

博士論文概要

[課程博士一覧]

Islam A K M Mahfuzul	「Modeling, Characterization and Compensation of Performance Variability using On-chip Monitor Circuits for Energy-efficient LSI」 (オンチップモニタ回路を用いた LSI 特性ばらつきのモデル化技術及び補償技術の活用によるエネルギー効率向上に関する研究)	平成 26 年 1 月 23 日
SinNyong Kim	「Analysis and Design of Radiation-Hardened Phase-Locked Loop」 (放射線耐性を持つ PLL の解析と設計)	平成 26 年 3 月 24 日
坂 本 健 一	「パケット通信による高信頼・高品質ネットワークの実現方式の研究」	平成 27 年 3 月 23 日
平 松 淳	「高速パケット通信網の通信品質制御方式に関する研究」	平成 27 年 3 月 23 日
松 原 大 典	「Studies on Information Sharing using Peer-to-Peer Systems and Information-Centric Networking」 (P2P システムおよび ICN による情報共有に関する研究)	平成 27 年 3 月 23 日
今 川 隆 司	「ソフトウェア耐性を考慮した粗粒度再構成可能アーキテクチャの設計手法」	平成 27 年 3 月 23 日
西 澤 真 一	「集積回路のエネルギー効率向上を目指した性能ばらつきの予測技術とセルライブラリの構築に関する研究」	平成 27 年 3 月 23 日
松 本 高 士	「Impact of Bias Temperature Instability and Random Telegraph Noise on CMOS Logic Circuits」 (バイアス温度不安定性とランダムテレグラフノイズが CMOS 論理回路特性に及ぼす影響)	平成 27 年 3 月 23 日
小 森 祥 央	「Epitaxial Growth and Superconducting Properties of 1212 Copper Oxides」 (1212 型銅酸化物のエピタキシャル成長とその超伝導特性)	平成 28 年 3 月 23 日
丹 羽 弘 樹	「Breakdown Characteristics in SiC and Improvement of PiN Diodes toward Ultrahigh-Voltage Applications」 (超高耐圧応用を目指した SiC における絶縁破壊特性の基礎研究および PiN ダイオードの高性能化)	平成 28 年 3 月 23 日
木 村 知 玄	「原子間力顕微鏡を用いた有機半導体グレイン／電極界面の局所電気特性評価」	平成 28 年 3 月 23 日
山 岸 裕 史	「有機薄膜トランジスタの特性制御およびそのチャネル上のナノスケール電荷分布評価に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日
井 上 卓 也	「電子・光子両状態制御に基づく高効率・高速熱放射光源の開発」	平成 28 年 3 月 23 日
川 本 洋 輔	「薄膜シリコン太陽電池の光吸収増大に向けたフォトリソニック結晶構造の設計に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日
西 本 昌 哉	「分子線エピタキシー法を用いたフォトリソニック結晶レーザ作製法の開発と空孔立体形状の検討」	平成 28 年 3 月 23 日
田 昇 愚	「超高 Q 値 SiC フォトリソニック結晶ナノ共振器に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日

赤 岩 和 明	「コランダム構造酸化ガリウム系半導体の電気特性制御とデバイス応用」	平成 28 年 3 月 23 日
金 弓 治	「High-quality Knowledge Acquisition of Predicate-argument Structures for Syntactic and Semantic Analysis」 (構文・意味解析のための高品質な述語項構造知識の獲得)	平成 28 年 3 月 23 日
Mo Shen	「Exploiting Vocabulary, Morphological, and Subtree Knowledge to Improve Chinese Syntactic Analysis」 (語彙的、形態的、および部分木知識を用いた中国語構文解析の精度向上)	平成 28 年 3 月 23 日
栗 野 皓 光	「Variability in BTI-Induced Device Degradation: From Silicon Measurement to SRAM Yield Prediction」 (トランジスタのBTI劣化ばらつきに関する研究：特性評価からSRAM回路歩留り予測へ)	平成 28 年 3 月 23 日
山 田 英 一	「非線形応答特性を持つ光デバイスを有する光通信システムの伝送特性に関する研究」	平成 28 年 3 月 23 日
羽 田 和 慶	「Model Analysis on Plasma Start-Up for Toroidal Fusion Devices」 (トロイダル核融合装置におけるプラズマ着火の研究)	平成 28 年 3 月 23 日
鋳 持 尚 輝	「Study of magnetic field configuration effects on internal transport barrier formation in Heliotron J」 (ヘリオトロンJにおける内部輸送障壁の形成機構に与える磁場構造の影響)	平成 28 年 3 月 23 日
石 川 峻 樹	「Study on Beam Forming for Phased Array Antenna of Panel-structured Solar Power Satellite」 (パネル構造型宇宙太陽発電所におけるフェーズドアレーアンテナのためのビーム形成技術の研究)	平成 28 年 3 月 23 日
水 野 公 平	「磁界共鳴送電の安全性に関する細胞影響評価研究」	平成 28 年 3 月 23 日
尾 上 洋 介	「因果グラフのビジュアル分析に関する研究 —評価グリッド法における評価構造分析を通じて—」	平成 28 年 3 月 23 日
Claudia Cecilia Yamamoto Noguchi	「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism Considering Meal Absorption Rate and Model-based Blood Glucose Control for Prandial State in Type 1 Diabetes」 (1型糖尿病における食事の吸収速度を考慮に入れたグルコース・インスリン代謝の数理モデル及び食事時の血糖値のモデルベース制御)	平成 28 年 9 月 23 日
金 子 光 顕	「Strain-Controlled AlN Growth on SiC Substrates」 (SiC基板上への歪み制御 AlN 層の成長)	平成 28 年 9 月 23 日
権 平 皓	「3次元フォトニック結晶光配線技術構築に向けた光伝搬制御の理論検討」	平成 28 年 9 月 23 日
John Richardson	「Improving Statistical Machine Translation with Target-Side Dependency Syntax」 (目的言語側の依存構文による統計的機械翻訳の改善)	平成 28 年 9 月 23 日
石 川 恵理奈	「Semantic Interpretation of Eye Movements Using Author-designed Structure of Visual Content」 (提示コンテンツのデザイン構造を用いた視線運動の意味理解)	平成 28 年 9 月 23 日

-
- 趙 欧 「Sum Rate Analysis and Dynamic Clustering for Multi-user MIMO Distributed Antenna Systems」 平成 28 年 9 月 23 日
(マルチユーザ MIMO 分散アンテナシステムにおける総和レート及びダイナミッククラスタリングに関する研究)
- 福 園 隼 人 「Spatial Signal Processing on Distributed MIMO Systems」 平成 28 年 9 月 23 日
(分散 MIMO システムにおける空間信号処理)
- 橋 本 大 志 「Robust adaptive beamforming for clutter rejection on atmospheric radars」 平成 28 年 9 月 23 日
(大気レーダーのための適応的クラッター抑圧手法)

[論文博士一覧]

- 中 西 俊 博 「Coupled-resonator-based metamaterials emulating quantum systems」 平成 28 年 1 月 25 日
(量子系を模擬する結合共振型メタマテリアル)

Islam A K M Mahfuzul (小野寺秀俊教授)

「Modeling, Characterization and Compensation of Performance Variability using On-chip Monitor Circuits for Energy-efficient LSI」

(オンチップモニタ回路を用いた LSI 特性ばらつきのモデル化技術及び補償技術の活用によるエネルギー効率向上に関する研究)

平成 26 年 1 月 23 日授与

本研究は、LSI のエネルギー効率の向上を目的とし、微細化により問題とされている LSI 特性ばらつきを回路・設計技術で解決するための手段であるオンチップモニタ回路の構成手法の検討、特性ばらつきを自律補償技術の検討、ならびに提案手法を試作チップによる評価を行ったものである。

LSI 技術は現在の情報化社会の基盤技術であり、LSI の低消費エネルギー化は喫緊の課題である。トランジスタの微細化及び電源電圧の低下により LSI の高速化と低消費電力化が実現されてきた。しかし、微細化に伴う特性ばらつきの増大により正常動作には大きな電圧マージンを設ける必要があり、微細化と電源電圧の低下を阻む要因となっている。この問題は製造技術だけでは解決できず、製造技術と回路技術の協調が必須とされている。本研究では、製造後の回路特性変動と変動要因を見積もるためのオンチップモニタ回路の開発を行う。さらに、特性モニタの診断結果を元に、ばらつきを自律的に補償する技術を提案する。

はじめに、LSI 特性の正確な見積もりを目標とし、各種ばらつきの要因を抽出するためのモニタ回路構成を検討する。特性ばらつきには補償可能な成分とランダムな成分がある。電源電圧が異なると、これらのばらつき成分の影響も異なり、特に低電圧動作ではばらつきの影響が急拡大する。これらのばらつき量を低コストと小面積でモニタすることにより補償可能な成分を補償し、ランダム成分に強靱な設計方法により大幅なエネルギー削減が可能とする。本研究では、各種の特性ばらつきの測定、モデル化及びばらつき要因の分離手法を提案し、ばらつきモニタ回路の構造を提案する。実際にチップを試作し、提案手法及び回路構成の評価を行い、妥当性を示す。

従来のモニタ回路技術では、ばらつきの統計的性質とばらつき要因を抽出するために、異なる種類の回路を大量にチップ上に搭載する必要があり、実装コスト及び面積オーバーヘッドが大きい。本研究では、トポロジー可変な回路構造を提案し、同一のモニタ回路によりばらつきの統計的性質と要因分離の手法を可能とする。提案回路は面積と実装コストを大幅削減する。そして、実測により各種のばらつきのオンチップ診断を検証する。

次に、補償可能なばらつき成分をオンチップで動的に補償する技術を提案する。特性ばらつきをオンチップモニタ回路で診断し、目標の特性を達成するようにトランジスタ特性を自律調整する回路技術を開発する。本研究で提案した小型のモニタ回路を用いることによりチップ上に細粒度で補償回路を搭載可能にする。特性ばらつきの自律的補償を活用することにより回路のマージンを大幅削減することができ、LSI のエネルギー効率を大幅向上できる。ばらつきによる電源電圧低下を阻む問題を回路技術で解決し、LSI のさらなる成長を可能とする。

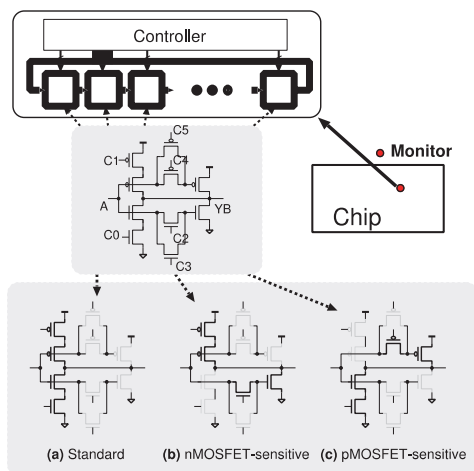


Figure 1 トポロジー可変なモニタ回路。1つの回路により様々なばらつき情報を抽出する。

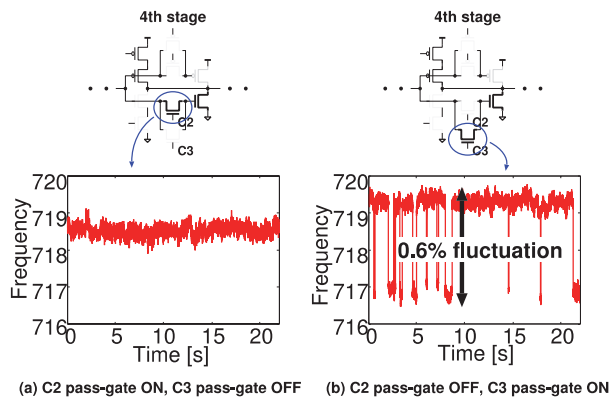


Figure 2 モニタ回路により観測される動作中のトランジスタ特性変動。トランジスタによって変動量が異なる。

SinNyoung Kim (小野寺秀俊教授)

「Analysis and Design of Radiation-Hardened Phase-Locked Loop」

(放射線耐性を持つ PLL の解析と設計)

平成 26 年 3 月 24 日授与

Phase-locked loop (PLL) is a clock generator. A radiation strike of high-energy particles on PLL causes clock perturbation. The perturbed clock is propagated to all over the digital system and attributed to a malfunction in the system. Thus, the performance related to radiation effect of the PLL is important for high-reliability applications such as satellite systems, medical equipment, vehicles, super computers et cetera. In this dissertation, an analysis of radiation effect on PLL and a radiation-hardened PLL (RH-PLL) design to guarantee clock-perturbation immunity are presented.

Firstly, this dissertation discusses an analysis of radiation effect on PLL. The radiation effect on PLL mainly depends on locations of radiation strikes, timings of radiation strikes, and PLL's design parameters. The analysis categorized radiation-induced errors based on locations of radiation strikes, which is sub-circuits of PLLs. The sub-circuits are phase-frequency detector (PFD), a divider, a charge pump (CP), and a voltage-controlled oscillator (VCO). The categorized errors were expressed as a set of equations, which is called an analytical model. The analytical model is used to evaluate quantitatively the amount of clock-perturbation. This value is evaluated immediately when a radiation strike occurs. This dissertation presents a behavioral model to evaluate a recovery time that is the time from the onset of the clock perturbation to that of settling. As a demonstration, a PLL designed in a $0.18\mu\text{m}$ CMOS process was evaluated using the analytical model and the behavioral model. The evaluation results indicated the PFD as the most vulnerable part.

Based on the analysis of radiation effect, an RH-PLL design that guarantee clock-perturbation immunity is proposed. The proposed technique can achieve an area-efficient RH-PLL due to the use of dual modular redundancy (DMR), in contrast to the triple modular redundancy (TMR) technique. The basic concept of the proposed RH-PLL is detecting errors and switching the output from one PLL having error to the other. Two detectors, which are clock detector and pulse detector, are developed to achieve high speed detection of the radiation-induced errors. The clock detector is for detecting errors originated from the analog sub-circuits and the pulse detector covers the errors originated from the digital sub-circuits. The proposed RH-PLL is fabricated in a $0.18\mu\text{m}$ CMOS process and verified by radiation-test. The clock perturbation immunity is confirmed in the experiment.

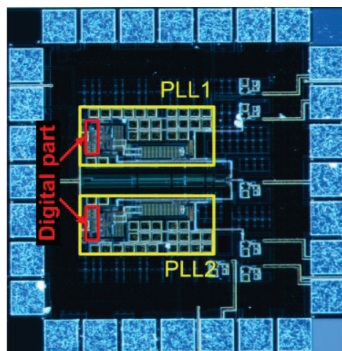


Fig.1 Micrograph of proposed RH-PLL.

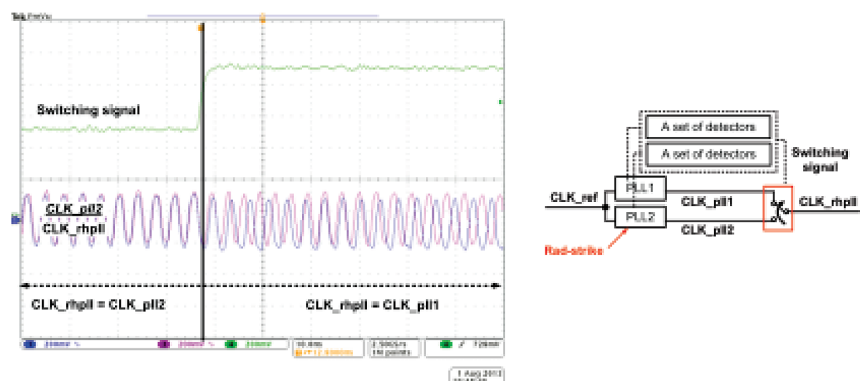


Fig. 2 Radiation test result of proposed RH-PLL when a radiation strike occurs at PLL2. The RH-PLL output (Blue line) clock remains constant clock period.

坂本 健一（高橋達郎教授）

「パケット通信による高信頼・高品質ネットワークの実現方式の研究」

平成 27 年 3 月 23 日授与

本論文は、音声からメール・画像・ストリーミングデータ等の多様な通信要件を持つ通信アプリケーションに対応するとともに、コンシューマ・ビジネスユース・マシンツウマシンのような各種のユーザーの特性に応じた、多様な通信要件を満たす次世代のネットワークアーキテクチャとそれを実現するための通信システム実現技術について論じている。

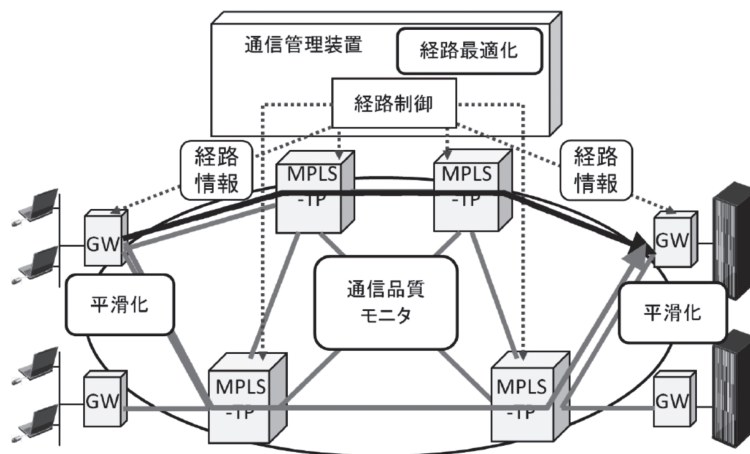
2章は、複数の要件を持つユーザーを収容するための、コアネットワークにおけるパケットによるユーザ多重方式である MPLS (Multi Protocol Label Switching) プロトコルの構築法を扱っている。仮想専用網を対象にした通信装置の実現方法として、ユーザごとのレイヤ2アドレスとレイヤ3アドレスの両者をテーブルとして具備するマルチルーティングテーブル方式により、ユーザ間の独立性が保証されることを示した。

3章は、パケット通信ネットワークにおける、通信可用性確保の方式について述べ、短時間で障害復旧を行うための通信装置の実装方法を述べている。障害発生時の通信途絶時間を、音声通信ユーザが体感できない 50ms 以内に抑えることを要件に、多数のユーザーが収容される通信インターフェースで障害が発生した場合にも要件を満たすような通信手順と、装置への機能配備法と実装方式を明らかにした。

4章は、パケット通信ネットワークにおける、通信品質要件を満たすためのトラフィック制御方式を述べている。ユーザー間で公平な通信サービスを提供し、かつ実装の容易なポリシーに基づく通信トラフィック制御方式を提案し、シミュレーションでその有効性を示している。また、ユーザーが利用しているトランスポートプロトコルに依存しない通信帯域確保方式を提案し、その有効性を実証した。

5章は、アクセスネットワークで用いられる PON (Passive Optical Network) システムにおいて、インターネットトラフィックに加えて TDM (Time Division Multiplexing) 型の既存サービスを伝送する方式を検討している。TDM 情報を低遅延でかつ通信ロスなく伝送するためのフレーム構造を提案し、その有効性を示した。

6章は、前章までに提案、評価を行った技術をもとに、多様な要件を満たすネットワークを、パケット通信プロトコルを用いて統合するアーキテクチャを提案している。コアネットワークのトランスポート機能として MPLS-TP (図) を適用するとともに、疑似ルータ方式を提案し、現実的な制約時間内に収束可能なルーティング処理を実現し、通信品質の確保及び通信可用性要件の確保を可能にした。



図：MPLS-TP による高信頼化 copyright©2012 IEICE

平 松 淳 (高橋達郎教授)
 「高速パケット通信網の通信品質制御方式に関する研究」
 平成 27 年 3 月 23 日授与

本論文は、高速パケット通信網の通信品質制御を対象とし、神経回路網の学習機能を用いた通信品質制御方式の提案と性能評価を行うとともに、将来の省エネルギー化に向けた広域同期スケジュール型高速パケット網を実現するための効率的なトラフィック収容手法を研究したものである。

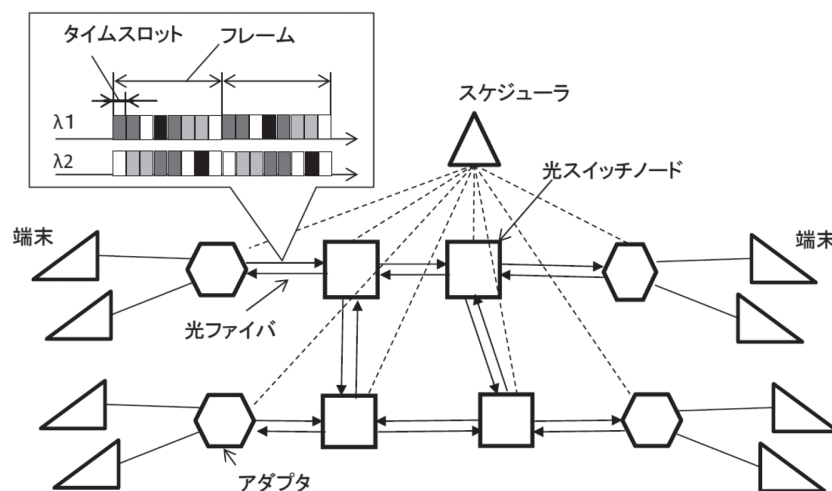
第 2 章は、高速パケット網における通信品質制御の枠組みを述べている。通信品質制御がパケット転送レベル、呼レベル、網レベルの 3 階層から構成されることを示し、本論文が対象とする、学習型通信品質制御と広域同期スケジュール型パケット網の研究課題を述べている。

第 3 章から第 5 章は、神経回路網を用いた学習制御方式を提案している。第 3 章は、3 層神経回路網を用いたオンライン学習制御型呼受付制御方式を提案している。さまざまなパケットの到着状況におけるパケット廃棄率をあらかじめ学習することにより、新たな呼接続の要求があった場合に、品質を満足できるかどうかを推定し、受付判定制御を行うものである。一般に目標パケット廃棄率は低い確率が設定される。低確率な事象を精度よく学習するためのリーキーパターンテーブル学習法を考案し、各種の呼種の組み合わせに対して、呼受付制御が可能であることを示した。

第 4 章は、呼受付制御に加え、リンク容量割り当てを行うクロスレイヤ型のオンライン学習制御を提案し、比較的長時間間隔の短い呼受け付け制御と、比較的長周期のリンク容量割り当て制御を連携統合して制御可能であることを明らかにした。

第 5 章は、仮想出力バッファ法による学習型通信品質制御を述べている。学習制御方式においては、品質が悪い状態も経験しないと受付制御の限界が学習できないという課題がある。そこで、実際の回線容量よりも小さな出力帯域を持った仮想バッファでパケット廃棄を発生させ、それを観測する手法を提案し、パケット廃棄を発生させずに、接続限界を学習できることを示した。

第 6 章は、低消費電力な広域同期型光パズネットワークを扱っている。GPS 等の高精度な時刻同期を用いた時分割型の光パズネットワークは (図)、小さな粒度で効率的に帯域割り付けが可能で、光信号のまま処理が可能のため電力消費量が小さい特長を持つ。高効率なタイムスロット割り付けを実現するために、連続タイムスロット割り付けや、基準ノードからの最短経路木を用いてタイムスロット選択位置をシフトする方法を提案し、高いリンク利用率が達成できることを示した。



図：広域同期スケジュール型高速パケット網 copyright©2014 IEICE

松原大典 (高橋達郎教授)

「Studies on Information Sharing using Peer-to-Peer Systems and Information-Centric Networking」

(P2P システムおよび ICN による情報共有に関する研究)

平成 27 年 3 月 23 日授与

本論文は新たな情報通信ネットワーク技術として、Peer-to-Peer (P2P) システムとデータ指向型ネットワークを研究対象としている。

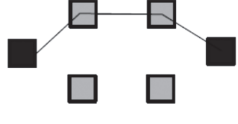

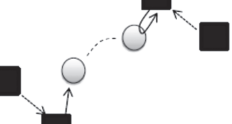
第 2 章は複数ユーザ間で直感的なリソースの探索および管理を実現する P2P 情報共有システムを提案している。分散配置されたファイルの整理・管理を直感的なユーザインタフェースで実現する仮想ディレクトリを実装し、中央管理サーバが管理する。ユーザビリティや管理性を向上させると共に、仮想ディレクトリ上のファイルやフォルダに対してアクセス制御を設定することで厳密なファイルセキュリティを実現できることを示した。

第 3 章は、複数ユーザ間でリアルタイムな相互交流を実現する P2P 情報共有システムを提案している。要約したテキスト情報をプッシュ型でクライアントに通知し、通信アーカイブにより、交流スペースにおけるユーザ通信の録音データをユーザ間で共有する。プッシュ型通知と通信アーカイブの統合により、ユーザ間のリアルタイムな情報共有と、時間に依存せずにユーザが参照できる通信アーカイブを提供した。

第 4 章は、IP アドレスの代わりにデータの名前を用いて端末間の通信と情報共有を実現する新しいネットワークアーキテクチャである情報指向型ネットワークの一方式として Data-Centric Network (DCN) を提案している (図)。最適化経路を形成することにより、データの移動に伴う経路情報数の増加や、上位階層の中継ノードのトランザクション負荷を低減し、大量データの頻繁な移動に対応することを可能とした。

第 5 章は、DCN を大規模網に適用した際の通信遅延およびトランザクション負荷に関する課題を述べ、集約ノード同士を隣接ノードとして直接接続する集約ノードピアリング方式を提案している。プロトタイプシステムを実装し、37 の中継ノードと 336 台の端末による広域網テストベッドを用いた実験評価により、遅延と上位階層の中継ノードのトランザクション負荷を低減できることを実証した。

第 6 章では、理論的評価によって DCN のトランザクション負荷を分析している。大規模プロバイダ網トポロジを用いたシミュレーションにより、各種の端末分布パターンや通信パターンにおける特性を明らかにし、特に近隣の端末同士が通信する場合において DCN が中継ノードのトランザクション負荷を低減できることを示した。

	PSTN (Telephony)	IP (Internet)	Data Centric Network
Time	1930's~	1980's~	2020's~
Usage	voice communication	WEB	M2M
Communication Type	Human to Human (1 to 1)	Human to Machine (1 to many)	Machine to Machine (many to many)
Infrastructure	circuit switching	packet switching	<u>data dissemination</u>
Strength	reliability, QoS	connectivity	<u>mobility, efficiency</u>
Weak	efficiency	reliability, QoS, mobility	delay
Mechanism	Sender specifies terminal ID (phone number) and set-up end-to-end circuit passage. 	Sender specifies terminal location (IP address) and send out packet flows. 	Sender registers a data object with an ID attached, and receiver specifies the ID to retrieve it. 

図：ネットワークアーキテクチャのパラダイム copyright©2013 IEICE

今川 隆 司 (佐藤高史教授)

「ソフトエラー耐性を考慮した粗粒度再構成可能アーキテクチャの設計手法」

平成 27 年 3 月 23 日授与

プロセスの微細化が進むことで、集積回路の開発や製造に要するコストの増大とシステムの信頼性の低下が懸念されている。特に近年はソフトエラーが回路に及ぼす影響が顕在化し、航空宇宙や社会インフラ等の分野だけでなく、民生機器においても信頼性を考慮したシステム設計を効率良く行うことの重要性が高まっている。これに対して本研究では、粗粒度再構成可能アーキテクチャ (CGRA: coarse-grained reconfigurable architecture) に注目し、この CGRA をソフトエラー耐性を考慮しながら設計するための手法を提案した。

本論文ではまず、ソフトエラー耐性を考慮した CGRA の設計空間探索の効率化のための評価環境を構築した。本環境を用いた信頼性評価により、ソフトエラーが発生する場所によって回路上に現れる影響に違いがあり、選択的空間多重化が有用であることを定量的に示した。また、配線資源の違いが選択的空間多重化における面積と信頼性のトレードオフに与える影響を評価し、アプリケーション回路や設計制約によって適切な配線資源量が異なることを示し、信頼性の観点からの設計空間探索の重要性を示した。

次に空間多重化に注目し、CGRA 上に実装されるアプリケーション回路に選択的三重化を適用する際の、適用領域の優先順位を高速に決定する手法を提案した。本手法は、データフローグラフ (DFG) で表現されたアプリケーション回路の各頂点をもつ特徴に注目し、その脆弱性を重み付き線形和の評価関数を用いて評価し、多重化適用の優先順位を決定している。提案手法により得られる回路面積と信頼性のトレードオフカーブは、網羅的な探索により得られるものに近くなることを示した (図 1)。また、評価関数の重みの値を、複数のサンプルアプリケーションに対する故障挿入シミュレーションの結果に基づいて求める手法を提案した。求めた重みの値から、DFG の頂点の脆弱性が自身に接続される他の頂点の脆弱性の影響を受けることや、論理演算や算術演算がもつ信頼性に与える影響の相対的な違いを、定量的に明らかにした。

更に時間多重化に注目し、構成情報メモリ上で発生したソフトエラーの影響を効率よく訂正可能な時間多重化手法を提案した。本手法では、繰り返しの処理の途中でエラーの発生を検出された時点や、それ以上の処理が不要と判定された時点で処理を打ち切る。これにより、繰り返しの最中に再度エラーが発生して誤り訂正が不可能になる確率を低下させるとともに、回路面積のオーバーヘッドを小さく抑えることが可能となる。評価を通じて、提案手法を CGRA 上に実現するのに必要な面積オーバーヘッドが 1.01 倍程度であることを示した。また標準的な時間多重化や空間多重化よりも、提案手法の方が最大で 2.5 倍程度信頼性が高くなることを示した (図 2)。

最後にこれらの結果を統合し、回路面積やスループットを制約として与えられたときの、提案手法を含む時間多重化や空間多重化の使い分けによるソフトエラー耐性の最大化について論じ、ソフトエラー耐性を考慮しながら CGRA を設計する際に、提案した評価環境・空間多重化手法・時間多重化手法が果たす役割を明らかにした。

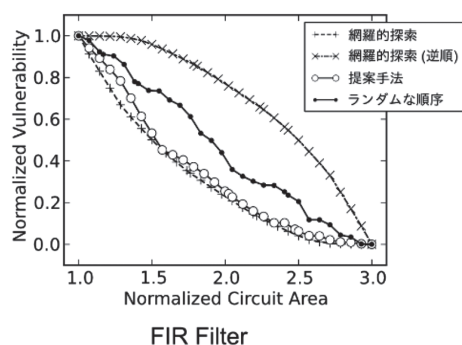


図 1: 提案手法により決定される優先順序で三重化をした場合の面積と信頼性のトレードオフ曲線。

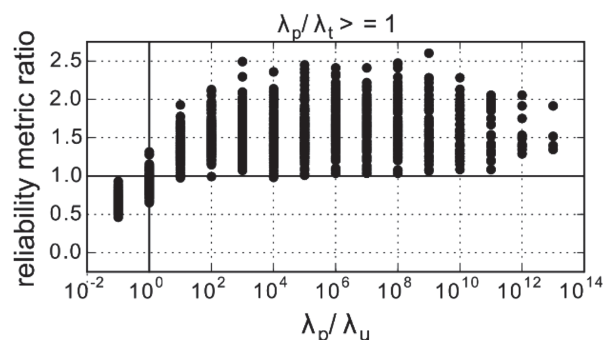


図 2: 空間多重化に対する提案時間多重化の信頼性の比。

西澤 真一 (小野寺秀俊教授)

「集積回路のエネルギー効率向上を目指した性能ばらつきの予測技術とセルライブラリの構築に関する研究」

平成 27 年 3 月 23 日授与

集積回路は、これまでその製造プロセスの微細化によって高速化、大規模化、低消費エネルギー化を実現してきた。しかし最小加工寸法が 100nm を切るようになると、微細化なトランジスタや配線素子の製造上および設計上の問題が顕在化してきた。一つは素子特性のばらつきが回路特性に与える影響の拡大である。製造プロセスの複雑化によって、トランジスタ特性ばらつきが複雑化している。ばらつきの正確なモデル化と設計への反映が必要不可欠である。もう一つは、微細化による消費エネルギー削減効果が得られなくなってきた事である。増大するリーク電流の影響によって、トランジスタの閾値電圧を下げられず、従って定格電圧を下げる事ができないためである。電源電圧を定格電圧以下に設定する事で回路のエネルギー効率を改善する事が可能であるが、回路遅延が増大し、また各種特性ばらつきが回路特性に与える影響が拡大する。そのためエネルギー効率の高い集積回路を実現するためには、低電圧動作に適した回路設計手法の構築が必要である。

本論文では、集積回路のエネルギー効率の向上を目的として、大きく以下の 2 つの問題について取り組んだ。

(1) 性能ばらつきの予測技術の向上によるエネルギー効率の向上

集積回路における素子特性ばらつきを考慮するために設計時にマージンを設けているが、不適切な設計マージンの設定は無駄な消費エネルギーの増加、性能歩留まりの悪化につながる。性能ばらつきの適切な予測のために、製造プロセスに起因する回路遅延ばらつきの統計的性質に応じた分離手法の高精度化、電源配線構造に起因する電圧ばらつきを評価するための埋め込みモニタ回路の検討を行った。実際の集積回路における回路遅延を評価し、その統計的性質の違いを利用した遅延ばらつきの分離、および電源電圧ばらつきモニタ回路の観測結果から、提案手法の妥当性を検証した。

(2) エネルギー効率の高い低電圧デジタル回路を実現するスタンダードセルライブラリの構築

電源電圧を下げる事は集積回路のエネルギー効率を改善する有効な手法であるが、電源電圧を下げると回路遅延は増大し、また製造プロセスに起因するトランジスタ特性ばらつきの影響が拡大する。そのため、低電圧動作に適したスタンダードセルの構成法について検討した。スタンダードセルの遅延特性がその回路構造に依存する事から、集積回路の動作電圧に最適なゲート幅を持つスタンダードセルを容易に設計可能なセルレイアウト構造を提案した。また、低電圧動作において拡大するトランジスタ特性ばらつきを考慮した順序セルの設計法について検討を行った。モンテカルロシミュレーションを利用した加速試験を行い、回路遅延ばらつきに大きく影響するトランジスタを見つけ出す事で、順序セルの設計改善を可能にした。

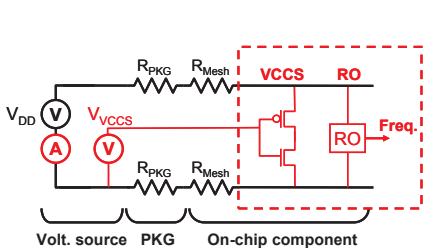


図 1：提案電源ドロップ測定回路。RO と電圧制御電流源からなる。

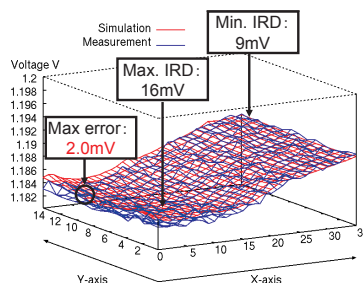


図 2：電圧分布の測定結果。提案回路の実測結果 (青) はシミュレーション (赤) とよく一致し、誤差 0.17% (2mV)。

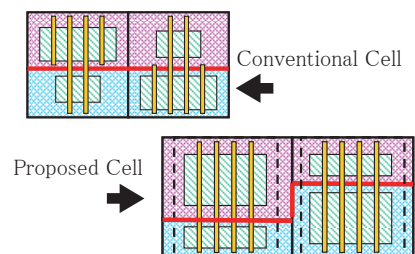


図 3：従来セル構造に対し、提案構造は左右に余白を設けることで PN 比の最適化が可能。

松本高士 (小野寺秀俊教授)

[Impact of Bias Temperature Instability and Random Telegraph Noise on CMOS Logic Circuits]

(バイアス温度不安定性とランダムテレグラフノイズがCMOS論理回路特性に及ぼす影響)

平成27年3月23日授与

CMOSテクノロジーのスケーリングにより、トランジスタのゲート酸化膜において、回路性能に影響を与える新たな信頼性の問題が近年発生している。その結果、高信頼性を備えたシステムを設計することはますます困難になっている。バイアス温度不安定性 (NBTI, Negative Bias Temperature Instability) とランダム・テレグラフ・ノイズ (RTN) は、ゲート酸化膜における信頼性の問題として近年活発に研究が行われている分野である。NBTIはトランジスタ特性の経年劣化を引き起こす要因であるが、時間とともに一様に劣化するのではなく、回路動作条件によっては急速な回復を伴う複雑な現象である。本研究では複数の高速なNBTI回復特性評価手法を構築した。65nm CMOSで試作した回路においては、図1に示すように、pMOSFETの様々な劣化状態からの回復を1つの回復曲線にマッピングできることを明らかにし、ある条件では数時間のうちに大部分は劣化が回復することを明らかにした。さらに回復現象を活用したマルチコアLSIの長寿命化手法を提案した。

本研究では次に、RTNに起因したデジタル回路の遅延ゆらぎについて、40nm CMOSテクノロジーにおいて試作したリング発振回路 (RO) を実測した結果に基づいて明らかにした。図2 (a) に示すように、あるROの発振周波数を連続的に観測していると、一時的に10.4%もの巨大な発振周波数ゆらぎが発生することを示した。最大で12,600個のROについて測定し、図3に示すように発振ゆらぎの統計的な分布が対数正規分布に従うことを明らかにした。特に、組合せ回路を0.65V程度で低電圧動作させた場合には、RTNによる深刻な遅延ゆらぎが発生することを示した。さらに組合せ回路において発生する遅延ゆらぎを回路設計者が低減する手法を提示した。組合せ回路の動作電圧、トランジスタサイズ、論理段数を増加させることでRTNの影響を急激に低減させることが可能であることを実験的に示した。RTNゆらぎの分布と製造プロセスばらつき分布との相関はほとんど無いことを示し、7シグマ値付近ではRTNゆらぎが製造プロセスばらつきを越えて支配的になる可能性があることを示唆する結果を得た。

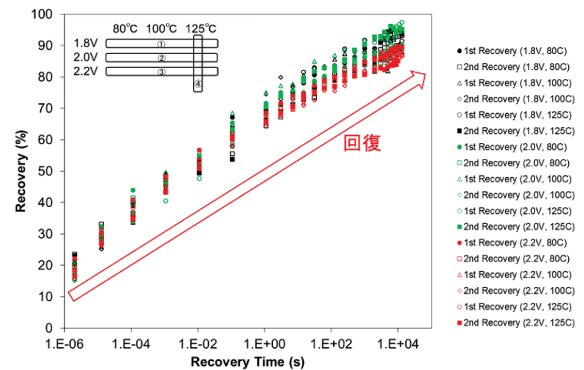


図1 pMOSFETの高速な回復測定結果

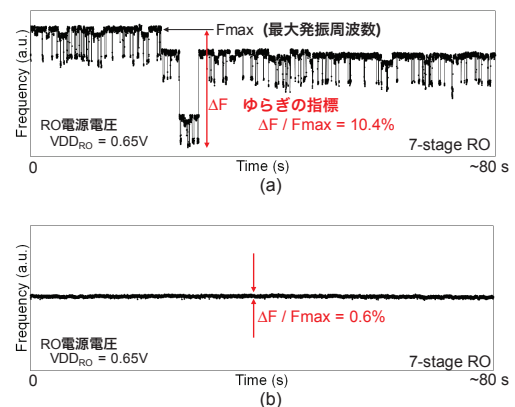


図2 RTNによるRO発振周波数ゆらぎの実測例 (a) ゆらぎが大きいRO (b) ほとんどゆらがないRO

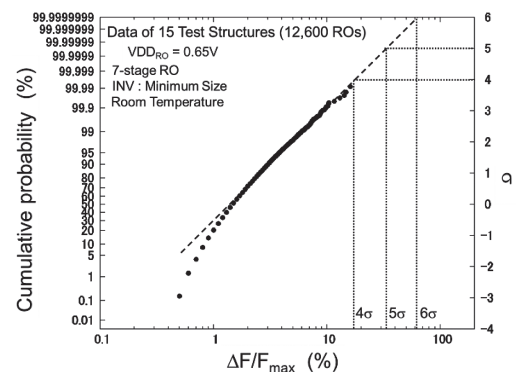


図3 RO発振周波数ゆらぎの統計分布 (対数正規分布)

小 森 祥 央 (掛谷一弘准教授)

「Epitaxial Growth and Superconducting Properties of 1212 Copper Oxides」

(1212 型銅酸化物のエピタキシャル成長とその超伝導特性)

平成 28 年 3 月 23 日授与

本研究は、超伝導体の中で最も高い超伝導転移温度を示す物質群である銅酸化物をベースとした高温超伝導薄膜の作製に関するものである。酸化物の中でも特に”1212 型”と呼ばれる結晶構造をもつ物質の研究を行った。この 1212 型の銅酸化物は、c 軸方向の電気伝導性に優れており、そのため、超伝導臨界電流が他の結晶構造の銅酸化物よりも高いことが魅力である。1212 型の物質群は、鉛、ビスマス、ルテニウムといった、融点の低い元素をベースとして構成される物質が多く、そのため薄膜成長の際にこれらの元素の再蒸発が伴い、超伝導を示す欠陥の少ない薄膜を得ることが困難とされてきた。本研究では、蒸発しやすい元素の分圧を高めながら熱処理を施すという新たな成長方法を用いることで、1212 型物質の良質なエピタキシャル薄膜を得ることに成功し、これによって、超伝導特性（臨界電流、臨界磁場、ジョセフソン特性など）の詳細を初めて明らかにすることができた。下図は、 $\text{PbSr}_2\text{YCu}_2\text{O}_7$ (Pb1212) 薄膜の原子像である。数多くの元素で元素置換が可能であることを活かし、c 軸導電率に大きな影響を及ぼす”ブロック元素（下図では Pb）”の置換効果に関する検証を行った。その結果、ブロック元素が構成する酸化物半導体（下図では PbO_2 ）のバンドギャップの大きさと c 軸抵抗率に正の相関があることが分かった。詳細な解析から、バンドギャップの大きさをトンネル障壁とした際のトンネル電流から見積もられる c 軸導電率が実験から得られる導電率とよく一致することが分かった。銅酸化物高温超伝導体の c 軸導電率は、超伝導特性を決める重要なパラメータであるが、理論的な導出が困難で新規高温超伝導材料の開拓を阻む一因となっている。しかし本研究で得られたモデルによって元素の種類から c 軸導電率を推定することが可能となった。

得られた具体的な結果は以下の通りであり、博士論文では以下のそれぞれが一つずつ章を構成している。

「1212 型物質のエピタキシャル薄膜の作製と結晶性の評価」

スパッタ法によるアモルファス薄膜の作製と元素の分圧を調整した熱処理を組み合わせることで基板に配向したエピタキシャル薄膜を得ることができた。1mm²以上のサイズの単結晶薄膜が得られていることが確認され、バルク多結晶よりも高い 90 K の超伝導転移温度を示す薄膜も得られた。

「高磁場・異方的電気伝導特性を基にした超伝導特性の評価」

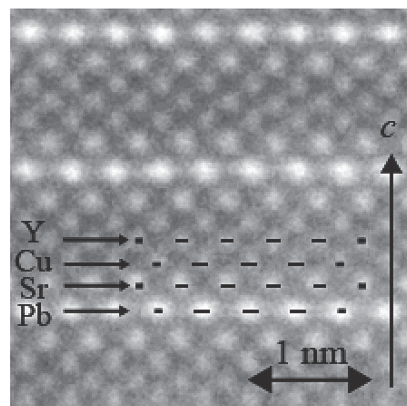
60 T のパルス高磁場を用いて超伝導を破壊し、臨界磁場の面内面直異方性から超伝導コヒーレンス長の ab 面方向と c 軸方向の異方性を評価した。異方性は 5-10 と見積もられる結果となり、結晶構造から予想される通り、銅酸化物高温超伝導体の中で非常に異方性が小さく、1212 型の物質群は超伝導材料としての応用に適することが明らかとなった。

「c 軸ジョセフソン特性の評価」

薄膜に微小メサ加工を施し、c 軸電流電圧特性の観察を行った。これまでビスマス系を中心とした限られた物質でしか観測されていなかった明瞭なジョセフソン特性を鉛がドーブされた 1212 型の物質で初めて観察することに成功し、超伝導ギャップ・最大ジョセフソン電流などの知見を深めることができた。元素置換効果を検証した結果、鉛イオンの存在が c 軸抵抗率を増大させ、明瞭なジョセフソン特性を形成する鍵となっていることが分かった。

「ブロック元素と c 軸導電率を結びつける新たな理論に関する議論」

ブロック元素が構成する酸化物半導体のバルクのバンドギャップの値を用いて Simmons の量子トンネル電流を計算したところ、実験結果から得られた c 軸導電率を説明できることがわかり、1212 型の物質に限らず、高温超伝導体全般が同様の傾向を示すことがわかり、磁場特性やジョセフソン特性をはじめとした超伝導特性を説明できることがわかった。



$\text{PbSr}_2\text{YCu}_2\text{O}_7$ (Pb1212) 薄膜の断面透過型電子顕微鏡像

丹羽 弘 樹 (木本恒暢教授)

「Breakdown Characteristics in SiC and Improvement of PiN Diodes toward Ultrahigh-Voltage Applications」

(超高耐圧応用を目指した SiC における絶縁破壊特性の基礎研究および PiN ダイオードの高性能化)

平成 28 年 3 月 23 日授与

ワイドギャップ半導体 SiC は Si と比較して優れた物性値を有しており、Si では実現不可能な高性能パワー半導体素子が作製できることから大きな注目を集めている。特に 600-1200 V 級のショットキーバリアダイオード (SBD) や電界効果トランジスタ (MOSFET) は産業機器やハイブリッド車・電気自動車などの電力変換機応用に期待されており、数多くの研究の末、2000 年台より量産化が始まっている。一方で本研究では、より高耐圧、すなわち耐圧 10 kV を超えるような次世代の超高耐圧 SiC バイポーラデバイスに注目している。このようなデバイスは、特に送電・変電系統における電力変換装置の低損失化に期待されている。しかし現在までに超高耐圧 SiC バイポーラデバイスについては断片的な報告例こそあるものの、その学術的な基礎研究は皆無である。そこで、超高耐圧 SiC バイポーラデバイスの実現に向けて、その基本構造である PiN ダイオードを用いた研究が必須となっている。

本論文では、超高耐圧 SiC バイポーラデバイスの高性能化に向けて、(1) 正確な絶縁破壊特性の性能予測に向けた衝突イオン化係数の精密測定、(2) 超高耐圧デバイスの実現に向けた接合終端構造の基礎研究、(3) バイポーラデバイスにおける順方向特性の改善に向けたハイブリッド動作デバイスの提案および実証と、物性からデバイス物理に関する基礎研究をまとめたものである。

- (1) 衝突イオン化係数はデバイスの絶縁破壊電圧などを決定する重要な物性値であり、SiC デバイス全般において設計の基盤となるものである。そこで、正確な値を決定するために本研究では先行研究が抱える問題点を明らかにし、測定・解析手法の改善を図った。これにより、1.0-3.2 MV/cm の広い電界範囲で衝突イオン化係数の決定に成功し (図 1)、さらに正確な温度依存性も明らかにした。
- (2) パワーデバイスにおいて高耐圧を実現する上で必須となる構造である接合終端構造に関して体系的な研究を行い、超高耐圧を実現する上での設計指針を明らかにした。特に本研究では空間変調型 JTE の改良により 26.9 kV の耐圧を有する SiC PiN ダイオードを実現した。
- (3) SiC バイポーラデバイスの導通損失低減に向けて、ユニポーラデバイスを内蔵させる SiC ハイブリッド動作デバイスを提案した。本デバイスでは立ち上がり電圧以下ではユニポーラ動作させることで、低電圧 (電流) 領域における損失の低減が可能となる。そこで本研究ではハイブリッド動作デバイスの基礎構造である MPS ダイオード (PiN/SBD ダイオードの並列構造) を設計・作製し、基本的な設計指針を示した。さらに (2) の空間変調型 JTE を用いることで 10 kV 級 SiC MPS ダイオードを実現した (図 2)。

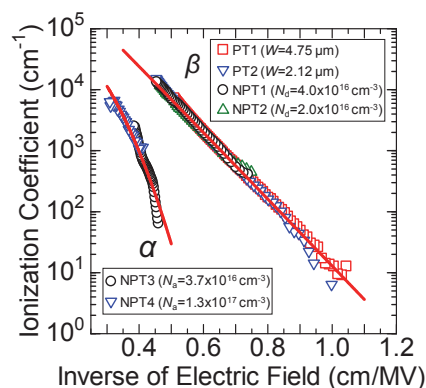


図 1 : SiC における衝突イオン化係数の電界依存性

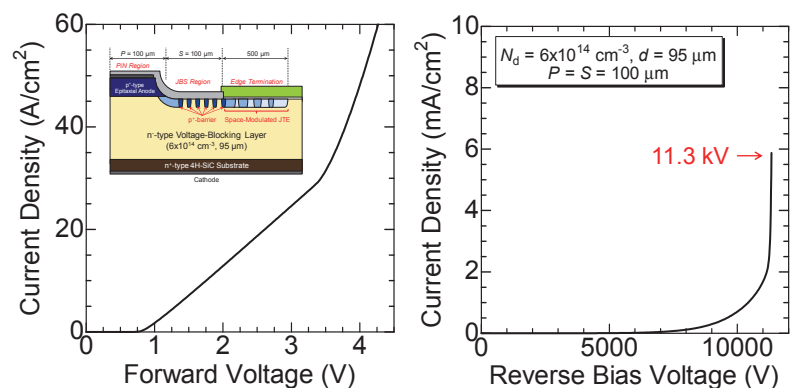


図 2 : 超高耐圧 SiC MPS ダイオードの電流電圧特性

木村 知 玄 (山田啓文教授)

「原子間力顕微鏡を用いた有機半導体グレイン／電極界面の局所電気特性評価」

平成 28 年 3 月 23 日授与

有機エレクトロニクスは有機半導体材料の電気・光学的機能を利用した軽量性・可撓性のある新規デバイス創成に向けた研究分野であり、有機薄膜トランジスタ (OFET) はその中核を成すデバイスの一つである。有機薄膜は多数の島状のグレインで構成されているため、OFET のデバイス特性に関する金属／有機界面物性を正しく評価するには特定のグレインに注目した局所物性評価手法の確立が急務である。ここで、表面形状の可視化手法である原子間力顕微鏡 (AFM) は、これまで有機薄膜の様々な電氣的刺激や応答の評価にも応用されてきた。本論文では AFM 応用を更に発展させ、特定の有機グレイン／電極界面の新規電気特性評価手法を開発し、評価した内容について記述している。

AFM の導電性探針を電氣的端子としてグレインに接触させることで、グレインを通る経路の電気特性を測定できるが、探針／グレイン間の接触抵抗が大きいと電極／グレイン間の接触抵抗評価には向かない。そこで、交流バイアスを用いることで非接触でも電極／グレイン間の接触抵抗評価可能な新規局所インピーダンス評価法を開発した。回路モデルより界面インピーダンスの等価回路パラメータを導出できることを数式的に示し、実験結果より金／ペンタセン単一グレイン界面のインピーダンスが抵抗 - 容量並列回路で表わされることを示した。

非接触での電極／グレイン間電気特性評価を進展させ、グレインの動的なチャネル形成過程を評価するための AFM 時間分解電位測定環境を構築した (図 1)。測定条件の最適化により、図 1 のように単一グレインへのキャリア注入・排出過程を 1 ms オーダの時間分解能、50 nm 以下の空間分解能で可視化することに成功した (図 2)。測定から、キャリア注入によりグレイン全体が徐々に電位増加しており、電極／グレイン界面の接触抵抗のみがその注入制限要因となっていることが分かった。さらに、電位変化の時定数のバイアス電圧依存性から非線形な界面電気特性の抽出を行うことができ、単一グレインとの界面においてもマクロな有機薄膜と同様な金属／有機界面物性が現れることを見出した。

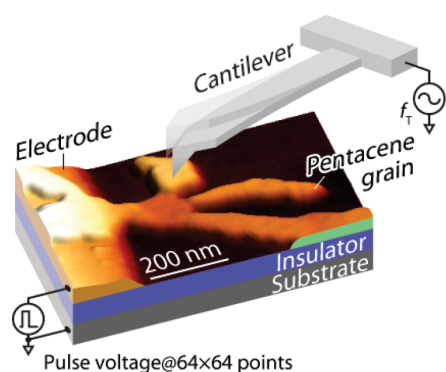


図 1 : 100 nm スケールの単一ペンタセングレイン上で AFM 時間分解電位測定を行うセットアップ。

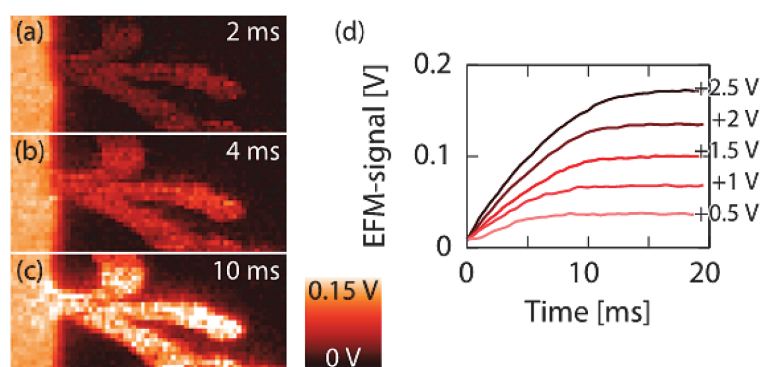


図 2 : (a)-(c) 電極に 2.5 V のパルス電圧を加えた際の時間分解電位応答像。(d) グレイン上で平均した時間分解電位応答。

山 岸 裕 史 (山田啓文教授)

「有機薄膜トランジスタの特性制御およびそのチャンネル上のナノスケール電荷分布評価に関する研究」

平成 28 年 3 月 23 日授与

有機エレクトロニクスは、有機半導体を中心とする機能性材料を能動的な電子デバイスへと応用することを主眼においた学術分野であり、これまでの無機半導体を中心としたエレクトロニクスとは異なる価値を創出する分野としてその発展が期待されている。有機材料が有する特長として、材料が軽量であること、フレキシブルなデバイスを実現可能であること、デバイス作製に溶液プロセスや低温プロセスが利用可能であること、合成可能であり多様性に富んでいること、などが挙げられ、これらの特長を最大限引き出した高性能有機半導体デバイスを実現するための研究開発が盛んである。有機薄膜トランジスタ (OTFT) は、上述の有機材料の特長を生かした電子回路を構築するために必須の基幹デバイスの一つであり、その実用化に向け広く研究開発が行われている。その一方で、OTFT の実用化および市場投入は未だ実現していない。

本論文は、OTFT の特性制御およびデバイスの局所物性評価法の開発を行い、デバイスの実用化に向けた課題解決を目標に研究した結果をまとめたものである。本論文によって得られた主な成果は次のとおりである。

(1) OTFT の有機半導体 / ゲート絶縁膜界面に分子ドーピングされたポリマーバッファ層を導入する手法を開発し、本手法によりデバイスのしきい値電圧のシフト量を連続的に制御可能であることを示した。

(2) OTFT に対してケルビンプローブ原子間力顕微鏡を用いてデバイス評価を実施し、デバイスの電気特性を制限し得る要因を明らかにした。

(3) OTFT のチャンネル内におけるキャリアダイナミクスの評価手法として、ケルビンプローブ原子間力顕微鏡及び静電気力顕微鏡に基づく、新たなキャリア挙動の時間分解観察法を開発した (図 1)。この開発した手法を用いて多結晶有機薄膜トランジスタの評価を行い、バイアスターンオフ時のチャンネル内からの拡散過程にあるキャリアが、結晶粒界を反映した不均一な空間分布を形成している様子を可視化することに成功した (図 2)。さらに、探針に働く外力をカンチレバーの共振周波数のシフトとして捉える周波数変調原子間力顕微鏡において瞬時周波数法を用いることで、外力の高速時間変化を測定することを可能とし、拡散過程のキャリアの空間分布の時間変化を $3 \mu\text{s}$ の時間分解能で可視化することにも成功した。

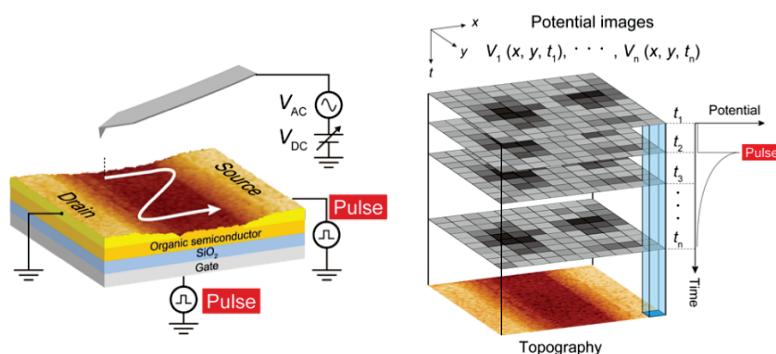


図 1 時間分解ケルビンプローブ原子間力顕微鏡による OTFT のチャンネル領域の表面電位像取得に基づく電荷分布時間発展計測の模式図。

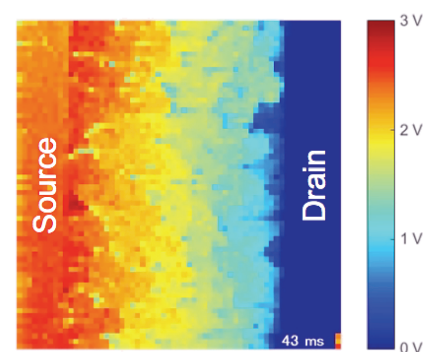


図 2 時間分解ケルビンプローブ原子間力顕微鏡によるチャンネル領域の表面電位像。

井上卓也 (野田進教授)

「電子・光子両状態制御に基づく高効率・高速熱輻射光源の開発」

平成 28 年 3 月 23 日授与

本研究は、半導体量子井戸による電子状態の制御とフォトニック結晶スラブによる光子状態の制御を併用することにより、熱輻射光源の高効率化および高速制御を実現したものである。従来の熱輻射光源は、プランクの輻射則に従う広帯域な発光スペクトルを示し、輻射強度が光源温度のみで決定されるために応答速度が極めて遅いという課題を抱えていた。それに対し本研究では、熱輻射強度が物質内の電子と光の相互作用に依存して決定されることに着目し、量子井戸のサブバンド間遷移を用いた電子状態の制御とフォトニック結晶スラブを用いた光子状態の制御を併用して、上記相互作用の帯域制御と高速制御を行うことで、所望の単一波長に熱輻射が集約された高効率光源や、熱輻射強度・波長の電圧変調が可能な高速応答型光源を、世界に先駆けて開発することに成功した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 目標の単一波長で狭線幅・高強度な熱輻射を実現するための光源構造の設計指針を、モード結合理論による解析により定量化した。また、GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子井戸と正方格子ロッド型フォトニック結晶スラブを組み合わせた具体的な光源を設計・作製し、ほぼ単峰で Q 値 100 を超える狭帯域熱輻射スペクトルを実証した。
2. 開発した高 Q 値熱輻射光源に電流注入加熱機構を導入し、不要な熱伝導損失・熱輻射損失の抑制手法を確立して、低消費電力で動作可能な熱輻射光源の開発を行った。開発光源の熱輻射特性の評価を行った結果、同電力投入時に、目標波数において黒体輻射光源の 12 倍以上の輻射強度が得られることを実証した (図 1)。
3. 量子井戸構造を pn 接合内部に導入し、印加電圧により量子井戸の電子密度を変調することで、熱輻射強度の高速変調を実現した。開発した光源では、狭帯域 (Q 値 72) かつ高放射率 (0.74) な熱輻射ピークの電圧変調動作が確認され、従来光源と比較して約 4 桁高速な、周波数 600 kHz での高速変調動作が実現した (図 2)。加えて、熱輻射スペクトルの発光線幅や発光波長が印加電圧により操作可能な、従来にない新機能を有する熱輻射光源の開発にも成功した。

以上の成果は、従来の熱輻射光源が抱えていた広帯域発光・低速応答という課題を同時に克服するものであり、赤外センシングシステムの小型化・低消費電力化や、熱光発電システムの高効率化などに大きく寄与することが期待される。

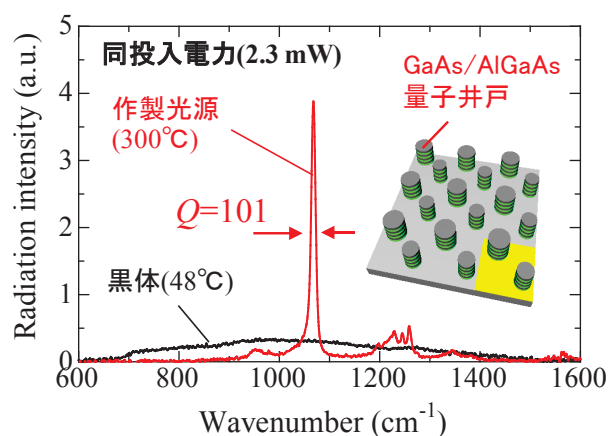


図 1 高効率・狭帯域熱輻射光源の実証

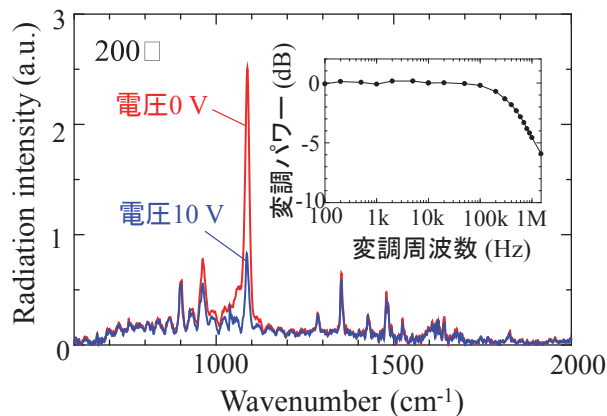


図 2 熱輻射光源の電圧高速変調動作の実現

川 本 洋 輔 (野田進教授)

「薄膜シリコン太陽電池の光吸収増大に向けたフォトニック結晶構造の設計に関する研究」

平成 28 年 3 月 23 日授与

本論文は、薄膜シリコン (Si) 太陽電池の高効率化に向けて、その光吸収増大を図るべく、フォトニック結晶の導入を検討し、構造設計手法の構築とともに、高い光吸収を有する薄膜 Si (特に薄膜微結晶 Si) 太陽電池の実現に向けた理論検討をまとめたものである。本論文において、得られた主な成果は次のとおりである。

1. フォトニック結晶のバンド端共振効果による薄膜微結晶 Si 太陽電池の光吸収増大を示すとともに、広帯域に亘る光吸収増大を実現すべく、バンド端モード数を増やしたフォトニック結晶構造についても検討し、バンド端数増大に伴う光吸収増大効果を示した。
2. 感度解析法を利用して正方格子フォトニック結晶の面内構造設計を行い、微結晶 Si (厚さ 400 ~ 600 nm の極薄) 太陽電池の光吸収に関し、波長 700~900 nm の範囲での光吸収率を図 1 のように増大させることに成功した。スペクトル計算を行った結果、フォトニック結晶がない場合と比較して最大で 2 倍以上に増大させることに成功し、その光吸収特性はランバシアン限界を上回ることを示した。
3. 感度解析法によるフォトニック結晶構造設計を 3 次元方向に拡張した場合についても検討を行った。厚さ 2 μm の微結晶 Si 太陽電池の光吸収を、フォトニック結晶がない場合と比較して 1.4 倍増大させることに成功した。さらに透明導電膜の光吸収を抑制した構造設計についても検討した。図 2 の上段に最適化されたフォトニック結晶の一周期分を示す。この構造において、同図下段に示す内部量子効率スペクトルが得られ、最大で 32.0 mA/cm^2 の短絡電流密度が得られた。本論文執筆時点で報告されている微結晶 Si 太陽電池の開放電圧および曲線因子を考慮すると、この構造において世界最大の光電変換効率が得られる可能性が示唆される。

以上により、本研究では薄膜 Si (特に微結晶 Si) 太陽電池の高効率化に向けたフォトニック結晶の具体的な設計指針、および適切な構造を示す上で大きな貢献を果たすことができた。この成果は今後、フォトニクスおよびエネルギー分野の発展に大きく寄与するものと期待される。

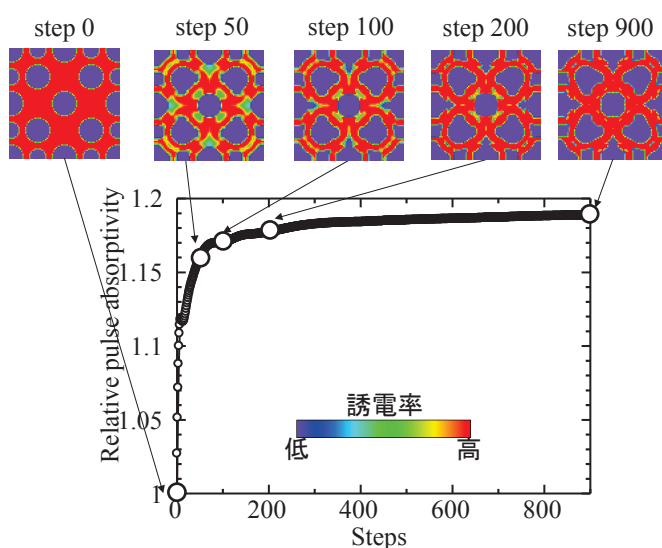


図 1 感度解析法により得られたフォトニック結晶および構造変化に伴う光吸収率変化

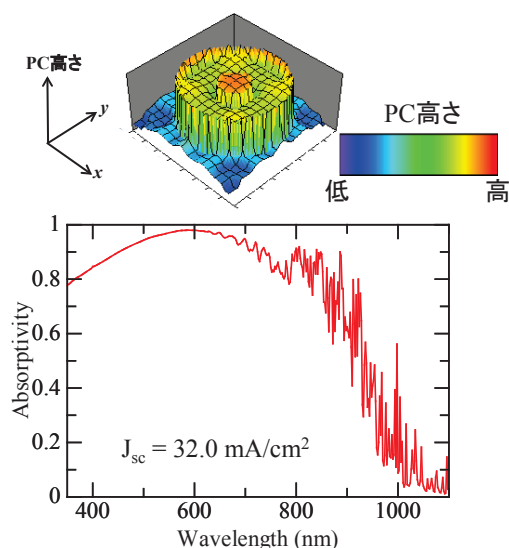


図 2 得られたフォトニック結晶および内部量子効率スペクトル・電流値

西本昌哉 (野田進教授)

「分子線エピタキシー法を用いたフォトニック結晶レーザ作製法の開発と空孔立体形状の検討」

平成 28 年 3 月 23 日授与

本論文は、大面積でのコヒーレントな発振が可能であり、出射ビームの形状や偏光を制御可能という特徴を併せもつフォトニック結晶レーザの空孔立体形状を制御し得る新規作製法を開発するとともに、空孔の立体形状に着目して新規機能の提案を行ったものである。

活性層の近傍に周期的な屈折率分布をもつフォトニック結晶を配置し、レーザ共振器として利用したフォトニック結晶レーザは、大面積発振による高出力動作のみならず、偏光およびビームパターンの制御や、ビーム出射方向の制御といった様々な機能の実現を可能とする、新しい半導体レーザとして注目を集めている。最近では、3次元結合波解析と呼ばれる、面垂直方向への結合特性も取り込んだ解析法の構築が進み、空孔の立体形状に非対称性を導入することにより、出射効率がさらに向上することが予想されている。しかしながら、空孔の立体形状を制御可能な作製手法は構築されていなかった。

本論文では、上記の課題に対して、分子線エピタキシー法 (MBE) を用いてフォトニック結晶構造を埋め込むことを提案・実証し、分子線の照射方向などを変化させることによって、空孔の立体形状を制御し得ることを示した (図 1)。さらに、本手法を実際にフォトニック結晶レーザの作製に適用し、レーザ発振の成功に至った (図 2)。また、作製したデバイスの特性評価を通じて空孔の立体形状が、出射効率や出射されるビームの形状・偏光など、レーザの諸特性に与える影響を明らかにした。並行して、空孔の立体形状に着目した新規の偏光制御手法を提唱し、これまでフォトニック結晶レーザで実現していなかった円偏光を出射可能な空孔立体形状を提案した (図 3、図 4)。

以上のように、本論文で構築された MBE 空孔埋め込み法は、フォトニック結晶レーザの作製において空孔の立体形状という新たな自由度を与える画期的な手法である。本論文で得られた知見は、今後のフォトニック結晶レーザのさらなる高出力化や、新規機能の創出に繋がり、半導体レーザ研究の推進に寄与すると期待される。

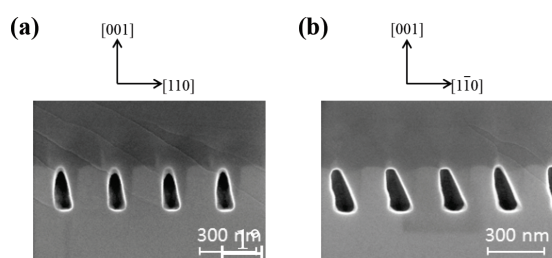


図 1 MBE 再成長後の断面 SEM 像

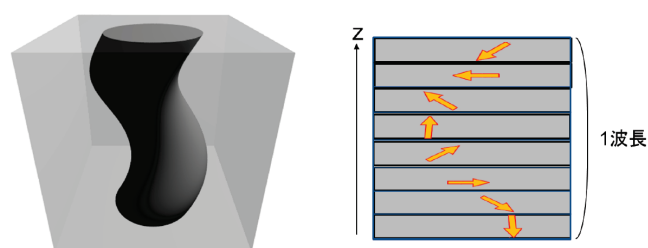
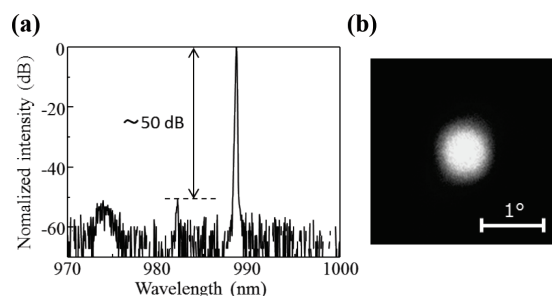
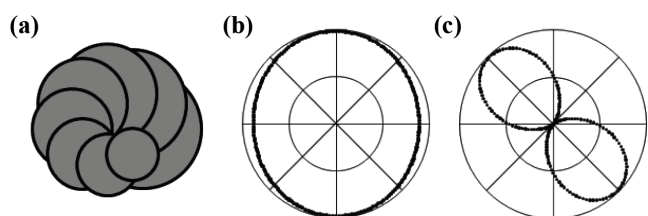


図 3 螺旋形状による円偏光出射の提案

図 2 作製した試料の測定結果
(a) 発振スペクトル、(b) 遠視野像図 4 提案した構造からの出射光の偏光特性の計算結果
(a) 空孔形状の模式図、(b) 偏光特性、
(c) 偏光特性 (1/4 波長板透過後)

田 昇 愚 (JEON SEUNGWOO) (野田進教授)
 「超高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器に関する研究」
 平成 28 年 3 月 23 日授与

本論文は、ワイドバンドギャップ半導体である「シリコンカーバイド (SiC)」を材料としたフォトニック結晶ナノ共振器の Q 値を大幅に向上させる方法を提案するとともに実証的検討を行い、世界最高の Q 値を実現した成果をまとめたものである。研究の初期段階は、SiC フォトニック結晶ナノ共振器の Q 値は 1 万以下にとどまっており、より様々な分野への応用のために Q 値の向上が強く望まれている状況だった。本論文では、まず、SiC フォトニックナノ結晶共振器に関する設計から製作及び測定に至るまで、全過程を再検討することにより、これまで Q 値が 1 万程度にとどまっていた原因を明らかにしている。それを踏まえ、Q 値を向上させる方法を提案し、従来の 30 倍の Q 値をもつ世界初の超高 Q 値 SiC ナノ共振器の実現に成功した結果をまとめている。また、超高 Q 値の SiC 共振器における非線形現象について考察し、今後の SiC 共振器の応用方向性について提言している。本論文において得られた主な成果は次のとおりである。

1. SiC フォトニック結晶ナノ共振器の Q 値が 1 万にとどまっている原因は、SiC フォトニック結晶を構成する材料である SiC 薄膜内部の結晶欠陥に起因した光吸収損失のためであることを明らかにした。また、これは SiC を薄膜化する工程で用いられるイオン打ち込みの結果生じていることを明らかにした。
2. イオン打ち込みを用いずにフォトニック結晶共振器を作製し、高 Q 値化を達成する方法を 2 種類提案・実証した。1 つめは、斜めエッチング技術を用いることで、純粋な SiC バルクの上にナノビーム構造フォトニック結晶共振器を作製する手法であり、本手法で作製された共振器では最大 4 万という、従来の 4 倍の値が得られた (図 1 (a))。2 つめは、研磨による SiC 薄膜化を利用した共振器作製手法であり、本手法で作製された SiC 共振器では最大 Q 値として 30 万という非常に高い値が得られた (図 1 (b))。これは従来を 30 倍以上回る値であり、SiC を用いたフォトニック結晶ナノ共振器でも 10 万以上の高い Q 値が得られることを世界で初めて実証した。
3. 超高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器の光学的特性、特に非線形光学特性について考察した。具体的には、まず超高 Q 値 SiC フォトニック結晶共振器においても、多光子吸収が効果的に抑制されることを確認した。つづいて二次高調波発生の実験的検討を行った結果、高 Q 値化による波長変換効率の大幅な向上を示唆する結果を得た (図 1 (c))。

以上の成果は、今後の SiC フォトニック結晶ナノ共振器の応用範囲の拡張に大いに貢献すると期待できる。

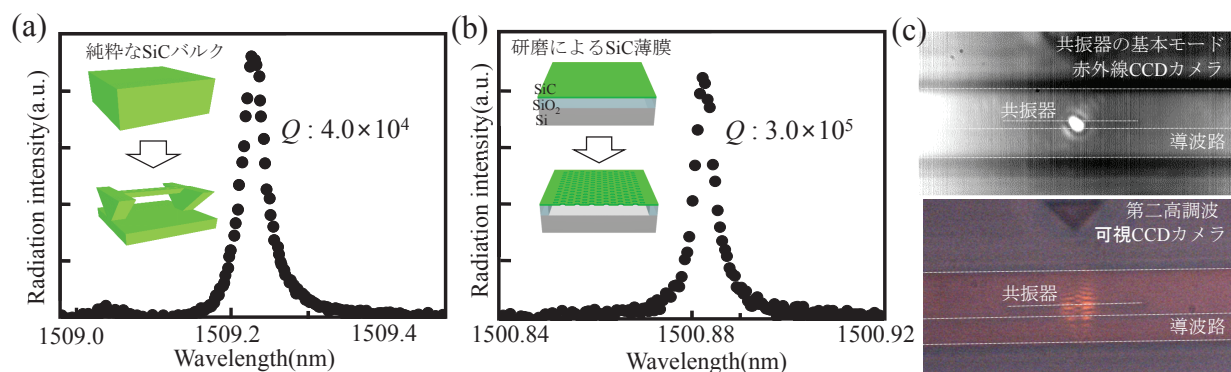


図 1 : (a) 純粋な SiC バルクの上にナノビーム構造フォトニック結晶共振器からの放射スペクトル (b) 研磨による SiC 薄膜化を利用した共振器からの放射スペクトル (c) 高 Q 値 SiC フォトニック結晶共振器からの近視野像

赤 岩 和 明 (藤田静雄教授)

「コランダム構造酸化ガリウム系半導体の電気特性制御とデバイス応用」

平成 28 年 3 月 23 日授与

半導体技術の発展において新規材料の開拓は新しい応用領域を創出する上で重要であり、また混晶という手法で材料物性の制御が行えることは、その材料の応用領域を広げるうえで重要な観点となる。このような観点から新規応用領域を開拓できる新規材料系として本研究ではコランダム構造酸化物混晶系に着目した。コランダム構造酸化物混晶系はバンドギャップ値が 5.3 eV で sapphire 基板上に成長可能なコランダム構造酸化ガリウム ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) を中心とした混晶系であり、同じ結晶構造をとる酸化アルミニウム ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) や酸化インジウム ($\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$) との混晶により 3.7 ~ 8.9 eV でのバンドギャップ制御が行え、また酸化鉄 ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) や酸化クロム ($\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$) といった遷移金属酸化物との混晶による、磁気特性の付与などの物性制御が行え、高耐压パワーデバイスやスピンドバイスへの応用が見込める系である。コランダム構造酸化物混晶系の問題は電気導電性に乏しい事であり、この問題は中心となる $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が絶縁体的な特性を示していることに起因する。そこで本研究ではコランダム構造酸化物混晶系のデバイス応用を目的に、中心材料である $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の電気特性制御に取り組んだ。

まず Sn をドーパントに選び $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の N 型導電性制御に取り組んだ。成長条件の最適化により $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 台でのキャリア密度制御に成功したが、 10^{18} cm^{-3} 以下の領域においては転位欠陥によるキャリア補償が問題となって実現せず、結晶性の向上が必要であることが分かった。また高濃度 Sn ドープを行った $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜では XRD 非対称面 ω -scan の半値幅が減少する結果が得られ、結晶性が高いことが分かった。

次に 10^{18} cm^{-3} 以下の領域でのキャリア密度制御を実現するため、結晶性の向上に取り組んだ。高濃度 Sn ドープを行った $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜が高い結晶性を示したことから、アニールによる Sn の転位欠陥へのゲッタリングによる高抵抗化処理を行った高濃度 Sn ドープ薄膜を下地層とすることで、高結晶性かつ高抵抗のバッファとすることを考案し (以降アニールバッファと呼称する)、このアニールバッファ層上の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の電気特性を評価した。図 1 に示すようにキャリア密度にして $10^{17} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ と 10^{18} cm^{-3} 以下の領域での制御を実現し、また $24 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という過去最高の移動度を得た。 10^{18} cm^{-3} 以下においてキャリア密度減少に伴い移動度が減少する傾向が得られ、これが転位散乱によるということを移動度の温度特性解析の結果などから示した。

スピンドバイス応用に向けた磁性酸化物の創生を目的にコランダム構造酸化インジウム鉄 ($\alpha\text{-(In,Fe)}_2\text{O}_3$) の作製と磁気特性評価を行った。作製した $\alpha\text{-(In,Fe)}_2\text{O}_3$ は室温以上で強磁性を示し、またその磁気起源が傾角強磁性によることを示した。また Sn ドープにより抵抗率が低減することを示し、導電性制御が可能な事を示した。

最後に $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の電気特性制御の成功に伴ってデバイス試作を行った。MISFET を試作し、図 2 に示すようにゲート電圧印可によるチャンネル層の伝導度変調動作を行うことができ、トランジスタ動作の実証を行った。特性の向上にはデバイスプロセスの最適化や更なる電気特性の向上が必要であり、今後の課題とした。

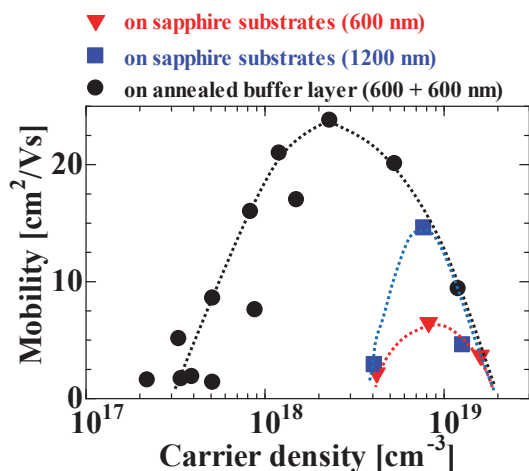


図 1: アニールバッファ層上の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の移動度とキャリア密度の相関

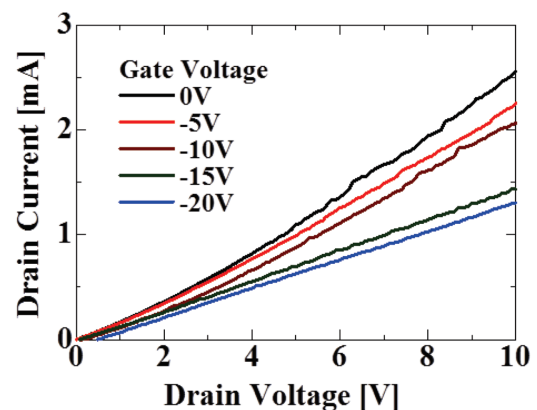


図 2: 作製した MISFET のソースドレイン間の I-V 特性

金 弓 冶 (河原大輔准教授)

「High-quality Knowledge Acquisition of Predicate-argument Structures for Syntactic and Semantic Analysis」

(構文・意味解析のための高品質な述語項構造知識の獲得)

平成 28 年 3 月 23 日授与

In computer science, people have been trying hard to march toward one of the very ultimate goals which expects computers can truly understand human's language. This task is named as text understanding. During the past decades, great efforts have been made to develop various kinds of techniques to achieve text understanding, which can further provide us with the space to discover more humanized ways for human-computer interaction. To complete this ultimate goal, it may involve multiple domains such as cognitive science, linguistics and even psychology. In Natural Language Processing (NLP), which is a field of computer science and artificial intelligence, for computers to understand text in human language, the priority is to discover and clarify the internal relations of the words within a sentence. In this thesis, it is considered to be crucial to acquire large-scale knowledge for improvement of varieties of NLP tasks. Thanks to data explosion, unprocessed data that potentially contain a large amount of useful information can be relatively easier to acquire, and thus it is promising to acquire knowledge from these raw texts using automatic approaches. Automatic knowledge acquisition is always dependent on the fundamental analysis such as syntactic parsing and semantic analysis. Without considering the automatic analyzing errors, the knowledge will be extremely noisy and may cause bad effects when we apply this kind of knowledge to NLP tasks. In this thesis, we solve the abovementioned problems by proposing a framework of acquiring high-quality knowledge from unlabeled raw text that contains less noise, and apply the knowledge to syntactic and semantic analysis.

In this thesis, we present a framework for knowledge construction from high-quality dependencies that are selected from automatic dependency parses. Figure 1 shows the overview of the proposed framework. For the raw text, we apply dependency parsing and acquire automatic dependency parses, which inevitably contain parsing errors. A high-quality dependency selection approach is proposed to filter these erroneous automatic parses and only select those with high reliability. From the high-quality dependency parses, we extract predicate-argument structures (PASs), which contain the abstract of a sentence. PASs can be used as additional knowledge for other NLP tasks. Afterwards, semantic clustering is applied to merge all the predicate-argument structures with similar meaning. The clustered PASs are called case frames, which are regarded as another type of knowledge. These are a type of semantic frames that distinguish between the different usages of each predicate. The PAS knowledge is then used to improve dependency parsing. We also use case frames to improve Semantic Role Labeling (SRL). We apply a similar selection approach to select high-quality semantic roles for deep case PAS extraction and deep case frame construction. Deep case frames are used for further SRL improvement. The experimental results show that the quality management of acquired knowledge is beneficial for various NLP tasks.

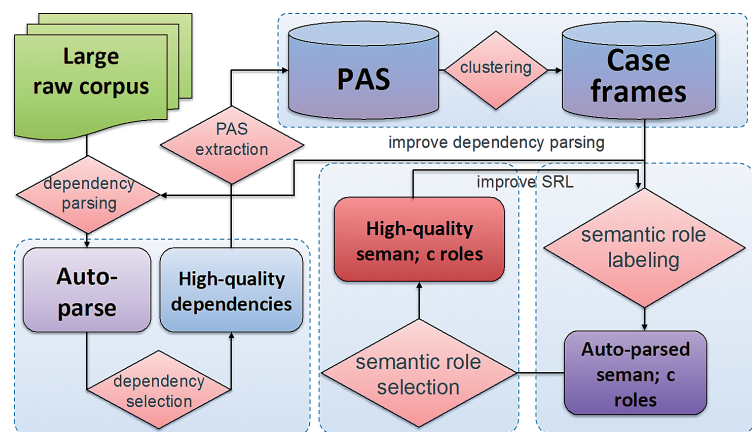


Figure 1: High-quality knowledge acquisition overview

Mo Shen (河原大輔准教授)

「Exploiting Vocabulary, Morphological, and Subtree Knowledge to Improve Chinese Syntactic Analysis」

(語彙的、形態的、および部分木知識を用いた中国語構文解析の精度向上)

平成 28 年 3 月 23 日授与

Syntactic analysis in Chinese, including word segmentation, part-of-speech (POS) tagging, and constituency and dependency parsing, has been actively studied since the publish of the first version of Penn Chinese Treebank. However, evaluations in major natural language processing (NLP) tasks suggest that the performance of state-of-the-art systems for Chinese is constantly lower than that for European languages. This is largely due to the ambiguous nature of the definition of “word”, as well as the lack of morphological inflection in Chinese, which have caused inconsistency and data sparseness problems in existing Chinese treebank annotation.

To address these difficulties, this thesis investigates the strength and weakness of previous studies and proposes new methods that improve the state-of-the-art systems. A consistent set of annotation guidelines for Chinese word segmentation, POS tagging, and dependency labelling is proposed (Figure 1.a); an algorithm that extracts substrings as reliable word boundary indicators which significantly enhance the accuracy of word segmenters is designed and implemented (Figure 1.b); a tagset for character-level POS tagging is proposed, based on which the entire Penn Chinese Treebank 5.0 is annotated (Figure 1.c); a model that performs character-level POS tagging jointly with word segmentation and word-level POS tagging is proposed (Figure 1.d); and a parse reranking model which takes advantage of global subtree features with less restriction in the structure and the size of the subtree context is proposed (Figure 1.e). All these components are integrated in a single Chinese syntactic analysis system, which is demonstrated to be effective through comprehensive parsing and machine translation experiments.

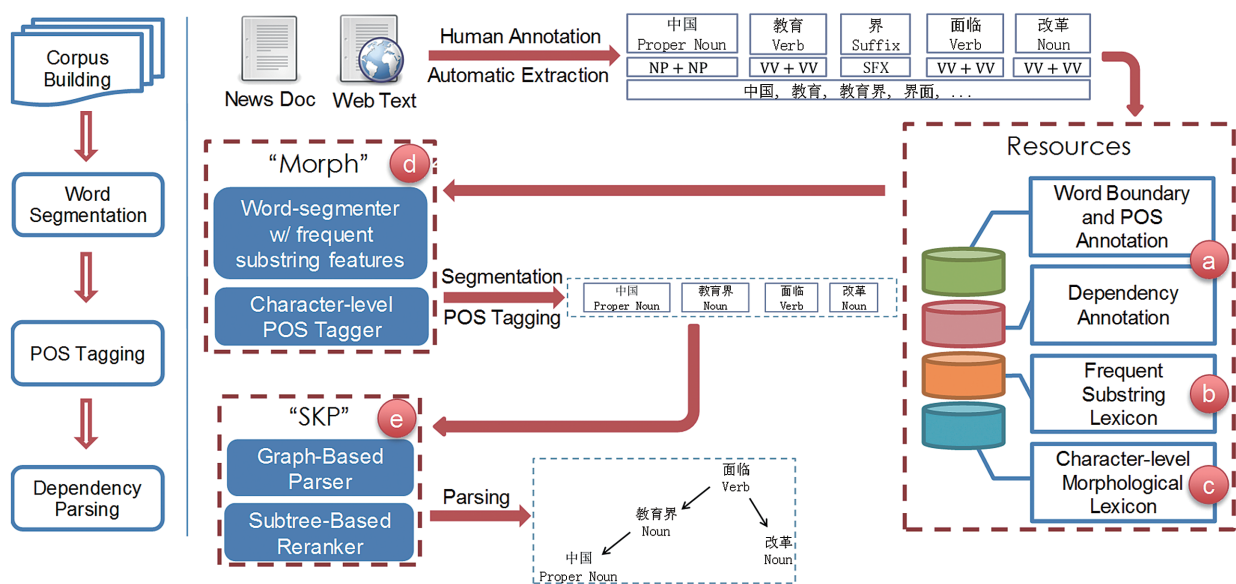


Figure 1. Illustration of the proposed system.

栗野 皓光 (佐藤高史教授)

「Variability in BTI-Induced Device Degradation: From Silicon Measurement to SRAM Yield Prediction」

(トランジスタのBTI劣化ばらつきに関する研究：特性評価からSRAM回路歩留り予測へ)

平成28年3月23日授与

コンピュータの性能は目を見張る速度で向上を続けているが、これはトランジスタの微細化によるところが大きい。一方、著しい微細化の進展により、集積回路の長期信頼性低下が懸念されている。先端プロセスでは、トランジスタのゲート長は数十nm程度に達しており、微細な構造が大電流が流れるために、特性劣化は免れない。従って、先端プロセスでは特性劣化を前提とした設計が求められている。本論文では、特性劣化の“ばらつき”に着目し、その統計的性質を明らかにするとともに、劣化ばらつきを考慮した歩留り解析手法を開発した。

まず、トランジスタの特性劣化を実シリコンで観測するために、劣化ばらつき測定に特化したTEG (Test Element Group)を開発した。バイアス温度不安定性 (BTI) に伴うしきい値電圧 (V_{TH}) 変化は緩やかに進行し、加速環境下で測定しても数時間から数日程度の測定時間を要する。そのため、数千個のトランジスタで劣化ばらつきを測定するためには、測定の並列化が必要不可欠であった。提案回路は、測定時間の大部分をストレス印加時間が占めることに着目し、複数のトランジスタに並行してストレスを印加し、逐次的に V_{TH} を測定する方式を考案した (図1)。提案回路の有効性を検証するために、65nm プロセスを用いてチップを試作し、測定の並列化が有効であること、そして劣化ばらつきがチャネル面積に反比例して増大することを実験的に明らかにした (図2)。

BTIは、絶縁膜内部の格子欠陥へのキャリアの捕獲・放出が関与していると考えられており、欠陥の活動を詳細に調べることが、BTI発生メカニズムの解明に繋がると期待されている。しかし、欠陥活動は直接見ることが出来ず、 V_{TH} の時間変化から間接的に推定する必要がある。一般に、単体トランジスタには複数の欠陥が含まれているため、各欠陥の寄与の総和が、 V_{TH} 変化として観測される。個々の欠陥活動を個別に調べるためには、 V_{TH} 変化から複数欠陥活動を分離する必要があるが、これは不良設定問題であり、何らかの拘束条件が必要となる。そこで、統計的機械学習を応用し、欠陥活動に対する事前知識と、観測された V_{TH} 変化をベイズ統合することで、個々の欠陥活動を分離する手法を開発した (図3)。

以上の取り組みでは、単体トランジスタのBTI劣化に注目していたが、BTI劣化が回路動作に与える影響は未知数であった。特にSRAMセルには非常に高い歩留りが要求されるため、BTIに伴う僅かな特性変化も無視できない。そこで、SRAMセルの歩留り変化を効率的に予測可能な計算手法を開発した。BTIに伴う特性変化は緩やかに進行することに着目し、空間を動き回る粒子によってSRAMセル特性の経時変化を逐次的に追跡することで、従来手法と比較して9.76倍の高速化を達成した。

集積回路は我々の生活に密接に関与しており、集積回路の動作不良は重大な社会損失に繋がる恐れがある。微細化に伴う信頼性低下が問題視されている中で、本論文は劣化の観測から回路特性を予測に至る一連の課題に取り組み、集積回路の高信頼化に向けて有効な知見を提供した。

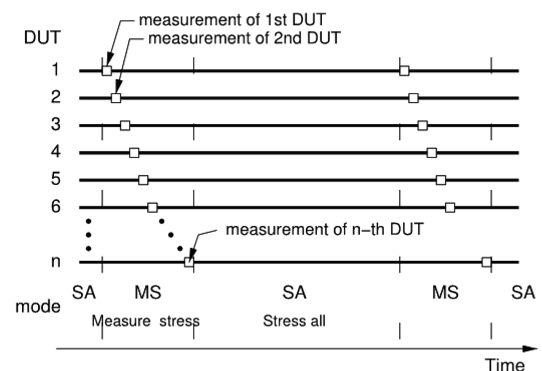


図1：提案する並列測定法

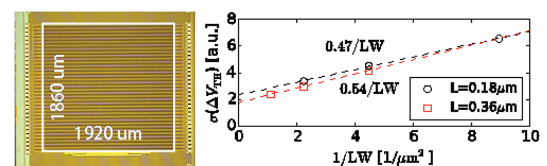


図2：試作チップ(左図)と劣化ばらつき(右図)

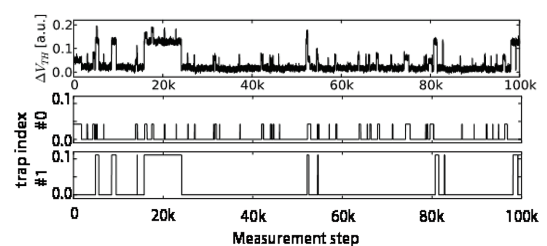


図3：測定した V_{th} 変化 (上段) と分離結果 (下段)

山田 英一 (佐藤亨教授)

「非線形応答特性を持つ光デバイスを有する光通信システムの伝送特性に関する研究」
平成 28 年 3 月 23 日授与

光ファイバを伝送媒体として用いる光ファイバ通信技術は、今日の情報化社会における社会基盤として広く利用され、様々な技術により光通信の長距離化および大容量化が実現されてきた。しかし、光ファイバ伝送システムにおける各種非線形応答特性が長距離大容量伝送を制限するという課題がある。

本論文は、光伝送システムにおける非線形応答特性として、1. 伝送路を構成するデバイスの非線形性、2. 伝送路である光ファイバ自体の非線形性、3. 光送受信器の非線形性について、それぞれの非線形応答特性が伝送特性に与える影響に関する研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 伝送路内の光デバイスの非線形応答として、長距離光中継伝送システムに用いられるエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) の利得飽和特性が伝送特性に与える影響について検討を行い、伝送路への入力信号強度の変動があっても、利得飽和により多中継伝送後に EDFA から出力される光信号強度が一定値に安定化されることを数値解析により明らかにした。また、一定になる光信号強度は EDFA の励起光強度を調整することにより任意に設定できることを示した。さらに、光ソリトン伝送において、光信号強度とパルス幅がともに一定値に安定化されることを伝送実験により実証した。

(2) 光ファイバの非線形性光学効果の1つである自己位相変調効果を利用した非線形ループミラーを光伝送システムに用いることによって、信号光強度に対するしきい特性により、長距離伝送された光信号から光雑音が低減できることを提案し、伝送実験により実証した。また、その後の伝搬に影響する非線形ループミラー通過後のパルスの周波数チャープ特性の解析を行い、非線形ループミラーへの入射パワーを低くし、非線形な位相変化が 0.3π 以下のとき、影響が小さいことを明らかにした。

(3) 光送信器に用いられる InP Mach-Zehnder (MZ) 光変調器における非線形な Electro-optic (EO) 効果が伝送特性に与える影響について検討を行い、EO 非線形性のある InP MZ 変調器は、同一バイアス電圧プッシュプル駆動を行うことにより、強度変調方式、差動 4 値位相変調 (DQPSK) 方式のいずれにおいても、EO 非線形が無い MZ 変調器と同等の変調特性を持つことを明らかにした。さらに、DQPSK 方式における 1 波長 (図 1) および波長多重 (WDM) 長距離伝送 (図 2) において、符号誤り率を表す Q 値が EO 非線形の有無で差が無いことを明らかにし、InP MZ 変調器が長距離 WDM 伝送用の光変調器として有効であることを示した。

以上のように、数値シミュレーションあるいは実験により、光伝送システムに用いられる各種光デバイスの非線形応答特性が伝送特性に与える影響を明らかにすることによって、長距離大容量光伝送システム実現のための有用な知見を得た。

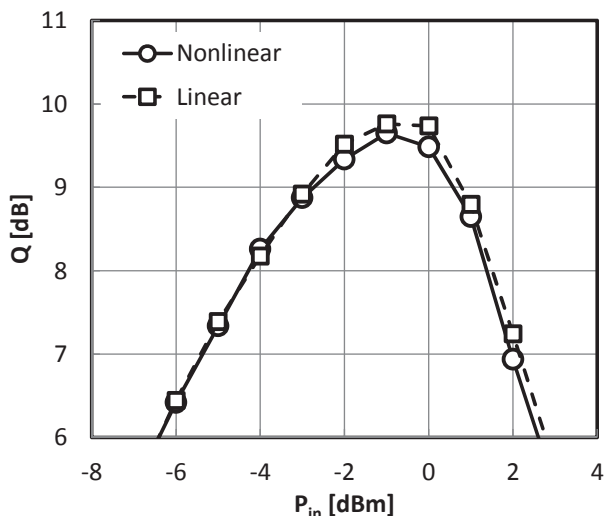


図 1 3200km 伝送後における Q 値のファイバ入力パワー P_{in} 依存性 (43 Gbit/s DQPSK、1 ch)

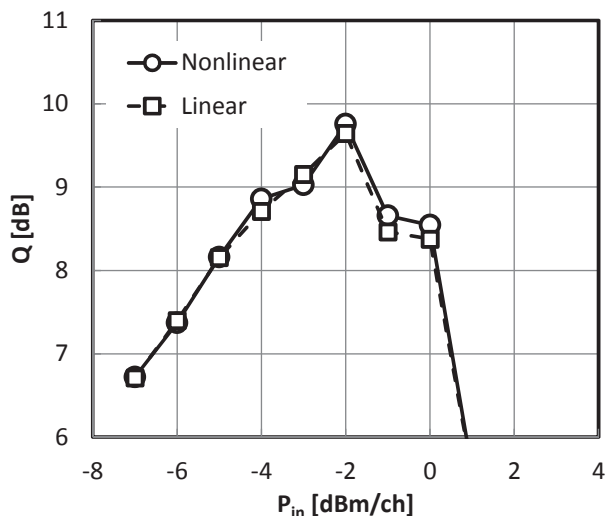


図 2 2400km 伝送後における Q 値のファイバ入力パワー P_{in} 依存性 (43 Gbit/s DQPSK、7 ch WDM)

羽 田 和 慶 (長崎百伸教授)

「Model Analysis on Plasma Start-Up for Toroidal Fusion Devices」

(トロイダル核融合装置におけるプラズマ着火の研究)

平成 28 年 3 月 23 日授与

プラズマ着火・立ち上げは、これに続く核融合プラズマ燃焼の出発点となるため、核融合発電の実現には非常に重要なテーマである。プラズマ着火の物理過程については完全に理解されているわけではなく、信頼性ある着火のために、今後、研究がますます必要となる。本研究では、トカマク装置及びヘリカル装置において、現在、注目されているプラズマ加熱手法による着火の条件や物理過程を調べるため数値モデルを構築し解析を行った。

トカマク装置においては、現在、定常運転のために超伝導コイルを用いた装置が主流になってきている。超伝導コイルは、容器内に印加できる一周電圧を大きくとることが困難でプラズマ着火を起こすことのできる圧力の範囲が非常に狭い。そのため、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) による予備電離が非常に期待されている。現在、建設中の超伝導トカマク装置 JT-60SA において、どの程度の ECRH パワーによりプラズマ着火がおこなえるのか検証することが重要である。研究の第一歩として、空間的に一様なプラズマを仮定した従来の 0 次元モデルによる解析を行った。0 次元モデルによる数値解析では、第 2 次高調波 ECRH の吸収効率については取り扱いができなかったものの、基本波 ECRH については 100% 吸収を仮定した解析により知見を得ることができた。第 2 次高調波 ECRH はプラズマ着火の直後は吸収効率が非常に低く、共鳴層に局在化した吸収分布を持っているため、径方向の分布を考慮に入れた 1 次元モデルを構築した。1 次元モデルは、電子及び水素原子などの中性粒子の粒子輸送方程式、電子および水素イオンの熱輸送方程式、電流拡散方程式から成る。本モデルの構築により、第 2 次高調波 ECRH の吸収効率をモデルに組み込むことに成功するとともにプラズマの径方向分布の時間発展を追うことが可能となった。本モデルにより、JT-60SA において考えられているガス圧において、ECRH パワーが 1 MW 程度あればプラズマ着火ができることを示した。これは、本装置において準備される ECRH システムのパワー内に納まっており、プラズマ実験に向けて非常に良い見通しが得られた。

ヘリカル装置においては、ECRH に依らない中性粒子入射 (NBI) によるプラズマ着火が、2.45 GHz マイクロ波によるシードプラズマの生成により中型装置においても可能となってきた。これは、容器内の磁場に依らないという特徴を持っており、高ベータ実験およびベータスケリング実験において注目を集めている。京都大学のヘリオトロン J においては、2.45 GHz マイクロ波による非共鳴な加熱により、あらかじめ、シードプラズマを生成し外側より入射した高速の中性粒子と荷電交換し高速イオンが作られる。高速イオンとのクーロン衝突により電子を加熱し、追加のガスパフを電離させプラズマ密度の立ち上げを行う。このプラズマ着火については、定性的な理解はあるものの、物理モデルの構築については、あまり進んでおらず、より定量的な評価の行える物理モデルの構築が必要である。本モデルは 0 次元モデルをベースとし、解析対象の粒子種を原子から分子に拡張した。本モデル方程式は、高速水素イオンのバランス方程式、イオン (水素イオン、水素分子イオン、重水素イオン、重水素分子イオン)、中性粒子 (水素原子、水素分子、重水素原子、重水素分子) のバランス方程式、電子およびイオン (水素イオン、重水素イオン) のエネルギーバランス方程式から構成される。0 次元モデルではあるものの、水素・重水素分子のプラズマ外からプラズマ内への侵入長を含めるなどプラズマの空間的な分布の効果を含めた。本モデルを用いて、ヘリオトロン J における NBI プラズマの電子密度立ち上げが成功する場合と失敗する場合の物理過程についての知見が得られた。具体的には、電子密度立ち上げが成功する場合は、①高速水素イオンの生成が大きく、これにより、②電子の加熱が十分に起こり、③高速水素イオンにより加熱された電子がガス分子を解離させる。③により、バルクイオン密度が大きくなり、さらに①高速水素イオンの生成に寄与する。①、②および③が正のフィードバックを形成し、電子密度立ち上げが成功する。この正のフィードバックを阻害する物理過程を起こすことにより、電子密度立ち上げが失敗する。また、本モデルを適用することで、シードプラズマ密度、ガスパフのタイミング、NBI パワーに対する依存性について実験の傾向を再現し、物理過程についても説明が行えた。

劔 持 尚 輝 (水内亨教授)

「Study of magnetic field configuration effects on internal transport barrier formation in Heliotron J」

(ヘリオトロン J における内部輸送障壁の形成機構に与える磁場構造の影響)

平成 28 年 3 月 23 日授与

高い温度とエネルギー閉じ込めの改善を伴う高性能プラズマの実現に輸送障壁の形成は必須となっている。近年、トラス磁場閉じ込めプラズマにおいて三次元磁場構造形成の重要性が認知されており、今後この三次元構造が閉じ込め改善度やその遷移機構へ如何に影響を与えるか理解していくことは、将来の先進的核融合炉開発に不可欠である。ヘリオトロン J 装置は、5 種類のコイル電流を制御することで多様な三次元磁場構造を形成できる。輸送障壁の形成条件に対し、有理面の存在との関係が議論されているが、ヘリオトロン J では磁場配位を変えることで有理面のモードや位置制御も可能である。本装置での研究により、輸送障壁形成における磁場の三次元効果を解明することが期待され、トカマク / ヘリカル問わずトラス型磁場閉じ込め装置共通の閉じ込め改善現象発現のメカニズム解明に大きく貢献できる。本研究では、電子内部輸送障壁 (eITB) の形成機構に与える磁場構造の影響を実験的に明らかにすることを目的とした。

ヘリオトロン J において実効ヘリカルリップルの大きさが異なる配位に対して、eITB が形成される密度閾値に違いがあることを観測した。この結果は新古典理論から予測される傾向と異なり、その要因として磁気島の形成の有無が eITB の形成条件に影響していることが考えられる。そこで、磁気島の存在に着目し、eITB の構造に与える影響を確認した。プラズマが存在しない状態 (真空磁気面) において有理面が存在しない配位のヘリオトロン J プラズマに対し、加熱パワー・密度を eITB 形成に十分な条件にすることで eITB を形成した (図 1)。eITB 形成を保持した状態で、トロイダル電流を ~ 0 A から徐々に上昇させることで回転変換を変化させた。トロイダル電流値がある閾値 (~ 0.7 kA) を超えると eITB フット位置が数百 μ s の間に $r/a \sim 0.1$ から $r/a \sim 0.2$ までプラズマ外側方向に向かって移動した。その後、トロイダル電流量の増加に伴い eITB フット位置が更に外側へ移動した (図 2)。回転変換値の初期値を変えて同様の実験を行うと、磁気島が形成される可能性が高い $n/m=4/7$ に近いほど、eITB フットの位置が移動を始めるトロイダル電流値が下がることが明らかになった (図 2)。実験パラメータ領域には他にも磁気島を形成することができる低次の有理面が存在するが、そのような有理面には eITB が影響を受けないことも確かめられている。実験的に得られたトロイダル電流値と eITB フット位置の変化を考察するため、新古典理論計算からブートストラップ電流分布を求め、それを元に MHD 平衡コード (VMEC) を用いて回転変換分布を見積もったところ、トロイダル電流値がある値を超えるとプラズマ中心領域 ($r/a \sim 0.3$) が $4/7$ を越え、有理面が形成されることが示された。更に、その後電流値の増加に伴い有理面位置がプラズマ外側に移動することも示され、実験と定性的に矛盾しない結果となった。以上の結果はトロイダル電流制御を介した時間応答性の高い eITB の形成及び位置制御の可能性を示している。eITB フット位置は閉じ込め性能に対して $(r/a)^2$ の改善効果があり、閉じ込め改善領域を広げることで高性能プラズマの生成手法に新たな知見を与えるものである。

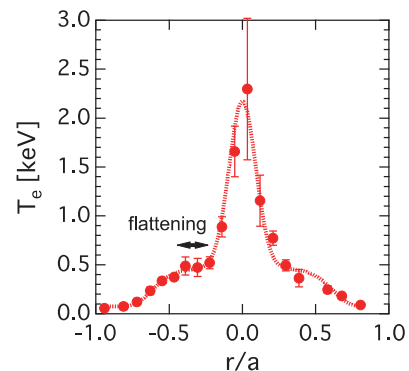


図 1 ヘリオトロン J の典型的な eITB プラズマの電子温度分布

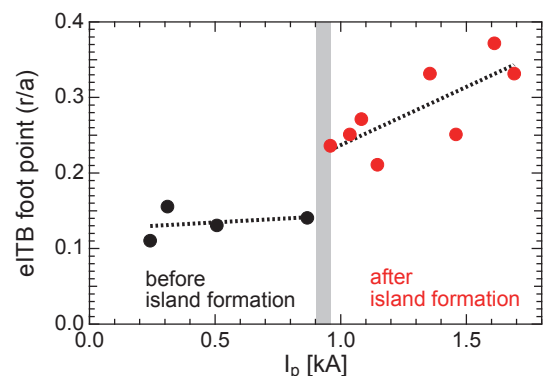


図 2 トロイダル電流の増加に伴う eITB フット位置の移動

石川 峻 樹 (篠原真毅教授)

「Study on Beam Forming for Phased Array Antenna of Panel-structured Solar Power Satellite」

(パネル構造型宇宙太陽発電所におけるフェーズドアレーアンテナのためのビーム形成技術の研究)

平成 28 年 3 月 23 日授与

本論文は、パネル構造を持った宇宙太陽発電所 (SPS、図 1) における送電ビーム制御を対象とした検討を行い、送電パネルのビーム制御の能力の評価や SPS のアンテナのゆがみを補正するビーム制御手法の精度評価および実際の SPS への適用に関する提案を行ったものであり、成果は以下のとおりである。

1. 生存圏研究所に導入された高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いた実験を行い、シミュレーションの結果と比較することにより、ビーム制御における制御精度やシミュレーション精度の評価を行った。このとき、単純なビーム方向制御だけではなく、平坦ビームという高度な位相制御が必要となるビームについても検討を行い、実際にビーム形成を行なえることを確認した。
2. 測定で誤差が生じる場合の制御精度について、解析的方法およびシミュレーションによる検討を行うことで制御において発生する誤差の大きさを示し、制御精度が最もよくなる測定点の配置を示した。
3. PAC 法の制御における制御において問題となる、パネル角度推定の不確かさ (アンビギュイティ) によって発生する誤りについて、対策の提案とその効果の検証を行った (図 2)。測定点を増やす手法およびパネル平面度維持技術を利用した手法について述べ、シミュレーションによりアンビギュイティの除去に有効であることを示した。
4. PAC 法を実際の宇宙太陽発電において運用するために必要となる、信号受信アンテナを設計することで配置法を提案し、また電磁界シミュレーションにより、受信アンテナと周囲のアンテナの干渉による影響の検討もを行い、問題なく運用が行えることを示した。
5. 宇宙太陽発電の送電パネルのビームについても、シミュレーションによる検討を行い、ビーム方向制御時の強度の変化を示した。

以上を要するに本論文は、フェーズドアレーによる高精度なビーム制御の実証や制御手法の精度の評価および実際のシステムにおける運用法の提案など、パネル構造型 SPS の実現において重要となるいくつかの要素を達成している。

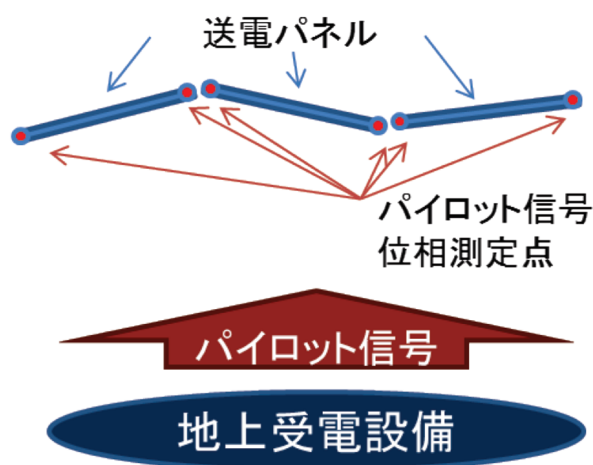


図 1 パネル構造型 SPS の送電ビーム制御

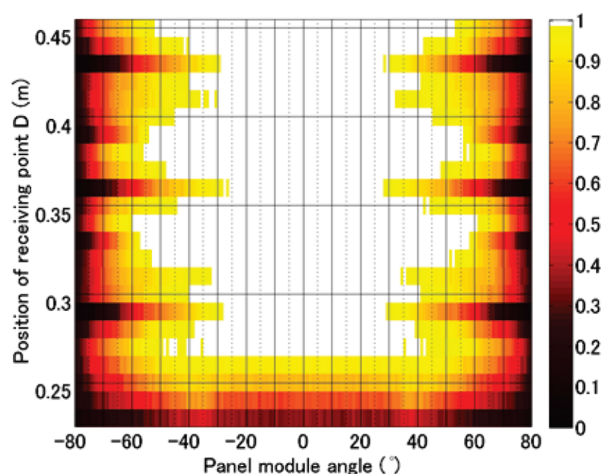


図 2 パイロット信号測定点がパネルに 4 点の場合のアンビギュイティ除去の成功率の一例

水野 公平 (篠原真毅教授)
 「磁界共鳴送電の安全性に関する細胞影響評価研究」
 平成 28 年 3 月 23 日授与

本論文は、身近な生活環境における共鳴送電の実用に向けて、その安全性を実験的に検証することを目的として、細胞影響評価のための磁界共鳴送電ばく露装置を開発し、それを用いて実際にヒトの細胞に対する影響を評価した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 磁界共鳴送電の細胞影響評価を実施するための、磁界共鳴送電ばく露装置を開発した。装置製作に先立ち、共鳴送電特性をシミュレーションにより検証し、金属箱による限られた閉空間内外での送電特性の変化を検証するとともに、更に電磁環境のレベル・均一性を考慮して最適な寸法を選択している。
2. シミュレーションによる検証結果に基づき装置製作（図1）に取り組み、共鳴送電特性等を確認した。送電効率は、共振周波数 12.5MHz において 85.4%、細胞培養位置における磁界強度は 170A/m（国際非電離放射線防護委員会の定めるガイドライン 80A/m の約 2 倍）である。
3. 製作した磁界共鳴送電ばく露装置の中で、共鳴送電を行っていない状況下で実際に細胞を培養し、細胞増殖能力や周期分布といった基本動態を指標に検証を行い、製作した装置が適切な細胞培養安定性を保持していることを確認した。
4. 開発した共鳴送電ばく露装置を用いて、実際に磁界共鳴送電の細胞影響評価に取り組んだ。細胞影響評価の指標には、細胞基本動態（細胞増殖能、細胞周期分布（図2））、がんに至る可能性を有する遺伝毒性（染色体異常、DNA 損傷、遺伝子突然変異）さらに非遺伝毒性である細胞応答の観点からストレスたんぱく質発現というように広い範囲を指標とし、指標ごとに、他の安定した細胞培養環境で培養された細胞サンプルで得られた結果と比較して、いずれの指標、条件においても有意な差異は見られないことを確認した。

以上、本論文は、磁界共鳴送電の安全性を実験的に検証するため、必要となる共鳴送電装置の開発に成功するとともに、それを用いて細胞影響評価に取り組み、細胞への共鳴送電の影響が生じないことを見出したものである。

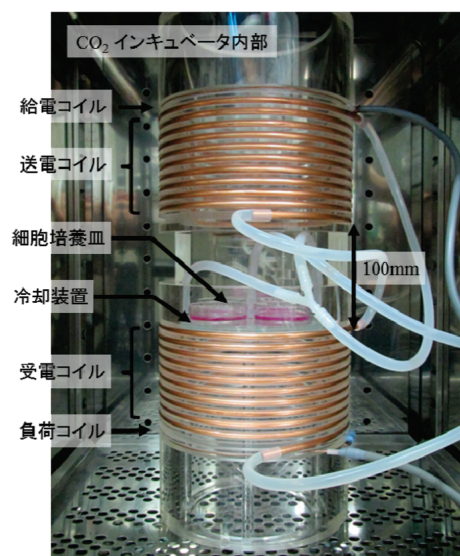


図1 試作共鳴送電ばく露装置の外観

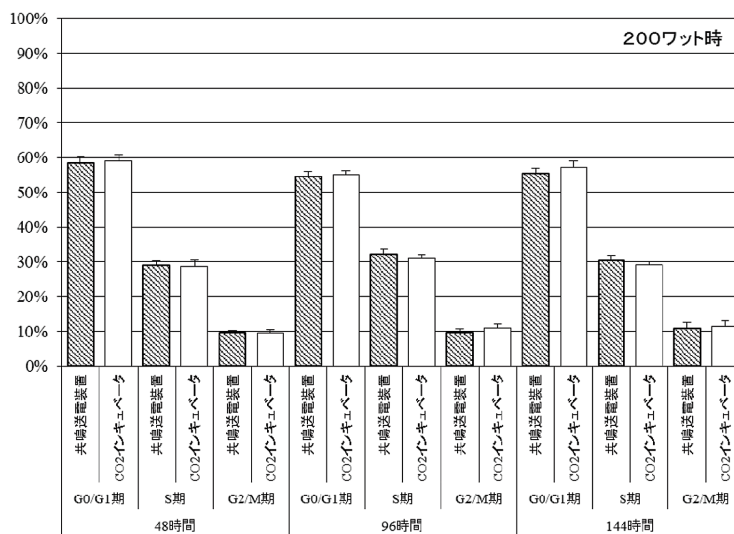


図2 共鳴送電ばく露による細胞周期への影響評価結果

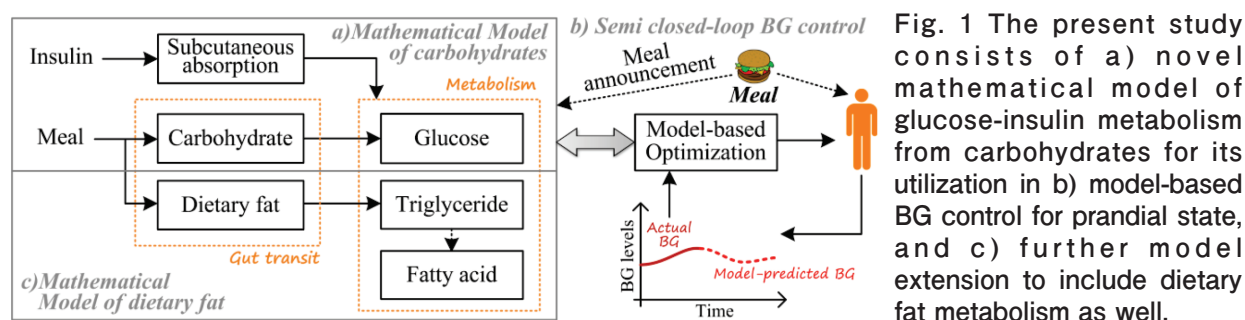
Claudia Cecilia Yamamoto Noguchi (土居伸二教授)

「Mathematical Model of Glucose-Insulin Metabolism Considering Meal Absorption Rate and Model-based Blood Glucose Control for Prandial State in Type 1 Diabetes」

(1型糖尿病における食事の吸収速度を考慮に入れたグルコース・インスリン代謝の数理モデル及び食事時の血糖値のモデルベース制御)

平成 28 年 9 月 23 日授与

Diabetes mellitus is characterized by high blood glucose (BG) levels above the normal range of 80—130 mg/dL seen in healthy subjects. Depending on its etiology, diabetes is classified in different types with type 1 diabetes mellitus (T1DM) being caused by the absence of insulin secretion, thus requiring self-administration before every single meal with the necessary dose being directly proportional to the amount of carbohydrates. Recently, model-based control algorithms, also known as *artificial pancreas*, are expected to bring a 'cure' by automatic maintenance of BG levels within the recommended range of 70—180 mg/dL the first 2 hours post-meal. Previous success obtained during non-feeding overnight state aside, post-meal BG control imposes the greatest challenge due to the rapid absorption of carbohydrates compared to that of insulin, which results in a very large BG spike of >200 mg/dL within one hour post-meals, yet also followed by sporadic low BG episodes <70 mg/dL afterwards. We hypothesize that the BG control performance depends largely on the accuracy of the mathematical model of glucose-insulin metabolism and the impact of a meal on BG levels to provide a summary of the present study (Fig. 1) in the following:



- Mathematical model of postprandial glucose-insulin metabolism in T1DM: We propose a novel mathematical model of gut transit of carbohydrates to obtain a more accurate mathematical representation of the impact of a meal on BG levels by including several parameters of food-specific carbohydrate absorption including the glycemic index (GI) of foods, which provides a quantitative assessment of food-specific absorption rate as a single number. The model proposed is able to reproduce post-meal BG excursion in T1DM accurately given the carbohydrate amount of the specific food type to be consumed—hence the very first model with such detail—and the insulin bolus dose at any specific time.
- Semi closed-loop BG control algorithm in T1DM for prandial state: We propose a novel control strategy that comprises a pre-meal bolus (either continuous or as single-bolus) 1 hour in advance, followed by model predictive control for post-meal automatic BG control. The model in a) is utilized for BG predictions as part of the insulin optimization computed for insulin requirements throughout the prandial state. Simulation results in MATLAB demonstrate that BG levels can be maintained effectively within the acceptable clinical recommendations 100% of the time, even under a number of variability scenarios.
- Mixed meal model in T1DM: We propose a novel mixed meal model that includes the effect of dietary fat on glucose-insulin metabolism by considering a comprehensive physiological representation of glucose and fatty acid metabolism—which is beyond the current understanding—. The proposal is an extension of the mathematical model in a) to include gut transit of dietary fat, as well as post-meal triglycerides (TG) and non-esterified fatty acids (NEFA) dynamics. The ability to reproduce clinical data in T1DM accurately despite its minimal compartmental approach demonstrates its potential for utilization in BG control.

The present study thus demonstrates that diurnal BG control, albeit with only minimal restrictions for patient safety, is feasible within 70—180 mg/dL provided an accurate mathematical representation of the impact of a meal on BG levels. Based on these results, further clinical implementation is expected to contribute to the development and commercial release of the long-sought artificial pancreas in the forthcoming future.

金子 光 顕 (木本恒暢教授)

「Strain-Controlled AlN Growth on SiC Substrates」

(SiC 基板上への歪み制御 AlN 層の成長)

平成 28 年 9 月 23 日授与

窒化ガリウム (GaN , $E_g=3.4 \text{ eV}$) 系半導体は、高効率固体照明である白色 (青色、緑色) 発光ダイオード (LED)、移動体通信基地局で用いられる高出力高電子移動度トランジスタ (HEMT) の材料であり、現代社会を支えている。次なる社会の要請として、殺菌・浄水や医療・化学分析機器等様々な応用が期待されている深紫外 LED や、高耐圧かつ高温動作可能な HEMT が求められている。これを実現するにあたり、窒化アルミニウム (AlN , 6.0 eV) および AlN に数%~40%の GaN を固溶させた高 Al 組成 AlGaIn 混晶を用いた AlN 系デバイスに注目が集まっている。しかしながら、様々な研究機関が高 Al 組成 AlGaIn を用いたデバイスの報告をしているものの、その材料物性から期待される性能は得られていない。要因の一つとして、成長した高 Al 組成 AlGaIn 層中に多数の結晶欠陥が存在することが挙げられ、結晶の高品質化が重要である。

高 Al 組成 AlGaIn の成長にあたり、格子整合する基板が存在しないため、ヘテロエピタキシャル成長する必要がある。使用できる基板のうち、本研究では SiC 基板に着目する。 SiC 基板は AlN との格子不整合が約 0.9% と小さく、大口径の高品質ウェハ (6 inch) を比較的安価で入手することが可能である。これまでの研究において、成長初期を工夫することで、6H- SiC (0001) 基板上に低貫通転位密度の AlN 層が 700 nm 厚まで基板と格子整合して成長 (コヒーレント成長) できることが示されている。しかしながら、この AlN 層成長の再現性が悪く、さらなる成長条件の検討が必要である。また、 SiC にコヒーレント成長した AlN 層上に高 Al 組成 AlGaIn 層を成長すると、バルク AlN 上の成長と比べて格子不整合が大きくなり、厚膜成長が困難となる。高品質高 Al 組成 AlGaIn 層の成長には、より AlGaIn 層の格子定数に近い格子定数に制御された AlN 層 (歪み制御 AlN 層) 上に成長するのが理想的である。

本論文は、高品質高 Al 組成 AlGaIn 成長実現に向け、 AlN 単層成長の基礎検討、物性評価および歪み制御 AlN 層成長に関する研究についてまとめたものである。主要な内容を以下に示す。

1. 窒素プラズマ源に由来する成長初期 Al/N 比の変化を発光分光により定量評価し、過度に Al-rich 条件となることを防ぐ成長シーケンスを考案し、高品質 AlN 成長を実現した。
2. 高分解能 X 線回折測定により AlN の歪み量を精密測定し、歪みによるバンド間遷移エネルギーおよび格子振動数の変化を変形ポテンシャルによる計算結果と比較することで、変形ポテンシャルの推奨値を提示した。同時に、より正確な弾性スティフネス定数を得る必要性も示した。
3. 1 分子層単位で層厚が制御された極薄 GaN 中間層の成長を実証し、緩和度が異なる GaN 層上に AlN を成長することで広範囲 ($-0.53 \sim +0.07\%$) の歪み制御を達成した (図 1)。
4. AlN/SiC 界面に局在する格子不整合転位に起因した横方向サテライトピークの観測に窒化物半導体系で初めて成功した (図 2)。さらに、ステップ端密度を増加した SiC 基板上へ AlN の成長を行うことで、より歪みを緩和した AlN 層の成長を実現した (図 3)。

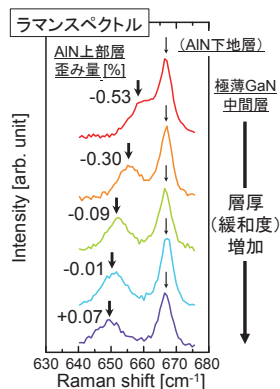


図 1: 歪み制御 AlN 層のラマンスペクトル

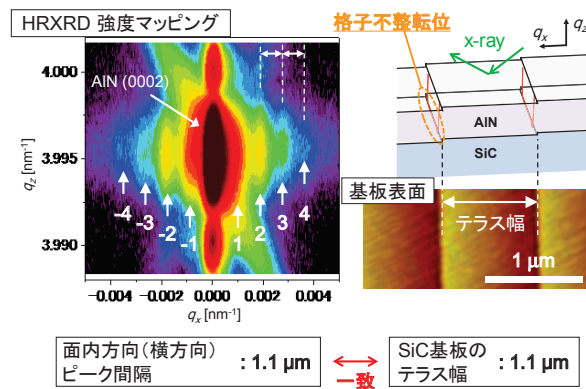


図 2: 周期的に配列した格子不整合転位による横方向サテライトピークの観測

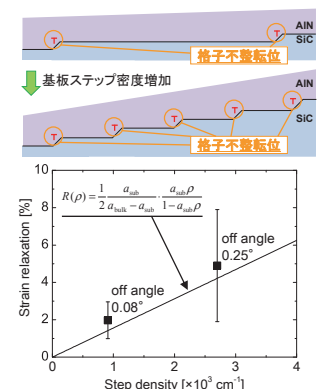


図 3: 基板ステップ密度制御による AlN 層の歪み制御

権 平 皓 (野田進教授)

「3次元フォトニック結晶光配線技術構築に向けた光伝搬制御の理論検討」

平成 28 年 9 月 23 日授与

本論文は、3次元フォトニック結晶における光伝搬制御に関して体系的な理論検討を行い、3次元光配線技術構築の基礎となる結果をまとめたものである。

3次元フォトニック結晶は、3次元的な周期的屈折率分布をもつ構造体で、微小な光回路や光電子集積回路における立体光配線などの自在な光制御を実現するための基礎技術として期待されている。近年、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶(図1)において、フォトニック結晶の結晶方位を考慮して導波路構造を設計することにより、三次元的な光導波路が実現できることが明らかとなった。本論文では、3次元フォトニック結晶を用いた光伝播制御の体系的な理解を行い、次世代の光配線技術構築のための光制御の理論検討を行っている。本論文において、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 結晶の上部あるいは下部方向から入出力可能な導波路(図2)において、その入出射特性および伝搬特性の解明とその改善法を示した。入出力特性に与える結晶終端部の構造の影響を明らかにし、高効率な入出力を実現するための導波路端部の設計指針を提案している。
2. 高密度光配線の実現へ向けた導波路間の結合を定量的に解析し、集積密度の改善方法を示した。光電子集積回路における光インターコネクションへの応用を念頭に、導波路を集積していく際に生じるクロストークを解析(図3)し、具体的なクロストーク許容値を基に集積可能な密度を示した。そして、異なる種類の導波路を適切に集積することによって導波路間の結合を抑制でき、それによって集積密度を向上させられることを示した。
3. 導波路に加えて共振器も含めたより高機能な光配線技術を構築するべく、3次元フォトニック結晶による光閉じ込めの振る舞いを定量的に解析する手法を提案した。これによりストライプ積層型3次元フォトニック結晶の複素バンド構造の解析を行い、これを基礎として導波路および共振器特性解明及び新設計指針への展開を示した。

以上の成果は立体光配線技術構築の基礎を成す重要な成果と言え、フォトニック結晶による高機能な光回路および光配線の実現へ繋がり、半導体光制御の推進へ寄与すると期待できる。

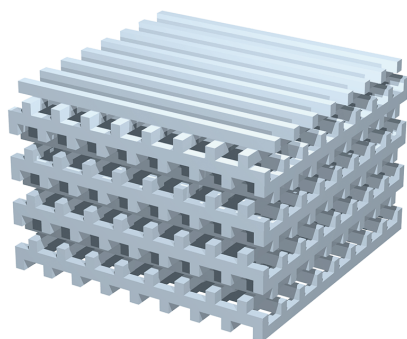


図1 ストライプ積層型3次元フォトニック結晶の模式図。ストライプパターンを4層一周期で積層することで構成される。

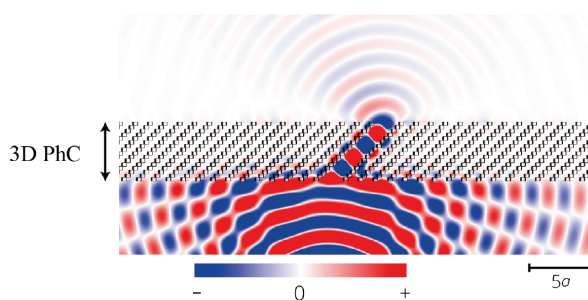


図2 3次元フォトニック結晶の導波路における光入出力の電界分布。

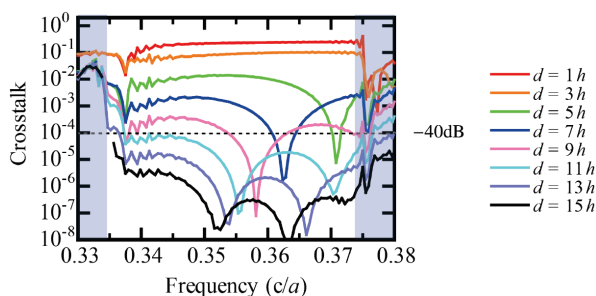


図3 導波路を立体交差させた場合のクロストークの解析結果の例。

石川 恵理奈 (松山隆司教授)

「Semantic Interpretation of Eye Movements Using Author-designed Structure of Visual Content」

(提示コンテンツのデザイン構造を用いた視線運動の意味理解)

平成 28 年 9 月 23 日授与

「目は心の窓」というように、人の視線は「意図」や「興味」といった心的な状態をよく反映して振る舞うことが従来研究を通して明らかになっている。視線と心的状態の関係は、認知心理学やヒューマンコンピュータインタラクション、マーケティングなどの幅広い分野において長く調査されてきたが、近年では特に、統計的機械学習・データマイニングの技術を視線解析に応用し、視線と心的状態との関係を確率的数理モデルで記述しようといった試みも盛んに行われている。このようなモデルは、視線からの心的状態推定などに応用でき、「人の知的活動における情報処理過程の解明」という根源的な課題への重要な足がかりとなるとともに、コンピュータインターフェイスやインタラクションのデザイン・評価への活用といったような応用面へも貢献することが期待できる。

しかしながら、既存研究においては、比較的単純な提示コンテンツが用いられるなど、統制された実験室環境下での視線運動が扱われるにとどまっている。閲覧対象・心的状態の両者が多様で複雑となる実環境下での視線運動を理解するには、まず、提示コンテンツの意味的・空間的構造を考慮することが不可欠であり、これらのコンテンツ情報をどのようにモデル化して利用するかという課題がある。さらには、同じような特徴を持つ視線運動でも、その視線運動の持つ「意味」（つまり、その視線運動を表出した際の閲覧者の意図）は、閲覧のコンテキスト（本研究では「閲覧状態」とよぶ）に応じて異なると考えられる。このような時間的に変化する閲覧状態を適切に推定して、視線の解釈に利用する必要がある。

本論文では、Web ページやデジタルカタログといったデジタルコンテンツの閲覧状況を取り上げ、上述の課題を解決する階層的な閲覧行動モデルを構築した。まず、提示コンテンツの意図的・構造的なレイアウト（デザイン構造）を知識源として積極的に利用することで、視線運動の持つ「意味」を解釈する枠組みを提案した（図1 Step 1）。この枠組みでは、視線運動は、コンテンツ上の要素間の空間的な配置関係や、「同一グループ内」といったようなデザイン構造上の意味的關係によって符号化される。視線計測実験を通して、提案する符号化法を用いることで、視線からの閲覧タスクの推定精度が向上することを確かめた。

次に、時間的に変化する閲覧状態を推定するために、隠れセミマルコフモデルに基づく閲覧行動モデルを提案した（図1 Step 2）。提案モデルは教師データ無しでの学習が可能であり、閲覧状態の数や種類に関する事前知識がない状況でも、計測された視線データからボトムアップに閲覧状態を推定することができる。さらに、この提案モデルをもとに、閲覧者の興味を推定する手法を提案し、視線計測実験を通して手法の妥当性を評価した。

さらに、先行研究によって閲覧状態に関する事前知識がある程度得られている状況を想定し、上述の2段階からなる閲覧行動のモデル化の枠組みに、事前知識を効率的に適用する手法を提案した。具体的には、「デジタルカタログを閲覧しながら商品を選んでいる」という選択行動の解析を扱い、提案手法により、選択行動中の意思決定過程の性質をよく表すような閲覧状態が推定できることを確認した。

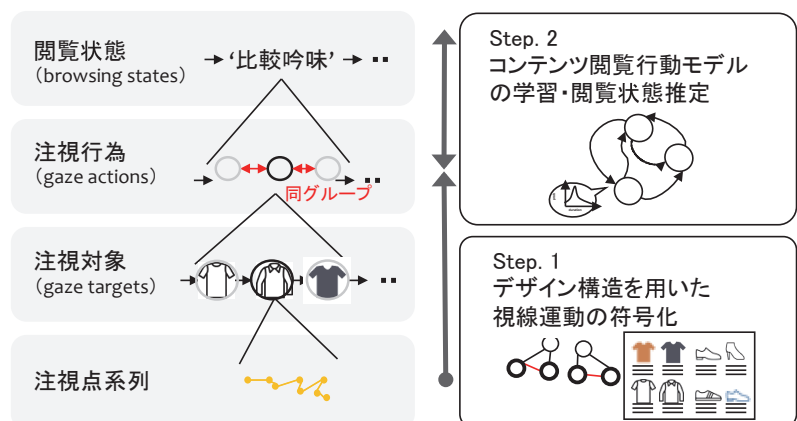


図1 提案する視線解析手法の概要

趙 欧 (原田博司教授)

[Sum Rate Analysis and Dynamic Clustering for Multi-user MIMO Distributed Antenna Systems]

(マルチユーザ MIMO 分散アンテナシステムにおける総和レート及びダイナミッククラスタリングに関する研究)

平成 28 年 9 月 23 日授与

With the ever-growing demand for higher data rates in wireless communication services, recently, various techniques have been proposed to increase system capacity. Among these techniques, multiple-input multiple-output (MIMO) transmission has attracted considerable attention. It has been verified that, in an independent and identically distributed Rayleigh flat-fading channel, the MIMO capacity increases linearly with the smaller of the number of transmit and receive antennas. In practice, however, because of physical constraints, the number of antennas on a user cannot be made arbitrarily large that may prevent the realization of MIMO transmission.

Fortunately, using precoding techniques on a transmitter equipped with multiple centralized antennas, the required computational complexity and the number of antennas on each user can be reduced because multiple users can demodulate the signals without using any detection scheme while retaining the advantages of MIMO transmission. Because of these merits, the sum rate of the so-called multi-user (MU) MIMO transmission has been widely studied over some simple channel attenuation models. However, since it is hard to average the sum rate over the shadowing distribution and spatial correlations further complicates the distribution, the theoretical analysis on MU-MIMO sum rate over correlated composite fading channels has not been studied.

To bridge this gap, we concentrate on the sum rate distribution of MU-MIMO systems employing linear zero-forcing precoding, accounting for both Rayleigh fading and shadowing effects, as well as spatial correlation at the transmit and receiver sides. In particular, we consider the classical spatially correlated lognormal model and propose closed-form bounds on the distribution of the achievable sum rates in MU-MIMO systems. With the help of these bounds, we found that, for instance, the effect of spatially correlated shadowing can be considered to be independent when the inter-user distance is approximately five times the shadowing correlation distance.

On the basis of the above analysis results, a distributed antenna system (DAS) has been proposed to further decrease the access distance and spatial correlations. To verify the sum rate improvement in MU-MIMO DASs, we investigate and compare the characteristics of sum rates in both centralized antenna systems (CASs) and DASs under the effects of correlated composite fading channels and inter-cell interference. One of the computer simulation results indicates that the DAS can significantly improve the performance of the sum rate compared to the traditional CAS in the case under the consideration, therefore confirms the speculation.

Finally, combining MU-MIMO transmission and DAS with precoding techniques, the advantages of both MIMO and DAS can be achieved. However, by establishing a large-scale MU-MIMO DAS, such as, Fig. 1, to increase multiplexing gain, the use of a dynamic clustering scheme (CS) is necessary to reduce computation in precoding. In the last of our research, we propose a simple multi-carrier based method for dynamic clustering to establish a large-scale MU-MIMO DAS and investigate its performance. We also compare the characteristics of the proposal to those of other schemes such as exhaustive search, traditional location-based adaptive CS, and improved norm-based CS in terms of sum rate improvement. Additionally, we further introduce spatial correlation to the considered system. Computer simulation results indicate that the proposed CS provides better performance than the existing schemes and can achieve a sum rate close to that of exhaustive search but at a lower computational cost.

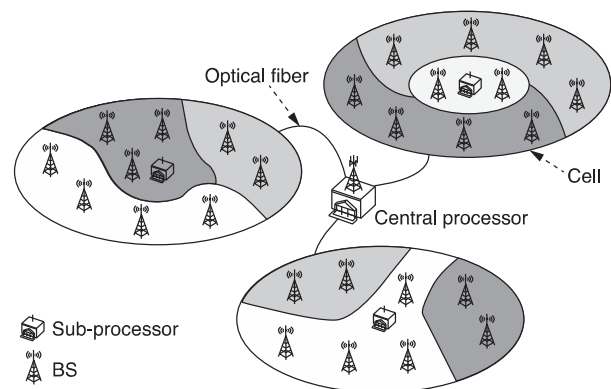


Fig. 1: An example of DAS with dynamic clustering.

福 園 隼 人 (守倉正博教授)

「Spatial Signal Processing on Distributed MIMO Systems」

(分散 MIMO システムにおける空間信号処理)

平成 28 年 9 月 23 日授与

近年、インターネットの爆発的な普及に伴い、モバイル端末によるデータトラフィックが著しく増加している。無線 LAN (local area network) は、MIMO (multiple-input multiple-output) システムに基づく空間信号処理技術を発展させこの増加に対応してきた。将来さらに増加するモバイル端末利用に対応するために、セルスループットの向上、エリアスループットの向上、カバレッジエリアの拡大を行う必要がある (図 1)。本論文は、これらの課題を解決する次世代無線 LAN の確立に向け、分散 MIMO システムにおける空間信号処理に関する新規手法を提案し、その効果を理論解析、計算機シミュレーション、実伝搬実験など様々な側面から評価し議論している。本研究で得られた成果は以下の通りである。

1. セルスループットを向上させるインプリシットフィードバックを用いたマルチユーザ MIMO システムにおける上り CSI (channel state information) の高精度校正法 WCC (weighted-combining calibration) を提案した。WCC の特性評価を理論解析と計算機シミュレーションにより行い、測定器により構築したマルチユーザ MIMO-OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 伝送系による屋内の実伝搬実験で WCC の特性向上効果を確認した。
2. インプリシットフィードバックを用いたマルチユーザ MIMO-OFDM 伝送を行うリアルタイム試作装置を FPGA (field programmable gate array) を用いて開発し、その開発システムの詳細と実伝搬結果の提示を行った。WCC を用いることで動的環境においても安定したリアルタイムスループットが得られることを示した。
3. エリアスループットを向上させるためのインプリシットフィードバックを用いた STMAP (simultaneous transmission from access points) システムを提案した。従来のエクスプリシットフィードバックを用いた STMAP システムと MAC (medium access control) スループットの比較を計算機シミュレーションにより行い、提案システムの優位性を示した。また、STMAP における送信ビーム形成に関わる式と評価指標となるサムレートの式を導出した。セル間干渉が発生する集合住宅で測定された通信路応答に基づくサムレート評価を行い、提案システムの実環境での有用性を示した。
4. カバレッジエリアを拡大させるための AF (amplify-and-forward) 協調リレーシステムにおける、Alamouti 符号および Golden 符号のための最尤復調器を提案した。検討システムの実効通信路利得に基づき、性能評価のための不稼働確率と平均誤り率を解析した。実際の無線 LAN のパラメータ条件下での提案復調器の計算量と誤り率特性の定量的評価を計算機シミュレーションにより示し、各復調器の適用領域と最適なりレー配置、電力割当量を明確化した。

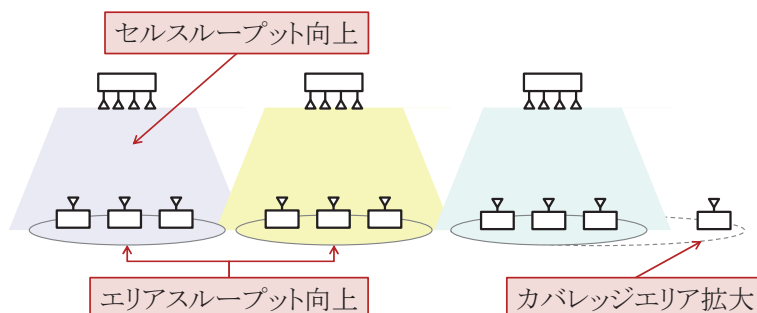


図 1. モバイル端末増加に伴う次世代無線 LAN の課題

橋本大志 (佐藤亨教授)

「Robust adaptive beamforming for clutter rejection on atmospheric radars」

(大気レーダーのための適応的クラッター抑圧手法)

平成 28 年 9 月 23 日授与

現代の気象予測は観測により得られる初期値と地球大気の変動を再現する数値モデルによって成り立っている。予測の精度は初期値に大きく依存するため、高精度な予測を行うためには信頼性の高い初期値が必要となる。中でも大気レーダーによって得られる風速の推定値は重要な初期値の一つである。大気レーダーは屈折率変動に起因する非常に微弱な散乱波を観測する測器であるが、電波の性質上あらゆる方位から非所望散乱波 (クラッター) が到来し、これらによる干渉を受ける。本論文ではこのクラッターを抑圧するため、複数の受信機をもつ大気レーダーにおける適応的信号処理法を提案した。主たる成果は以下の通りである。

1. 一般に中間圏における大気エコーは対流圏・成層圏に比べさらに微弱であり、流星エコーの混入を除去しなければドップラー風速推定は難しい。そこで中間圏観測にノルム拘束付き (NC-) 方向拘束付き出力電力最小化 (DCMP) 法を適用して流星エコーを抑圧し、観測可能な高度範囲が流星の混入の無い場合の理論的な限界に近い値まで拡大することを示した。
2. 大気レーダーで観測されるのはメインビーム方向に投影された風速である。したがって特に微弱な鉛直風を測定する場合には、ビーム方向の誤差による水平風の漏れ込みが無視できない。そこでクラッター抑圧に必要な自由度を残して大部分をノンアダプティブに合成し、少数のサイドローブキャンセラからの出力をゲイン比に応じた重みを与えて合成するゲイン重み付き NC-DCMP 法を提案し、ビーム誤差を小さくできることを示した。また信楽の MU レーダーによる実観測では均等分割アレイとほぼ同等のクラッター抑圧度をより小さな SNR ロスで得られることを示した (図 1)。
3. NC-DCMP 法では事前に経験的に与えたノルム拘束値を用いるが、クラッターや所望波の強度比などにより適切でない場合がある。そこでクラッター抑圧度とノイズレベル上昇度を観測データから推定し、それらが均等に配分される最適なノルム拘束値を自動的に決定するパワーバランス (PB) 法を提案した。数値実験においては、種々の所望信号及びクラッターの強度において NC-DCMP 法より高いクラッター抑圧度と DCMP 法より小さな SNR ロスを両立できることを示した。また南極大型大気レーダーによる実観測データへの適用例では、DCMP 法と同等のクラッター抑圧度をより小さな SNR ロスで得られるとともに (図 2)、NC-DCMP 法でクラッターが消え残る場合でも所望の抑圧度を得られることを示した (図 2 上)。

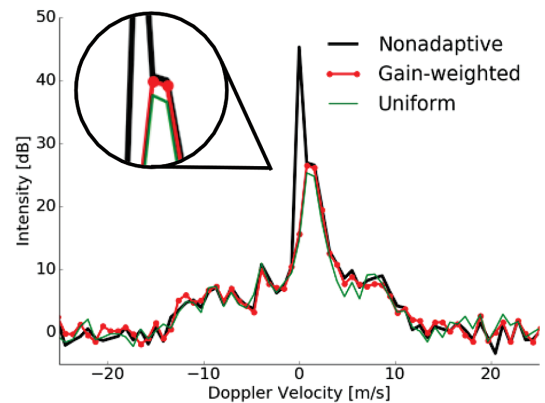


図 1: ゲイン重み付きアレイと均等分割アレイによるドップラーспекトラムの比較

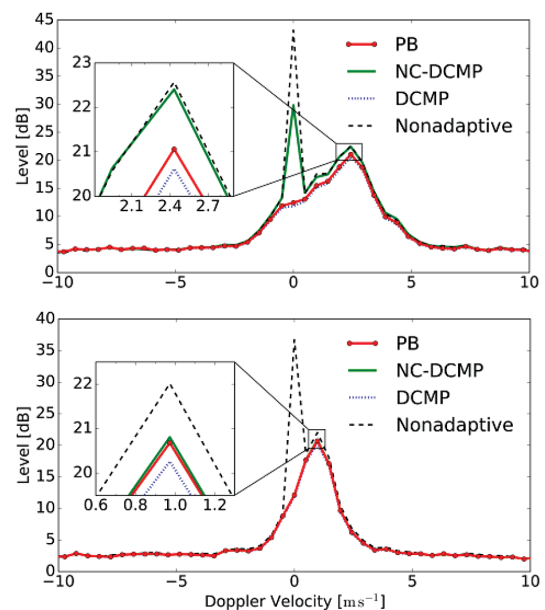


図 2: 南極大型大気レーダーへの適用例 (上: クラッターが消え残る場合、下: 容易に抑圧できる場合)

中西 俊 博 (北野正雄教授)

「Coupled-resonator-based metamaterials emulating quantum systems」

(量子系を模擬する結合共振型メタマテリアル)

平成 28 年 1 月 25 日授与

メタマテリアルとは波長よりも小さい構造の集合体のことで、電磁波に対して媒質のように振る舞い、特異な電磁応答を実現できることから注目を集めている。本論文ではメタマテリアルを用いて量子系で起こる現象を人工的に模擬することを主な目的としている。本研究の成果は以下の通りである。

- 孤立原子系の時間発展を模擬する結合共振回路モデルを提案し、量子系を記述する基本方程式であるシュレディンガー方程式が共振器列で正確に表現できることを示した。スカラーポテンシャル中の量子波の波動伝搬だけでなく、ベクトルポテンシャル存在下の波動伝搬も回路モデルで表現し、トンネル効果やアハラノフ・ボーム効果を回路シミュレーションで実現した。
- 原子系で実現されている超光速光伝搬現象を回路で模擬する方法を考案し、入力パルスより出力パルスが先に観測される負群遅延効果を実証した。
- 原子系の電磁誘起透明化現象 (EIT 現象) を用いて実現されている光の低群速度化と光凍結をベースバンド信号で実現する回路モデルを提案し、対応する現象を観測した。また、光凍結に必要な条件が回路モデルでも同様に導出されることを明らかにした。
- 電磁波と相互作用する 2 準位系や 3 準位系がメタマテリアルを用いて表現できることを明らかにし、共鳴吸収や EIT 現象を人工原子系で完全に模擬できることを示した。
- EIT 現象を制御することができるメタマテリアルを提案し、電磁波の保存と再生をメタマテリアル系で初めて実現した (図 1 参照)。実験はマイクロ波領域で行い、電磁波の位相情報がメタマテリアル中に保存されていることを実証した。
- 2 重共振型メタマテリアルという独自の発想に基づき、第 2 次高調波を高効率に生成するメタマテリアルを提案した。マイクロ波領域での実験で、従来法 (単一共振型メタマテリアル) の約 100 倍の第 2 次高調波発生を実現した (図 2 参照)。

以上の研究は、量子系の複雑な現象から本質を抽出して、古典系で同現象を実現しており、現象の理解と更なる発展を促進するという点で意義は大きい。また、通常の原子とは異なりメタマテリアルでは設計によって動作周波数をマイクロ波領域から光領域まで自由に設定できるという点で大きな利点がある。この性質により、本研究が対象にした低周波領域から、今後より高周波領域 (テラヘルツ, 光領域) に発展していくことが期待される。

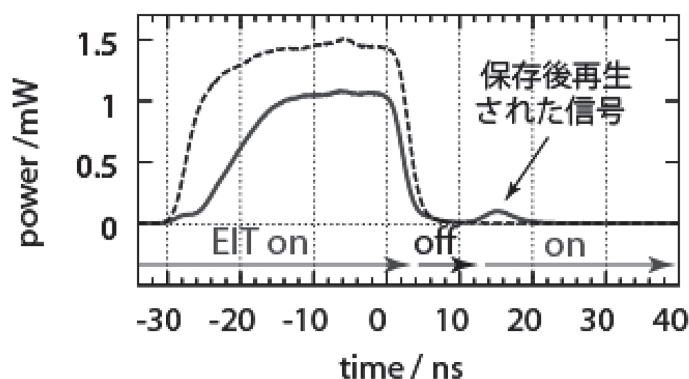


図 1 電磁波の保存と再生

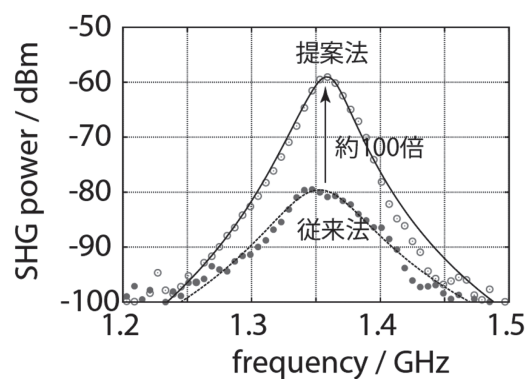


図 2 発生した第 2 次高調波強度