第61回
学位取得者
・
第18回
学術奨励賞

学位取得者・学術奨励賞受賞者の紹介

東京大学 工学系研究科 原子力専攻
相川 脩（あいかわ しゅう）
東京理科大学 理学研究科 応用物理学専攻 2020年度 博士課程入学
理学研究科 応用物理学専攻 2022年度 博士課程修了

産業応用のための中赤外固体レーザーの開発

御礼

第18回学術奨励賞ならびに本稿執筆の機会を賜り，心より御礼申し上げます．私は，元々は他大学の大学院で原子核実験の研究室に所属していましたが，学位取得までに10年程度を要すると言われ，風土・教育システム含め自分には耐えられる環境ではないとの判断から，原子分光実験に必要ということで開発を進めていた中赤外レーザーの研究テーマで博士号取得を目指す方針に転換しました．それに伴い，東京理科大学の博士課程に転入学し，無事に学位を取得させていただき，現在は東大で日々充実した研究活動に取り組んでおります．ここに，転機となった理化学研究所の和田智之チームリーダーおよび連携大学院制度でご指導・支援を賜った齋藤智彦教授をはじめ，関係者各位に深く感謝申し上げます．

中赤外レーザーの開発

中赤外領域（波長2～10 μm）は，分子固有の吸収スペクトルが多数存在する「指紋領域」として知られ，医療，材料科学，高エネルギー物理学など多岐にわたる応用が期待されています．特に波長2～3 μm帯は，－OH，－NHの伸縮振動（2.8～3.4 μm）や－CH伸縮振動（約3.4 μm）に起因する吸収バンドが存在し，生体材料の加工やリモートセンシングに有用です．

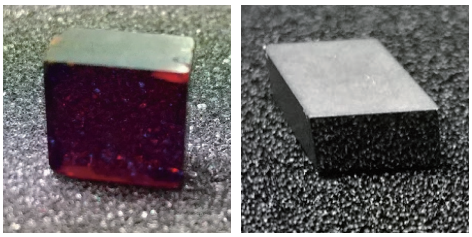
近年，波長2～3 μm帯で高エネルギーなパルス発振を実現するため，遷移金属イオンの一種であるCr^{2+}添加カルコゲナイド（II-VI族半導体）が注目されています．これらの材料は，ホスト結晶中の四面体配位による大きな誘導放出断面積と，添加イオンの電子状態と格子振動（フォノン）との強いバイブロニック相互作用により，広い蛍光バンド幅を示します．「中赤外のチタンサファイア」とも評されるCr:ZnSeは，その中でも有望な例です．

私の研究では，Cr:ZnSeとCr:CdSeという2種類のCr^{2+}添加カルコゲナイド【図1】を用いて，両者の吸収スペクトルが波長約2 μm付近で重なっている点に着目しました．

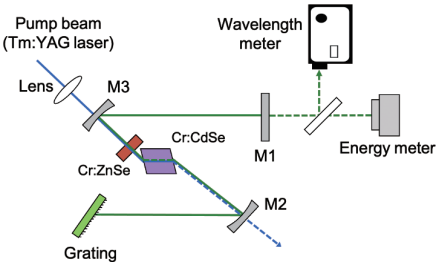
そこで，【図2】に示す通り，1つのレーザー発振器内に両結晶を配置し，波長2.01 μmのTm:YAGレーザーを励起光源として発振試験を行い，各単体の結晶での発振試験時よりも広い波長可変領域と高出力が得られることを確認しました[1)]．具体的には，Cr:ZnSe＋Cr:CdSe複合活性媒質（CAM）レーザーにおいて，波長2.15～3.04 μmと広い可変範囲を達成し，光子エネルギー変化率にして41.4％が制御可能であることが明らかになりました．これは，画期的なレーザー媒質として広く利用されているチタンサファイア（波長650～1100 nm，光子エネルギー変化率約41.2％）と同等の可変率であり，先述の通り，応用が期待される中赤外領域で動作する点に大きな意義があると言えます．一方で，CAMレーザーの波長可変領域は，【図3】のグラフからもわかるように，発振器を構成する際に使用した光学素子の高反射（HR）コーティングの対応波長範囲によって制限されることもわかり，このHRコーティング範囲を最適化することで，さらなる広帯域化が期待できることもわかりました．この経験は，結果的に私の博士課程修了後の進路に大きく影響を与えることとなりました．

次に取り組んだのは，中赤外レーザーのさらなる高出力化のための増幅器の評価です．Cr:CdSeを用いた

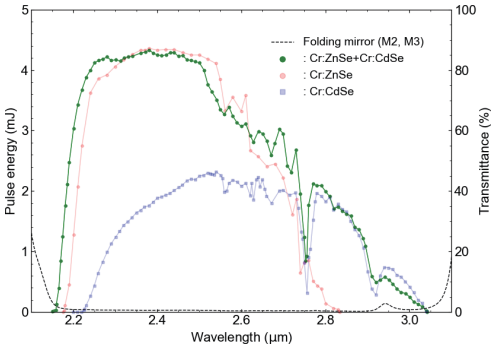
増幅器開発の報告はこれまでなく，私が初めて評価しました[2]．シングルパスの増幅器を構成し，波長2.54 μmにおいて約1.78倍（1.48 mJ→2.63 mJ）の増幅度を達成し，その際の抽出効率は66.2％でした．



【図1】Cr: ZnSe材料（左），Cr: CdSe結晶（右）



【図2】複合活性媒質レーザーの概略図



【図3】各レーザー媒質の波長可変領域と高反射ミラー透過率の関係
横軸：波長（μm）
左縦軸：各レーザーの出力エネルギー（mJ）
Cr:ZnSe（薄赤），Cr:CdSe（薄青），Cr:ZnSe＋Cr:CdSe（緑）
右縦軸：（黒点線）使用した高反射ミラー（M2, M3）の透過率（％）
本グラフからミラーの反射特性がレーザーの波長可変領域に影響を与えていることが示唆される．

さらなる広帯域化・高出力化に向けて

波長2–3 μm帯のCr^{2+}添加カルコゲナイドの成功を踏まえ，現在は波長4–7 μm帯に蛍光領域を有するFe^{2+}添加カルコゲナイドの研究も進められています．残念ながら，これら遷移金属イオンを添加するためのホスト結晶であるZnSeやCdSeといったカルコゲナイドは，毒性の高い半導体として日本では取り扱いが制限されています．そのため，これらのレーザー媒質は輸入に頼らざるを得ず，中赤外固体レーザーの開発は，結晶育成ノウハウが成熟しつつある米露に大きく水をあけられているのが現状です．実は私の博士課程での最終目標は，Cr^{2+}添加カルコゲナイドレーザーを励起光源として，波長4.5–7 μmに蛍光領域を持つFe:CdTe結晶を用いたレーザーを，日本で初めて開発することだったのですが，在学中に本格的な着手には至らず今後の開発の進捗に期待しています．もし今後国内でFe^{2+}添加カルコゲナイドレーザーが実現すれば，Cr^{2+}系と含めて波長2–7 μmという中赤外領域の広い範囲を全固体化することができ，安定した高出力動作が可能となると期待されます．また，広い波長可変領域により得られる広いスペクトル幅は，適切な位相補償を施すことで，フーリエ限界に近い極めて短いパルスへと圧縮することが可能です．これにより，チャープパルス増幅法（CPA）を適用した場合，さらなる高出力な中赤外パルスの実現が期待されます．

さいごに

来年度から私は世界最高出力（10 PW，すなわち10^{16} W）のレーザー実験施設を持つ欧州・極限レーザー核科学研究所（ELI-NP）[3]の定年制研究員として採用されることとなりました．ELI-NPは，2018年にCPAの考案でノーベル物理学賞を受賞されたフランスのジェラール・ムル博士の提唱で，原子力発電所などから出てくる高レベル放射性廃棄物を，極めて高出力のレーザー照射によって処理する研究を目的として設立されました．本格的に稼働開始した現在では，超高出力レーザー・ガンマ線ビームを活用し，従来の手法ではアクセスが難しかった極限条件下を再現し，核物理学に限らず，プラズマ，物性，さらには天体物理学や応用科学など，幅広い分野への貢献が期待されています．この原稿が公開される頃には渡欧して研究をスタートさせることになりますが，最初に取り組むのは光学素子の改良です．中赤外レーザー開発の章で述べている通り，レーザーの出力・波長可変領域を制限している要因の一つは，発振器を構成する光学素子のコーティング技術と言えます．したがって，より耐久性が高く，質の高いコーティングを施すことで，発振器からより光を取り出すことができ，その技術を学べば様々なレーザーの改良に繋がると考えています．母国を離れて研究することは少し寂しいですが，東京理科大学はじめとした日本の教育で学んだことを基礎として，ヨーロッパでよりハイパワーなレーザーの開発に取り組み，尚且つ放射能の脅威を少しでも減らすための研究に自分の人生を捧げていく所存であります．

参考文献

1）S. Aikawa, et al., J. Cryst. Growth **575**, (2021): 126341.
2）S. Aikawa, et al., Sens. Mater. **34**, (2022): SS–4245.
3）https://www.eli-np.ro