

特

集

ナノデバイス・

機能創造理工学科 教授 下村 和彦

物性研究の最前線

スマートフォン、パソコン、テレビ、そして光ファイバ通信など、エレクトロニクス、ICT分野は半導体デバイスの高機能化と共に発展してきました。21世紀においてさらなるシステムの高度化を目指すとき、革新的なデバイスが求められますが、これは新しい材料と極限的な物性の発現によってもたらされます。ナノテクノロジーはナノサイズ of 材料・構造に新規な物性・機能を発現させる根幹的な科学技術として発展してきました。エレクトロニクスの分野ではトランジスタや集積回路、レーザーなどナノテクノロジーを駆使したデバイスはすでに製品化されていますが、時代が求める「超高機能」、「超高速」、「超微細」、「超低消費電力」といった特長を持つデバイス開発には、ナノ材料とナノ物性のブレークスルーは必須となります。



「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」は私立大学が特色ある研究を実施するため、その研究基盤の形成を支援する事業です。平成23年度より本学の研究プロジェクトとして「新規ナノ構造によるナノデバイス・物性研究の拠点形成」(代表・下村和彦)が採択されました。このプロジェクトには理工学部の7名の研究者が参画し、0次元量子構造である量子ドット、1次元量子構造であるナノコラム、ナノワイヤ、2次元量子構造であるナノウォール、超格子構造の結晶成長^{※1}を行い、高品質化を進めると共に、これらナノ構造の光電子・量子物性の解明とナノ物性新現象の探索を行っています。さらに、新規ナノ構造による革新的な光・電子デバイス、電子・光融合デバイスの研究を推進し、革新的な光・電子ナノデバイスの基盤技術を開拓することを目的としています。本特集では、7チームの研究テーマとその進展状況を紹介しします。

用語解説・参考文献

※1 0次元、1次元、2次元量子構造

ナノメートルオーダーの薄膜を作製すると、電子は縦方向に閉じ込められ、2次元(平面)的にしか移動できなくなります。このような構造や状態が「量子井戸」であり、2次元量子構造と呼ばれます。さらに横方向に縮めていくと、2次元だった平面が1次元状態(線状)に閉じ込められ、これが「量子細線、ナノワイヤ、ナノコラム」と呼ばれるもので、電子は1方向にしか移動できなくなり、1次元量子構造と呼ばれます。さらに、量子細線の長さ方向を縮めていき、電子の波長程度の大きさにしてしまうと、電子は縦／横／高さのどちらの方向にも動けなくなり、完全に閉じ込められた「0次元」の世界になってしまいます。このように3方向から行き場をなくした状態が「量子ドット」となり、0次元量子構造と呼ばれます。

GaN ナノコラム光デバイス

電気・電子工学領域 教授 岸野 克巳

GaN ナノコラム^{※2}は、上智大学が1997年に最初に論文発表し、先導的に研究を展開してきたナノ結晶です。InGaN/GaN系ナノコラム^{※2}では、ナノ結晶効果によって結晶欠陥（貫通転位）が含まれない高品質結晶が再現性良く得られ、格子定数差に起因する結晶歪が低減され、デバイス作製に一般的に用いられる平坦膜薄膜結晶を凌駕する優れた発光特性が得られます。本研究では、100–300nmの範囲でコラム径を超微細・高精度に制御して、規則配列 GaN ナノコラムの極限制御を行い、ナノコラム内に InGaN/GaN 発光層を作り込んでいます。ナノ結晶では、 $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ といった微小領域でみても、およそ30万個の多数本のナノコラムが存在しますが、この中でもナノコラム成長の欠陥は6ヶ所しか見つからない程の高度の結晶成長制御を達成しています。

通常の平坦膜の InGaN 系結晶の発光効率は、青、緑、さらに赤色になるとともに激減し、赤色域はほとんど光りません。

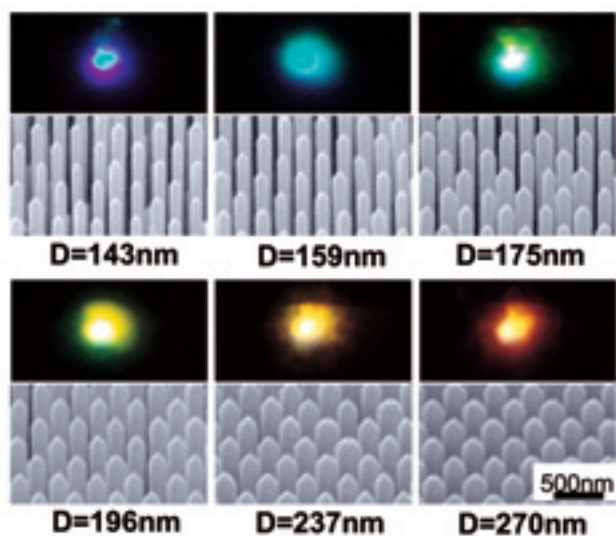


図1 規則配列ナノコラムの発光色制御

RFプラズマ分子線エピタキシー^{※4}による選択成長法で規則配列 GaN ナノコラムを成長させ、ナノコラム上部に InGaN/GaN 系多重量子井戸 (MQW) 構造を内在化させています。コラム径 (D) は 10nm 刻みで自由に制御することができ、143nm から 270nm の範囲で変化させています。コラム径によって、InGaN 量子井戸の In 組成比を変化させることができ、ここでは青色～赤色域発光を得ています。この手法は異なる発光色の LED の集積化に寄与し、将来の RGB 三原色集積型 LED 実現への基礎技術です。

※2 GaN ナノコラムによる発光特性や技術的背景の詳細は、『岸野 克巳、“ナノコラム結晶がもたらす三原色発光デバイス—ナノテクノロジー研究センターの挑戦—”, *Sophia Sci-Tech* 24 (2013) 8-13』を参照。

※3 Ramesh Vadivelu, Yusuke Igawa, and Katsumi Kishino, “633nm Red Emissions from InGaN Nanocolumn Light-Emitting Diode by Radio Frequency Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy”, *Japanese Journal of Applied Physics* 52 (2013) 08JE18.

そこで赤色域の高輝度化が得られれば、光の三原色（赤、緑、青）の InGaN 系 LED 実現といった産業界垂涎のテーマを達成することができます。最近、赤色域（波長 600–662nm）ナノコラム結晶の作製に成功しました^{※3}。波長 600–613nm で高い内部量子効率 17–22% を実証し、波長 633nm の赤色ナノコラム LED 動作を実現したことで、期待が高まっています。

一方、InGaN 発光層を含む規則配列ナノコラム^{※2}は、図1に示すように、コラム径とともに発光色が変化し、可視全域をカバーすることができます。この現象を活用して、コラム径の異なる4個の規則配列ナノコラム LED を同一基板上に作製し、コラム径の違いで発光色を変化させることにより、二色（緑、橙）あるいは四色（青、空色、緑、黄）集積型ナノコラム LED を試作することに成功しました。この成果を展開することで、近い将来には三原色集積型 LED といった「夢の新世代 LED」が実現されることが期待されます。さらに、ナノコラム規則配列によるフォトリソ結晶効果を発現させ、コラム径による発光色制御と併用することで、将来的にはスペクトル幅が狭く、鋭い放射ビーム特性をもつ革新的な LED へと発展することが考えられます。

GaN ナノウォール光・電子デバイス

電気・電子工学領域 准教授 菊池 昭彦

窒化物半導体ナノ結晶は、電子デバイス応用においても魅力的な材料として期待されています。本研究では、上智大学が開発した GaN ナノ結晶の選択成長技術を駆使して、板状ナノ結晶（ナノウォール）を用いた Fin 型電界効果トランジスタ (Fin-FET) ^{※5} を作製しました。ナノウォールは結晶欠陥フリーなので優れたトランジスタ特性の発現が期待されます。

図2は、結晶成長後の AlGaIn/GaN ナノウォール結晶の電子顕微鏡像です。中央に幅 150nm、長さ $20\mu\text{m}$ 、高さ $1.2\mu\text{m}$ の薄い板状ナノ結晶が形成されており、ここが電流の流れる導電性チャネルとなります。GaN ナノウォールの表面には厚さ約 20nm の AlGaIn 層があり、GaN との界面に高い電子移動の二次元電子ガスが形成されます。左右の Source Pad と Drain Pad はチャネルに電流を流す電極用パッド、上下の Gate Pad はチャネルにゲート電圧 (V_g) を印加してチャネルに流れる電流 (I_d) を制御する為の電極用パッドです。成長した

※4 RFプラズマ分子線エピタキシー：超高真空装置内で、GaやAlの原子状蒸気ビームと活性化した窒素を原料として、AlGaInなどの半導体結晶を成長する装置です。原子層レベルの膜厚制御が可能です。

※5 Fin-FET：電流を流す板状チャネル部の上左右の三方向から制御電圧（ゲート電圧）を印加する方式のFET構造。最新のシリコンLSIで採用され始めています。

ウェハ表面全体に Al_2O_3 絶縁膜を 20nm 堆積後、電極を形成して Fin-FET を作製しました。

図 3 は、ナノウォール Fin-FET で得られた静特性 (I_d - V_{ds} 特性) であり、ゲート電圧 (V_g) を変えるとドレイン電流が変化することが確認されました。これにより AlGaIn/GaN ナノウォール Fin-FET の最初の動作実証に成功しました^{※6}。

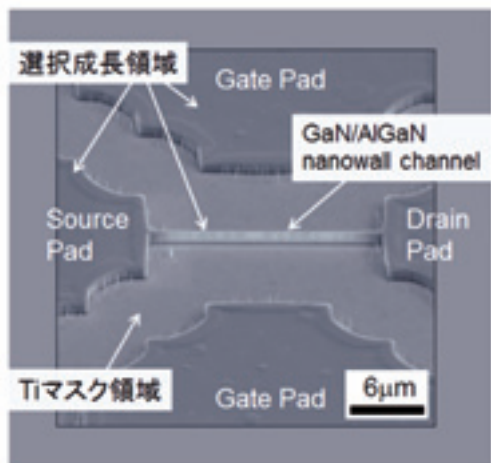


図2 RFプラズマ分子線エピタキシー^{※4}による選択成長法で成長したAlGaIn/GaNナノウォールFin-FET結晶の電子顕微鏡写真

中央の細い板状結晶がAlGaIn/GaNナノウォールであり、パッドを含めた写真の構造を1回の選択成長で作製できます。

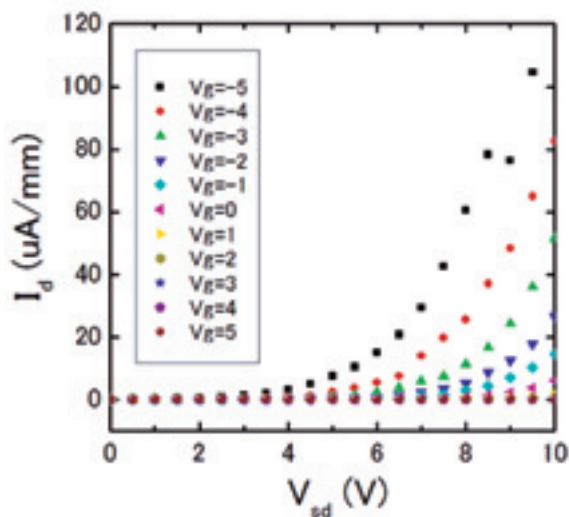


図3 ナノウォールFETの静特性 (I_d - V_{ds} 特性)

ナノウォール部に印加するゲート電圧 (V_g) を変えるとナノウォールを流れるドレイン電流 (I_d) を制御できることが確認されました。これはナノウォールFin-FETの最初の実証です。

※6 菊池 昭彦、井上 大輔、山野 晃司、蜂屋 大樹、岸野 克巳、“TiマスクRF-MBE選択成長法によるAlGaIn/GaNナノウォールFETの作製”、第59回応用物理学関係連合講演会 (2012) 16p-F12-2.

上記以外にも、InGaN/GaN ナノウォールによるナノレーザ、水素雰囲気下での GaN の熱分解を利用したナノ構造作製技術、Ag/ZnO 多層構造による高性能透明導電膜、誘電体無機 / 有機ハイブリッド LED、低コスト大面積化が期待される三電極型静電塗布法 (NMD 法) など、多角的に研究を進めており、これら要素技術を複合したハイブリッド型ナノデバイスの開発を目指しています。

II-VI 族ナノ構造

電気・電子工学領域 准教授 野村 一郎

ZnCdSe/BeZnTe 超格子の作製とデバイスへの応用について研究を行っています^{※7}。超格子とは、非常に薄い (原子数個分に当たる数ナノメートル (nm) の厚さ) 半導体の薄膜を交互に積層した半導体人工結晶のことです。分子線エピタキシー (MBE) 法^{※4}と呼ばれる高度な半導体結晶成長法を用いることで作製することができます。上記の超格子は、ZnCdSe と BeZnTe という II-VI 族化合物半導体^{※8} の薄膜を用いて作製されますが、これには様々な注目すべき特性が備わっています。その一つは、この超格子の各層の厚さを変えるだけで、青、緑、赤の可視光から赤外光といった幅広い波長帯の発光や光の吸収が得られることです。これを利用すると、例えば図 4 に

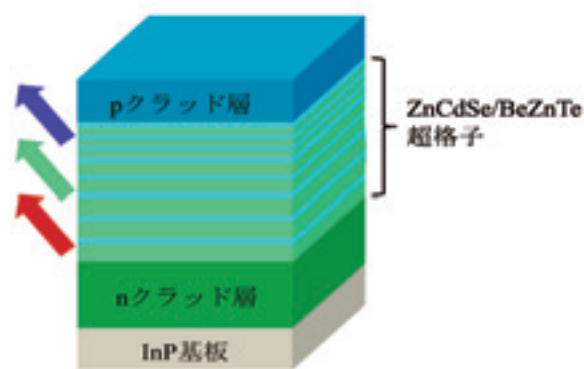


図4 ZnCdSe/BeZnTe 超格子を用いた多色 (青、緑、赤) 発光 LED の構造

p クラッド層と n クラッド層の間に層厚の異なる 3 種類の ZnCdSe/BeZnTe 超格子が内在しており、各々の超格子から同時に異なる発光 (青、緑、赤など) が得られる構造となっています。

※7 Keisuke Murakami, Ichirou Nomura, Toshiki Kobayashi, Tomohiro Shiraiishi, Shingo Takamatsu, and Katsumi Kishino, “Wide-Range Visible Luminescence of ZnCdSe/BeZnTe Type-II Superlattices Grown on InP Substrates”, 16th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2013) (2013) Tu-P27.

※8 II族元素 (Be, Zn, Cd など) と VI族元素 (Se, Te など) を組み合わせてできる化合物半導体。代表的なものに ZnSe (セレン化亜鉛) があります。

示したように、1つの発光ダイオード(LED)から青、緑、赤の三原色発光が得られ、色合いを様々に変えられる高性能な白色LEDが得られる可能性があります。図において、“pクラッド層”と“nクラッド層”に挟まれた縞状の部分がZnCdSe/BeZnTe超格子となっています。ここで、黄緑色の部分がZnCdSe層、水色の部分がBeZnTe層です。更にこの超格子を詳細に見ると、ZnCdSe層(黄緑)とBeZnTe層(水色)の層の厚さが少しずつ変化していることがわかります。このように各層厚を変えることで、赤、緑、青のように発光色を制御することができます。ここで膜厚は、BeZnTe層はおよそ1.8nmであり、ZnCdSeは0.3から1.5nmに変化させています。ZnCdSe/BeZnTe超格子はこれ以外にも、赤外光に対応することから太陽電池への応用も期待されており^{*9}、更にサブバンド間遷移という手法を用いると光通信波長帯での発光、光制御、光検知に対応する超高速デバイスへと利用される展開も考えられます。このようにZnCdSe/BeZnTe超格子は光エレクトロニクス分野において非常に魅力的な特性を秘めています。

InAs 量子ドット・ナノワイヤ

電気・電子工学領域 教授 下村 和彦

量子ドットは半導体原子が数百個から数千個集まった10数nm程度の小さな塊です。量子ドット内部では、電子は3次元方向から移動が制限された状態になり、そのエネルギー準位は量子ドットの大きさによって変化します。我々は有機金属気相成長法^{*10}によるStranski-Krastanov(S-K)成長モードを用いて自己組織的な量子ドットを作製しており(図5)、その大きさを広範囲で制御することにより、非常に広い波長範囲で発光するLEDを開発しています。その制御には選択成長とダブルキャップ法を用いています。選択成長とは、半導体基板上にSiO₂などの非晶質を用いて部分的にマスクを形成し、マスクの無い半導体が露出した部分に選択的に結晶成長させる技術です^{*11}。このマスク幅を変えると結晶成長速度を制御することができ、基板内で厚さの異なる、すなわちエネルギー準位の異なる量子構造を得ることが可能になります。また、S-K成長モードにおいては量子ドットの高さにばらつきがありますが、高さを均一化するための方法としてキャップ層を2段階で成長するダブルキャップ法があります。

^{*9} Tomohiro Shiraishi, Ichirou Nomura, Keisuke Murakami, Shingo Takamatsu, Toshiki Kobayashi, and Katsumi Kishino, "Formation of Indium Tin Oxide (ITO) Transparent Electrodes by Magnetron Sputtering for II-VI Compound Semiconductor Optical Devices on InP Substrates", *16th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2013)* (2013) We-P6.

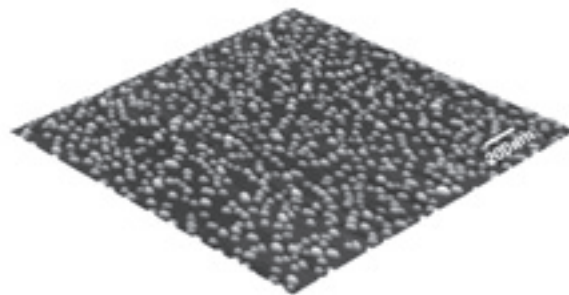


図5 量子ドットの原子間力顕微鏡像

直径50nm、高さ8nm程度の円錐状のInAs量子ドットが1cm²あたり2×10¹⁰個あります。

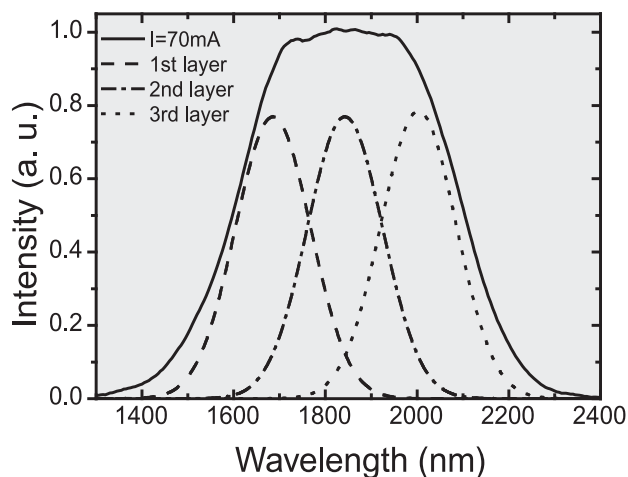


図6 広帯域量子ドットLEDのスペクトル

16本のアレイ導波路構造で高さの異なる3層量子ドットLEDに70mAの電流を流した時の波長(グラフ横軸)に対する光強度(グラフ縦軸)。層ごとに発光波長ピークは破線のようになりますが予想され、すべての層からの発光強度を合わせた測定結果が実線になります。

これらの技術を組み合わせて、導波路が16本平行に並び、片端のマスク幅を広くした非対称アレイ導波路マスクにS-K成長により量子ドット構造を形成します。この時、マスクの非対称性からアレイ導波路の成長速度はそれぞれ変化し、そしてダブルキャップ法により量子ドットの高さをアレイ導波路ごとに制御することが可能となります。さらに、3層の量子ドット構造において層ごとに高さを変えます。すなわち、アレイ導波路の横方向と導波路内の垂直方向(層方向)に量子ドットの高さ(=エネルギー準位)を制御することにより、広帯域で発光するLEDの開発に成功しました。このLEDは発光波長帯域500nm以上を持ち、そして発光パワーの最大値がスペクトル上で平坦なフラットトップスペクトルを有しています^{*12}(図6)。

^{*10} 有機金属気相成長法: 原子層レベルの膜を作製する有力な成長法です。有機金属とは金属原子と炭素原子との間に直接結合を持つ化合物であり、常温では液体または固体ですが、飽和蒸気圧が比較的高く、水素などのガスをキャリアガスとして用いれば、結晶成長には十分な量の成長用原料をガスとして安定に供給できます。また熱力学的には不安定で、加熱によって分解され、金属を遊離します。この性質を利用して、加熱した基板結晶表面にⅢ族およびⅤ族の有機金属化合物を同時に供給し、エビタキシャル成長を生じさせます。

ナノワイヤ/CMOS 異種集積化技術

電気・電子工学領域 教授 和保 孝夫

現在、情報処理 / 通信機器で使われている集積回路にはシリコンを用いた CMOS 技術^{※13}が利用されています。過去 50 年あまりで、集積回路を構成する素子の微細化が進み、性能が驚異的に向上してきました。しかし今日の素子寸法は原子スケールに迫っており、微細化による性能向上には限界が見えています。その限界を打破するため、新しい材料と組み合わせた画期的なデバイスの探索が始まっています。本研究では従来の CMOS 技術では使用されていなかった化合物半導体に着目し、それらを組み合わせることで新しい機能の実現を目指しています。

本研究では化合物半導体としてナノワイヤ形状を有する InAs^{※1}を利用しています。バルク材料と比較してナノワイヤは体積に対する表面積の割合が大きく、その物性が表面の性質に大きく左右されます。特に、表面に化学物質が吸着した場合、ナノワイヤの電気伝導率が変化することが報告されていて、これを利用すれば高感度化学センサが実現できると期待されています。一方、表面の原子配列が乱れているため、ナノワイヤ形状にすると電気伝導率が低下してしまう材料が多くあります。InAs の表面には電気伝導層が自発的に形成されるため、ナノワイヤにしても良好な電気伝導率が得られることを確認しています。

InAs ナノワイヤは有機金属気相成長法^{※10}を用いて成長します。しかし、CMOS 集積回路が搭載されたシリコン基板上に直接成長させることが困難なため、別の基板上に成長させたものを移し替える操作をします。ナノワイヤと集積回路との電気的な接続を確保するためには、予め決められた場所にナノワイヤを配置する必要があります。そこで、その場所だけに電界を発生させナノワイヤを引き寄せる電界支援自己整合法 (Field-Assisted Self Assembly: FASA)^{※14}を開発しました。シリコン基板上にはアナログ / デジタル (A/D) 変換器を搭載し、InAs ナノワイヤの抵抗率変化をデジタル的に高精度で検知することに成功しました^{※15}。A/D 変換器としては、本研究室で独自に設計した $\Delta\Sigma$ 変調器を使いました。

従来、ナノワイヤと CMOS 回路を別々に用意し、それらをケーブルで接続していたため、省電力化、高感度化は難しい課題

でした。今回、それらを同じシリコン基板上に集積化できたことで、低消費電力高感度センサの実現に見通しが得られました。将来的には、環境モニタや生体センサへの応用が期待できます。

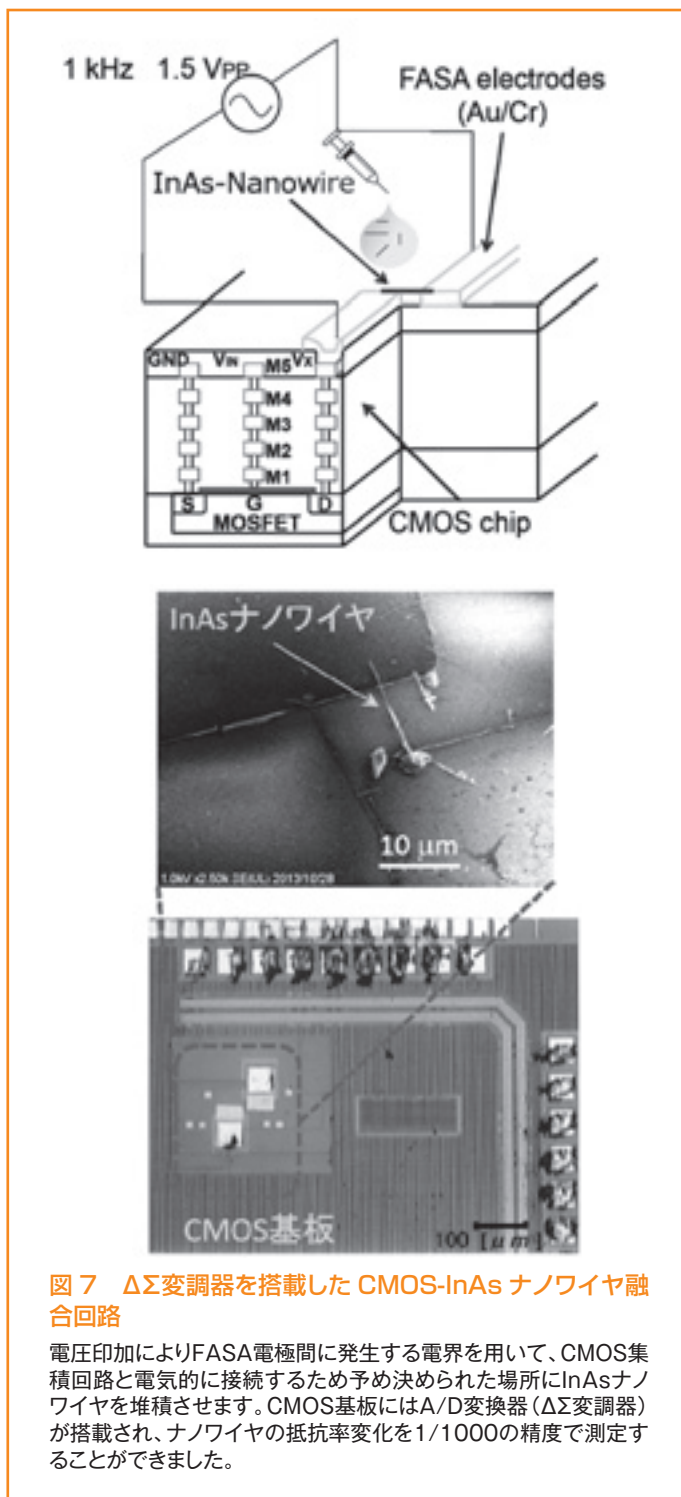


図 7 $\Delta\Sigma$ 変調器を搭載した CMOS-InAs ナノワイヤ融合回路

電圧印加により FASA 電極間に発生する電界を用いて、CMOS 集積回路と電気的に接続するため予め決められた場所に InAs ナノワイヤを堆積させます。CMOS 基板には A/D 変換器 ($\Delta\Sigma$ 変調器) が搭載され、ナノワイヤの抵抗率変化を 1/1000 の精度で測定することができました。

※11 Tatsuya Kihara, Yuichi Nitta, Hiroaki Suda, Kazunori Miki, and Kazuhiko Shimomura, "Wavelength Control of Arrayed Waveguide by MOVPE Selective Area Growth", *Journal of Crystal Growth* 221 (2000) 196-200.

※12 Shohei Yoshikawa, Tomomitsu Saegusa, Yuto Iwane, Masayuki Yamauchi, and Kazuhiko Shimomura, "Flat-Topped Emission with Spectral Width above 500 nm from InAs/InP Quantum Dot Waveguide Array Light-Emitting Diode", *Applied Physics Express* 5 (2012) 092103.

※13 CMOS 技術 (Complementary MOS, 相補型 MOS): n 型半導体と p 型半導体を組み合わせることで低消費電力動作を実現した集積回路作製技術。MOS とは Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (金属酸化半導体電界効果型トランジスタ) の略称で、情報を担っている電気信号を制御するため使われるトランジスタです。

単電子・単一光子融合デバイス

電気・電子工学領域 准教授 中岡 俊裕

現在、パソコンに代表される情報処理素子の性能向上に物理的な限界が近づいており、世界中でこれを打破するための取り組みが進められています。これに向けた重要な技術として、1個の電子を操作する「単電子制御^{*16}技術」、「光と電子の融合技術」、「これまでのトランジスタとは異なるまったく新しい原理に基づいた素子」といった3つのテーマがそれぞれ活発に研究されています。本研究では、これらポストスケーリングとよばれる機能を1つ1つではなく、1つの素子においてまとめて実現する融合することを目指しています。異分野の架け橋となることで、量子力学に基づいた素子、新しいメモリへの応用を進めます。

一般に電子輸送デバイスにおいては、優れた光学特性を引き出せず、発光（光子発生）素子においては電子制御が困難であるというデバイス機能上のトレードオフが存在します。本

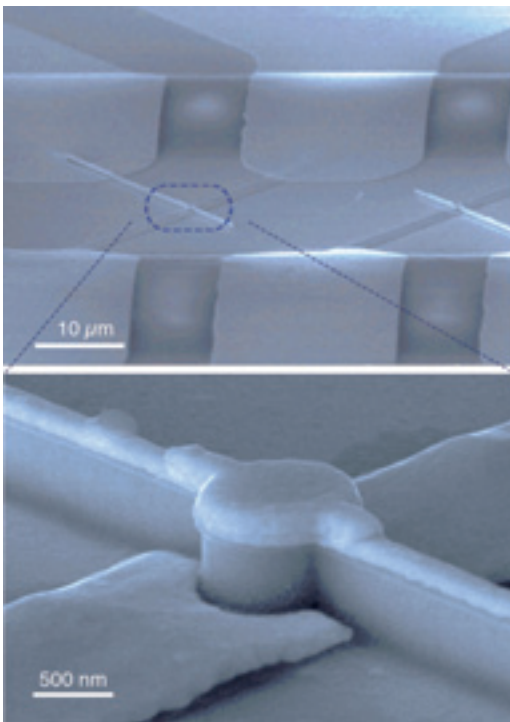


図8 縦型量子ドット単一光子素子

半導体微細加工技術を駆使して作製した「縦型素子」で、量子力学的な光である単一光子をゲートにより制御することのできる新しいLEDです。

※14 Kai Blekker, René Richter, Ryosuke Oda, Satoshi Taniyama, Oliver Benner, Gregor Keller, Benjamin Münstermann, Andrey Lysov, Ingo Regolin, Takao Waho, and Werner Prost, "InAs Nanowire Circuits Fabricated by Field-Assisted Self-Assembly on a Host Substrate", *IEICE Transactions on Electronics* E95-C (2012) 1369-1375.

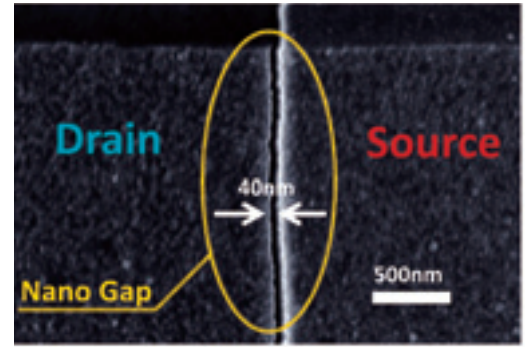


図9 自然酸化 Al_xO_{1-x} を用いた横型ナノギャップ素子

今回メモリ動作を確認できた「横型素子」で、地球上にふんだんにあるアルミニウムを自然酸化させるという、環境に優しくかつ簡便な手法で作製することができました。

研究では、このトレードオフを解消し、上記3技術融合プラットフォームを担い得る、「横型素子」と「縦型素子」を開発しました。

図8の縦型素子は、前項でも説明のあった量子ドットを用いた電流注入型量子ドット単一光子素子^{*17}であり、量子ドット内の電子を1個の単位で制御することにより、「(長距離)離れた2素子間の量子もつれ」に適した単一光子を発生するLEDです。縦型素子の特徴であるサイドゲート制御によって、電流注入電極とは独立した電子状態制御が可能となります。量子もつれ生成に適した波長制御が可能で、現在素子最適化を進めています。図9の横型素子はフォトリソグラフィーのみで作製したナノギャップ電極^{*18}を自然酸化アルミ Al_xO_{1-x} 膜に適用したもので、ギャップ間隔に依存したユニポーラ型、バイポーラ型の抵抗変化を観測しています。メモリ動作の解明と将来のローコストかつスループットの高いメモリとして研究を進めています。

ナノ光物性・非線形光学

物理学領域 教授 江馬 一弘

ナノ結晶において発現する光・電子物性現象を解明することは、新しい機能を持つ光・電子デバイスの開拓へとつながります。本プロジェクトでは、無機有機ハイブリッドナノ構造の光物性とナノコラムの光物性とレーザー発振に関して研究を行っています。ここでは、プロジェクト内での密接な共同研究の例として、ナノコラムに関する研究について紹介します。

※15 Kenji Michimata, Hiroaki Kotani, Tatsuro Watanabe, Hiroaki Funayama, Shin Murakami, Kazuhiko Shimomura, and Takao Waho, "Heterogeneous Integration of an InAs Nanowire with Energy-Efficient CMOS Delta-Sigma Modulator", *Proceedings of 2013 IEEE Sensors* (2013) 1-4.

※16 非常に微弱な電流を制御する技術。例えば1秒間に電子1個流れる電流は0.00000000000000000001 アンペア程度。

ナノコラム結晶を周期的に配列した構造では、2次元フォトニック効果^{※19}が発現して光のバンド構造が形成されます。また、コラム配列の揺らぎが大きくなっていくと光のアンダーソン局在^{※20}が生じ、そこに利得を導入すればランダムレーズングと呼ばれるレーザー発振が生じます。我々は半導体ナノコラムの集団配列に起因した光伝播現象に注目し、規則配置および不規則に配置したナノコラム集団における光局在現象やレーザー発振について研究を行っています。

図10に測定した発光スペクトルの励起密度依存性の一例を示します。励起密度を上げていくと、誘導放出による多重ピーク構造が現れます。数値解析から、この多重ピークはフォトニック効果によって生じたモードであることを明らかにしました。また、高速ストロークカメラを用いて測定した時間分解スペクトルから、この発振現象は10ps以下という超高速なダイナミクスであることが判明しました。本研究では、コラムの配置や形状が不均一な試料において、ランダムレーズングとフォトニックレーズングの中間的な振る舞いが現れるのを確認しています。さらに、試料構造のランダムネスとレーザー発振との関係を詳細に評価し、ランダムレーズングとフォトニックレーズングの中間領域の振る舞いを明らかにしつつあります。また、その結果から光学デバイス作製に最適な構造パラメーターの算出を目指しています。

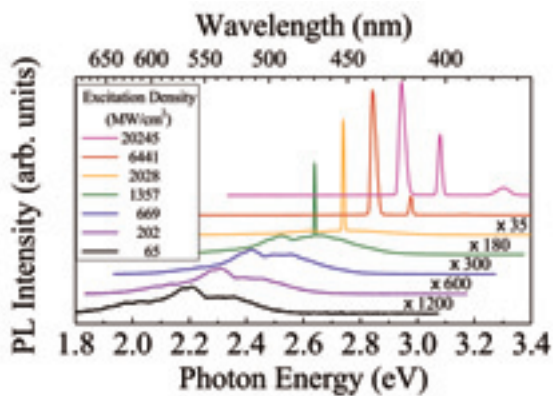


図10 発光スペクトルの励起強度依存性

横軸が発光する光のエネルギー（対応する波長は上の横軸に表記）、縦軸に発光強度を示しています。下から上に行くに従って、励起する光の強度を上げています。また、見やすくするために、スペクトルは強度を上げるごとに横にずらしています。励起を上げていくと、シャープなスペクトルが現れていますが、これがレーザー発振に対応しています。

※17 光の最小エネルギー単位である極めて微弱な光(光子)の量子力学的な特性を応用する素子。例えば1秒間あたり1個光子が発生する光の強さは0.0000000000000001 ミリワット程度。

※18 Toru Miyabe, and Toshihiro Nakaoka, "Nanogap Resistance Random Access Memory Based on Natural Aluminum Oxide", *Japanese Journal of Applied Physics* 52 (2013) 04CJ08.

おわりに

本研究プロジェクトは、ナノ構造の結晶成長、ナノ結晶を用いたデバイス構造の研究、ナノ構造の集積化・融合デバイスの研究、さらにナノ物性を評価する研究が連携して進められています。その組織体制を図11に示します。

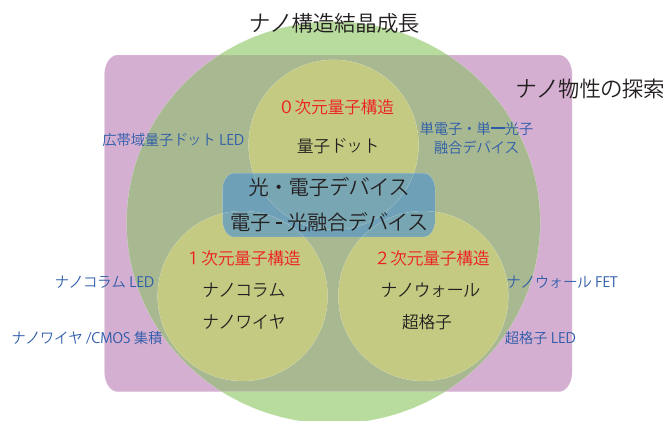


図11 本研究プロジェクトにおける組織構成・分野間連携

- ・下村研究室
<http://pweb.sophia.ac.jp/shimolab/>
- ・和保研究室
<http://pweb.sophia.ac.jp/sscd/>
- ・中岡研究室
<http://pweb.sophia.ac.jp/nakaoka/>
- ・江馬研究室
<http://soliton.ph.sophia.ac.jp/EmaLabWeb/top.html>

各研究課題とも順調に進展し、最先端の研究成果も次々に得られており、詳細は脚注の文献（最新研究成果）あるいは研究グループのホームページを直接ご参照いただければと思います。

今後はさらにナノ構造・ナノデバイス研究グループ間の共同関係を促進し、競争力のある研究体制を構築して、世界水準のナノ研究拠点を構築していきたいと思ひます。

※19 光の波長程度の間隔で周期的に変化する構造体の中では、光の伝播特性が制御できます。特に、光が存在が許されないようなバンド構造が現れるのが特徴的です。

※20 ランダムに配置された構造体の中では、光の波としての干渉効果により、光の伝播が許されない状況が生じることがあります。光が進むことなく、ある場所に局在するため、光局在とも呼ばれます。