

研究室紹介

京都工芸繊維大学 電子システム工学課程／専攻 山下・高橋研究室

Yamashita & Takahashi Lab., Kyoto Institute of Technology

山下兼一, 高橋駿 Kenichi Yamashita, Shun Takahashi

京都工芸繊維大学, 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町
Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

はじめに

本研究室は有機フォトニクスやナノ光電子工学を研究対象としており、筆者である山下と高橋が合同で運営している。現在の研究体制が2017年にスタートして以来、小さな所帯ではあるが日々活発に研究活動を推進している。また、本研究室と同じ組織内にはフォトニクスに関連する研究室がほかにも多く、教育／研究の交流でも相乗効果を生み出し、学内全体でもフォトニクス分野の研究活動が盛んである。

筆者の1人である山下は、半導体工学や光エレクトロニクス、有機エレクトロニクスなど、これまでに多彩な研究分野を経験してきた。神戸大学では学部生から学振特別研究員PDまでの9年間、半導体超構造の光物性や光半導体の結晶成長技術の研究を行い、現在の研究の基盤となる基礎的な物性物理学を習得した。

その後、現在の所属に赴任し、半導体レーザー材料やポリマー光導

波路技術などの研究を経ることで、応用分野までの幅広い光エレクトロニクス分野を俯瞰してきた。また、それと並行して π 共役系の有機低分子及び高分子材料を用いたフォトニクス技術にも興味を持つようになり、他機関や他学科の先生ともコラボレーションしながら異分野の研究技術も磨いてきた。このような幅広い研究経験を踏まえた結果として、現在メインに取り組んでいる研究テーマが有機系材料中での光-物質相互作用の制御とそれに基づくポラリトンデバイスの開発である。一方、高橋は無機半導体（主にGaAs）のナノ加工技術を駆使して三次元周期構造（フォトリソグラフィ結晶）を作製し、三次元的に光を閉じ込めたナノ共振器における光-物質相互作用などの研究を行っている。

る。本稿ではそれらの研究トピックスについて、我々の研究活動を少しばかり紹介させていただく。

有機半導体ポラリトン

急峻な励起子吸収スペクトルを示す活性材料によって作製された微小共振器内において、形成される光子モードのエネルギーが励起子遷移双極子モーメントのエネルギーと共鳴した時、光-物質間での相互作用効果が高められ、光-物質のハイブリッド準粒子である共振器ポラリトンが形成される¹⁾。共振器ポラリトンはボーズ粒子性と小さな有効質量を持つとされ、コヒーレントなエネルギー凝縮状態（ポラリトン凝縮）を示すことがよく知られている²⁾。これまでは主に無機化合物半導体のマイクロキャビティにおいてその基礎物性が注目されてきたが、2010年にミシガン大学の

グループから有機半導体の1つであるアントラセン単結晶の微小共振器において、室温でのポラリトン凝縮が報告された³⁾。有機半導体レー

ザーに関する研究を進めていた筆者らはこの報告に強く感化され、それ以来、有機室温ポラリトンを研究活動のメイントピックに据えることになった。

我々の研究室では、光-物質ハイブリッド化への優位性が期待される材料系として、振動子強度が大きく、強い分子配向を有するTPCOと呼ばれる低分子半導体単結晶に注目している。ところが当初は、分子配向がスラブ型結晶の垂直方向になることが多く、いわゆるVCSEL型のマイクロキャビティとの相性がよくなかった。しかし、2014年頃にTPCOの一種であるBPIT-CNと呼ばれる分子において大きな振動子強度と水平方向への分子配向が両立できることがわかり⁴⁾、これがブレークスルーとなってまともな成果が出始



研究室の集合写真（飛沫感染には十分注意して撮影）

め、室温での強結合観測やコヒーレント発光の観測を達成するに至った。

このような学際的研究を推進するには物理化学系の研究者との連携が不可欠であった。特に TPCO を使用するにあたっては、この材料系の開発者である堀田収先生（京都工繊大名誉教授）のご協力を仰ぎ、その単結晶成長に関しては山雄健史先生（京都工繊大）に多大な研究協力をいただいた。また、本研究の開始から現在に至るまで、奈良先端大の柳久雄先生、産総研の佐々木史雄先生らと強く連携して成果を出してきており、最近では国際的にも徐々に認知されつつある状況にある⁵⁾。また、高品質な誘電体多層膜の作製には、大阪市立大学の中山正昭先生に多大なご協力をいただいている。

2016 年度に学内措置で 1 年間の海外派遣に出る機会をいただいた。有機系のポラリトン研究をさらに推進するためには材料的知見の裾野を広げることが不可欠と考え、世界有数の有機光エレクトロニクスの研究室である英国ケンブリッジ大学の R. H. Friend 先生の研究室を訪問した。訪問研究員としてのプロジェクトとして TPCO ポラリトン凝縮の超高速ダイナミクスを明らかにするとともに⁶⁾、現地で多くの研究者と交流を深め、鉛ハライドペロブスカイト半導体の基礎知識を収集した。この材料系は最近、高効率な太陽電池として注目を集めているが、LED やレーザ材料、ポラリトン材料としても有望視されており、その特異な電子物性による新しい光機能の創出が期待されている。帰国後に Friend 研究室の若手 P.I. である A. Rao 博士とペロブスカイト微小共振器に関する共同研究を開始し、これまでの有機半導体とは異なる電子物性に起因した興味深い成果が出始めている⁷⁾。派遣期間中に教授に昇進させていただき、帰国後の 2017 年度からは、卓越研究員として東京大学から赴任した高橋と合流して光エレクトロニクス研究グループを形成し、現在に至っている。

三次元フォトニック結晶

高橋は、前職から継続して、マイクロマニピュレーション法という薄膜積層技術によって作製した、サブミクロン周期の GaAs 三次元フォトニック結晶を軸に研究を行ってきた。三次元フォトニック結晶内部にナノ共振器を設けることで、あらゆる伝播方向・偏光を有する光を閉じ込めることができるため、高効率なナノ共振器レーザーや、制御自由度の高い共振器量子電気力学現象などが期待されている。また、三次元系でのみ実現可能な構造カイラリティ（らせん構造）に注目して円偏光制御の研究を行っているほか、トポロジカルフォトニクスの研究にも注力している。最近では、

博士課程時に研究した電子スピン物性の微小電流測定技術を用いて、円偏光と固体中の電子とのスピン角運動量転写を利用したスピントロニクスの研究も始めた。山下とは、有機/無機半導体の材料の違いはあるものの、微小共振器における光-物質相互作用の点で研究背景が一致しており、理論や考察の面で議論を重ねている。今後は、有機/無機材料のハイブリッド化など、実験面での連携も検討している。

おわりに

本研究グループでは学部生、大学院生を合わせて毎年総勢 15 名程度の学生が協力し合いながら、日々のびのびと活動している。ほぼ 100% の学部生が修士課程へ進学しており、他大学からの大学院転入者も多い。昨年度末からのコロナ渦の影響で、恒例になっていた定例コンパなどが開催できないのは残念であるが、新たな研究室生活の様式に順応すべく、前向きに進んでいるところである。大変ありがたいことに、山下、高橋ともにフォトニクス分科会の幹事を経験させていただくことができた。また、昨年度のフォトニクスワークショップでは所属学生が優秀ポスター賞をいただいたり、学内での研究会イベントへは協賛をいただいたりするなど、グループとしても本分科会には大変お世話になっている。ここに心よりの感謝を申し上げるとともに、今後とも学術講演会や本分科会誌などを通じて、多くの最先端フォトニクス技術を勉強させていただきたい所存である。

【参考文献】

- 1) Weisbuch, C., et al. "Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity," *Phys. Rev. Lett.*, 69 (1992) 3314-3317.
- 2) Kasprzak, J., et al. "Bose-Einstein condensation of exciton polaritons," *Nature*, 443 (2006) 409-414.
- 3) Kéna-Cohen, S., et al. "Room-temperature polariton lasing in an organic single-crystal microcavity," *Nat. Photon.*, 4 (2010) 371-375.
- 4) Yamashita, K., et al. "Vertical cavity surface emitting lasing from cyano-substituted thiophene/phenylene co-oligomer single crystals," *Appl. Phys. Lett.*, 104 (2014) 255301.
- 5) Yanagi, H., et al. "Cooperative behaviors in amplified emission from single microcrystals of thiophene/phenylene co-oligomers toward organic polariton laser," *Adv. Opt. Mater.*, 7 (2019) 1900136.
- 6) Yamashita, K., et al. "Ultrafast dynamics of polariton cooling and renormalization in an organic single-crystal microcavity under nonresonant pumping," *ACS Photon.*, 5 (2018) 2182-2188.
- 7) Fujiwara, K., et al. "Excitation dynamics in layered lead halide perovskite crystal slabs and microcavities," *ACS Photon.*, 7 (2020) 845-852.
- 8) Takahashi, S., et al. "Circularly polarized vacuum field in three-dimensional chiral photonic crystals probed by quantum dot emission," *Phys. Rev. B* 96 (2017) 195404, Editors' Suggestion.