. Shimizu, S. Hotta, N. Suganuma, T. Koyama, and Y. Taniguchi, *Adv. Mater.* **14**, 1272 (2002).
- (18) (a) J. H. Schön, A. Dodabalapur, Ch. Kloc, and B. Batlogg, *Science* **290**, 963 (2000). (b) J. H. Schön, Ch. Kloc, A. Dodabalapur, and B. Batlogg, *Science* **289**, 599 (2000). (c) J. H. Schön, Ch. Kloc, and B. Batlogg, *Nature* **406**, 702 (2000).
- (19) A. Hepp, H. Heil, W. Weise, M. Ahles, R. Schmechel, and H. von Seggern, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 157406

(2003).

(20) C. Rost, S. Karg, W. Riess, M. A. Loi, M. Murgia, and M. Muccini, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1613 (2004).

(21) T. Oyamada, H. Sasabe, C. Adachi, S. Okuyama, N. Shimoji, and K. Matsushige, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 093505 (2005).

(22) V. C. Sundar, J. Zaumseil, V. Podzorov, E. Menard, R. L. Willett, T. Someya, M. E. Gershenson, and J. A. Rogers, *Science* **303**, 1644 (2004).

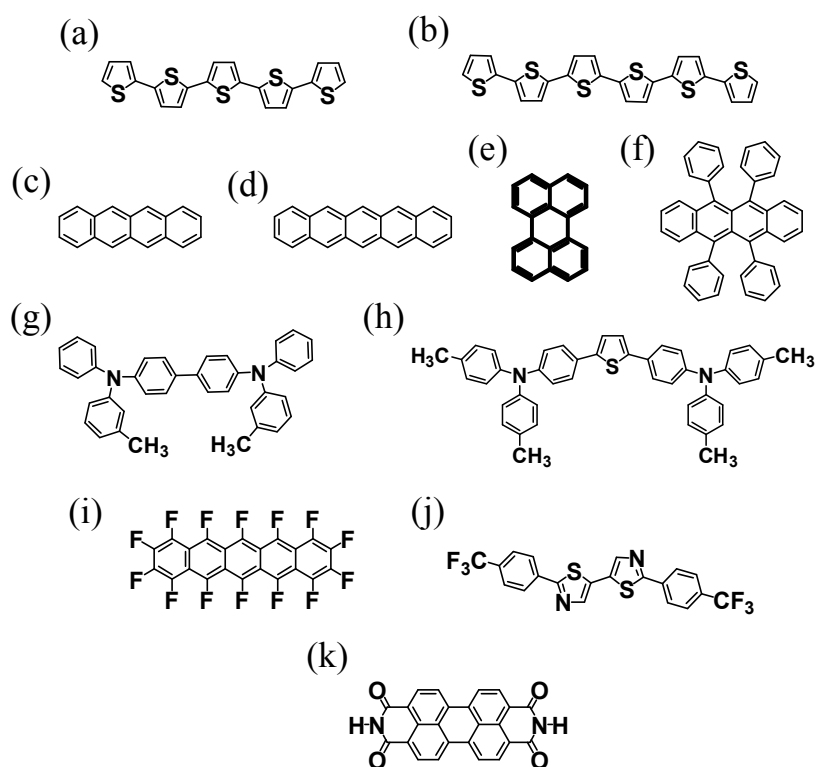


図 1 低分子およびオリゴマー系有機半導体材料のいろいろ。

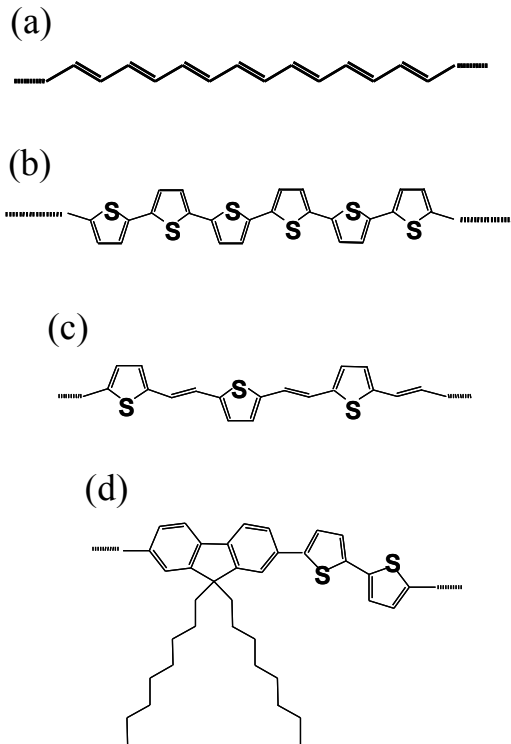


図2 高分子系有機半導体材料のいろいろ。

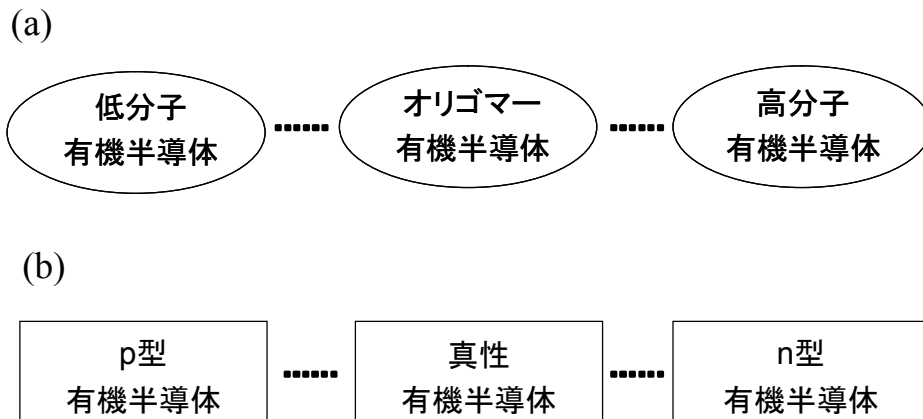


図3 分子量および不純物の有無による有機半導体の区別。

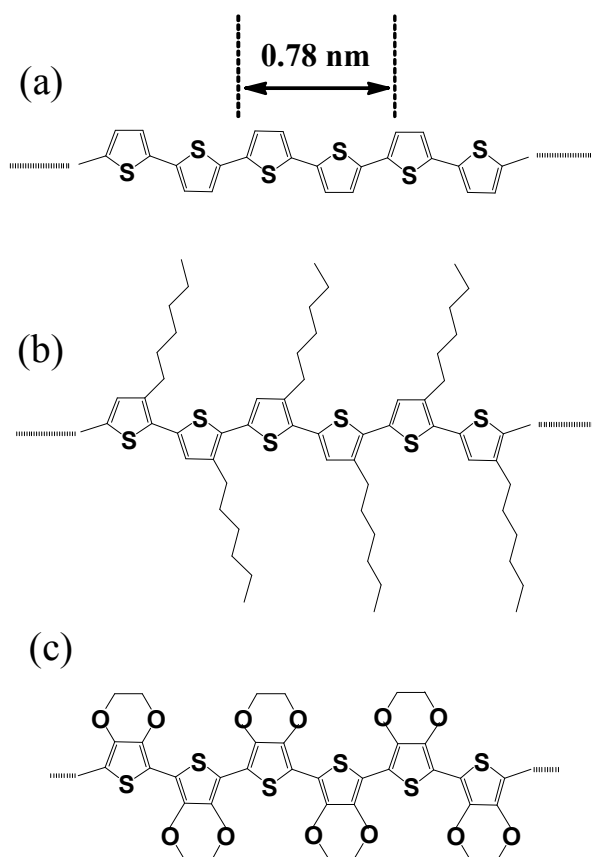


図4 いくつかのポリチオフェン誘導体。

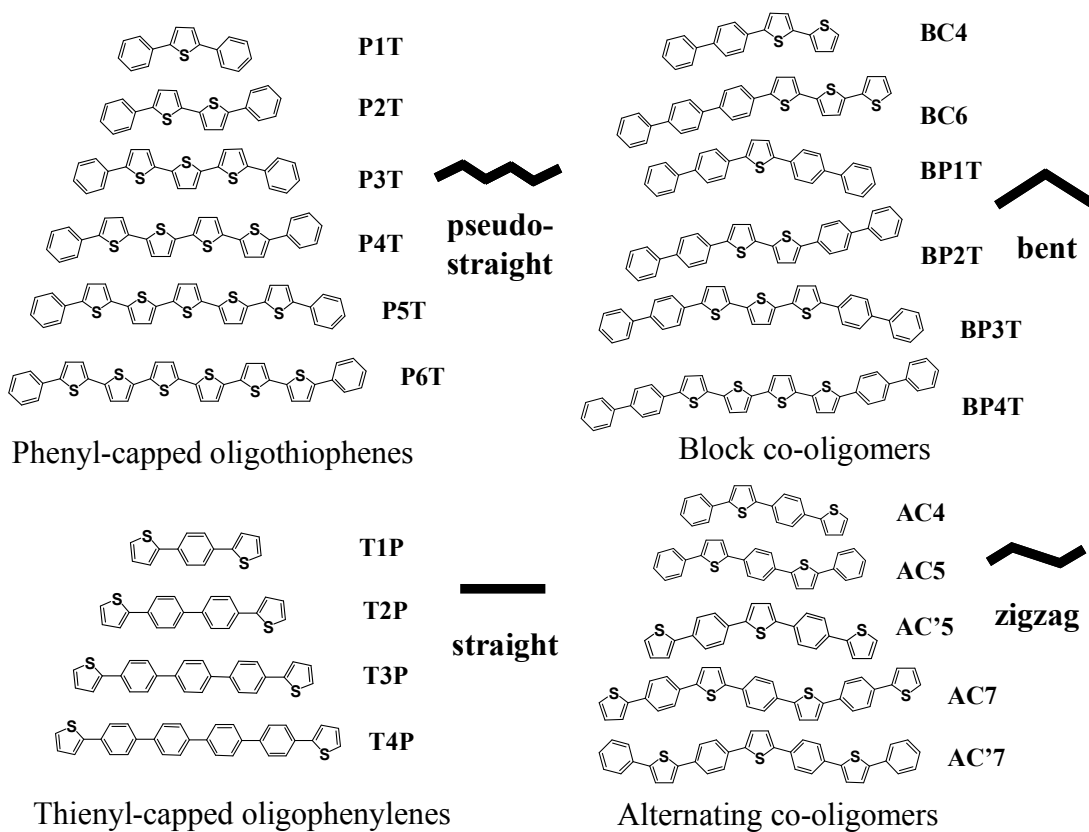


図5 いろいろな(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの分子構造と形状。

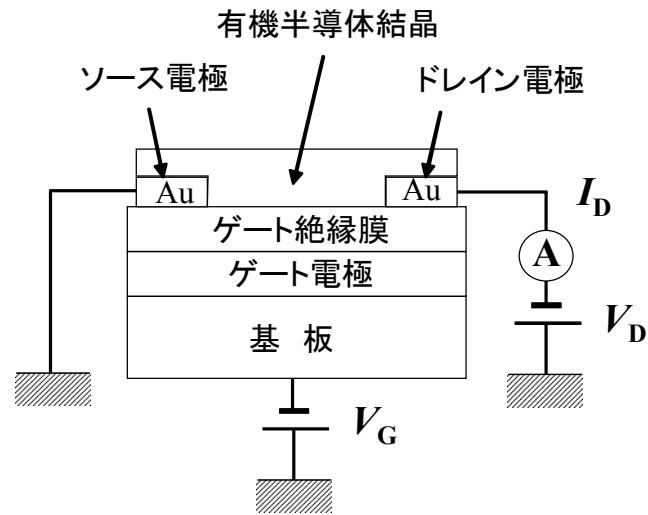


図 6 ボトム・コンタクト型有機結晶トランジスタの断面構造模式図。

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 μm 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

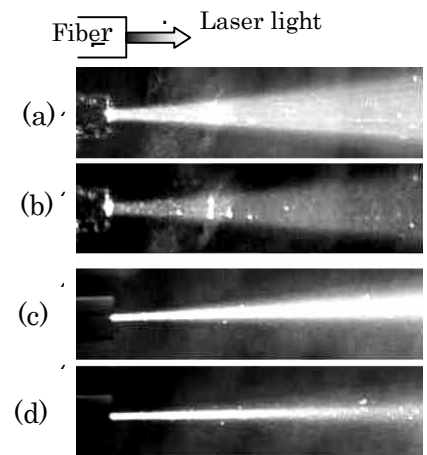


図1 多モードファイバからポリイミドへの Ar レーザ光出射の様子 (a)光増感剤なし・照射直後 (b)光増感剤なし・照射 5 分後 (c)PSPI への照射直後 (d) PSPI への照射 5 分後

{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

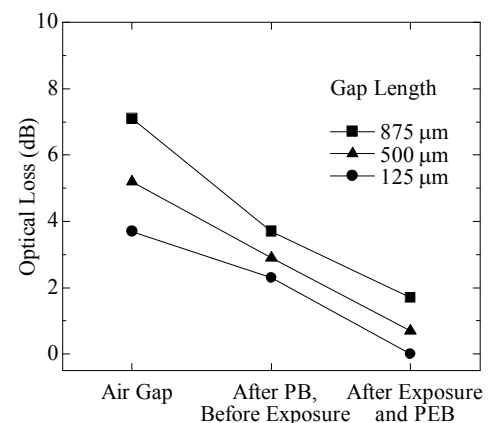


図2 2 本の多モードファイバ間のギャップ挿入損失

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]。

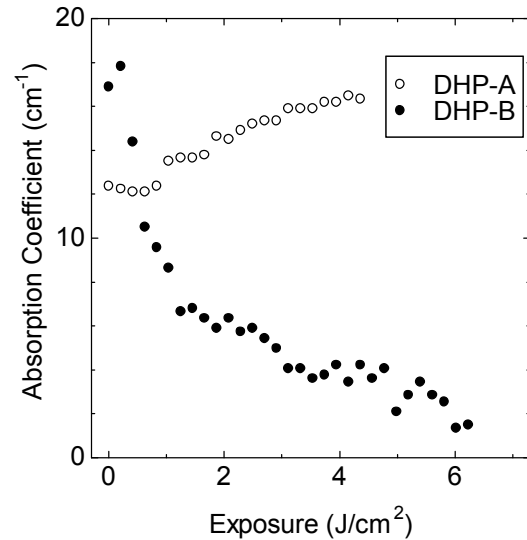


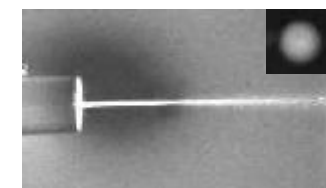
図3 PSPIの488 nm Arレーザ光照射に対する吸収係数の変化

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) $3 \mu\text{m}$ -SMF 未使用時



(b) $3 \mu\text{m}$ -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 488nm 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ことができた。

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 μm 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 μm であり、それらのパターン溝の深さはすべて 10 μm 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 μm 部にポンプ光 (波長 565 nm) を照射すると、導波路幅 100 μm 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

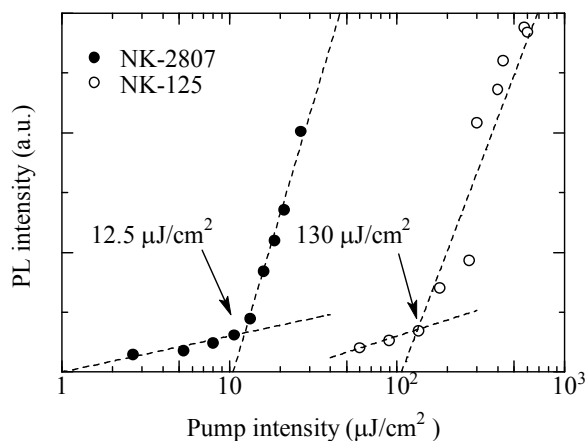


図 5. 発光強度の励起強度依存性 (薄膜サンプル, 色素ドープ濃度 1.0-wt%, 膜厚 1.4 μm , ポンプ光長 565 nm, 励起長 5 mm)

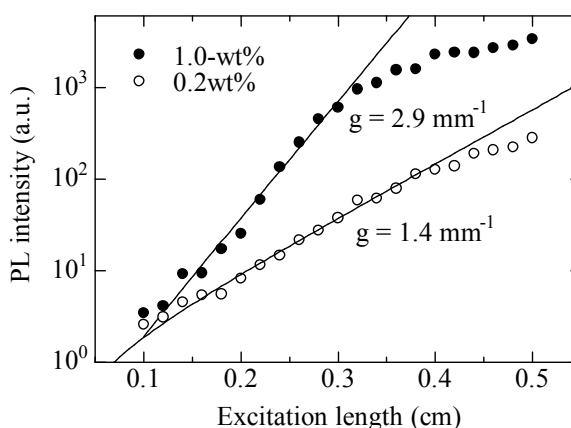


図 6. NK-2807 発光強度の励起長依存性 (薄膜サンプル, 色素ドープ濃度 1.0-wt%, 膜厚 1.4 μm , ポンプ光長 565 nm, ポンプ光強度 73.1 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$)

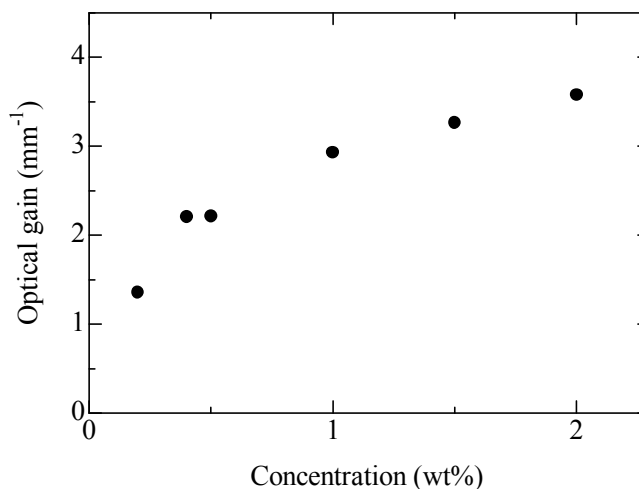


図 7. 利得の濃度依存性 (薄膜サンプル, 膜厚 1.4 μm , ポンプ光波長 565 nm, ポンプ光強度 73.1 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$)

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 mm^{-1} 、 1.4 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 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

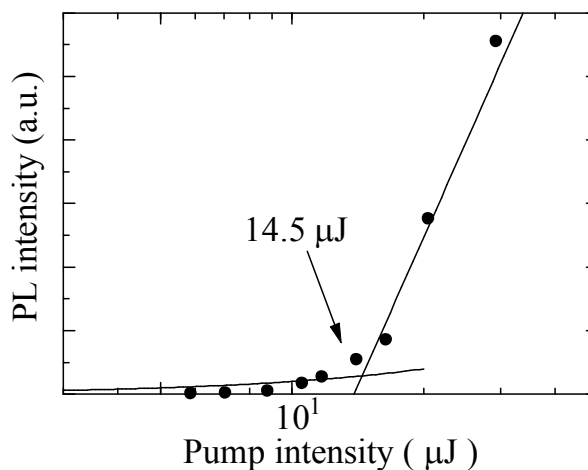


図 8 導波型ポンプによる ASE 閾値
(薄膜サンプル,色素ドーパ濃度 1.0-wt%,膜厚 4 μm)

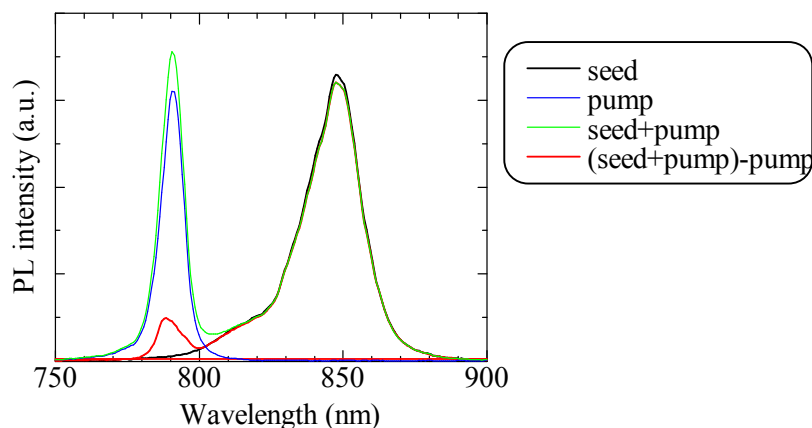


図 9:導波路入力光の光増幅

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 μm 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 μJ 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 μJ 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 μm 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 μm 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 μm 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)

導波路の光デバイスへの応用 -光・電子融合回路デバイスの回路モデル開発-

研究分担者 裏 升吾
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】

サブナノメートル以下の周期精度を有するグレーティングを用いた光・電子融合回路の実現へ向けて、デバイスの試作を通して、その作製技術の確立および設計アルゴリズムの開発を行うことを目的とする。

【研究内容】

(1) はじめに

情報通信技術を支える電子集積回路プロセッサの高性能化に限界が近づきつつある。電子集積回路は微細化技術により順調に性能が向上してきたが、今後はその延長線上での技術開発では対応が困難と予測されている。微細化技術にはまだ進展の余地はあるが、製造コストの急激な増大を招き、高速化による発熱の問題が表面化してきた。すなわち電子回路チップへの機能集積に限界がきており、次世代情報処理システムとしてトータル性能を向上させるためには、クロック周波数を制限し、チップを分散させるを得ない状況にあり、その際、チップ間配線の広帯域化が課題となる。しかしながら、電磁干渉ノイズや配線密度の点で現在のレイアウトの電気配線では対応が困難である。そこで、配線の短小化を狙った3次元集積化やアーキテクチャの最適化とともに、ボード内やモジュール内、チップ内の光配線が注目されている。

これらの基板内光配線の方式としては、自由空間（もしくは媒体）を伝送路とした結像光学系型と光配線ボードを基本とした導波路型とに大別されよう。結像光学系型を構成する方法は、基本的に2次元並列伝送が可能で伝送容量の点で優位であり、McGill 大、Vrije 大/Ghent 大、Hagen 大、IMT Mainz、UC San Diego、沖電気などから報告されている。送信側電子回路チップに近接して垂直共振器型面発光レーザ（VCSEL; Vertical Cavity Surface Emitting Laser）2次元アレイを実装し駆動回路で高速直接変調する。基板に垂直に出射された2次元並列光信号は、マイクロレンズアレイならびにミラーなどからなる結像光学系や回折レンズと導光板で形成される結像光学系などにより自由空間（媒質）を伝送され、受信側チップに近接して実装されたフォトダイオード（PD; Photodiode）2次元アレイに1対1で垂直入射され、PDおよびレシーバー回路で電気信号に変換される。この結像光学系型は、単なる信号伝送だけではなく、伝送路中に能動的な光路変換素子を挿入してスイッチングや並列演算などの機能を容易に実現するポテンシャルも併せ持つ。またチップ内の極短小距離にも比較的容易にレイアウト可能である。しかしながら、バルク光学系や厚い導光板を用いるためスペース的な問題や放熱対策等に課題が残る。

一方、配線板に光導波路を集積もしくは搭載する導波路型のボード内光配線に関しては、国内ではNTT、ASET、京セラ、松下電工、オムロン、住友ベークライト、日立、京都工繊大/(独)産総研など、国外ではIBM/Agilent、VTT-TRC Finland、Fraunhofer IZM、韓国情報通信大、Texas 大 Austin、Vrije 大/Ghent 大、Georgia 工大、米国富士通研、韓国 ETLI などの報告がある。導波路型光配線板を構成する上でのひとつの重要な課題は、伝搬方向が直交している入出力空間光と導波路内伝搬光（導波光）との結合である。導波路ディメンジョンが大きな多モード導波路や導光板を利用するほとんどの場合、微小光学素子

(光線光学での扱いが可能)である直角変換素子(45°ミラー)が利用され、実装トレランスは数 μm 〜数十 μm である。導波路型光配線板のもう一つの課題は伝送容量である。単一伝送路で2次元並列伝送を実現できる結像光学系型と異なり、1伝送路に1信号チャンネルである。そのため、伝送容量を確保する方策として、導波路の多階層化による2次元導波路アレイが検討されている。ただし、光配線板の厚さはそれだけ増すことになる。また、2次元並列信号の入出力結合方法が新たな課題となる。

光信号は搬送波(キャリア)の上に信号を載せて伝送する方式であるから、周波数(波長)が異なるキャリアには異なる信号を載せることができる。すなわち、同一の伝送路に複数の信号チャンネルを形成できる。これが波長(分割)多重であり、光ファイバ通信では広く普及している。チップ内光配線を検討しているIntelやRochester大は、電気配線を凌駕する可能性のある光配線の条件として、波長多重の導入とGlobal配線への応用を示唆している。多モード導波路や導光板を用いる導波路型光配線板に波長多重技術を用いようとすると、波長フィルタや波長合分波素子などの光学素子を新たに導入する必要があり、配線サイズや製造コストの点から整合性は高くない。一方、薄膜光導波路と集積光学素子を用いれば、波長分散を有する導波型素子をプレーナプロセスで集積可能となる。薄膜光導波路を用いる構成は、波面を扱うために実装トレランスが $\sim 1\mu\text{m}$ と厳しくなるが、ディメンジョンが小さく、またこのように波長多重技術の適用が比較的容易である。

(2)空間光アドドロップ素子を用いた波長多重薄膜光導波路配線

図1に示すように、薄膜光導波路を集積した光電気配線板に、電子回路チップを光-電気変換素子と共に表面実装する構成を基本とする。電気-光信号変換にはVCSEL 2次元アレイを、光-電気信号変換には面型PD 2次元アレイを用いる。薄膜導波路で2次元信号伝送を実現するため波長多重技術を利用する。例えば、導波路チャンネル幅を $150\mu\text{m}$ とし8波長多重とするとチップ10mm辺当たり500の信号チャンネルが形成でき、チャンネル当たり10Gbpsとしてチップ1辺当たり2.5Tbps(一方向当たり)の伝送が期待できる。

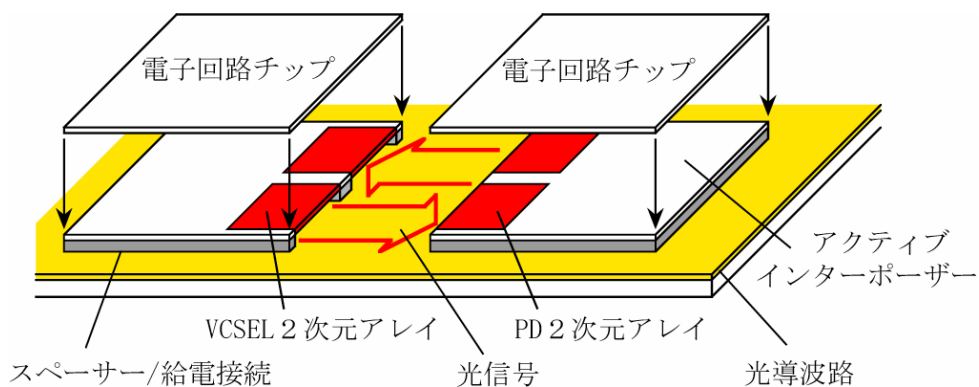


図1 薄膜光導波路を集積した光電気配線板の概念図

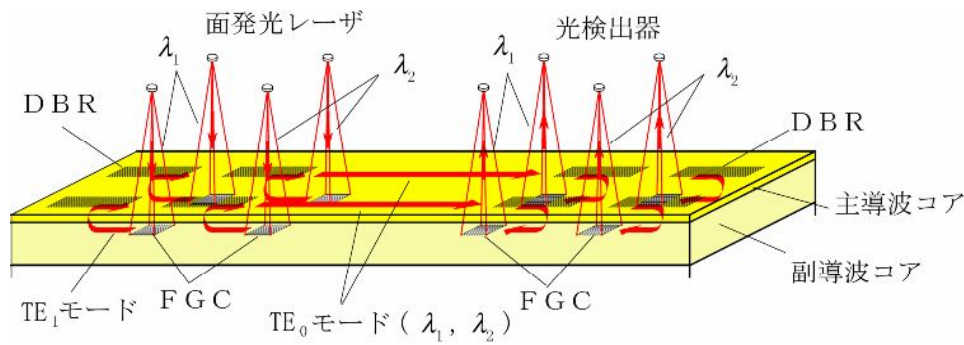


図2 波長多重光配線導波路の構成とアドドロップ機能

入出力に集光グレーティングカップラ (FGC; Focusing Grating Coupler) と分布ブラッグ反射器 (DBR; Distributed Bragg Reflector) を用いた空間光アドドロップ素子を集積した波長多重光配線導波路の構成とアドドロップ動作の様子を図2に示す。簡単のため2×2チャンネルのみを示している。送信側には VCSEL 2次元アレイを実装するが、送信方向に波長の異なるものを配列する。光配線基板には高反射膜上に主導波コア層と副導波コア層からなるガラス導波路が形成され、FGC と DBR で構成する空間光アドドロップ素子を集積する。VCSEL からの発散空間光は導波路面にほぼ垂直に入射し FGC により TE₁モード導波光に結合される。TE₁モード光は DBR により TE₀モード導波光に逆方向結合される。図3に導波路の断面構造および TE₀モード光、TE₁モード光の電界分布の例を示す。TE₀モード光は電界の大部分が主導波コア層に閉じこめられているが、TE₁モード光の電界は主導波コア層と副導波コア層に広がっている。FGC を TE₁モード光の電界が大きく TE₀モード光の電界が小さい副導波コア層の中央付近に作製することで、TE₁モード光は回折するが TE₀モード光をほとんど回折しない導波モード選択性を持たせている。また、DBR は主導波コアのトップに作製するが、導波モードの離散性と波長分散のため、強い波長選択性を示す。したがって、TE₁モード光を入出力モードとして利用し、TE₀モード光を伝送モードとして利用すれば、一对の FGC/DBR により空間光を波長多重 TE₀モード光にアド (加算) する空間光アド機能が得られる。受信側に伝送された波長多重 TE₀モード光 (伝送モード) は、DBR により所望の信号波長のみが TE₁モード光 (入出力モード) に逆方向結合され、FGC により対応する PD への収束空間光に回折される。すなわち、空間光ドロップ機能を得る。

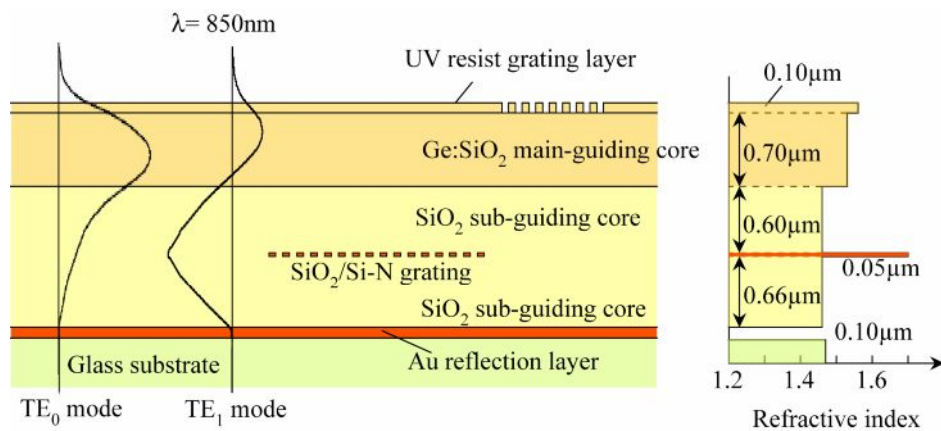


図3 導波路の断面構造および TE₀モード光、TE₁モード光の電界分布

(3) 干渉露光を用いた DBR の集積化

高密度波長多重を利用するため、結合特性は作製誤差に敏感である。例えば、実効屈折率が0.1%ずれ

ると結合波長は1nm ずれる。そこで、検討しているデバイスでは波長分波に使うDBRを最後に集積し、その周期を微調することで、それまでの作製誤差を補償する構成をとっている。したがって、DBRの作製には生産性ととも周期微調が求められる。電子ビーム描画は、周期を微調して作製する能力に優れる反面、生産性は良くない。また、ステッパー露光は、生産性に優れる反面、周期を微調して作製する能力は弱い。我々は、生産性に優れ、周期微調可能な干渉露光法の検討を行ってきた。図4に基本となる干渉露光光学系を示す。ロイドミラー干渉光学系を用いて、平面ミラーの角度を微調してレーザ光を下方に照射する。半分の光は直接マスクに角度 ϕ で入射する。また、残りの光は、もうひとつのミラーで反射され、角度 $\gamma = -\phi$ で入射する。2波の干渉により干渉縞が形成される。これまでは平面ミラーを用いていたので1回の露光につき同一周期のDBRの作製しかできなかった。今回は、異なる周期のDBRを一度に作製する露光システムを検討した。円柱ミラーを用いてチャープグレーティングを形成し、マスクでセグメント化して異周期DBRを一括露光する方法である。また、ポリゴンミラーを用いて角度 γ を面ごとに変化させ、異周期DBRを一括露光する方法もある。設計仕様として、8波長多重DBRを8mm以内のサイズに集積すること、結合効率80%以上、クロストーク雑音-10dB以下、 $\pm 3\%$ の実効屈折率誤差を補償可能な周期微調能力とした。円柱ミラー方式は干渉縞周期をチャープさせるので、反射特性の劣化が問題となる。一方、ポリゴンミラー方式では、ミラーをセグメント化しているので、以下の2点が問題となる。ひとつは、回折により干渉領域端で周期が乱れるので、その影響を考慮する必要がある。もうひとつは、周期を変化させる場合に、角度 δ を変化させて γ 及び ϕ を変えるが、 γ の変化に伴い干渉領域の位置も変化することである。以下、円柱ミラーを用いた場合のチャープDBRの結合特性および周期微調、素子作製と実験について述べる。

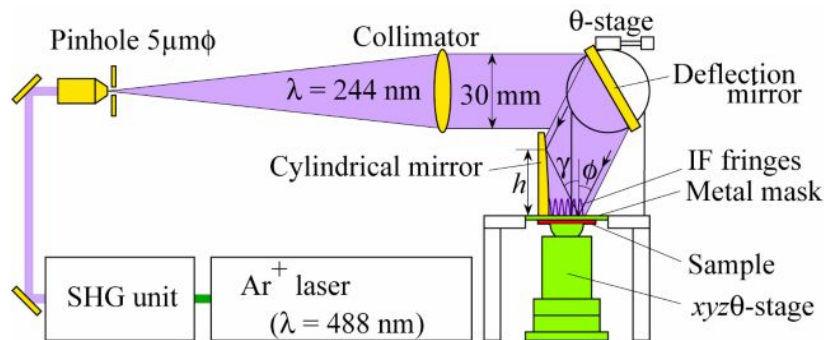


図4 異なる周期の周期構造を同時に作製する干渉露光装置の概要

円柱ミラーを用いて、グレーティング周期をチャープさせ、マスクを用いて分割して異周期DBRを集積する。結合中心波長を850nm 近辺とし、 SiO_2 系ガラス基板導波路を検討している。DBRは前進導波モードAと逆進導波モードBを結合する。干渉縞周期のチャープレート α を次式で定義する。

$$\frac{2\pi}{\Lambda(z)} = \frac{2\pi}{\Lambda(0)} + 2\alpha z \quad (1)$$

$\Lambda(z)$ は、位置 z での干渉縞周期である。チャープレート α を含むモード結合方程式は次のように表される。

$$\frac{dA(z)}{dz} = -j\kappa B(z)\exp\{-2j(\Delta - \alpha z)z\} \quad (2)$$

$$-\frac{dB(z)}{dz} = -j\kappa^* A(z)\exp\{2j(\Delta - \alpha z)z\} \quad (3)$$

$$2\Delta = (N_0 + N_1) \left(\frac{2\pi}{\lambda} - \frac{2\pi}{\lambda_c} \right) \quad (4)$$

$A(z)$ と $B(z)$ は、入力導波モード振幅及び反射導波モード振幅、 κ は結合係数、 Δ は $z=0$ の時の位相不整合量である。DBRのデバイスパラメータは、 α と κ と L の3つである。結合効率の波長依存性についての各パラメータの影響について述べる。 L が長いと結合効率は高いが、サイズが大きくなるので小型化の障害になる。逆に短いと、結合効率が低下する。チャープレート α を小さくとると、結合効率は上がるが、一方で異なる周期のDBR間の距離が長くなり、定められた範囲で一回の露光で集積できるDBRの数が減少する。結合係数 κ を大きくすると、結合効率が高くなる代わりに、クロストーク雑音が増す。グレーティング周期の位置依存性の計算例を図5に示す。縦軸がグレーティング周期、横軸はその位置を表している。上の長波長側のラインは $\Lambda(0)=288.9\text{nm}$ 、 $\alpha=21.0\text{mm}^{-2}$ で露光した場合のグレーティング周期と位置の関係で、4つの異周期DBRが集積される。点線部はマスクに隠れて露光されない部分である。短波長側のラインは $\Lambda(0)=284.3\text{nm}$ 、 $\alpha=21.0\text{mm}^{-2}$ で露光した場合のグレーティング周期と位置の関係である。 L は 0.6mm 、隣接するDBRとの距離を 0.9mm として2回の露光で 7.2mm 中に8つのDBRの作製が可能である。

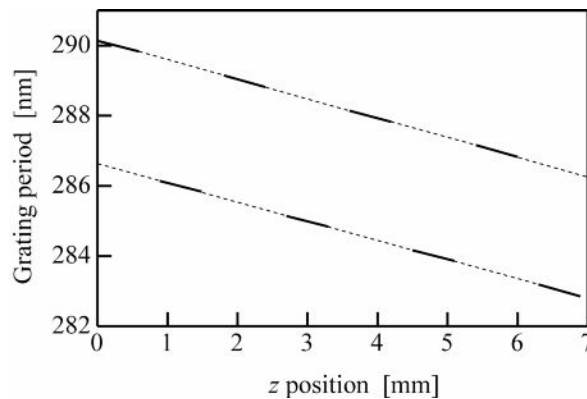


図5 グレーティング周期の位置依存性

$\alpha=21.0\text{mm}^{-2}$ 、 $\kappa=5.0\text{mm}^{-1}$ 、 $L=0.6\text{mm}$ としたとき、3つのDBRの結合効率の波長依存性を図6に示す。結合中心波長は、 845nm 、 848nm 、 851nm としている。これらは、 $N_0 + N_1=2.946$ とした場合の、図5の長波長側の4つのDBRに対応する。最大結合効率は90%以上、波長幅 1nm の領域で結合効率80%以上である。あるDBRに着目したとき、隣のDBRの結合波長の消光比は -10dB 以下である。これは隣接チャンネル間のクロストーク雑音となる。

波長 244nm のレーザー光を直径 30mm の平面波にコリメートした。円柱ミラーを用いることで、位置によって入射角 $\gamma(z)$ は変化する。干渉縞の周期 $\Lambda_{\text{ex}}(z)$ は次の式(5)で表される。

$$\Lambda_{\text{ex}}(z) = \frac{\lambda_{\text{ex}}}{\sin\phi + \sin\gamma} \quad (5)$$

円柱ミラーの曲率半径を R とすると、式(1)、式(5)からチャープレート α は次式で表される。

$$\alpha = \frac{\pi}{z} \left(\frac{1}{\Lambda(z)} - \frac{1}{\Lambda(0)} \right) \cong \frac{\pi}{h \tan\gamma} \frac{\sin\gamma - \sin\phi}{\lambda_{\text{ex}}} \cong \frac{\pi}{h \tan\phi} \frac{\sin 2\delta \cos\phi}{\lambda_{\text{ex}}} \cong \frac{2\pi \cos^2\phi}{\lambda_{\text{ex}} R \sin\phi} \quad (6)$$

$\alpha=21.0\text{mm}^{-2}$ となるように $R=2300\text{mm}$ とした。 $\lambda_{\text{ex}}=244\text{nm}$ 、 $\phi=24.98^\circ$ で、 $A(0)=A_{\text{ex}}(0)=288.9\text{nm}$ が得られる。 δ の回転精度は $2.5\times 10^{-4}\text{rad/div}$ であり、グレーティング周期換算では、 0.015nm/div である。

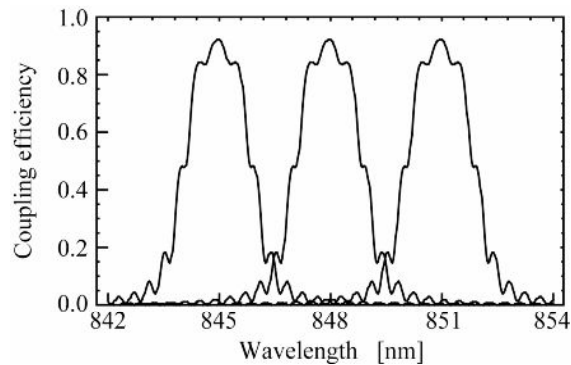


図6 分割チャープDBRの反射特性

4チャンネルの波長ドロップ素子を集積して、DBRの特性を評価した。ガラス基板上に真空熱蒸着でCr およびAu を連続して堆積した。プラズマCVD で $0.66\mu\text{m}$ 厚の SiO_2 第1 副導波コア層を堆積し、電子ビームレジストをスピコートした。FGC のグレーティングパターンを電子ビームで直接描画した。現像後、反応性イオンエッチングで SiO_2 副導波コア層を $0.05\mu\text{m}$ エッチングした。反応性DCスパッタリングで $0.05\mu\text{m}$ 厚のSi-N グレーティング層を堆積し、リフトオフした。プラズマCVD で $0.6\mu\text{m}$ 厚の SiO_2 第2 副導波コア層および $0.7\mu\text{m}$ 厚のGe- SiO_2 主導波コア層を連続的に堆積した。Ge- SiO_2 主導波コア層上に $0.14\mu\text{m}$ の厚さでKrFレジスト(KRFM151Y JSR社提供)を塗布した。その後、 0.6mm の開口長を持った 1.8mm ピッチのマスクを用いて干渉露光を行った。干渉縞ピーク位置のドーズ量は 240mJ/cm^2 とした。現像を行い、DBRを得た。

作製したDBRの結合効率を測定した。波長可変レーザからのビームをプリズムカップラによって、導波路内の TE_0 モードに結合した。 TE_0 モードは主導波コア層に閉じ込められて伝播し、FGCを透過し、該当するDBRによって TE_1 モードに逆方向結合する。 TE_1 モードは主導波コア層と副導波コア層に界を持ち、副導波コア層中に設けられたFGCにより回折され、外部に取り出される。例えば、波長 λ_4 の TE_0 モードは波長 $\lambda_1\sim\lambda_3$ 用の3個のDBRおよび4個のFGCを通過し、対応する結合波長 λ_4 のDBRにより TE_1 モードに反射されたのち、FGCによって空間光に出力結合され検出される。4つのDBRからのそれぞれの反射光をFGCにより取り出した出力光の波長依存性を図7に示す。測定した結合効率のピーク波長は、 841.2nm 、 844.5nm 、 848.1nm 、 851.1nm であった。設計結合波長は 842nm 、 845nm 、 848nm 、 851nm である。波長間隔は、設計値 3.0nm に対して 3.3nm であった。この違いの原因は、導波モード実効屈折率の面内分布であると考えている。ピーク値の不均一の原因は、露光の不均一によるDBRの結合係数に差があったためと考えている。

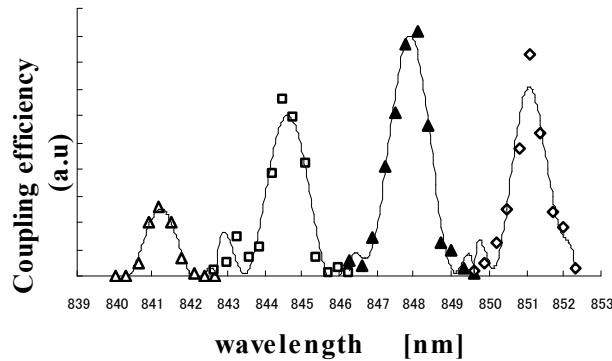


図7 集積したDBRの反射特性

(4) 2波長多重ギガビット/秒信号伝送実験

2波長多重信号伝送実験を行うにあたり、低損失な光配線を作製および2本のPMFを高精度で位置合わせするファイバナノアライナの開発を行った。作製した光配線の挿入損失は17dB、クロストークノイズは-11dBであった。また開発したファイバナノアライナの微動ステップは30nmである。ここでは、これらを用いた1.0ギガビット/秒2波長多重信号伝送実験について報告する。

光導波路は主導波コア層に $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$ (屈折率 $n=1.54$)、副導波コア層に SiO_2 ($n=1.46$)、反射膜に Au ($n=0.2-i5.5$)を用いる。主導波コア層上の電子ビーム(EB)レジスト($n=1.55$)層には、DBRを形成する。FGCは Si-N ($n=2.01$)を副導波コア層のほぼ中央に埋め込んで形成される。 TE_0 モードは主導波コア層とEBレジスト層を導波コアとして、 TE_1 モードは主導波コア層と副導波コア層およびEBレジスト層を導波コアとして伝搬する。主導波コア層は導波光が単一モードとなるように膜厚を $0.7\mu\text{m}$ とし、副導波コア層は金属反射膜による吸収損失を低減するバッファ層として機能させる為、その膜厚を $1.31\mu\text{m}$ とした。 TE_0 モードと TE_1 モードの導波損失はそれぞれ 0.1dB/cm 、 15dB/cm と見積もられた。

TE_0 モードの電界分布が小さく、 TE_1 モードの電界分布が大きくなる位置にFGCを設け、FGCの結合効率に大きな違いを持たせてある。またFGCはVCSELからの発散球面波及びPDへの収束球面波と導波路を伝搬する平面波を結合する為、グレーティングパターンに曲率と周期変化を持たせてある。FGCの開口サイズは $100\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$ 、焦点距離は 0.7mm とした。DBRは TE_0 モードと TE_1 モードを逆方向結合する素子である。DBRは波長選択性を持つ反射器であり、結合係数と結合長を大きくとることで結合波長において高い結合効率を得ることが出来る。結合長を $300\mu\text{m}$ 、溝深さを $0.1\mu\text{m}$ とした場合、 TE_0 モードと TE_1 モードの結合係数として 12mm^{-1} 、結合波長での結合効率として99%以上と見積もられた。また、結合効率の半値全幅は 2nm である。

光導波路はプレーナプロセスにて作製される。真空熱蒸着法で Au/Cr をコーティングしたガラス基板の上に、プラズマCVDを用いて SiO_2 を $0.71\mu\text{m}$ 堆積させた。ポジ型のEBレジストをスピコートし、FGCのグレーティングパターンをEB描画した。反応性イオンエッチングにより SiO_2 層に $0.05\mu\text{m}$ 溝深さのFGCパターンを形成した後に、DCスパッタリングで Si-N を $0.05\mu\text{m}$ 堆積させた。リフトオフ法により、不要なレジストや Si-N を除去することで Si-N のFGCを形成した。更にプラズマCVDで SiO_2 を $0.6\mu\text{m}$ 、 $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$ を $0.7\mu\text{m}$ 堆積させた。最上部にEBレジストを $0.1\mu\text{m}$ 厚でスピコートし、DBRのグレーティングパターンをEB描画で直接描画した。今回、波長 λ_1 と波長 λ_2 に対応するDBRの周期はそれぞれ 289.4nm 、 291.1nm 、導波距離は 15mm とし、チャンネル間距離は2本のファイバが干渉しないように 4mm とした。FGCの開口サイズは $100\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$ 、DBRの結合長は $300\mu\text{m}$ とした。光源としてVCSELの代わ

りに波長可変半導体レーザ (LD) を使用し、偏波保持ファイバ(PMF)に結合させ、その出射端を FGC の焦点位置に合わせ入射させた。光導波路を伝搬した出射光はグレーデッドインデックス型マルチモードファイバ(GI-MMF)に結合させ、接続されたPDにてその光強度を測定した。波長可変LDの波長を変化させ、挿入損失を測定した。得られた挿入損失波長依存性の結果を図8に示す。

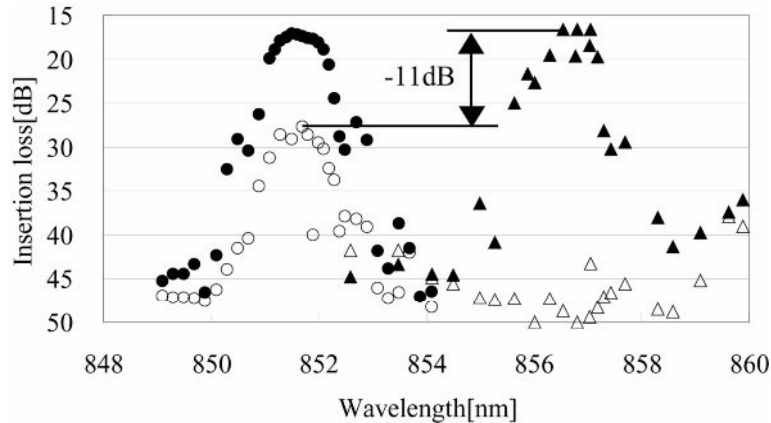


図8 挿入損失の波長依存性

▲はチャンネル1の信号光、○はチャンネル1の信号光に対するクロストークノイズに相当する。同じく●はチャンネル2の信号光、△はチャンネル2の信号光に対するクロストークノイズである。チャンネル1では波長857nm、チャンネル2では波長852nmで挿入損失は最小値となり、それぞれ17dBであった。理論値6dBとの過剰損失はGMS-FGCの結合効率が低いことが原因と考えている。

信号伝送実験の光学系概略図を図9に示す。光源は2つの波長可変半導体レーザ(LD)を用い、それぞれのレーザ光をPMFに結合させた。パルスパターンジェネレータ(PPG)からの1.0ギガビット/秒の擬似乱数ビット列(PRBS)非ゼロ復帰(NRZ)信号で光強度変調器を駆動し、レーザ光強度を変調した。

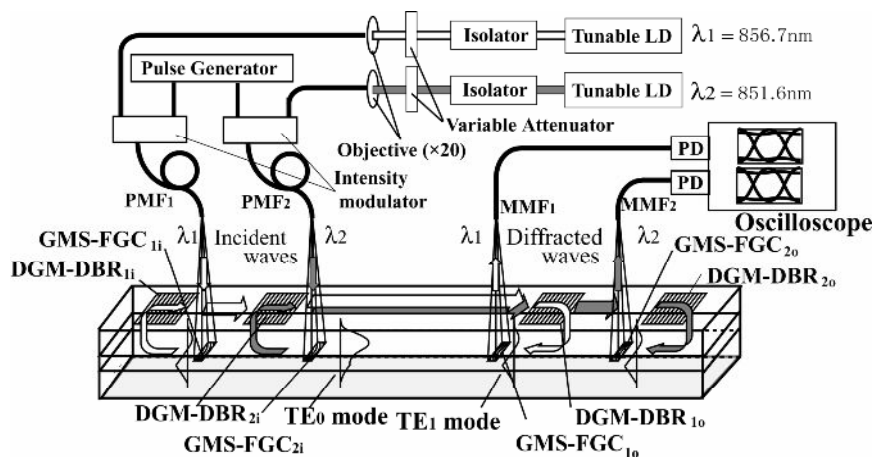


図9 信号伝送実験の光学系概略図

2本のPMFは今回開発したファイバナノアライナ(コニカミノルタオプト社製)により位置合わせを行った。このツールはアライナベースに3軸ナノアクチュエータを搭載し、ベースを超精密ステージで微動する構造であり、2本のファイバ間隔の相対位置を範囲4mm、ステップ幅30nmで位置合わせが可能である。図10に作製した光配線基板と4本の入出力用ファイバを含む実験系の写真を示す。右側のPMF

はアライナベース部に固定されており超精密微動ステージで調整を行い、左側の PMF は 3 軸ナノアクチュエータを用いて調整を行う。PMF 出力光パワーは約 1.0mW とした。光導波路配線を伝搬した光信号は、GI-MMF に結合させ、その波形をオシロスコープにて観測した。PPG の出力信号、光導波路配線への入力光信号(PMF 出力)と光導波路配線からの出力光信号(GI-MMF 出力)を図 11 に示す。両信号チャンネルにおいて、光配線からの出力波形にはノイズは増加しているものの、目立った波形の歪みもなく、良好なアイを確認することが出来た。また、単一チャンネルで信号伝送させた場合の光信号波形との差異は見られず、クロストークノイズの影響も観測されなかった。

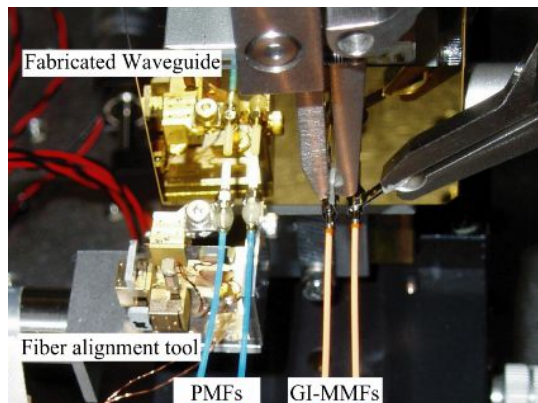


図 10 作製した光配線基板を含む実験系の写真

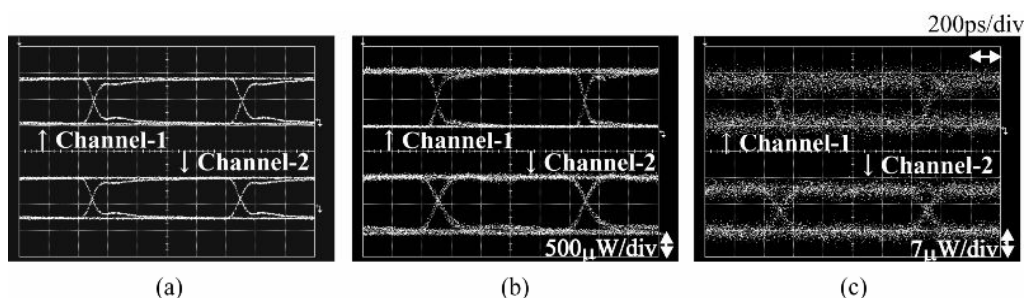


図 11 1.0 ギガビット/秒 PRBS-NRZ 信号のアイパターン;
(a)PPG 出力, (b)PMF 出力, (c)GI-MMF 出力

【今後の展開と見通し】

薄膜導波路に FGC を集積する構成は、チャンネル構造を必要としない、信号チャンネルを自由に交差可能である、VCSEL への光帰還が無視できる、などの長所を有する。他方で、回折拡がりのため伝送距離とチャンネル幅は比例しチャンネル密度が制限される、FGC の波長分散のため挿入損失は VCSEL 波長変動に敏感である、などの短所も有する。そこで、より高密度配線を目指し、これらの長短を入れ替えたチャンネル構造光配線回路も並行して検討している。いずれにしても、必要仕様の受発光素子の開発、高精度実装技術の開発、LSI との集積実装など、実用化までにはまだ多くの解決すべき課題が残っている。

光デバイス用新規半導体・絶縁体材料の創成

研究分担者 吉本昌広

地域共同研究センター・教授

本研究グループは、半導体を中心とする光・電子材料を創製し、新機能光デバイスに応用することを目指している。具体的には「ビスマス含有Ⅲ-V族半導体混晶の創製」と「窒化シリコン絶縁膜の新規堆積法の開発とデバイスへの応用」の2テーマを進めた。

1. ビスマス含有Ⅲ-V族半導体混晶の創製

1-1. はじめに—新型通信用レーザの必要性

光通信網の通信容量を飛躍的に増大させ、光通信網のフレキシブルな管理を可能とする方法として、波長分割多重(wavelength division multiplexing: WDM)通信方式がある。WDMはすでに、大陸間や基地局間の光通信に用いられており、現在のインターネットを支えている重要な技術である。

WDM通信方式では、光ファイバーに波長の異なる複数のレーザ光を通すことで、通信容量を大きくしており、混信を防ぐためにレーザ光の波長の安定化が不可欠である。例えば、高密度(Dense)WDMと呼ばれる方式では、レーザ光の波長間隔が0.4あるいは0.8nmに設定されているのに対して、そこで用いられる分布帰還形半導体レーザの発振波長は、温度が1°C変化すると0.1nm変化する。このため、現在のWDM通信方式では半導体レーザをペルチェ冷却素子上に搭載し、この素子に常に電流を流して温度を一定に制御している。

WDM通信方式を、一般家庭や小規模事業者等の加入者端末に使用できれば、現在のADSLや光接続をはるかにしのぐ大容量通信が可能になる。一方で、一般家庭のパソコンの光通信用モデムにペルチェ冷却素子などの温度制御装置を装備することは、価格や消費電力、占有スペースの点で問題となる。WDM通信方式を加入者端末まで広げるには、温度変化に対して発振波長が変動しない半導体レーザの開発が必要である。

1-2. 本研究の目的—新型レーザ用材料の創製

通常、半導体の禁制帯幅は温度上昇により減少する負の温度依存性を示す。これに対して、目的とする半導体レーザの実現には、レーザ構造に合わせて、禁制帯幅が負の小さい温度依存性(具体的には通常の1/2程度の変化率)、あるいは、やや正の温度依存性を示す新規な半導体材料が必要となる。本研究では、このような特長を有する半導体・半金属混晶を創製し、それをレーザに応用することで発信波長が温度無依存のレーザを実現することを目的としている。

1-3. Biを含むⅢ-V族半導体

禁制帯幅の温度依存性が零となるものとして半導体・半金属混晶 $\text{Hg}_{0.4}\text{Cd}_{0.6}\text{Te}$ や $\text{Hg}_{0.4}\text{Cd}_{0.6}\text{Se}$ がある。禁制帯幅が正の温度依存性をもつ半金属 HgTe や HgSe と、負の温度依存性をもつ半導体 CdTe や CdSe とで混晶を形成することで、温度依存性が零になると考えられている。

通信用レーザ用材料として現在用いられている InGaAsP と同じⅢ-V族半導体では、 GaAs と半金属 GaBi の混晶である $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ が、禁制帯幅を温度無依存化する材料として期待される[1]。有機金属気相エピタキシャル(MOVPE)法を用いた $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ の結晶成長が、本学の尾江による先駆的な研究で実現されている[2]。Biをわずか2.6%含有するだけで、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ の禁制帯幅の温度依存性が GaAs の1/3となる[3]。また、筆者らは分子線エピタキシャル(MBE)法を用いて $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ を結晶成長し[4]、その禁制帯幅が同じく温度無依存化することを明

らかにしている。

1-4. 半導体・半金属混晶GaNAsBiの創製

ビスマス含有III-V族半導体を半導体レーザに応用するためには、禁制帯幅を光通信の波長帯(1.3 μm または1.55 μm)に適合させるとともに、格子定数をGaAs等の一般的な基板材料に整合させる必要がある。筆者らは、GaAsの格子定数に適合させるために、GaAs_{1-x}Bi_xに少量の窒素原子を添加したGa_{N_y}As_{1-x-y}Bi_xを創製した[5]。図1にGa_{N_y}As_{1-x-y}Bi_xの組成と禁制帯幅の関係(計算値)を示す[6]。図では組成の表記がGa(N_yBi_{1-y})_xAs_{1-x}となっている。この図から、Ga_{N_{0.026}}As_{0.923}Bi_{0.051}の禁制帯幅が光の波長1550nmに対応すると予想される。混晶中にNとBiがたかだか5%程度含まれることで、通信波長帯のレーザに適した材料となる。

Ga_{N_y}As_{1-x-y}Bi_xはMBE法によりGaAs(001)基板上に結晶成長した。GaAs結晶中に原子半径の大きいBiを導入するために、基板温度を400°C以下の低温にして非平衡度を高めている。Ga_{N_y}As_{1-x-y}Bi_x成長層はPendellosung干渉パターンを有するX線回折パターンを示す(図2)[7]。成長層とGaAs基板の界面および成長層の表面が平坦な結晶成長ができています。

所期の格子定数と禁制帯幅を得るためには、NおよびBiの組成制御が不可欠であり、このために組成の決定が重要である。Biの原子番号が大きいので、ラザフォード後方散乱(RBS)法によりBi組成の絶対定量ができる。一方、Nは軽元素でありRBS法で検出が難しく、また、オージェ電子分光法やX線光電子分光法で数%程度のN組成を精度よく決定するのは困難である。本研究では、二次イオン質量分析(SIMS)を用いてN組成を決定している。図3にGa_{N_y}As_{1-x-y}Bi_x成長層のRBSスペクトルを示す[7]。Biの信号がGaとAsが重畳した信号から明瞭に分離して観測される。Biの信号強度は深さ方向にほぼ一定であり、偏析せず深さ方向に一様に取り込まれている。RBSチャネリング測定の結果から、Biは閃亜鉛鉱構造の格子位置にあることを確認している。

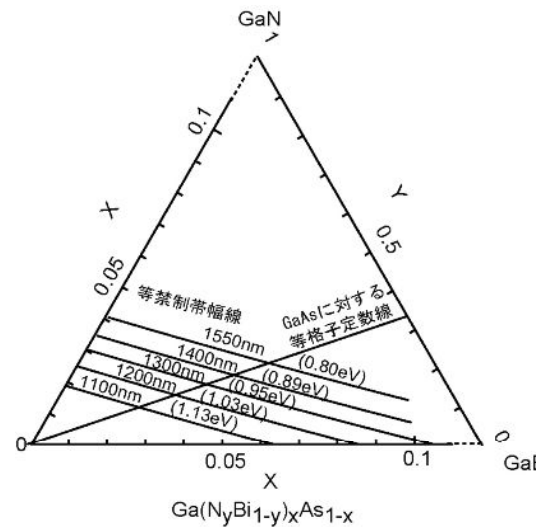


図1. Ga(N_yBi_{1-y})_xAs_{1-x}の組成と禁制帯幅の関係

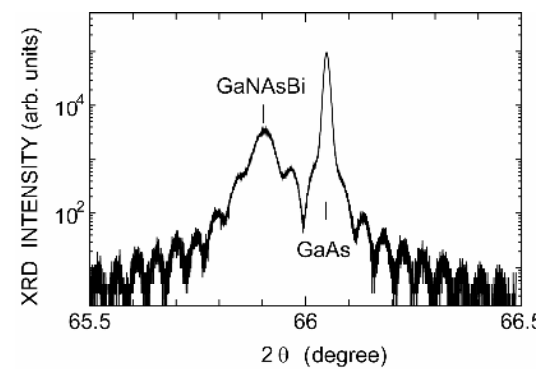


図2. GaN_yAs_{1-y}Bi_x成長層のX線回折パターン

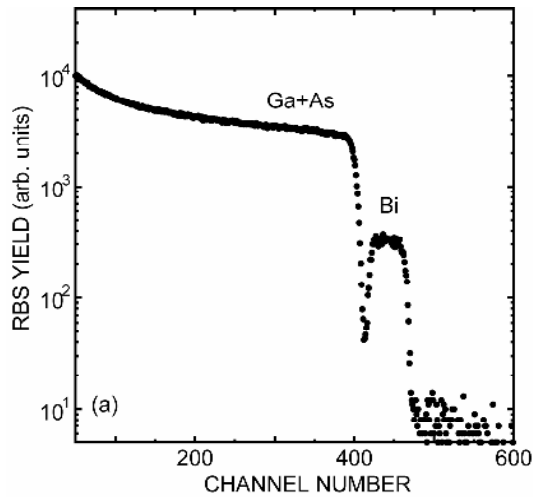


図3. GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層のラザフォード後方散乱スペクトル

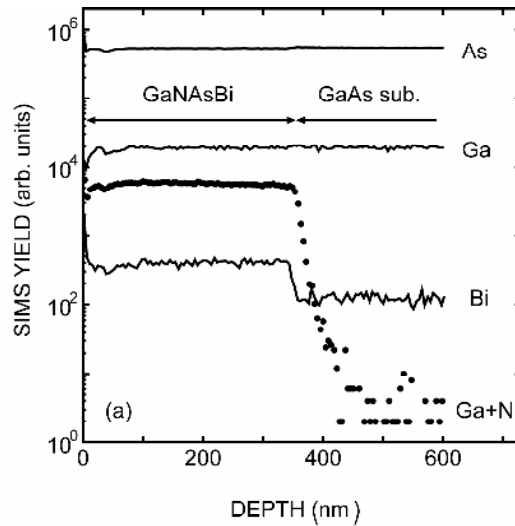


図4. GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層の二次イオン質量分析深さ方向プロフィール

図4にGaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層のSIMSのプロファイルを示す[7]。窒素の検出感度を良くするためにここでは⁶⁹Ga¹⁴Nを検出している。N原子とBi原子ともに深さ方向に一樣に取り込まれている。Bi組成およびN組成はRBSとSIMSの結果をもとに決めた。基板温度が低くなるほど、また、Bi供給量を大きくするほどBi組成は大きくなった。また、Bi供給量が、基板温度で決まるある値以上になると、Bi供給量を増やしても成長層中のBi組成は飽和した[8]。

レーザを実現するためには、成長層と基板との格子整合が重要である。GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層の格子定数はBiおよびNの供給量と基板温度を変化することで制御できる[9]。Bi供給量と基板温度を一定にしてN供給量を増加した場合、図5に示すように成長層のX線回折パターンは単調に高角側にシフトする。窒素流量が0.35 sccmのときに成長層の回折ピークは、ちょうどGaAs基板のピークに重なり格子整合している。Ga(N_{0.33}Bi_{0.67})_zAs_{1-z}の組成をとることでこの混晶はGaAs基板に格子整合することがわかっている[8]。

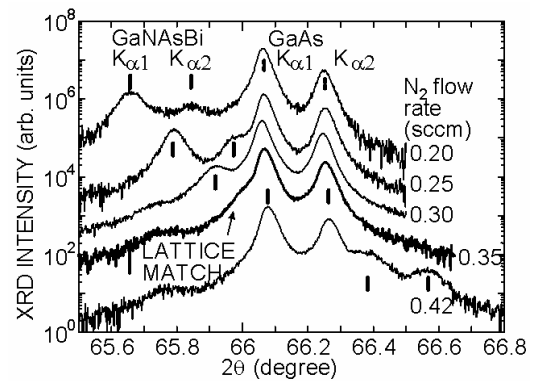


図5. GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層のX線回折パターン
Bi供給量一定。N供給量(流量)を変化。

1-5. GaNAsBiの光学的性質

GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層からは、図6に示すように通信波長帯である波長1.3 μmのホトルミネセンス発光が室温で観測される。成長層はGaAs基板に格子整合している。発光強度を強くするには、成長後のアニールが効果的である[8]。図では550°Cで1時間アニールすることにより、5倍程度、強度が大きくなっている。

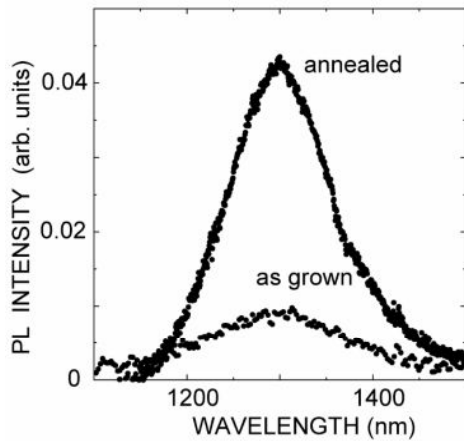


図 6. GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層の室温における
ホトルミネセンススペクトル

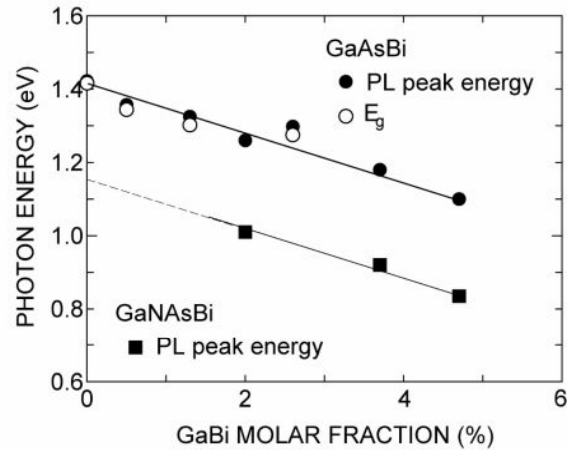


図 7. GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x成長層およびGaAs_{1-x}Bi_x
成長層の発光ピーク波長の組成依存性。
GaAs_{1-x}Bi_xの禁制帯幅の組成依存性も示す。

GaN_yAs_{1-x-y}Bi_xおよびGaAs_{1-x}Bi_xのPLピークエネルギーは、図7に示すように、Bi組成が大きくなるにつれて低エネルギー側にシフトする[7]。図では、GaN_yAs_{1-x-y}Bi_xのN組成は2.0%に固定している。GaAs_{1-x}Bi_xについてはホトリフレクタンス法で測定した禁制帯幅の実測値[2]もプロットした。GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x、GaAs_{1-x}Bi_xともにPLピークエネルギーはBi組成の変化に対して、62 meV/%Biの割合で低エネルギー側にシフトしている。また、N組成の変化に対しては130 meV/%Nの割合でPLエネルギーは低エネルギーシフトする。

図8(a)にGaN_{0.020}As_{0.960}Bi_{0.020}のPLスペクトルの温度変化を示す[9]。昇温につれてピークはわずかに低エネルギー側にシフトする。PLピークエネルギーの温度係数は、図8(b)から、0.16 meV/Kと求まる。この温度係数は通信用レーザーに用いられているInGaAsPの3分の1の値である。本研究で創製したGaN_yAs_{1-x-y}Bi_xは、禁制帯幅の温度依存性が小さく、発振波長が温度無依存となる通信波長レーザーへの応用が期待できる。

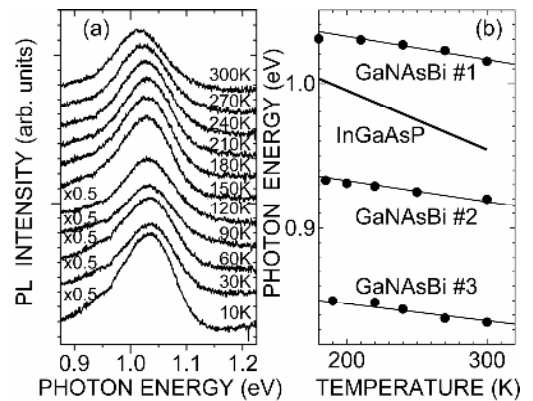


図 8. (a) GaN_{0.020}As_{0.960}Bi_{0.020}のPLスペクトルの温度変化。(b) GaN_yAs_{1-x-y}Bi_xおよびIn_{0.78}GaAs_{0.48}P_{0.52}のPLピークエネルギーの温度変化。

1-6. GaNAsBi/GaAs ダブルヘテロ構造の試作とその特性

図9に示すGaNAsBi/GaAsダブルヘテロ(DH)構造を試作した[10,11]。まずGaAs基板の上に500°Cでnon-dope GaAs層を50 nm成長し、基板表面の結晶性を改善した後、基板温度を370°Cに下げてGaN_{0.015}As_{0.957}Bi_{0.028}薄膜を150 nm成長した。そして再び50 nmのnon-dope GaAs層を基板温度を上げながら成長させ、その後Asビーム照射下で550°C30分間のアニールを行った。下のnon-dope GaAs層は、n型不純物を添加したn-GaAs層が望ましいが、使用しているMBE装置にn型不純物用セルがないので上記構成とした。

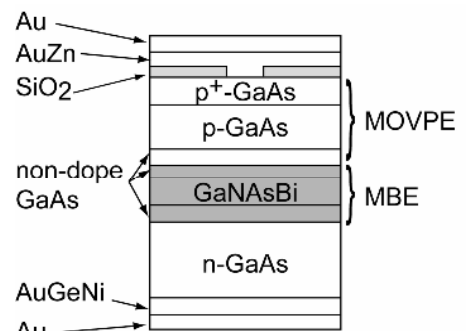


図 9 レーザ構造

また、試作時点で、p 型不純物セルもなかったで、p-GaAs クラッド層は外部の研究機関に依頼し、有機金属気相成長(MOVPE)法で成長を行った。ここまでの製作工程を経た試料に対して PL 測定を行った。さらに、この GaNAsBi/GaAs ダブルヘテロ構造を用いて SiO₂ 絶縁膜ストライプ電極利得導波路型レーザを試作した。電流の流れる領域を狭窄することにより、電流の流れる面積を小さくでき、しきい値電流を低減できる。

市販のレーザダイオードを用いて波長 0.98 μm のパルス光(デューティ比 1/1000)を DH 構造に照射して、DH 構造の端面からの発光を観測した。パルスレーザ光は 10 倍対物レンズで平行光にした後、シリンドリカルレンズによりストライプ状にして試料に照射した。ストライプ状の光は、ファブリペロー共振器全体に照射されており、共振器の端面から発光する。

100 K での光励起端面発光 PL スペクトルの測定結果を図 10 に示す[10]。励起光強度を大きくしていき、400 mW を超えた励起光強度を与えると、PL 強度に非線形な増加が確認できた。さらに強い励起光強度を与えることで、レーザ発振が期待できる。

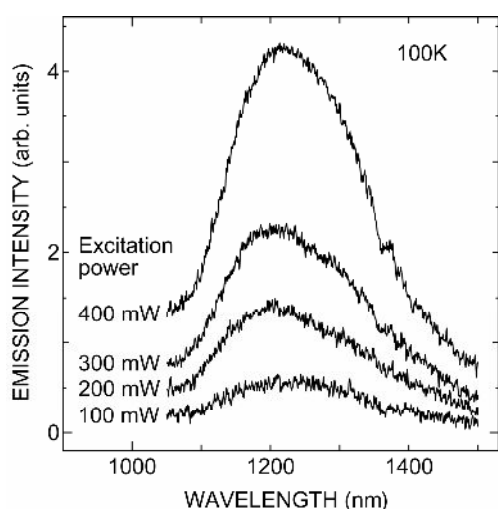


図 10 GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x/GaAs ダブルヘテロ構造のファブリペロー共振器端面からの PL スペクトル

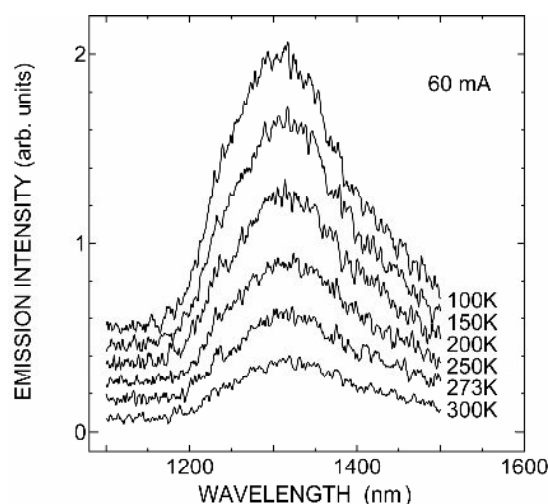


図 11 GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x/GaAs ダブルヘテロ構造からの EL 発光

へき開したレーザチップは明瞭な整流性を示し、逆バイアスに対してほとんど電流が流れない。一方、立ち上がり電圧が 4 V 付近と非常に大きな値となった。V 族原子である As の平衡蒸気圧が高いため、ウェハ製作工程のアニール中に、加熱により結晶表面から As が選択的に蒸発・熱分解し、結晶表面が損傷を受けた可能性がある。レーザに電流を流し、赤外線カメラで端面発光を撮影すると、ストライプの箇所のみでのエレクトロルミネセンス(EL)発光が確認できた。電流の流れる領域がストライプの箇所のみで狭窄できている。

図 11 に注入電流 60 mA の時、種々の温度における EL スペクトルである[11]。電流は duty1/100 のパルス電流 (パルス周期 1 kHz、パルス幅 10 μs)である。100 から 300 K の全ての温度範囲で波長 1.3 μm を中心とする広いスペクトルが確認できる。この EL ピーク波長の温度依存性は 0.09 nm/K である。これは、従来用いられている InGaAsP FPレーザが 0.4 nm/K であるのに対し、1/4 程度の値である。活性層材料に GaNAsBi 材料を用いることで、発光波長の温度依存性が低減できた。

1-7. まとめ

温度が変化しても発振波長が変化しない半導体レーザ用材料として半導体・半金属混晶 GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x を世界に先駆けて創製し、発光エネルギーの温度無依存化を実証した。さらに、GaNAsBi/GaAs ストライプ電極ダブルヘテロ構造ダイオードの試作と光学特性の評価を行った。GaNAsBi ウェハの光励起端面発光 PL 測定では、

励起光強度の増大により PL 強度の非線形な増加が確認でき、レーザ発振への期待が大きい。試作したストライプ電極 GaNAsBi/GaAs ダブルヘテロ(DH)構造レーザは明瞭な整流性を示し、電流狭窄部からの EL 発光が確認できた。低い注入電流(60 mA)で EL を測定したところ、EL スペクトルピークの温度依存性は 0.09 nm/K であった。活性層材料に従来の用いられている InGaAsP FP レーザの発振波長温度依存性が 0.4 nm/K であるのに対し、1/4 程度に低減された。所期の発振波長が温度無依存のレーザの実現に大きく近づいた。

以上のように、禁制帯幅の温度依存性が従来の半導体に比べて大幅に小さい通信レーザ用材料を創製し、レーザ構造を試作するまでにいたった。電流注入による発光が得られ、発光波長の温度無依存化の実証に至ったが、レーザ発振には至っていない。レーザ構造を試作する際に、MBE と MOVPE の両方を用いており、pn 接合界面が一旦大気に触れており、界面が劣化している可能性がある。また、MBE に比べて MOVPE ではより高温になるため、アクセプタ(Zn)の GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x 活性層への拡散が無視できない。このため pn 接合特性が大きく劣化していると考えている。また、窒素源を高純度化する余地も残されている。現在、これらの問題点を順次、改善しており、レーザ発振への展望は明るいと考えている。

2. 窒化シリコン絶縁膜の新規堆積法の開発とデバイスへの応用

2-1. はじめに—電子産業における窒化シリコン

シリコン窒化(SiN_x)膜は、水や不純物の浸透を抑える緻密な構造を持ち、電気絶縁性も良好であり、パッシベーション膜として不可欠な材料である。さらに、組成比を化学量論比から Si リッチあるいは N リッチとすることで屈折率を変化できる。そのため、太陽電池の反射防止膜に応用されている。最近では、マイクロエレクトロメカニカルシステム(MEMS)や有機物の保護膜などに応用されつつある。しかしながら、SiN_x 膜の形成法には、爆発性や腐食性のある原料を用いて堆積する方法しか存在しておらず、いくつかの問題を抱えている。

SiN_x 膜と並んで電子デバイスに広く用いられているシリコン酸化(SiO₂)膜の形成には、爆発性や腐食性のある原料を用いて堆積する方法と有機原料を用いた安全な堆積法、熱酸化法があり、用途によって手法を使い分けている。SiO₂ 膜の有機原料を用いた安全な膜の形成法にはテトラオリシケートシラン[Si(OC₂H₅)₄:TEOS]を用いるのが一般的である[12]。この原料を用いた SiO₂ 膜の堆積技術は既に確立されており、広く産業に用いられている。

一方、プラズマ CVD 法や光 CVD 法による SiN_x 膜の形成過程で、前駆体としてジシラザン(別称:シリルシランアミン:H₃SiNHSiH₃)が存在することが明らかになっている[13-15]。しかし、ジシラザンは化学的に不安定で膜堆積の原料とはならない。ヘキサメチルジシラザン[(CH₃)₃SiNHSi(CH₃)₃:HMDS]は、ジシラザンの Si に結合している H がメチル基に置き換わったもので、ジシラザンと類似の構造をもっており、SiN_x 膜の堆積のための原料として期待される。この原料は、爆発性や腐食性がなく取り扱いが容易であるだけでなく、電子産業でホトレジスト塗布時の界面活性剤として使用されているため、安価である。しかし、通常の熱 CVD[16]法やプラズマ CVD[17]法を用いて HMDS を原料として SiN_x 膜を堆積すると膜中に炭素が混入し、膜内欠陥密度が増大する[18]。プラズマや熱によって HMDS が分解され CH_x などが生成し、膜内にそれらが取り込まれると考えられる。

2-2. 有機液体原料を用いた低炭素濃度窒化シリコン堆積法の開発

本研究では図 12 に示すように、HMDS をプラズマで直接に分解することなく、プラズマで励起した窒素原子と HMDS の反応により SiN_x 膜を堆積した[19]。この方法により膜中の炭素濃度を大幅に低減した。基板温度 200°C から 400°C では、堆積速度はほぼ一定で、励起窒素原子の供給量に律速されている。基板温度 600°C から

800°Cでは、堆積速度は、活性化エネルギーが 0.23eV の活性化型の変化を示した。すべての基板温度で、励起窒素原子の存在が膜堆積に不可欠である。膜中の炭素含有量は基板温度に関わらず XPS 測定の検出限界以下であった。また、基板温度 300°Cおよび 700°Cで堆積した膜の FT-IR スペクトルで、2960cm⁻¹ 付近の C-H に関するピークは観測されない。SIMS 測定により、膜中の炭素含有量はたかだか 10¹⁹cm⁻³ 台と推定される[19]。基板温度 200°Cから 400°Cで堆積した膜密度は 2.9g/cm³程度であり、SiH₄を原料とする従来法で堆積した SiN_x膜と同等な値が得られた。500°Cから 800°Cでは 3.2g/cm³で一定となり焼結法により形成した緻密な膜とほぼ同等な値を示した[20]。高温で堆積するほど膜中の Si-H および N-H 結合密度が減少した。基板温度が高くなるにしたがい膜組成は窒素リッチから Si リッチに近づいた。これに対応し、基板温度 300°Cでは屈折率 1.79、比誘電率 5.7 が、基板温度 700°Cでそれぞれ 1.98、7.6 と増加した。300°Cで堆積した場合、10⁻⁶A/cm²で定義した絶縁破壊強度は3.5MV/cm、抵抗率は3×10¹³Ω cmとなり、良好な絶縁性を示した[21]。

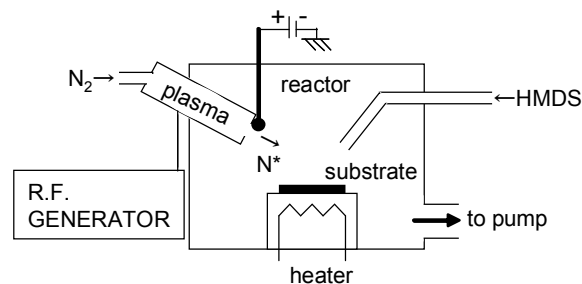


図 12. 堆積装置

2-3. 有機エレクトロルミネセンスディスプレイの封止膜への応用

有機エレクトロルミネセンス(Electroluminescence:EL)ディスプレイは、消費電力がブラウン管(CRT)より低く、液晶(LCD)と同程度で、高画質、広視野角といった特長があり、次世代フラットパネルディスプレイの本命とされている。すでに一部の携帯電話で製品化されているが、耐久性に課題がある。有機 EL に使われている発光素子は有機半導体で作られているため、無機半導体に比して耐湿性が大幅に劣る。現在、缶封止またはガラス封止によって有機半導体を外気から遮断し、有機 EL 素子の耐湿性を確保している。これらの封止法では、封止接着部の接着剤の隙間から湿気が入り込んだり、接着剤を乾燥する際にガスが発生したりするため、乾燥剤を使って耐久性を向上させなければならない。このことが、薄型化への足かせとなっている(図 13)。また、缶やガラスを使うため、フレキシブルディスプレイへの応用が不可能となる。

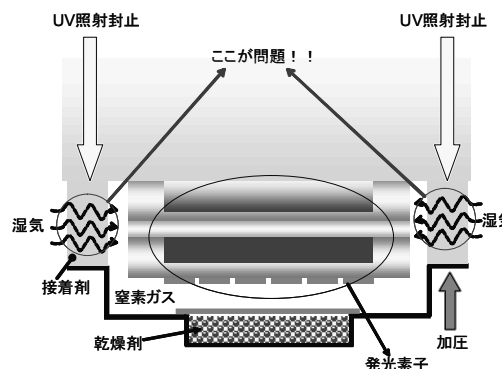


図 13. 従来の有機 EL 封止技術

この問題の打開策として、膜封止が検討されている。多くの研究機関で、非常に緻密で絶縁性に優れた窒化シリコン膜を用いた封止技術の開発が試みられている。この窒化シリコン膜によって有機 EL を封止できるようになれば、フレキシブルディスプレイへの応用が可能となり、新しい市場が創成され、新しい産業が生まれる。

しかし、有機 EL 上に窒化シリコン膜を形成する場合、有機物が熱によるダメージを受けないようにするため、低温(~150°C)で膜を形成する必要がある。従来法による低温形成では、粉塵(パーティクル)が発生し、ピンホールやクラックなどの欠陥となる(図 14)。この欠陥によって耐湿性が失われ、結果として十分な素子寿命が得られない。また、この方法による膜の

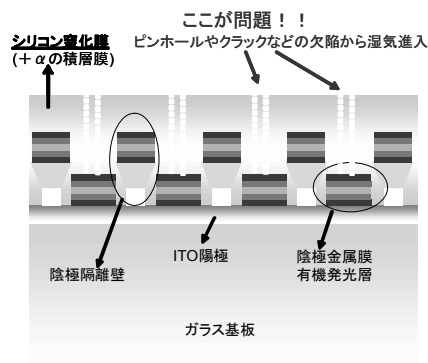


図 14. 膜封止構造

形成速度は、たかだか 30 nm/min 程度であり、生産効率が悪い。

そこで、これらの問題を解決するために、試料へのプラズマダメージがなく、低温で緻密な窒化シリコン膜を堆積できる本研究で開発した堆積法を、封止膜の形成に応用した。

2-4. ホトルミネセンス強度の経時変化からみた封止特性

本方法で有機膜上に窒化シリコン膜を堆積できるか、また堆積した窒化シリコン膜が保護膜として応用できるかを確認するため、ガラス基板上に蒸着したAlq3 (トリス(8-ヒドロキシキノリナト)アルミニウム:有機EL用電子輸送性材料)膜上に窒化シリコン膜を堆積した[22,23]。Alq3は有機薄膜の蒸着装置でガラス基板上に250 nm蒸着した。また、Alq3を完全に覆うように窒化シリコン膜を常温で約250 nm堆積し試料とした。なお、有機材料の蒸着装置と窒化シリコン膜の堆積装置は、全く別な場所にあるため、Alq3を蒸着した段階で一旦大気開放し、あらためて窒化シリコン膜の堆積装置に移送して、窒化シリコン膜を堆積している。

窒化シリコン膜を堆積した試料の評価方法として、大気中でφ 2.5 mm の He-Cd レーザを出力 5 mW で連続照射し続けた場合の PL 強度の減衰の様子を調べた。参照試料として、窒化シリコン膜を堆積していない Alq3 膜についても、真空中および大気中で同様の測定を行った。

測定結果を図 15 に示す。参照試料である窒化シリコン膜を堆積していない Alq3 膜では、大気中で測定したものは、1時間のレーザー照射の後に PL 強度は1割程度にまで減少した。一方、真空中では9割以上の強度を保っている。これに対して窒化シリコン膜で Alq3 を保護した試料では、大気中でも9割程度の PL 強度を保っており、窒化シリコン膜を堆積しなかった試料の真空中のものと同様な結果となり、良好な封止特性を示した。

また、実際に有機 EL デバイスを製作して、本方法によって堆積した窒化シリコン膜の封止特性を評価した。EL デバイスを製作した直後と、窒化シリコン膜で封止した直後で、電流密度-電圧、輝度-電流密度、発光強度-波長の特性に変化は見られず、また、封止直後も、きれいな面発光が確認されたことから、本方法による堆積は、デバイスにダメージを与えないプロセスであるといえる。

窒化シリコン膜で封止しなかったデバイスは、20日間程度で電流、輝度ともに2桁程度の減少を起こしてしまうのに対し、窒化シリコン膜を堆積した試料では、電流、輝度ともほとんど変化は確認されなかった。発光強度の半減期を観察したところ、窒化シリコン膜で封止していないものにくらべ7-10倍の半減期となった。

2-5. 実用化研究

実用化研究のため、図 16、17 に示す大面積に膜を堆積する装置を開発した。装置全体の大きさは、約 4.5×2.5m、膜の形成面積は 400×550mm である。本方法では、これまで述べてきた堆積装置と同じく、プラズマを生成する箇所と膜を堆積する箇所を分離している。大面積の膜を堆積するためにスキャン方式を採用した。全体の膜厚分布平均は±9.7%であった。試料のスキャンのタイミングを調節することで膜厚

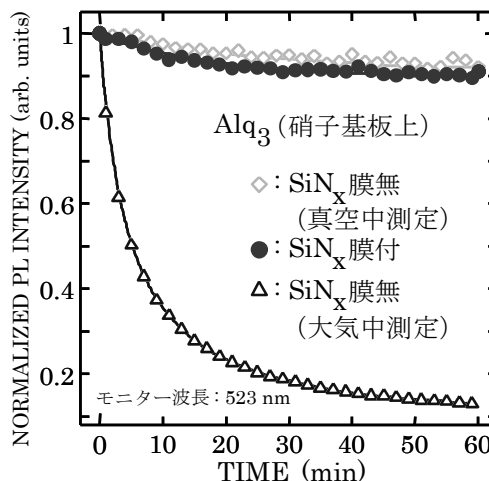


図 15. PL 発光強度観察による経時変化特性

分布を 5%以下にする目処つけている。また、膜の屈折率の分布は $\pm 4.7\%$ であり、組成分布も大きくない。さらに、FT-IR 測定により 3000 cm^{-1} 付近の CH_x に関するピークが確認されず、堆積膜の低炭素化が実現できている。

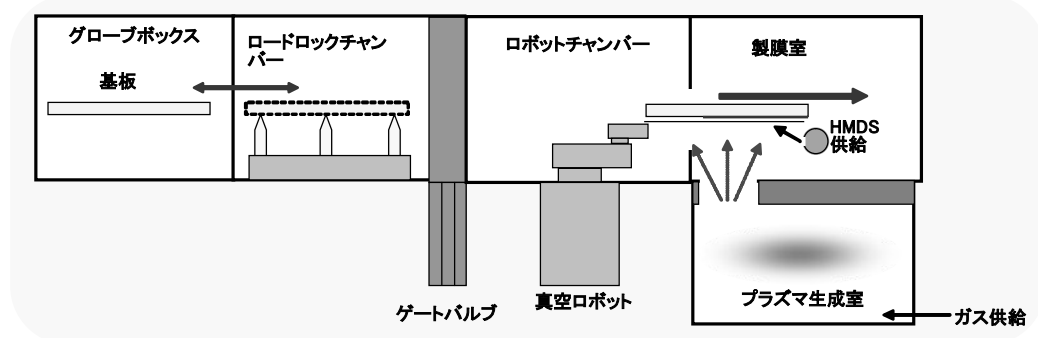


図 16. 装置構成図

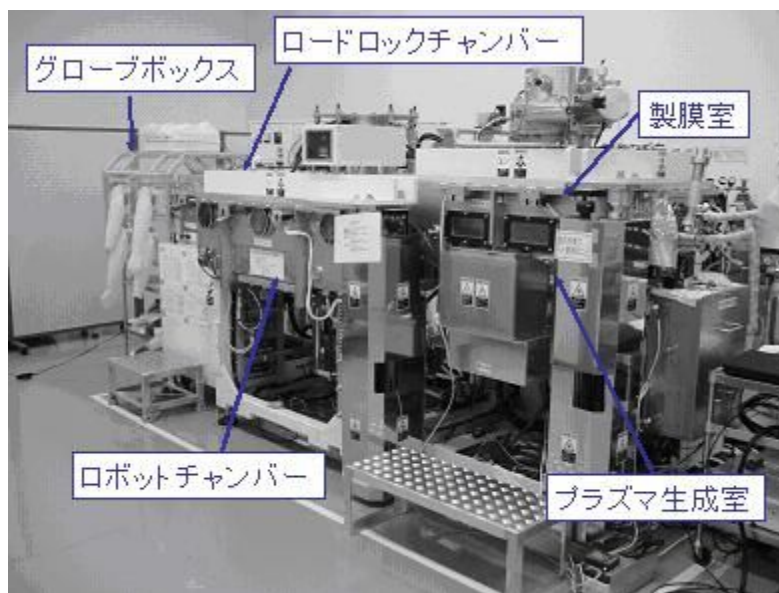


図 17. 開発した装置の写真

有機 EL デバイスの封止膜として積層膜を堆積した。第 1 層は、基板へのダメージが少ない本研究で開発した手法を用いて形成した。その上に、膜の形成速度が比較的早い高密度プラズマ CVD 法で第 2 層を形成した。通常、プラズマ CVD 法で形成した膜は数 100 nm 程度の膜厚を形成すると膜がはがれてしまうが、本研究の方法では、膜を $1\mu\text{m}$ 程度形成しても、曲げ試験やテープ剥離試験では、はがれは確認されず、また、クラックも発生しない。

タクトタイムは 5 分を目標としている。現時点での装置構成では、15 分程度のタクトタイムとなる。高密度プラズマを大面積に生成することや、膜を形成するチャンパー

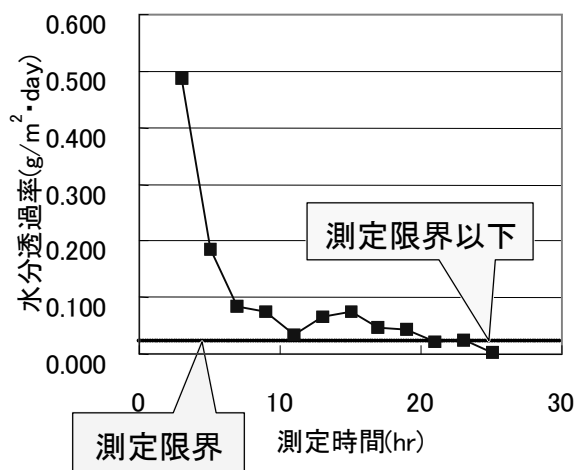


図 18. 水分透過率

の増加することなどにより、タクトタイム 5 分が実現できると考えている。

図 18 に、モコン評価法による水蒸気透過度の測定結果を示す。モコン評価法の測定限界以下($0.02 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$)の値が得られ、本方法により形成した封止膜は非常に優れたバリア性を有している。その他の特性も、以下に示すように有機 EL 素子の封止膜として、良好な値が得られている。

- ・ 膜の残留応力: 18 MPa
- ・ 線膨張係数: $2.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- ・ 弾性率 57 GPa
- ・ 光の透過特性: 可視領域において 90%以上

2-6. まとめ

プラズマを生成する領域と膜を堆積する領域を分離することによって有機原料(HMDS)を用いながら炭素濃度の低い窒化シリコン膜を堆積することに成功した。堆積した膜は、非常に緻密な絶縁膜であることがわかった。室温で堆積した膜は、可視領域における光の透過率が 90 %以上であり、有機 EL の封止膜としての応用しうる。

本方法では HMDS がプラズマセル内へ混入しないように差圧をもうけた。窒化シリコン膜を堆積した場合、堆積温度が 600°C から 800°C の高温領域では活性化エネルギーが 0.23 eV の活性化型の変化を示した。 400°C 以下の低温では、堆積速度は窒素原子の供給量に律速されている。

本方法によって堆積した膜の炭素含有量は、二次イオン質量分析測定によって 10^{19} cm^{-3} 台と見積もられる。炭素の含有量は従来報告されている数値より 2 桁程度低い。RBS 測定によって密度をもとめた結果、 200°C から 400°C で堆積した密度は 2.9 gcm^{-3} 程度であり、モノシランガスを原料とする従来法で堆積した窒化シリコン膜と同等な値が得られた。堆積温度が 500°C から 800°C で、密度は 3.2 gcm^{-3} で一定となり、焼結法により堆積した緻密な膜とほぼ同等な値を示した。高温で堆積するほど膜中の Si-H および N-H 結合密度が減少した。堆積温度が高くなるにしたがい膜組成は窒素リッチからシリコンリッチに近づいた。堆積温度が高温ほど、膜が緻密になるのに対応して、エッチング速度は低い値を示し、屈折率は増加した。

300°C で堆積した場合、 10^{-6} A/cm^2 で定義した絶縁破壊強度は 3.5 MV/cm 、抵抗率は $3 \times 10^{13} \Omega \text{ cm}$ となり、良好な絶縁性を示した。シリコン MIS ダイオードを製作し、通常のプラズマ CVD で堆積した窒化シリコン膜では得られ難い反転現象を確認した。これは、本方法は基板にプラズマのダメージを与えないことを示している。

室温で堆積した膜は可視領域において 90 %以上の透過率であった。ガラス基板上に堆積した Alq3 にレーザを連続照射した際の PL 強度の変化を用いて窒化シリコン膜の封止特性を評価した。窒化シリコン膜を堆積した Alq3 試料は、窒化シリコン膜を堆積していない試料を真空中に放置した場合と同等の劣化特性を示した。堆積前後の EL 特性の比較より、堆積過程における劣化はほとんど見られなかった。本方法により堆積した窒化シリコン膜は、有機 EL デバイスの封止膜へ応用が期待される。

本方法を用いて大面積($400 \times 500 \text{ mm}$)に膜を堆積する装置を開発した。良好な膜厚均一性が得られた。モコン評価法の測定限界以下($0.02 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$)の値が得られ、本方法により形成した封止膜は優れたバリア性を有する。

今後、開発した装置で製膜した封止膜について、各ディスプレイメーカーから評価を受け、実用化につなげる予定である。

参考文献

- [1] K. Oe and H. Asai, IEICE Trans. Electron. **E79-C** (1996) 1751.
- [2] K. Oe and H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998) L1283 (1998).
- [3] J. Yoshida, T. Kita, O. Wada and K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 371.
- [4] M. Yoshimoto, S. Murata, A. Chayahara, Y. Horino, J. Saraie and K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, (2003) L1235.
- [5] M. Yoshimoto, W. Huang, Y. Takehara, J. Saraie, A. Chayahara, Y. Horino and K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L845.
- [6] M. Yoshimoto, W. Huang, Y. Takehara, J. Saraie, A. Chayahara, Y. Horino and K. Oe, *Proc. 16th Int. Conf. Indium Phosphide & Related Materials, Kagoshima*, IEEE Cat. No. 04CH37589 (IEEE, New York, 2004) p.501.
- [7] M. Yoshimoto, W. Huang, G. Feng and K. Oe, phys. stat. solidi (b) **243** (2006) 1421.
- [8] W. Huang, K. Oe, G. Feng and M. Yoshimoto, J. Appl. Phys. **98** (2005) 053505.
- [9] W. Huang, M. Yoshimoto, Y. Takehara, J. Saraie and K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L1350 ; **43** (2004) L1495(E).
- [10] K. Oe, Y. Tanaka, W. Huang, G. Feng, K. Yamashita, M. Yoshimoto, Y. Kondo, and S. Tsuji, *32nd European Conference on Optical Communi.*, Sep.24-28, 2006, Cannes, France, We3.P.39
- [11] M. Yoshimoto, W. Huang, G. Feng, Y. Tanaka and K. Oe, J. Crystal Growth, in press.
- [12] C. Y. Chang and S. M. Sze: *ULSI Technology* (McGraw-Hill, New York, 1996) p.216.
- [13] D. K. Smith, A. S. Alimonda, C. C. Chen, S. E. Ready, and B. Wacker, J. Electrochem. Soc., **137** (1990) 614.
- [14] C. Wu, J. Phys. Chem., **91** (1987) 5054.
- [15] M. Yoshimoto, K. Takubo, T. Ohtsuki, M. Komoda and M. Matusnami: J. Electrochem. Soc., **142** (1995) 1976.
- [16] I. Kleps, F. Caccavale, G. Brusatin, A. Angelescu, L. Armelao, Vacuum, **46** (1995) 979.
- [17] M. T. Kim, J. Lee: Thin Solid Films, **303** (1997) 173.
- [18] Y. Hatanaka, K. Kitamura, S. Wickramanayaka, Y. Nakanishi, J. Tyczkowski: *Proc. of 6th Int. Conf. Silicon Carbide and Related Materials Kyoto*, IOP Conf. Ser., **142** (1995) 1055.
- [19] K. Taguchi, M. Yoshimoto and J. Saraie, Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) L148.
- [20] K. Taguchi, M. Yoshimoto and J. Saraie, Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L1403.
- [21] 田口貢士, 吉本昌広, 更家淳司, 材料, **53** (2004) 1318.
- [22] T. Yamao, K. Taguchi, M. Yoshimoto and S. Fujita, *Extended Abstracts 23rd Electronic Materials Sympo., Izu-Nagaoka, 2004*, p.53-54.
- [23] K. Taguchi, M. Yamashita, M. Yamazaki, A. Chayahara, Y. Horino, T. Iwade, M. Yoshimoto, *Abstracts 2005 Mat. Res. Soc. Fall Meeting, Boston, November 27-December 2, 2005*, D.13.22.

ホログラフィの超高速 3 次元イメージングへの応用

研究分担者 栗辻 安浩
大学院 工芸科学研究科
電子システム工学部門 助教授

【研究目的】

これまで不可能であったフェムト秒オーダーで進展する光の伝搬の様子を連続動画像として観察する技術をホログラフィを用いて開発する。また、被写体の一瞬の 3 次元像を取得・計測する技術をホログラフィを用いて開発する。各技術を超高速現象の 3 次元像の観察・計測および超高速光デバイスの設計・評価に応用することを目的としている。

【今までの成果】

[I] フェムト秒光パルス伝搬の動画像記録・観察技術の開発

ピコ秒、フェムト秒の超短光パルスでホログラムを記録すれば、速すぎて決して見ることが出来ない光の伝搬の様子を、あたかも水面の波紋がゆっくり広がってゆくのをみるかのように可視化することができる。この技術は Light-in-flight recording by holography (Light-in-flight ホログラフィ)と呼ばれており、我々はピコ秒パルスレーザーおよびフェムト秒パルスレーザーを用いたホログラフィにより、本研究プロジェクトの期間で以下の成果を得た。

(1) ホログラム光デバイスの設計および作製

我々の研究グループでは計算機支援ホログラム設計ツール(ホログラム CAD ツール)の開発を行っている。このツールは、ホログラムの再生特性、結像特性の解析、また無収差結像を実現するホログラムの設計が可能であり、ホログラムを使った新しい光デバイスの設計に利用できる。このツールの機能拡張を行っており、多重再生光源による最適結像のためのホログラムの設計を行った。設計で得られたレンズを 2 光束干渉露光により作製した。作製したレンズの再生特性、結像特性を解析し、本ツール内の計算で得られた結果と一致することを実験的に確認し、本設計手法と設計で得られたデバイスの有効性を確認した。

(2) フェムト秒光パルス用ホログラフィック光学素子の設計と製作

パルス幅 130fs, 中心波長 720nm フェムト秒光パルス集光用の軽量薄型レンズをホログラム CAD ツールを用いて設計した。本設計のために、多波長光源を扱えるようにホログラム CAD ツールの機能拡張を行った。機能を拡張されたホログラム CAD ツールを用いて設計したレンズを 2 光束干渉露光で作製した。光源にモードロック Ti:S レーザーを用いて、作製したレンズの再生特性、結像特性を実験的に調べた。その結果、ホログラム CAD ツールを用いて計算した結果と一致し、本設計の有効性を示した。また、Ti:S レーザーが連続波発振モードの場合とパルス光発振モードのそれぞれの場合において、本レンズの集光特性を実験的に調べた。実験結果は、ホログラム CAD ツールを用いて計算した結果と一致し、設計の有効性を示した。また、パルス光発振モードでは像がぼけることを実験により確認した。実験結果はホログラム CAD ツールを用いて計算した結果と一致し、本ホログラム CAD ツールがフェムト秒光パルスを光源とした場合にも適用可能であることを示した。

(3) 超短光パルスに対する種々の光学現象の 2 次元像の観察

Light-in-flight ホログラフィを利用して、超短光パルスの種々の光学現象の 2 次元像の記録・観察に成功した。また、光導波路中を超短光パルスが全反射を繰り返しながら進んでゆく様子、平板ガラスに対してスネルの法則として知られている屈折の現象、レンズによりパルス面が集光・発散する様子の観察に成功した。また、中心波長 720nm、パルス幅 130fs のモードロック Ti:S レーザーから発せられるフェムト秒光パルスがプリズムによりパルス面が屈折する様子の観察に成功した。

(4) 集積型アレイイルミネータにより生成されるフェムト秒光パルス列の発生と伝搬の観察

集積型アレイイルミネータは、超高速光通信や並列光コンピューティングシステム、大容量光メモリシステムなどに有用なアレイ状にビームを発生させるナノ構造グレーティングカプラを有する光デバイスである。このアレイイルミネータから発生する多数の平行なフェムト秒光パルス像の観察に成功した。本技術で得られた再生像の動画では、参照光パルスと同方向に進行する出射パルスの方が、参照光パルスと逆方向へ進行する出射パルスよりも傾き、かつ、伝搬速度が速い再生像となることがわかった。パルスが伝搬する過程のモデルを立ててパルスの形状、伝搬速度の解析を行った。このモデルに基づいて計算した結果が、実験結果と一致することがわかり、モデルの正当性を示した。

(5) 観察されるパルス面形状に関する理論的解析

基本的な光学系により作製したホログラムからの再生像として観察される光パルスの面の形状は、その原理上実際に生じているパルスの形状とは異なり、実際の光パルスの形状が歪曲された再生像として観察される。その程度は参照光の角度、観察位置などに依存する。この現象について理論的に解析した。この曲線の傾きは、参照光と物体光の光路長がホログラム面上で一致するための物体光点の軌跡として求められ、計算結果は実験結果と一致した。この技術を超高速現象の観察・計測に応用するためには、理論解析に基づいた変換を行って真のパルス面形状を知る必要があることを明らかにした。

(6) Light-in-flight ホログラフィで観察される超短光パルスの再生像の歪補正

Light-in-flight ホログラフィでは、その原理上、実際の光パルスの形状を歪曲した再生像が観察されることをこれまでに明らかにした。そこで、Light-in-flight ホログラフィで得られる光パルスの再生像の歪みを補正する手法を提案した。コリメートされて伝搬するフェムト秒光パルスを記録したホログラムから再生される像にたいして、提案する歪み補正法を適用した。その結果、再生像がほぼ直線状になり、提案する歪補正方法の有効性を示した。

(7) Light-in-flight ホログラフィにおける再生像の空間的・時間的分解能の解析

Light-in-flight ホログラフィでは、ホログラムに記録される干渉縞は、パルス幅が狭いほどその領域が狭くなる。そのため再生像の解像力は回折によって低下する。そこで、本ホログラフィで得られる再生像に関して、参照光が記録材料に入射する角度を変化させて記録を行い、各入射角度にたいして、水平および垂直方向の解像力を測定した。また、測定した結果が理論から導かれる結果と同じ傾向を示すことを確かめた。

(8) 3 次元空間を伝搬するフェムト秒光パルスの伝搬の観察

光パルスの伝搬を3次元像として観察できれば現象のより詳しい情報を得ることができる。3次元空間を伝搬する光パルスそのものを観察するため、ゼラチンゼリーを散乱媒体としてその空間を伝搬するフェムト秒光パルスのホログラム記録に世界で初めて成功し、その動画像が得られた。ここで注目すべきことは、得られた再生像は、連続光で記録した場合とは異なり左右が反転するという現象が観察されたことである。これは、物体から出てホログラムに到達するまでのパルス光の時間差を考慮することによって説明できる。この現象についての理論的な解析を行い、シミュレーション結果が実験結果と一致することを確かめた。

(9) 回折格子によって回折されるフェムト秒光パルス伝搬の3次元像の観察

ナノ構造光デバイスを通過する3次元空間を伝搬する光パルスの伝搬を観察するために、回折格子によって回折されるフェムト秒光パルスの伝搬の動画記録・観察に成功した。まず、レーザーから照射される狭いビームの伝搬の記録・観察に成功した。回折された光パルスの像は回折効率に応じて像の明暗が観察できた。また、コリメートして画像情報が含まれるフェムト秒光パルスの伝搬の観察にも成功した。ここで注目すべきことは、得られた再生像では、+1次回折光と-1次回折光が斜めに歪んで観察されるということである。これは、物体から出てホログラムに到達するまでのパルス光の時間差を考慮することによって説明できる。

(10) 分布屈折率媒質中を伝搬するフェムト秒光パルスの3次元像の観察

水とゼラチンで作製したゼリーに砂糖を混ぜて濃度勾配を形成させ屈折率を連続的に変化させることにより作製した分布屈折率媒質をフェムト秒光パルスの伝搬の3次元像の記録・観察に成功した。中心波長 727nm, パルス幅 226fs のモードロック Ti:S レーザーから発せられるフェムト秒光パルスが分布屈折率媒質によりカーブを描き、緩やかに曲がりながら伝搬する様子の動画観察に成功した。

(11) 伝搬する超短光パルス拡大像動画記録と観察

Light-in-flight ホログラフィを用いて、超短光パルスを拡大して記録したという例は報告されていない。そこで、拡大光学系を用いて、超短光パルスの伝搬の拡大像の記録と観察を行った。拡散板と記録材料との間に凸レンズを1枚挿入して、中心波長 727nm, パルス幅 226fs のモードロック Ti:S レーザーから発せられるフェムト秒光パルスの2倍の拡大像を記録し、その観察に成功した。また、本技術において物体光の拡大像を記録する場合に生じる、再生像の歪みについて解析し、計算機シミュレーションを行ったところ実験で得られる再生像の特性を説明できることがわかった。

II] 瞬時3次元画像記録・計測技術の開発

電子撮像デバイスとホログラフィを組み合わせた技術により、被写体の3次元像を記録・計測することができる。これはデジタルホログラフィと呼ばれており、従来のデジタルホログラフィでは原理的に避けることができなかった高鮮明かつ瞬時の3次元情報を獲得できる並列位相シフトデジタルホログラフィの開発を行ってきた。本研究プロジェクトの期間で以下の成果を得た。

(1) 並列位相シフトデジタルホログラフィの考案

並列に位相シフトを行うことにより動く被写体に対しても適用可能な技術である位相シフトデジタルホログラフィを考案した。本技術は、従来の In-line デジタルホログラフィの記録光学系に対して、

参照光の光に位相シフトアレイデバイスが設けられ、CCD カメラの各画素に位相シフトアレイの各要素が結像される。本技術で用いる位相シフトアレイデバイスは、 2×2 の位相シフトデバイスが 1 単位を構成し、この単位が 2 次元アレイ状に配列される。 2×2 の位相シフトデバイスでは参照光の位相を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 遅れを生じさせる。この位相シフトデバイスはガラスの厚みを変化させるか、微小位相板で実現できる。本技術における像再構成の計算手続きは次の通りである。各位相シフト量が等しい部分の CCD の画素を抜き出し、新たに用意した画像上で抜き出した画素と同じアドレスの画素に画素値を複製する。抜き出した以外のアドレスの画素には周囲の画素値から複製または、補間を行うことにより画素値を設定する。4 種類の位相遅れそれぞれについて上記の処理を行い、4 種類の干渉縞画像を作成する。作成した 4 種類の干渉縞画像に対して従来の位相シフト法で用いる計算を行い、撮像素子面での光の複素振幅を計算し、さらに物体の複素振幅を計算する。本技術の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い、その有効性を示した。

(2) 並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡の可能性試験

並列位相シフトデジタルホログラフィにおいて記録光学系中に顕微鏡に用いる拡大光学系を導入することにより、微小領域の瞬時 3 次元画像計測が可能な光学系を考案した。水生微生物や植物細胞試料にたいして、並列位相シフトデジタルホログラフィが利用可能であることを原理確認実験により示した。

(3) 集積型デバイスを用いた並列位相シフトデジタルホログラフィの考案

従来の記録光学系において参照光は空間的に位相を変化させる位相シフトアレイデバイスを透過し、レンズによって撮像素子に結像させるため位相シフトアレイデバイスと撮像素子の位置合わせが必要になり光学系が複雑になるといった問題があった。そこで、偏光を利用し、位相シフトアレイデバイスと撮像素子を集積したデバイスを用いた記録光学系を考案した。提案する位相シフトアレイデバイス-撮像素子集積型デバイスを用いた光学系では、レーザーからの光は、偏光ビームスプリッターによって 2 つの偏光に分けられる。ビームスプリッターで重ね合わさった 2 つの光は位相シフトアレイデバイスを通ることで干渉し、4 段階($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$)の位相の異なる参照光で記録したホログラムが得られる。位相シフトアレイデバイスは、 $\lambda/4$ 板、 $\lambda/4$ 板の高速軸と同じ屈折率をもったガラス、直交した偏光軸を持った偏光板からなり、CCD と一体化されている。各素子は CCD の画素と同じように配置され、各素子の 1 区間の大きさも CCD の 1 画素の大きさに等しい。偏光板の偏光軸の方向は、入射する 2 つの光の偏光方向に対し、それぞれ 45 度となるように配置され、 $\lambda/4$ 板の高速軸と低速軸がそれぞれ物体光と参照光の偏光方向と一致するように配置される。本技術の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い、その有効性を示した。

(4) 並列位相シフトデジタルホログラフィにおける干渉縞情報の有効利用法の考案

記録した干渉縞の情報を有効に利用することにより、並列位相シフトデジタルホログラフィで得られる再生像の精度の向上を行うことができる像再構成方法を考案した。考案法で干渉縞の情報を有効に利用する方法の計算手順を次に述べる。記録されたホログラム中で異なる位相を持った参照光で記録された 4 画素に対して位相シフト法の計算を行う。このとき、計算に使われる 4 画素を、鉛直方向には 1 画素ずつ、水平方向には 1 画素間隔で選ぶ。従って計算により得られる実部と虚部の画像は、水平方向に 1 画素間隔、鉛直方向に 1 画素ずつ画素値を持つことになる。欠落した画素を線形補間することで水

平方向，鉛直方向ともに1画素ずつ画素値を持った実部と虚部の画像が得られる．こうして得られた複素振幅分布に対してフレネル変換を行って再生像を求める．本方法の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い，その有効性を示した．

(5) 並列3段階位相シフトデジタルホログラフィの考案

参照光の位相を空間的に3段階に変化させて得た1枚の干渉縞から並列に位相シフト法を行い，再生像を得る手法を提案した．提案法を次に述べる．レーザーからの光は，ビームスプリッタによって物体光と参照光とに分けられる．参照光は空間的に $0, 2\pi/3, -2\pi/3$ と3段階の位相分布を持つ位相シフトアレイデバイスを透過し，レンズによって CCD 面上に結像する．このデバイスを透過した参照光の空間的な位相分布は，CCD 面上で CCD の画素の配置と一致し，位相分布の1区間は，CCD の画素サイズと同じである．このような空間的に位相分布を持つ参照光でホログラムを記録する．記録された1枚のホログラムには参照光の位相の異なる3種類の干渉縞の情報が1画素ごとに分布する．本技術において像再生を行う計算手順を述べる．記録されたホログラム中の参照光の位相が0の画素に対して，その4近傍画素を用いて位相シフト計算を行う．次に欠落した画素に対して線形補間により元の画像サイズの CCD 面上での複素振幅分布が得られる．こうして得られた複素振幅分布に対してフレネル変換を行い再生像を求める．本方法の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い，その有効性を示した．

(6) 並列カラー位相シフトデジタルホログラフィの考案

色情報の瞬時計測を目的として，赤，緑，青の3色のレーザーを用いた並列位相シフトカラーデジタルホログラフィを提案した．この技術では各色に対して位相を空間的に数段階に変化させることで一度の記録で複数の干渉縞の情報を取り込むことができる．この干渉縞の各色成分に対して並列に位相シフト法による計算を行うことでフルカラーの再生像を得ることができる．提案法を実現する光学系では，光源としては赤，緑，青のそれぞれの光を発する3つのレーザーを用いる．光軸を一致させた3つのレーザーからの光はビームスプリッタによって物体光と参照光とに分けられる．参照光側にはカラーフィルタと位相シフトアレイデバイスが配置されている．レーザーの光はカラーフィルタレイにより各色の光が鉛直方向に並ぶ．位相シフトアレイデバイスは水平方向に空間的に各色に対して $0, 2\pi/3, -2\pi/3$ と3段階に参照光の位相をシフトさせるデバイスが鉛直方向に連結した構造となっている．このデバイスにより各色成分の光の位相が水平方向に3段階に変化する．このように空間的に位相がシフトした光はレンズによって CCD 面上に結像する．その結果，参照光の空間的な位相分布は，CCD 面上で CCD の画素の配置と一致し，位相分布の1区間は，CCD の画素サイズと同じになる．このような空間的に位相分布を持つ参照光でホログラムを記録する．記録した1枚のホログラムには参照光の各色成分の位相が異なった9種類の干渉縞の情報が1画素ごとに分布する．本技術において像再生を行う計算手順を述べる．記録したホログラムに対して同じ波長の参照光で記録した画素をそれぞれ抜き出して3枚のホログラムを得る．各ホログラムには水平方向に参照光の位相が3段階にシフトしたときの干渉縞の情報が含まれている．各ホログラムに対して左右に隣接する3画素を用いて次式で与えられる位相シフト計算を行う．次に，画素を水平方向に1画素移動した3画素のデータを用いて同様の計算を行う．空白部分に対しては求めた値を複製することで補間する．このようにして得られた CCD 面上での物体の複素振幅分布に対して，フレネル変換を行うことで CCD 面からある距離における面での複素振幅分布を得る．以上の処理を各ホログラムに対して行うことで得られた3枚の再生像から各波長の示す色を割り当てて色合成をすることでカラーの再生像を得る．本方法の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い，その

有効性を示した。

(7) 並列位相シフトデジタルホログラフィにおける高画質再生のための位相配置の提案

並列位相シフトデジタルホログラフィで用いられる位相シフトアレイデバイスは、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の位相シフト量を持つ位相シフトを周期的に配列したものである。この位相シフトの基本的な配列方法は全部で 24 通り存在する。そこで計算機シミュレーションにより各配列でのホログラムの記録・再生を行った。入力画像は画像処理の分野で標準的に用いられる画像を用いた。再生像を評価するために各配列における再生像と入力画像との相互相関係数を求めた。この係数により各配列における再生像の画質を比較してホログラムの記録・再生に有効である配列方法を選定した。対角画素の位相シフト量の差が π になるものが 24 通りの配列方法の中で有効な配列であることがわかった。

(8) デジタルホログラフィ用像再生ソフトウェアの開発

デジタルホログラフィの像再生計算・表示用ツールはこれまで各研究者が独自に開発しており、汎用の再生・評価ツールはなく、デジタルホログラフィを効率良く研究するためのソフトウェアが必要とされていた。そこで我々は、記録した干渉縞画像を入力ファイルとして、容易な操作で異なる再生方法による物体の再生像を出力し、評価するソフトウェアを開発した。本ソフトウェアは撮像素子で記録したホログラムのデジタルデータ、記録に用いたレーザーの波長、再生像面と撮像素子との再生距離、撮像素子の画素数・画素間距離を入力すると、再生像が出力される。さらに、異なるデジタルホログラフィの方式に対応するために以下の有用な機能を備えた。(1)フレネル変換のみの手法や位相シフト法 2・並列位相シフト法 3 などの異なる記録・計算方法による像の再生(2)一回フーリエ変換かコンボリューション法 4 のフレネル変換の計算アルゴリズムの再生距離に応じた自動選択(3)相互相関係数・誤差平均を用いた再生像の画質評価(4)フルカラー再生像の再生。また、本ソフトウェアは像再生・評価の操作を容易にするために GUI (Graphical User Interface)を備えている。この、GUI 上には機能ごとに操作画面を用意し、タブボタンでそれぞれの画面の切り替えを可能にした。これにより、見易さと操作性、そして今後の機能拡張の容易さを向上した。さらに、実験で得られたホログラムのデジタルデータを用い、本ソフトウェアで像を再生・評価することにより、本ソフトウェアの正常動作を確認した。

【今後の展開と見通し】

この技術は物理学、化学、生物学、またエレクトロニクスにおける未知の超高速現象の 3 次元像の観察・解明や各種工学分野の超高速計測・評価など幅広い分野への応用が期待される。これらの応用と同時に、その成果をふまえた超高速光デバイスの設計と評価へと研究を進める。また、並列位相シフトデジタルホログラフィを行うシステムを実現することが課題である。このシステムを実現するためには並列に位相をシフトさせるための位相シフトアレイデバイスを実現する必要がある。この光デバイスの設計、製作を行う予定である。また、ホログラム CAD ツールを使った新しい光デバイスの設計と超高速現象を解明するための研究を進める予定である。また、Light-in-flight ホログラフィを用いて、相対性理論に基づく現象の記録・観察の可能性についても検討する。さらに Light-in-flight ホログラフィとデジタルホログラフィを組み合わせたデジタル Light-in-flight ホログラフィによる光の伝搬の動画像記録、観察の可能性についても検討する予定である。

研究論文等リスト
(平成 15 年度)

研究論文

- 1) K. Y. Sandhya, C. K. S. Pillai, M. Sato and N. Tsutsumi, "Highly stable rigid main chain nonlinear optical polymers with nematic phase: effect of LC phase on NLO response" *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* **41** (10), pp.1527-1535 (2003).
- 2) S. Katayama, M. Horiike, M. Urairi, K. Hirao, and N. Tsutsumi, "Structures induced in polysilane and thin polysilane layer coated polymer films by irradiation of femto-second laser pulse" *Chem. Phys. Lett.* **373**(1-2), pp.140-145 (2003).
- 3) N. Tsutsumi and C. Odane, "Phase-matched noncentrosymmetric structures induced by nonresonant all optical poling in polymeric waveguide" *JOSAB* **20**(7), pp.1514-1519 (2003).
- 4) S. Katayama, M. Horiike, M. Urairi, K. Hirao, and N. Tsutsumi, "Laser molding in polymeric materials using femto-second laser pulse and replication via electroforming" *Optical Review* 10(4), pp.196-201 (2003).
- 5) N. Tsutsumi, T. Kawahira and W. Sakai, "Amplified spontaneous emission and distributed feedback lasing from conjugated compound in various polymer matrices" *Appl. Phys. Lett.* **83**(13), pp. 2533-2535 (2003)
- 6) S. Katayama, M. Horiike, M. Urairi, K. Hirao, and N. Tsutsumi, "Periodic bell-shaped upheaval structure on surface of polycarbonate by irradiation of femto-second laser pulse." *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**(11), pp. 6926-6930 (2003).
- 7) A. Nishio, K. Wasai and N. Tsutsumi, "Synthesis and photorefractive properties of novel photoconductive low-molecular-weight glass compounds" *Kobunshi Ronbunshu* (in Japanese) **60**(12), pp. 725-732 (2003).
- 8) K. Yamashita, T. Hashimoto, K. Oe, K. Mune, R. Naitou, and A. Mochizuki, "New Fabrication Method of Core-Cladding Structure in Self-Written Waveguide by using Photosensitive Polyimide", *Proceedings of 29th European Conference on Optical Communication*, 2003, Paper 3-5-5.
- 9) K. Oe, K. Yamashita, K. Mune, and A. Mochizuki, "New Waveguide Technique using Photosensitive Polyimide for Integrated Optics", *Proceedings of IEEE LEOS ANNUAL MEETING*, 2003, p.527.
- 10) M. Yoshimoto, Y. Yamamoto, J. Saraie, "Fabrication of InN/Si heterojunction with rectifying characteristics" *physica status solidi c* **0**, 2794-2797 (2003).
- 11) M. Yoshimoto, H. Yamamoto, W. Huang, H. Harima, J. Saraie, A. Chayahara, and Y. Horino, "Widening of optical bandgap of polycrystalline InN with a few percent incorporation of oxygen" *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3480-3482 (2003).
- 12) M. Yoshimoto, S. Murata, A. Chayahara, Y. Horino, J. Saraie, and K. Oe, "Metastable GaAsBi alloy grown by molecular beam epitaxy" *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, L1235-L1237 (2003).
- 13) W. Huang, M. Yoshimoto, K. Taguchi, H. Harima, and J. Saraie, "Improved electrical properties of InN by high-temperature annealing with *in situ* capped SiN_x layers" *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L97-L99 (2004).
- 14) K. Taguchi, M. Yoshimoto, and J. Saraie, "Reduction of carbon impurity in silicon nitride films deposited from metalorganic source", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L148-L150 (2004).
- 15) S. Ura, F. Okayama, K. Shiroshita, K. Nishio, T. Sasaki, H. Nishihara, T. Yotsuya, M. Okano, and K. Satoh, "Planar reflection grating lens for compact spectroscopic imaging system", *Applied Optics* **42**(2), pp. 175-180 (2003).

- 16) N. Nishimura, Y. Awatsuji, and T. Kubota: "Analysis and evaluations of logical instructions called in parallel digital optical operations based on optical array logic," *Applied Optics* **42**, 14, 2532-2545, (2003).
- 17) Y. Matsuura, Y. Awatsuji, and T. Kubota: "Optimum holographic optical element lens recorded by visible laser beams for an infrared two-dimensional vertical-cavity surface-emitting laser array," *Optics Letters* **28**, 10, 795-797, (2003).
- 18) Y. Matsuura, Y. Awatsuji, T. Shimizu, and T. Kubota: "A hologram computer-aided design tool extends the function for designing and analyzing holographic optical elements illuminated by multiple point-sources," *Optical Review* **10**, 4, 275-282, (2003).
- 19) N. Nishimura, Y. Awatsuji, and T. Kubota: "Performance comparison and evaluation of options for arranging data in digital optical parallel computing," *Optical Review* **10**, 6, 523-533, (2003).

総説

- 1) 久保田敏弘: "2002年の写真の進歩 —科学写真—", *日本写真学会誌* **66**, 3, 234-235 (2003).
- 2) 栗辻安浩, 久保田敏弘: "ホログラム CAD による HOE の最適設計," *光技術コンタクト* **41**, 11, 643-652, (2003).
- 3) 栗辻安浩: "Optics in Computing 2003 参加報告," *光学* **32**, 568-569, (2003).

特許

- 1) 出願番号：特願 2003-31083, 発明の名称：「有機フォトリフラクティブ材料およびその製造法」
発明者：堤 直人, 西尾 昭徳, 小田根 千春, 望月 周, 出願人：京都工芸繊維大学長ならびに日東電工株式会社, 出願日：2003年2月7日
- 2) 出願番号：特願 2003-149328, 発明の名称：「有機フォトリフラクティブ材料」
- 3) 発明者：堤 直人, 西尾 昭徳, 小田根 千春, 望月 周, 出願人：日東電工, 出願日：2003年7月11日
- 4) 出願番号：特願 2003-317421, 発明の名称：「ポリマーおよびその製造方法」 発明者：堤 直人, 大矢将也, 坂井互, 出願人：藤沢薬品株式会社ならびに京都工芸繊維大学長, 出願日：2003年9月9日
- 5) 出願番号：特願 2003-346859, 発明の名称：「感光性膜表面上への釣鐘状構造の形成方法」 発明者：堤 直人, 藤原新, 片山茂, 宮内和彦, 出願日：2003年10月6日, 出願人：(日東電工) ; 代表者竹本 正道 (社長) ならびに堤 直人
- 6) 特許出願番号：2003-15533, 発明の名称：光導波路の製造方法および光デバイスの接続構造、特許出願人：日東電工株式会社、発明者：尾江邦重、山下兼一、宗和範、望月周、内藤龍介、出願日：2003年1月24日
- 7) 国際出願 PCT/JP03/08552 (特願 2002-199122) 「ヘキサアルキルジシラザンを原料としたシリコン窒化膜の製作装置」 発明者：田口貢士、吉本昌広 出願日：平成15年7月4日
- 8) 特願 2004-020706 「混晶半導体とその製造方法およびそれを用いた半導体レーザ装置」 発明者：尾江邦重、吉本昌広、出願日：平成16年1月29日

招待講演

- 1) M. Yoshimoto, "Submicron scale photoluminescence images of wide bandgap semiconductors by cryogenic scanning optical microscope" 日韓先端技術交流セミナー, 2003年8月29日、韓国水原市 三星総合技術院
- 2) K. Oe, and M. Yoshimoto, "GaAsBi semiconductor alloy towards temperature-insensitive wavelength laser diodes" 12th Int. Workshop Physics of Semiconductor Devices. (IWPSD 2003), Chennai, India, 2003 December.
- 3) S. Ura, K. Kintaka, R. Satoh, and H. Nishihara, "Integrated-optic wavelength-division-add/drop device for broad-band chip-to-chip optical interconnects" The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society, TuB1, Tucson, Arizona, October 26-30, 2003.

国際会議

- 1) N. Tsutsumi, Y. Shimizu, "Asymmetric Two Beam Coupling with High Optical Gain in External-Field-Free Photorefractive Polymeric Materials" *17th Symposium on Optical and Electrical Properties of Organic Materials, Fiber Preprints Japan* **58 (2)** p. 76, 2003, June (Kyoto)
- 2) N. Tsutsumi, T. Kawahira, W. Sakai, "Amplified Spontaneous Emission and Distributed Feedback Lasing from BTAPVB in Polymer Matrices" *17th Symposium on Optical and Electrical Properties of Organic Materials, Fiber Preprints Japan* **58 (2)** p. 83, 2003, June (Kyoto)
- 3) N. Tsutsumi, T. Kojima, M. Yagi, W. Sakai, "All-Optical Poling in Polymeric Materials" *17th Symposium on Optical and Electrical Properties of Organic Materials, Fiber Preprints Japan* **58 (2)** p. 88, 2003, June (Kyoto)
- 4) T. Shingu, W. Sakai, N. Tsutsumi, "□⁽²⁾ Holography in Polymeric Materials by All-optical Poling" *17th Symposium on Optical and Electrical Properties of Organic Materials, Fiber Preprints Japan* **58 (2)** p. 89, 2003, June (Kyoto)
- 5) N. Tsutsumi, "Periodic $\chi^{(2)}$ structures induced by all optical poling and their application to optical devices" *2nd Int'l Symp. On Molecular Synchronization for Design of New Materials System*, p. 133, 2003, July (Yokohama)
- 6) Naoto Tsutsumi, Tetsuya Kawahira, and Wataru Sakai, "Amplified Spontaneous Emission and Distributed Feedback Lasing from Conjugated Compound in Polymer Matrices" *OTF Technical Digest*, TuU3, 2003, October (Tucson)
- 7) Naoto Tsutsumi and Yusuke Shimizu, "Asymmetric Two Beam Coupling with High Optical Gain in External-Field-Free Photorefractive Polymeric Materials" *OTF Technical Digest*, MMM2, 2003, October (Tucson)
- 8) Naoto Tsutsumi and Yusuke Shimizu, "Asymmetric Two Beam Coupling with High Optical Gain in External-Field-Free Photorefractive Polymeric Materials" *Presentations Abstracts*, JFC2003, p. 18 2003, October (Awaji)
- 9) K. Yamashita, T. Hashimoto, K. Oe, K. Mune, R. Naitou, and A. Mochizuki, "New Fabrication Method of Core-Cladding Structure in Self-Written Waveguide by using Photosensitive Polyimide", *29th European*

Conference on Optical Communication, September 2003.

- 10) K. Oe, K. Yamashita, K. Mune, and A. Mochizuki, "New Waveguide Technique using Photosensitive Polyimide for Integrated Optics", *IEEE LEOS ANNUAL MEETING*, October 2003.
- 11) M. Yoshimoto, S. Murata, J. Saraie, and K.Oe, A.Chayahara , " Growth of metastable GaAsBi alloy by molecular beam epitaxy" *45th Electronic Materials Conf.* Salt Lake City, USA, 2003
- 12) M. Yoshimoto, Y. Yamamoto, W. Huang, H. Harima, and J. Saraie, "Wide bandgap of polycrystalline InN caused by a few percent incorporation of oxygen" *Technical Digest of 5th Int. Conf. Nitride Semiconductors*, Nara, Japan, 2003, pp.529.
- 13) M. Yoshimoto, Y. Yamamoto, and J. Saraie, " Fabrication of InN/Si heterojunction with rectifying characteristics" *Technical Digest of 5th Int. Conf. Nitride Semiconductors*, Nara, Japan, 2003.
- 14) K. Oe, and M. Yoshimoto, "GaAsBi semiconductor alloy towards temperature-insensitive wavelength laser diodes" *Proc. 12th Int. Workshop Phys. Semicond. Dev. (IWPSD 2003)*, Chennai, India, (Narosa Publishing House, 2003, New Delhi), pp.876-881.
- 15) K. Kintaka, J. Nishii, Y. Imaoka, J. Ohmori, S. Ura, R. Satoh, and H. Nishihara, "Optical waveguide for guided-mode-selective focusing grating coupler", *Frontiers in Optics (The 87th OSA Annual Meeting)*, WC1, Tucson, Arizona, October 5-9, 2003.
- 16) Y. Imaoka, J. Ohmori, M. Hamada, S. Ura, K. Kintaka, R. Satoh, and H. Nishihara, "Guided-mode-selective focusing grating coupler for optical add/drop multiplexing of free-space wave with guided waves", *9th Microoptics Conference*, L-2, Tokyo, Japan, October 29-31, 2003.
- 17) K. Yokota, R. Satoh, Y. Iwata, K. Fujimoto, S. Ura, and K. Kintaka, "Development of Au reflection film with high adhesion for optical interconnection between LSI chips", *36th International Symposium on Microelectronic*, WP5, Boston, Massachusetts, November 16-20, 2003.
- 18) Y. Awatsuji, N. Nishimura, and T. Kubota: "Analysis and evaluation of data-arrangements in digital optical parallel computing," *Optics in Computing 2003*, 143-145, (2003).
- 19) Y. Awatsuji, M. Sasada, N. Kawano, and T. Kubota: "Reflective micro optical element array fabricated by photofabrication technique," *The 9th Microoptics Conference (MOC'03) Technical Digest*, 214-217, (2003).

国内発表

- 1) 阿賀野勝昭, 坂井互, 堤直人, “分子アモルファスフォトリフラクティブ材料 [I] “ 第51回高分子年次大会予稿集 *Polymer Preprints, Japan*, 52(4) 752 (2003) (名古屋 名古屋国際会議場 5月)
- 2) 江口淳哉, 坂井互, 堤直人, “分子アモルファスフォトリフラクティブ材料 [II] “ 第51回高分子年次大会予稿集 *Polymer Preprints, Japan*, 52(4) 752 (2003) (名古屋 名古屋国際会議場 5月)
- 3) 新宮崇史, 坂井互, 堤直人, “オプティカルポーリングと $\chi^{(2)}$ ホログラフィー” 第51回高分子年次大会予稿集 *Polymer Preprints, Japan*, 52(4) 751 (2003) (名古屋 名古屋国際会議場 5月)
- 4) 阿賀野勝昭, 坂井互, 堤直人, “分子アモルファスフォトリフラクティブ材料 [I] “ 第51回高分子討論会 *Polymer Preprints, Japan*, 52(12) 3252-3253 (2003) (山口 山口大学 (吉田キャンパス) 9月)
- 5) 江口淳哉, 坂井互, 堤直人, “分子アモルファスフォトリフラクティブ材料 [II] “ 第51回高分子討論会 *Polymer Preprints, Japan*, 52(12) 3254-3255 (2003) (山口 山口大学 (吉田キャンパス) 9月)

月)

- 6) 新宮崇史, 坂井互, 堤直人, “オプティカルポーリングと $\chi^{(2)}$ ホログラフィー” 第51回高分子討論会 Polymer Preprints, Japan, 52(12) 3172-3173 (2003) (山口 山口大学 (吉田キャンパス) 9月)
- 7) 林大輔, 坂井互, 堤直人, “有機薄膜からのDFBレーザー発振” 第51回高分子討論会 Polymer Preprints, Japan, 52(12) 3174-3175 (2003) (山口 山口大学 (吉田キャンパス) 9月)
- 8) 山下兼一、橋本崇、尾江邦重、宗和範、内藤龍介、望月周、"感光性透明ポリイミドを用いた自己形成光導波路のコア-クラッド新形成技術"、第50回応用物理学関係連合講演会、2003年3月。
- 9) M. Yoshimoto, Y. Yamamoto, W. Huang, H. Harima, and J. Saraie "Wide bandgap of polycrystalline InN caused by a few percent incorporation of oxygen" Extended Abstracts 22 Electronic Materials Sympo., Moriyama, 2003, p.307.
- 10) M. Yoshimoto, S. Murata, J. Saraie, and K. Oe, "Growth of metastable GaAsBi alloy by molecular beam epitaxy" Extended Abstracts 22 Electronic Materials Sympo., Moriyama, 2003, p.131.
- 11) K. Taguchi, S. Yukumoto, A. Chayahara, Y. Horino, M. Yoshimoto, J. Saraie "Reduction of carbon impurity in SiN_x films deposited from organic source by use of radical beam deposition technique", Extended Abstracts 22 Electronic Materials Sympo., Moriyama, 2003, p.21.
- 12) 山本孔明、茶谷原昭義、吉本昌広、更家淳司 「RF-MBE法成長多結晶InNの禁制帯幅-In供給量依存性-」平成15年春季 第50回応用物理学関係連合講演会 28p-T-15
- 13) 田口貢士、茶谷原昭義、堀野裕治、吉本昌広、更家淳司 「有機液体原料を用いてラジカルビーム堆積法により形成した低炭素濃度SiN膜の構造」平成15年春季第50回応用物理学関係連合講演会 27a-ZX-13
- 14) 村田聡司、茶谷原昭義、吉本昌広、尾江邦重 「MBE法によるGaAs基板上GaAsBi混晶成長」平成15年春季 第50回応用物理学関係連合講演会 29a-YA-18
- 15) 竹原優志、吉本昌広、更家淳司、尾江邦重 「MBE法を用いたGaNAs成長の低温化」平成15年秋季 第64回応用物理学学会学術講演会 1p-K-9
- 16) 吉本昌広、山下兼一、村田聡司、竹原優志、更家淳司、尾江邦重 「MBE成長GaAs_{1-x}Bi_x混晶薄膜のランプアニール効果」平成15年秋季 第64回応用物理学学会学術講演会 31p-ZE-2
- 17) 栗本英治、山口智弘、播磨弘、吉本昌広、名西やすし 「分光学的手法によるInN結晶中の欠陥研究」平成15年秋季 第64回応用物理学学会学術講演会 31p-G-15
- 18) 田口貢士、行本聡、棚田祐介、吉本昌広、更家淳司 「有機液体を原料とした低炭素濃度SiN_x膜の電気的特性」平成15年秋季 第64回応用物理学学会学術講演会 31p-P3-30
- 19) 黄偉、田口貢士、吉本昌広、更家淳司 "Effect of annealing with capped SiN_x on the electric properties of InN grown by MBE" 平成15年秋季 第64回応用物理学学会学術講演会 31p-G-5
- 20) 中田俊武、堀野裕治、中嶋堅志郎、吉本昌広、西野茂弘 「SiCウエハの不純物分析」 SiCおよび関連ワイドギャップ半導体研究会第12回講演会 (2003年11月6-7日) 予稿集 P-53
- 21) 田口貢士、吉本昌広、更家淳司、「有機原料を用いた低炭素濃度窒化シリコン膜の堆積と特性」第14回日本材料学会半導体エレクトロニクス部門研究会 (平成15年10月27日)
- 22) 横田耕一 佐藤了平 岩田剛治 藤本公三 裏升吾, "高密度回路実装における光伝送用 Au 系反射薄膜の開発", 9th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" , 89, パシフィコ横浜 会議センター, 2/6-7, 2003.

- 23) 今岡良考 大森淳平 濱田芽衣 裏升吾 金高健二, "超広帯域チップ間光配線のための導波モード選択集光グレーティングカップラ", 第17回エレクトロニクス実装 学術講演大会, 14B-10, 東京電機大学神田キャンパス, 3/12-14, 2003.
- 24) 岡山文和 西尾謙三 裏升吾 西原浩 佐藤和郎 四谷任 岡野正登, "平板グレーティングレンズを用いた小型分光結像デバイス", 第50回応用物理学関係連合講演会, 28a-YS-7, 神奈川大学横浜キャンパス, 3/27-30, 2003.
- 25) 濱田芽衣 乗友太郎 西尾謙三 裏升吾, "単純汎用干渉露光による0.28mm周期グレーティングの精密周期制御", 第50回応用物理学関係連合講演会 28a-ZK-17, 神奈川大学横浜キャンパス, 3/27-30, 2003.
- 26) 裏升吾 石野勉 濱田芽衣 西原浩, "UVパルスレーザーを用いた単純汎用干渉露光による0.3mm周期グレーティングの作製", 第50回応用物理学関係連合講演会, 28a-ZK-18, 神奈川大学横浜キャンパス, 3/27-30, 2003.
- 27) 今岡良考 大森淳平 裏升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩, "導波モード選択集光グレーティングカップラ用薄膜光導波路の作製", 第50回応用物理学関係連合講演会, 28a-ZK-19, 神奈川大学横浜キャンパス, 3/27-30, 2003.
- 28) 栗辻安浩, 魚野雅弥, 久保田敏弘: "スリットを用いて記録するリップマンホログラムからの再生像の色変化の解析," 日本写真学会2003年度年次大会 講演要旨, 121-122, (2003).
- 29) 高岡俊允, 栗辻安浩, 久保田敏弘: "ガウシアン光強度分布を均一化するための反射型光学素子," 第28回光学シンポジウム 講演予稿集, 91-92, (2003).
- 30) 河野直樹, 高岡俊允, 笹田正樹, 栗辻安浩, 久保田敏弘: "光造形技術で作製する反射型光学素子," 第28回光学シンポジウム 講演予稿集, 93-96, (2003).
- 31) 小松 彩, 栗辻安浩, 久保田敏弘: "スリットを用いて記録するエッジリットリップマンホログラムの再生像特性の解析," 2003年度日本写真学会秋季大会・研究発表会 講演要旨, 62-63, (2003).
- 32) 栗辻安浩, 久保田敏弘: "ホログラフィによる3次元情報表示," *Optics Japan 2003 講演予稿集*, 160-161, (2003). [invited]
- 33) 河野直樹, 笹田正樹, 栗辻安浩, 久保田敏弘: "光造形技術で作製する3次元マイクロミラーアレイ," *Optics Japan 2003 講演予稿集*, 24-25, (2003).
- 34) 栗辻安浩, 小松 彩, 久保田敏弘: "超短パルスレーザーを用いたホログラフィによる光伝播の観察I-光伝播の動画像表示-," *Optics Japan 2003 講演予稿集*, 284-285, (2003).
- 35) 小松 彩, 栗辻安浩, 久保田敏弘: "超短パルスレーザーを用いたホログラフィによる光伝播の観察II-再生像特性の観察条件依存性-," *Optics Japan 2003 講演予稿集*, 286-287, (2003).

研究会報告

- 1) 「ホログラム光記録材料としての有機材料—非線形光学特性を生かして—」, 堤直人, 学術振興会情報科学用有機材料第142委員会B部会(インテリジェント有機材料)合同研究会資料 pp.25-32 (2003)
- 2) 山下兼一、宗和範、「自己形成光導波路」、第3回KIT-NITTO研究交流会、平成15年2月3日
- 3) 山下兼一、「自己形成光導波路の長尺化」、第4回KIT-NITTO研究交流会、平成15年10月3日
- 4) 裏升吾 "チップ間光配線のための導波路グレーティング対", 日本赤外線学会第34回定例研究会, IR-03-4, 機械振興会館, 2/14, 2003.

- 5) 裏升吾 "チップ間光多重化配線に向けて", 電子情報通信学会 光集積デバイス 技術時限研究専門委員会 第3回登別研究会, 議題8, 登別温泉ホテルまほろば, 10/3, 2003.
- 6) 岡山文和 西尾謙三 裏升吾 西原浩 佐藤和郎 四谷任 岡野正登 "平板グレーティングレンズを用いた小型分光結像デバイス" 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE 2002-176, 和歌山大学, 1/24, 2003.
- 7) 今岡良考 大森淳平 濱田 芽衣 裏 升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩 "導波モード選択集光グレーティングカップラ", 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, OCS 2003-84, 九州大学箱崎キャンパス, 11/13, 2003.
- 8) 濱田 芽衣 西尾謙三 裏 升吾 "干渉露光法を用いた0.28 μm 周期グレーティングの精密周期制御", 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2003-115, 神戸ベイシェラトンホテル&タワーズ, 12/18, 2003.

新聞報道

- 1) 日経産業新聞 2003年3月20日 「産学連携の現場」⑨
- 2) 日刊工業新聞 2003年7月14日 「モノシランガスを使わず安全・高品質シリコン窒化膜を形成」
- 3) 日経産業新聞 2003年9月25日号第1面 「分解能200ナノメートルに 次世代素子の顕微鏡開発 京都工繊大とエックスレイ」
- 4) 京都新聞 2004年1月1日 68面 「ナノテク、バイオ・・・に挑む」

展示会出展

(サブミクロン解像度極低温顕微光学分光装置)

- 1) (社)日本分析機器工業会主催 2003年分析展 (2003年9月10日から9月12日、幕張メッセ)
- 2) 日経ナノテクフェア2003 (2003年10月8日から10月10日、東京ビッグサイト)

(窒化シリコン絶縁膜の新規堆積法の開発)

- 1) 産学連携推進会議 (2003年6月7日から8日、京都国際会議場)
- 2) 中小企業ビジネスフェア (2003年9月10日から12日、インテックス大阪)
- 3) 国際フロンティア産業メッセ2003 (2003年10月6日から7日、神戸国際展示場)
- 4) 日経ナノテクフェア2003 (2003年10月8日から10月10日、東京ビッグサイト)

研究論文等リスト
(平成 16 年度)

研究論文

- 1) S. K. Yesodha, C. K. S. Pillai and N. Tsutsumi, "Stable polymeric materials for nonlinear optics: a review based on azobenzene systems" *Progress in Polym. Sci. (Review)*, **29(1)**, pp 45-74 (2004).
- 2) N. Tsutsumi and Y. Shimizu, "Asymmetric two beam coupling with high optical gain and high beam diffraction in external field free polymer composites" *Jpn. J. Appl. Phys.* **43(6A)**, pp.3466-3472 (2004).
- 3) N. Tsutsumi, M. Oya and W. Sakai, "Biodegradable Network Polyesters from Gluconolactone and Citric Acid" *Macromolecules*, **37**, pp.5971-5976 (2004).
- 4) N. Tsutsumi and A. Fujihara, "Pulsed laser induced spontaneous gratings on a surface of azobenzene polymer" *Appl. Phys. Lett.*, **85 (20)**, pp.4582-4584 (2004).
- 5) T. Nakamura, N. Tsutsumi, N. Juni, and H. Fujii, "Improvement of coupling-out efficiency in organic electroluminescent devices by addition of a diffusive layer" *J. Appl. Phys.* **96(11)**, pp.6016-6022 (2004).
- 6) T. Nakamura, H. Fujii, N. Juni, S. Nakanishi, M. Miyatake, and N. Tsutsumi, "Extraction of waveguided light by anisotropic scattering polarizer in organic EL devices" *Opt. Rev.* **11 (6)** pp.L370 - L377 (2004).
- 7) Md. Rafiqul Islam, Akira Hiroki, and Masayoshi Yamada, "Modeling and Analytical Calculation of Strain Induced by Gradual Variation of Composition in Bulk $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Mixed Crystal", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43(3)**, pp.1088-1093 (2004).
- 8) Md. Rafiqul Islam, P. Verma, Akira Hiroki, and Masayoshi Yamada, "Modeling of strain induced by compositional variation in wafer-shaped bulk mixed crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43(8)**, pp.5469-5476 (2004).
- 9) Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Applied Physics Letters* **85**, pp.1069-1071 (2004).
- 10) Y. Awatsuji, M. Sasada, N. Kawano, and T. Kubota, "Reflective microoptical element array fabricated by photofabrication technique," *Japanese Journal of Applied Physics* **43**, pp.5845-5849 (2004).
- 11) N. Nishimura, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Two-dimensional arrangement of spatial patterns representing numerical data in input images for effective use of hardware resources in digital optical computing system based on optical array logic," *Journal of Parallel and Distributed Computing* **64**, pp.1027-1040 (2004).
- 12) K. Yamashita, T. Hashimoto, K. Oe, K. Mune, R. Naitou, and A. Mochizuki, "Self-written waveguide structure in photosensitive polyimide resin fabricated by exposure and thermosetting process", *IEEE Photonics Technology Letters* **16(3)**, pp. 801-803 (2004).
- 13) K. Mune, A. Mochizuki, R. Naitou, K. Tagawa, Y. Shimizu, K. Yamashita, and K. Oe, "New fabrication method of self-written waveguide by using photosensitive polyimide" *Journal of Photopolymer Science and Technology* **17(2)**, pp. 189-193 (2004).
- 14) K. Yamashita, T. Kuro, K. Oe, K. Mune, T. Tagawa, R. Naitou, and A. Mochizuki, "Fabrication of self-written waveguide in photosensitive polyimide resin by controlling photochemical reaction of photosensitizer", *Applied Physics Letters* **85(18)**, pp. 3962-3964, (2004).
- 15) K. Yamashita, T. Hashimoto, K. Oe, K. Mune, R. Naitou, and A. Mochizuki, "Self-written waveguide structure in photosensitive polyimide resin fabricated by exposure and thermosetting process", *IEEE*

Photonics Technology Letters **16(3)**, (to be published in March 2004).

- 16) S. Hotta, M. Goto, R. Azumi, M. Inoue, M. Ichikawa, and Y. Taniguchi, "Crystal structures of thiophene/phenylene co-oligomers with different molecular shapes," *Chem. Mater.* **16(2)**, 237–241 (2004).
- 17) S. Hotta, "Thiophene-based semiconducting materials: Integrated functionalities of electronics and photonics," *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* **29(3)**, 985–990 (2004).
- 18) H. Yanagi, A. Yoshiki, S. Hotta, and S. Kobayashi, "Mirrorless lasing from thiophene/phenylene co-oligomer crystals based on stimulated resonance Raman scattering," *J. Appl. Phys.* **96(8)**, 4240–4244 (2004).
- 19) K. Ishikawa, F. Sasaki, S. Kobayashi, H. Yanagi, S. Hotta, and Y. Taniguchi, "Spectrally narrowed emissions in single crystals of 2,5-bis(4-biphenyl)thiophene," *J. Lumin.* **108(1–4)**, 127–130 (2004).
- 20) J. Casado, M. C. Ruiz Delgado, V. Hernández, J. T. López Navarrete, S. Hotta, F. Carrique, and J. R. Ramos-Barrado, "Study of the ac conductivity of α,α' -dimethyl sexithiophene in pristine and doped states," *J. Non-Cryst. Solids* **342(1–3)**, 146–151 (2004).
- 21) K. Suzuki, M. Yamaguchi, S. Hotta, N. Tanabe, and S. Yanagida, "A new alkyl-imidazole polymer prepared as an ionic polymer electrolyte by in situ polymerization of dye sensitized solar cells," *J. Photochem. Photobiol. A* **164(1–3)**, 81–85 (2004).
- 22) H. Muguruma, M. Ishikawa, J. Nakada, S. Hotta, and Y. Takahashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43(7A)**, L859–L861 (2004).
- 23) K. Kintaka, J. Nishii, Y. Imaoka, J. Ohmori, S. Ura, R. Satoh, and H. Nishihara, "A Guided-Mode-Selective Focusing Grating Coupler", *Photonics Technology Letters* **16(2)**, pp. 512-514 (2004).
- 24) K. Kintaka, J. Nishii, J. Ohmori, Y. Imaoka, M. Nishihara, S. Ura, R. Satoh, and H. Nishihara, "Integrated waveguide gratings for wavelength-demultiplexing of free space waves from guided waves", *Optics Express* **12(14)**, pp. 3072-3078 (2004).
- 25) S. Ura, F. Okayama, K. Takegami, K. Nishio, H. Nishihara, "Compact Spectroscopic Imaging Device Using Planar Grating Lens", *Japanese Journal of Applied Physics* **48(8B)**, pp.5886-5889 (2004).
- 26) M. Yoshimoto, W. Huang, Y. Takehara, J. Saraie, A. Chayahara, Y. Horino, and K. Oe, "New semiconductor GaNAsBi alloy grown by molecular beam epitaxy" *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) L845-L847.
- 27) K. Taguchi, M. Yoshimoto, and J. Saraie, "Dense Structure of SiN_x films fabricated by radical beam deposition method using hexamethyldisilazane" *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) L1403-L1405.
- 28) W. Huang, M. Yoshimoto, Y. Takehara, J. Saraie, K. Oe, "Ga_{N_y}As_{1-x-y}Bi_x alloy lattice matched to GaAs with 1.3 μ m photoluminescence emission", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) L1350-L1352
- 29) 田口貢士, 吉本昌広, 更家淳司, 「有機液体原料を用いたラジカルビーム堆積法による低炭素濃度シリコン窒化膜の堆積」 *材料*, **53** (2004) 1318-1322.

特許

- 1) 特願 2004-291103, 発明の名称:「感光性高分子膜表面上への規則的な2次元周期構造部の形成方法」
発明者:堤 直人, 藤原新, 片山茂, 宮内和彦, 出願人:堤 直人ならびに(日東電工);代表者 竹本 正道
(社長)出願日:2004年10月4日

- 2) 特願 2004-09382, 発明の名称:「デジタルホログラフィ装置及びデジタルホログラフィを用いた像再生方法」, 発明者: 栗辻安浩, 久保田敏弘, 笹田正樹, 出願人: 独立行政法人科学技術振興機構, 2004年3月26日.
- 3) 出願番号 2004-333884 「触媒CVD装置」 発明者 吉本昌広, 田口貢士, 岩出卓, 山下雅充、出願日:平成16年11月18日
- 4) 出願番号 2004-333885 「CVD方法及びCVD装置」 発明者 吉本昌広, 田口貢士, 岩出卓, 山下雅充、出願日:平成16年11月18日

招待講演

- 1) Y. Awatsuji, N. Nishimura, and T. Kubota, "Reduced operation kernel set correlation technique in digital optical computing and its performance evaluation," *EOS Topical Meeting Optics in Computing 2004*, pp.73-74, 2004.
- 2) A. Komatsu, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Dependence of reconstructed image characteristics on observation condition in light-in-flight holography," *2004 ICO International Conference Optics and Photonics in Technology Frontier*, pp.95-96, 2004.
- 3) N. Kawano, T. Takaoka, K. Mizumoto, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Compact beam-shaping module using a reflective aspherical-curve," *2004 ICO International Conference Optics and Photonics in Technology Frontier*, pp.149-150, 2004.
- 4) M. Sasada, A. Fujii, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography that can achieve instantaneous measurement," *2004 ICO International Conference Optics and Photonics in Technology Frontier*, pp.187-188, 2004.
- 5) Y. Awatsuji, Y. Shiuchi, A. Komatsu, and T. Kubota, "Design and fabrication of an holographic optical element lens for a femtosecond pulsed laser using the hologram computer-aided design tool," *2004 ICO International Conference Optics and Photonics in Technology Frontier*, pp.227-228, 2004.
- 6) M. Sasada, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography implemented by simple optical set up and effective use of image-sensor pixels," *2004 ICO International Conference Optics and Photonics in Technology Frontier*, pp.357-358, 2004.
- 7) Y. Awatsuji, A. Komatsu, M. Yamagiwa, and T. Kubota, "Motion pictures of propagating ultrashort laser pulses," *26th International Congress on High-Speed Photography and Photonics Abstract Program*, p.13, 2004.
- 8) 尾江邦重, 吉本昌広、「GaAsBi混晶の低温MOVPE,MBE成長」平成16年春季 第50回応用物理学関係連合講演会 29p-ZX-6.

国際会議

- 1) K. Yamashita, T. Kuro, K. Oe, K. Mune, R. Naitou, K. Tagawa, and A. Mochizuki, "Fabrication of all-solid core-cladding structure of self-written waveguide in photosensitive polyimide resin", *10th MicroOptics Conference*, p. 81, Jena, Germany, Sep., 2004.
- 2) K. Yamashita, K. Oe, T. Kita, O. Wada, Y. Wang, C. Geng, F. Scholz, and H. Schweizer: "Order-parameter

dependence of spontaneous electron accumulation at Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs studied by Raman-scattering and photoluminescence measurements” *27th International Conference on the Physics of Semiconductors*, (H5), FLAGSTAFF, ARIZONA, JUL., 2004

- 3) Mei Hamada, Taro Noritomo, Kenzo Nishio, and Shogo Ura, “Integration of fine-tuned 0.28μm period gratings for integrated-optic add/drop multiplexing”, *Technical Digest of Seventh International Symposium on Contemporary Photonics Technology*, pp. 97-98, Tokyo, Japan, January 14-16, 2004.
- 4) Kenji Kintaka, Junji Nishii, Junpei Ohmori, Masaaki Nishihara, Yoshitaka Imaoka, Shogo Ura, Ryohei Satoh, and Hiroshi Nishihara, “Optical waveguide device for demultiplexing of free space waves from guided waves”, *Integrated Photonics Research*, paper IFH3, San Francisco, California, June 30-July 2, 2004.
- 5) Shogo Ura, Fumikazu Okayama, Kouji Takegami, Kenzo Nishio, and Hiroshi Nishihara, “Compact optical device for one dimensional spectroscopic imaging”, *Technical Digest of Optics & Photonics in Technology Frontier (2004 ICO International Conference)*, pp. 559-560, Tokyo, Japan, July 12-15, 2004.
- 6) Junpei Ohmori, Yoshitaka Imaoka, Masaaki Nishihara, Shogo Ura, Kenji Kintaka, Ryohei Satoh, and Hiroshi Nishihara, “Integration of waveguide gratings for optical interconnects with add/drop multiplexing of free space waves”, *Technical Digest of Optics & Photonics in Technology Frontier (2004 ICO International Conference)*, pp. 561-562, Tokyo, Japan, July 12-15, 2004.
- 7) Shogo Ura, Mei Hamada, Takashi Shigei, Junpei Ohmori, Kenzo Nishio, and Kenji Kintaka, “Integration of different-guided-mode-coupling DBRs by interference exposure method for intra-board optical interconnects”, *10th Microoptics Conference*, paper G7, Jena, Germany, September 1-3, 2004.
- 8) Shogo Ura, Mei Hamada, Junpei Ohmori, Kenzo Nishio, and Kenji Kintaka, “Integrated-optic free-space-wave drop demultiplexer fabricated by using interference exposure method”, *Diffraction Optics and Micro-Optics*, paper DWA3, Rochester, New York, October 9-13, 2004.
- 9) M. Yoshimoto, W. Huang, Y. Takehara, A. Chayahara, J. Saraie and K. Oe, “New semiconductor GaNAsBi alloy grown by molecular beam epitaxy” *Abst. Materials Research Society 2004 Spring Meeting*, pp.238
- 10) W. Huang, M. Yoshimoto, Y. Takehara, J. Saraie, A. Chayahara, Y. Horino and K. Oe, “Molecular Beam of Quaternary Semiconductor Alloy GaNAsBi” *Proc. 16th Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials*, Kagoshima, Japan, IEEE Cat. No. 04CH37589, (IEEE, New York, 2004) p.501-504.
- 11) M. Yoshimoto, W. Huang, J. Saraie, and K.Oe, “MBE-grown GaNAsBi matched to GaAs with 1.3-μm emission wavelength” *Proc Materials Research Society 2004 Fall Meeting*.

国内発表

- 1) 江口淳哉, 坂井互, 堤直人, 西尾昭徳, 望月周, 「分子ガラスフォトリフラクティブ材料」 高分子年次大会 53, 1344 (2004) (神戸 神戸国際会議場 5月)
- 2) 村尾岳洋, 坂井互, 堤直人, 「フォトリフラクティブポリマー材料(1)」高分子年次大会 53, 1345 (2004) (神戸 神戸国際会議場 5月)
- 3) 伊藤雄規, 坂井互, 堤直人, 「フォトリフラクティブポリマー材料(2)」 高分子年次大会 53, 1346 (2004) (神戸 神戸国際会議場 5月)
- 4) 山本昌紀, 坂井互, 堤直人, 「有機薄膜からの分布帰還レーザー発振」 高分子年次大会 53, 1485 (2004) (神戸 神戸国際会議場 5月)

- 5) 藤原新, 坂井互, 堤直人, 「パルスレーザー照射によるアゾベンゼンポリマー薄膜の SRG 構造ならびにレーザー誘起周期構造」 高分子年次大会 53, 1688 (2004) (神戸 神戸国際会議場 5月)
- 6) 山本昌紀, 坂井互, 堤直人, 「有機薄膜からの分布帰還レーザー発振」 第 65 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 No.3, 1121, 3a-ZW-10, (2004) (仙台 東北学院大学 9月)
- 7) 藤原新, 坂井互, 堤直人, 「パルスレーザー照射によるアゾベンゼンポリマー薄膜の SRG 構造ならびにレーザー誘起周期構造」 第 65 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 No.3, 1122, 3p-ZW-2, (2004) (仙台 東北学院大学 9月)
- 8) 江口淳哉, 坂井互, 堤直人, 西尾昭徳, 望月周, 「分子ガラスフォトリフラクティブ材料」 高分子討論会 53, 4642 (2004) (札幌 北海道大学 9月)
- 9) 村尾岳洋, 坂井互, 堤直人, 「フォトリフラクティブポリマー材料(1)」 高分子討論会 53, 4650 (2004) (札幌 北海道大学 9月)
- 10) 伊藤雄規, 坂井互, 堤直人, 「フォトリフラクティブポリマー材料(2)」 高分子討論会 53, 4652 (2004) (札幌 北海道大学 9月)
- 11) 河野直樹, 高岡俊允, 水本和俊, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "ガウシアン光強度分布を均一化するための反射型光学素子の評価," 第 29 回光学シンポジウム 講演予稿集, pp.35-38, (2004).
- 12) 山際将具, 小松 彩, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "Light-in-flight ホログラフィを用いたグレーティングカプラ型アレイイルミネータからのフェムト秒光パルスの解析," 第 29 回光学シンポジウム 講演予稿集, pp.39-40, (2004).
- 13) 久保田敏弘, 小松 彩, 山際将具, 栗辻安浩, "超短パルスレーザーを用いたホログラフィによる光伝搬の可視化," 3 次元画像コンファレンス 2004 講演論文集, pp.81-84, (2004).
- 14) 山本大介, 小川 智, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "リップマンホログラムからの再生像を計算するための高速アルゴリズム," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.292-293, (2004).
- 15) 山本大介, 小川 智, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "ヘッドアップディスプレイのためのシリンダカルレンズを用いて再生するリップマンホログラム再生像の歪み補正," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.294-295, (2004).
- 16) 河野直樹, 高岡俊允, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "ガウスビーム整形ミラーの反射曲面の次数に対するビーム整形特性," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.362-363, (2004).
- 17) 藤井 淳, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "並列準 3 段階位相シフトデジタルホログラフィ," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.392-393, (2004).
- 18) 山本大介, 小川 智, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "ヘッドアップディスプレイのためのシリンダカルレンズを用いて再生するリップマンホログラム再生像の特性解析," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.398-399, (2004).
- 19) 小松 彩, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "超短パルスレーザーを用いたホログラフィによる光伝播の観察 III -再生像の解像力評価-, " Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.524-525, (2004).
- 20) 山際将具, 小松 彩, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "Light-in-flight ホログラフィで観察される集積型アレイイルミネータからのフェムト秒光パルス列の再生像の速度解析," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.526-527, (2004).
- 21) 藤井 淳, 笹田正樹, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "並列準位相シフトデジタルホログラフィにおける干渉縞離散情報の有効利用法," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.542-543, (2004).
- 22) 藤井 淳, 笹田正樹, 栗辻安浩, 久保田敏弘, "位相シフトアレイデバイス-撮像素子集積型デバイスを用いる並列準位相シフトデジタルホログラフィ," Optics Japan 2004 講演予稿集, pp.584-585, (2004).
- 23) 栗辻安浩, 藤井 淳, 笹田正樹, 久保田敏弘, "並列位相シフトデジタルホログラフィ," 2004 年度 日本写

真学会秋季大会・研究発表会 講演要旨, pp.80-81, (2004).

- 24) 石野 崇, 小松知修, 則末智久, 宮田貴章(Qui Tran-Cong), 山際将具, 栗辻安浩, "可視光のパターン照射で誘起・制御した分離構造の観察," 第 14 回「非線形反応と協同現象」研究会 講演予稿集, p.21, (2004).
- 25) 畔智之、山下兼一、尾江邦重、宗和範、内藤龍介、田河憲一、望月周、「感光性ポリイミドの光化学反応制御による自己形成導波路の長尺化」、第 51 回応用物理学関係連合講演会、(28a-N-3)、東京工科大学、八王子市、2004 年 3 月
- 26) 宗和範、望月周、内藤龍介、田河憲一、清水裕介、畔智之、尾江邦重、山下兼一、「感光性ポリイミドによる自己形成光導波路の新規作製法」、The 21st Conference on Photopolymer Science and Technology、(B1-01)、千葉大学、千葉市、2004 年 6 月
- 27) 畔智之、山下兼一、尾江邦重、宗和範、内藤龍介、田河憲一、望月周、「微小コア径を持った感光性ポリイミド自己形成導波路の新規作製法」、第 65 回応用物理学会学術講演会、(1a-ZM-2)、東北学院大学、仙台市、2004 年 9 月
- 28) 田中良宜、江口宗利、尾江邦重 「光ファイバ通信における戻り光誘起雑音の影響」電子情報通信学会 2004 年ソサイエティ大会、(B-10-55)、徳島市、2004 年 9 月
- 29) 守友連一・金内伸義・尾江邦重、「MMF 光伝送におけるスペクトルノイズの影響の検討」 電子情報通信学会 2004 年総合大会 (B-13-11)、東京都、2004 年 3 月
- 30) 黒田晃弘 佐藤了平 岩田剛治 横田耕一 藤本公三 裏升吾 金高健二、「高密度光・電子複合モジュール用高反射率・高接着 Ag 系反射膜の開発」、10th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", pp. 369-374 (2004).
- 31) 大森淳平 今岡良考 西原正輝 裏升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩、「空間光アドロップ光導波路配線用グレーティングの集積化」、第 51 回応用物理学関係連合講演会、29a-ZC-11 (2004).
- 32) 大森淳平 今岡良考 西原正輝 裏升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩、「チップ間光配線用光アドロップ導波路デバイスの作製」、Optics Japan 2004, 4pD2 (2004).
- 33) M. Yoshimoto, W. Huang, Y. Takehara, J. Saraie, and K. Oe, "Molecular beam epitaxy of quaternary semiconductore alloy GaNAsBi" Extended Abstracts 23rd Electronic Materials Sympo., Izu-Nagaoka, 2004, p.185-186.
- 34) T. Yamao, K. Taguchi, M. Yoshimoto and S. Fujita, "Potential of SiN_x films fabricated by radical-beam deposition technique for passivation of organic devices" Extended Abstracts 23rd Electronic Materials Sympo., Izu-Nagaoka, 2004, p.53-54.
- 35) 山雄健史, 藤田静雄, 田口貢士, 吉本昌広、「ラジカルビーム堆積法による低炭素濃度 SiN_x 膜の有機デバイスの封止膜への応用」平成 16 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会
- 36) 田口貢士, 吉本昌広, 更家淳司、「有機原料を用いたラジカルビーム堆積法における SiN_x 膜の低酸素化の機構」平成 16 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会 30p-D-21
- 37) 吉本昌広, W. Huang, 竹原優志, 更家淳司, 尾江邦重, 茶谷原昭義, 堀野裕治、「4 元混晶半導体 GaNAsBi の MBE 成長」平成 16 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会 30p-YG-12
- 38) 竹原優志, 吉本昌広, 尾江邦重、「MBE 法を用いた GaNAs 成長の低温化 II」平成 16 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会 30p-YG-11
- 39) 黄偉, 吉本昌広, 竹原優志, 更家淳司, 尾江邦重、「GaAs に格子整合した GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x の MBE 成長」平成 16 年秋季 第 65 回応用物理学会学術講演会 1a-P1-13

研究報告会

- 1) 堤直人, “有機材料と体積ホログラム光記録材料” 2004 年度第 3 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会 *HODIC Circular 24*, No.4, pp.23-31, (2004). [invited]
- 2) 堤直人, “ナノ構造の作製と有機光デバイスへの応用” 京都工芸繊維大学公開講座, 京都工芸繊維大学総合研究棟多目的ホール, 平成 17 年 1 月 13 日.[invited]
- 3) 小松 彩, 栗辻安浩, 久保田敏弘, “超短パルスレーザーを用いたホログラフィによる光伝播の観察,” 2004 年度第 3 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会/応用光学懇談会第 126 回講演会 *HODIC Circular 24*, No.4, pp.2-9, (2004). [invited]
- 4) 久保田敏弘, “ホログラフィーによる 3 次元ディスプレイの動向と展望,” テラ光情報技術フォーラム 第 7 回講演会、大阪科学技術センター、2004 年 10 月 19 日[invited]
- 5) 堀田収, “有機レーザー材料：開発と物性研究そしてデバイス化,” 情報科学用有機材料第 142 委員会 C 部会 (光エレクトロニクス), 東京工業大学国際交流会館多目的ホール, 平成 16 年 7 月 16 日. [invited]
- 6) 堀田収, “有機トランジスタと有機レーザー：材料開発の歴史と将来展望,” 京都工芸繊維大学公開講座, 京都工芸繊維大学総合研究棟多目的ホール, 平成 17 年 1 月 13 日. [invited]
- 7) 堀田収, “有機トランジスタ：材料開発の歴史とデバイス応用に向けた将来展望,” 有機フレキシブルデバイス研究会, 名古屋大学, 平成 17 年 1 月 28 日. [invited]

展示会出展

- 1) 堤研究室, “第 11 回大学ホログラフィー展” (ホログラフィックディスプレイ研究会主催, 2004 年 11 月 19 日～11 月 22 日、京都工芸繊維大学 総合研究棟)
- 2) 久保田敏弘, “ホログラフィー ー光が創る科学と芸術の不思議な世界ー” (久保田敏弘 ホログラム展、2004 年 8 月 19 日～8 月 29 日、千葉県立現代産業科学館).
- 3) 久保田研究室, “第 11 回大学ホログラフィー展” (ホログラフィックディスプレイ研究会主催, 2004 年 11 月 19 日～11 月 22 日、京都工芸繊維大学 総合研究棟)

研究論文等リスト
(平成 17年度)

- 1) N. Tsutsumi and T. Shingu, “ $\chi^{(2)}$ Holography Induced by All-Optical Poling” *Chem. Phys. Lett.* **403(4-6)**, pp.420-424 (2005).
- 2) N. Tsutsumi and A. Fujihara, “Tunable Distributed Feedback Lasing with Narrowed Emission Using Holographic Dynamic Gratings in Polymeric Waveguide” *Appl. Phys. Lett.* **86**, 061101 (3 pages) (2005).
- 3) T. Nakamura and N. Tsutsumi, N. Juni and H. Fujii, “Thin film waveguiding mode light extraction in organic electroluminescent device using high refractive index substrate” *J. Appl. Phys.* **97**, 054505 (6pages) (2005).
- 4) N. Tsutsumi, J. Eguchi, and W. Sakai, “High performance photorefractive molecular glass composites in reflection gratings” *Chem. Phys. Lett.* **408 (4-6)** pp.269-273 (2005).
- 5) N. Tsutsumi, A. Ueyasu, W. Sakai, and C. K. Chiang, “Crystalline Structures and Ferroelectric Properties of Ultrathin Films of Vinylidene Fluoride and Trifluoroethylene Copolymer” *Thin Solid Films* **483(1-2)**, pp.340-345 (2005).
- 6) N. Tsutsumi, T. Murao, and W. Sakai, “Photorefractive Response of Polymeric Composites with Pendant Triphenyl Amine Moiety” *Macromolecules* **38(17)**, pp.7521-7523 (2005).
- 7) Y. Awatsuji, A. Komatsu, M. Yamagiwa, and T. Kubota, “Motion pictures of propagating ultrashort laser pulses”, *Proc. SPIE* **5580**, pp.543-550 (2005).
- 8) M. Yamagiwa, A. Komatsu, Y. Awatsuji, and T. Kubota, “Observation and analysis of the propagating femtosecond light pulse train generated from an integrated array illuminator using light-in-flight recording by holography”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **11(2)**, pp.510-518 (2005)
- 9) M. Yamagiwa, A. Komatsu, Y. Awatsuji, and T. Kubota, “Observation of propagating femtosecond light pulse train generated by an integrated array illuminator as a spatially and temporally continuous motion picture”, *Optics Express* **13(3)**, pp.3296-3302 (2005).
- 10) T.Kubota and Y.Awatsuji, “Femtosecond motion picture”, *IEICE Electronics Express* **2(9)**, pp.298-304(2005).
- 11) A. Komatsu, Y. Awatsuji, and T. Kubota, “Dependence of reconstructed image characteristics on observation condition in light-in-flight recording by holography”, *J. Opt. Soc. Amer. A* **22(8)**, pp.1678-1682 (2005).
- 12) K. Yamashita, T. Kuro, K. Oe, K. Mune, T. Hikita, and A. Mochizuki, "Propagation-mode-controlled fabrication of self-written waveguide in photosensitive polyimide for singlemode operation", *IEEE Photonics Technology Letters* **17(4)**, pp. 786-788, Apr. 2005.
- 13) K. Yamashita, K. Oe, T. Kita, O. Wada, Y. Wang, C. Geng, F. Scholz, and H. Schweizer, "Electronic structure of ordered Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs heterointerface studied by Raman-scattering and photoluminescence-excitation measurements", *Japanese Journal of Applied Physics Part 1* **44(10)**, pp. 7390-7394, Oct. 2005.
- 14) K. Yamashita, M. Yoshimoto, and K. Oe, "Temperature-insensitive refractive index of GaAsBi alloy for laser diode in WDM optical communication", *Physica Status Solidi (c)*, (to be published)..
- 15) Junpei Ohmori, Yoshitaka Imaoka, Shogo Ura, Kenji Kintaka, Ryohei Satoh, and Hiroshi Nishihara, “Integrated-optic add/drop multiplexing of free-space waves for chip-to-chip optical interconnecting board”,

Japanese Journal of Applied Physics **44(11)**, 7987-7992 (2005).

- 16) 佐藤了平 岩田剛治 黒田晃弘 横田耕一 中川浩一 裏升吾 金高健二, “次世代光・電子システムにおける高耐熱性 Ag 系反射薄膜に関する研究”, *エレクトロニクス実装学会誌*, vol. 8, no. 6, pp. 502-507 (2005).
- 17) M. Yoshimoto, W. Huang, J. Saraie, and K.Oe, MBE-grown GaNAsBi matched to GaAs with 1.3- μm emission wavelength, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **829** (2005) B11.6.1-B11.6.6.
- 18) G. Feng, M. Yoshimoto, K. Oe, A. Chayahara and Y. Horino, New III-V semiconductor InGaAsBi alloy grown by molecular beam epitaxy, *Jpn J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L1161-L1163.
- 19) W. Huang, K. Oe, G. Feng, M.Yoshimoto, Molecular-beam epitaxy and characteristics of GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x *J. Appl. Phys.* **98** (2005) 053505.
- 20) Y. Takehara, M. Yoshimoto, W.Huang, J. Saraie, K. Oe, A. Chayahara, Y. Horino, Lattice distortion of GaAsBi alloy grown on GaAs by molecular beam epitaxy, *Jpn J. Appl. Phys.* **45** (2006) 67-69.

総説

- 1) 堤直人“光ポーリングと $\chi^{(2)}$ 構造形成”高分子加工 54(3) pp.18-25 (2005)

特許

- 1) 特願 2005□124560, 発明の名称:「波長可変レーザー発振装置」, 発明者: 堤 直人, 藤原 新, 出願人: 国立大学法人京都工芸繊維大学, 出願日: 2005 年 4 月 22 日
- 2) 出願番号: 2005-215848 「積層型光導波路の製法」 発明者: 尾江邦重、山下兼一、内藤龍介、疋田貴巳、宗和範、出願年月日: 2005/7/26
- 3) 特願 2005-330597 「SiC 蛍光体および発光ダイオード」 発明者 上山智、天野浩、岩谷素顕、吉本昌広、木下博之 出願日 平成 17 年 11 月 18 日

招待講演

- 1) T. Kubota, A. Komatsu, M. Yamagiwa, and Y. Awatsuji, “Observation of femtosecond light pulse propagating in space and time”, *International Conference on Holography, Optical Recording, and Processing of Information (Holography 2005)*, Abstracts 123 (Varna, Bulgaria, May 2005). [invited]
- 2) Masahiro Yoshimoto, Wei Huang, Gan Feng and Kunishige Oe, GaNAsBi Semiconductor Alloy with Temperature-Insensitive Bandgap, *Materials Research Society 2005 Fall Meeting, Symposium EE: Progress in Semiconductor Materials V—Novel Materials and Electronic and Optoelectronic Applications*, Boston, November 27 - December 2, 2005, EE.11.6.

国際会議

- 1) Y. Awatsuji, K. Komai, M. Yamagiwa, A. Komatsu, and T. Kubota, "Motion picture of three-dimensional image of propagating femtosecond laser pulse", *High-Speed Photography and Photonics 2005*, (San Diego, U.S.A., Aug. 2005).
- 2) T. Kuro, K. Yamashita, K. Oe, K. Mune, T. Hikita, and A. Mochizuki, "Fabrication method of singlemode self-written waveguide with constant core diameter in photosensitive polyimide", *8th International Symposium on Contemporary Photonics Technology*, pp. 115-116, Tokyo, Japan, Jan., 2005.
- 3) K. Yamashita, M. Yoshimoto and K. Oe, "Temperature-insensitive refractive index of GaAsBi alloy for laser diode in WDM optical communication", *32nd International Symposium on Compound Semiconductors*, WE P16, Rust, Germany, Sep., 2005.
- 4) Takuo Asada, Satoshi Yamaguchi, Kenzo Nishio, Atsushi Horii, Kenji Kintaka, and Shogo Ura, "Simultaneous interference exposure of different period DBRs for intraboard optical interconnects using WDM", *Technical Digest 11th Microoptics Conference*, pp. 154-155, Tokyo, Japan, October 30-November 2, 2005.
- 5) Atsushi Horii, Kouji Shinoda, Shogo Ura, Kenji Kintaka, Ryohei Satoh, and Hiroshi Nishihara, "0.5Gbit/s signal transmission in thin-film waveguide with free-space-wave add-drop multiplexers", *Technical Digest International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005*, paper CWK1-4, Tokyo, Japan, July 11-15, 2005.
- 6) Kenji Kintaka, Junji Nishii, Atsushi Horii, Junpei Ohmori, Shogo Ura, Ryohei Satoh, and Hiroshi Nishihara, "Optical signal transmission with waveguide add-drop multiplexer of free-space waves for optical interconnects", *Technical Digest Integrated Photonics Research and Applications*, paper ItuF2, San Diego, California, April 13-15, 2005.
- 7) Yohjiro Kawai, Tomohiko Maeda, Yoshihiro Nakamura, Motoaki Iwaya¹, Satoshi Kamiyama¹, Hiroshi Amano¹, Isamu Akasaki¹, Masahiro Yoshimoto, Tomoaki Furusyo, Hiroyuki Kinoshita, Hiromu Shiomi, 6H-SiC Homoepitaxial growth and optical property of boron-and nitrogen-doped donor acceptor pair (DAP) states on 1°-off substrate by closed-space sublimation method, *Int'l Conf. SiC and Rel. Mat.* 2005, September 18-23, Pittsburgh, MPG2/EPI1-28
- 8) K. Yamashita, M. Yoshimoto and K. Oe, Temperature-insensitive refractive index of GaAsBi alloy for laser diode in WDM optical communication, *32nd ISCS (ISCS-2005)* September 18 - 22, 2005, Rust, We P16.
- 9) Kunishige Oe, Gan Feng, and Masahiro Yoshimoto, GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x, Semiconductor alloy for temperature-insensitive-wavelength Lasers in WDM optical communication, *18th Annual Meeting IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS)*, 23-27 October 2005, Sydney, ThP2
- 10) Kohshi Taguchi, Masamichi Yamashita, Mitsuo Yamazaki, Akiyoshi Chayahara, Yuji Horino, Takashi Iwade, Masahiro Yoshimoto, Radical beam deposition of silicon nitride towards passivation for organic devices, *2005 Materials Research Society Fall Meeting, Symposium D: Organic and Nanostructured Composite Photovoltaics and Solid-State Lighting*, Boston, November 27 - December 2, 2005, D.13.22,
- 11) Tomohiko Maeda, Yoshihiro Nakamura, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki, Tomoaki Furusho, Hiroyuki Kinoshita and Masahiro Yoshimoto, High-speed and high-quality epitaxial growth of 6H-SiC by closed sublimation method, Materials Research Society 2005 Fall Meeting, Symposium EE: *Progress in Semiconductor Materials V—Novel Materials and Electronic and Optoelectronic Applications*, Boston, November 27 - December 2, 2005, EE.12.12.

- 12) Masahiro Yoshimoto, Wei Huang, Gan Feng, Kunishige Oe, New semiconductor alloy GaNAsBi with temperature-insensitive bandgap, *6th International Conference on Nitride Semiconductors* August 28 – September 2, 2005, Bremen, Germany Tu-G2-6

国内発表

- 1) 藤原新, 坂井互, 堤直人, 「波長可変有機DFBレーザー」, 第52回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 No. 3, 1428 (1a-YB-4), 埼玉大学、さいたま市、2005年3月
- 2) 藤原新, 山本昌紀, 堤直人, 「波長可変有機DFBレーザー」, *Fiber Preprints, Japan*, 60(2), 53, (2005) (Symposium), 長良川国際会議場, 岐阜市, 2005年6月
- 3) 中島祥人, 坂井互, 堤直人, 「高分子フォトリフラクティブ材料」, *Fiber Preprints, Japan*, 60(2), 54, (2005) (Symposium), 長良川国際会議場, 岐阜市, 2005年6月
- 4) 藤原新, 坂井互, 堤直人, 「DFB有機色素レーザー」, *Polymer Preprints, Japan* 54, 4360 (2005), 高分子討論会, 山形大学小白川キャンパス, 山形市, 2005年9月
- 5) 駒井和斉, 小松彩, 栗辻安浩, 久保田敏弘, “Light-in-flight ホログラフィによるフェムト秒光パルス伝搬の3次元的な観察”, 3次元画像コンファレンス2005 講演論文集, pp.61-64 (2005).
- 6) 山際将具, 駒井和斉, 栗辻安浩, 久保田敏弘, “Light-in-flight ホログラフィで観察される超短光パルスの再生像の歪補正”, *Optics Japan 2005* 講演予稿集, pp.290-291 (2005).
- 7) 駒井和斉, 山際将具, 栗辻安浩, 久保田敏弘, “Light-in-flight ホログラフィにより得られる3次元再生像の歪み解析”, *Optics Japan 2005* 講演予稿集, pp.254-255 (2005).
- 8) 山下兼一、畔智之、尾江邦重、宗和範、疋田貴巳、望月周、「感光性ポリイミドを用いたシングルモード自己形成導波路の作製手法」、第25回レーザ学会年次大会、(20aI-9)、けいはんなプラザ、京都府精華町、2005年1月
- 9) 藤本修平、坂田勇男、福島正憲、柳久雄、山下兼一、尾江邦重、「色素分散ポリマー薄膜の可視及び近赤外光増幅特性」、第52回応用物理学関係連合講演会、(1a-YB-1)、埼玉大学、さいたま市、2005年3月
- 10) 尾江邦重、山下兼一、宗和範、疋田貴巳、内藤龍介、望月周、「感光性ポリイミドを用いた自己形成光導波路」、第63回レーザ加工学会、pp. 48 - 51、クリエイション・コア東大阪、東大阪市、2005年5月
- 11) 畔智之、山下兼一、尾江邦重、柳久雄、「有機発光材料を用いた近赤外 ASE 発光の低閾値化」、第66回応用物理学学会学術講演会、(8p-V-20)、徳島大学、徳島市、2005年9月
- 12) 山下兼一、長谷建吾、湯浅一範、尾江邦重、宗和範、疋田貴巳、内藤龍介、望月周、「紫外線効果樹脂を用いた異種材料間縦型方向性結合デバイスの作製手法」、第66回応用物理学学会学術講演会、(9a-T-4)、徳島大学、徳島市、2005年9月
- 13) 山下兼一、吉本昌広、尾江邦重、「GaAsBi 混晶の屈折率スペクトル温度依存性」、第66回応用物理学学会学術講演会、(10p-ZA-2)、徳島大学、徳島市、2005年9月
- 14) 藤本修平、坂田勇男、柳久雄、山下兼一、尾江邦重、「色素分散ポリマー薄膜導波路の発光増幅利得特性」、第16回光物性研究会、(III-A-85)、大阪市立大学、大阪市、2005年12月
- 15) 裏升吾 濱田芽衣 大森淳平 西尾謙三 金高健二, "チップ間波長多重光配線用異導波モード結合 DBR の干渉露光集積化", レーザ学会学術講演会第25回年次大会, 20p I 4, けいはんなプラザ, 1/20-21, 2005.

- 16) 堀井篤 大森淳平 裏升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩, "空間光アドドロップ光導波路配線を用いた 0.1Gbps 伝送実験", 第 19 回エレクトロニクス実装学術講演大会, 東京理科大学野田校舎, 16C-7, 3/16-18, 2005.
- 17) 堀井篤 今岡良考 裏升吾 金高健二, "空間光アドドロップ光導波路配線用グレーティングカップラのリフトオフ作製", 第 52 回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZR-3, 埼玉大学, 3/29-4/1, 2005.
- 18) 麻田卓男 山口智史 堀井篤 西尾謙三 裏升吾 金高健二, "チップ間波長多重光配線用異周期 DBR の円柱ミラーによる一括干渉露光", 第 66 回応用物理学学会学術講演会, 9a-T-9, 徳島大学, 9/7-9/11, 2005.
- 19) 井関雅照 西尾謙三 裏升吾, "遠紫外光狭窄用膜厚テーパ SiO₂ 導波路の作製", Optics Japan 2005, 24aB4, 学術総合センター, 11/23-25, 2005.
- 20) M. Yoshimoto, W. Huang, G. Feng and K. Oe, "New semiconductor alloy GaNAsBi with temperature-insensitive bandgap", 24th Electronic Materials Sympo. (EMS-24), Matsuyama, 4-6 July, 2005, D1.
- 21) 福島正宏、吉本昌広、黄偉、尾江邦重、低温MBE成長 GaN_xAs_{1-x} 混晶薄膜のランプアニール効果、平成 17 年春季 第 52 回応用物理学関係連合講演会 30a-L-19
- 22) 馮 淦、吉本昌広、黄 偉、尾江邦重、Yitem GaN_yAs_{1-x-y}Bi_x におけるホトルミネセンス発光波長と Bi および N 組成の関係、平成 17 年春季 第 52 回応用物理学関係連合講演会 31a-ZM-14
- 23) 竹原優志、黄偉、尾江邦重、更家淳司、吉本昌広、MBE 成長した GaAsBi 混晶の格子歪、平成 17 年春季 第 52 回応用物理学関係連合講演会 31a-ZM-15
- 24) 馮 淦、吉本 昌広、尾江 邦重、茶谷原昭義、堀野裕治、4元混晶 InGaAsBi の MBE 成長、平成 17 年秋季 第 66 回応用物理学学会学術講演会 10p-ZA-1.
- 25) 山下兼一、吉本昌広、尾江邦重、GaAsBi 混晶の屈折率スペクトル温度依存性、平成 17 年秋季 第 66 回応用物理学学会学術講演会 10p-ZA-2M.

研究報告会

- 1) 久保田敏弘, "ホログラムー技術開発と応用動向ー", 近畿化学協会エレクトロニクス部会 平成 17 年度第 3 回研究会, 大阪科学技術センター, 2006.3.2. [invited]
- 2) 久保田敏弘, "最近の銀塩乳剤の動向", 平成 17 年度第 4 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 産総研つくばセンター, 2006.3.3. [invited]
- 3) 大森淳平 今岡良考 裏升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩, "チップ間光配線用空間光アドドロップ導波路デバイスの作製", 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE 2004-145, 大阪大学吹田キャンパス, 1/27, 2005.
- 4) 堀井篤 篠田浩司 裏升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩, "空間光アドドロップ光導波路配線を用いた 0.5Gbit/s 信号伝送実験", 輻射科学研究会, RS 05-06, 京都工芸繊維大学, 7/29, 2005.

展示会出展

- 1) 久保田研究室, "ホログラムー光が創る不思議な 3 次元空間の世界" (応用物理学会関西支部世界物理年企画 物理イベント展示, 2005 年 12 月 10 日, 京都市青少年科学センター)

研究論文等リスト
(平成 18 年度)

- 1) Naoto Tsutsumi, Koji Nakatani, “ $\chi^{(2)}$ polarization induced in molecular glass of conjugated compound by all-optical poling” *Optics Communications* **259(2)**, pp.852-855 (2006).
- 2) N. Tsutsumi, J. Eguchi, W. Sakai, “Asymmetric energy transfer and diffraction efficiency of novel molecular glass with carbazole moiety” *Optical Materials* **29** pp.435-438 (2006).
- 3) Naoto Tsutsumi, Masaki Yamamoto, “Threshold reduction of tunable organic laser using effective energy transfer” *J. Opt. Soc. Am.* **23 (5)** pp. 842-845 (2006).
- 4) Naomi Eidelman, Naoto Tsutsumi, C. K. Chiang, “Micro FTIR Mapping of Nanometer Ferroelectric Polymer Films” *Macromol. Rapid Commun.* **27**, pp.558–562 (2006).
- 5) Toshitaka Nakamura, Hironaka Fujii, Noriyuki Juni, Naoto Tsutsumi, “Enhanced coupling of light from organic electroluminescent device using diffusive particle dispersed high refractive index resin substrate” *Optical Review* **13 (2)**, pp.104-110 (2006).
- 6) Minoru Nagata, Keisuke Kato, Wataru Sakai, Naoto Tsutsumi, “Biodegradable Network Elastomeric Polyesters from Multifunctional Aliphatic Carboxylic Acids such as Tricarballic Acid and meso-1,2,3,4-Butanetetracarboxylic Acid and Poly(ϵ -caprolactone) Diols” *Macromolecular Bioscience* **6**, pp.333-339 (2006).
- 7) Naoto Tsutsumi, Arata Fujihara, Daisuke Hayashi, “Tunable distributed feedback lasing with threshold in the nJ range in an organic guest-host polymeric waveguide” *Applied Optics* **45(22)**, pp. 5748-5751 (2006).
- 8) Naoto Tsutsumi, Yusuke Shimizu, Junya Eguchi, Takehiro Murao, Yoshito Nakajima, Wataru Sakai, “Photorefractive Performances in Polymeric and Molecular Glass Composites for Optical Memories” *Proceedings of SPIE* **6343** 63432V (14 pages) (2006).
- 9) R. P. Ortiz, J. Casado, V. Hernández, J. T. López Navarrete, E. Ortí, P. M. Viruela, B. Milián, S. Hotta, G. Zotti, S. Zecchin, and B. Vercelli, “Magnetic properties of quinoidal oligothiophenes: More than good candidates for ambipolar organic semiconductors?” *Adv. Funct. Mater.* **16(4)**, 531–536 (2006).
- 10) K. Bando, T. Nakamura, and Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, and S. Hotta, “Origin of the amplified spontaneous emission from thiophene/phenylene co-oligomer single crystals: Towards co-oligomer lasers,” *J. Appl. Phys.* **99(1)**, 013518 (2006).
- 11) K. Shimizu, Y. Mori, and S. Hotta, “Laser oscillation from hexagonal crystals of a thiophene/phenylene co-oligomer,” *J. Appl. Phys.* **99(6)**, 063505 (2006).
- 12) F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, H. Yanagi, S. Hotta, M. Ichikawa, and Y. Taniguchi, “Pulse-shaped emissions with time delay in single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers,” *J. J. Appl. Phys.* **45(45)**, L1206–1208 (2006).
- 13) H. Muguruma and S. Hotta, “Conformational polymorphism and thermochemical analysis of 5,5'-bis[(2,2,5,5-tetramethyl-1-aza-2,5-disila-1-cyclopentyl)ethyl] -2,2':5', 2'':5'',2''' -quaterthiophene,” *J. Phys. Chem.* **110(46)**, 23075–23080 (2006).
- 14) T. Yamao, Y. Kawasaki, S. Ota, S. Hotta, and R. Azumi, “Search of optimum conditions for sublimation growth of thiophene/phenylene co-oligomer crystals,” *Macromol. Symp.* **242**, 315–318 (2006).

- 15) S. Hotta, M. Goto, and R. Azumi, "Peculiar crystal structure of a thiophene/phenylene co-oligomer of 2,5-bis(4'-methoxybiphenyl-4-yl)thiophene," *Chem. Lett.* **36**(2), 270–271 (2007).
- 16) T. Yamao, S. Ota, T. Miki, S. Hotta, and R. Azumi, "Improved sublimation growth of single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers," *Thin Solid Films*, in press.
- 17) T. Yamao, T. Ohira, S. Ota, and S. Hotta, "Polarized measurements of spectrally-narrowed emissions from a single crystal of a thiophene/phenylene co-oligomer," *J. Appl. Phys.*, in press.
- 18) Kenji Kintaka, Junji Nishii, Kouji Shinoda, and Shogo Ura, "WDM signal transmission in thin-film waveguide for optical interconnection", *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**(21), pp. 2299-2301 (2006).
- 19) 堀井篤 篠田浩司 裏升吾 金高健二 佐藤了平 西原浩, "空間光アドロップ導波路配線を用いた 0.5Gbit/s 信号伝送実験", 電子情報通信学会論文誌 C-I, vol. J89-C, no. 11, pp. 902-909 (2006).
- 20) Shogo Ura, Takuo Asada, Satoshi Yamaguchi, Kenzo Nishio, Atsushi Horii, and Kenji Kintaka, "Simultaneous interference exposure of different-period DBRs for intra-board WDM optical interconnection", *Optics Express*, **14**(16), pp. 7057-7062 (2006).
- 21) Koichi Yokota, Rhyohei Satoh, Yoshiharu Iwata, Kozo Fujimoto, Shogo Ura, and Kenji Kintaka, "Development of Au reflection film with high adhesion for high density optical interconnection between LSI chips", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* **29**(1), pp. 54-59 (2006).
- 22) Shogo Ura, Mei Hamada, Junpei Ohmori, Kenzo Nishio, and Kenji Kintaka, "Free-space-wave drop demultiplexing waveguide device fabricated by use of the interference exposure method", *Applied Optics* **45**(1), pp. 22-26 (2006).
- 23) Y. Takehara, M. Yoshimoto, W. Huang, J. Saraie, K. Oe, A. Chayahara, Y. Horino, Lattice distortion of GaAsBi alloy grown on GaAs by molecular beam epitaxy, *Jpn J. Appl. Phys.* **45**, 67-69 (2006).
- 24) G. Feng and M. Yoshimoto, Influence of Mn incorporation on MBE growth of (In,Mn), *J. Electronic Mat.* **35**, 319-322 (2006).
- 25) Masahiro Yoshimoto, Wei Huang, Gan Feng and Kunishige Oe, GaNAsBi Semiconductor Alloy with Temperature-Insensitive Bandgap (invited), *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **891**, pp.B11.6.1-B11.6.6 (2006).
- 26) Tomohiko Maeda, Yoshihiro Nakamura, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki, Tomoaki Furusho, Hiroyuki Kinoshita and Masahiro Yoshimoto, High-Speed and High-Quality Epitaxial Growth of 6H-SiC by Closed Sublimation Method, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **891**, 597-601 (2006).
- 27) Masahiro Yoshimoto, Wei Huang, Gan Feng and Kunishige Oe, New semiconductor alloy GaNAsBi with temperature-insensitive bandgap, *phys. stat. solidi (b)* **243**, 1421-1425 (2006).
- 28) S. Kamiyama, T. Maeda, Y. Nakamura, M. Iwaya, H. Amano, I. Akasaki, H. Kinoshita, T. Furusho, M. Yoshimoto, T. Kimoto, J. Suda, IG Ivanov, JP. Bergman, B. Monemar, T. Onuma, SF. Chichibu, Extremely high quantum efficiency of donor-acceptor-pair emission in N-and-B-doped 6H-SiC, *J. Appl. Phys.* **99**, 93108 (4 pages) (2006).
- 29) G. Feng, K. Oe and M. Yoshimoto, Bismuth containing III-V quaternary alloy InGaAsBi grown by MBE, *phys. stat. solidi (a)* **203**, 2670-2673 (2006).
- 30) G. Feng, K. Oe and M. Yoshimoto, Temperature dependence of Bi behaviors in MBE growth of InGaAs, *J. Crystal Growth*, in press
- 31) M. Yoshimoto, W. Huang, G. Feng, Y. Tanaka and K. Oe, Molecular Beam Epitaxy of GaNAsBi Layer for Temperature-Insensitive Wavelength Emission, *J. Crystal Growth*, in press

- 32) K. Yamashita, H. Asai, and K. Oe, "Optical anisotropy in (110) InGaAs/InAlAsmericQuantum well structure", to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.*
- 33) H. Mataka, K. Tsuchiya, J. Sun, H. Taniguchi, K. Yamashita, and K. Oe, "High-gain Optical amplification of europium (Eu³⁺)-aluminum (Al) nanocluster doped Planar polymer waveguides", *Jpn. J. Appl. Phys.* **46(3)**, p.L83, 2007.
- 34) K. Yamashita, T. Kuro, K. Oe, and H. Yanagi, "Low threshold amplified spontaneous emission from near-infrared dye-doped polymeric waveguide", *App. Phys. Lett.* **84(24)**, p.241110 (2006).
- 35) S. Fujimoto, I. Sakata, H. Yanagi, K. Yamashita, and K. Oe, "Near infrared light amplification in dye-doped polymer waveguide", *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2* **45(12)**, pp.355 – 357 (2006)
- 36) Y. Awatsuji, Y. Shiuchi, A. Komatsu, and T. Kubota, "Design and fabrication of an optimum holographic optical element lens for a femtosecond laser pulse using a hologram computer-aided design tool," *Optics and Lasers in Engineering* **44**, pp.975-990 (2006).
- 37) T. Kubota, A. Komatsu, M. Yamagiwa, and Y. Awatsuji, "Observation of femtosecond light pulse propagating in space and time," *Proc. SPIE* **6252**, pp.398-404 (2006).
- 38) Y. Awatsuji, A. Fujii, T. Kubota, and O. Matoba, "Parallel three-step phase-shifting digital holography," *Applied Optics* **45**, pp.2995-3002 (2006).
- 39) S. Ishino, H. Nakanishi, T. Norisuye, Q. Tran-Cong-Miyata, and Y. Awatsuji, "Designing a polymer blend with phase separation tunable by visible light for computer-assisted irradiation experiments," *Macromolecular Rapid Communications* **27**, pp.758-762 (2006).
- 40) T. Takaoka, N. Kawano, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Design of a reflective aspherical surface of a compact beam-shaping device," *Optical Review* **13**, pp.77-86 (2006).
- 41) Y. Awatsuji, M. Sasada, A. Fujii, and T. Kubota, "Scheme to improve the reconstructed image in parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Applied Optics* **45**, pp.968-974 (2006).

書籍

- 1) 堀田収, "結晶系有機トランジスタ," *有機基板上の電子デバイス～低温プロセスと応用展開～* (監修: 坂本正典), シーエムシー出版, 2006, 第3章4節 (pp.94–101).
- 2) 堀田収, "有機トランジスタを用いた発光素子の開発," *最新 機能性色素大全集*, 技術情報協会, 2007, 第12章1節 (pp.331–339).

総説

- 1) 堤直人 "ホログラム記録と高分子" *高分子* **55(6)**, pp. 422-425 (2006)
- 2) 堤直人 "特集にあたってーナノ構造の創製と光・電子デバイスの構築ー" *機能材料 特集* **27(2)**, pp.5 -6 (2007)
- 3) 堤直人 "ナノメートルサイズで制御された構造を基盤とする新規有機光デバイスの構築" *機能材料 特集* **27(3)**, pp.5 -10 (2007)
- 4) 柳久雄, 堀田収, 小林俊介, 佐々木史雄, "π共役オリゴマー低次元結晶ーラマン・レーザー作用と遅延パルス発光ー," *応用物理*, **75(12)**, 1471–1475 (2006).

- 5) 堀田収, “有機半導体材料の設計とハイパフォーマンス光源,” *機能材料*, **27(2)**, 16–23 (2007).
- 6) 裏升吾 金高健二, “基板内チップ間波長多重光配線技術”, *O plus E*, **29(2)**, pp. 11-16, 2007.
- 7) 裏升吾, “光配線板を用いた光・電子融合回路のモデル開発”, *機能材料*, **27(2)**, pp. 7-15, 2007.
- 8) 裏升吾, “光配線回路素子 (光回路実装技術基礎講座「光配線と電気配線の融合化技術」第6回)”, *エレクトロニクス実装学会*, **10(1)**, pp. 80-87, 2007.
- 9) 裏升吾, “高密度回路技術”, *エレクトロニクス実装学会光回路実装技術委員会編「光回路実装技術ロードマップ (2005年度版) -光インタコネクション技術の進展と新たな可能性-*”, pp. 62-65, 2006.
- 10) 久保田敏弘, 栗辻安浩, “一枚の写真: 光の伝搬を見る -超短光パルスレーザーホログラフィーによる光伝搬の可視化-,” *O plus E* **28**, pp.761-762 (2006).

特許

- 1) 堀田収, 山雄健史, 鴨井彬, 大田郷史, 大平貴之, 栗木寛文, 土井拓子, 栗原隆, 松原徹, 小勝負信建, 奥良彰, “有機半導体膜の製造方法および有機デバイス,” 特願 2006-112273.
- 2) 山雄健史, 堀田収, 大田郷史, 三木智晴, “材料の単結晶薄膜製造方法及び単結晶薄膜製造装置,” 特願 2006-179593.
- 3) 特願 2006-91616, 「デジタルホログラフィ計測装置および方法」発明者: 村田滋, 久保田敏弘, 栗辻安浩, 金原賢治, 姉崎信幸 “デジタルホログラフィ計測装置および方法,” 出願人 国立大学法人 京都工芸繊維大学, 株式会社 日本自動車部品総合研究所, 出願日: 平成 18 年 3 月 29 日.

国際会議

- 1) Naoto Tsutsumi and Arata Fujihara, “Spontaneous Gratings Induced by Pulsed Laser on a Surface of Azobenzene Polymer” *IDC-NICE 2005*, January 2006, (Yokohama).
- 2) N. Tsutsumi, J. Eguchi, T. Murao and W. Sakai, “Photorefractive Performances in Polymeric and Molecular Glass Composites for Optical Memories” *Photonics North*, OM-05-2-3, June 5, (2006) (Quebec, Canada)
- 3) N. Tsutsumi, A. Fujihara, M. Takeuchi, “Organic DFB Laser with Threshold in the Nanojoule Range in a Guest-Host Polymeric Waveguide” Topical Meeting, *Organic Photonics and Electronics (OPE)*, *The 90th OSA Annual Meeting*, OPTuB4, October 10, (Rochester, NY).
- 4) N. Tsutsumi, M. Takeuchi, W. Sakai, “All Plastic Organic Dye Laser with Distributed Feedback Resonator Structure” *The 7th International Conference on Nano-Molecular Electronic (ICNME)*, December 2006 (Kobe).
- 5) T. Yamao, Y. Kawasaki, S. Ota, S. Hotta, and R. Azumi, “Search of optimum conditions for sublimation growth of thiophene/phenylene co-oligomer crystals,” *POLYCHAR-14*, Nara Women’s University, April 17–21, 2006.
- 6) S. Hotta, “Development and Electronic and Photonic Characteristics of thiophene/phenylene co-oligomers,” 20th Bratislava International Conference on Macromolecules: Advanced Polymeric Materials (APM-2006), Congress Center of the Ministry of Foreign Affairs, Bratislava, Slovakia, June 11–15, 2006.
- 7) T. Yamao, K. Yamamoto, Y. Taniguchi, T. Ohira, and S. Hotta, “Polarized emission microspectroscopy of

thiophene/phenylene co-oligomer crystals,” The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM) 2006, Trinity College, Dublin, Ireland, July 2–7, 2006.

- 8) T. Yamao, T. Miki, S. Ota, and S. Hotta, “Liquid-phase growth of thiophene/phenylene co-oligomer crystal films,” The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM) 2006, Trinity College, Dublin, Ireland, July 2–7, 2006.
- 9) T. Yamao, S. Ota, T. Miki, S. Hotta, and R. Azumi, “Improved sublimation growth of single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers,” The 7th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME), International Conference Center Kobe, December 13–15, 2006.
- 10) Kenji Kintaka, Junji Nishii, Satoshi Yamaguchi, and Shogo Ura, “Proposal of intra-board chip-to-chip optical interconnect device using channel waveguides with wavelength-division multiplexing”, *Technical Digest of 5th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication*, pp. 43-44, Nara, December 6-8, 2006.
- 11) Shogo Ura, Takuo Asada, Satoshi Yamaguchi, Kenzo Nishio, Atsushi Horii, and Kenji Kintaka, “Integration of eight different-period DBRs by interference exposure for intra-board WDM optical interconnection”, *The 90th OSA Annual Meeting*, paper FME3, Rochester, New York, October 8-12, 2006.
- 12) Kouji Shinoda, Daisuke Nii, Yasuhiro Awatsuji, Shogo Ura, and Kenji Kintaka, “Giga-bits-per-second WDM signal transmission in thin-film waveguide for intra-board optical interconnection”, *Technical Digest of 12th Microoptics Conference*, pp. 104-105, Seoul Korea, September 11-14, 2006.
- 13) Satoshi Yamaguchi, Takayuki Kobayashi, Yasuhiro Awatsuji, Shogo Ura, and Kenji Kintaka, “Vertically Y-branched mode splitter for intra-board optical interconnects with wavelength division multiplexing”, *Technical Digest of 12th Microoptics Conference*, pp. 106-107, Seoul Korea, September 11-14, 2006.
- 14) Masateru Izeki, Kenzo Nishio, and Shogo Ura, " Fabrication of vertically tapered SiO₂ waveguide for squeezing far-UV light", *Technical Digest of Ninth International Symposium on Contemporary Photonics Technology*, pp. 110-111, Tokyo, Japan, January 11-13, 2006.
- 15) K. Oe, Y. Tanaka, W. Huang, G. Feng, K. Yamashita, M. Yoshimoto, Y. Kondo, and S. Tsuji, Temperature-Insensitive Wavelength Emission and Absorption Characteristics of GaNAsBi/GaAs DH Diodes, *32nd European Conference on Optical Communication*, Sep. 24-28, 2006, Cannes, France, We3.P.39
- 16) K. Oe, Y. Tanaka, W. Huang, G. Feng, K. Yamashita, M. Yoshimoto, and Y. Kondo, Temperature-Insensitive Wavelength Electroluminescent Emission from GaNAsBi/GaAs DH Diodes, *Northern Optics 2006*, June 14 - 16, 2006, Bergen, Norway, W39
- 17) G. Feng, K. Oe and M. Yoshimoto, Bismuth containing III-V quaternary alloy InGaAsBi grown by MBE, *15th Int'l. Conf. Ternary & Multinary Compounds*, March 6-10, 2006, Kyoto.
- 18) G. Feng, K. Oe and M. Yoshimoto, Temperature dependence of Bi behaviors in MBE growth of InGaAs, *14th Int'l Conf. Molecular Beam Epitaxy*, September 3-8, 2006, Tokyo, TuA2-2.
- 19) M. Yoshimoto, W. Huang, G. Feng, Y. Tanaka and K. Oe, Molecular Beam Epitaxy of GaNAsBi Layer for Temperature-Insensitive Wavelength Emission, *14th Int'l Conf. Molecular Beam Epitaxy*, September 3-8, 2006, Tokyo, FrB3-4.
- 20) Masahiro Yoshimoto and Gan Feng, MBE Growth of InMnN and its annealing characteristics **(invited)** *Abstracts of 3rd International Indium Nitride Workshop*, Ilhabela Island, Brasil, 12-16 November 2006, p.27

- 21) K. Oe, Y. Tanaka, W. Huang, G. Feng, K. Yamashita, Y. Kondo, and M. Yoshimoto, Temperature-insensitive wavelength electroluminescent emission from GaNAsBi/GaAs DH diodes, *Technical digest of Northern Optics 2006*, Bergen, Norway, 14-16 June 2006, p.107
- 22) K. Oe, Y. Tanaka, W. Huang, G. Feng, K. Yamashita, Y. Kondo, S. Tsuji, and M. Yoshimoto, Temperature-insensitive wavelength emission and absorption characteristics of GaNAsBi/GaAs DH diodes, *Technical digest of EC Optical Communi.*, Cannes, 24-28 September 2006
- 23) H. Mataki, N. Mibuka, K. Tsuchii, A. Suzuki, S. Yamaki, J. Sun, H. Taniguchi, K. Yamashita, K. Oe, "High-Gain Optical Amplification of Europium-Aluminum Nanocluster Doped Planar Polymer Waveguide" 2007 *OFC/NFOEC Meeting*, March 25-29, 2007. Anaheim, California, USA, OTuK1
- 24) K. Yamashita, T. Kuro, K. Oe, and H. Yanagi, "Near-Infrared Optical Amplification by Organic Dye as Active Medium", *11th Optoelectronic and Communications Conference*, Kaohsiung, Taiwan, July, 2006, 6B4-5
- 25) T. Koyama, A. Fujii, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Design and implementation of highly usable software for digital holography," *5th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (ODF2006) Technical Digest*, pp.221-222, Nara, Dec. 2006.
- 26) A. Kaneko, A. Fujii, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Comparative study on configuration of phase-shifting array device for high-quality image in parallel phase-shifting digital holography," *5th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (ODF2006) Technical Digest*, pp.219-220, Nara, Dec. 2006.
- 27) A. Kuzuhara, K. Komai, M. Yamagiwa, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Motion picture of three-dimensional image of femtosecond light pulses diffracted by a diffraction grating," *5th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (ODF2006) Technical Digest*, pp.327-328, Nara, Dec. 2006.
- 28) T. Kakue, K. Komai, M. Yamagiwa, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Light-in-flight recording by holography for recording motion picture of magnified image of ultrashort light pulse propagation," *5th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (ODF2006) Technical Digest*, pp.223-224, Nara, Dec. 2006.
- 29) M. Aihara, K. Komai, M. Yamagiwa, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Observation of femtosecond light pulse propagation in graded-index medium as form of motion picture," *5th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (ODF2006) Technical Digest*, pp.227-228, Nara, Dec. 2006.
- 30) K. Komai, T. Katayama, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Recording and reconstruction analysis of three-dimensional image of femtosecond light pulse propagation obtained by light-in-flight recording by holography," *5th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (ODF2006) Technical Digest*, pp.225-226, Nara, Dec. 2006.

招待講演・依頼講演

- 1) 駒井和斉, 葛原あゆみ, 栗辻安浩, 西尾謙三, 裏 升吾, 久保田敏弘, "ホログラフィを用いた光伝播の3次元像動画記録と観察," 第54回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集, 相模原市, 2007年3

月 28 日.

- 2) 栗辻安浩, 葛原あゆみ, 駒井和斉, 山際将具, 西尾謙三, 裏 升吾, 久保田敏弘, "ホログラフィによる超短パルスレーザー光の伝播の観察," 微小光学研究グループ機関誌 Microoptics News 24, No.4, pp.7-12, 吹田市, 2006 年 12 月 1 日.
- 3) Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Observation of femtosecond laser pulse propagating in space and time," 2006 IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2006) Conference Proceedings, pp.70-71 Montreal, Canada, Oct. 2006.
- 4) 久保田敏弘, 駒井和斉, 栗辻安浩, "ホログラフィによる 3 次元空間を進む光パルスの観察," 平成 18 年度 第 3 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会 HODIC Circular 25, No.4, pp.27-30, 桐生市, 2006 年 11 月 10 日.
- 5) 栗辻安浩, "フェムト秒光速動画像システム," 日本分析化学会第 55 年会講演要旨集, p.462, 豊中市, 2006 年 9 月 22 日.
- 6) 栗辻安浩, "フェムト秒動画像記録再生機器," 東京コンファレンス 2006 講演要旨集, pp.40-41, 千葉市, 2006 年 8 月 31 日.

国内発表

- 1) 中島祥人, 坂井互, 堤直人「フォトリフラクティブ高分子材料」第 55 回高分子学会年次大会予稿集 Polymer Preprints, Japan 55, 1414 (2006) (名古屋国際会議場, 名古屋, 2006 年 5 月)
- 2) 信夫正英, 坂井互, 堤直人「有機薄膜の DFB レーザー発振」Fiber Preprints, Japan 61(2), (2006) (Symposium) 繊維学会 第 20 回オプティクスとエレクトロニクス有機材料に関するシンポジウム, タワーホール船堀, 東京, 2006 年 6 月
- 3) 笠場秀人, 坂井互, 堤直人「有機フォトリフラクティブ材料」Fiber Preprints, Japan 61(2), (2006) (Symposium) 繊維学会 第 20 回オプティクスとエレクトロニクス有機材料に関するシンポジウム, タワーホール船堀, 東京, 2006 年 6 月
- 4) 中島祥人, 坂井互, 堤直人「フォトリフラクティブ高分子材料」第 55 回高分子討論会予稿集 Polymer Preprints, Japan 55, 4702 (2006) (富山大学, 富山, 2006 年 9 月)
- 5) 伊藤雄規, 坂井互, 堤直人「高分子フォトリフラクティブ材料のアクセプター依存性」第 55 回高分子討論会予稿集 Polymer Preprints, Japan 55, 4797 (2006) (富山大学, 富山, 2006 年 9 月)
- 6) 山手 章弘, 廣木 彰, 山田 正良, 「ドレインコンダクタンスのゲート電圧依存性を考慮した 20nm MOSFET 解析モデル」, 平成 19 年春季応用物理学関係連合講演会, 2007.
- 7) 山雄健史, 大田郷史, 鴨井彬, 大平貴之, 堀田収, “ (チオフェン/フェニレン) コオリゴマーの昇華結晶 FET, ” 第 53 回応用物理学関係連合講演会, 26a-ZG-4, 武蔵工業大学 (世田谷キャンパス), 2006 年 3 月 26 日.
- 8) 大平貴之, 大田郷史, 鴨井彬, 山雄健史, 堀田収, “ 直立分子配向 (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結晶の狭線化発光スペクトル, ” 第 53 回応用物理学関係連合講演会, 26a-Q-10, 武蔵工業大学 (世田谷キャンパス), 2006 年 3 月 26 日.
- 9) 大田郷史, 三木智晴, 山雄健史, 堀田収, 阿澄玲子, “ (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー単結晶の作製とデバイス応用”, 第 55 回高分子討論会, 高分子討論会予稿集, pp. 4795-4796, 富山大学五福キャンパス, 2006 年 9 月 20 日~9 月 22 日.
- 10) 大平貴之, 谷口友樹, 山本一統, 山雄健史, 堀田収, “ (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結

晶の狭線化発光スペクトルの偏光特性,” 第55回高分子討論会, 高分子討論会予稿集, pp. 4712-4713, 富山大学五福キャンパス, 2006年9月20日~9月22日.

- 11) 嶋井彬, 栗木寛文, 山雄健史, 堀田 収, 奥良彰, 下地 規之, “有機半導体配向薄膜の新規な常圧気相成長法の開発,” 第55回高分子討論会, 高分子討論会予稿集, pp.4789-4790, 富山大学五福キャンパス, 2006年9月20日~9月22日.
- 12) 金高健二 西井準治 山口智史 裏升吾, “チャンネル光導波路を用いたボード内チップ間波長多重光配線”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 3/27-30, 2007. [招待講演]
- 13) 金高健二 西井準治 山口智史 小林貴之 裏升吾, “チャンネル光導波路を用いた波長多重光配線板のための分布ブラッグ反射器”, 第 21 回エレクトロニクス実装学術講演大会, 早稲田大学大久保キャンパス, 3/14-16, 2007.
- 14) 裏升吾 金高健二, “ボード内チップ間波長多重光配線” 電子情報通信学会 2006 年ソサイエティ大会, CS-4-2, 金沢大学角間キャンパス, 9/19-22, 2006. [招待講演]
- 15) 篠田浩司 仁井大輔 栗辻安浩 裏升吾 金高健二, “ボード内光インターコネクション用薄膜光導波路配線を用いたギガビット/秒 2 波長多重信号伝送実験”, 電子情報通信学会 2006 年ソサイエティ大会, C-3-76, 金沢大学角間キャンパス, 9/19-22, 2006.
- 16) 山口智史 小林貴之 栗辻安浩 裏升吾 金高健二, “ボード内波長多重光導波路配線用縦型 Y 分岐モード合分波素子”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 29a-ZX-10, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 8/29-9/1, 2006.
- 17) 山口智史 裏升吾 金高健二, “チャンネル光導波路を用いたボード内チップ間波長多重光配線の提案”, 第 20 回エレクトロニクス実装学術講演大会, 22C-10, 日本大学理工学部駿河台キャンパス, 3/22-24, 2006.
- 18) 裏升吾, “次世代情報家電用光インターコネクション”, 第 9 回光技術シンポジウム, 講演資料, 24-32, 笹川記念会館, 2/22, 2006.
- 19) ヘキサメチルジシラザンを原料とした有機デバイス用封止膜, 田口貢士, 山下雅充, 山崎光生, 岩出 卓, 吉本昌広, 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 30p-ZV-7
- 20) GaNAsBi/GaAs DH 構造ダイオード発光及び吸収端波長の低温度依存性, 風間 裕, 田中良宣, 吉本昌広, Huang Wei, Feng Gan, 山下兼一, 近藤康洋, 辻 伸二, 尾江邦重, 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 29a-B-8
- 21) GaAsBi/GaAs 多重量子井戸構造の製作, 木下雄介, 富永依里子, Gan Feng, 尾江邦重, 吉本昌広, 2007 年春季 第 54 回応用物理学関係連合講演会 29p-Q-3
- 22) GaNAsBi ホトルミネセンスのアニール効果 - Bi および N の影響, 馮 滄, 尾江邦重, 吉本昌広, 2007 年春季 第 54 回応用物理学関係連合講演会 29p-Q-2
- 23) MBE 法で作製した InN 薄膜における不純物酸素の占有位置の TEM による解析, 初井真介, 桑野範之, 波多 聡, 吉本昌広, 2007 年春季 第 54 回応用物理学関係連合講演会 30a-ZG-7
- 24) Molecular beam epitaxy of GaNAsBi layer for temperature-insensitive wavelength emission M. Yoshimoto, W. Huang, G. Feng, Y. Tanaka and K. Oe, 25th Electronic Materials Sympo. (EMS-25), Izu-no-kuni, 4-6 July, 2005, I5.
- 25) 湯山駿, 谷口弘典, 山下兼一, 尾江邦重, 孫軍, 股木宏至 「Eu-Al ナノクラスターの平面導波路における CW 光誘導放出」 第 54 回応用物理学関係連合講演会、(27p-)、青山学院大学、相模原市、

2007年3月

- 26) 山下兼一、浅井裕允、尾江邦重、「[110]方向に積層された InGaAs/InAlAs 量子井戸構造の光学異方性」第 17 回光物性研究会 (IB-29)、大阪市立大学、大阪市、2006 年 12 月
- 27) 股木宏至、孫軍、槌井加奈芽、鈴木綾美、身深暢子、谷口弘典、山下兼一、尾江邦重、「希土類-金属ナノクラスタードープ高分子光導波路における高利得光増幅」 Optics and Photonics Japan 2006 (10pB7)、学術総合センター (一橋記念講堂)、東京都、2006 年 11 月
- 28) 山下兼一、長谷建吾、尾江邦重、柳久雄、「赤外有機発光材料を活性媒体としたチャンネル型光増幅素子による外部入力信号光増幅」第 67 回応用物理学会学術講演会、(1a-P-9) 立命館大学、草津市 2006 年 8 月
- 29) 谷口弘典、山下兼一、尾江邦重、孫軍、股木宏至、「希土類-金属ナノクラスター含有高分子光導波路の高利得増幅特性」第 67 回応用物理学会学術講演会、(1a-P-8) 立命館大学、草津市 2006 年 8 月
- 30) 山下兼一、浅井裕允、尾江邦重、「変調分光法による InGaAs/InAlAs(110)面量子井戸の光学遷移強度異方性の評価」第 67 回応用物理学会学術講演会、(1a-RE-6) 立命館大学、草津市、2006 年 8 月
- 31) 北之防明、山下兼一、尾江邦重、疋田貴巳、内藤龍介、宗和範、「感光性ポリイミドを用いた自己形成光導波路の光信号伝送評価」第 67 回応用物理学会学術講演会、(29p-ZX-15) 立命館大学、草津市、2006 年 8 月
- 32) 田中良宜、三上修、山中淳彦、尾江邦重「ポリエチレン繊維強化プラスチック(FRP)による FBG 反射波長の温度無依存化」第 53 回応用物理学関係連合講演会、(24p-Y-1)、武蔵工業大学、東京都、2006 年 3 月、
- 33) 葛原あゆみ、駒井和斉、山際将具、栗辻安浩、裏 升吾、久保田敏弘、「フェムト秒パルス光の回折現象の 3 次元像の動画観察」3 次元画像コンファレンス 2006 講演論文集, pp.89-92, 東京都, 2006 年 7 月.
- 34) 小山貴正、藤井 淳、栗辻安浩、西尾謙三、裏 升吾、久保田敏弘、「デジタルホログラフィ用像再生・評価ソフトウェアの設計と実装」第 67 回応用物理学会学術講演会 講演予稿集, p.921, 草津市, 2006 年 8 月.
- 35) 金子篤志、藤井 淳、栗辻安浩、西尾謙三、裏 升吾、久保田敏弘、「並列位相シフトデジタルホログラフィにおける高画質再生のための位相配置」第 67 回応用物理学会学術講演会 講演予稿集, p.921, 草津市, 2006 年 8 月.
- 36) 角江 崇、駒井和斉、山際将具、栗辻安浩、西尾謙三、裏 升吾、久保田敏弘、「Light-in-flight ホログラフィによる超短光パルス伝搬の拡大像の動画記録」第 67 回応用物理学会学術講演会 講演予稿集, p.922, 草津市, 2006 年 8 月.
- 37) 栗飯原雅之、葛原あゆみ、駒井和斉、山際将具、栗辻安浩、西尾謙三、裏 升吾、久保田敏弘、「非一様媒質中を伝搬するフェムト秒光パルスの動画観察」可視化情報全国講演会(神戸 2006) 講演論文集, pp.219-222, 神戸市, 2006 年 9 月.
- 38) 駒井和斉、片山哲治、栗辻安浩、西尾謙三、裏 升吾、久保田敏弘、「フェムト秒光パルス伝搬の 3 次元像の Light-in-flight ホログラフィによる動画観察と解析」可視化情報全国講演会(神戸 2006) 講演論文集, pp.223-226, 神戸市, 2006 年 9 月.

研究報告会

- 1) 堀田収、「チオフェン系オリゴマー結晶の F E T 特性」応用物理学会結晶工学分科会第 124 回研究会、

学習院大学学習院創立百周年記念会館, 2006年4月27日.

- 2) 堀田収, “オリゴマー系 FET 材料の開発,” 応用物理学会有機分子バイオエレクトロニクス分科会, 東京大学武田先端知ビル武田ホール, 2006年11月21日.
- 3) 山口智史 小林貴之 栗辻安浩 裏升吾 金高健二, “チャンネル光導波路を用いたボード内波長多重光配線の提案”, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE 2006-107, 機械振興会館, 12/8, 2006.
- 4) 篠田浩司 仁井大輔 栗辻安浩 裏升吾 金高健二, “ボード内薄膜光導波路配線を用いた波長多重信号伝送”, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE 2006-107, 機械振興会館, 12/8, 2006.
- 5) 麻田卓男 山口智史 堀井篤 西尾謙三 裏升吾 金高健二, “チップ間波長多重光配線用異周期 DBR の一括干渉露光”, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE 2005-131, 神戸大学, 1/31, 2006.
- 6) 堀井篤 篠田浩司 裏升吾 金高健二, “空間光導波光アドドロップ素子集積配線を用いた 0.5Gbit/s 信号伝送実験”, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE 2005-131, 神戸大学, 1/31, 2006.

新聞報道

- 1) 「ガラス内の光反射記録 光学素子の評価に」日経産業新聞 2006年8月31日版の先端科学欄

あとがき

無機半導体や光半導体の専門家と有機高分子材料の専門家とのジョイントプロジェクトの活動は、近年では国内外でも盛んになってきており、今後もその勢いは加速すると予想される。

最近では、有機半導体のドリフト移動度が無機半導体のそれに匹敵するとの報告もなされてきており、有機材料は、それ自身のもつポテンシャルの高さとフレキシビリティを生かして、エピタキシャル成長に依存してきた無機半導体を補完しながら、いずれは凌駕するかもしれない。事実、昨今の材料革新のテンポは非常に速く、例えば、有機発光ダイオード（OLED）、有機トランジスタや有機太陽電池などの研究も着実に進んでおり、Paint-on Optoelectronics の波は全世界的に広がりつつある。Carter 博士が分子エレクトロニクスデバイスを提唱してから30年近く経た現在、カーボンナノチューブや走査型トンネル顕微鏡（STM）の活用によって分子レベルでのマニピュレーションも可能となってきた。本プロジェクトは、このような世界的な流れを的確に捉え、これを基盤に今後も一層の展開が期待できる。

平成19年3月31日

プロジェクト代表者

堤直人