

低閾値発振を目指した電流励起有機半導体レーザーの構築



研究代表者	九州大学・工学研究院・教授 安達 千波矢 (あだち ちはや)	研究者番号:30283245
研究課題情報	課題番号: 23H05406 キーワード: 有機半導体レーザー、有機エレクトロニクス、励起子、TADF、ナノ加工	研究期間: 2023年度~2027年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

● 研究の全体像

有機半導体開発の歴史は、デバイス工学と有機材料化学・デバイス物性の学理が両輪となって発展してきた。30年前には、誰も100 nmの有機超薄膜を用いたデバイスが安定性の課題を乗り越えて実用化を迎えることを予想することは困難であった。しかし、多くの研究者の努力により、ピンホールのない、均一な有機薄膜を形成する材料・デバイスプロセス技術が大きく進歩したことで、再現性の高い超薄膜形成が可能となり、さらに、有機固体薄膜の光電子物性の開拓が大きく進展した。まさに、超薄膜エンジニアリングと材料・デバイスサイエンスが共に競い合っており、有機光エレクトロニクスを大きく発展してきた。そして、無機材料を含め多彩な材料が開発されてきた中でOLED (有機EL) が実用化に至ったことは、有機分子がエレクトロニクス素材として、アカデミックの枠を超え、実用材料として耐えうる性能を有していることを実証した。この背後には、電荷注入・移動から電荷再結合・分離過程に関する詳細なメカニズム解明が工学としての発展を支えてきたことは疑いがない。本研究では、OLEDの科学技術を基礎とし、その延長線上にある有機半導体レーザー (OSLD)を実現するための新材料開発からデバイス物性までの基礎学理の解明を進める。

● OSLDの学理の確立

OSLDは、有機半導体の学理を大きく発展させる可能性を有している。1kA/cm²に達する高電流密度下における励起子失活過程、電子伝導機構、そして、有機レーザー分子の高度化や光共振器構造の新展開を進め、有機材料化学からデバイス物性工学までの幅広い領域を一段上の学理へと展開することができる。

特に、有機レーザー分子の設計においては、これまでOLEDで培ってきた蛍光、りん光、そしてTADFの材料技術を発展させることで、電流励起下での超低閾値レーザー材料の創製が期待できる。電流励起下では、大量に生成される三重項励起子をレーザー作用に転換させることも重要な視点であり、そのためには三重項励起子の一重項励起状態への数100ns以下での高速スピン変換過程の実現等が必要である。これらの研究により、スピン変換における詳細な機構解明の進展が期待される。さらに、高電流密度下におけるOSLDの劣化機構の解明は、励起子解離機構の視点に加え、高電流密度下においても耐える有機薄膜凝集構造の高度化が進むと期待される。特に微細なアモルファス構造の制御による膜の安定化と配向分極に関する研究は、有機アモルファス構造の新たな学問領域を開拓すると期待される。

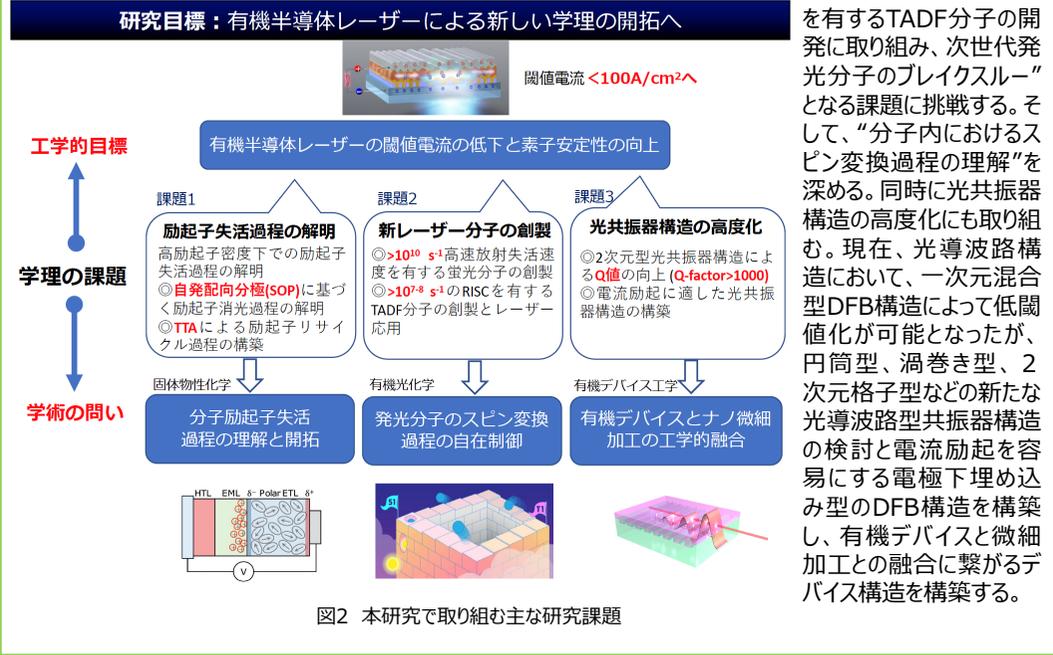
● 有機CT現象の解明へ

有機薄膜デバイス研究のコアサイエンスを一言で総括すると、有機分子の分子内・分子間のCT相互作用の精密制御と捉えることができる。電荷注入から電荷輸送、そして、励起子の生成から失活まですべての素過程において、CT相互作用の強・弱の精密制御が機能発現に繋がっている。キャリア注入では電極と有機層の分極効果、電荷輸送では分子のドナー性、アクセプター性が、励起子生成ではExciplex状態や分子内・間CT相互作用によって、TADF機能が発現している。CT現象の徹底制御により、有機デバイスサイエンスのコアである。これまでのCT現象を総括して、OSLDの課題を突破していきたい。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

OSLDは有機薄膜に従来の常識を越える1kA/cm²の大電流密度を通電する必要がある。OSLD駆動下では、高電流密度、高電界強度、高励起子密度の状態が同時に形成されるために、励起子同士の失活に加え、励起子と電荷 (ポーロン) の相互作用、高電界下における励起子消光過程を克服していく必要がある。さらに、有機薄膜形成時における自発配向分極 (Spontaneous orientation polarization (SOP)) も励起子消光に重大な影響を果している可能性があり、SOPによる強い内部電界が励起子失活の主要因になっている。このような極限状況 (強電界・高励起子密度・高電流密度) 下において、励起子失活を能動的に抑制しながら反転分布を形成し、レーザー発振に至る詳細なメカニズムを確立し、“分子励起子失活過程の完全理解”に繋げる。

OSLDを実用可能な確実な技術とするためには、大幅なレーザー発振閾値の低減が必須であり、本研究では、新規レーザー分子の開発と光閉じ込め効率に優れた光共振器構造の開発に取り組む。新レーザー分子の開発においては、放射速度定数が $k_r > 10^{10} \text{ s}^{-1}$ を超える蛍光分子の開発、速い逆系間交差速度 ($> 10^8 \text{ s}^{-1}$)



Progress of Organic Lasers

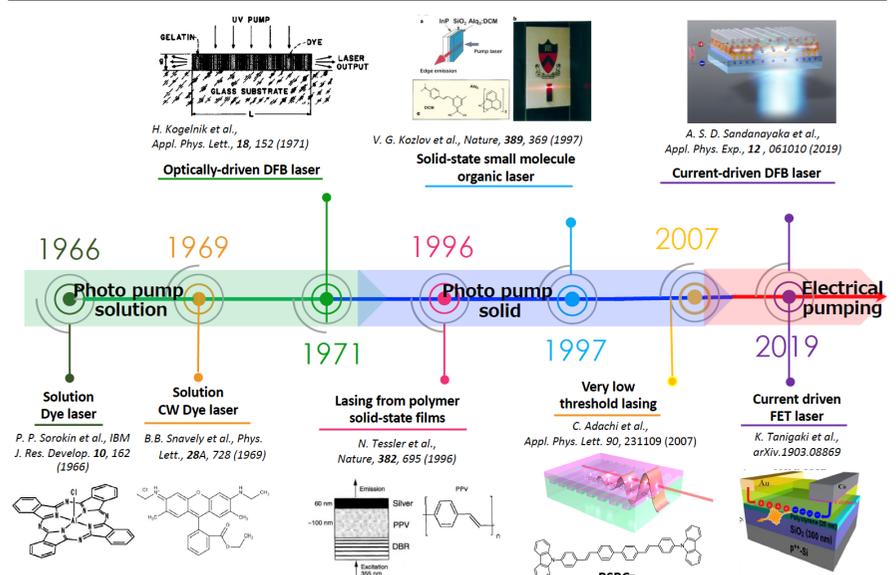


図1 OSLD研究展開—光励起から電流励起へ—

図2 本研究で取り組む主な研究課題