

光誘起ナノ構造による光子の制御とそれに基づく
新規な有機光電子デバイスの開発

平成19年度

教育研究推進事業

成果報告書



平成20年3月

研究代表者

堤直人

大学院・工芸科学研究科

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	5
2. 研究成果	7
3. 研究論文等リスト	21

はしがき

有機ナノ構造は、有機物のもつフレキシビリティをいかに発揮できる構造であり、無機半導体に匹敵するあるいはそれ以上の性能の可能性が秘められている。光誘起ナノ構造を用いて、光の増幅や減衰あるいは光子のベクトルの制御(方向性の制御)などを自在に行う斬新な有機光電子デバイスを設計開発することを目的として、本教育研究事業を推進する。

本代表者らは、平成15年度より4年間「ナノ構造の創製と光デバイスの構築」の本教育研究事業を推進してきた。平成19年度は、具体的に創製した有機ナノ構造を用いて光子を自在に制御した新規な有機光電子デバイスの開発を意図して研究を進めた。

本報告書では、本年度に実施した本教育研究事業に係る3つの研究成果をまとめた。

1. 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
2. 新奇有機光電子半導体材料：(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー
3. 分子線エピタキシー法による $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 多重量子井戸構造の製作

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

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

吉本昌広 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・教授

研究代表者 堤直人
大学院 工芸科学研究科
高分子機能工学部門 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 工芸科学研究科
高分子機能工学部門 教授

【研究目的】

フェムト秒レーザーを励起源とする研究はここ十数年で大きく発展しており、分光的研究の励起源から光通信の信号源さらには材料加工の励起源へとその応用範囲は大きく広がってきている。

本研究では、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、フェムト秒レーザーのポテンシャルを活かした以下の研究テーマを検討した。

【研究成果】

1. フェムト秒レーザー励起の分布帰還(DFB)有機レーザー発振素子の構築

次世代の光通信および信号処理システムでは 100 Gb s^{-1} を越えるバンド幅が要求されている。しかしながら、現存のオプトエレクトロニクスやエレクトロニクスデバイスおよび集積回路は 100 Gb s^{-1} を越えるビット速度で機能させることはできない [1]。超高速オールオプティカルデバイス、光源およびスイッチ素子が超高速光通信および信号処理に実現に向けて要求されている [1]。そこで、1テラバイト (1テラ = 10^{12}) / 秒を越えるバンド幅の応答に対応できるフェムト秒レーザーパルス応答を検討した。具体的には、フェムト秒レーザー励起の分布帰還 (DFB) 有機レーザー発振を検討した [2]。

DFB レーザー発振では、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 (Λ_{th}) をもつ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、(1)式に従って光導波モードのレーザー発振が起こる。

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

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 : グレーティング (格子) モード数 ($m = 1, 2, 3, \dots$) である。

以下に DFB 有機レーザー素子の製作工程を示す。光感光性ポリマーである SU-8[®] を基板上にスピコーティングする。SU-8[®] 表面上に 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により、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。露光後、連続した周期的な凹凸構造は、ベーキング、現像処理ならびハードベーキング処理を施した。周期的な凹凸構造の上に 4-(Dicyanomethylene)-2-methyl-6-(4-dimethylaminostyryl)-4H-pyran (DCM) / ポリビニルカルバザール (PVCz) / Tris(8-quinolinolato)aluminum (Alq) 薄膜あるいは DCM / ポリスチレン (PS) / Alq 薄膜をスピコーティングして、レーザー活性光導波層を作り上げた。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、定量的に評価した。表1に、それぞれのモード m に対して、ロイドミラーの入射角を変えて照射して作製した周期構造のピッチ間隔 Λ_{th} 、実効屈折率 n_{eff} 、ならびに発振波長 λ_L をまとめる。レーザー発振の可変波長範囲は $m = 1$ のときが最大で、PVCz 導波層で 599~646 nm であり、PS 導波層で 586~642 nm であった。発振の閾値は ASE 発光の中心付近でのレーザー発振で極小をとった高次モードになるに従って、可変波長範囲は狭くなった。レー

レーザー発振の閾値は PVC z 導波層で $m = 1$ に対して、 $0.106 \text{ mJcm}^{-2} \text{ pulse}^{-1}$ であった。

図 1 に示すように、Ti-sapphire フェムト秒レーザーの半値幅は 14 nm であるのに対して、DFB レーザー発振の半値幅は 0.15 nm であり、線幅の狭線化が確認された。

表 1. それぞれのモード m に対して様々なピッチ間隔 Λ_{th} をもつ PVCz および PS 導波路系でのレーザー発振のピーク波長 λ_L 、実効屈折率 n_{eff} 。 n_{eff} は、 λ_L と Λ_{th} を使って式 (1) より計算した。

m	SU-8 2002		PVCz		PS	
	Incidence angle ($^\circ$)	Λ_{th} (nm)	λ_L (nm)	n_{eff}	λ_L (nm)	n_{eff}
1	72.9	185.7	598.9	1.6124	586.0	1.5777
1	67.6	192.0	610.6	1.5902	604.3	1.5738
1	65.7	194.8	-	-	608.5	1.5622
1	61.6	201.8	638.3	1.5816	633.6	1.5700
1	60.0	204.9	646.3	1.5766	641.5	1.5650
2	28.6	371.0	592.6	1.5981	585.2	1.5782
2	27.6	383.1	609.8	1.5916	602.4	1.5723
2	27.1	389.7	-	-	607.5	1.5591
2	26.8	393.5	618.9	1.5721	619.8	1.5743
2	26.1	402.9	634.1	1.5716	633.7	1.5706
3	18.0	574.4	609.9	1.5927	607.1	1.5853
3	17.8	580.7	-	-	609.5	1.5745
3	17.1	602.3	631.3	1.5686	630.8	1.5674
3	16.9	610.6	638.3	1.5680	636.5	1.5636

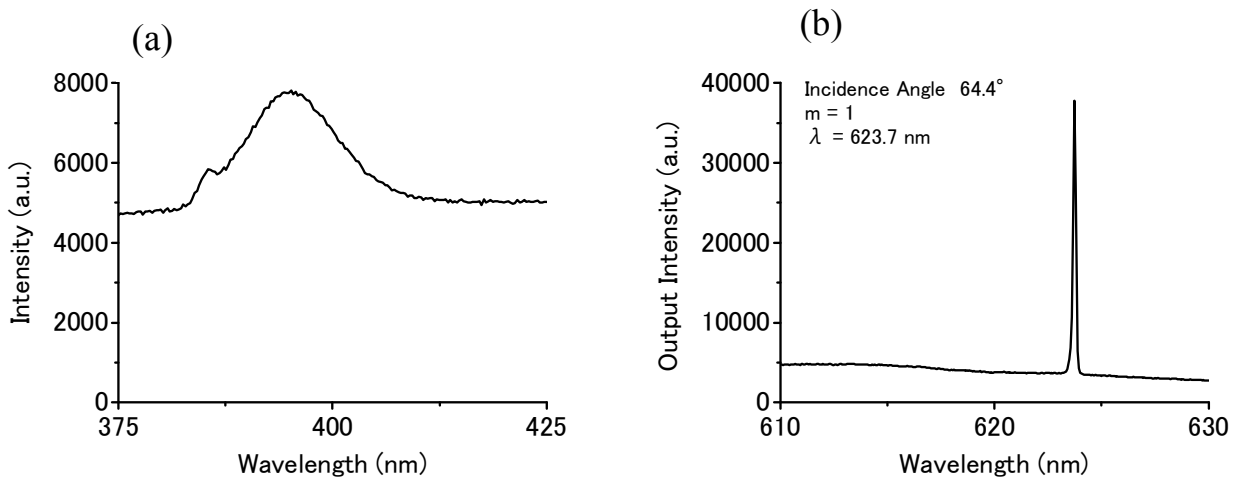


図 1. フェムト秒レーザーのパルス波形とフェムト秒レーザー励起の DFB レーザー発振のパルス波形の線幅の比較。(a) Ti-Sapphire フェムト秒レーザー、(b) DFB レーザー

2. フェムト秒レーザー照射による金属イオンの還元とナノ細線配線

フェムト秒レーザーは単位時間あたりに非常に大きなエネルギーを注入でき、それを用いて容易に2光子励起を起こさせることができる。フェムト秒レーザー照射により、銀イオン (Ag^+) から銀粒子を析出させ (銀イオンの還元)、ナノ細線への応用を試みた。 Ag^+ イオン源として硝酸銀を、マトリックスとして polyvinylpyrrolidone (PVP) を、2光子吸収増感剤として水溶性の色素 safflomin A を用いた。これらを溶解させた水溶液 (硝酸銀/safflomin/PVP/ H_2O = 0.34g/0.02g/0.01g/9.00g) から溶液キャスト法でガラス基板上に薄膜試料を作製した。フィルム作製後、ガラス基板を上にして Ti:Sapphire レーザー光 (パルス幅: 100 fs, 発振波長: 800 nm, 繰返し周波数: 80MHz) を適切なエネルギーにコントロールして油浸対物レンズ (100×, NA=1.30) を用いて薄膜試料に集光照射した。図2にレーザー照射エネルギーを 3 mW, 5 mW および 10 mW にして誘起させた銀粒子構造を示す。ステージ走査速度 0.3 $\mu\text{m/s}$, レーザー照射エネルギー 5mW のときに銀イオンを銀粒子に還元できており、線幅が 200 nm ほどのナノ細線を描けることが示された。

次に、どのような機構で銀イオンが還元されたかを検証する必要がある。Safflomin A はレーザー発振波長 800 nm の倍波である 400 nm を中心にブロードな吸収をもっているが、マトリックスの PVP および硝酸銀水溶液は 400 nm 近傍に吸収はない。従って、800 nm のフェムト秒レーザーにより Safflomin A の2光子励起が可能であり、2光子吸収に基づくフォトンモードの銀イオンの還元が考えられる。また、DSC 測定よりこの試料は 210°C にシャープな発熱ピークが観測され、このピークは銀イオンの銀粒子への還元に基づくものと推定された。この薄膜試料を 250°C まで融点測定器上で観察したところ、210°C 付近で銀粒子の析出が確認でき、フォノンモードの銀イオンの還元も示された。従って、フェムト秒レーザー照射による銀イオンの還元は、2光子励起によるフォトンモードあるいはフォノンモードによって起こると推測された。

3. 今後の展開

2光子励起による銀イオンの還元の研究成果は、3次元の立体的な配線への応用を可能とする。多光子励起を応用した新規なトップダウン型の3次元ナノ細線配線は、次世代の集積回路の新規なアーキテクチャーに対する1つの指針を示すと考えられ、今後この分野への応用が期待される。

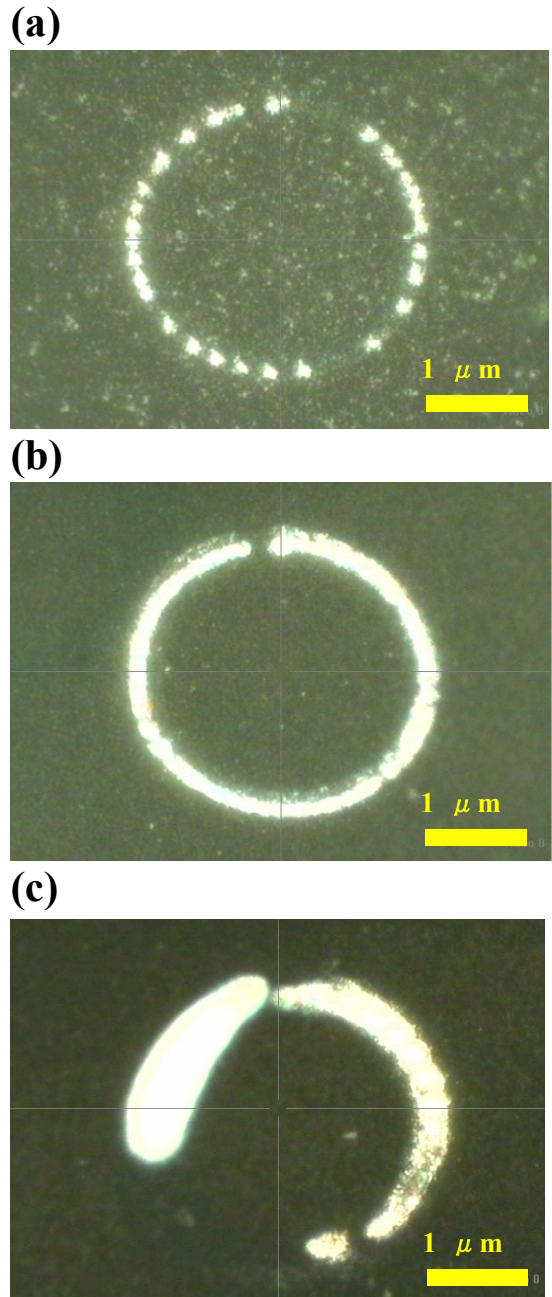


図2

- (a) レーザー照射出力: 3 mW
ステージ走査速度: 0.1 $\mu\text{m/s}$
- (b) レーザー照射出力: 5 mW
ステージ走査速度: 0.3 $\mu\text{m/s}$
- (c) レーザー照射出力: 10 mW
ステージ走査速度: 0.3 $\mu\text{m/s}$

参考文献

- 1) Wada, O. "Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing". *New J. Phys.* **6**, 183 (2004).
- 2) N. Tsutsumi and M. Takeuchi, "Ti-Sapphire Femtosecond Pulse Pumped Laser Emission from All-Plastic Organic Waveguide with Distributed Feedback Resonator" *Optis Commun.* **281**, 2179 (2008)

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

1. はじめに

近年、ペンタセンやルブレン等の天然物縮合多環炭化水素あるいはオリゴチオフェンや、オリゴフェニレン等の直鎖分子等、オリゴマー系有機半導体の物性が活発に研究されている。我々はこれらの化合物をモデルに、(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー(TPCO)と呼ぶ、分子サイズと形状を精密制御した一連の次世代共役オリゴマー材料を新規に開発しつつある(図1)。これらの材料はユニークな構造をもち¹⁾、興味深い光電子物性を示す²⁾。このことは結晶底面に対する分子(即ち、遷移電気双極子モーメント)の直立として理解できる¹⁾。

TPCOは、耐熱性、耐酸化性等の環境安定性を備えたロバスト(強靱)な材料であり、半導体プロセスに耐える。この特徴を生かして、マイクロリングレーザー^{3,4)}を作製し所望の特性を得た。ここでは、従来の液相および気相結晶成長法を改良した新たな結晶成長法^{5,6)}によって得たTPCO材料の単結晶薄膜について、最近見出した特異な光学的性質を報告する。

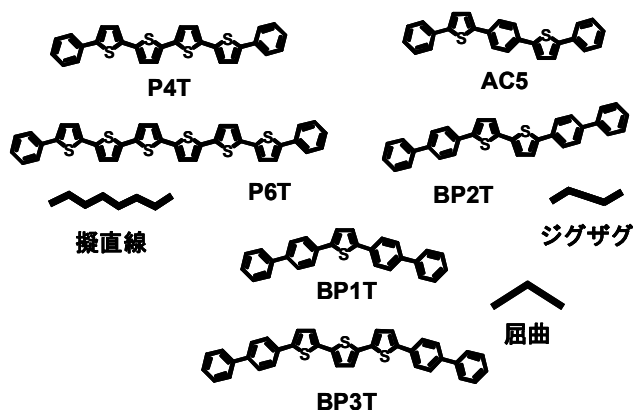


図1 いくつかのTPCOと分子形状

2. 実験

山雄らは液相における高品質単結晶薄膜作製法を新規に開発した⁵⁾。単結晶薄膜は六角形等の明瞭な幾何形状をもち、高品質で欠陥が少ない。この結晶を用いて(異方)屈折率等の光学定数を決定し⁷⁾、トランジスタ等のデバイス応用を研究している^{5,6)}。TPCO結晶は光励起すると端面のみが強く発光し、結晶内部からの発光は全く観察されない(図2挿入図参照)。

図2に、AC5結晶(図1参照)をレーザー光励起して得たレーザー発振スペクトルを示す。540, 544および546 nm付近に結晶両端面を共振器とした、縦多モードに由来するレーザー発振に基づく発光スペクトルが明瞭に観察される。539~547 nmの波長帯における等間隔のモード群のFWHMは約20 pmであった。モード間隔から屈折率を計算し、吸収端より長波長側で4.0と有機高分子物質として格段に高い値を記録した⁸⁾。Qファクターも24500と極めて高い⁸⁾。

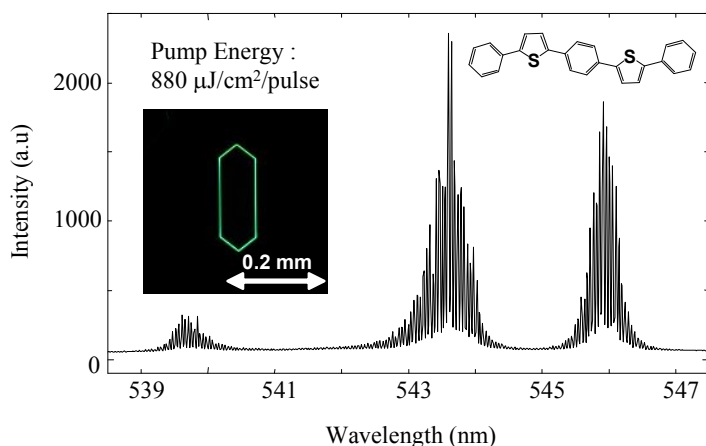


図 2 AC5 単結晶薄膜からのレーザー発振スペクトル⁸⁾。
挿入図は単結晶薄膜の顕微蛍光像。(スペクトルは、別の結晶に関して測定した。)

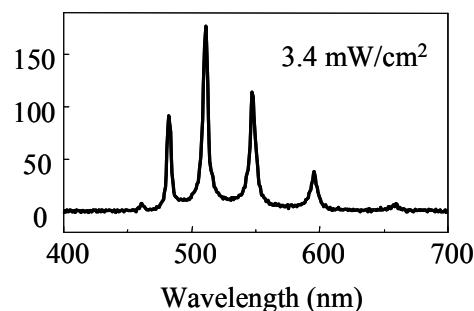


図 3 端面からの狭線化スペクトル⁹⁾
(励起強度: 3.4 mW/cm²)。

さらに、AC5 結晶端面を水銀ランプでスポット光励起し、 $\sim 90 \text{ mW/cm}^2$ あるいはそれ以下の弱い励起強度で、482 nm, 510 および 547 nm の位置に狭線化し (FWHM: $\sim 4 \text{ nm}$) *c*-軸に強く偏光した強い発光線を観測した⁹⁾。このうち、547 nm の発光線は、上記のレーザー発振と関係があるものと考えられる。図 3 に励起強度が 3.4 mW/cm^2 の場合の狭線化スペクトルを示す。この励起強度は、用いた装置で制御し得る最低限のエネルギーであり、事実上、無閾値狭線化発光といえる。

特徴的な狭線化あるいはレーザー発振を示すスペクトル線は共に *c*-軸に強く偏光し、偏光比は 500 を超える¹⁰⁾。この光は結晶内を導波し、上述した高い屈折率および *Q* ファクターを与える。このため高い光閉じ込めが期待でき、レーザー媒質として最適である。図 2 に示した結晶端面のみからの発光は、このことを裏付ける。なお、導波光は励起子に由来する発光と考えられる。詳細は、文献を参照されたい^{11,12)}。

3. 研究の意義と将来展望

以上のように、TPCO はレーザー材料として高いパフォーマンスをもつ有機半導体であることを示した。チオフェンとフェニレン (ベンゼン) との組合せによって様々な分子形状をもつ多様な分子が設計できる (図 1 参照) ことも、TPCO 材料の強みである。また、分子末端を色々に化学修飾することによって *p* 型および *n* 型の半導体に随意に作り分けることも容易である¹³⁾。さらには、結晶や配向薄膜において高い移動度を確認しており⁵⁾、発光トランジスタに応用して効率の良い発光を観測している^{14,15)}。このように、電子材料として高いポテンシャルをもち、応用展開の可能性は幅広い。

今後は、このような高いポテンシャルを活かして高機能先端デバイスにつなげたい。最終目標として、今世紀に入って実現が待ち望まれている有機半導体への電流注入によるレーザー発振を達成したい。

参考文献

- 1) **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**, 270–271 (2007).
- 2) 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.* **101**, 083517/5 pages (2007).
- 3) S. Fujiwara, K. Bando, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, and **S. Hotta**, "Laser oscillations of whispering gallery modes in thiophene/phenylene co-oligomer microrings," *Appl. Phys. Lett.* **91**, 021104/3 pages (2007).
- 4) F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, S. Fujiwara, K. Bando, Y. Masumoto, and **S. Hotta**, "Microdisk and microring lasers of thiophene-phenylene co-oligomers embedded in SiO₂ substrates," *Adv. Mater.* **19**, 3653–3655 (2007).
- 5) T. Yamao, T. Miki, H. Akagami, Y. Nishimoto, S. Ota, and **S. Hotta**, "Direct formation of thin single crystals of organic semiconductors onto a substrate," *Chem. Mater.* **19**, 3748–3753 (2007).
- 6) 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* **516**, 2527–2531 (2008).
- 7) T. Yamao, Y. Taniguchi, K. Yamamoto, T. Miki, S. Ota, **S. Hotta**, M. Goto, and R. Azumi, "Anisotropic refractive indices of organic crystals of thiophene/phenylene co-oligomers determined by microspectroscopic measurements," *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 7478–7482 (2007).
- 8) T. Yamao, K. Yamamoto, Y. Taniguchi, T. Miki, and **S. Hotta**, "Laser oscillation in a highly anisotropic organic crystal with a refractive index of 4.0," *J. Appl. Phys.*, in press.
- 9) T. Yamao, K. Yamamoto, Y. Taniguchi, and **S. Hotta**, "Spectrally-narrowed emissions occurring near an interface between a single crystal thiophene/phenylene co-oligomer and a glass substrate," *Appl. Phys. Lett.* **91**, 201117/3 pages (2007).
- 10) T. Yamao, K. Yamamoto, T. Miki, H. Akagami, Y. Nishimoto, and **S. Hotta**, "Polarized laser oscillation from polygon crystals of thiophene/phenylene co-oligomers grown by liquid-phase growth," *Phys. Status Solidi C*, in press.
- 11) K. Bando, T. Nakamura, S. Fujiwara, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, Y. Shimoi, and **S. Hotta**, "Optical selection rule for the lower Davydov excitons in co-oligomer single crystals," *Physical Review B* **77**, 045205/6 pages (2008).
- 12) T. Yamao, Y. Taniguchi, K. Yamamoto, T. Miki, T. Ohira, and **S. Hotta**, "Polarized emissions from single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers measured by microspectroscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, in press.
- 13) T. Katagiri, S. Ota, T. Ohira, T. Yamao, and **S. Hotta**, "Synthesis of thiophene/phenylene co-oligomers. V. Functionalization at molecular terminals toward optoelectronic device applications," *J. Heterocyclic Chem.* **44**, 853–862 (2007).
- 14) K. Yamane, H. Yanagi, A. Sawamoto, and **S. Hotta**, "Ambipolar organic light emitting field effect transistors with modified asymmetric electrodes," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 162108/3 pages (2007).
- 15) K. Yamane, A. Sawamoto, **S. Hotta**, and H. Yanagi, "Organic heterojunction ambipolar field effect transistors with asymmetric source and drain electrodes," *Thin Solid Films* **516**, 2758–2761 (2008).

分子線エピタキシー法による $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 多重量子井戸構造の製作

研究分担者 吉本昌広

大学院 工芸科学研究科
電子システム工学部門 教授

1. はじめに

波長多重光通信 (WDM) 方式は、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する手法で、現在のインターネットを支えている重要な技術である。通常、半導体の禁制帯幅は温度依存性を持つため、温度変動によって半導体レーザの発振波長が変化する。WDM 方式では発振波長の変動による混信を防ぐためにペルチェ冷却素子を利用して温度を制御している。もし禁制帯幅が温度に依存しない半導体でレーザが実現できれば、ペルチェ素子が不要になり、WDM 方式のコストが低減でき、一般家庭等の加入者端末にまで WDM 方式を広げることができる。

禁制帯幅の温度依存性が零に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持つ半金属と負の依存性をもつ半導体との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。現在、通信用半導体レーザに使用されている III-V 族半導体の中では、半導体 GaAs と半金属 GaBi の混晶が禁制帯幅を温度無依存化する材料として期待される[1-2]。実際に有機金属気相エピタキシャル(MOVPE)法[3]で成長した GaAsBi の禁制帯幅の温度依存性が GaAs の 1/3 になることが確認されている[4]。筆者らは分子線エピタキシャル(MBE)法を用いて GaAsBi[5]や GaNAsBi[6]の成長を行い、PL 発光波長の温度無依存化を明らかにした[7]。GaNAsBi は GaAs 基板に格子整合しながら通信用波長帯 $1.3 \mu\text{m}$ で発光する[7]。

本報告では $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 量子井戸構造の製作とその光学的性質および熱的安定性について報告する。

2. 実験方法

MBE 法により(100)GaAs 基板上に結晶成長を行った。原料に金属 Ga、As および Bi を用いた。As 供給下で基板表面の酸化膜を脱離した。基板温度 550°C にて GaAs バッファ層を 300nm 成長し、その上に $350\sim 400^\circ\text{C}$ で $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 多重量子井戸(MQW)構造を成長した。多重量子井戸構造は $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ を井戸層、GaAs を障壁層とし、Ga と As を供給しながら Bi を交互供給することにより製作した。成長温度による MQW 構造の違いを調べるために基板温度を $350\sim 400^\circ\text{C}$ で試料を成長した。また、MQW 構造の井戸層膜厚を 3~12nm に変化させた。

成長中に反射高速電子線回折(RHEED)パターンとその輝度の時間変化を観察した。成長した試料を高分解能 X 線回折(HR-XRD)測定により評価した。また波長 488 nm の Ar レーザを光源としたホトルミネセンス(PL)測定を室温で行った。さらに 500°C から 900°C で急速加熱アニール(RTA)を窒素雰囲気中で 10 分間行い、量子井戸構造の熱的安定性を調べた。

3. 実験結果・考察

3.1. $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ -MQW 構造の MBE 成長

図 1 に $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 井戸層と GaAs 障壁層を成長中の RHEED パターンを示す。GaAs バッファ層成長時は(2x4)パターンが観察され、 400°C 以下の基板温度で $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 井戸層を成長すると(2x1)パターンが見

られた。GaAs 障壁層の成長に切り替えると(1x1)パターンとなった。いずれの場合もストリークパターンが観察され平坦な成長面が得られている。

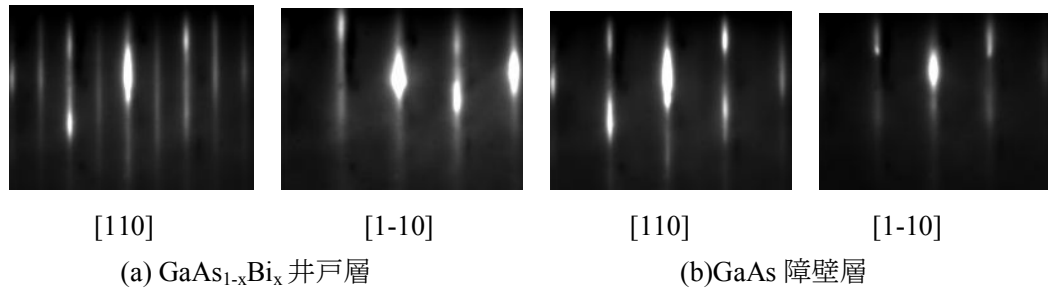


図 1. GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造成長中の RHEED

図2はGaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造を成長中の RHEED のスペキュラースポット輝度の時間変化である。基板温度が 375°C という低温でありながら明瞭な RHEED 振動が見られ、2次元成長している。MQW 構造を製作した成長温度 350°C~400°C の範囲では全ての試料で RHEED 振動を観察した。RHEED 振動の振動周期から成長速度を求めて、その成長速度と成長時間から膜厚を算出した。

GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層の膜厚を 7nm、GaAs 障壁層の膜厚を 13 nm として、24 周期の GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造を成長温度 350°C から 400°C まで変化させて製作した。他の成長条件は同じとした。GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造の HR-XRD による測定結果を図 3 に示す。(400)GaAs の回折ピークとともに MQW 構造由来の 0 次ピークとサテライトピークが確認できる。井戸層と障壁層の間に急峻な界面を有する量子井戸構造が製作できている。

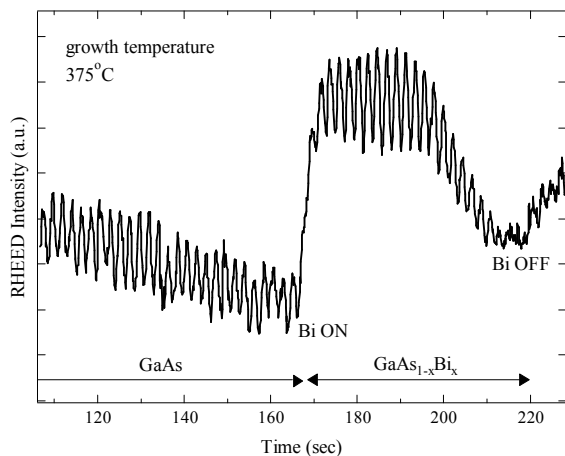


図 2. MQW 構造成長中の RHEED 輝度の時間変化

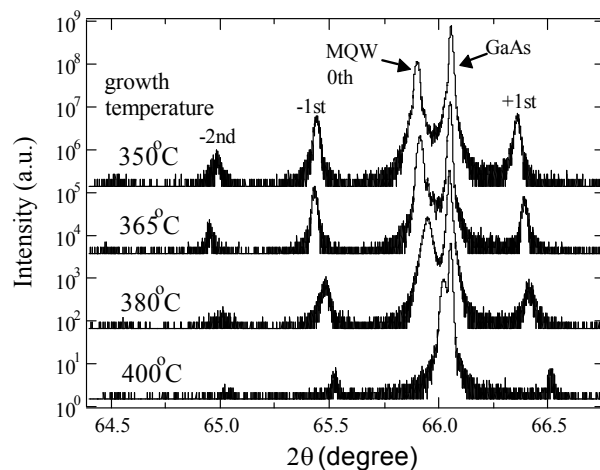


図 3. MQW 構造の X 線回折パターンの成長温度依存性

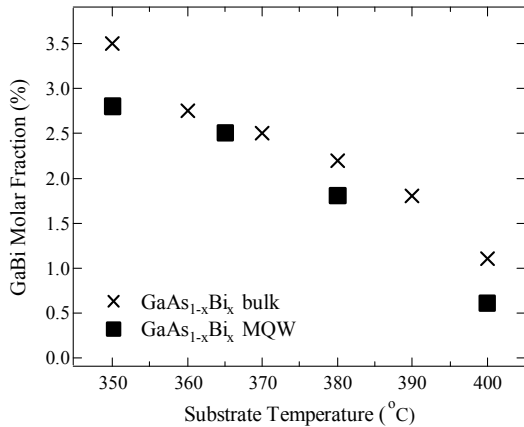


図4. GaBi モル分率の成長温度依存性

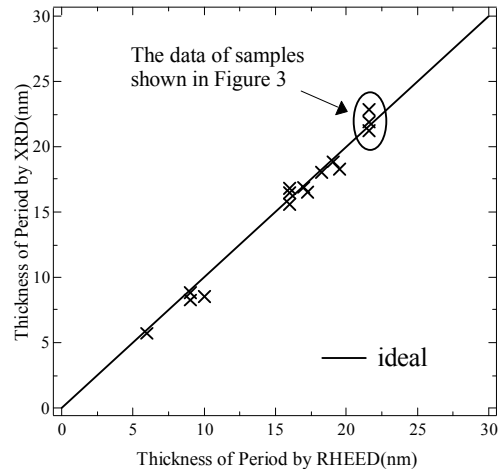


図5. RHEED と XRD から得た 1 周期膜厚の関係

MQW 構造からの 0 次ピークは、低温成長になるほど低角にシフトしており、井戸層の GaBi モル分率は低温になるにつれて増大した。

GaAs_{1-x}Bi_x バルク混晶における GaBi モル分率は XRD 測定での(400) GaAs_{1-x}Bi_x ピークと(400)GaAs ピークからの角度差 $\Delta 2\theta$ をもとに $x = 6.93\Delta 2\theta$ (degree) で与えられる[5]。この関係を用いて MQW 構造の GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層の GaBi モル分率を算出した。また、本報告の GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層の GaBi モル分率と総膜厚では GaAs 基板に対してほぼコヒーレントに成長することが確認されている[9]。

MQW 構造の GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層と GaAs_{1-x}Bi_x バルク混晶の GaBi モル分率の成長温度依存性をそれぞれ図4に示す。GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造の井戸層の GaBi モル分率は低温になるにつれて 0.6%から 2.8%まで増加した。GaAs_{1-x}Bi_x バルク混晶においても MQW 構造の GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層と同様に基板温度が低温になるにつれて Bi が成長表面へ取り込まれる量は増加した。図3の基板温度 400°C で成長した試料のサテライトピーク強度が弱い原因は GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層の GaBi モル分率が 0.6%と小さく、GaAs 障壁層との組成の違いが僅かなためと考えられる。

XRD 測定結果のサテライトピーク間の角度差から量子井戸構造の 1 周期膜厚を計算した。これまでに製作した GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造について RHEED 振動による成長速度から得た 1 周期膜厚と XRD 測定から得た 1 周期膜厚の関係を図5に示す。得られた 1 周期膜厚の実測値は 2 つの測定法でよく一致した。

3.2. GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造の光学的特性

GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層の厚みを 3 nm から 12 nm まで変えた試料を製作した。GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層の組成を 5.2% に一定とし、GaAs 障壁層の厚みを 14 nm に一定とした。図6に室温での PL 測定の結果を示す。また、4 つのスペクトルのピークエネルギーを図7にプロットした。井戸層厚が 12 nm から 3 nm へ小さくなるにつれて PL ピークエネルギーが大きくなっており、量子サイズ効果が確認できる。

3.3. GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造の熱的安定性

GaAs_{1-x}Bi_x 混晶の成長は ~400°C 以下の低温成長が必要である。この原因として Ga-As の結合強度 210 kJmol⁻¹ に対して Ga-Bi の結合強度が 159 kJmol⁻¹ と小さいことや、本報告の Bi フラックス量が $2\sim 3 \times 10^{-8}$

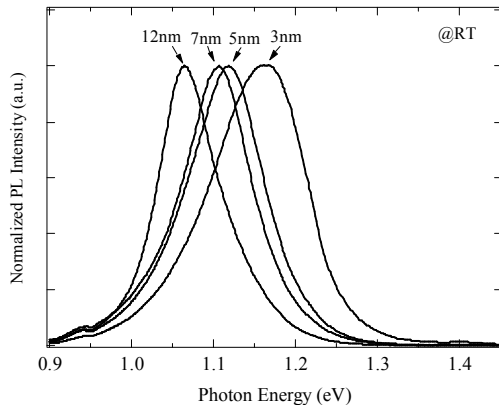


図 6. GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造の PL スペクトル

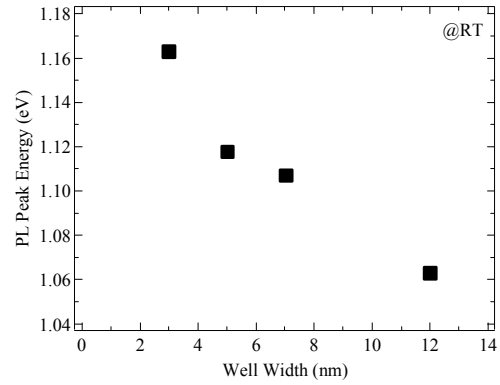


図 7. PL ピークエネルギーの井戸層厚依存性

Torr であることに対して 400°C での Bi の蒸気圧が 6.5×10^{-7} Torr と高いため、成長表面から容易に Bi が脱離していってしまうことが考えられる。そこで低温成長が必要である GaAs_{1-x}Bi_x 混晶の量子井戸構造に対してアニールを行い、熱的安定性を調べた。

GaAs_{1-x}Bi_x 井戸層の膜厚が 7 nm、GaAs 障壁層の膜厚が 13 nm の GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造を基板温度 365°C で製作した。井戸層中の GaBi モル分率は 1.9% となった。この試料を 500°C から 900°C までアニールして HR-XRD 測定を行った。その結果が図 8 である。 500°C から 800°C の温度範囲で XRD ピーク強度の明らかな低下やピーク角度のシフトが見られず GaAs_{1-x}Bi_x/GaAs-MQW 構造は 800°C まで熱的に安定であった。 900°C アニールでは、0 次ピークが高角側に広がりサテライトピーク強度の低下が見られた。

図 9 にアニール温度別の PL 測定の結果を示す。as-grown 試料および 700°C 以下でアニールした試料の発光に比べて 800°C でアニールした試料では明らかなピークシフトが見られ、1.4 eV 付近に新たなスペクトルが確認できる。 900°C でのアニールでは MQW 構造からの発光と考えられるスペクトルは確認できなくなった。

以上より、本報告で製作した Bi 混晶を含む MQW 構造は 700°C までは熱的に安定であった。

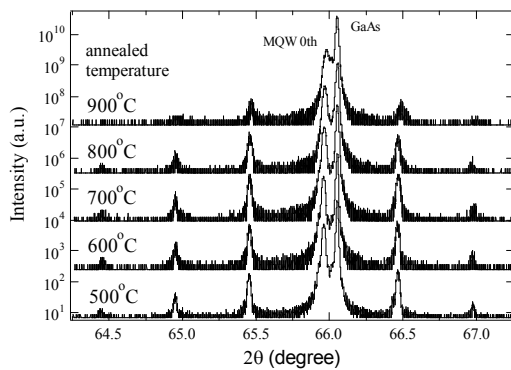


図 8. MQW 構造の X 線回折パターンのアニール温度依存性

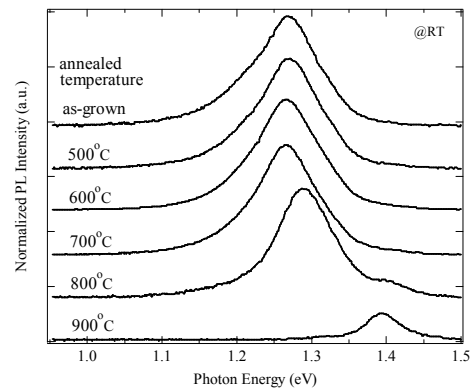


図 9. MQW 構造のホトルミネセンススペクトルのアニール温度依存性

4. まとめ

本研究では、GaAs 基板上に $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs-MQW}$ 構造を MBE 法により製作した。MQW 構造を製作する時の基板温度は 350°C から 400°C の範囲と低温成長でありながら RHEED 観測でストリークパターンが見られた。製作した試料の HR-XRD パターンには明瞭なサテライトピークが観察でき、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 混晶を含む量子井戸構造が製作できていることを確認した。井戸層厚が小さくなるにつれて PL のピークエネルギーがブルーシフトした。これは量子サイズ効果によるものといえる。 700°C 以下のアニールに対して $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs-MQW}$ 構造の XRD パターンに変化はなかった。同様のアニールに対して MQW 構造からの PL のピークエネルギーも変化せず、MQW 構造は熱的に安定であった。

以上、新規な電子材料である GaAsBi を用いて、多重量子井戸構造を実現した。今後、この構造をレーザー素子に応用する予定である。

参考文献

- [1] K. Oe and H. Asai: Symp. Record Electronic Materials Symp., Izunagaoka, pp.191, 1995
- [2] K. Oe and H. Asai: IEICE Trans. Electron., E79-C, pp1751, 1996
- [3] K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys, vol.41, pp.2801, 2002
- [4] J. Yoshida, T. Kita, O. Wada, and K. OE, Jpn. Appl. Phys, vol.42, pp.37, 2003
- [5] M. Yoshimoto, S. Murata, A. Chayahara, Y. Horino, J. Saraie, and K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys, vol.42, L1235, 2003
- [6] W. Huang, M. Yoshimoto, Y. Takehara, J. Saraie, and K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys, vol.43, L1350, 2004
- [7] W. Huang, K. Oe, G. Feng, and M. Yoshimoto, J. Appl. Phys. Vol.98, pp.053505, 2005
- [8] G. Feng, K. Oe, and M. Yoshimoto, Jpn. J. Appl. Phys, vol.46, L764-766, 2007
- [9] Y. Takehara, M. Yoshimoto, W. Huang, J. Saraie, K. Oe, A. Chayahara, and Y. Horino, Jpn. J. Appl. Phys, vol.45, L67-69, 2006.

研究論文等リスト

研究論文

- 1) Naoto Tsutsumi and Arata Fujihara, "Self-assembled Spontaneous Structures Induced by a Pulsed Laser on a Surface of Azobenzene Polymer Film" *J. Appl. Phys.* **101**, 033110 (5 pages) (2007).
- 2) Naoto Tsutsumi, Shinya Yoda and Wataru Sakai, "Infrared spectra and ferroelectricity of ultrathin films of vinylidene fluoride and trifluoroethylene copolymer" *Polym. Int'l* **56**, pp.1254-1260 (2007).
- 3) Minoru Nagata, Ryosuke Sugiura, Wataru Sakai, and Naoto Tsutsumi, "Synthesis and Characterization of Biodegradable Network Poly(ethylene glycol) Films with Elastomeric Properties" *J. Appl. Polym. Sci.* **106** (5) pp.2885-2891 (2007).
- 4) Naoto Tsutsumi and Masayuki Otsuji, "Crystalline Structures, Surface Morphology and Ferroelectric Response in Ultra-thin Film of Vinylidene Fluoride and Trifluoroethylene Copolymer" *J. Appl. Phys.* **102**, 104101 (4 pages) (2007).
- 5) N. Tsutsumi and M. Takeuchi, "Ti-Sapphire Femtosecond Pulse Pumped Laser Emission from All-Plastic Organic Waveguide with Distributed Feedback Resonator" *Optis Commun.* **281**, pp.2179-2183 (2008).
- 6) Naoto Tsutsumi, Makoto Takeuchi and Wataru Sakai, "All-Plastic Organic Dye Laser with Distributed Feedback Resonator Structure" *Thin Solid Films* **516**, pp.2783-2787 (2008).
- 7) Naoto Tsutsumi, Yuki Ito, and Wataru Sakai, "Effect of Sensitizer on Photorefractive Nonlinear Optics in Poly(N-vinylcarbazole) Based Polymer Composites" *Physical Chemistry* **344**, pp. 189-194 (2008).
- 8) M. Nagata, T. Tanabe, W. Sakai, and N. Tsutsumi, "Synthesis and Properties of Biodegradable Network Poly(ester-carbonate) Elastomer" *Polymer*, **49** (6), pp. 1506-1511.
- 9) 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**, 270-271 (2007)
- 10) 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.* **101**, 083517/5 pages (2007).
- 11) S. Fujiwara, K. Bando, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, and S. Hotta, "Laser oscillations of whispering gallery modes in thiophene/phenylene co-oligomer microrings," *Appl. Phys. Lett.* **91**, 021104/3 pages (2007).
- 12) F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, S. Fujiwara, K. Bando, Y. Masumoto, and S. Hotta, "Microdisk and microring lasers of thiophene-phenylene co-oligomers embedded in SiO₂ substrates," *Adv. Mater.* **19**, 3653-3655 (2007).
- 13) T. Yamao, T. Miki, H. Akagami, Y. Nishimoto, S. Ota, and S. Hotta, "Direct formation of thin single crystals of organic semiconductors onto a substrate," *Chem. Mater.* **19**, 3748-3753 (2007).
- 14) 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* **516**, 2527-2531 (2008).
- 15) T. Yamao, Y. Taniguchi, K. Yamamoto, T. Miki, S. Ota, S. Hotta, M. Goto, and R. Azumi, "Anisotropic refractive indices of organic crystals of thiophene/phenylene co-oligomers determined by microspectroscopic measurements," *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 7478-7482 (2007).
- 16) T. Yamao, K. Yamamoto, Y. Taniguchi, T. Miki, and S. Hotta, "Laser oscillation in a highly anisotropic organic crystal with a refractive index of 4.0," *J. Appl. Phys.*, in press.
- 17) T. Yamao, K. Yamamoto, Y. Taniguchi, and S. Hotta, "Spectrally-narrowed emissions occurring near an interface between a single crystal thiophene/phenylene co-oligomer and a glass substrate," *Appl. Phys. Lett.* **91**, 201117/3 pages (2007).

- 18) T. Yamao, K. Yamamoto, T. Miki, H. Akagami, Y. Nishimoto, and S. Hotta, "Polarized laser oscillation from polygon crystals of thiophene/phenylene co-oligomers grown by liquid-phase growth," *Phys. Status Solidi C*, in press.
- 19) K. Bando, T. Nakamura, S. Fujiwara, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, Y. Shimoi, and S. Hotta, "Optical selection rule for the lower Davydov excitons in co-oligomer single crystals," *Physical Review B* **77**, 045205/6 pages (2008).
- 20) T. Yamao, Y. Taniguchi, K. Yamamoto, T. Miki, T. Ohira, and S. Hotta, "Polarized emissions from single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers measured by microspectroscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, in press.
- 21) T. Katagiri, S. Ota, T. Ohira, T. Yamao, and S. Hotta, "Synthesis of thiophene/phenylene co-oligomers. V. Functionalization at molecular terminals toward optoelectronic device applications," *J. Heterocyclic Chem.* **44**, 853–862 (2007).
- 22) K. Yamane, H. Yanagi, A. Sawamoto, and S. Hotta, "Ambipolar organic light emitting field effect transistors with modified asymmetric electrodes," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 162108/3 pages (2007).
- 23) K. Yamane, A. Sawamoto, S. Hotta, and H. Yanagi, "Organic heterojunction ambipolar field effect transistors with asymmetric source and drain electrodes," *Thin Solid Films* **516**, 2758–2761 (2008).
- 24) G. Feng, M. Yoshimoto, and K. Oe, "Influence of thermal annealing treatment on the luminescence properties of dilute GaNAs bismide alloy" *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** (2007) L764-L766.
- 25) M. Yoshimoto, G. Feng, and K. Oe, "Annealing effects of diluted GaAs nitride and bismide on photoluminescence" *ECS Transaction* **6** (2007) 45-51.
- 26) M. Yoshimoto, Y. Hashino, M. Nakamura, T. Furusho, H. Kinoshita, and H. Shiomi, "Characterization of Schottky diode on 4H-SiC with various off-axis angles grown by sublimation epitaxy" *Materials Science Forum*, in press.
- 27) M. Aoki, M. Miyazaki, T. Nishiguchi, H. Kinoshita, and M. Yoshimoto, "TEM observation of the polytype transformation of bulk SiC ingot" *Materials Science Forum*, in press.
- 28) Y. Tominaga, Y. Kinoshita, G. Feng, K. Oe, and M. Yoshimoto, "Growth of GaAsBi/GaAs multi-quantum wells by molecular beam epitaxy" *physica status solidi (c)* in press.

国際会議

- 1) Naoto Tsutsumi, Yoichiro Kono, Masaya Oya, Wataru Sakai, and Minoru Nagata "Recent development of biodegradable network polyesters obtained from renewable natural resources" (Division of Industrial & Engineering Chemistry "Feedstocks for the Future II: Renewables for the Production of Chemicals and Materials" ACS Symposium, August 2007 (Boston, MA)
- 2) M. Yoshimoto, Y. Hashino, M. Nakamura, T. Furusho, H. Kinoshita, and H. Shiomi, "Characterization of Schottky diode on 4H-SiC with various off-axis angles grown by sublimation epitaxy", *Int. Conf. Silicon Carbide and Related Materials 2007 (ICSCRM2007)*, Otsu.
- 3) M. Aoki, M. Miyazaki, T. Nishiguchi, H. Kinoshita, and M. Yoshimoto, "TEM observation of the polytype transformation of bulk SiC ingot", *Int. Conf. Silicon Carbide and Related Materials 2007 (ICSCRM2007)*, Otsu.
- 4) Y. Tominaga, Y. Kinoshita, G. Feng, K. Oe, and M. Yoshimoto, "Growth of GaAsBi/GaAs multi-quantum wells by molecular beam epitaxy", *34th Int. Sympo. Compound Semiconductors (ISCS 2007)*, Kyoto.
- 5) Tsukuba, T. Sasaki, H. Minami, K. Kisoda, W. S. Yoo, M. Yoshimoto, and H. Harima, "UV-VIS Raman

characterization of high dose ultra shallow implanted silicon before and after excessive annealing”, 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2007).

- 6) M. Yoshimoto, G. Feng, and K. Oe, “Annealing effects of diluted GaAs nitride and bismide on photoluminescence”, 211th Electrochemical Society Meeting, Chicago.
- 7) K. Oe, G. Feng, Y. Kinoshita, and M. Yoshimoto “Ga_{N_y}As_{1-x-y}Bi_x alloy for temperature-insensitive wavelength semiconductor lasers”, European Materials Reserch Society Spring Meeting, Strasbourg.
- 8) Y. Kinoshita, Y. Tominaga, G. Feng, M. Yoshimoto., and K. Oe, “GaAsBi/GaAs multiple quantum well structures grown by molecular beam epitaxy”, 2007 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK2007), Osaka.

著書

- 1) S. Hotta, “Novel Electronic and Photonic Properties of Thiophene-Based Oligomers,” in *Thiophene-Based Materials for Electronics and Photonics* (Eds.: I. F. Perepichka and D. F. Perepichka), John Wiley & Sons, Chichester, UK, in press.
- 2) 山雄健史, 堀田収, “(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー材料の結晶成長と光・電子デバイス応用,” *光機能性高分子材料の新たな潮流 (仮題)*, シー・エム・シー出版, **2008**, 第 III 編第 1 章 (2008 年 3 月出版予定).
- 3) 堀田収, *有機トランジスタ*, 全 46 ページ, ED リサーチ社, **2007**.
- 4) 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 “特集にあたって—光の極限に挑む—” *機能材料 特集 28(2)*, pp.5 (2008)
- 2) 堤直人 “レーザー誘起構造形成” *機能材料 特集 28(2)*, pp.35-42 (2008)
- 3) S. Hotta, T. Katagiri, T. Yamao, K. Shimizu, H. Yanagi, M. Ichikawa, and Y. Taniguchi, “Development and Electronic and Photonic Characteristics of Thiophene/Phenylene Co-Oligomers,” *Int. J. Polym. Mater.*, in press.
- 4) 山雄健史, 堀田収, “溶液法による(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの結晶成長と有機結晶トランジスターの作製,” *有機分子・バイオエレクトロニクス分科会会誌*, **18**, 275–278 (2007).
- 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**, 16–23 (2007).

国内発表

- 1) 堤直人 「レーザー誘起周期構造形成と界面幾何工学」日本化学会春季年会 特別企画講演 (関西大学 3月)
- 2) 笠場秀人, 坂井互, 堤直人 「有機フォトリフラクティブポリマー材料」 *Polymer Preprints, Japan* 56(1), p. 1362 (2007) (京都 京都国際会館 5月)
- 3) 信夫正英, 坂井互, 堤直人 「有機薄膜のDFBレーザー発振」 *Polymer Preprints, Japan* 56(1), p. 1334 (2007) (京都 京都国際会館 5月)

- 4) 田家行伸, 渋谷雄一, 坂井互, 堤直人「マイクロサーマルアナライザーによる高分子超薄膜の局所熱特性解析」Polymer Preprints, Japan 56(1), p.1047 (2007) (京都 京都国際会館 5月)
- 5) 染田忠, 坂井互, 堤直人「直鎖状コポリエステルの光および生分解性」Polymer Preprints, Japan 56(1), p. 2362 (2007) (京都 京都国際会館 5月)
- 6) 宮崎航, 坂井互, 堤直人「高分子フォトリフラクティブ材料」Fiber Preprints, Japan 62(2), p. 55 (2007) 繊維学会 第 21 回オプティッ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 (東京 タワーホール船堀 6月)
- 7) 石橋隆志, 坂井互, 堤直人「有機薄膜導波路からの分布帰還型レーザー発振」Fiber Preprints, Japan 62(2), p. 53 (2007) 繊維学会 第 21 回オプティッ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 (東京 タワーホール船堀 6月)
- 8) 山岡知広, 坂井互, 堤直人「ナイロン11超薄膜の強誘電性」Fiber Preprints, Japan 62(2), p. 47 (2007) 繊維学会 第 21 回オプティッ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 (東京 タワーホール船堀 6月)
- 9) 笠場秀人, 坂井互, 堤直人「有機フォトリフラクティブポリマー材料」Polymer Preprints, Japan 56(2), p. 4627 (2007) (名古屋 名古屋工業大学 9月)
- 10) 信夫正英, 坂井互, 堤直人「有機薄膜のDFBレーザー発振」Polymer Preprints, Japan 56(2), p. 4691 (2007) (名古屋 名古屋工業大学 9月)
- 11) 渋谷雄一, 定金祐司, 坂井互, 堤直人「マイクロサーマルアナライザーによる高分子超薄膜の局所熱特性解析」Polymer Preprints, Japan 56(2), p. 4069 (2007) (名古屋 名古屋工業大学 9月)
- 12) 染田忠, 坂井互, 堤直人「直鎖状コポリエステルの光および生分解性」Polymer Preprints, Japan 56(2), p. 5631 (2007) (名古屋 名古屋工業大学 9月)
- 13) 池上由洋, 坂井互, 堤直人「オプティカルポーリングによるポリマーの $\chi^{(2)}$ 構造制御」Polymer Preprints, Japan 56(2), p. 4689 (2007) (名古屋 名古屋工業大学 9月)
- 14) 山本一統, 三木智晴, 谷口友樹, 井上文嗣, 山雄健史, 堀田収, “有機半導体レーザーの実現に向けた(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー単結晶のレーザー分光,” 第56回高分子討論会, 名古屋工業大学, 2007年9月19-21日.
- 15) 谷口友樹, 三木智晴, 山本一統, 山雄健史, 堀田収, “(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー単結晶の屈折率異方性,” 第56回高分子討論会, 名古屋工業大学, 2007年9月19-21日.
- 16) 三木智晴, 平等文雄, 赤神博, 清水康弘, 西本善博, 山本一統, 山雄健史, 堀田収, 陣内浩司, “機能デバイスの創製に向けた有機半導体結晶薄膜のトップダウン加工,” 第56回高分子討論会, 名古屋工業大学, 2007年9月19-21日.
- 17) 栗木寛文, 山雄健史, 堀田収, “(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーからなるプラスチックFETの開発,” 第56回高分子討論会, 名古屋工業大学, 2007年9月19-21日.
- 18) 赤神博, 三木智晴, 西本善博, 山雄健史, 堀田収, “液相結晶成長法を利用した有機半導体デバイスの作製,” 第56回高分子討論会, 名古屋工業大学, 2007年9月19-21日.
- 19) 井上文嗣, 山本一統, 谷口友樹, 石橋隆志, 信夫正英, 山雄健史, 堀田収, 坂井互, 堤直人, “干渉露光を用いたオリゴマー結晶の分光測定,” 第56回高分子討論会, 名古屋工業大学, 2007年9月19-21日.
- 20) 阪口拓哉, 重里圭一郎, 栗木寛文, 中西英行, 山雄健史, 堀田収, 宮田貴章, “(チオフェン/

- フェニレン)コオリゴマー-溶融膜のマイクロ構造,”第56回高分子討論会,名古屋工業大学,2007年9月19-21日.
- 21) 清水康弘, 三木智晴, 山雄健史, 堀田収, 阿澄玲子, “n型有機結晶トランジスタの作製,”第56回高分子討論会,名古屋工業大学,2007年9月19-21日.
 - 22) 重里圭一郎, 栗木寛文, 阪口拓哉, 山雄健史, 堀田収, “近接蒸着による有機結晶薄膜の作製,”第56回高分子討論会,名古屋工業大学,2007年9月19-21日.
 - 23) 西本善博, 三木智晴, 赤神博, 山雄健史, 堀田収, “さまざまな置換基をもつ(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー単結晶の液相成長,”第56回高分子討論会,名古屋工業大学,2007年9月19-21日.
 - 24) 山本一統, 大平貴之, 谷口友樹, 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レーザー発振,”第56回高分子学会年次大会,国立京都国際会館,2007年5月29-31日.
 - 25) 谷口友樹, 大平貴之, 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顕微光学異方性測定,”第56回高分子学会年次大会,国立京都国際会館,2007年5月29-31日.
 - 26) 三木智晴, 大田郷史, 山雄健史, 堀田収, “溶液法による(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー結晶薄膜の作製とデバイス応用,”第56回高分子学会年次大会,国立京都国際会館,2007年5月29-31日.
 - 27) 栗木寛文, 鴨井彬, 山雄健史, 堀田収, “(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーからなる電界効果トランジスタの開発,”第56回高分子学会年次大会,国立京都国際会館,2007年5月29-31日.
 - 28) 山本一統, 大田郷史, 三木智晴, 大平貴之, 谷口友樹, 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光学利得測定,”第55回応用物理学関係連合講演会,青山学院大学,2007年3月27-30日.
 - 29) 山雄健史, 谷口友樹, 三木智晴, 山本一統, 大平貴之, 堀田収, “液相成長させた有機分子単結晶の屈折率異方性の簡易評価,”第55回応用物理学関係連合講演会,青山学院大学,2007年3月27-30日.
 - 30) 木下雄介, 富永依里子, 尾江邦重, 吉本昌広「分子線エピタキシー法によるGaAsBi/GaAs多重量子井戸構造の製作」、電子情報通信学会レーザー量子エレクトロニクス研究会、寝屋川市
 - 31) 篠原 広, 吉本昌広「シリコンカーバイドを用いたSOI基板上へのシリコンMOSFETの製作」、第68回応用物理学学会学術講演会、札幌
 - 32) 富永依里子, 木下雄介, 馮淦, 尾江邦重, 吉本昌広「GaAsBi/GaAs多重量子井戸構造の製作(II)」、第68回応用物理学学会学術講演会、札幌
 - 33) 青木正彦, 宮崎恵, 吉本昌広「バルクSiC単結晶のTEMによるポリタイプ変形構造評価」、第68回応用物理学学会学術講演会、札幌
 - 34) Y. Tominaga, Y. Kinoshita, G. Feng, K. Oe, M. Yoshimoto 「Fabrication of GaAsBi/GaAs multi-quantum-well structures and their thermal stability」, 第26回電子材料シンポジウム、守山市
 - 35) 篠原広, 木下博之, 吉本昌広「シリコンカーバイド基板上のシリコンMOSFETの放熱特性」、第55回学術講演会、船橋市

- 36) 青木正彦, 西田幸子, 川野輪 仁, 篠原 広, 吉本昌広「SiC による SOI 基板の界面構造評価」、第 55 回応用物理学関係連合講演会、船橋市
- 37) 富永依里子, 尾江邦重, 吉本昌広「1.3 μm でのホトルミネセンス発光を有する GaAsBi/GaAs 多重量子井戸構造の製作」、第 55 回学術講演会、船橋市

光誘起ナノ構造による光子の制御とそれに基づく
新規な有機光電子デバイスの開発

平成19年度
教育研究推進事業
成果報告書

平成20年3月

研究代表者
堤 直人

〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
京都工芸繊維大学
大学院 工芸科学研究科
Tel: 075-724-7810
Fax: 075-724-7805
E-mail: tsutsumi@kit.ac.jp

京都工芸繊維大学
研究協力課 研究推進本部
Tel: 075-724-7038
Fax: 075-724-7030
E-mail: research@kit.ac.jp