

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17067009
 研究課題名（和文） 寸法と分子形状を超精密制御したハイブリッド共役ポリマーの極限性能
 研究課題名（英文） Ultimate Performance of Hybridized Conjugated Polymers with Super-Controlled Sizes and Molecular Shapes
 研究代表者
 堀田 収 (HOTTA SHU)
 京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
 研究者番号：00360743

研究成果の概要：

(チオフェン/フェニレン) コオリゴマーと称する、寸法と分子形状を超精密制御した新奇なハイブリッド共役ポリマーを開発した。この材料系の高配向結晶薄膜を作製し、光学性質および電荷輸送特性を研究した。結晶薄膜は光の閉じ込め機能が図抜けて高く、レーザー媒質として抜きん出て優れる。これをレーザー光励起し、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を観察した。トランジスタデバイス上で、レーザー発振の前駆現象と考えられる超狭線化発光 (FWHM: 1.1 nm) を達成した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	9,000,000	0	9,000,000
2006年度	9,900,000	0	9,900,000
2007年度	7,500,000	0	7,500,000
2008年度	2,300,000	0	2,300,000
年度			
総計	28,700,000	0	28,700,000

研究分野：有機機能材料の創製と構造・物性研究

科研費の分科・細目：材料化学 ・ 機能材料・デバイス

キーワード：(1) 共役ポリマー (2) 極限性能 (3) 電流注入レーザー
 (4) 有機半導体 (5) 結晶薄膜

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、すでに分子量を制御した共役化合物が数多く提案されていた。これらの材料は、当時研究開発が活発に行われていた有機電界発光 (EL) 材料として応用されたものが多い。このような状況下で研究代表者らは、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー (以後 TPCO と略記) と称する新奇なハイブリッド共役ポリマーを開発した。本材料は、分子量だけでなく、寸法と分子形状まで超精密制御したところに他の材料に見られない

斬新さがある。結晶構造や半導体特性に関しても、従来の材料にみられない新たな側面をもつことが明らかになった。

2. 研究の目的

TPCO 材料の特異な構造と物性を調べ、寸法と分子形状を超精密制御したハイブリッド共役ポリマーの特徴を明らかにすることを当初の研究目標とした。特に、同材料の結晶が示す、レーザー特性を軸とした極限性能について詳細に研究する。

3. 研究の方法

- (1) TPCO 材料を有機合成的な手法で開発した。特に、分子両末端に様々な置換基を導入して材料に機能性 (p-型および n-型半導体特性) をもたせた。
- (2) 合成した材料を高度に配向させる新規手法を開発した。これによって気相および液相において高品質の結晶薄膜を基板上に直接形成することに成功し、TPCO 等の有機半導体を用いた光電子デバイスの実用的な作製を可能にした。
- (3) 上記の結晶薄膜およびそれを用いた電界効果トランジスタ (Field-effect transistor: FET) デバイスに関して、光学性質および電荷輸送特性を研究した。

4. 研究成果

- (1) 分子末端を置換しない TPCO 材料および置換した TPCO 材料のうち、代表的なものを示す (図 1, 2 参照)。これらはロバスト (強靱) かつ安定な材料であり、各種の半導体プロセスに耐える。

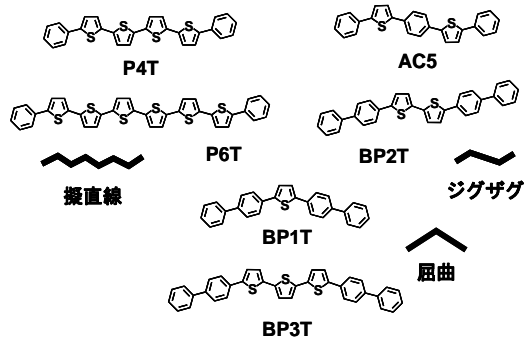


図 1 いくつかの TPCO と分子形状

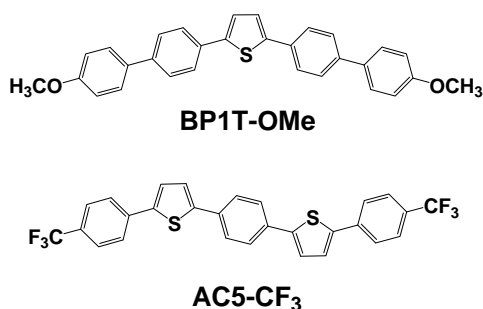


図 2 分子末端を化学修飾した TPCO

- (2) 研究代表者らは、気相および液相においてこれまでの結晶成長法を改良して良質の単結晶薄膜を作製することに成功した。これらを下記にまとめる。

- ① Physical Vapor Transport と呼ばれる気相結晶成長法を改良した。二つのヒーターを水平に置き、そのうちの一つは材料の昇華用 (source heater) で、もう一つは結晶成長用 (growth heater) である。成長用ヒーター

の温度を昇華用ヒーターよりも低く保つことで装置内の温度勾配を小さくし、大型の結晶 (数 mm サイズ) を得た。消光位において結晶の像が完全に消えることから、これらが単結晶であると決定した。

- ② 液相においてさらに高品質の単結晶薄膜を作製した。TPCO 材料は有機溶媒に溶解し、飽和濃度の懸濁液が得られる。結晶育成装置には放熱板が取り付けられており、一部は装置外に露出する。懸濁液を下からヒーターで暖めると、放熱板に接する部分およびその近傍で溶液が局所的に冷却される。このため、液中で放熱板上にシリコンウエハなどの基板を固定させておくと、再結晶によって基板上に結晶が析出する。特定の結晶軸、結晶方位とそれらが形成する特徴的な角度が明瞭に認められる。図 3 の六角形の BP1T 結晶はその一例である。発光が結晶端からのみ起こることは、TPCO 結晶内で光の閉じ込めが極めて有効に機能し、レーザー媒質として抜きん出て優れることを物語る。分子軸が単結晶薄膜の広いファセットに対して直立する特異な結晶構造に由来し、他の材料系に見られない著しい特徴である。

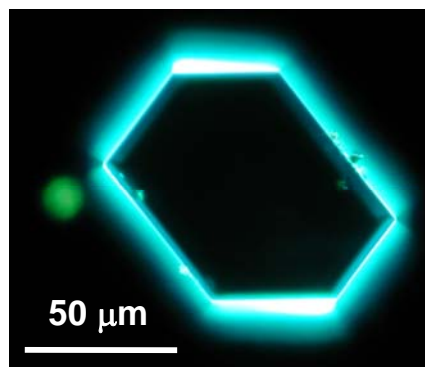


図 3 BP1T 液相成長結晶と端面発光

- (3) 上記の気相または液相で成長させた単結晶薄膜は厚さが数百 nm のオーダーで均一であり、基板に強固に密着するので、光電子デバイスの作製に打って付けである。これらの結晶について (異方) 屈折率等の光学定数を決定し、光励起による狭線化発光やレーザー特性等を研究した。また、トランジスタ等のデバイス上で電気物性を測定し、ハイブリッド共役ポリマー結晶への電荷注入・輸送の特徴を調べた。

- ① 図 4 に AC5 結晶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 付近に結晶の平行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

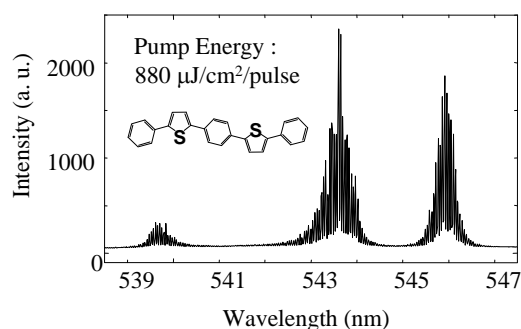


図4 AC5単結晶薄膜からのレーザー発振

端より長波長側で4.0と有機高分子物質としては格段に高い値を記録した。 Q ファクターが24500と極めて高い。スペクトルは c 軸方向に高度に偏光するので、この屈折率は c 軸方向の値である。これらの特性は光閉じ込め等が有効に機能するために必要不可欠である。

② 分子末端を様々な化学修飾して半導体物性にバリエーションをもたせることができるのも、TPCO材料の大きな特徴の一つである。例えば、図2のBP1T-OMeはp型特性を示す一方、AC5-CF₃はn型特性を示す。AC5結晶の正孔移動度およびAC5-CF₃結晶の電子移動度は共に $\sim 0.02 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であり、両極性に関してバランスの取れた移動度レベルを与える。同じ分子骨格をもつ有機半導体材料を比較した場合、電子移動度の方が小さい傾向があることを考えると、同レベルの移動度はTPCO材料の機能拡大に対して大きな意義をもつ。pn接合の形成等、デバイス設計に対しても優位性が高い。

③ 液相法によって育成したTPCO結晶を用いて電界効果トランジスタ(Field-Effect Transistor: FET)を作製した。酸化膜付シリコン基板上に成長させた結晶に金を蒸着してソースおよびドレイン電極とした。酸化膜下のシリコン基板本体がゲート電極として働く。比較的低い閾値でドレイン電流が立ち上がり、ドレイン電流の飽和特性が明瞭である。飽和領域でFETのキャリア移動度を評価し、BP3T結晶薄膜に対して $0.16 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の値を得た。その他のTPCO結晶も有機材料の中で高い移動度を与える。

④ 発光トランジスタの駆動方式を刷新して高い発光効率を示すデバイスを開発した。駆動方式は、ゲート電極に交流電圧を印加することを特徴とする。金等の安定な電極材料を用いて効果的な電子注入を実現できたことが大きなポイントである。交流電圧の周波数増大に伴って強い発光が得られる。これによって、デバイス構成や電極材料を変更することなく、従来の直流ゲート電圧印加方式に比べて1桁高い発光効率を達成した。ゲート交流電圧法によって、キャリア注入のメカニ

ズムを詳細に調べることが可能である。交流周波数増大に伴う強い発光は、主として負のキャリア(電子)の効率的な注入によることが分かった。交流電圧として矩形波を選択し、世界に先駆けてデバイスからの超狭線化発光(FWHM: 1.1 nm)を達成した。レーザー発振の前駆現象と考えられる。

⑤ 以上のように、TPCO材料を軸にハイブリッド共役ポリマー材料を新規に開発し、構造・物性を研究した。ロバストで安定な材料を用いて、デバイス上での超狭線化発光等、優れた光電子物性を生み出すことを示した。今後、高結晶性かつ高度に配向したポリマー材料の極限性能を追求するために、さらに優れた材料およびデバイスを開発して、次世代共役ポリマーを超階層制御し、革新機能をさらに深く探求したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計38件)

- (1) T. Yamao, K. Terasaki, Y. Shimizu, S. Hotta, "Organic-crystal light-emitting field-effect transistors driven by square-wave gate voltages," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 印刷中, 査読有.
- (2) S. Hotta, Y. Sakurai, Y. Okuda, T. Miki, K. Matsunaga, F. Hirato, T. Yamao, H. Jinnai, "Grating-assisted spectrally-narrowed emissions from an organic slab crystal excited with a mercury lamp," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 印刷中, 査読有.
- (3) S. Z. Bisri, T. Takenobu, Y. Yomogida, H. Shimotani, T. Yamao, S. Hotta, Y. Iwasa, "High mobility and luminescent-efficiency in organic single-crystal light-emitting transistors," *Advanced Functional Materials*, 印刷中, 査読有.
- (4) T. Yamao, T. Sakaguchi, K. Juri, H. Doi, A. Kamoi, N. Suganuma, S. Hotta, "Improvements of morphologies and emission characteristics of highly purified organic oligomer semiconductors," *Thin Solid Films*, 印刷中, 査読有.
- (5) T. Yamao, H. Akagami, Y. Nishimoto, S. Hotta, Y. Yoshida, "Improved device performance of organic crystal field-effect transistors fabricated on friction-transferred substrates," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 印刷中, 査読有.
- (6) T. Yamao, T. Inoue, Y. Okuda, T. Ishibashi, S. Hotta, N. Tsutsumi, "Gain-narrowed emissions from oligomer crystals assisted by interference exposure," *Synthetic Metals*,

- Vol. 159, No. 9–10, pp. 889–892 (2009), 査読有.
- (7) T. Shimada, S. Tomita, S. Hotta, S. Hayashi, H. Yanagi, “Photoluminescence from donor-acceptor molecular systems via long distance energy transfer mediated by surface plasmons,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48, No. 4, 042001/4 pages (2009), 査読有.
- (8) T. Yamao, K. Yamamoto, T. Inoue, Y. Okuda, Y. Taniguchi, S. Hotta, “Refractive index along the molecular long axis of an orthorhombic thiophene/phenylene co-oligomer crystal,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48, No. 4, 04C174/4 pages (2009), 査読有.
- (9) T. Yamao, K. Yamamoto, S. Hotta, “A high optical-gain organic crystal comprising thiophene/phenylene co-oligomer nanomolecules,” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 9, No. 4, pp. 2582–2585 (2009), 査読有.
- (10) S. Hotta, Y. Shimizu, T. Yamao, M. Goto, R. Azumi, “Crystal structure and FET characteristics of an n-type thiophene/phenylene co-oligomer of 1,4-bis{5-[4-(trifluoromethyl)phenyl]thiophen-2-yl}benzene,” *Chemistry Letters*, Vol. 38, No. 3, pp. 294–295 (2009), 査読有.
- (11) T. Yamao, H. Kuriki, T. Miki, S. Hotta, “A field-effect transistor based upon thiophene/phenylene co-oligomer nanomolecules combined with a composite polymer gate insulator,” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 9, No. 1, pp. 165–168 (2009), 査読有.
- (12) T. Hiramatsu, N. Matsuoka, H. Yanagi, F. Sasaki, S. Hotta, “Gain-narrowed emissions of thiophene/phenylene co-oligomer single crystals,” *Physica Status Solidi (c)*, Vol. 6, No. 1, pp. 338–341 (2009), 査読有.
- (13) T. Yamao, Y. Shimizu, K. Terasaki, S. Hotta, “Organic Light-Emitting Field-Effect Transistors Operated by Alternating-Current Gate Voltages,” *Advanced Materials*, Vol. 20, No. 21, pp. 4109–4112 (2008), 査読有.
- (14) T. Yamao, K. Yamamoto, T. Miki, H. Akagami, Y. Nishimoto, S. Hotta, “Polarized laser oscillation from polygon crystals of thiophene/phenylene co-oligomers grown by liquid-phase growth,” *Physica Status Solidi (c)*, Vol. 5, No. 9, pp. 3194–3196 (2008), 査読有.
- (15) T. Yamao, Y. Taniguchi, K. Yamamoto, T. Miki, T. Ohira, S. Hotta, “Polarized emissions from single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers measured by microspectroscopy,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 6, pp. 4719–4723 (2008), 査読有.
- (16) T. Yamao, K. Yamamoto, Y. Taniguchi, T. Miki, S. Hotta, “Laser oscillation in a highly anisotropic organic crystal with a refractive index of 4.0,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, No. 9, 093115/4 pages (2008), 査読有.
- (17) S. Hotta, T. Katagiri, T. Yamao, K. Shimizu, H. Yanagi, M. Ichikawa, Y. Taniguchi, “Development and electronic and photonic characteristics of thiophene/phenylene co-oligomers,” *International Journal of Polymeric Materials*, Vol. 57, No. 5, pp. 515–531 (2008), 査読有.
- (18) K. Yamane, H. Yanagi, S. Hotta, “Ambipolar field effect transistors with heterojunction of organic semiconductors,” *Thin Solid Films*, Vol. 516, No. 10, pp. 3157–3161 (2008), 査読有.
- (19) K. Yamane, A. Sawamoto, S. Hotta, H. Yanagi, “Organic heterojunction ambipolar field effect transistors with asymmetric source and drain electrodes,” *Thin Solid Films*, Vol. 516, No. 9, pp. 2758–2761 (2008), 査読有.
- (20) T. Hiramatsu, T. Shimada, S. Hotta, H. Yanagi, “Photoluminescence dynamics of thiophene/phenylene co-oligomer thin films based on Förster energy transfer,” *Thin Solid Films*, Vol. 516, No. 9, pp. 2700–2703 (2008), 査読有.
- (21) T. Yamao, S. Ota, T. Miki, S. Hotta, R. Azumi, “Improved sublimation growth of single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers,” *Thin Solid Films*, Vol. 516, No. 9, pp. 2527–2531 (2008), 査読有.
- (22) T. Shimada, S. Hotta, H. Yanagi, “Energy-transferred photoluminescence from thiophene/phenylene oligomer thin films,” *Journal of Luminescence*, Vol. 128, No. 3, pp. 457–461 (2008), 査読有.
- (23) K. Bando, T. Nakamura, S. Fujiwara, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, Y. Shimoi, S. Hotta, “Optical selection rule for the lower Davydov excitons in co-oligomer single crystals,” *Physical Review B*, Vol. 77, No. 4, 045205/6 pages (2008), 査読有.
- (24) T. Yamao, K. Yamamoto, Y. Taniguchi, S. Hotta, “Spectrally narrowed emissions occurring near an interface between a single crystal thiophene/phenylene co-oligomer and a glass substrate,” *Applied Physics Letters*, Vol. 91, No. 20, 201117/3 pages (2007), 査読有.

- (25) T. Yamao, Y. Taniguchi, K. Yamamoto, T. Miki, S. Ota, S. Hotta, M. Goto, R. Azumi, "Anisotropic refractive indices of organic crystals of thiophene/phenylene co-oligomers determined by microspectroscopic measurements," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 11, pp. 7478–7482 (2007), 査読有.
- (26) F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, S. Fujiwara, K. Bando, Y. Masumoto, S. Hotta, "Microdisk and microring lasers of thiophene-phenylene co-oligomers embedded in Si/SiO₂ substrates," *Advanced Materials*, Vol. 19, No. 21, pp. 3653–3655 (2007), 査読有.
- (27) T. Yamao, T. Miki, H. Akagami, Y. Nishimoto, S. Ota, S. Hotta, "Direct formation of thin single crystals of organic semiconductors onto a substrate," *Chemistry of Materials*, Vol. 19, No. 15, pp. 3748–3753 (2007), 査読有.
- (28) S. Fujiwara, K. Bando, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, S. Hotta, "Laser oscillations of whispering gallery modes in thiophene/phenylene co-oligomer microrings," *Applied Physics Letters*, Vol. 91, No. 2, 021104/3 pages (2007), 査読有.
- (29) T. Katagiri, S. Ota, T. Ohira, T. Yamao, S. Hotta, "Synthesis of thiophene/phenylene co-oligomers. V. Functionalization at molecular terminals toward optoelectronic device applications," *Journal of Heterocyclic Chemistry*, Vol. 44, No. Jul–Aug, pp. 853–862 (2007), 査読有.
- (30) T. Yamao, T. Ohira, S. Ota, S. Hotta, "Polarized measurements of spectrally narrowed emissions from a single crystal of a thiophene/phenylene co-oligomer," *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, No. 8, 083517/5 pages (2007), 査読有.
- (31) S. Hotta, M. Goto, R. Azumi, "Peculiar crystal structure of a thiophene/phenylene co-oligomer of 2,5-bis(4'-methoxybiphenyl-4-yl)thiophene," *Chemistry Letters*, Vol. 36, No. 2, pp. 270–271 (2007), 査読有.
- (32) K. Yamane, H. Yanagi, A. Sawamoto, S. Hotta, "Ambipolar organic light emitting field effect transistors with modified asymmetric electrodes," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 16, 162108/3 pages (2007), 査読有.
- (33) F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Haraichi, H. Yanagi, S. Hotta, M. Ichikawa, Y. Taniguchi, "Pulse-shaped emissions with time delay in single crystals of thiophene/phenylene co-oligomers," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 45, pp. L1206–L1208 (2006), 査読有.
- (34) K. Shimizu, Y. Mori, S. Hotta, "Laser oscillation from hexagonal crystals of a thiophene/phenylene co-oligomer," *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, No. 6, 063505/4 pages (2006), 査読有.
- (35) R. P. Ortiz, J. Casado, V. Hernández, J. T. L. Navarrete, E. Ortí, P. M. Viruela, B. Milián, S. Hotta, G. Zotti, S. Zecchin, B. Vercelli, "Magnetic properties of quinoidal oligothiophenes: More than good candidates for ambipolar organic semiconductors?," *Advanced Functional Materials*, Vol. 16, No. 4, pp. 531–536 (2006), 査読有.
- (36) K. Bando, T. Nakamura, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, S. Hotta, "Origin of the amplified spontaneous emission from thiophene/phenylene co-oligomer single crystals: Towards co-oligomer lasers," *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, No. 1, 013518/4 pages (2006), 査読有.
- (37) D.-M. Smilgies, D. R. Blasini, S. Hotta, H. Yanagi, "Reciprocal space mapping and single-crystal scattering rods," *Journal of Synchrotron Radiation*, Vol. 12, No. 6, pp. 807–811 (2005), 査読有.
- (38) M. Ichikawa, R. Hibino, M. Inoue, T. Haritani, S. Hotta, K. Araki, T. Koyama, Y. Taniguchi, "Laser oscillation in monolithic molecular single crystals," *Advanced Materials*, Vol. 17, No. 17, pp. 2073–2077 (2005), 査読有.

[学会発表] (計 8 4 件) (略)

[図書] (計 5 件) (略)

[産業財産権]

○出願状況 (計 9 件)

(1) 名称：発光デバイスの駆動方法及び駆動装置

発明者：山雄健史，清水康弘，寺崎皓平，堀田収

権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学

種類：特許

番号：PCT/JP2009/052092

出願年月日：2009年2月9日

国内外の別：国外

(2) 名称：(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー，その製造方法，およびそれを含む有機半導体材料および発光材料

発明者：坂東誠二，片桐敏文，宮田真良，鈴木三千雄，堀田収，山雄健史

権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学，住友精化株式会社

- 種類：特許
番号：特願 2008-278300
出願年月日：2008年10月29日
国内外の別：国内
- (3) 名称：(チオフェン／フェニレン) コオリゴマー，その製造方法，およびそれらを含む有機半導体材料および発光材料
発明者：片桐敏文，坂東誠二，宮田真良，鈴木三千雄，堀田収，山雄健史
権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学，住友精化株式会社
種類：特許
番号：特願 2008-216781
出願年月日：2008年8月26日
国内外の別：国内
- (4) 名称：(チオフェン／フェニレン) コオリゴマー，その製造方法，およびそれらを含む有機半導体材料および発光材料
発明者：坂東誠二，片桐敏文，宮田真良，鈴木三千雄，堀田収，山雄健史
権利者：住友精化株式会社，国立大学法人京都工芸繊維大学
種類：特許
番号：特願 2008-188486
出願年月日：2008年7月22日
国内外の別：国内
- (5) 名称：有機光学デバイス，その製造方法，及び増幅又は狭線化した光を発する方法
発明者：堀田収，山雄健史，陣内浩司，櫻井陽一，松永和之，三木智晴，平等文雄
権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学
種類：特許
番号：特願 2008-175782
出願年月日：2008年7月4日
国内外の別：国内
- (6) 名称：(チオフェン／フェニレン) コオリゴマー
発明者：坂東誠二，片桐敏文，宮田真良，鈴木三千雄，北山浩之，堀田収，山雄健史
権利者：住友精化株式会社，国立大学法人京都工芸繊維大学
種類：特許
番号：特願 2007-285196
出願年月日：2007年11月1日
国内外の別：国内
- (7) 名称：有機半導体膜の製造方法
発明者：堀田収，山雄健史，鴨井彬，栗木寛文
権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学，国立大学法人京都大学，日本電信電話株式会社，パイオニア株式会社，株式会社日立製作所，三菱化学株式会社，ローム株式会社
種類：特許
番号：特願 2006-238133，特開

- 2008-060480
出願年月日：2006年9月1日
国内外の別：国内
- (8) 名称：材料の単結晶薄膜製造方法及び単結晶薄膜製造装置
発明者：山雄健史，堀田収，大田郷史，三木智晴
権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学
種類：特許
番号：特願 2006-179593，特開 2008-007377
出願年月日：2006年6月29日
国内外の別：国内
- (9) 名称：有機半導体膜の製造方法および有機デバイス
発明者：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，松浦徹，小勝負信建，奥良彰
権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学，国立大学法人京都大学，日本電信電話株式会社，パイオニア株式会社，株式会社日立製作所，三菱化学株式会社，ローム株式会社
種類：特許
番号：特願 2006-112273，特開 2008-287862
出願年月日：2006年4月14日
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕
ホームページ等
URL: <http://www.mse.kit.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1)研究代表者
堀田 収 (HOTTA SHU)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号：00360743
- (2)研究分担者
山雄 健史 (YAMAO TAKESHI)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・助教
研究者番号：10397606
- (3)連携研究者