

21世紀COEプログラム コヒーレント光科学の展開

The 21st Century Center of Excellence (COE) Program
Innovation in Coherent Optical Science



電気通信大学大学院 電気通信学研究科
量子・物質学専攻、情報通信工学専攻、電子工学専攻

電気通信大学

The University of Electro-Communications

電気通信大学 21世紀 COE プログラム

コヒーレント光科学の展開 ひかり

目 次

学長挨拶	1
電気通信学研究科長挨拶	2
拠点リーダー挨拶	3
プログラムの概要	4
拠点メンバー・研究紹介	
I.コヒーレント操作	6
<u>白田耕藏</u> 清水富士夫 渡辺信一 鈴木 勝 中川賢一 西野哲朗 島田 宏	
II.光の超高精度制御	13
<u>武田光夫</u> 三木哲也 富田康生 米田仁紀 西岡 一 上野芳康 桂川眞幸	
III.フォトニックデバイス	20
<u>植田憲一</u> <u>大谷俊介</u> 豊田太郎 小林直樹 野崎真次 大淵泰司 石田尚行	
<u>※サブリーダー</u>	

学長挨拶

電気通信大学

学長 梶谷 誠



電気通信大学は、21世紀を迎えるにあたり、新しい社会のあり方、それに貢献する本学の使命について議論しました。20世紀は、科学技術の輝かしい発展に支えられ、もっぱら物質的豊かさの追求に傾注してきたため、さまざまなひずみも生んでしまいました。その反省から、21世紀社会の価値観は“もの”から“こころ”にパラダイム転換する必要を痛感しました。21世紀は、全ての人々が心豊かに暮らせる社会を目指すべきなのです。心の豊かさは、人と人、人と社会、人と自然、人と人工物など、人を中心とする多様なコミュニケーションの豊かさによってもたらされると考えました。このような社会を私たちは「高度コミュニケーション社会」と名付けました。

電気通信大学は、高度コミュニケーション社会に貢献するため、「コミュニケーションにかかるる総合的科学技術の創出と人材育成」という新しい教育研究の理念を掲げました。本学は、高度コミュニケーション社会の健全な発展とそれを支える産業基盤の強化に資するため、科学技術基本計画が重点分野に掲げている情報通信（IT）分野を中心に、コミュニケーションにかかるる一連の関連科学技術分野を総合した「高度コミュニケーション科学」の創造を目指しています。

高度コミュニケーション科学は、情報を伝える光や電子とそのマテリアル、それらを制御するデバイス、デバイスを組み合わせ、さらにソフトウェアを加えたコンピュータやネットワークなどの情報通信システム及びそれらを用いて情報を伝えるメディア、メディアを通じて表現されるコンテンツ、そしてコンテンツが人々の心に作用して起こるコミュニケーションという流れのなかで必要とされる科学と技術の総体を表しています。

電気通信大学では、1980年に「新形レーザー研究センター」として創設された現在の「レーザー新世代研究センター」を中心核に、「光と原子のコヒーレント制御」をキーワードに、未来の光通信の要となる新しい素子、基盤技術の開発を指向した基礎研究を行ってきました。

この度、21世紀 COE プログラムに採択された「コヒーレント光科学の展開」は、レーザー新世代研究センターと量子・物質工学専攻、電子工学専攻、情報通信工学専攻を有機的に連携させ、電気通信大学の光科学グループを世界拠点へと発展させ、21世紀の基幹科学技術として展開されることを目指します。

電気通信大学は、「高度コミュニケーション科学」を構成する基礎学術と先端技術において世界をリードできる研究教育拠点を形成することによって、本学の社会的使命を果たしたいと願っています。皆さんのご支援とご助言を切にお願い申し上げます。

21世紀 COE プログラムに期待するもの

電気通信大学大学院

電気通信学研究科長 益田隆司



電気通信大学の光科学の教育、研究は、電気通信学研究科の量子・物質工学専攻、および、学内共同教育研究施設であるレーザー新世代研究センターを中心として、国際的にもその教育研究水準の高さが認知されています。そのことが正しく評価され、「コヒーレント光科学の展開」が、21世紀 COE プログラムの「数学、物理学、地球科学」という理学の中核の分野で採択されたことは真に嬉しく、大学の誇りとするところでもあります。

電気通信大学の学部卒業生、大学院前期課程修了生は、社会からきわめて高く評価されています。大学院前期課程には、希望者も多く、毎年定員を大幅に超えた学生が入学し、修了しています。各種メディアによる大学評価でも、常に上位にランキングされています。こうした中で、これから電気通信大学にとっての最大の課題は、大学院後期課程を、量、質の面において充実させることです。現状は満足できない状況にあるといわざるを得ません。大学院後期課程の充実度は、その大学の研究力と強い相関をもつと考えられます。都心にある理工系の国立大学としては、大学院後期課程が弱いことは、法人化に向けて深刻な問題となりかねません。何としても大学院後期課程の充実を図らねばならないと考えています。今回の COE が、光科学の分野で大きな教育研究成果を生み出してくれることを期待していることは無論ですが、それに加えて、それが、電気通信大学全体の大学院後期課程の活性化の契機となって欲しいと望んでいます。

21世紀 COE プログラムは、大学院後期課程の教育研究の充実のための支援と認識しています。白田拠点リーダーの強いリーダーシップのもとに、大学院後期課程を対象として、「コヒーレント光科学コース」という専攻横断型の教育コースがつくられようとしています。電気通信学研究科には 7 つの専攻があります。「コヒーレント光科学コース」に関する専攻は、量子・物質工学専攻を中心に、情報通信工学専攻、電子工学専攻の 3 つです。選ばれた学生には、経済的支援も考慮されています。このようなコースに、他大学からも優秀な学生が入学し、それが、電気通信大学の大学院後期課程充実のきっかけになることを期待しています。

その一方で、経済的支援を受ける学生とそうでない学生に大きな差が出ることは、教育の機会均等にも反し、必ずしも望ましいことではないとも考えています。大学としては、COE 参加学生とそうでない学生に説明が難しい差がつかないような配慮も必要であると考えています。COE に限らず大学院後期課程の学生に対する経済的支援は検討に値する課題です。今回の採択に合わせて、近い将来、情報、電気、電子等、電気通信大学のより中核的分野においても COE としての採択が実現するよう努力したいと考えています。

コヒーレント光科学の展開

電気通信大学大学院

拠点リーダー 白田耕藏



平成 15 年度の 21 世紀 COE プログラムに私どもが提案いたしました「コヒーレント光科学の展開」が「数学・物理学・地球科学」カテゴリーにおいて採択されました。私どもは 21 世紀 COE プログラムを大学の教育と研究に新しい機能を付加する試みと認識し、それに応募することは学問・文化の創造拠点としての大学の主張を行うことと位置づけ応募作業を行ってまいりました。提案が採択され大きな喜び・期待とともに責任を強く感じつつあります。

「コヒーレント光科学」はレーザーの発明にその端緒を持つまだ比較的若い分野です。しかしながらこの 40 年間にこの分野は大きく発展し、量子エレクトロニクス・レーザー物理学・量子光学・非線形光学・光エレクトロニクスなどまったく新しい学問分野が開拓されてまいりました。現在では、これらの分野で確立された諸手法は、物理学・化学・生命科学等の基礎分野はもとより、光加工・光通信等の応用分野におきましても必要不可欠なものとなっております。本分野の最近の発展も目覚しく、ノーベル賞を例にとりましても 1997 年にレーザー冷却、1999 年にフェムト秒超高速現象、2001 年にボーズ・アインシュタイン凝縮と「コヒーレント光科学」の分野から立て続けに受賞しています。

電気通信大学の光科学グループは、とりわけレーザー研究センターが設立された 1980 年以来、「コヒーレント光科学」の分野におきまして基礎から応用にわたる広範な分野で系統的に貢献を行ってまいりました。原子光学・量子非線形光学・超高安定レーザー・光干渉計測・セラミックレーザー・多価イオンナノ加工など、それぞれ世界をリードする研究を開拓してまいりました。今回の提案は、この 20 数年来の電通大光科学グループの研究・教育活動の更なる発展に向けた私どもの未来展望によるものでもあります。

本プログラムの活動はもちろん大学院における教育活動として実施されるものです。先端的な研究の実施の中で、将来の光科学を創造し担う若い研究者が育ち羽ばたいて行くことを願っています。

提案したプログラムを具体的に実施し未来に価値のある教育・研究システムとして実現していくには拠点メンバーの積極的なイノヴェーティブな努力が必要であることは言うまでもありません。大いに努力する所存であります。皆様方のご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申しあげます。

コヒーレント光科学の展開 COE プログラムの概要

「コヒーレント光科学」拠点形成の目的

近年、光科学は大きな発展を遂げ光科学関連分野のみならず物理学の様々な分野に大きなインパクトを与えている。光と物質系のコヒーレント相互作用は、物質系の量子光学応答から運動の自由度までを自在に操作する手法として発展し、レーザー冷却・トラッピングの方法は原子のBose-Einstein 凝縮を実現し、物質波を波動媒体とする原子光学をも現実のものとした。また光のコヒーレンスを極限的に制御する方法は超高精度計測から重力波天文学にまでも渡る大きな展開を見せて発展している。さらに、コヒーレントな量子操作の方法は量子情報処理の概念を生み出し、量子通信や量子コンピューティングなど 21 世紀の新しい情報技術を実現する物理的な基盤を与えるつある。このような光科学の展開は、原理的な特性がほぼ理想的に実現できる新固体レーザーを中心とする様々な光発生技術や光制御・光計測技術の革新的な発展がその基盤を支えてきたことはいうまでもない。

本プログラムの目的は、現代のこの急速な光科学の展開を「コヒーレント光^{ひかり}科学」として応用も視野に入れて組織的かつ系統的にまとめあげ、21 世紀の基幹科学技術として育て上げる教育研究拠点を築くことである。拠点の活動のキーワードは、光のみならず物質も含む系の「コヒーレンスの操作と制御」である。本拠点では「コヒーレンスの操作と制御」の概念と方法を基礎研究からフォトニクス・情報通信技術にまでの発展・展開を目指して実施する。

電気通信大学における拠点の意義

電気通信大学は 21 世紀における教育研究の展開の柱を「高度コミュニケーション科学の創造」と定め、平成 15 年度より電気通信学研究科を、物質やデバイスから情報通信にまでわたって総合的に教育と研究を展開すべく、情報通信工学、情報工学、電子工学、量子・物質工学、知能機械工学、システム工学、人間コミュニケーション学の 7 専攻体制として再編しスタートした。

本プログラムは「高度コミュニケーション科学」を複眼的な視点から創造することを目指し、7 専攻の教育研究の枠組み（縦糸）とは相補的に、専攻横断的に物質やデバイスと情報とをつなぐ研究教育の構造（横糸）を創り出すものである。伝統的な学問構造に根ざす縦糸構造と相補的に「コヒーレント光^{ひかり}科学」をキーワードに横糸研究教育構造を創出することは「高度コミュニケーション科学」の高度かつ柔軟な発展に重要な意義を持つものである。

電通大における光科学の研究と教育は、1980 年に設立されたレーザー研究センター（新形レーザー研究センター、レーザー極限技術研究センター、レーザー新世代研究センターと発展的に改組）を中心に専攻の枠を越えて実施され、この 20 年間に国内はもとより世界をリードするさまざまな成果を上げてきた。本プログラムは、電通大のこの光科学の研究教育のアクティヴィティーを、その更なる発展と互いの融合による新分野開拓を目指して、現時点で「コヒーレント光^{ひかり}科学」の研究教育拠点として確立し、かつ「高度コミュニケーション科学」を担う大学院教育の横糸構造として組織的にまとめあげることを目指すものである。

研究実施概要

電気通信大学ではこの 20 年にわたって、光科学の諸分野において世界をリードする研究が展開されてきた。代表的な例は、レーザー冷却・原子光学、量子非線形光学、フーリエ干渉計測、超高コヒーレンスレーザー、ファイバーレーザー、セラミックレーザー、多価イオントラップの研究、である。本プログラムは、これらの研究を中心核に研究と教育を発展・展開させるものである。研究実施の基本的な視点は、個々の研究者の自由な発想を尊重し発展させることである。それとともにプログラムの研究課題を、コヒーレント操作による光・物質系の新機能の創出、光の超高精度制御による新機能の創出、新世代コヒーレントフォトニクデバイスの創出の 3 プロジェクトに組織し、各拠点メンバーのテーマを積極的に融合し新しい可能性を切り拓くことを目指す。また、学際的な研究展開や発展を目指し、材料科学・デバイス科学・低温科学などの諸分野との連携を各プロジェクトに組み込んで実施する。とりわけ、量子計算や量子情報など次世代の情報通信分野での応用を視野に入れ研究を展開する。なお、拠点における研究は学内で閉じた形で行うのではなく、国際・国内共同研究をさらに充実して一層の発展を図る。

教育実施概要

本プログラムは、電通大の光科学の研究教育のアクティヴィティーを「コヒーレント光科学」の研究教育拠点として確立し、専攻の枠を越える大学院教育の新機軸を立ち上げ、21 世紀の光科学の将来を担う研究者を育てる基盤を構築することを目指すものである。

本プログラムでは、従来の専攻の教育研究の枠組みとは相補的に、量子・物質工学専攻、電子工学専攻、情報通信工学専攻の 3 専攻横断の教育組織「コヒーレント光科学コース」を設置する。このコースでは専攻での専門性とは独立に、光科学・フォトニクスをキーワードとした教育を行う。「コヒーレント光科学コース」の教育の主体は博士後期課程である。コース学生の中から「COE 研究生」を選抜し、拠点研究の実施の中で次代の光科学の研究を担う自立した研究者として育成する。「COE 研究生」には自主的に研究を実施する環境を準備し、経済的にも十分な支援を行う。COE 研究生に対する学位審査においては、インターネットを活用し広く国内外からの評価意見を求め、「世界レベルでの学位授与」を実質的に保障するシステムを確立する。

プログラムにおいて定常的に重視することの一つは基礎力の充実である。現代の先端的研究では、基礎の深い理解と再整理が常に必要であり、研究に集中する学生・若手研究者が視点を明確にし、独創的な展開を可能にするために基礎の視点と系統的な学習は常に不可欠である。先端研究と基礎をつなぐ「コヒーレント光科学」の系統的なカリキュラムを整備し教育を行う。

プログラムを活力を持って実施するためには、日本人学生とともに海外から優秀な学生を多く集め、切磋琢磨の環境を形成することが必須である。そのために、海外の多くの大学に共同研究等で培った信頼関係をもとに推薦拠点を設け、推薦拠点からの推薦を得た学生を積極的に受け入れる。

量子コヒーレンスによる光学応答の操作と制御

量子・物質工学専攻

教授 白田耕藏

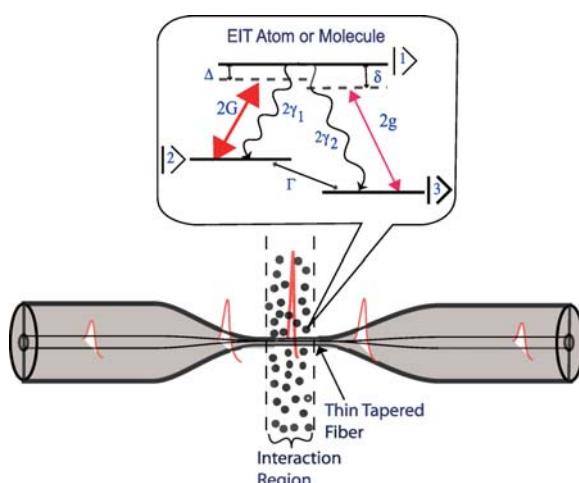
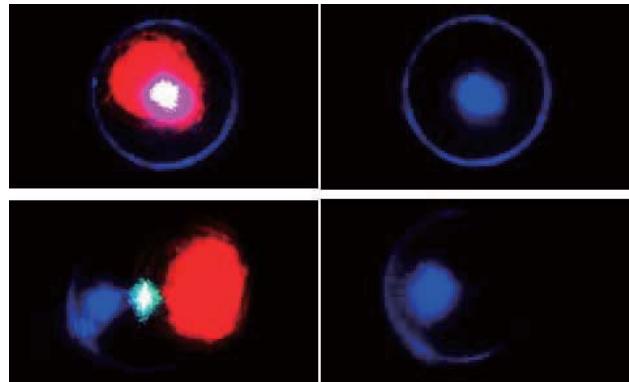
hakuta@pc.uec.ac.jp

<http://kiji.pc.uec.ac.jp/>



物質系に量子コヒーレンスを制御性良く生成すれば、物質系の光学応答は従来の常識を超えて制御可能であることを私たちは原子系と光の相互作用において実証しました。本研究では、この量子コヒーレンスの操作と制御の物理を凝縮系で実現することを目指して研究を展開しています。原子の光物理が凝縮系で実現できれば、従来の非線形光学や量子光学の枠組みを超えた新しい展開が可能となり様々な応用にも新しい道を拓くことが可能となります。そのためには、何よりも対象とする物質が重要であり、また相互作用を実現する光の取り扱いも重要となります。私たちは、物質として「固体水素」を取り上げ、また光ファイバーの直径を波長以下に超微細化することにより光ファイバー近傍での光の場を用いて光学応答を制御する方法を開拓しています。

固体水素は、いわば原子の量子性と固体の高密度性を併せ持つ物質です。固体水素を光物理の対象として扱ったのは私たちが最初です。私たちは、固体水素に制御性良く量子コヒーレンスを生成することにより、通常では非線形光学の対象になりえないインコヒーレント光や単一光子すらも高効率に波長変換でき、また光パルスの伝播速度を真空中の光速の3万分の1にまで減速できることを示しました。上図は固体水素の誘導ラマン散乱で観測した発光パターンです。従来の常識は位相整合による青色のリングです。量子コヒーレンスにより、強い青色のスポットが観測されています。



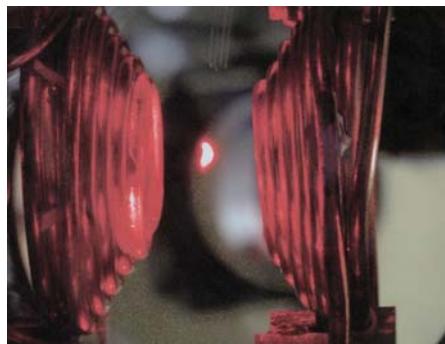
超微細化した光ファイバーを用いて様々な光学過程を設計すれば、光の量子性と物質の量子性をともに操作し制御することも可能となります。左図は超微細光ファイバーを物質系に埋め込んだ模式図です。光ファイバー中を伝播する光が超微細部で物質と相互作用し操作・制御します。この方法が確立すれば次代の量子情報処理などに大きな応用が拓かれます。

原子波光学

レーザー新世代研究センター

共同研究員 清水 富士夫

fshimizu@ils.uec.ac.jp



ネオン原子のトラップ

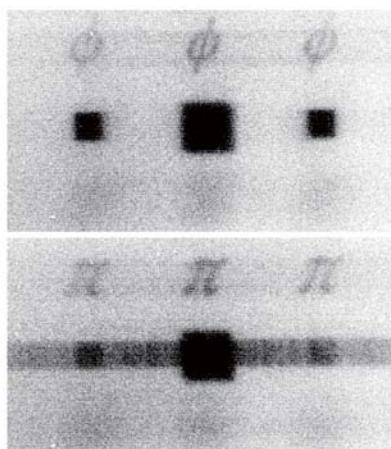
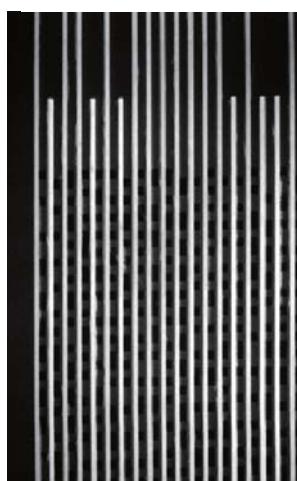
原子も量子力学的には波ですから、波動的性質が観測されてよいはずです。これはすでに 70 年前に実証されていますが、近年になるまで、粒子の波動的性質が工学的な応用に繋がるとは誰も考えていませんでした。これは常温の原子の波としての波長が非常に短く、波動的性質を引き出すことが困難であったためです。1980 年代に入って、レーザーを使って原子気体を極低温に冷却し、空間にトラップする技術が発達しました。この極低温の原子は長い波長を持ち、ナノ加工技術で作った部品を使って色々な干渉や

うになりました。

写真に示した例は、波動制御の最も一般的手法であるホログラフィーを原子波に応用したもので、ほぼ単色の原子波を多数の穴が空いた窒化シリコンの膜に通して干渉させ、原子の任意のパターンを描かせたものです。（左図）光のホログラフィーと違って、下図のようにホログラムに電極を蒸着し、電圧をかけてパターンを制御することもできます。



原子線ホログラフィー 左がホログラム（原子が透過する SiN 薄膜）
下はホログラムの穴の間に電極を蒸着し、その電極にかける電圧を
変えて 2 種類の原子のパターンを描かせている。



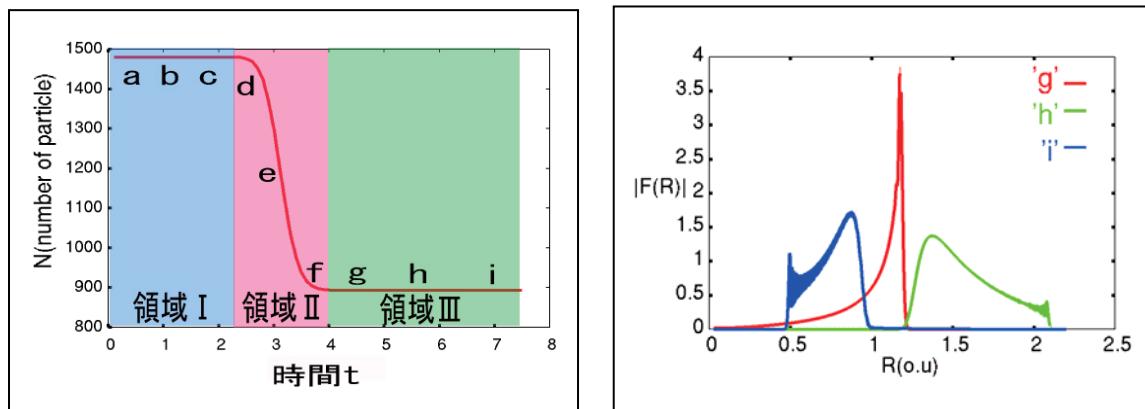
ボーズ・AINシュタイン凝縮体制御の理論的解析に向けて

量子・物質工学専攻

教授 渡辺 信一

shin@pc.uec.ac.jp

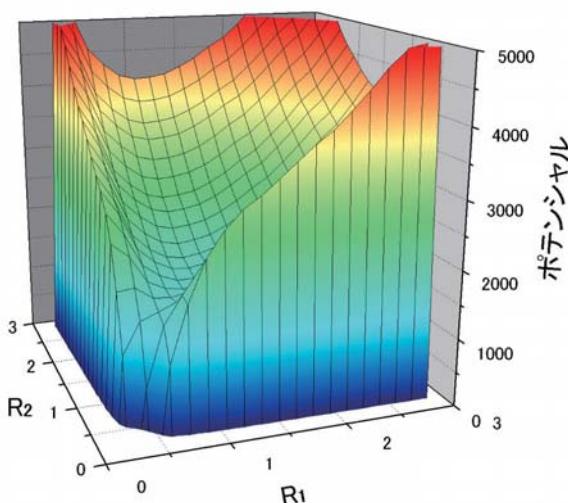
<http://power1.uec.ac.jp/>



磁気光学トラップ中に捕獲されて引力型の有効相互作用下に形成されたBECは、臨界個数を越えると不安定となり崩壊し始めます。このときの過渡現象を有効ポテンシャルで可視化します。左図はBECを形成している原子数の時間変化。右図は多体系の波束のスナップショット。^{'g'}、^{'h'}、^{'i'} は左図の同じラベルの時刻に対応。

アルカリ原子からなる希薄なガスで、トラップ中にコヒーレントな原子のボーズ・AINシュタイン凝縮体（BEC）を形成する技術が確立されて数年経ちます。最近は基盤上に作成した回路によって磁場を制御して、BECを操作する技術などが開発されつつあります。BEC物性の研究とその応用を可能にするための数理解析技術を開発しています。

右図は2成分からなる引力型のBECの運動を記述するための有効ポテンシャル面。波束は原点 $R_1=0$ 、 $R_2=0$ に落ち込み、3体の衝突による再結合でトラップから出てしまします。



量子液体・固体の物性研究

量子・物質工学専攻

教授 鈴木 勝

suzuki@e-one.uec.ac.jp



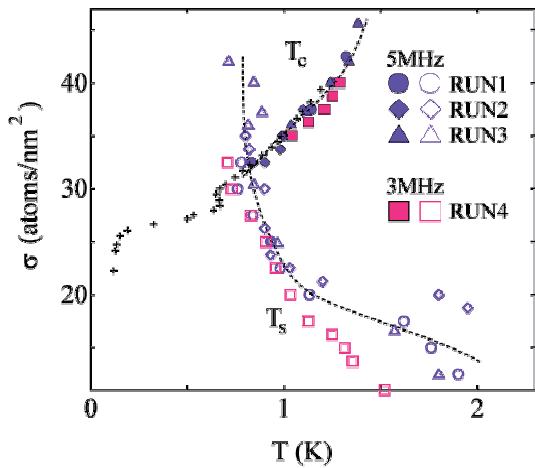
ヘリウム原子や水素分子はその質量が小さいために低温の液体・固体で量子性が顕著に表れます。近年の主要な研究テーマは、(1)固体水素を用いた非線形光学の研究、(2)ヘリウム吸着膜の界面ナノ摩擦の研究です。

(1) 固体水素を用いた非線形光学の研究

固体水素中の水素分子は気体状態と同様に回転と振動ができ、固体水素は気体のスペクトル線幅の狭さと固体の数密度の大きさを合わせ持つ光学材料として興味が持たれています。現在、良質な固体水素の作製方法を研究しています。この研究テーマは白田教授、桂川助教授との共同研究です。

(2) ヘリウム吸着膜の界面ナノ摩擦の研究

界面摩擦は古くから知られた現象ですが、その原子スケールでのメカニズムは明らかではありません。近年のナノテクノロジーの発展によりナノ摩擦に興味を持たれています。研究の対象としてヘリウム吸着膜を選びナノ摩擦の研究を行っています。物理吸着した不活性ヘリウム吸着膜の界面摩擦は、適当な面密度では高温域では摩擦力が大きく、低温域ではほぼゼロとなる特異的な性質を示します。この温度依存性は、吸着膜の摩擦をつくるピン止めが、熱励起により発生することで説明されます。原子スケールでの摩擦の理解は、摩擦の制御に新たな可能性を与えるものとして重要です。



グラファイト基板に吸着したヘリウム吸着膜のスリップ温度 T_s と超流動転移温度 T_c 。スリップ温度以下で摩擦力の減少が起こります。

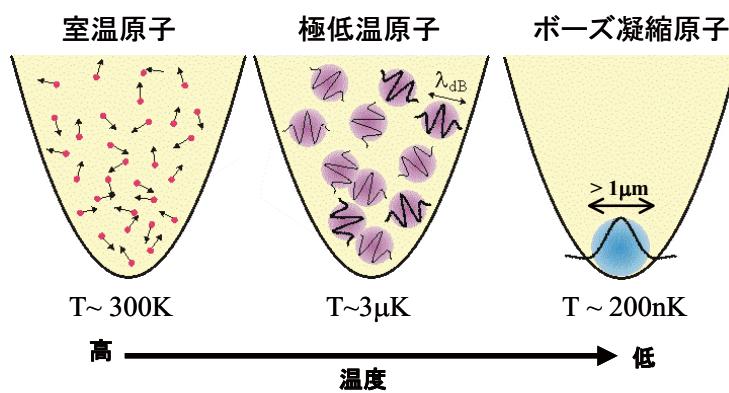
レーザー冷却原子を用いたコヒーレント原子光学

レーザー新世代研究センター

助教授 中川 賢一

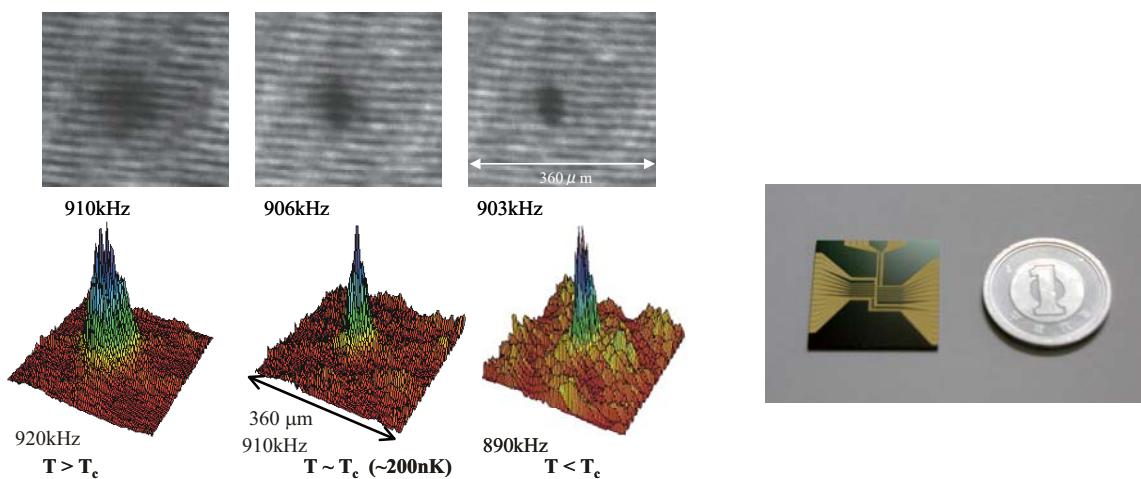
nakagawa@ils.uec.ac.jp

<http://www.ils.uec.ac.jp>



レーザー冷却技術を用いることによりマイクロケルビン台の極低温原子を実現することが可能です。室温において小さな粒子として振舞っていた原子は、極低温になると波の性質が現れ始めます。原子の温度をさらに下げると、原子同士の波動関数が重なり、しまいには全ての原子が

同じ量子状態に落ち込むいわゆるボーズ・アインシュタイン凝縮が実現されます。こうして得られる位相が揃ったコヒーレントな物質波はレーザー光と同様に干渉、回折、結像する事が可能となります。このためこれを用いて原子干渉計を実現すれば重力や加速度などの高感度・精密測定が可能となります。また最近ではこの凝縮原子の量子コンピューターなどの量子情報処理への応用が期待されています。



^{87}Rb 原子のボーズ・アインシュタイン凝縮
臨界温度($\sim 200\text{nK}$)以下では速度分布(下)に速度が
ほぼゼロのピークが現れます(中、右)。

アトムチップ(集積化原子回路)
基板上の電流が作る磁場ポテンシャルを
用いて凝縮原子のガイドします。

物理的実現に適した量子計算の理論構築

情報通信工学専攻

助教授 西野 哲朗

nishino@ice.uec.ac.jp

<http://www.tnlab.ice.uec.ac.jp/>



1. 研究の背景

現在、インターネット上では、公開鍵暗号が広く利用されている。代表的な公開鍵暗号である RSA 暗号は、現在のコンピュータが 300 枠以上の整数の因数を現実的時間内には発見できないであろうという仮定に基づいて設計されている。

そもそも現在のコンピュータは、1936 年頃に英国の数学者アラン・チューリングによって考案された、チューリング機械という数学的モデルに基づいている。これに対し、重ね合わせの原理等の量子力学的原理を取り入れた計算モデルである量子チューリング機械を、1985 年に英国の物理学者デイビッド・ドイッチが考案した。量子チューリング機械が通常のチューリング機械と異なる点は、メモリの 1 つの区画に状態の任意の重ね合わせを保持できる点にある。つまり、量子チューリング機械では単一のプロセッサ上で、理論上、任意の並列度の並列計算が行なえる。

そして、1994 年にピーター・ショアが、量子チューリング機械は任意に小さな誤り確率で、整数を高速に因数分解できることを証明した。すなわち、もし量子コンピュータが実現されると、RSA 暗号が効率良く破られることになるため、量子コンピュータの実現可能性について、多くの研究者が注目するところとなった。

2. 本研究のテーマ

現在、多くの研究者が、量子チューリング機械に基づく量子コンピュータを物理的に実現する方法について研究を進めている。しかし、重ね合わせ状態の制御の難しさや、デコヒーレンスの問題などから、量子コンピュータの実現は非常に難しいと考えられている。

そこで我々は、より物理的実現が容易な量子計算の理論構築に向けて、さまざまな研究を行っている。具体的には、(1) NMR 装置上の量子計算のモデル化と、NMR 装置上で効率良く動作する量子アルゴリズムの設計、(2) 量子論理回路設計理論の整備と、効率的量子論理回路の自動設計の研究、(3) 光技術による実現に適した量子ニューラルネットの理論構築などの研究を行っている。

メゾスコピックな Josephson 接合を使った機能素子

量子・物質工学科

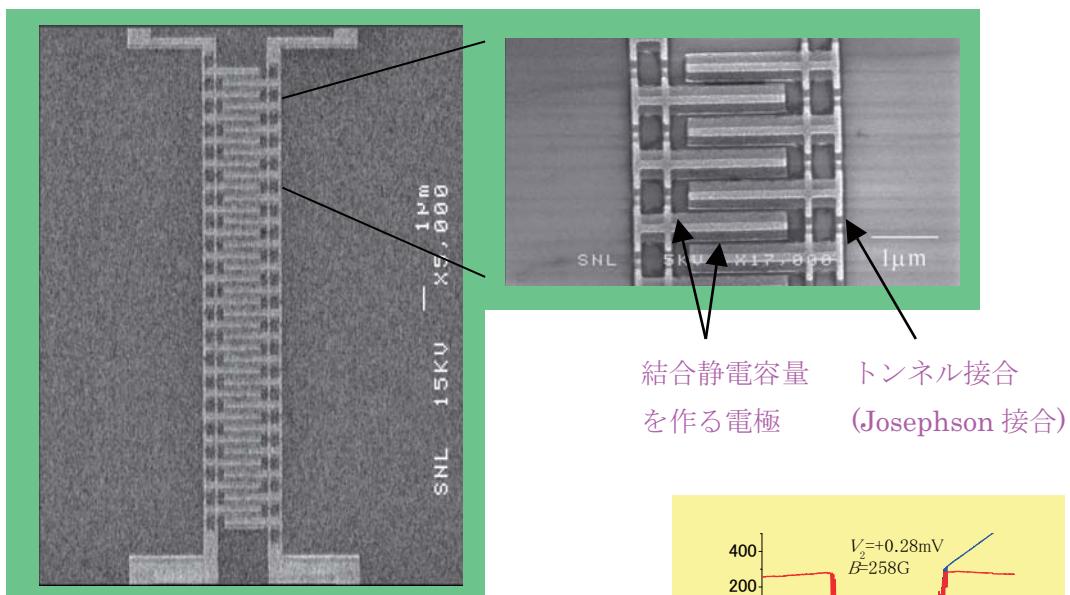
助教授 島田 宏

shimada@pc.uec.ac.jp

<http://inaho.pc.uec.ac.jp/>

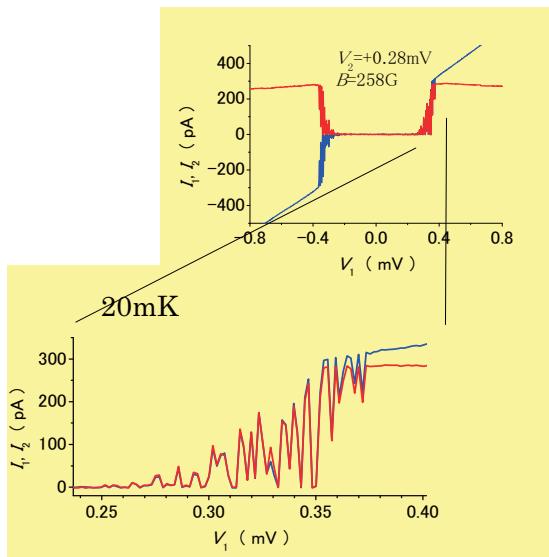


サブミクロン・サイズのメゾスコピックな Josephson 接合（超伝導トンネル接合）を使った、有用な機能をもつ素子を探索しています。



これは、そのような Josephson 接合（実際には、並列 2 個の接合）を多数 1 次元的に並べたものを 2 本 静電容量で結合させた素子です。一方の接合列に流す直流電流が他方の接合列に高い精度でコピーされます（右図）。

接合の静電容量を C とすると、Cooper 対（超伝導電子対）のトンネル現象に伴う単位電荷 ($2e$) の帶電には $(2e)^2/2C$ 程度のエネルギー変化が伴います。接合が微小で C が小さいときには、この帶電エネルギーが大きくなり、支配的なエネルギー・スケールとなって、トンネル現象自体に影響が現れます。この電流コピー現象にも、このような「単一電子帶電効果」が背景にあるのです。



光波の3次元空間コヒーレンス構造の制御とその応用

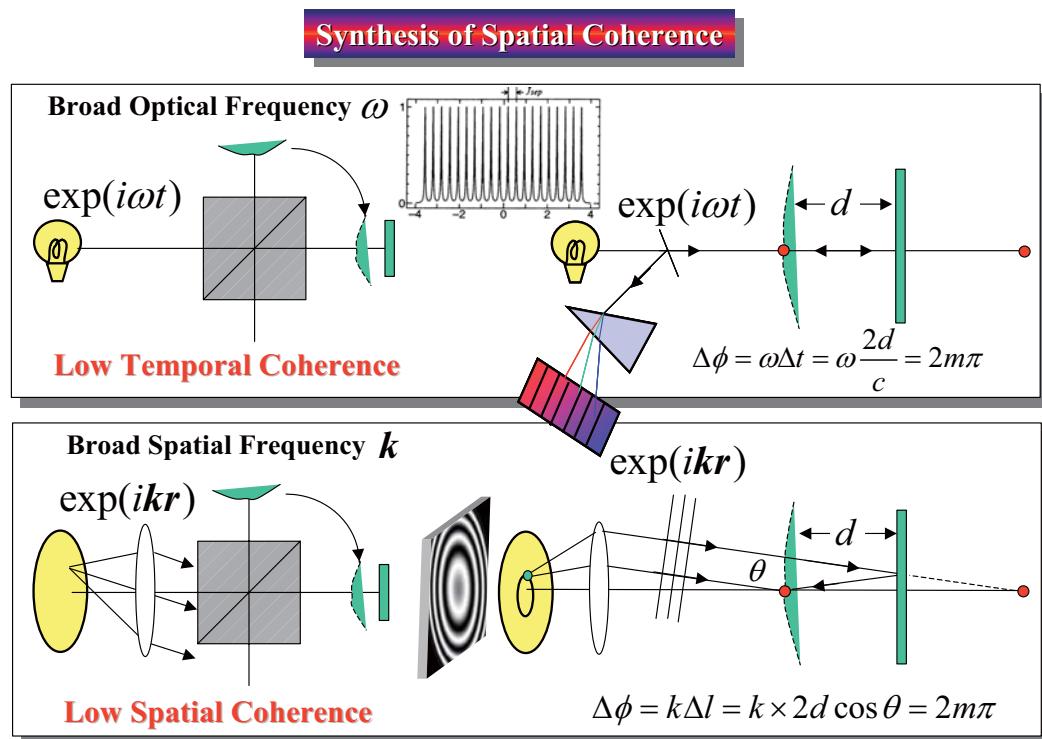
情報通信工学専攻

教授 武田 光夫

takeda@ice.uec.ac.jp



OCT (Optical Coherence Tomography)による3次元断層映像やコヒーレンス・レーダーによる3次元形状計測など、現在の低コヒーレンス干渉計測法はすべて光源の時間コヒーレンスの性質を利用しています。一例として、下図の上段に光周波数コムを用いたOCTの概念図を示します。光周波数コムの周波数間隔を変化させることにより所望の光路差の断層映像プロープ位置に高いコヒーレンスを発生させることができます。しかし、このような広い周波数帯域をもつ光源を用いると生体などの計測物体や伝播媒質の屈折率や吸収の分散の影響を避けることができません。



本研究では、空間的にインコヒーレントな広がりを持つ準単色光源の輝度分布を空間光変調器により各点ごとに独立に空間変調することにより光波の空間的コヒーレンスの3次元構造を自由に制御する技術を開発しています。時間周波数コムの代わりに空間周波数コムを生成させて「光波の伝搬軸方向に所望の距離を隔てた特定の2平面上の光波動場間に選択的に高い空間的コヒーレンスを生じさせる」という新しい原理に基づく空間コヒーレンス制御断層映像法を提案し、その原理の有効性を実験により確認しました。この方法により、吸収の大きな媒質や物体であっても、狭いスペクトル幅の吸収の窓さえあれば計測できる新しいOCTの可能性が生まれます。

超多波長WDM（波長分割多重）と光バースト処理によるフォトニックネットワーク

教授 三木 哲也

情報通信工学科

miki@ice.uec.ac.jp

<http://ftth.ice.uec.ac.jp>



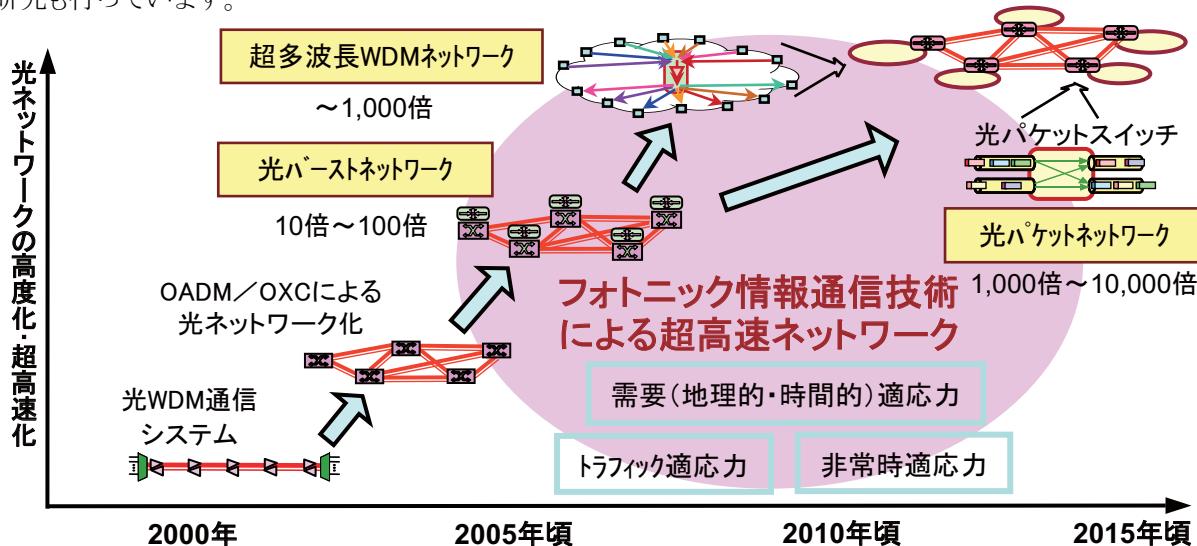
高度コミュニケーション社会の形成に求められる、超高速性と高いクオリティをもつ情報通信を実現するために、コヒーレント光科学をベースとするフォトニックネットワークのコンセプト創出と、それを現実のものとするための光信号処理や光システムの研究を行っています。

既存の光通信は、光ファイバーで2地点間を結んで高速のデジタル伝送を行ってはいるが、ほとんどの機能は依然としてエレクトロニクス技術に頼っており、これが通信速度やクオリティのボトルネックとなっています。超高速性や外乱を受けにくい点で本質的に優れているフォトニクスによって、全ての通信機能を実現するのがフォトニックネットワークです。これにより、将来の情報通信を飛躍的に高度化することが可能となります。

フォトニックネットワークを実現するための要素技術は、波長領域の処理として多波長の高安定・狭スペクトル光源、WDM(Wavelength Division Multiplex; 波長多重)、波長変換、空間光スイッチなどが必要です。また、時間領域の処理として超短光パルス発生、OTDM(Optical Time Division Multiplex; 光時分割多重)、超高速光ゲート、光メモリ、などが必要です。また、波長領域と時間領域を自由に組み合わせて、効率的なネットワークを構成するには WDM-OTDM 相互変換など、複合的な処理も必要となります。

研究の中心は、これらの波長領域と時間領域の処理技術を駆使して、ネットワーク高度化に最も適したフォトニックネットワークの構成法と、そのための光信号処理技術を確立することです。現在、取り組んでいる研究の一つは、1,000 波以上の超多波長(実用化されている技術は 100 波程度)の WDM 技術と広帯域な波長変換技術を実現することによる、波長域での自由度の大きいフォトニックネットワーク構成を具現化することです。もう一つの研究は、光バースト処理(複数パケットをまとめて瞬時に切り替え)を基本とする次世代インターネットに対応するフォトニックネットワーク構成法とそのための光信号処理技術を確立することです。

さらに将来の技術として、現在エレクトロニクス技術で実現しているルータの主要機能を全てフォトニクス技術で実現することによって、超高速の光パケットネットワークを実現することも狙っています。このためには、光メモリや、光論理回路、など高度なフォトニクス技術が必要になります。また、光通信と無線通信はいざれ融合してゆくことが必要と考えて、フォトニクスとワイヤレスを組み合わせた光・無線通信システムの研究も行っています。



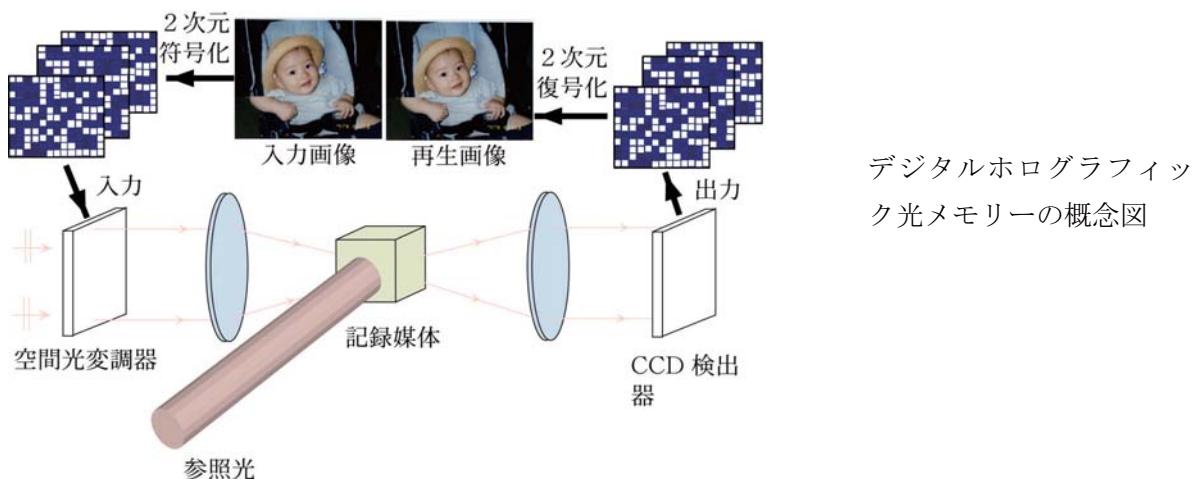
有機・無機複合ナノ光記録材料

電子工学専攻

教授 富田康生

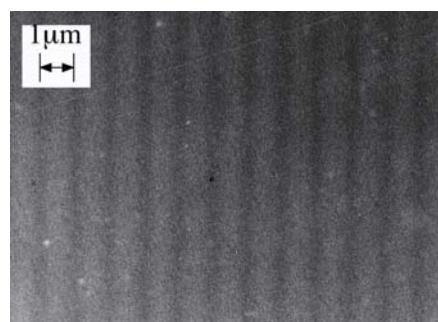
ytomita@ee.uec.ac.jp

<http://talbot.ee.uec.ac.jp/>



光波の位相情報の記録が可能なホログラフィーの技術を利用して3次元多重光記録を実現するホログラフィック光メモリーは、超高密度（テラバイト/cm³）、超高速転送速度（ギガビット/秒）、超短シーク時間（数10マイクロ秒以下）などの優れた潜在的性能を持ち、次世代の光メモリーとして期待されています。

ホログラフィック露光により形成された
SiO₂ナノ微粒子分布の周期構造のTEM像



この光メモリーの実用化には高記録感度と高ダイナミックレンジ（高屈折率変化）を有する光記録材料の実現が望まれます。本研究では、フォトポリマーに無機ナノ微粒子を分散させそのモフォロジーを光波で制御することで高回折効率・低収縮率のホログラフィック記録が実現できる有機・無機複合ホログラフィック光記録材料を開発しました。この材料では無機ナノ微粒子の選択自由度があるために回折光学素子やホログラフィック波長フィルターへの応用に加えて、フォトニック結晶や非線形周期構造材料などへの応用も期待されます。

コヒーレント加算による高出力 THz 光源とその応用

レーザー新世代研究センター

助教授 米田仁紀

yoneda@ils.uec.ac.jp

<http://www.ils.uec.ac.jp/~yoneda>



THz 周波数領域（光と電波の中間領域で波長にして $300\mu\text{m}$ 前後の電磁波）では、これまで強力な光源が存在していなかったため、光の領域でよく用いられる非線形光学研究があまり行われていません。

特にレーザー始動型の放射源は、駆動するレーザーもポンププローブ計測のプローブなどに利用できるために、高精度のコヒーレンス制御（フォノン、プラズモンなどの励起）が可能ですが、現在あるものは数 MW ピークまでで、これを超える高強度放射源の開発が望まれていました。THz 波を発生する方法の中で光伝導放射源は、光伝導体に超短パルスレーザーを照射して、立ち上がりの速い電気パルスを駆動させ、THz 波を発生させる方法です。（Fig.1）これは最も高い出力が得られている方式の一つですが、その出力密度は

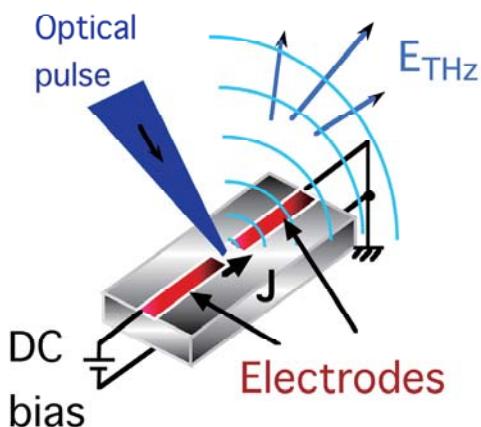


Fig. 1 光伝導型 THz 光源の概念図

印加する電界で制限されています。この電界強度は光伝導体のバンドギャップの広さと関係があり、広いバンドギャップを持った物質を高い光子エネルギーの超短パルスレーザーで駆動することが、高出力化への鍵となっています。ここでは、ダイヤモンドを用いて $2 \times 10^8 \text{ V/m}$ もの高電界を印加させる放射源を開発中で、これまでに 10^7 V/m の印加で最大の放射密度 (0.15 MW/cm^2) を達成し、電界の増加、照射レーザーの増強でこれまでより 2 衡以上高い THz 電磁波の発生を目指して実験を行っています。Fig.2 はその放射源の一例で 10^8 V/m という電界を cm オーダーの表面で実現させるために、 $20\mu\text{m}$ 幅の電極を並列に並べ、レーザーにより直列にスイッチさせ、コヒーレントに加算された THz 波を発生させています。

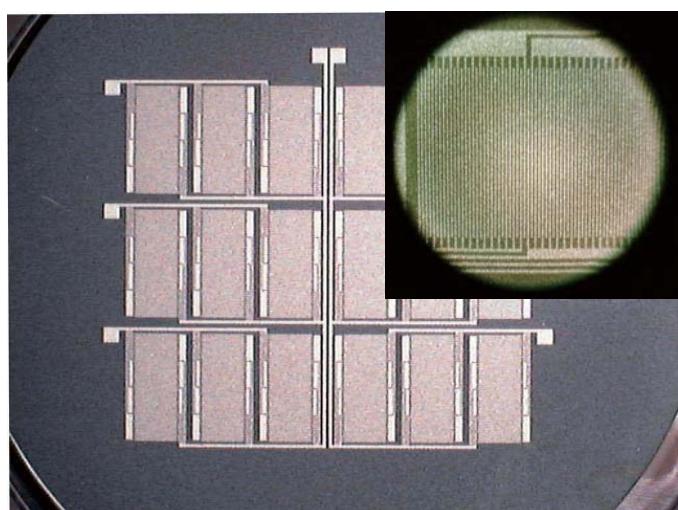


Fig. 2 コヒーレント加算型 THz ダイヤモンド放射源

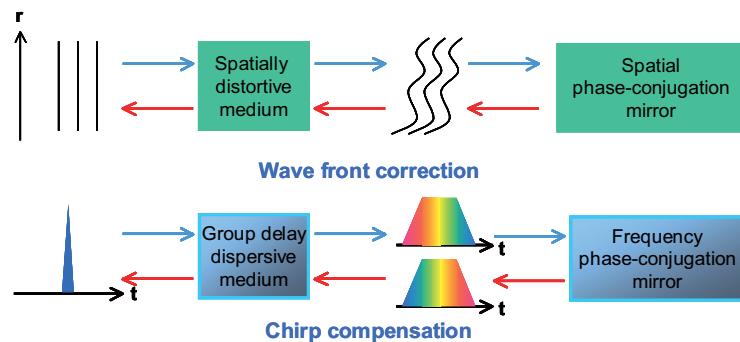
コヒーレンス変換による超短パルス光の光学制御

レーザー新世代研究センター

助教授 西岡 一

nishioka@ils.uec.ac.jp

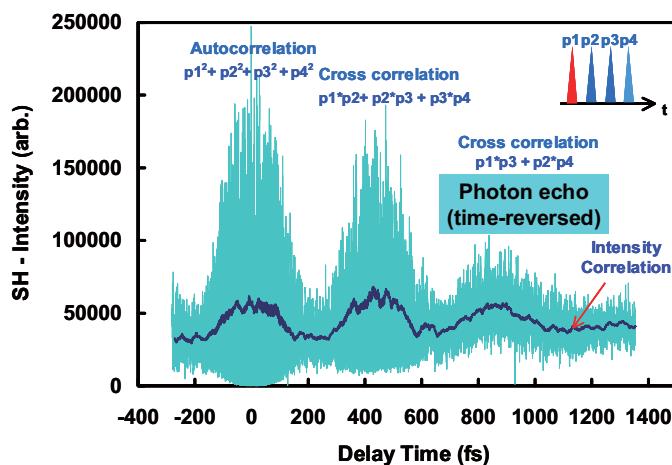
<http://alr.ils.uec.ac.jp/>



空間位相共役鏡と周波数位相共役鏡の違い

フェムト秒の超短パルス光は広い周波数スペクトルを持っているため、群遅延分散によりパルス拡がり（位相ひずみ）を生じます。周波数位相共役鏡はフーリエ成分の位相共役波（時間反転波）を生成します。時間反転波をもう一度、同じ群遅延媒質を通過させると位相ひずみは補償され元のパルス波形が再生されます。

フェムト秒時間反転パルスの生成



これまでこうした周波数位相共役波の発生には、周波数分解能を持つ非線形媒質が必要でしたが、本研究では時間多重に周波数分解することにより、非共鳴あるいは单一の共鳴波長を持つ非線形媒質でも周波数位相共役波の発生に成功しています。

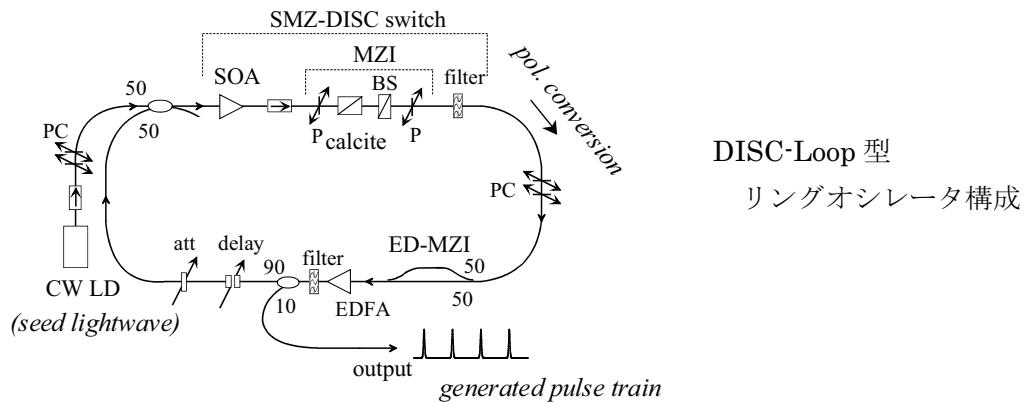
全光ゲートを応用した高周波光パルス光発生器

電子工学専攻

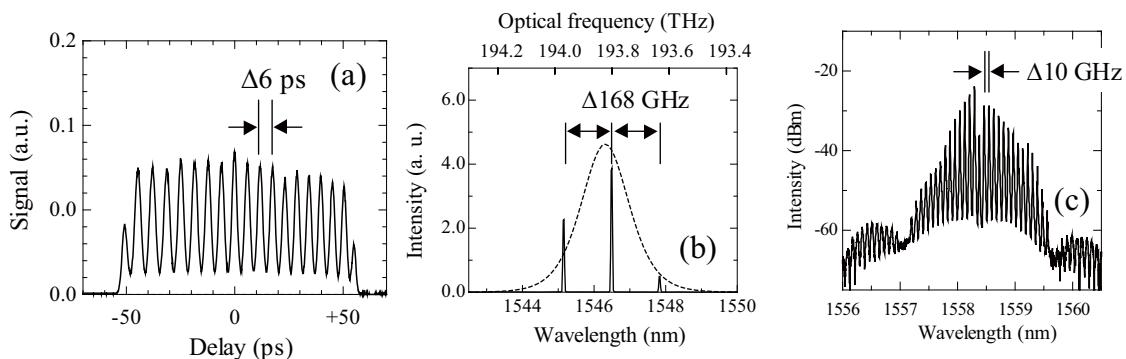
助教授 上野 芳康

ueno@ee.uec.ac.jp

<http://www.ee.uec.ac.jp/staff/ueno/ueno-j.html>



モードロックと異なる新しい光パルス発生メカニズム、及び、その高精度制御の研究を進めています。本研究独自の DISC-Loop 型リングオシレータが発生する光パルス列の中心光周波数・光パルス幅・繰返し周波数は、それぞれ、seed 光の光周波数・DISC ゲート窓時間幅・リング高次共振周波数により決定されます。



これまでに、オシレータモデルによる光パルス列収束の理論予測、及び、パルス発生の原理実証に成功しています。DISC ゲート単体の研究ではすでに、1.5ps, 168GHz の高速・高周波ゲート窓形成に成功しています。広帯域な光周波数帯を活用した高精度周波数制御への展開が、今後大いに期待されます。

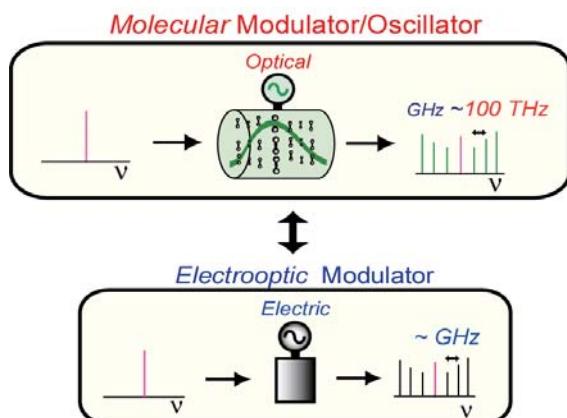
量子コヒーレンスの断熱生成と光学過程の制御

量子・物質工学科

助教授 桂川眞幸

katsura@pc.uec.ac.jp

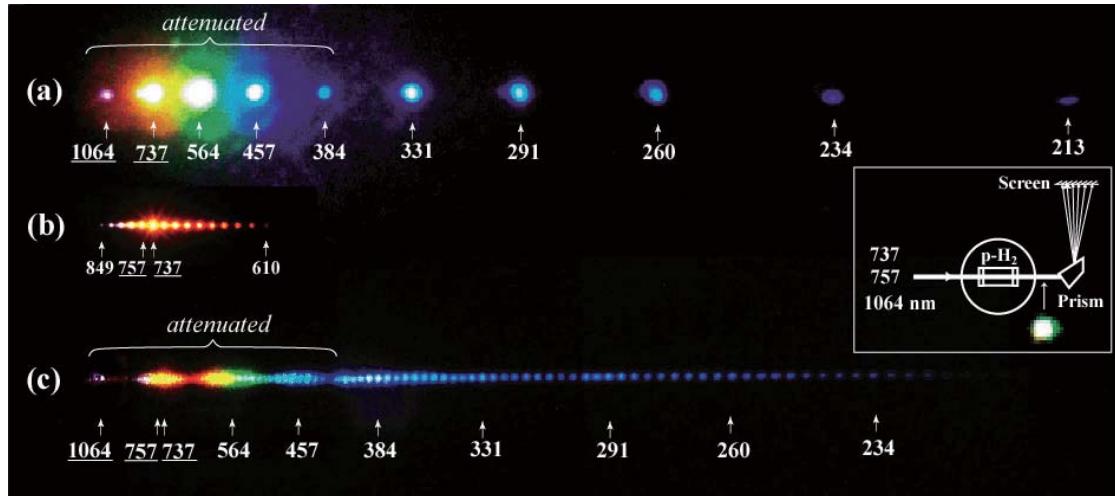
<http://kiji.pc.uec.ac.jp/>



ラマン過程を断熱的に時間発展させることで、 $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の高密度分子集団をほぼ完全にコヒーレントに振動、回転させることが可能です。

その分子状態は超高周波 ($\sim \text{GHz} \sim 100 \text{ THz}$) で動作する光の変調器として利用できます。

水素分子中に 125THz、及び 10THz の高周波振動子を実現し、それを用いて單一周波数光源を変調した結果です。 (a) 125 THz (b) 10 THz (c) 125 THz と 10 THz の同時変調。



発生したサイドバンド光の一つ一つは実用光源として利用可能な質を持っています。「中心周波数」、及び「繰り返し周波数」を広帯域に可変にできる新しい超短パルス光源の実現が期待されます。

量子コヒーレンスの断熱生成を基礎とする様々な光学過程と、それらを物性制御へ応用する研究を進めています。

ナノ結晶から作ったセラミックレーザー

レーザー新世代研究センター

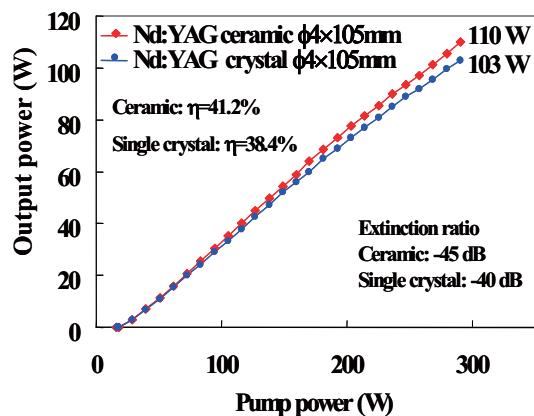
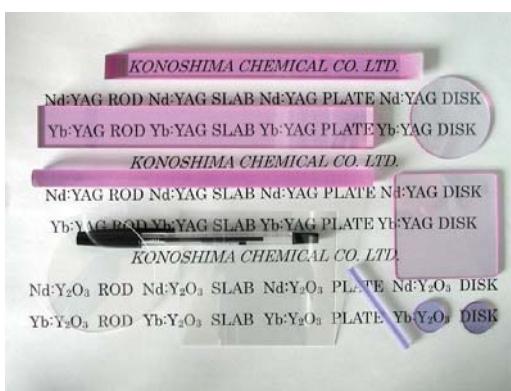
教授 植田憲一

ueda@ils.uec.ac.jp

http://www.ils.uec.ac.jp/~ueda_lab/index.html



日本を含む東アジアの諸国は古くから優れた陶磁器の製作技術を誇っており、東洋文化の背景ともなっています。セラミックスの定義は、技術の発展と共に変化します。我々はその究極ともいえる“光学結晶より透明で損失の少ないセラミック”の開発に成功し、最高品質が必要とされるレーザー材料への応用を展開しています。

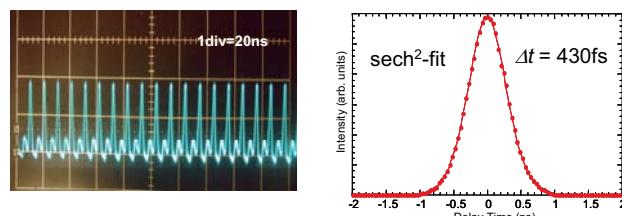


完全合成手法で作られた YAG 結晶の前駆体

を仮焼して作りだした 200nm の粒径の揃った単結晶粒子を材料として真空焼結をさせることにより、自然界で宝石が生まれるのと同様な固相結晶成長によって、完全透明セラミックレーザー材料を作り出します。高速結晶成長に見られる必然的な内部歪みや欠陥、結晶ずれがなく、ガラスのように均質なセラミック材料は、結果として、単結晶より優れた特性を発揮しました。キロワット出力の発生や 60 % の高効率動作、単結晶よりはるかに優秀な機械特性などを実証しました。最大の優位点であるサイズの拡大則では、メートルサイズのセラミックレーザーが可能になります。核融合用レーザーはセラミックレーザーでなくてはならないと考えています。

単結晶が困難な Yb:Y₂O₃ レーザーでは、LD 励起で高効率にモードロック発振を実現し、フーリエ限界パルスを発生しました。フェムト秒レーザー加工の本命は、セラミックレーザーになると考えられています。

セラミックレーザーが示した技術は単にレーザー応用だけではなく、結晶育成の技術を根本的に革新したものです。材料を含めて、人類が設計し、必要な要素、機能、デザインを実現できるセラミック



レーザー技術は、光のコヒーレント制御を進歩させる“日本発のオリジナル技術”です。

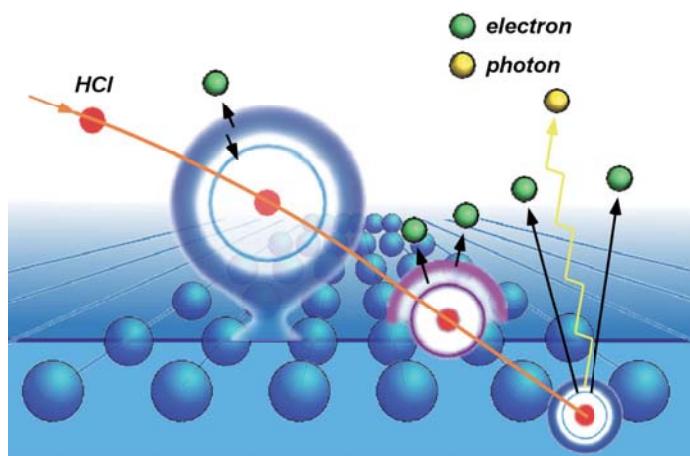
多価イオンプロセスによるナノ構造生成

レーザー新世代研究センター

教授 大谷 俊介

ohtani@ils.uec.ac.jp

<http://yebisu.ils.uec.ac.jp/>

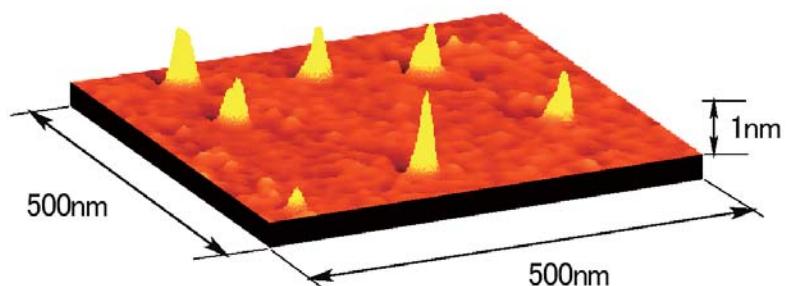


左図：多価イオンと固体表面との相互作用の様子。多価イオンの持つ膨大な内部エネルギーにより、局所的に劇的な改質が起こります。

多価イオンは「サブナノ」のサイズでありながら数10keVから数100keVという非常に大きな内部エネルギーを持っています。そのため、多価イオンの衝突した固体表面では、局所的な改質が起こり、周囲とは物性の異なるナノサイズの構造が生成されます。

Xe⁴⁴⁺ (4×10^5 m/s) on HOPG

右図：Xe⁴⁴⁺イオンが高配向性グラファイト(HOPG)表面上に形成する照射痕。高さ1nm程度の隆起一つ一つが一個の多価イオンにより形成された照射痕です。



このように物性の異なるナノサイズ物質相を周期的に配列することで、多価イオンプロセスをフォトニック結晶などのデバイス生成に応用することを目指しています。レーザー新世代研究センターは、独自に設計・建設した世界最高性能の低速多価イオン発生装置を有しており、他では成し得ない多価イオン研究を先駆的に行ってています。

光機能発現の向上を目指した半導体ナノ材料の創製と評価

量子・物質工学専攻

教授 豊田 太郎

toyoda@pc.uec.ac.jp



数ナノメートル（1ナノメートルは100万分の1ミリメートル）程度に小さくなった半導体（半導体ナノ粒子という）では、通常の大きさの半導体に比べて著しい機能性の向上、特に光に対する機能性向上が見られます。私共の研究は半導体ナノ粒子の光エネルギー変換過程と光機能性発現との関連性の解明を中心として、以下に示す課題を対象にしています。

- ① 高い効率を示す太陽電池を念頭に置いた、フラクタル状かつポーラス化した酸化物半導体 (TiO_2 , ZnO と SnO_2 の複合物) ナノ粒子の自己組織化に基づく創製と、それらを用いた光電極形成・評価を進めています (光エネルギー → 電気エネルギー)。
- ② 近年、上記の酸化物半導体ナノ粒子系に有機色素を吸着して変換効率を向上させることができます (分光増感)。私共は有機系の色素ではなく、母体のナノ粒子よりもさらに小さな無機化合物半導体のナノ粒子 (量子ドット) の粒径をコントロールしたものを作成し、上記の酸化物半導体系に吸着することで光電変換効率向上を目指しています。無機化合物半導体系は電荷分離が有機系色素系に比べて大きく、また一種類の材料だけで様々な領域の光を吸収出来ること、さらに環境に対して比較的安定という長所を持っています。
- ③ 高い発光効率を示す蛍光体材料を念頭に置き、遷移金属不純物 (Mn , Cu) を不純物として含む硫化物半導体 (ZnS) ナノ粒子の創製と評価を進めています。ナノ粒子中に置換された遷移金属不純物からは、従来のバルクの物と比較して10倍以上発光効率が増大することが知られています (光エネルギー → 光エネルギー)。私共は紫外線照射によりナノ粒子の表面改質を行うことで、さらに数倍発光効率が向上することを見出しています。

本研究の究極目標は、21世紀の重要な課題の一つと考えられる光エネルギーの有効利用の向上化にあります。一般に光エネルギー変換用の材料・デバイスの変換効率を目指すには、光吸収後のエネルギー放出機構（緩和過程）に関する情報が重要と考えられます。本研究では、吸収した光エネルギーが最終的に熱エネルギーに変換する過程（機能性の観点からは無駄となる過程）・電子移動を反映する光電流過程・さらに蛍光に変換する過程を総合的に評価し、これらのメカニズムの追求と併せて、高効率化を示す半導体ナノ材料とデバイスの創製に挑戦しています。

私共の研究に対して、平成15年度熱物性学会論文賞（題目：「透過型光音響分光法による半導体の熱物性と電子物性の評価」）と、平成15年度超音波シンポジウム奨励賞（題目：「光音響法と光電気化学電流法による $CdSe$ 量子ドットを吸着したナノ構造 TiO_2 電極の評価」）が授与されています。

光反射による結晶成長過程のモニターと制御

量子・物質工学専攻

教授 小林 直樹

naoki@pc.uec.ac.jp

<http://www.pc.uec.ac.jp/>



ガリウム砒素（GaAs）やガリウム・ナイトライド（GaN）などで代表される化合物半導体を用いたデバイスは、エピタキシャル成長によって構造を作製します。2次元電子ガスFETや量子井戸レーザなどの薄膜量子構造デバイスの作製法として、特に有機金属ガスを用いた気相成長法（MOCVDあるいはMOVPE）が実用的に広く用いられています。そこではナノメーターサイズでの層の厚さや組成、さらには量子ドットの大きさや密度をリアルタイムで計測し制御することが強く望まれています。

電子線を使うことがむずかしい気相成長では、成長表面の光反射をプローブに使うことによって、成長過程をリアルタイムにモニタリングしたり、それを用いた制御が可能になります。これまで、成長表面上での有機金属分子の分解過程や、成長中における表面の化学組成のその場観察（GaAsではAsリッチ、GaNではGaリッチ）に成功しています。現在、GaAs成長と比べ複雑なGaN成長過程の解明や、量子ドット成長など、成長するナノ構造の大きさや密度をリアルタイムで計測し制御することを試みています。

反射光の性質とモニター対象

光学干渉

成長表面と基板表面からの反射光が干渉
反射率が成長とともに振動

モニター対象

反射率の周期から、膜厚と成長速度を測定



Optical Interference
-Thickness Monitoring

レイリー散乱

波長より短い表面のラフネスにより
光が散乱
短い波長の光ほど表面のラフネスに
敏感

モニター対象

散乱による反射率の減少から
表面モホロジー(凹凸と密度)を観察



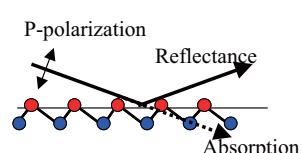
Rayleigh Scattering
-Roughness smaller than wavelength of probe light

表面光吸収

ブリュースター角入射でp偏光を用い
ると成長最表面の反射率の変化を敏感
に検出

モニター対象

成長最表面の誘電率変化を検出
→成長表面の化学量論比を測定



Surface PhotoAbsorption
-Surface stoichiometry

ナノ珪素系粒子のデバイスへの応用

電子工学専攻、電子情報学専攻

教授 野崎 真次

nozaki@ee.uec.ac.jp

<http://130.153.142.88/menu.html>



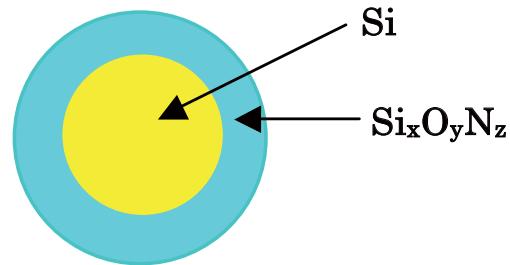
ナノ珪素系粒子とは、電子材料として欠かせないシリコンがナノメートル(10^{-9} m)オーダーの超微粒子となり、その周りが、右図のように酸化膜や窒化膜で覆われているものです。このような粒子では、シリコン半導体の中のキャリア（電子、正孔）やフォノンは三次元的に閉じ込められ、ナノ珪素系粒子では、シリコン核の表面が安定した理想的な量子ドットを形成しています。

シリコンも量子ドットになれば、新規な電子や光機能が期待でき、これまで以上にシリコンの重要性は高まります。従来、シリコンでは実現できなかつた発光デバイスをはじめ、コヒーレントな光との相互作用により室温でシリコン核を酸化させ、量子ドットのサイズを小さくする光酸化が可能です。

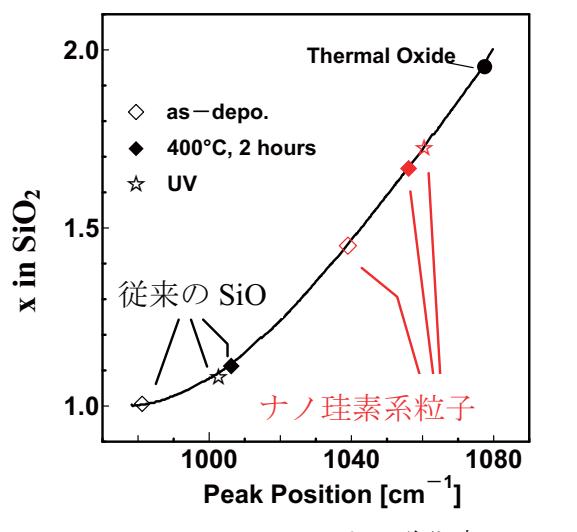
作製したナノ珪素系粒子のラマンスペクトルより、量子ドット内でのフォノンの閉じ込め効果が確認され、シリコンナノ粒子の粒径が 2 nm であることが判明しました。このナノ珪素系粒子を真空蒸着し、UV 光を照射すると、シリコンの熱酸化膜(Thermal Oxide)に匹敵する良好な酸化膜が得られています。右図は、赤外吸収分光(FTIR)スペクトルでシリコンの酸化を示すピーク位置と SiO_x の x を示すものですが、ナノ珪素系粒子の場合、光酸化により x が化学量論比 2 に非常に近づいています。

従来の SiO の蒸着では、良好な酸化膜が得られませんでしたが、本研究で示した様に、ナノ珪素系粒子の蒸着により室温で、デバイスプロセスに利用できる良質な酸化膜が作製できるという画期的な成果をあげました。

今後は、VLSI におけるゲート酸化膜として利用できるようさらなる高品質化をめざし、またナノ珪素粒子そのものの電子、光機能を探求していきます。



ナノ珪素系粒子の構造（量子ドット）



FTIR による酸化度

ナノスケール系の光物性

量子・物質工学専攻

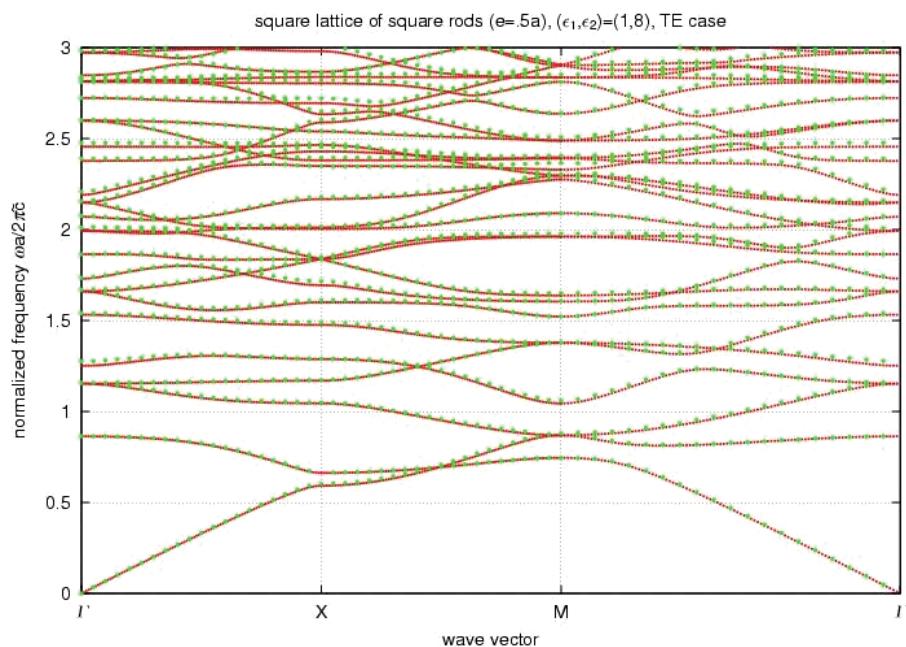
助教授 大淵泰司

ohfuti@pc.uec.ac.jp

<http://enju.pc.uec.ac.jp/>



ナノスケール系の光物性の理論的な研究を行っています。元々はナノスケール系の特徴である非局所性が出易いサイズ量子化された系に興味を持っていますが、最近では伝統的な誘電媒質で構成されたフォトニック結晶のバンド構造の高精度計算も行っています。改良された平面波展開法と FD-TD 法の結果を比較することで計算精度を確認することができるようになりました。今後は非線形媒質を含んだフォトニック結晶やフォトニック結晶を舞台としたナノスケール系の光物性の可能性を考えて行きたいと思っています。



分子性材料を基調としたフォトニックデバイス開発

量子・物質工学専攻

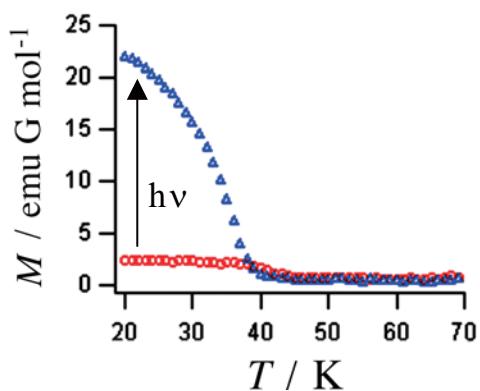
助教授 石田 尚行

ishi@pc.uec.ac.jp

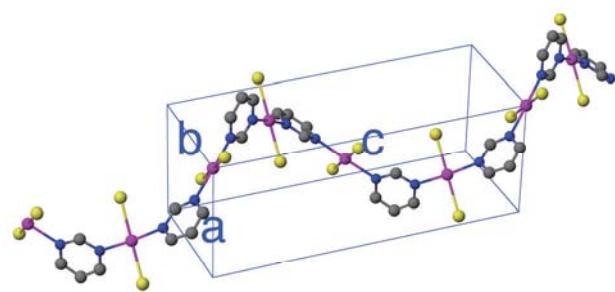
<http://ttf.pc.uec.ac.jp/>



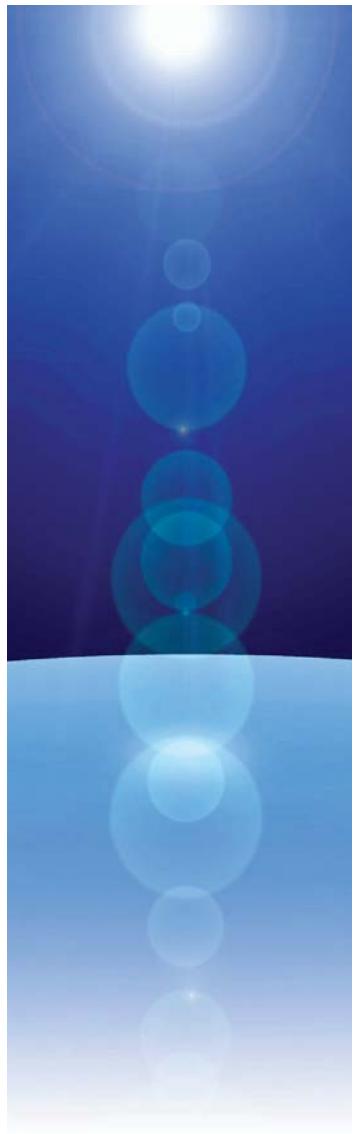
原子を自由に組み立てて、好みの分子を創るのは合成化学の役割です。しかし電子物性材料の機能性は、物質の持つ結晶構造の周期性や対称性が重要となってきますので、分子を組み立てて分子システムを創るという、一段高次元のセンスも要求されます。有機・分子性材料を用いた(超)伝導体や強磁性体の開発現場では、分子に乗っている電荷やスピニ相互間の相関を制御するために、結晶工学、超分子科学の知恵が総動員されます。筆者は分子性磁性体の開発に携わってきましたが、この分野は特に結晶工学がものを言います。現在は、外的刺激として光照射を用いた磁性のスイッチや、磁気光学効果に興味があります。具体的には、光誘起磁化を示す基底反強磁性物質(左下図)や、光学的な透明性を有するキラル磁石の開発(右下図)などを手がけています。ここでは架橋性配位子を上手に用いて遷移金属錯体を形成させることにより、三次元ネットワークを一気に構築しています。超分子「化学」的に物性を制御することも行っています。



光誘起磁化の例です。磁気転移温度の39Kより下の領域で、光照射すると磁化が増大します。



キラルな磁性体の一例の結晶構造図です。転移温度は約5Kです。螺旋モチーフを抜き出して書いてありますが、三次元ネットワークをもつ物質です。



お問い合わせ

電気通信大学
21世紀COEプログラム
(コヒーレント光科学の展開)

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1
TEL:0424-43-5454
FAX:0424-43-5507
<http://www.ils.uec.ac.jp/COEcoherent/>
e-mail: COE@ils.uec.ac.jp

