

博士論文概要

[課程博士一覧]

| | | |
|----------------------------|--|------------------------------------|
| 三 瀧 雅 俊 Fengjiu Yang | 「モード同期 Yb:KYW レーザーを用いた光周波数コム」 「Architecture design for high efficient perovskite solar cells」 (高効率ペロブスカイト太陽電池のための構造デザインに関する研究) | 令和元年 7 月 23 日授与 令和元年 9 月 24 日授与 |
| 重 松 英 | 「Study on transport and conversion of ac and dc spin current generated by magnetization dynamics」 (磁化ダイナミクスにより誘起される交流・直流スピンの輸送・変換に関する研究) | 令和 2 年 1 月 23 日授与 |
| 吉 田 昌 宏 | 「高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザに関する研究」 | 令和 2 年 1 月 23 日授与 |
| 柳 楽 勇 士 | 「離散時間確率系の解析と制御ならびにスモールゲイン定理とその周辺」 | 令和 2 年 3 月 23 日授与 |
| 清 原 孝 行 | 「Generation of heralded multi-photon parallel state for realizing a large-scale photonic quantum circuit」 (大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究) | 令和 2 年 3 月 23 日授与 |
| 前 田 拓 也 | 「Study on Avalanche Breakdown in GaN」 (窒化ガリウムにおけるアバランシェ破壊に関する研究) | 令和 2 年 3 月 23 日授与 |
| 松 田 祥 伸 | 「Polar-Plane-Free Faceted InGaN-LEDs toward Highly Radiative Polychromatic Emitters」 (高効率多色発光素子に向けた極性面フリーなマルチファセット InGaN-LED に関する研究) | 令和 2 年 3 月 23 日授与 |
| 神 矢 翔太郎 | 「Modeling and Analysis of Interactions in Wireless Resource Allocation」 (無線リソース割当における相互作用のモデル化及び解析) | 令和 2 年 3 月 23 日授与 |
| Nor Azlan bin Mohd Aris | 「Development of Software-Defined Multichannel Receiver for Equatorial Atmosphere Radar (EAR)」 (ソフトウェア無線機を用いた赤道大気レーダー(EAR)用多チャンネル受信機の開発) | 令和 2 年 3 月 23 日授与 |
| 今 井 康 貴 | 「Single-Ion Spectroscopy of Two Electric Quadrupole Transitions in Ytterbium Ion and Excess Micromotion Minimization」 (Yb イオンの 2 つの電気四重極子遷移の単一イオン分光および過剰マイクロ運動の最小化) | 令和 2 年 5 月 25 日授与 |
| 王 策 | 「Study on Novel Rectifiers for Microwave Wireless Power Transfer System」 (マイクロ波無線電力伝送システム用整流回路に関する研究) | 令和 2 年 7 月 27 日授与 |

| | | |
|---------------------|--|-------------|
| Sha Wu | 「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism and Model Predictive Glycemic Control for Critically Ill Patients Considering Time Variability of Insulin Sensitivity」 (インスリン感度の時変性を考慮に入れた重症患者のグルコース・インスリン代謝の数理モデルおよび血糖値のモデル予測制御) | 令和2年9月23日授与 |
| Fujun He | 「Reliable Resource Allocation Models in Network Virtualization」 (ネットワーク仮想化における信頼性のある資源割り当てモデル) | 令和2年9月23日授与 |
| Longfei Chen | 「Analysis and Modeling of Machine Operation Tasks using Egocentric Vision」 (エゴセントリックビジョンを用いた機械操作タスクのユーザー行動分析とモデリング) | 令和2年9月23日授与 |

三 瀧 雅 俊 (竹内繁樹教授)

「モード同期 Yb:KYW レーザーを用いた光周波数コム」

令和元年 7 月 23 日 授与

モード同期レーザーから出力される周期的な光パルス列を周波数軸で見ると、等間隔で離れた多数の単一周波数レーザー光の集まりとなっている。この形状から、この光は光周波数コム（光コム）とよばれる。光コムを用いた光周波数の測定は 2000 年に実現された。その後、マイクロ波領域よりも安定な光領域の周波数標準、すなわち周波数安定化されたレーザー光に、光コムを位相同期させる技術が開発されたことから、波長の離れた光周波数の比較なども可能となった。これをはじめ、多くの応用で長時間連続運転が期待されている。初期の光コムでは超短パルス光を出力するチタニウム・サファイアレーザーが、その後は連続運転に適したファイバーレーザーが、よく用いられてきた。前者は低雑音だが連続運転が難しく、後者は連続運転には適しているが低雑音化には専用の技術が必要とする。本研究では固体レーザーであり、出力 1 W 未満の半導体レーザーによる励起で発振する Yb:KYW レーザーに着目し、両者の長所をあわせもつ光コムを開発することを目的とした。モード同期の実現からレーザーへの位相同期技術の確立まで、独自の方法を数々開発し、以下に示す研究成果を上げた。

- (1) レーザー共振器の安定領域中央近くでわずかに出力パワーが減少する、横モード縮退点でカーレンズモード同期を実現した。励起パワーに対しモード同期出力パワー 48 % と、高い変換効率を得た。低雑音の光コム実現には、凹面鏡の間隔と結晶位置を 10 μm 程度の範囲に調整する必要があるようになった。レーザー共振器の温度安定化と密閉構造により、1 ヶ月以上の連続モード同期を達成するなど、これを解決した。
- (2) 光コムの各モード周波数は、パルス繰り返し周波数にモード番号をかけた値に、光コム全体の周波数軸上の位置を示すオフセット周波数をたしたものになっている。したがって、オフセット周波数の安定化が光コムの応用には必要になる。通常、これは励起レーザーのパワーを制御して行われる。Yb:KYW レーザーではその制御帯域幅が 45 kHz とやや狭い。オフセット周波数のゆらぎの周波数成分、すなわちスペクトル幅を、非制御時で 45 kHz 以下に抑える必要がある。本研究では、レーザー共振器の群遅延分散、Yb:KYW 結晶の位置、および励起レーザーパワーに、オフセット周波数のスペクトル幅が依存することを見出した。それらをスペクトル幅 45 kHz 以下、最狭で 15 kHz になる状態に最適化し、位相同期を実現した。
- (3) 光コムをレーザーに対して位相同期させるには、モード周波数を高速で制御する必要がある。鉛を充填したマウントを用いて piezo 素子制御ミラーの機械的共振を減衰させ、制御帯域幅 200 kHz を実現した。これを用いて位相同期を実現し、このレーザーの光コムとしては世界最小の残留位相雑音、0.47 rad を実現した。同時に、オフセット周波数の位相同期の継続時間拡大を図った。オフセット周波数のドリフトの補償にともなって、そのスペクトル幅が 45 kHz を超えると位相同期ができなくなる。結晶位置の制御によって、スペクトル幅が狭い状態で広い周波数範囲を補償できることを見出し、piezo 素子を用いた結晶位置の制御を追加し組み合わせた。
- (4) GPS 時計にパルス繰り返し周波数を位相同期させ、GPS 時計の不確かさでの光周波数測定を実証した。さらに、光共振器の共鳴に安定化したレーザーへモード周波数を、オフセット周波数を位相同期させた状態で位相同期させることに成功した (図)。位相同期と同時に、同じ光共振器の別の共鳴に安定化した波長の離れたレーザーを用意してビート周波数を測定し、光周波数比計測を実現した。連続測定 3 時間はレーザー側による限界で、光コムはさらに長時間の連続位相同期が可能であったことが確かめられている。

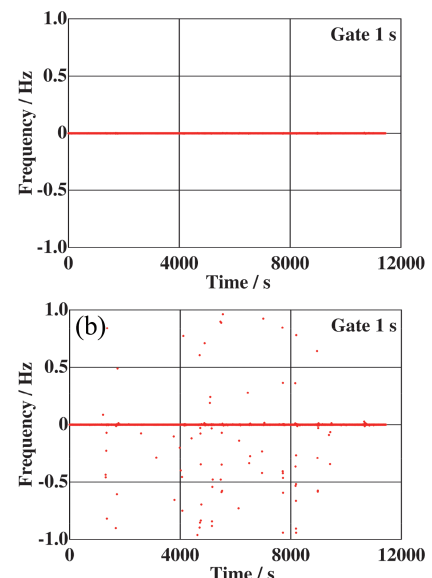


図 レーザーへの光コムの位相同期。
(a) モード周波数とレーザーとのビート、(b) オフセット周波数。

Fengjiu Yang (松田一成教授)

「Architecture design for high efficient perovskite solar cells」

(高効率ペロブスカイト太陽電池のための構造デザインに関する研究)

令和元年 9 月 24 日授与

Hybrid organic/inorganic metal halide perovskite solar cells (PSCs) have emerged widespread attentions and interesting because of the unprecedented progress of power conversion efficiency (PCE), which has been regarded as a most-promising for next-generation photovoltaics. Although the rapid development on PCE, the stability of PSCs is still far behind the industrial application requirement and the single-time utilization of metal electrode also increase the fabrication cost of perovskite-photovoltaics, induce environmental pollution and resource waste. Hence, the SnO_2 and Cs-perovskite have been employed into planar PSCs as transport materials (ETM) and light harvester to replace TiO_2 and MAPbI_3 perovskite. The stability and PCE have been significantly enhanced on SnO_2 based PSCs compared with that of the typical TiO_2 based PSCs. The low temperature fabrication process of SnO_2 has been also introduced into flexible PSCs (fPSCs). The fPSCs using SnO_2 as ETM could achieve a high PCE of 17.1% with an ignorable hysteresis, sustaining an excellent bending durability of 76.5% even after 2000 bending cycles at bending radius of 4 mm (Fig. 1 (a)). The improvement of bending durability should mainly come from superior bending resistance of nanoparticle component of SnO_2 ETM film, because the SnO_2 nanoparticle can release the bending stress.

The excessive PbI_2 of Cs-perovskite precursor has severely limited the PCE and stability of PSCs, even though the excessive PbI_2 contribute to form large crystal size perovskite. Thus, the second solution growth process (SSGP) has been employed into the perovskite crystal growth to eliminate the excessive PbI_2 and maintain the large crystal size. The PCE of SSGP PSCs has promoted to 21.6% with a negligible hysteresis, and kept a much better stability at continuous light soaking and thermal treatment conditions. The SSGP PSCs have also realized a high PCE of 20.1% on large active area of 1.0 cm^2 with comparable high fill factor of records.

The single-time utilization of metal electrode fabricated by complicated deposition process of high vacuum thermal evaporation, which increases the fabrication cost of PSCs and wastes resource, and also causes ecological environmental pollution and hinders commercial application at the same time. Thus, the nanoporous Au film fabricated by simple and directly transfer process has been introduced into the PSCs. The nanoporous Au-PSCs achieve a high PCE of 19.0% with a small hysteresis. Moreover, the nanoporous Au film can realize more than 12 times reusing for the PSCs with a little reduction of PCE (Fig. 1 (b)). The nanoporous Au film has also employed into fPSCs and obtained a high PCE of 17.3% with an excellent bending durability of 98.5% even after 1000 bending cycles at a bending radius of 5 mm.

Improving the photovoltaic performance of PSCs by an approach of architecture design by varying the stacking configuration, passivation, and material innovation paves a potential way toward its commercial application.

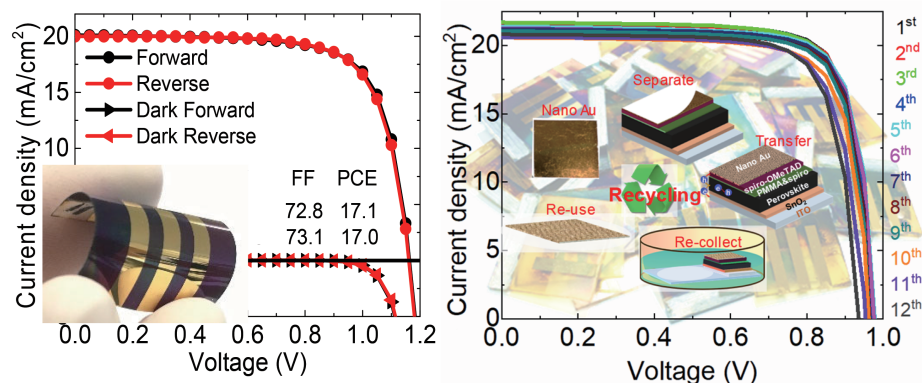


Fig. 1(a) Performance of developed flexible PSCs (fPSCs), (b) Demonstration of concept of recycle-utilization of metal electrode for PSCs.

重 松 英 (白石誠司教授)

「Study on transport and conversion of ac and dc spin current generated by magnetization dynamics」

(磁化ダイナミクスにより誘起される交流・直流スピンの輸送・変換に関する研究)

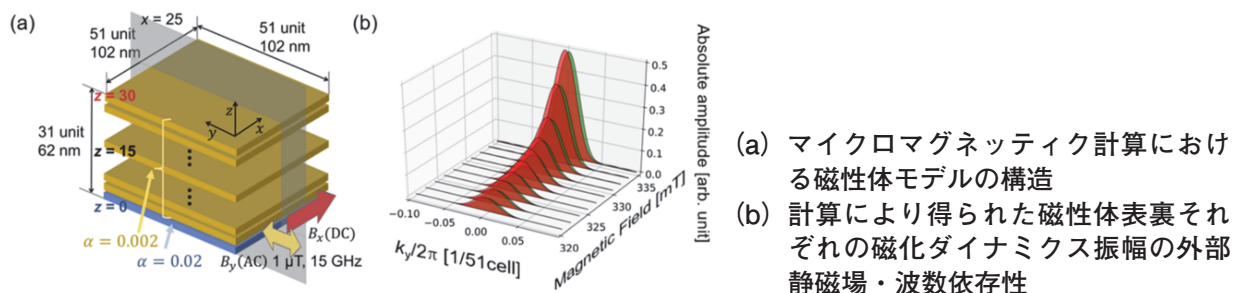
令和2年1月23日授与

スピン角運動量の流れであるスピン流については、MRAM (Magnetic Random Access Memory) をはじめとした磁性体デバイスの制御やスピン流自体を情報伝達の担体としたスピントランジスタの実用化を目指し精力的な探求がなされている。固体物質中のスピン流物性は学理上も重要な研究対象であり、近年実験的な検証が進められてきた。スピン流を生成する手法として重要なのが磁性体 / 固体物質界面において磁化ダイナミクスを誘起する方法であり、スピンポンピングと呼ばれる現象により直流・交流スピン流を固体物質中に誘起することができる。

この研究では従来の研究で中心的に探索されてきた金属中のスピン流物性に加えて半導体もその対象とすべく、強磁性体 / 固体物質界面における磁化ダイナミクス物性の探求や、スピン流伝搬効率・スピン流電流変換効率の両特性を実測するための手法の検証を行った。その結果、以下の成果が得られた。

1. イットリウム・鉄・ガーネット (YIG) / 白金 (Pt) からなる系では直流スピンポンピングによる Pt におけるスピン流電流変換を観測できるが、この研究ではその温度依存性について詳細に調べた結果、低温域において強磁性共鳴の共鳴線幅の増大に従って Pt へのスピン流注入量が低減していることがわかった。共鳴周波数を変化させた実験により、YIG 中の希土類不純物が磁化ダンピングを増大させる効果による寄与が示唆され、YIG をスピン注入源として用いる際の指標を得られた。
2. YIG の磁化ダイナミクスにより、マグノン・フォノン相互作用に起因する熱勾配が生成される現象が知られていた。この研究では、ESR キャビティ中の一様交流磁場で YIG 上に熱電対構造を設置して熱輸送効果を観測した。さらに、一様な交流磁場においても構造的な対称性の破れに起因して非相対的な磁化ダイナミクスが誘起されることをマイクロマグネティック計算に基づき示した。(図を参照)
3. スピンポンピングでは直流スピン流に加えて交流スピン流も生成されている。交流スピン流電流変換を効果的に観測する手法が近年他グループから提案された。この研究では、この手法を半導体 Si に適用した。強磁性共鳴に伴う複素インダクタンスの変化を近接させた導波路で観測した。ドーパ元素とドーパ濃度を変化させた Si と磁性体からなる 2 層構造試料を用いて、そのスピン流電流変換効率を体系的に測定した。
4. スピンポンピングによる直流スピン流生成を利用したスピン流輸送を半導体 3C-SiC に適用した。3C-SiC は研究が先行している Si と同族の軽元素で構成されている一方で、閃亜鉛鉱型の結晶構造を持ちスピン流輸送物性の研究対象として興味深い。実験では n 型 3C-SiC をチャネルとした試料と実験系において、室温でのスピン流輸送を示す信号が得られた。

以上、それぞれの実験系において磁化ダイナミクスを詳細に検討し、交流・直流スピンの検出手法を用いることでスピン流輸送・変換等のスピン流物性を明らかにした。



(a) マイクロマグネティック計算における磁性体モデルの構造
(b) 計算により得られた磁性体表裏それぞれの磁化ダイナミクス振幅の外部静磁場・波数依存性

吉田 昌宏 (野田進教授)

「高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザに関する研究」

令和2年1月23日授与

本論文は、二重格子フォトニック結晶という新たな共振器構造を考案し、大面積単一モード発振可能なフォトニック結晶レーザを開発することにより、従来の半導体レーザでは困難であった、高出力・高ビーム品質動作を実証した成果をまとめたものである。

半導体レーザは、小型・安価・高効率・高制御性といった優れた特徴を有する一方で、出力増大のために発振面積を拡大すると、多モード発振となりビーム品質が劣化するため、高出力・高ビーム品質動作（すなわち、高輝度動作）の実現が、原理的に困難であるという課題を抱えていた。このため、従来の半導体レーザの輝度は、炭酸ガスレーザや固体/ファイバレーザなどの輝度 $> 1 \text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ に比べて、一桁以上低い値に留まっており、次世代のスマート製造やスマートモビリティにおいて重要となる、レーザ加工や様々な光センシング（light detection and ranging: LiDAR 等）への応用が阻害されていた。

本論文では、フォトニック結晶のバンド端共振効果を利用したフォトニック結晶レーザに着目し、大面積単一モード発振を可能とする新たなフォトニック結晶共振器として、図1に示す「二重格子フォトニック結晶」を導入したレーザデバイスを開発した。本構造では、x、y方向に格子定数 a の $1/4$ (=媒質内波長 λ の $1/4$) ずつシフトさせた2つのフォトニック結晶格子を重ね合わせることで、面内180度方向の光波の回折に消失性干渉を生じさせ、光閉じ込め効果を適切に弱めることが可能となる。これにより、ビーム品質の劣化を招く高次モードの損失を増大させ、大面積においても基本モード単一での発振が期待される。この新たな構造を導入することで、従来構造と比較して、5倍の発振面積をもつ直径 $500 \mu\text{m}$ の大面積レーザデバイスにおいて、10 W 級の高出力・高ビーム品質動作を実証し、半導体レーザとして世界最高レベルの輝度 ($\sim 300 \text{ MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) を達成した (図2)。さらに、上記の180度方向に加えて、90度方向の回折効果との相互作用についても検討し、二重格子構造の深化・最適化を行うことで、直径 1 mm を超える大面積での高ビーム品質動作を可能とする設計にも成功した。またこの際、フォトニックバンド構造の観点からも議論を行い、 Γ 点バンド端におけるモードの縮退という物理的に興味深い現象との関連についても見出した。設計に続いて、直径 1 mm のフォトニック結晶レーザを作製し、パルス駆動において、70 W の高出力・高ビーム品質動作 (輝度 $\sim 650 \text{ MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) に成功するとともに、このような高輝度レーザの重要な応用の一例として、開発したフォトニック結晶レーザを用いたレンズフリーのLiDARシステムを構築し、長距離・高空間分解能での測距動作の実証にも成功した。

以上のように、本論文で実現された二重格子フォトニック結晶レーザは、従来の半導体レーザの高出力・高ビーム品質化における課題を克服し、半導体レーザの応用分野を大きく拡張する飛躍的進展であると言え、学術および産業的に重要な成果であると位置づけられる。

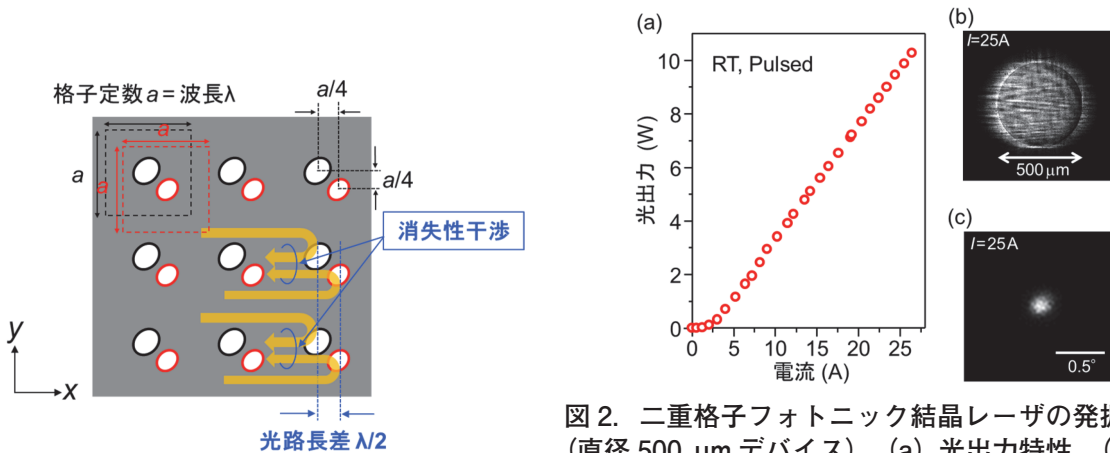


図1. 二重格子フォトニック結晶共振器。

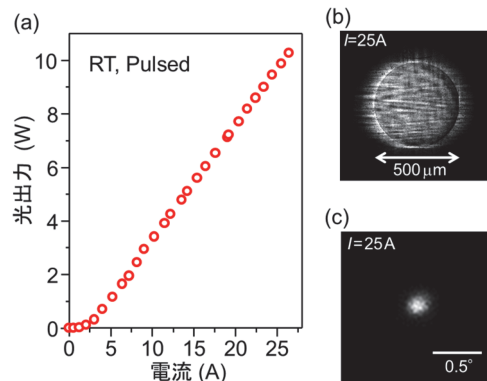


図2. 二重格子フォトニック結晶レーザの発振特性 (直径 $500 \mu\text{m}$ デバイス)。(a) 光出力特性、(b) 近視野像、(c) 遠視野像。

柳 楽 勇 士 (萩原朋道教授)

「離散時間確率系の解析と制御ならびにスモールゲイン定理とその周辺」

令和2年3月23日授与

実制御対象に対して何らかの制御理論を適用するためには、その対象を伝達関数や状態方程式などの数理モデルを用いて表現する必要がある。本論文では、とくに確率的な挙動を考慮に入れた数理モデルである離散時間確率系を扱う。確率系を扱うことが有用な状況として、太陽熱発電システムやネットワーク制御システム、サンプル値制御系などの数理モデル化を挙げることができ、この系の解析および制御に関する理論整備は今後益々重要になると考えられる。本論文における主要な研究目的は、通常の確定系の議論において知られる解析および設計手法を確率系に対して適用できるようにするための理論的枠組みの一部を構築することであり、本論文ではそれに関する種々の問題に取り組んだ。以下では、その中でも本論文の中心的議題である確率系のスモールゲイン定理とその定理に基づく解析および設計に関する3つの研究事項を取り上げる。

【研究事項1. 確率系のスモールゲイン定理】 通常の確定系の議論において、スモールゲイン定理はロバスト制御の基礎をなす重要な定理である。この定理は図1に示す2つの（入出力）安定なサブシステム G_1 と G_2 からなる閉ループ系の安定判別に用いられる（外部入力に対する、 G_1 と G_2 の入出力部分をこの閉ループ系の出力とみなす）。より正確には、スモールゲイン

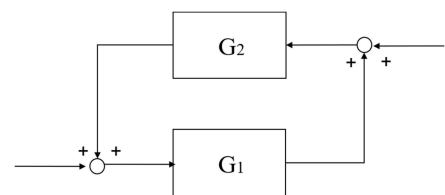


図1 閉ループ系

定理は、2つの安定な G_1 と G_2 のゲインを誘導ノルムにより評価し、それらの誘導ノルムの積が1未満であれば、閉ループ系が安定であることを主張している。本研究事項の目的は、これらのサブシステムが確率系として与えられる場合の閉ループ系を考え、その系に対するスモールゲイン定理を導出することである。Wan ら (2013) は、このような定理の導出を試みたが、

- ① 確定系スモールゲイン定理導出の鍵となる l_p 空間の拡張空間（その詳細は割愛）の確率系版を導入しておらず、その証明に不備があった。
 - ② また、スモールゲイン定理が扱うことのできる確率系のクラスが限定的であった。
 - ③ さらに、その工学的意義を論じることなく、閉ループ系の入力が確率的であることを前提とした。
- これら3つの点に注目して、上記証明の不備や議論の不十分性を是正し、より広いクラスの確率系に対するスモールゲイン定理の導出を行った。

【研究事項2. 確率系の有界実補題】 上記研究事項で導出した確率系のスモールゲイン定理は、2つのサブシステムの誘導ノルムを用いた安定条件を与えている。本研究事項の目的は、工学的応用に向けて、サブシステムのクラスを線形系に限定し、それらの誘導ノルムを求める手法を導出することである。通常の確定系の議論において、有界実補題は線形時不変系の誘導ノルムを求める上で重要な役割を果たすことが知られている。確率系の誘導ノルムを求める上でも対応する補題が必要になると考えられ、そのことに着目した Bouhtouri ら (1999) は（線形）確率系に対する有界実補題を導出した。しかし、その際扱われた系のクラスが限定的であった。そこで、より一般的なクラスの系に対して適用できるように有界実補題の導出を行った。また、その補題が工学的応用に向けた道具として重要なものであることを状態フィードバック設計およびスモールゲイン定理に関する例題を通して示した。

【研究事項3. 確率的Dスケールリング】 確定系の議論において一般にスモールゲイン定理の単純な適用に基づく安定解析は保守的であり、その保守性を低減する一手法として（確定的な）スケールリング要素を用いたDスケールリングが知られている。確率系のスモールゲイン定理の単純な適用も同様に保守的な解析をもたらす。そこで本研究事項では、確定系の議論を参考にして、考察対象とする閉ループ（確率）系に対して、そのランダム性を表現する確率過程を用いて構成される確率的なスケールリング要素を導入し、その要素を用いた確率的Dスケールリングと呼ぶ手法を提案した。この手法により解析の保守性が低減されることを、数値例を用いて確認した。

清原孝行 (竹内繁樹教授)

「Generation of heralded multi-photon parallel state for realizing a large-scale photonic quantum circuit」

(大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究)

令和2年3月23日授与

本論文は、光子を用いた量子回路の大規模化に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究をまとめたものである。多光子並列状態とは、同一性の極めて高い単一光子を複数個並列に配置された状態を指しており、光量子回路の入力状態として用いられている。今後、その光子数を向上させることは、量子計算において用いることのできるヒルベルト空間の次元数が光子数に対して指数関数的に増加するため、量子情報通信処理にとって重要となっている。

第一章では、光子を用いた量子技術の研究についての背景や、当該分野における本研究の位置づけと目的を明らかにしている。

第二章では、本論文において重要な基礎事項となる、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源の出力光子数分布に関する理論や、複数の光子間における量子干渉現象（多光子量子干渉）について述べている。

第三章では、伝令付き単一光子源において問題となっている複数光子が同時に出力する状態確率の抑制の実現について述べている。その方法として、複数台の光子対源を構築し、そのうちの少なくとも一台の光子対源から光子対が発生した場合、その一方の光子を光子数識別検出器による検出、その検出信号（伝令信号）は光子対のもう一方の存在を示唆するものであるために、伝令信号に基づいて対応する光子を高速光スイッチにより出力させる。本手法を用いた場合の出力光子数分布を理論的に検討し、その後、非線形光学結晶を用いた光子対源と電気光学変調器により実装することで実証している。

第四章では、伝令付き単一光子源から出力された光子列の効率的なシリアルパラレル変換について述べている。初めに、光子の存在を示す伝令信号を用いることで、伝令信号を用いない従来法と比較して変換効率が向上することを示している。次に、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源と、伝令信号により制御された光スイッチによって実装し、従来法の光子列の理論的最大変換効率を超える効率を達成している。

第五章では、複数台の伝令付き単一光子源からランダムで出力した複数光子を効率的に多光子並列状態に変換する研究について述べている。 $N \times N$ の空間的動的ネットワークと固定時間遅延系を用いることで、余剰光子を抑制しつつ多光子並列状態を効率的な生成する方法を提案し、2光子において原理検証している。

第六章では、2組の多光子システム間量子もつれ状態の新しい評価方法の実証実験について述べている。初めに、線形光学素子を用いたモード間フーリエ変換量子回路を2組用いることにより、多次元量子もつれ状態を効率的に評価できる新しい方法を説明している。次に、それを実現するために必要な量子回路の安定化する方法を述べている。最後に、3光子を用いた量子もつれ状態に対しての原理検証実験が報告されている。

第七章では、本論文の成果をまとめ、将来展望について述べている。

以上の研究により、光量子回路の大規模化に向けて必要となる、効率的な多光子並列状態の生成と、多光子を用いた量子もつれ状態の効率的な検証方法を実現した。ごく最近、本研究の実証で用いたものよりも高い効率での伝令付き単一光子発生も報告されている。このような光子源と組み合わせることで、より多くの光子を含んだ、決定論的な多光子並列状態の実現が期待される。

前田 拓也 (木本恒教授)

「Study on Avalanche Breakdown in GaN」

(窒化ガリウムにおけるアバランシェ破壊に関する研究)

令和2年3月23日授与

持続可能な社会の実現に向けて電力変換の高効率化が強く求められている。現在、電力変換を担う半導体パワーデバイスの材料としてシリコン (Si) が主流だが、長年の研究によってその性能は材料物性から決まる物理限界に到達しつつあり、今後飛躍的な性能向上は難しい。そこで、ワイドギャップ半導体である窒化ガリウム (GaN) が次世代パワーデバイス材料として期待されている。GaN は高い絶縁破壊電界 ($\sim 3 \text{ MV/cm}$) および高い電子移動度 ($\sim 1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) を有するため、Si に比べて耐圧維持層のオン抵抗を 1/1000 程度に低減できると考えられる。

パワーデバイスの耐圧・安全動作領域を設計・予測するには、正確な物性値を用いたデバイスシミュレーションが必要不可欠である。パワーデバイスにおける絶縁破壊 (アバランシェ破壊) を決定するのは「衝突イオン化係数 (電子 / 成功が単位距離進む間に衝突電離を起こす回数)」という材料固有の物性値である。GaN の絶縁破壊現象の理解、および、GaN パワーデバイスの実現に向けて、GaN の衝突イオン化係数の精密決定が必要である。しかし、衝突イオン化係数の測定は極めて難しく、GaN の衝突イオン化係数の研究は未開拓であった。

衝突イオン化係数は直接測定することができず、光照射などによって空乏層へキャリアを注入して高電界下のキャリアのアバランシェ増倍を測定・解析することで実験的に求めることができる。その際、p-n 接合の空乏層へ電子・正孔を注入し、それぞれのキャリア増倍を測定する必要がある。例えば他材料では、裏面基板を極薄加工して表面と裏面から光照射することで電子・正孔のキャリア増倍を測定した報告があるが、GaN はキャリアの拡散長や光の侵入長が $1 \mu\text{m}$ 以下と極めて短く、同様の手法を適用することはできない。

本研究では、GaN におけるアバランシェ破壊現象の解明を目的とし、アバランシェ破壊に関する課題に包括的に取り組み、衝突イオン化係数の新規測定手法を提案・確立し、電子・正孔の衝突イオン化係数を実験的に求めることに成功した。図 1 に光電流増倍測定に用いた素子構造を示す。通常、GaN デバイスを作製する際は、移動度が高く不純物制御も容易な n 層を耐圧維持層に用いるが、本研究では低濃度 p 層を耐圧維持層とする p-n 接合ダイオードを作製した。この素子においては、高電界部となる p-n 接合界面が基板側に位置する。この素子にバンドギャップよりも短波長の光を照射すると、p 層表面近傍で光吸収が生じて少数キャリアである電子の注入が生じる。一方、バンドギャップよりも長波長の光を照射すると、光は GaN に吸収されずに結晶内部へ侵入するが、高電界部である p-n 接合界面近傍において、禁制帯中への波動関数の浸み出しに起因する光吸収 (Franz-Keldysh 効果) が局所的に生じて正孔の注入が生じる (図 2 にその概略図を用いて示している)。光電流を詳細に解析することで電子・正孔注入時のアバランシェ増倍係数を抽出し、それらを解析することで衝突イオン化係数を求めた。図 3 に GaN の衝突イオン化係数を示す。得られた結果について経験式を用いてモデル化し、様々なドーピング密度の GaN デバイスの絶縁破壊電圧をシミュレーションしたところ、多数の先行研究を含むこれまでのデータをよく再現した。これは、得られた衝突イオン化係数の値が高精度であり有用であることを支持している。

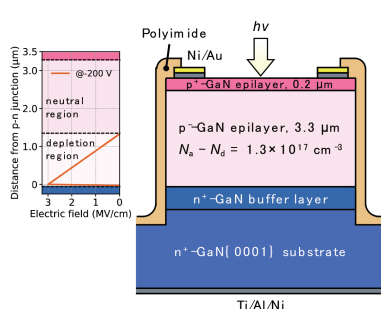


図 1. 測定に用いた GaN p-n 接合ダイオードの構造図。

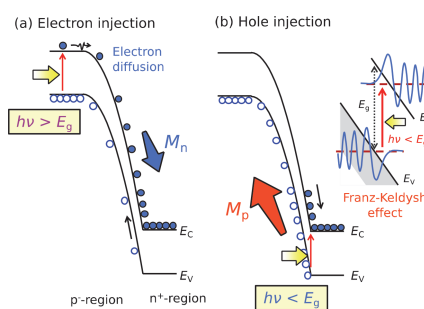


図 2. 光電流測定の概略図。光の波長により光吸収位置を制御できる。

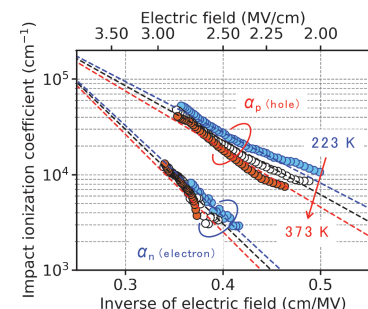


図 3. 本研究で得られた GaN の電子・正孔の衝突イオン化係数。

松田 祥伸 (川上養一教授)

「Polar-Plane-Free Faceted InGaN-LEDs toward Highly Radiative Polychromatic Emitters」
 (高効率多色発光素子に向けた極性面フリーなマルチファセット InGaN-LED に関する研究)
 令和2年3月23日授与

マルチファセット InGaN-LED は、単一の半導体素子による蛍光体フリーな多色発光デバイスとして注目されている。本構造では、複数の結晶ファセット面から成るマイクロ構造上に発光層を形成することで、ファセット面間で発光層の構造特性分布が生じ、多色発光が実現される。実際、電流注入動作による多色発光特性や白色合成が、本研究室の初期の研究を皮切りとして複数の研究グループから報告されてきた。しかし、これまで提案されてきたマルチファセット構造は、その長波長発光成分が (0001) 極性面に由来し、この面方位特有の大きな分極誘起電界のために高効率発光を妨げられていた。本研究では、この問題を回避するため、分極誘起電界の抑制される半極性面および無極性面から成る極性面フリーなマルチファセット構造を提案し、その多色発光 LED としてのデバイス動作実証を行った。以下に概要をまとめる。

本研究では、有機金属気相成長法における選択成長法を用い、半極性 $\{11\bar{2}2\}$ 面 GaN 基板上に形成される極性面フリーなマルチファセット LED 構造を提案した (図 1 (a))。本構造の獲得にあたって次のような検討を行った。はじめに、基板の面方位 ($\{11\bar{2}2\}$ 面または $\{1\bar{1}2\bar{2}\}$ 面)、選択成長におけるマスク材のストライプ方向、およびマスクパターンに着目して様々な作製条件を探索し、特定の条件下において $\{1\bar{1}2\bar{2}\}$ 面上に (0001) 極性面フリーなマルチファセット構造が得られることを見出した。次いで、そのマルチファセット構造上に形成した発光層は、光励起下において輻射再結合確率の高い多色発光特性を示すことを明らかにした。また、発光ダイナミクスに加えて、マルチファセット構造上の発光層の構造特性分布を詳細に評価し、拡散方程式と独自の結晶成長モデルを適用することにより、多色発光特性を示す結晶成長メカニズムを明らかにした。続いて、 $\{1\bar{1}2\bar{2}\}$ 面上の極性面フリーなマルチファセット構造の LED デバイス化に向けて、n 型層および p 型層のドーピング条件を検討した。マルチファセット構造に先立ち、 $\{1\bar{1}2\bar{2}\}$ 面上の通常の平坦 LED 構造においてドーピング条件を確立し、その後、極性面フリーなマルチファセット構造へのドーピングを試み、構造全面に pn 接合を形成することに成功した。最終的に、マルチファセット LED 構造に対する電極形成プロセスを最適化し、電流注入動作における多色発光特性の実証に至った (図 1 (b))。その発光スペクトルは、500 nm を中心波長として 400 ~ 600 nm という広範囲の可視光域をカバーしている。

以上のように、本研究は、新しい InGaN 系多色発光構造として、半極性 GaN 基板上への極性面フリーなマルチファセット構造の作製に成功するとともに、同構造をベースとした多色発光 LED の動作実証も行ったものである。また、マルチファセット GaN 構造および InGaN 発光層の結晶成長ダイナミクスについても論じており、可視域の多色発光素子の応用上のみならず物性解明と制御において大きく寄与するものである。

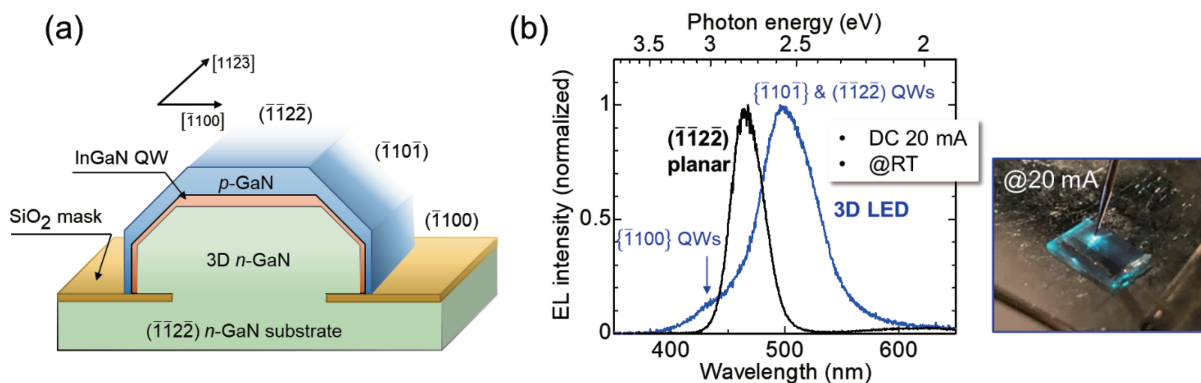


図 1. (a) 極性面フリーなマルチファセット LED 構造の概要図と、(b) 室温発光スペクトルおよび駆動時のサンプル写真。参考に、同様の成長条件で作製した $\{1\bar{1}2\bar{2}\}$ 面平坦膜 LED の発光スペクトルを示す。

神 矢 翔太郎 (守倉正博教授)

「Modeling and Analysis of Interactions in Wireless Resource Allocation」

(無線リソース割当における相互作用のモデル化及び解析)

令和2年3月23日授与

本論文では、無線通信におけるリソース制御に焦点を当て、システムに応じた適切なリソース制御の提案並びに制御対象の振る舞いや通信性能の解析を行っている。無線通信におけるリソース制御は、本質的に相互作用を含んでおり、同一周波数で同時に複数の通信を行う場合には、干渉の発生や、送信の時分割を考慮する必要がある。本論文ではこれに着目し、検討するシステムに応じた数理モデルの仮定のもと、リソース制御の提案並びに解析を行っている。検討対象の無線システムは、無線LANとセルラシステムに大別され、それぞれ送信電力・周波数チャネルの制御、上り回線のユーザスケジューリングについて議論している。

無線LANのリソース制御に関する議論の要点は次のとおりである。高密度な無線LAN環境においては、しばしば複数のAPによるカバーエリアが過度に重複している。このような状況では、無線LAN機器の送信機会が抑制され、スループットが低減する。本論文では、この問題に対し送信電力制御による適応的なカバーエリアの調節法を提案している。この際、任意の端末が無線サービスを受けられるために、APとの接続性は担保される必要がある。提案手法においては、端末やAPをカバレッジのセンサーとして利用し、それらのカバレッジが保証されるようにすることで、カバレッジホールの発生を抑制しつつ、カバレッジの重複を低減する電力制御を行っている。

上記に加え、本論文では、分散的チャネル制御も提案している。無線LANでは複数の周波数が利用可能であり、異なるチャネルであれば複数の通信が同時に行える。そのため、適当なチャネル制御は、カバレッジの重複削減に対して有効な手段となる。ただし、周波数チャネルの分散的な制御は、上に述べたように相互作用を含む。すなわち、他のAPがいずれのチャネルを選択するかに応じて、自身にとってカバレッジ重複削減の意味で最適なチャネルは異なるため、分散制御は不安定になりうる。本論文では、相互作用をゲーム理論を用いて定式化し、各APに対する利得関数を適切に設計することで、分散的な最適チャネル選択の収束性を獲得している。

セルラシステムにおける上り回線のユーザスケジューリングに関する要点は次のとおりである。本論文では、確率幾何学と呼ばれる無線通信品質定量化の枠組みを用いて、システムにユーザスケジューリングが適用される場合における通信品質の解析を行っている。確率幾何学は、適当な確率モデルの仮定のもと、干渉局の配置に起因する所望信号帯干渉電力比の変動を、解析的な分布の形で得ることを可能にする。本論文では、従来の確率幾何学による性能解析では度外視されていたユーザスケジューリングに焦点を当て、その適用下での通信品質を解析している。この際、スケジューリングの効果は基地局あたりのユーザの数に依存することに注意し、ユーザ数ごとに通信品質の解析を行い、それらをユーザ数の分布で平均化することで、所望の解析結果を得ている。

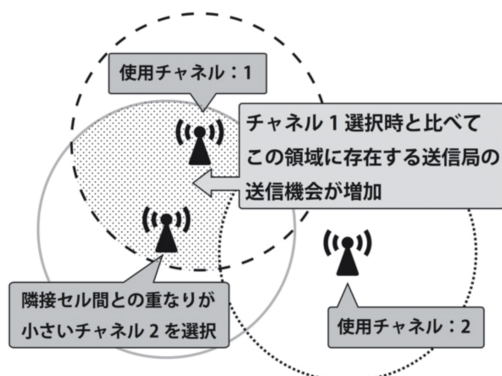


図1. 無線LANにおけるカバレッジ重複を削減するチャネル選択

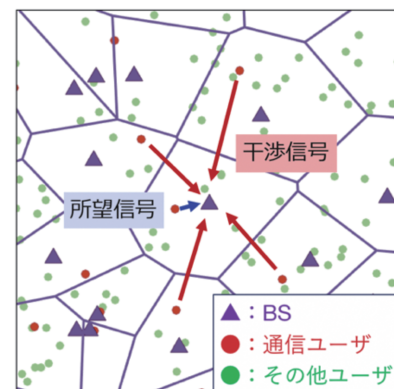


図2. セルラネットワークにおける干渉

Nor Azlan bin Mohd Aris (橋口浩之教授)

「Development of Software-Defined Multichannel Receiver for Equatorial Atmosphere Radar (EAR)」

(ソフトウェア無線機を用いた赤道大気レーダー (EAR) 用多チャンネル受信機の開発)
令和2年3月23日授与

Equatorial Atmosphere Radar (EAR) is a very high frequency (VHF) Doppler radar operated with an active phased-array antenna system, approximately 110 m in diameter which consists of 560 three-element Yagi antennas, located at the equator in Kototabang, West Sumatra, Indonesia (0.20°S, 100.32°E). The array antenna is divided into 24 groups where each group consists of 24 antennas except for eight groups along the periphery which contain one to three fewer antennas. These design is purposely constructed to produce a quasi-circular array pattern. The EAR had originally been equipped with a single receiving channel system. This research presents development of a multichannel receiver system for the EAR using a combination of the Universal Software Radio Peripheral X300 (USRP X300) and GNU Radio software. There are a number of advantages to have multichannel receiver system such as to enable spaced-antenna (SA) method and spatial domain interferometry.

First test observation was conducted on November 2017 to analyze the system reliability, followed with subsequent tests in March and July 2018. The configuration of the test observation is shown in Figure 1. Two USRP X300 devices, corresponding to four receiving channels, were synchronized using 10 MHz reference clocks and a pulse per second (1 PPS) signal. The standard observation system of the EAR is retained by splitting the received echo signals through directional coupler which enabled simultaneous observation of the two different techniques, SA and Doppler beam swinging (DBS). Each receiving antennas for the EAR SA method formed by a combination of two antenna array groups (aperture size is approximately one twelfth of the whole EAR). The signal for SA application is fed to the USRP X300s for digital conversion, and then stored on a Hard Disk Drive (HDD). The ranging of the data is carried out by taking advantage of the leaked transmitted pulse, before demodulated and coherently integrated. The initial results show the existence of noticeable fluctuations in the estimated horizontal wind.

Further, performance analysis using multiple receiving antennas orientation for the application of SA method on the EAR has been carried out through multiple experiments over the duration between April 2019 and September 2019. Phase correction is applied to all channels for a single spectrum in the real time signal processing for improving the phase synchronization. Then, a comparison of the EAR SA performance using five different orientations taking into consideration the aperture size of receiving antenna and its separation distance has been presented, where the horizontal wind profiles using Full Correlation Analysis (FCA) were estimated and compared with the EAR standard observation data. Based on the results, the configuration with the largest aperture shows slight advantage over the other four configurations but with limited improvement.

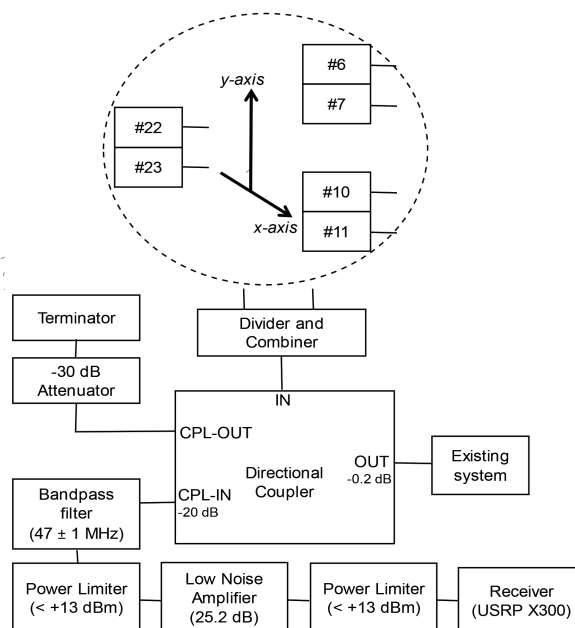


Figure 1. The configuration of the EAR multichannel receiver for test observation.

今井 康 貴 (山田啓文教授)

「Single-Ion Spectroscopy of Two Electric Quadrupole Transitions in Ytterbium Ion and Excess Micromotion Minimization」

(Yb イオンの2つの電気四重極子遷移の単一イオン分光および過剰マイクロ運動の最小化)

令和2年5月25日授与

光領域の遷移を基準としてレーザー光の周波数を安定化した光周波数標準、すなわち、光時計は、極めて不確かさが小さい。基準スペクトルを超高真空中のイオントラップに捕捉した単一イオンから得る方法では、 10^{-18} よりも小さい不確かさが報告されている。この小さな不確かさから、単位“秒”の再定義や、基礎物理学の検証実験への応用が注目されている。検証実験の例として、複数の光時計間の周波数比を長期にわたって比較することにより、物理の基本定数の一つである微細構造定数 a の時間変化を探索することが可能である。また、同位体シフトの精密測定による、未知の粒子の探索が提案されている。

本研究ではイッテルビウムイオン (Yb^+) の遷移を基準とした光時計の実現を目標に、(1) 単一イオンのレーザー冷却法、および、(2) 2つの電気四重極子遷移 $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ と $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ の単一イオン分光法を確立した。また、(3) 単一イオン分光で観測されるイオンの運動によるサイドバンドと過剰マイクロ運動との関係を解析した。以下にその概要を記す。

- (1) レーザー冷却光源の周波数安定度を改善し、超微細構造をもたない $^{174}\text{Yb}^+$ を用いてイオントラップへの導入個数の制御法を確立した。また、冷却の障害となるイオンの過剰マイクロ運動を、RF 光子相互相関法により検出し、静電場印加により最小化した。続いて、磁場による周波数変動が小さい遷移をもつが、超微細構造によりレーザー冷却が難しい、 $^{171}\text{Yb}^+$ のレーザー冷却法を確立した。
- (2) FPGA 含む分光システムを開発し $^{174}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移、および、 $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移を単一イオンで分光した。とくに $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移は分光手順が複雑であるが、駆動する必要がある遷移すべてに独立なレーザーを用意し分光条件を詳細に調べ、分光を行った。最終的に、幅 380Hz で基準スペクトルの観測に成功した (図 1)。
- (3) 単一イオン分光で観測されるサイドバンドとトラップポテンシャルとの関係性を調べることで、サイドバンドスペクトルの構造は永年周波数の混変調が原因で発生することを突き止めた。混変調の発生はイオンの永年運動が十分に冷却されていないことを示している。RF 光子相互相関法およびトラップポテンシャル変調による検出法を併用し、過剰マイクロ運動の最小化を3次元で行った。その結果、永年運動をドップラー冷却限界近くまで冷却することに成功した。同時に、サイドバンドスペクトルの構造が大幅に減少した (図 2)。

以上のように、単一 Yb イオン分光システムを完成させ、分光手順を確立した。また、サイドバンドスペクトルの構造と過剰マイクロ運動の関係を明らかにし、理論限界近い温度まで Yb イオンを冷却することに成功した。これは光時計の不確かさの要因の一つ、2次のドップラーシフトを十分に低減するうえで非常に重要な結果である。

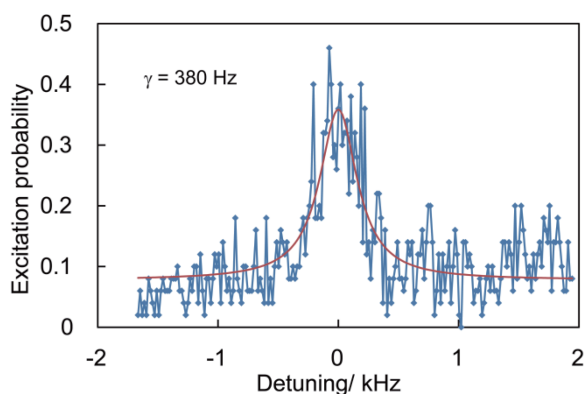


図 1 : 単一 $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移スペクトル

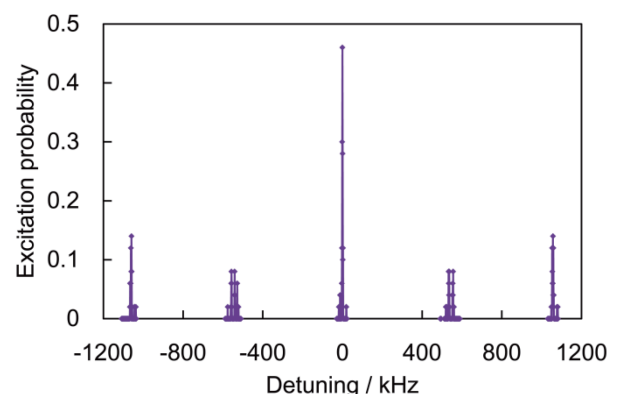


図 2 : 単一 $^{174}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移スペクトル

王 策 (篠原真毅教授)

「Study on Novel Rectifiers for Microwave Wireless Power Transfer System」

(マイクロ波無線電力伝送システム用整流回路に関する研究)

2020年7月27日授与

本論文では、様々な応用が考えられるマイクロ波無線電力伝送システムのうち、特にマイクロ波を整流し電力に変換する整流回路に注目し、マイクロ波電力レベルに応じた整流回路の高効率化について研究を行った。

まず弱電力応用のためのF級負荷 Charge Pump 整流回路を開発した(図1)。本研究では、高効率化を図るため、Charge Pump 整流回路に、中-大電力のマイクロ波無線電力伝送で用いられるシングルシャント型整流回路の重要構成要素であり、高調波処理回路であるF級負荷を導入し、市販ショットキーバリアダイオードを用いて、シングルシャント型整流回路と同程度となる整流効率約72%を実現した。

次に中電力応用のための多段 Dickson 整流回路のトポロジーを用いた多段 Dickson F級負荷 Charge Pump 整流回路の開発を行った。多段 Dickson 整流回路は電力分配線路とF級負荷 Charge Pump 整流回路の二つ部分で構成される。開発した2段、4段の各 Dickson F級負荷 Charge Pump 整流回路において、整流効率及び出力電圧はそれぞれ約70%、9V以上、および約60%、15V以上となり、情報処理ユニット等のデジタル回路等を駆動することも可能とした。

さらに大電力応用のための新型 GaAs ショットキーダイオードを用いたシングルシャント型整流回路を開発した。高効率を実現するために、SPICE パラメータの存在しない新型 GaAs ショットキーバリアダイオードのパラメータ推定を行い、測定結果をもとにモデリングした高周波ダイオードパラメータを用いて、整流回路の設計開発を行った(図2)。その結果、2.45GHz帯では世界最高効率となる91%の整流効率(@5W マイクロ波入力)を達成した(図3)。さらに今回測定した新型 GaAs ショットキーバリアダイオードの SPICE パラメータをもとに、変換効率への影響について検討し、より高効率の整流回路を実現するために必要なダイオードへの要求事項を示した。

最後に最適負荷抵抗が調整可能な整流回路設計手法についてまとめた。マイクロ波無線電力伝送システムの受信側におけるレクテナ変換効率は負荷抵抗に強く依存することが知られている。実際応用する時、負荷抵抗とレクテナ設計最適負荷抵抗とが不整合となる場合は多々あり、これによって、整流効率の低下が考えられる。また、一般的に入力電力と最適負荷抵抗は互いに依存する。本課題では、整流回路上のダイオードとグラウンド点間の線路長を利用し、ダイオードの特性インピーダンスを調整することにより、同じ入力電力において、負荷抵抗を調整する整流回路の設計手法を新しく提案した。F級負荷 Charge Pump 整流回路とシングルシャント型整流回路において、ダイオードと負荷抵抗は線形関係であるため、負荷抵抗調整する設計法は適用できる。

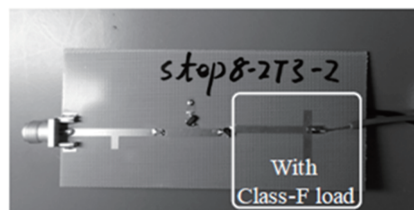


図1: 弱電力用F級負荷 Charge Pump 整流回路

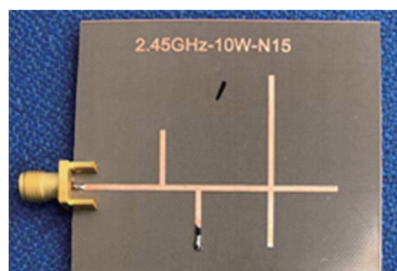


図2: 大電力用シングルシャント型整流回路 (GaAs ダイオード)

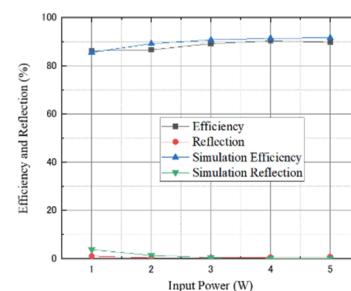


図3: 開発した大電力用整流回路のRF-DC変換効率(最高91%の整流効率@5W)

Sha Wu (土居伸二教授)

「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism and Model Predictive Glycemic Control for Critically Ill Patients Considering Time Variability of Insulin Sensitivity」

(インスリン感度の時変性を考慮に入れた重症患者のグルコース・インスリン代謝の数理モデルおよび血糖値のモデル予測制御)

令和2年9月23日授与

集中治療室 (Intensive Care Unit; ICU) に滞在する患者あるいは重症患者は、病気や外傷・手術などの侵襲によるストレスホルモン分泌の促進およびインスリン抵抗性の上昇によって血糖値が高くなりやすい。さらに栄養補給のためのグルコース投与を行う必要があるため、多数の患者が高血糖になることが知られている。しかし、高血糖は敗血症などの合併症や高死亡率の原因となるため、重症患者にとって深刻な問題である。そこで、患者にインスリンを投与して血糖値を低下させる処置が行われるが、その際に患者の血糖値を 80—110 mg/dL (4.4—6.1 mmol/L) の範囲に維持できれば罹病率と死亡率を低下させられる [Van den Berghe et al., N Engl J Med (2001)] ため、目標血糖値範囲を 80—110 mg/dL とする厳格な血糖値管理を行うことが望ましいとされている。しかし、ICU 滞在患者はインスリン感度の変動が大きく、血糖値を常に目標範囲に維持するようなインスリン投与速度の調節は困難である。特に術後患者の場合、患者の回復に従ってインスリン感度が増加して血糖値が低下しやすくなり、低血糖で死に至るリスクが増大するため、厳格な血糖値管理はほとんど行われていないのが現状である。本論文は以上の問題点を解決することを目的として、術後患者のインスリン感度の変動を考慮に入れた ICU 滞在患者の血糖値変化をより正確に表せる糖代謝の数理モデルを構築するとともに、構築したモデルに基づく非線形モデル予測制御と範囲モデル予測制御を用いた重症患者の血糖値制御法の検討を行った。

まず、既存の ICU 患者糖代謝数理モデルにインスリン感度を表すパラメータを導入するとともに、より正確に糖代謝を表すためインスリン依存性と非依存性のグルコース代謝の非線形特性、細胞間インスリンの飽和特性および経腸グルコース投与入力を追加して改良を行った (図 1)。また、改良モデルのパラメータを香川大学医学部附属病院 ICU に滞在した患者の臨床データに基づいて同定した。このモデルにおいてインスリン感度パラメータのみ変動させることで臨床データの血糖値変化をほぼ表せることを確認でき、従来モデルより誤差が小さくなる傾向を確認した。

次に、患者のインスリン感度を常に把握できるように過去の血糖値、グルコース投与速度とインスリン投与速度に基づいてインスリン感度パラメータを 30 分ごとに同定するオンライン同定アルゴリズムを構成した。

最後に、改良モデルを血糖値予測モデルとして、インスリン感度オンライン同定アルゴリズムを備えた非線形モデル予測制御および範囲モデル予測制御を用いた血糖値制御システムを構築した (図 2)。臨床データに基づいて構成した仮想患者に対する適用結果から、血糖値を 80—110 mg/dL の範囲に維持できる時間率は既存の研究と同程度で、とくに範囲モデル予測制御を用いた場合に低血糖となる時間率を低減できることが確認できた。

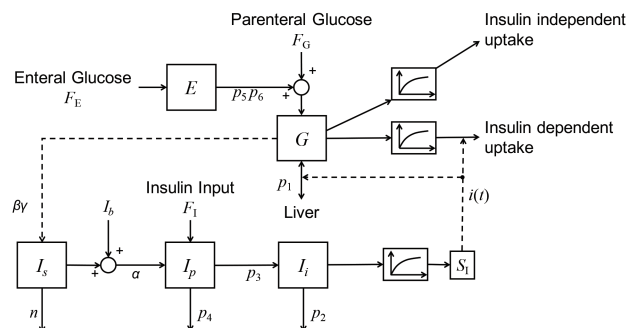


図 1 改良した糖代謝数理モデル。G は血糖値、 I_i は細胞間インスリン、 I_p は血漿インスリン、 I_s は膵臓のインスリン分泌、E は腸内グルコース、 S_1 はインスリン感度である。

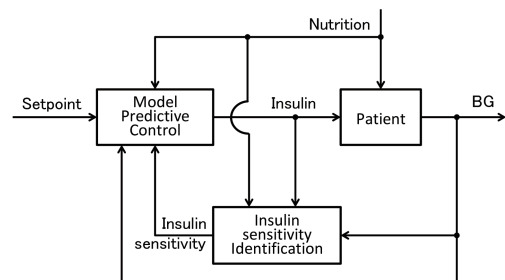


図 2 血糖値制御システム。

Fujun He (大木英司教授)

「Reliable Resource Allocation Models in Network Virtualization」

(ネットワーク仮想化における信頼性のある資源割り当てモデル)

令和2年9月23日授与

Network virtualization has been introduced as a key role in the next-generation networking paradigm to fend off the ossification of traditional networks. By leveraging the technologies of computer virtualization, network function virtualization, and software-defined networking, a platform with network virtualization provides virtualized resources of computing, functionality, and networking to users in a dynamic manner. While network virtualization leads to a more flexible and efficient network, it brings challenges for network management, one of which is how to efficiently allocate resources with satisfying different requirements. In addition, as the adaptation of network virtualization in different application archetypes is an increasing trend, the reliability of an environment with network virtualization has become a major concern. Resource allocation with protection strategies dealing with the reliability issue is an essential requirement for network virtualization. This thesis studies five specific problems about reliable resource allocation in network virtualization, each of which focuses on a typical application scenario.

Firstly, this thesis proposes a primary and backup resource allocation model that provides a probabilistic protection guarantee for virtual machines against multiple failures of physical machines in a cloud provider to minimize the required total capacity. The probability that the protection provided by a physical machine does not succeed is guaranteed within a given number. Providing the probabilistic protection can reduce the required backup capacity by allowing backup resource sharing, but it leads to a nonlinear programming problem in a general-capacity case against multiple failures. This work applies robust optimization with extensive mathematical operations to formulate the resource allocation problem as a mixed integer linear programming problem, where capacity fragmentation is suppressed. Secondly, this thesis proposes a backup computing and transmission resource allocation model for virtual networks with the probabilistic protection against multiple facility node failures. Thirdly, this proposes a backup resource allocation model for middleboxes with considering both failure probabilities of network functions and backup servers. This work aims to find an assignment of backup servers to functions where the worst weighted unavailability is minimized. This work develops three heuristic algorithms with polynomial time complexity to solve the problem. This work analyzes the approximation performances of different heuristic algorithms with providing several lower and upper bounds. Fourthly, this thesis proposes an unavailability-aware backup allocation model with the shared protection to minimize the maximum unavailability among functions. Fifthly, this thesis proposes a master and slave controller assignment model against multiple controller failures in software-defined networks with considering propagation latency between switches and controllers. Given assigned controllers for a switch, the master controller in each failure case is automatically specified based on a low latency first policy. This work proves that the adopted policy achieves the optimal objectives for considered problems.

The five proposed models studied five typical application scenarios of network virtualization with considering the corresponding properties, respectively. This work provides different approaches with theoretical analyses in each model. A network operator or service provider can select appropriate models with suitable approaches according to the specific requirements to achieve a flexible, cost-effective, and dependable network virtualization environment.

Longfei Chen (中村裕一教授)

「Analysis and Modeling of Machine Operation Tasks using Egocentric Vision」
 (エゴセントリックビジョンを用いた機械操作タスクのユーザー行動分析とモデリング)
 令和2年9月23日授与

The purpose of this research is to support the operational behaviors of ordinary users, especially in daily machine operational tasks. Home or office devices commonly appear in our everyday lives, such as a printer, rice cooker, coffee maker, sewing machine, DIY tools, and automobiles. First-time users, typically elderly people, usually need a guide on how to deal with those equipments; even for the most experienced users, a good guide can help save their physical energy and reduce their mental workload.

Evolving from textbook manuals and video tutorials, intelligent guidance systems with Augmented Reality (AR) have recently been developed to efficiently support users in these tasks, aiming at providing help on both knowledge perception and skill development of operators. In order to meet various user needs in rapidly changing task conditions, an effective guidance system should (i) provide a diversity of guidance patterns that is compatible with a sufficient variety of possible users and (ii) support what is needed by situational awareness during the task execution process. For instance, novices may require step-by-step instructions and a detailed explanation; concerning intermediate level users, it may be reasonable to offer more advanced ways of instructions; while professionals may seek to customize guidance according to their own ways.

To address these issues, we aimed at learning an extensive task model from a diversity of users and analyze the characteristics of their behaviors with different skill levels. We first introduced a novel approach for unsupervised hotspot detection from egocentric RGB-D experiences. The purpose is to use hotspots as key clues for workflow detection and experience summarization. Modeling the tasks was achieved by temporal interactions using a probabilistic model (HMM). We then focused on developing a framework for integrating multiple users' experiences into a unified operation model. Beginners' operational behaviors can provide valuable insights to provide detailed information about handling difficult task situations, confirmation of results, and common errors. A novel two-step aggregation framework is proposed to align and integrate experts' and beginners' experiences into an extensive task model. At last, we use fine-grained visual features based on the user's hotspot, head, hand, and gaze (H³G) for explicitly analyzing their operational behaviors with different skills, knowledge levels, and interpersonal differences. We observed significant behavioral changes due to continuous skill improvement. Automatically integrating different operating habits allows developing a rich, inclusive task model that could flexibly adapt to various user-specific behavior patterns.

In conclusion, we offered new insight into the field of supporting daily machine operations. We explored novel solutions of capturing experiences with machines and how these can be described, modeled, and used.

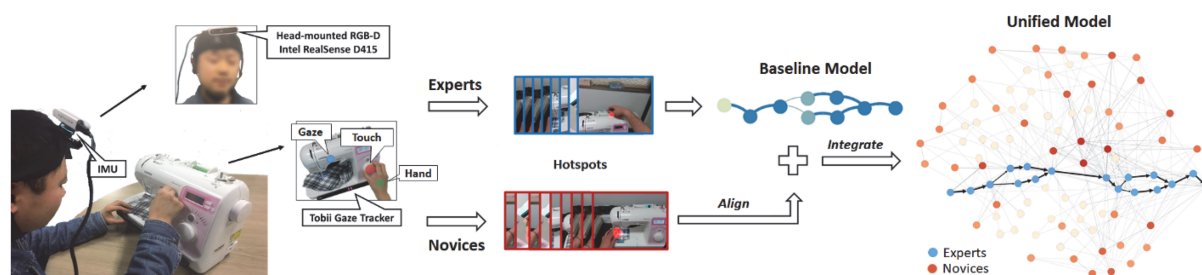


Figure 1: Recording and integration of operational experiences through egocentric vision.