

広帯域相関計測解析研究部門

藤 貴 夫（准教授）（2010 年 2 月 1 日着任）

A-1) 専門領域：量子エレクトロニクス，レーザー物理，非線形光学，超高速分光

A-2) 研究課題：超短光パルスの研究

- a) 超短光パルスの超広帯域波長変換技術を使った分光法の開発
- b) 超短光パルスの位相制御，評価の研究
- c) 赤外ファイバーレーザーの開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 本研究室において，2 から 20 μm までの波長領域で位相の揃ったコヒーレントな赤外光パルスを発生する技術と，そのスペクトルを単一ショット（1 ms）で計測できる方法を開発した。この波長領域の光は，多くの分子振動単位と共鳴しており，非破壊で分子のダイナミクスを研究するのに適している。今年度の成果としては，その高速赤外スペクトル分光法を用いた超高速ポンプ・プローブ分光が挙げられる。800 nm のフェムト秒パルスで半導体を励起し，生成したキャリアのダイナミクスを，広帯域な赤外スペクトル計測を行うことで，観測した。台湾のグループとの共同研究によって，詳細な解析を進め，100 ps 程度の高速な緩和は，オージェ再結合であることと，その後に，ナノ秒のタイムスケールで拡散による緩和が起こることがわかった。
- b) 数年前に開発した超短光パルスの光電場波形を直接計測する手法を使って，電場波形に敏感な高次高調波発生の研究を進めた。Si 薄膜にサブサイクル中赤外光パルスを集光すると，300 nm 以下の紫外領域まで広がった高次高調波が発生した。サブサイクル中赤外光パルスの位相を操作することで，高調波スペクトルが大きく変化した。この変化は，光学ブロッホ方程式でおおむね説明できることがわかった。
- c) 前年度にはチャープパルス増幅を基本としたツリウム添加 ZBLAN ファイバー増幅器によって，2 μm の波長で出力が 4 W 程度，時間幅が 150 フェムト秒のパルスが得られた。このパルス幅をさらに短くするために，ファイバー内の非線形効果を利用する増幅を試みた。すなわち，チャープパルス増幅法で用いるパルス伸長器を取り除き，パルス幅を伸ばしていない状態で増幅を行った。その結果，ファイバー内での光強度の尖頭値が格段に高くなり，非線形効果によってスペクトル幅が大幅に広がった。この時に得られたパルスは，圧縮器を通していないにも関わらず時間幅は 48 フェムト秒となっており，前年度の 1/3 にまで短縮することに成功した。出力は 2.4 W となっており，チャープパルス増幅の場合と比べて，遜色のないものとなっている。

B-1) 学術論文

T.-T. YEH, H. SHIRAI, C.-M. TU, T. FUJI, T. KOBAYASHI, and C.-W. LUO, “Ultrafast Carrier Dynamics in Ge by Ultra-Broadband Mid-Infrared Probe Spectroscopy,” *Sci. Rep.* **7**, 40492 (10 pages) (2017).

Y. NOMURA and T. FUJI, “Efficient Chirped-Pulse Amplification Based on Thulium-Doped ZBLAN Fibers,” *Appl. Phys. Express* **10**, 012703 (4 pages) (2017).

Y. NOMURA and T. FUJI, “Generation of Watt-Class, Sub-50 fs Pulses through Nonlinear Spectral Broadening within a Thulium-Doped Fiber Amplifier,” *Opt. Express* **25**, 13691–13696 (2017).

H. SHIRAI, Y. NOMURA and T. FUJI, “Self-Referenced Measurement of Light Waves,” *Laser Photon. Rev.* **11**, 1600244 (6 pages) (2017).

B-2) 国際会議のプロシーディングス

Y. NOMURA and T. FUJI, “Ultrafast thulium-doped amplifier generating watt-level 50 femtosecond pulses,” *The 6th Advanced Lasers and Photon Sources*, ALPS7-2 (2017).

Y. NOMURA and T. FUJI, “Watt-level 50 fs pulse generation from thulium-doped ZBLAN fiber amplifier system,” *CLEO/Europe-EQEC 2017*, CF-3.4 (2017).

H. SHIRAI, Y. FURUTANI and T. FUJI, “Ultra-broadband mid-infrared spectroscopy for real-time observation of chemical reaction dynamics,” *ICO24*, M1B-05 (2017).

T. FUJI, M. SUZUKI, P. MALEVICH, Y. NOMURA, N. TSURUMACHI and A. BALTUSKA, “Generation of mid-infrared supercontinuum in cascaded fluoride and chalcogenide glass fibers pumped with Thulium based master oscillator power amplifier,” *ICO24*, M1G-04 (2017).

H. SHIRAI, F. KUMAKI, Y. NOMURA and T. FUJI, “High-harmonic generation driven by single-cycle mid-infrared pulses in solids,” *Ultrafast Optics XI*, Mo1.4 (2017).

T. FUJI, M. SUZUKI, P. MALEVICH, Y. NOMURA, N. TSURUMACHI and A. BALTUSKA, “Generation of mid-infrared supercontinuum in cascaded fluoride and chalcogenide glass fibers pumped with Tm-based femtosecond amplifier,” *Ultrafast Optics XI*, Tu6.3 (2017).

Y. NOMURA and T. FUJI, “Ultrafast thulium-doped ZBLAN fiber amplifier utilizing nonlinear spectral broadening,” *Advanced Solid State Lasers*, JTh2A.47 (2017).

B-3) 総説, 著書

H. SHIRAI, Y. NOMURA and T. FUJI, “Development and Application of Sub-Cycle Mid-Infrared Source Based on Laser Filamentation,” *Appl. Sci.* **7**, 857 (5 pages) (2017).

B-4) 招待講演

藤 貴夫, 「新規フェムト秒赤外パルスレーザーを光源とした計測装置」, 分子観察による生命の階層横断的な理解, 分子科学研究所, 岡崎, 2017年3月.

野村雄高, 藤 貴夫, 「トリウム添加ZBLAN ファイバーによる 2 μm 帯超短パルスレーザーシステム」, 超高速光エレクトロニクス研究会, 電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス時限研究専門委員会, 名古屋大学, 名古屋, 2017年6月.

藤 貴夫, 「超短光パルスの測定法——基礎から最先端の研究まで——」, 第62回物性若手夏の学校, 長良川温泉ホテルパーク, 岐阜, 2017年7月.

T. FUJI, H. SHIRAI and Y. NOMURA, “Self-referenced light wave measurement of few-cycle mid-infrared pulses,” *CLEO Pacific Rim Conference*, Singapore, August 2017.

T. FUJI, H. SHIRAI and Y. NOMURA, “Self-referenced waveform measurement of ultrashort mid-infrared pulses,” *ALT’17*, Busan (Korea), September 2017.

藤 貴夫,「チャープパルス上方変換による高速な中赤外スペクトル計測」, テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会第 33 回研究会, 浜松ホトニクス, 浜松, 2017 年 10 月.

野村雄高,「新奇な長波長レーザーによる超深部顕微分光システム」, 光電相互変換第 25 委員会第 239 回研究会, 明治大学, 東京, 2017 年 12 月.

B-6) 受賞, 表彰

藤 貴夫, 日本光学会奨励賞 (1999).

藤 貴夫, 大阪大学近藤賞 (2008).

藤 貴夫, 野村雄高, 白井英登, レーザー学会業績賞 (進歩賞) (2015).

野村雄高, 自然科学研究機構若手研究者賞 (2016).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

レーザー学会「ファイバーレーザー技術」専門委員会委員 (2015-). (野村雄高)

電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス時限研究専門委員会第 4 部会副査 (2017-).

電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス時限研究専門委員会第 2 部会副査 (2017-). (野村雄高)

学会の組織委員等

CLEO/Europe 2007 国際会議プログラム委員 (2007).

化学反応討論会実行委員 (2009).

CLEO/Pacific Rim 2009 国際会議プログラム委員 (2009).

HILAS 国際会議プログラム委員 (2011).

CLEO/Europe 2011 国際会議プログラム委員 (2011).

HILAS 国際会議プログラム委員 (2012).

CLEO/Europe2013 国際会議プログラム委員 (2013).

CLEO/Pacific Rim 2013 国際会議プログラム委員 (2013).

HILAS 国際会議プログラム委員 (2014).

CLEO/USA2014 国際会議プログラム委員 (2014).

CLEO/USA2015 国際会議分科プログラム委員長 (2015-2016).

CLEO/Europe2015 国際会議プログラム委員 (2015).

レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会プログラム委員 (2014-2015).

レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会プログラム委員 (2017). (野村雄高)

ICO24 国際会議プログラム委員, 座長 (2017).

CLEO Pacific Rim 2017 座長 (2017).

Ultrafast Optics 2017 国際会議プログラム委員, 座長 (2017).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

文部科学省科学技術・学術審議会量子科学技術委員会・超短パルスレーザーに係るロードマップ検討グループ専門有識者 (2017-).

B-8) 大学での講義、客員

総合研究大学院大学物理科学研究科、学融合レクチャー「先端レーザー基礎演習」, 2017年9月19日-9月21日, 2017年10月24日-10月26日.

B-10) 競争的資金

科研費若手研究(A),「光電子イメージング分光のための10フェムト秒深紫外光パルス発生」, 藤 貴夫 (2007年-2008年).
自然科学研究機構若手研究者による分野間連携研究プロジェクト,「プラズマを使ったフェムト秒中赤外光パルス発生の研究」, 藤 貴夫 (2010年-2011年).
科研費基盤研究(B),「超広帯域コヒーレント中赤外光を用いた新しい分光法の開拓」, 藤 貴夫 (2012年-2014年).
自然科学研究機構若手研究者による分野間連携研究プロジェクト,「超短中赤外パルスを用いた生細胞内分子の無染色ライブイメージング法の開発」, 藤 貴夫 (2012年).
科学技術振興事業団先端計測分析技術・機器開発プログラム要素技術タイプ,「超広帯域コヒーレント赤外分光技術の開発」, 藤 貴夫 (2012年-2015年).
科研費挑戦的萌芽研究,「自己参照による光電場の直接測定」, 藤 貴夫 (2014年-2016年).
科研費特別研究員奨励費,「高次高調波発生による高繰り返し極端紫外光源の開発およびその応用」, 野村雄高 (2010年).
豊秋奨学会海外渡航旅費助成,「153 nmにおけるコヒーレントな高繰り返し準連続光源」, 野村雄高 (2011年).
光科学技術研究振興財団研究助成,「トリウム添加ファイバーによるフェムト秒レーザーの開発」, 野村雄高 (2012年-2013年).
科研費若手研究(B),「中赤外領域における高繰り返しフェムト秒パルス光源の開発」, 野村雄高 (2013年-2014年).
光科学技術研究振興財団研究助成,「自己参照による光電場波形の直接計測」, 藤 貴夫 (2015年-2016年).
科研費若手研究(B),「単一サイクル赤外光パルスを用いた高速赤外吸収分光」, 白井英登 (2015年-2016年).
自然科学研究機構若手研究者による分野間連携プロジェクト,「新規赤外フェムト秒レーザーによる超深部シナプス内分子活性化イメージング」, 藤 貴夫 (2015年-2017年).
天田財団一般研究開発助成,「高出力2 μ m超短パルスレーザー光源の開発」, 野村雄高 (2015年-2017年).
科学技術振興機構さきがけ研究「生命機能メカニズム解明のための光操作技術」領域,「長波長レーザーによる超深部顕微分光システムの開発」, 野村雄高 (2016年-2019年).
科研費基盤研究(B),「光電場波形計測法の開発と新しい非線形光学の開拓」, 藤 貴夫 (2017年-2020年).
科学技術振興機構CREST研究,「超短赤外パルス光源を用いた顕微イメージング装置の開発と生命科学への応用」, 藤 貴夫 (2017年-2023年).

C) 研究活動の課題と展望

フィラメンテーションを用いた波長変換は、気体を媒質としながらも、高効率な超短光パルスの波長変換法として有効である。この光源を使った新規分光法が評価され、CRESTのプロジェクトに採択された。この手法をさらに発展させて、分子科学のみならず、生物、医療など異分野へ応用していくことを考えている。また、本研究室で独自に開発した新しい光電場波形計測法を有効に用いて、高次の非線形過程の光電場位相による制御が可能であることを示した。これまで、この手法が実証されたのは、赤外光パルスだけであるが、今後、可視光領域でも実証したいと考えている。ファイバーレーザーの開発では、非線形ファイバー増幅器の開発に成功した。この増幅器から発生するスペクトルは2000 nm から1800 nm 以下まで広がっており、3光子顕微鏡において、最適な波長であると考えられる。今後、赤外光発生のためのさらなる増幅や、多光子顕微鏡など、様々な分野へ応用することを考えている。