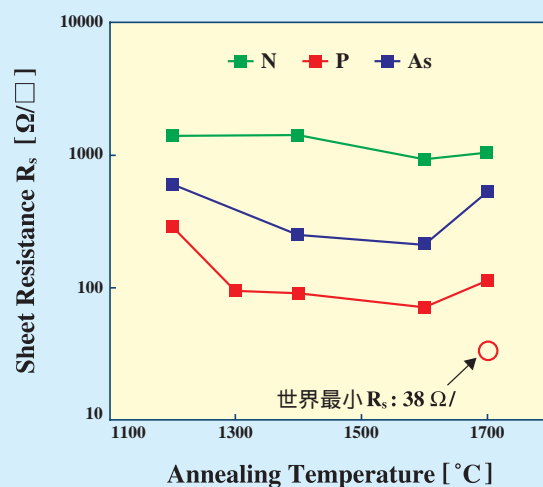
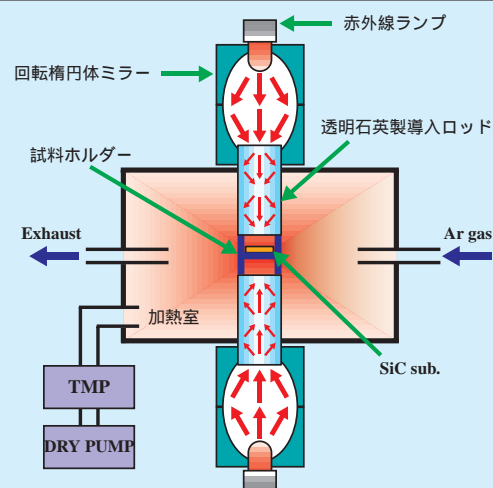


# ETL NEWS



## 電総研ニュース

超高温・超高速熱アニール処理による 4H-SiC への低抵抗  $n^+$  型  
イオン注入層形成

光による磁性のコントロール

メガワット級高安定全固体フェムト秒レーザー発振器の開発

光度および光束の国家標準の値の変更について

平成 11 年度共同研究事例

受賞・その他

**2001.2** vol.613

# 超高温・超高速熱アニール処理による 4H-SiC への低抵抗 $n^+$ 型イオン注入層形成 - 世界最小のシート抵抗値を達成 -

## Formation of Low Resistance Layer for $n^+$ Type Implanted 4H-SiC using Ultra High Temperature Rapid Thermal Annealing Process - Achievement of World Record in Sheet Resistance for Implanted SiC Layer -

先進パワーデバイス研究室  
材料科学部 ハードエレクトロニクス・ラボ  
Advanced Power Devices Lab.  
Material Science Division, Hard Electronics Lab.

Selective area doping technique has been investigated to form  $n^+$  type implanted layer with low sheet resistance ( $R_s$ ) into 4H-SiC substrate. High temperature ion implantation method can implant dopants with high dose into SiC without an amorphization of implanted layer, resulting in lower  $R_s$  than that implanted at room temperature. Ultra high temperature rapid thermal annealing (RTA) process is effective to suppress an evaporation of implanted layer and realizes highly activation of dopants. The lowest  $R_s$  of  $38 \Omega/\square$  has been achieved in the phosphorus implanted SiC at  $500^\circ\text{C}$  and adequately annealed at  $1,700^\circ\text{C}$  for 1min.

### 1 はじめに

情報技術(IT)に代表される21世紀の高度情報社会は、エネルギー流、情報流、物流などあらゆる面で20世紀以上に電気に依存する時代になることが予測されている。そのため、風力発電や太陽発電などのクリーンで使い勝手のよい電力エネルギーへの依存が益々高まっている。これに伴い電力エネルギーを高效率で制御するパワーエレクトロニクス分野の飛躍的な発展が要求されており、なかでもパワー半導体デバイスの低損失化が必要不可欠である。他方、情報通信分野では、周波数の有効利用が重要な課題であり、高出力・高周波で動作するパワー半導体デバイス開発が要求されている。しかしながら、既存のシリコン(Si)半導体を用いたパワー半導体デバイスでは、低損失、高速・高出力動作において既に理論(物性値)限界に近づきつつあり、5~10年先には技術の発展が飽和すると言われている。この分野における今後のさらなる発展のためには、理論的に高性能化が可能な新材料によるパワー半導体デバイスの開発が期待されている。

シリコンカーバイド(SiC)は、エネルギーギャップがSiの約3倍、絶縁破壊電界強度が約10倍、飽和電子速度が約2倍、熱伝導度が約3倍と優れた物性値を

有する。これをパワー半導体デバイスに適用できれば、小型化とともに、電力変換時の熱損失をSiデバイスの約1/100以下に低減できると予想されている。さらに、Siでは $150^\circ\text{C}$ 程度とされる動作上限温度を $400\sim 500^\circ\text{C}$ までにも上げることができるなどの利点もある。したがって、SiCパワー半導体デバイスが実現すれば、電力輸送・変換、産業用電力装置及び家電製品など各種の電力・電気機器の大幅な効率向上と高性能化が期待できる。

現在、SiCパワー半導体デバイスはその目的・用途に合わせて様々な電界効果トランジスタ(FET)構造が提案されている。図1に示すように、大電力用として接合FET、中電力高速制御用としてMOSFET、通信用としてMESFETなどがある。このようなSiCデバイスの低損失化を実現するためには、動作状態での抵抗(オン抵抗)値を下げるのが重要である。このオン抵抗成分の1つに $n^+$ 型ソース領域がある。この領域のシート抵抗( $R_s$ )の低減化が図れ、実際のデバイスプロセスに適用できる選択的領域ドーピング技術の開発がFETの共通プロセス技術として必要である。

我々は、当所に設けられた先進パワーデバイス研究室において、「超低損失電力素子技術開発」(UPD)プロジェクトを、新エネルギー・産業技術総合開発機

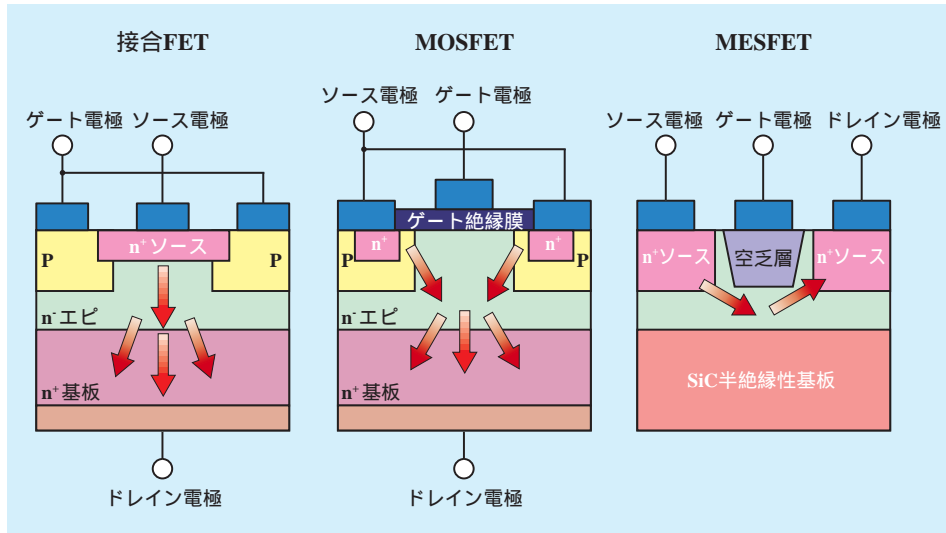


図1 各種 FET デバイス構造

構 (NEDO) の委託を受けた新機能素子研究開発協会 (FED) と当所の共同研究として、SiC の結晶成長からデバイス作製・評価技術まで幅広い領域に亘り研究を遂行している。この UPD プロジェクトのデバイス化プロセスの界面・伝導度制御技術開発において、低抵抗  $n^+$  ソース領域形成を目的として、SiC の  $n$  型不純物 (窒素 (N)、磷 (P)、砒素 (As)) イオン注入法及び活性化アニール法について系統的に調べた。その結果、高温 ( $500^{\circ}\text{C}$ ) イオン注入及び超高温 ( $\sim 1,700^{\circ}\text{C}$ )・超高速熱アニール (Rapid Thermal Annealing, RTA) 処理により SiC 基板の上に低抵抗  $n^+$  型イオン注入層の形成に成功したので、これについて報告する。

## 2 . SiC パワー半導体デバイスのためのイオン注入及び活性化アニール技術

SiC は  $1,300^{\circ}\text{C}$  までは、熱的、化学的、機械的に非常に安定であるため、実用的なプロセス温度での不純物拡散係数が小さい。このことは SiC デバイス作製において熱拡散法による不純物ドーピングが困難であることを意味している (熱拡散法を使用する場合、ほとんどの不純物元素に対して  $2,000^{\circ}\text{C}$  を越える温度が必要である)。これに対して、化学的・熱力学的制約を受けることなく注入領域の不純物濃度と注入深さを正確に制御できるイオン注入法は、SiC の選択的領域ドーピング技術として理想的なものである。

しかしながら、イオン注入法を適用した場合、注入不純物イオンの衝突によって半導体材料の結晶構造が破壊され、損傷を生じるという欠点を持つ。この損傷は、低ドーズ量における 1 回カスケード衝突によっ

て生じる点欠陥から、十分高いドーズ量における完全なアモルファス化にまで及ぶ。このような損傷の回復及び注入不純物の電気的活性化のため、イオン注入後に高温熱アニール処理を行うことが必要である。しかし、SiC は 2 元化合物材料であり、また数多くの多形構造 (3C、4H、6H、15R など) を有するため、一度アモルファス化した注入層をアニール処理によって再結晶化する場合、Si のような非注入層からの固相エピタキシャル成長による完全な単結晶化が困難である。そのため、近年、SiC をアモルファス化することなく高濃度に不純物を注入する方法として、イオン注入時に基板を加熱する高温イオン注入法が提案されている。この方法を用いることにより  $R_s$  を大幅に低減できることが報告されているが、その詳細については明らかではないのが現状である。

また、SiC に注入された不純物の活性化アニールには、通常  $1,500^{\circ}\text{C}$  以上の高温が必要である。そのため、Si の選択的優先蒸発による SiC 表面の局所的なグラファイト化などの様々なアニール誘起損傷が生じることが予想される。このような損傷が注入層の  $R_s$  の低減を妨げたり、不安定なデバイス動作を引き起こすことが容易に想像できる。そこで本研究では、アニール誘起損傷の発生を抑制し、注入不純物の高い活性化を実現させるため、短時間 ( $\sim 1$  分間) で  $1,700^{\circ}\text{C}$  以上に SiC を加熱することを可能とする超高温・超高速熱アニール装置を作製し、それを用いてイオン注入層の  $R_s$  低減を試みた。その結果、 $500^{\circ}\text{C}$  で P をイオン注入した 4H-SiC を  $1,700^{\circ}\text{C}$ 、1 分間のアニール処理を施すことにより世界最小の  $R_s$  値を実現することに

成功した。

### 3 .試料作製プロセス

実験には、Cree Research 社製 p 型エピタキシャル 4H-SiC(0001)基板( オフ角度 : 8°、有効キャリア密度 :  $\sim 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  ) を使用した。SiC 基板を 4 mm に切断後、標準的な RCA 洗浄を行った。続いて熱酸化により SiO<sub>2</sub> を 10nm 厚形成し、これをイオン注入時の保護膜として用いた。イオン注入は室温 ~ 800°C の範囲で基板加熱を行い、また SiC 基板表面より約 0.3 μm のボックスプロファイルに注入層を形成するため、N 注入に対して 40~150keV、P 注入に対して 40~250keV、As 注入に対して 40~400keV の加速エネルギーを用いた。

活性化アニールに用いた超高温・超高速熱アニール装置の概要図を 図 2 に示す。本装置の特徴は、赤外線伝送機構に回転楕円反射ミラーの他に、透明石英製赤外線導入ロッドを使用している点である。赤外線ランプから放射された赤外線は、まず回転楕円反射ミラーによって石英製ロッド上面に集光され、その後、透明石英製ロッド内を全反射を繰り返しながら試料ホルダーに伝送される。そのため、効率よく赤外線を試料ホルダーに集光することが可能である。また、本装置では室温から超高温 (~1,700°C) への急速加熱を実現するために、上記の赤外線伝送機構を有した加熱装置を加熱室の上下2箇所を設置している。その結果、~1,700°C/min. の昇温速度を実現した。実際の

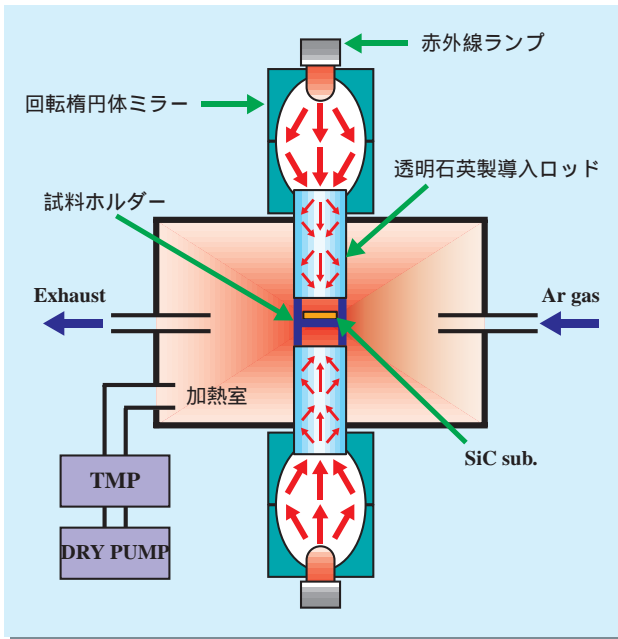


図 2 超高温・超高速熱アニール装置の概要図

実験に用いた活性化アニールシーケンスは、設定アニール温度に 1 分で急速加熱し、Ar 大気圧雰囲気中で所望の時間保持した後、自然冷却により室温まで降温した。

R<sub>s</sub> および Hall 効果測定を行うため、イオン注入された試料表面に反応性イオンエッチング(RIE)によりメサ構造を形成し、その後、電子ビーム蒸着装置を用いて 300nm 厚の Ni 電極を van der Pauw パターンに形成した。最後にオーミックコンタクトを形成するために、Ar 雰囲気中、1,000°C、5 分間のシンタリングを行った。

### 4 .実験 I - イオン注入技術 -

一般に、抵抗率 ρ は有効キャリア濃度 n とキャリア移動度 μ の積の逆数に比例すること (  $\rho = 1/ne\mu$ 、e : 素電荷 ) が知られている。このことから R<sub>s</sub> を低減するためには高ドーズにイオン注入し、キャリア濃度を増加させることは有効な方法である。しかし、注入ドーズ量が固溶限界に近づくと、注入不純物同士でクラスタリングを起こし、電気的活性化率の低下を生ずる。また、イオン注入誘起損傷も増大するため、その後の活性化アニールによる完全再結晶化ができないばかりか、2 次的なアニール誘起損傷を新たに生じ、これも R<sub>s</sub> 低減の妨げになることが容易に予測される。

#### 4-1 .不純物注入ドーズ量依存性

500°C でイオン注入を行い、その後 1,600°C、30 分間の活性化アニールをした試料から測定された R<sub>s</sub> の n 型不純物注入ドーズ量依存性について 図 3 に示す。P 及

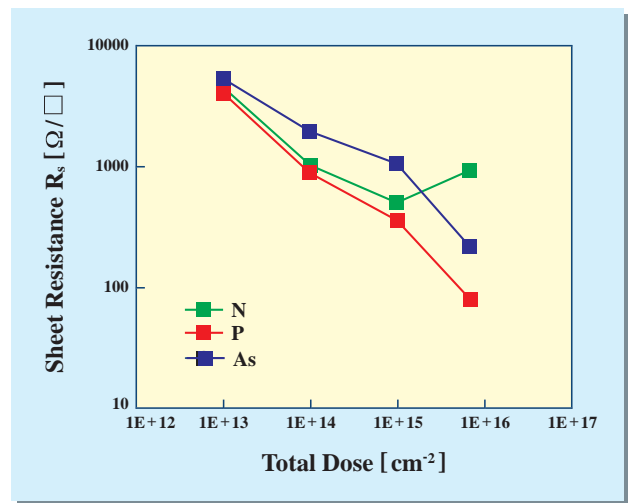


図 3 R<sub>s</sub> に対する注入不純物ドーズ量依存性

びAsを不純物として用いた場合、 $1 \times 10^{13} \sim 7 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ の範囲で、注入ドーズ量の増加とともに $R_s$ が低下することが示されている。また、Pの方がAs注入試料より低い $R_s$ 値が得られている。これは、Pドナーの活性化エネルギーがAsドナーに比べて小さいので、P注入試料においてより高いキャリアが生成されているためと考えられる。実際、注入ドーズ量が $7 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ の時、室温でのAsの活性化率が23%であるのに対し、Pでは約50%活性化している。

一方、Nを不純物として使用した場合、注入ドーズ量が $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ までは、P及びAsと同様にドーズ量の増加とともに $R_s$ が低下するが、 $7 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ の高ドーズ量になると $R_s$ が増加する。活性化率も低注入ドーズ量では50%以上得られているが、高注入ドーズ量ではわずか数%にまで低下する。Nドナーの活性化エネルギーが他のドナーに比べて小さいにもかかわらず活性化率が低い原因として、N-N結合によるNドナーの電気的不活性化が推測されているが、その詳細は明らかではなく今後の検討が必要である。以上の結果、P及びAsは高ドーズ注入による $R_s$ 低減に有効な不純物であることを見出した。

#### 4-2. イオン注入温度依存性

図4に $R_s$ のイオン注入温度依存性を示す。イオン注入時に試料を $500^\circ\text{C}$ に加熱することにより、室温注入の場合と比較して1桁以上の $R_s$ の低減が達成された。一方、 $500^\circ\text{C}$ 以上の温度ではほとんど $R_s$ の変化はない。

室温から $500^\circ\text{C}$ にイオン注入温度を増加させただけ

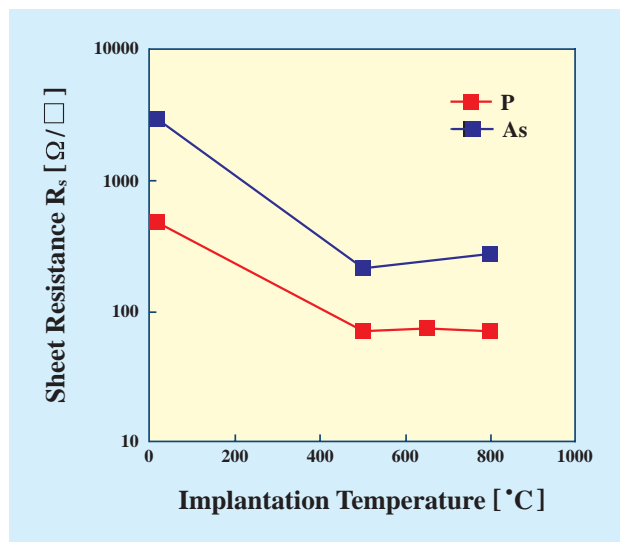


図4  $R_s$ に対する注入温度依存性

で大幅に $R_s$ が低下する原因を調べるため、透過電子顕微鏡(TEM)によるAs注入層断面観察を行い、活性化アニール前後での注入層の結晶性を評価した。その結果、室温注入直後のAs注入層は完全アモルファス化していることが確認された。これを活性化アニールすると、図5(a)に示すように注入層が再結晶化するものの、約 $0.1 \mu\text{m}$ の注入層深さの減少が確認される。さらに、As注入層から得られた透過電子線回折像(図5(a)挿入図)から、その結晶性は3C-SiCが支配的であり、4Hから3Cへのポリタイプ遷移が生じている。さらに積層欠陥や双晶などの結晶欠陥も確認され、アニールによって完全な再結晶化ができていない。その結果、1%程度しかAsドナーは活性化できず、高い $R_s$ 値を示す。

一方、 $500^\circ\text{C}$ でイオン注入を行った場合には、活性化アニール前後で注入層は4Hが維持されていることが確認された。しかしながら、図5(b)に示すように、活性化アニールした後には表面より深さ200nmの位置を中心として細かい黒点の幅広い分布が生じる。各黒点は、イオン注入によって生じた格子間原子が

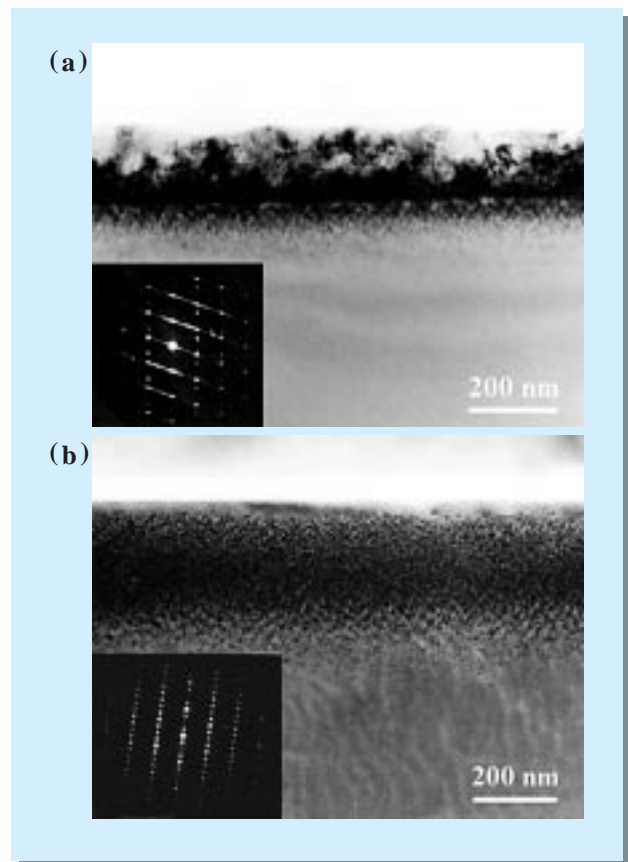


図5 異なるイオン注入温度で形成されたAs注入SiCの活性化アニール後の断面TEM観察像

活性化アニール時に局所的に凝集し、格子間原子型の転位ループが形成されたために生じたものである。この転位ループは注入不純物の種類にかかわらず発生することから、ループ内に蓄えられている原子は注入不純物ではなく、イオン注入により生じたSiまたはC格子間原子であると考えられる。この転位ループが注入層の電気特性に及ぼす影響は明確ではないが、キャリア移動度の低下を引き起こす散乱中心として影響することが示唆されており、これの発生を制御することにより、さらなるキャリア移動度及び活性化率の増大が期待できる。

以上の結果から、イオン注入時にSiC基板を500°Cに加熱することによって、イオン注入誘起損傷の発生及び注入層のアモルファス化が抑制され、 $R_s$ が低減されることを確認した。

5 .実験 II - 活性化アニール技術 -  
5-1 .活性化アニール温度依存性

図6に $R_s$ の活性化アニール温度依存性を示す。試料はすべて500°Cでイオン注入を行い、注入ドーズ量は $7 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ を用いている。また、活性化アニール時間は30分である。不純物としてNを使用した場合、 $R_s$ は活性化アニール温度に依存せずほぼ一定の値(約1k $\Omega/$ )を示す。これに対してP及びAsを使用した場合、1,200°C~1,600°Cの範囲では活性化アニール温度の増加とともに $R_s$ が低下する。1,600°Cアニールした試料の $R_s$ は、P注入では71 $\Omega/$ 、As注入で213 $\Omega/$ が達成されている。しかしながら、1,700°Cの活性化アニールを行うと $R_s$ は逆に大きくなる。Hall効果

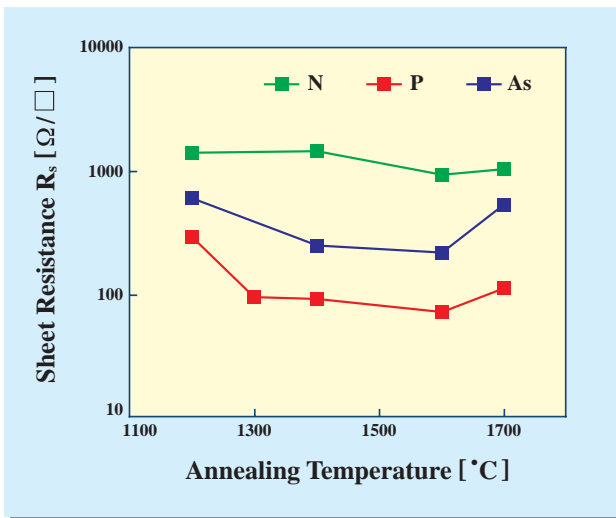


図6  $R_s$ に対する活性化アニール温度依存性

測定より、1,600°C以下の活性化アニールを行った試料のキャリア濃度はアニール温度に依存せずほぼ一定であるが、キャリア移動度はアニール温度の増加とともに大きくなることが確認された。このことから高温アニールによって注入層内に存在する先に述べたような転位ループなどの結晶欠陥が消滅もしくは低密度化し、キャリアの散乱が抑制され、その結果 $R_s$ が低下したと考えられる。

これに対し、1,700°Cアニールによる $R_s$ の増加は、イオン注入層深さの減少が原因であることが、図7のアニール前後におけるP不純物プロファイルのSIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)測定結果に明確に示されている。イオン注入直後のP不純物プロファイルは約0.3 $\mu\text{m}$ 深さで形成されており、TRIM(Transport of Ions in Matter)シミュレーション計算を使用して求められた分布と良好な一致を示している。一方、1,700°Cで30分間の活性化アニールを行った後のP不純物プロファイルは、約0.15 $\mu\text{m}$ にまで深さが減少している。プロファイルのプラトー領域より深い位置でのテールの傾きが、活性化アニール前後で変化がない。このことから、P不純物プロファイル深さの減少は、活性化アニール時におけるSiC表面からのイオン注入層の蒸発によるものと考えられる。

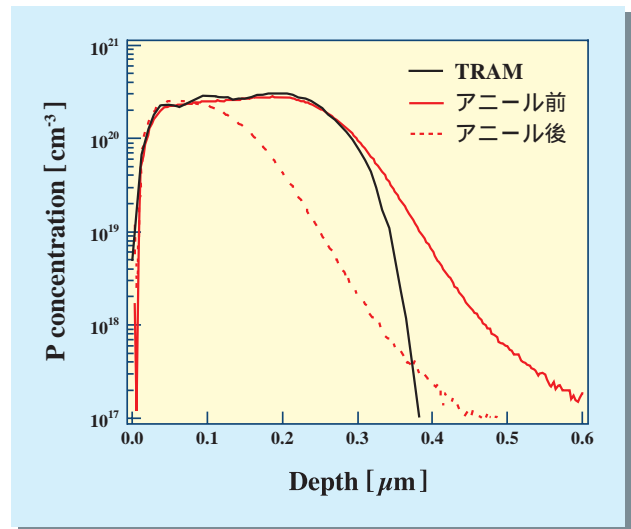


図7 活性化アニール前後のP不純物深さ方向分布のSIMS測定結果

5-2 .活性化アニール時間依存性

上記のSiC表面層の蒸発を防ぐためには、短時間に高温活性化アニールを行うことが重要であると考えられる。図8に異なる時間でアニールされたP不純物

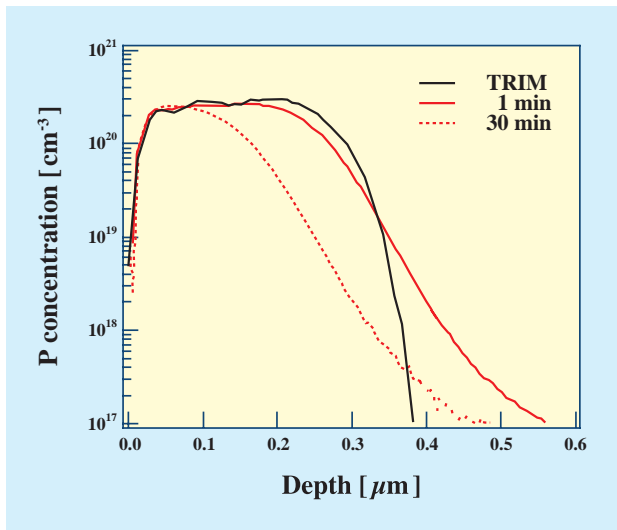


図8 SIMSにより測定されたP不純物深さ方向分布の活性化アニール時間依存性

プロファイルのSIMS測定結果を示す。30分間アニールと比較して1分間アニールのP不純物プロファイルは、アニール前のプロファイルからのシフト量が小さく、高温活性化アニールによるSiC表面層の蒸発が抑制されていることを示している。その結果、1,700°C、1分間の活性化アニール処理が施されたP注入SiCにおいて38Ω/ の $R_s$ 値が達成された。この $R_s$ 値はこれまでに報告されている $R_s$ 値の中で最小である。さらにHall効果測定により、Pドナーは約80%活性化していることが確認された。同様に、超高温・超高速活性化アニール処理により、As注入SiCにおいても $R_s$ の低減(～160Ω/ )及びAsドナー活性化率の増大を実現している。これらの $R_s$ 値は各種SiCデバイスのn<sup>+</sup>ソース領域の抵抗値として十分低いものである。

## 6.まとめ

本稿では、「超低損失電力素子技術開発」プロジェクトで実行している4H-SiC基板への低抵抗n<sup>+</sup>型イオン注入層形成技術について報告した。本研究では、SiCデバイス作製プロセスの中で重要な役割を果たすイオン注入及び活性化アニール法を用いた選択的領域ドーピング技術を確立すると同時に、4H-SiCへのn型不純物である窒素、燐、砒素について系統的に実験を行った。高温イオン注入法を用いることにより、SiCをアモルファス化することなく高濃度不純物注入層を形成できることを確認した。さらに超高温・超高速熱アニール装置を作製し、これを注入不純物の活性化アニールに使用することにより、SiC表面からの注入層の蒸発を抑制させ、不純物の電気的活性化を促進することに成功した。その結果、Pイオン注入4H-SiC基板において、38Ω/ という世界最小シート抵抗( $R_s$ )を実現した。このとき約80%の高いPドナー活性化率が達成されている。この $R_s$ 値は各種SiCデバイスの性能パラメータであるオン抵抗の成分の一つであるn<sup>+</sup>型ソース領域の抵抗として十分低いものである。また、本技術と金属/半導体界面制御技術を組み合わせることにより～10<sup>-6</sup>Ωcm<sup>2</sup>の低オーミックコンタクト抵抗も実現している(電総研ニュース、604号)。現在、この技術を実際のデバイスプロセスに導入して、MOSFETやMESFETなど各種デバイスの試作を開始している。本技術の確立により、超低損失SiCデバイスの実現への流れが加速されるであろう。

## 研究課題

超低損失電力素子技術の研究

## ラボメンバー (Lab. Members)

先崎 純寿 (Junji Senzaki)

e-mail:senzaki@etl.go.jp

原田 信介 (Shinsuke Harada)

小杉 亮治 (Ryoji Kosugi)

鈴木 誠二 (Seiji Suzuki)

福田 憲司 (Kenji Fukuda)

荒井 和雄 (Kazuo Arai)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

材料科学部 (Materials Science Division)

材料科学部 (Materials Science Division)

# 光による磁性のコントロール

- 新しい機構の理論 -

## Control of Magnetism by Light

- a New Mechanism -

電子基礎部 ナノ物性理論ラボ

Physical Science Division, Condensed Matter Theory Lab.

The microscopic mechanism of the bidirectional structural change in Co-Fe Prussian blue analogues was revealed by means of ab initio quantum chemical calculations. The local potential energies of various spin states of Co are sensitive to the number of nearest neighbor Fe vacancies. As a result, the forward and backward structural changes are most readily initiated by excitation of different local regions by different photons. This mechanism indicates a novel strategy to realize photoinduced reversible phase transitions in general systems consisting of two local components.

### 1 .はじめに

光があたると物質の状態が変化するという現象はよく知られている。たとえば、カルコゲナイドガラスという物質は光をあてると無色透明から黒褐色に変色する。このような光による物質の変化をもっとさまざまな現象に広げ、積極的に利用しようという研究が盛んに行われてきた。例えば、有機分子に光を照射して高分子(プラスチック)を作り出すことができる。光によって化学反応を起こす「光触媒」を使った空気清浄機も売られている。最近では、「光ディスク」という言葉をよく耳にする。これは、CDなどの情報を記憶するレコードのようなものであるが、CD-RW、DVD-RAMといった家庭でも書き込める種類のものは、光を照射して音楽や画像などの情報を記録している。強力な光を照射することにより、一度ディスクの表面を融解させた後、冷えて固化すると表面の色が変わることを利用している。しかしながら、弱い光だけで温度を上げることなく結晶の状態を一気に変えることができれば、もっと応用が広がるものと期待されている。このような現象を「光誘起相転移」と呼び、研究者の注目の的となっている。

1996年に神奈川科学技術アカデミーの佐藤氏と東京大学の橋本氏は、特定の波長の光を照射すると磁石になる物質を初めて発見した<sup>1,2)</sup>。それは鉄コバルト・シアノ錯体と呼ばれる物質で、別の波長の光を照射することによって磁性を消すことができることも報告された。つまり、この物質は2つの波長の光を使って、低温においてではあるが、磁性のオン・オフを自在に行うことができるのである。それ以来、なぜ

この物質でそのような現象が起こるのか、さまざまな推測がなされてきたが、当所ではこのほど、計算機を用いた理論研究によってこの現象に潜む精妙なメカニズムをはじめて明らかにした<sup>3,4)</sup>。

### 2 .双安定性

鉄コバルト錯体には鉄原子とコバルト原子が含まれている。鉄やコバルトなどの金属原子は、個々の原子のまわりの環境によって磁性(スピン)を持つ場合と持たない場合がある。例えば、鉄が錆びる(酸化する)と磁性が消えてしまうのは、鉄原子のまわりに酸素原子がついて環境が変わってしまうからである。原子の磁性を担っているのは電子であるが、その電子の状態がまわりの環境によって異なる状態を取るためである。鉄コバルト錯体の中では、磁性の状態と非磁性の状態がほぼ同じ程度に安定であるため、外部からのきっかけ、たとえば光によって、どちらの状態を取るかを操作することができるのだと考えられる。しかし、磁性状態と非磁性状態で、構造が異なっているため、状態を変化させることはそう簡単には説明できない。

構造変化の最も大きな要因はコバルト原子の占める体積である。コバルト原子の半径は磁性状態の方が非磁性状態のときより10%ほど大きくなっている。これは電子状態の変化に由来する。このことと安定性の関係を議論するため、状態のエネルギーというものを考える。エネルギーはコバルト原子の電子の状態や、その周りの環境によって変化するが、原子は集団としてエネルギーが小さくなる方向に運動する。

この物質では、コバルト原子とそれに隣接するシアノ基(CN)との距離によってエネルギーが大きく変化する。その様子が図1に示されている。磁性状態と非磁性状態とでコバルトの原子半径が異なることを反映し、エネルギーの極小点(谷の底)の場所が二つの状態で異なっている。運動エネルギーが小さいと、二つの谷の間の山を越えることができないので、非磁性状態(図1(a))あるいは磁性状態(図1(b))のどちらかの谷底付近で運動する。図1のエネルギーは重力に対する位置エネルギーと同じようなものなので、エネルギー曲線を山や谷などの地形に見立て、それに沿った球の運動を思い浮かべると理解の助けになるかもしれない。

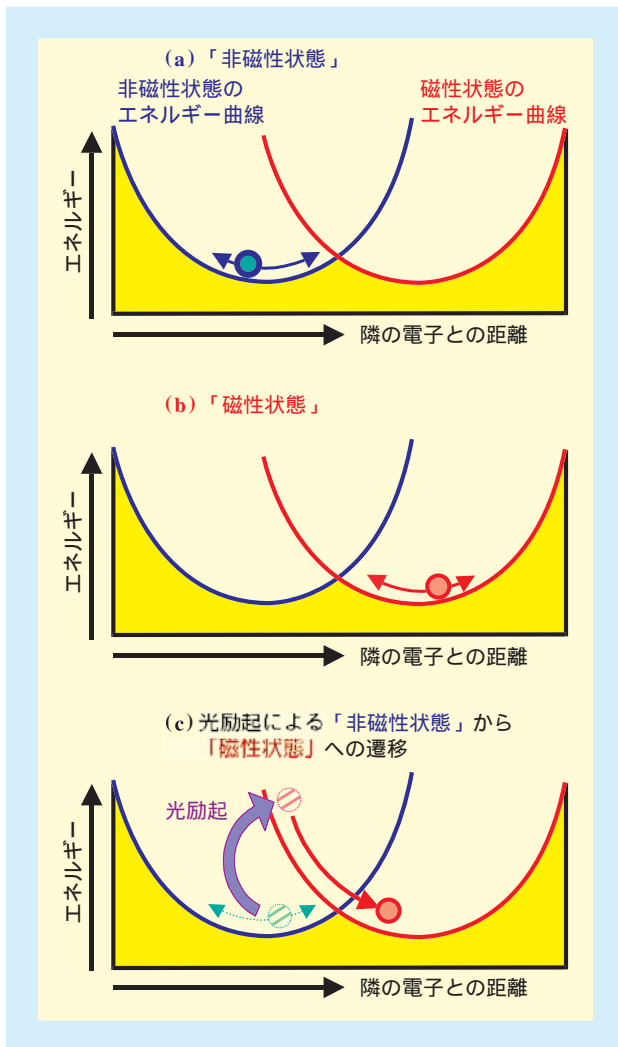


図1 隣接原子間距離に対するコバルトのエネルギーの模式図  
(a)非磁性状態 (b)磁性状態 (c)光によって非磁性状態から磁性状態へ移り変わる

この物質に光を照射するということは以下のように理解できる。光を照射すると、その一部は物質に吸収される。光はエネルギーを持っているので、吸収した分だけ物質はエネルギーを受け取る。その結果、図1(c)のようにエネルギーが高い状態に変化する。このように光で状態が変化したものを「光励起状態」とあるという。今の場合、光励起状態は元の状態と磁気的性質が異なるので、光によって磁性を変化させることができるというわけである(ただし、ここでは話を単純化しており、実際の過程はもう少し複雑である)。

このような原子の状態変化が結晶全体の変化、つまり相転移に結びつくのは次の理由による。図2はこの結晶のコバルト原子だけを取り出して模式的に表したものである。コバルト原子は磁性状態(赤)か、非磁性状態(緑)のどちらかをとるのであるが、前述の通り、状態によってコバルト原子の大きさは異なっている。図2(a)はすべてのコバルトが磁性状態である場合であり、図2(b)ではすべて非磁性状態になっている。これに対して図2(c)には、両方が混ざった状態の例として、非磁性状態の中に一つだけ磁性状態の原子が存在する場合を示している。これを見ればわかるように、二つの状態のコバルトが混在する場合、その境界でひずみが生じるので、その分だけ不安定になると考えられる。結果として、(c)のような構造は長時間その状態を維持することができず、(a)や(b)の状態に陥ることが予想される。このように、すべての構造単位(今の場合はコバルト)が、同じ状態になろうとすることから、結晶全体として非磁性状態と磁性状態という2種類の安定状態が存在するのである。これを双安定性というが、このことが光によって相転移を引き起こす前提条件となる。

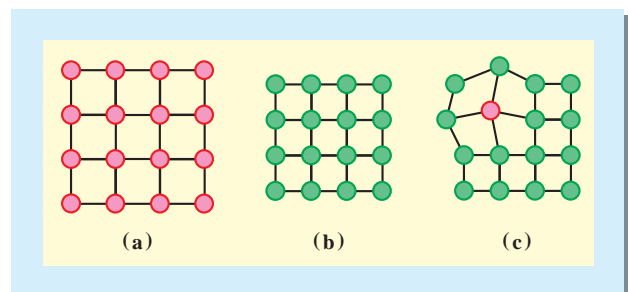


図2 コバルト原子間の協力現象  
(a)はすべての原子が非磁性状態  
(b)はすべての原子が磁性状態の場合  
(c)は一箇所が磁性状態で、その周辺が非磁性状態の場合

### 3 .内部対立を抱えた物質

上に述べた双安定性は光誘起相転移の基本的な機構として多くの物質に共通のものである。しかし、具体的に二つの状態の間の変化がどのようにして起こるのか、この物質でなぜそれが可能になっているのか、を明らかにしなければならない。今回の研究で明らかになったことは、この物質に含まれている格子欠陥というものが本質的に重要なはたらきをしていることである。

光誘起相転移が観測された鉄コバルト錯体は、鉄とコバルトの比率が一對一ではなく、鉄のほうがやや少ない。そのため、結晶格子の鉄原子の位置は高い割合で原子が抜けている、つまり空孔となっている。そして、空孔のまわりのシアノ基(CN)が水分子(H<sub>2</sub>O)に置き換わっている。このため、コバルト原子を中心にすると、隣接するシアノ基の一部が水分子で置換されたものが存在することになる。まったく置換がない場合( $N_w=0$ )と、一つ置換がある場合( $N_w=1$ )のコバルト周辺の環境を図3 (a)、(b)の挿入図に示す。

前述の通り、金属は周りの環境によって、磁性状態と非磁性状態のどちらが安定であるかが変化する。図3の(a)と(b)のグラフは、コバルトの環境の違いによって磁性状態と非磁性状態のエネルギーがどのように異なるかを、第一原理に基づく計算によって求めたものである<sup>3)</sup>。グラフの意味は図1と同様のものであり、横軸は隣接するシアノ基との距離を表している。(a)は水分子置換がない場合、(b)は一つのシアノ基が水分子で置換されている場合である。

これを見ると、(a)と(b)は基本的には似ているものの、非磁性状態のエネルギー曲線と、磁性状態のエネルギー曲線の相対的な高さが変化していることがわかる。(a)では、非磁性状態の方がかなり下にあるのに対し、(b)ではほとんど同じ高さになっている。つまり、(a)のコバルト原子は非磁性状態になる傾向が強いが、(b)は(a)に比べて磁性状態にとどまる傾向が強いと言える。すなわち、空孔が存在することによって、コバルト原子の環境が場所によって異なり、磁性を好む場所もあれば、非磁性を好む場所もあるのである。

これは、前述の「協力的相互作用」とは逆の方向であり、「場所によって局所的に安定な状態が異なる」ことを意味している。すなわち、鉄コバルト錯体は、結晶全体としては同じ状態を取ろうとする傾向があるのに対し、空孔が多くあるために、個々の場所によって別々の状態を取ろうとする傾向もあることになる。

おのおのの原子はそれぞれ別の状態をとろうとしているにもかかわらず、無理に全体で同一の状態を取っているために、もともとストレスを抱えているのである。いわば「内部対立を抱えた物質」ということになる。

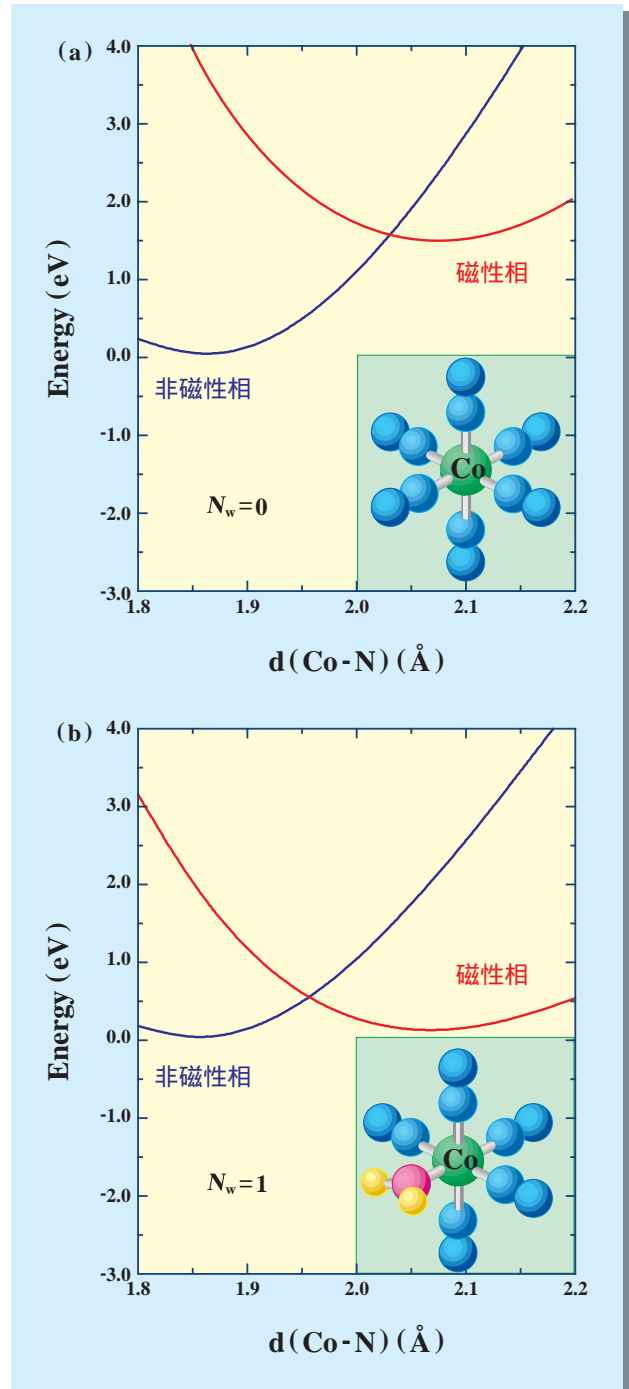


図3 第一原理計算で得られたコバルトのエネルギー  
(a)シアノ基に完全に囲まれている場合  
(b)隣のシアノ基の一つが水分子に置換されている場合

#### 4 .光が双方向の相転移を引き起こす機構

図3のようなエネルギー曲線を計算すると、二つの状態のエネルギー差から吸収される光の波長を計算することができる。一方、実験的には、どのような波長の光を当てると相転移が進むかがわかっている。非磁性から磁性に変化させるためには可視光が必要であり、逆に磁性から非磁性に戻すためには近赤外光が必要である<sup>1)</sup>。計算結果と対応させると、非磁性

磁性の変化を引き起こす可視光は図3(b)の水分子置換のある部位の励起であり、逆の磁性 非磁性の場合は図3(a)の水分子置換のない部位の励起に対応している。つまり、変化の方向によって、異なった場所のコバルトの周辺で光吸収が起こっていると結論づけられるのである。

これは何を意味しているのだろうか。まず、結晶全体が非磁性の状態を考えると、(b)のコバルトは磁性になりやすいにもかかわらず、非磁性状態をとっている。そういう場所を光励起すると、局所的には容易に磁性状態に変わる。それが結晶の中である程度増えてゆくと、(a)のような磁性になりにくい場所も協力的相互作用によって磁性状態に変わってしまうと考えられる。逆に、全体が磁性状態にある場合、(a)の磁性になりにくいコバルトを光励起すると、そこから容易に非磁性状態に転換し、協力的相互作用によって(b)のような磁性になりやすい場所をも非磁性状態に引きずり込むのである。

ただし、協力的相互作用によって結晶全体が相転移に至る過程は今後さらに解明してゆかねばならない。光吸収によって起こる局所的な変化は、決してそのまま保持されるわけではなく、まわりからの協力的相互作用が強ければ元の状態に容易に引き戻されてしまう。光誘起相転移に至るためには励起状態の寿命が長くなければならない。この物質の場合には、磁性状態と非磁性状態が構造の違いを伴っていて、2つの状態間のエネルギー障壁が大きいことが、励起状態の長い寿命を保証しているものと思われる。

#### 5 .まとめ

鉄コバルトシアノ錯体が光によって磁性から非磁性へ、また別の光によってその逆の変化を引き起こす新しい機構を理論的に明らかにした。この物質は、結晶の部位によってコバルト原子の環境が異なり、その結果、磁性になりやすい原子とそうでない原子が混在している。そのような内部対立を抱えていることを積極的に利用し、特定の部位を光励起することによって双方向の光誘起相転移を引き起こしているものと考えられる。このような機構はこの鉄コバルト錯体だけに限られるものではなく、また、磁性体だけにとどまるものでもない。一般に、相反する傾向をもつ成分をうまく組み合わせることにより、光によってその性質を自在にコントロールできる物質を人工的に設計する道を拓くものである。

#### 参考文献

- 1) O. Sato, Y. Einaga, T. Iyoda, A. Fujishima, and K. Hashimoto, J. Electrochem. Soc. 144, L11 (1997).
- 2) O. Sato, T. Iyoda, A. Fujishima, and K. Hashimoto, Science 272, 704 (1996).
- 3) T. Kawamoto, Y. Asai, and S. Abe, Phys. Rev. Lett. 86, 348 (2001).
- 4) T. Kawamoto, Y. Asai, and S. Abe, Phys. Rev. B 60, 12990 (1999).

#### 研究課題

工業技術院特別研究

凝縮系における励起状態ダイナミクスモデリング

---

#### ラボメンバー (Lab. Members)

川本 徹 (Tohru Kawamoto)

e-mail:kawa@etl.go.jp

阿部 修治 (Shuji Abe)

浅井 美博 (Yoshihiro Asai)

下位 幸弘 (Yukihiko Shimoi)

片桐 秀樹 (Hideki Katagiri)

電子基礎部 (Physical Science Division)

電子基礎部 (Physical Science Division)

電子基礎部 (Physical Science Division)

電子基礎部 (Physical Science Division)

材料科学部 (Materials Science Division)

# メガワット級高安定全固体フェムト秒レーザー発振器の開発

## Highly-Stabilized Megawatt-class All-solid-state Femtosecond Laser Oscillator

光技術部 超短パルス光エレクトロニクス評価ラボ  
Optoelectronics Division, Ultrashort Pulse Optoelectronics Lab.

We report a 1.25-MW high-peak-power self-starting self-mode-locked Ti:sapphire laser pumped by a frequency-doubled diode-pumped Nd:YVO4 laser. Pulses as short as 16 fs at a repetition rate of 75 MHz were obtained with an average output power of 1.5 W. A femtosecond Cr:forsterite laser producing 35-fs pulses with an average out power of 330 mW is also described, where an emphasis is placed on a process of the formation of a stable self-mode-locking oscillation.

### 1 .はじめに

フェムト秒固体レーザーの出現は、フェムト秒光パルスをまさにプラグアンドプレイで一般ユーザに提供することを可能にしてきており、フェムト秒時間領域で発生するさまざまな物理・化学現象の解明に広く使われているだけでなく、超高速光情報通信に必要な要素デバイスの開発においても不可欠なツールとなっている。10年前に、チタンをドープしたサファイアレーザーではじめて100fsを切るフェムト秒パルスの発振が観測されて以来、レーザー研究者の関心は、チタンサファイアレーザーのもつ400nmにわたる発振スペクトル領域をすべて利用した極限的超短パルスレーザーを開発することに向けられた。このような目標は最近ほぼ達成され、単独のレーザー発振器から5fsを切る光パルスが得られるようになってきた。チタンサファイアレーザーは、この信じ難いほど広帯域な発振波長領域を有するだけにとどまらず、高効率で高出力発振が得られることも大きな特徴の1つである。さらに、レーザー結晶そのものの大口径化、長尺化も可能である。これらの特徴を十分に利用して、現在、10fs級パルスを増幅することにより、100TW級の尖頭出力をもつフェムト秒レーザーパルスが得られている。

上記のように、レーザーパルスの超短パルス化、増幅による高出力化の研究が進められてきたが、レーザー発振器そのものから尖頭出力の大きな光パルスを直接得ようとする試みは最近になって始められた。今回、当所では、自律的な発振が可能な自己モード同期チタンサファイアレーザーとしては、はじめて、1MWを越える尖頭出力をもつフェムト秒パルスを発生させることに成功した。この成功により100MHz前後の高繰返しで発振するMW級のフェムト秒パルスが高安定で得られるようになった。また、チタンサ

ファイアレーザーの発振波長より長波長の1.25 $\mu$ m付近で発振する安定な自己モード同期フェムト秒クロムフォーステライトレーザーを開発したので、これについても紹介する。

### 2 .MW級フェムト秒チタンサファイアレーザー発振器

レーザー発振器から得られる光パルスの尖頭出力は、平均出力をパルス列の繰返し周波数とパルス幅で除した値になる。このため、大きな尖頭出力を得るためには、平均出力を大きくするとともに、パルス幅と繰返し周波数を小さくすることが必要になる。パルスの繰返し周波数は、一般に共振器長によって決まるため、現実的な周波数としては100MHz前後にならざるを得ない。従って、今回平均出力を大きくし、かつ可能な限りパルス幅を狭くすることとした。具体的には、平均発振出力2W程度、パルス幅20fs以下により、1MW以上の尖頭出力を目指した。

これまでの報告から、20fs以下のパルス幅を確実に得るためには、結晶長が3mm以下である必要があった。また、最も効率よくレーザー発振を行わせるためには、レーザー結晶による励起光の吸収は80%程度必要であった。この吸収率を3mmの結晶で実現するためには、吸収係数として5cm<sup>-1</sup>程度が必要であり、このためには、サファイア結晶へのTiのドープ量は0.25重量%とかなり高い値にならざるを得なかった。一般に、Tiのドープ量を大きくすると、レーザー光の再吸収が顕著になり、発振効率が低下する。しかし、結晶成長技術の進歩により、高ドープ結晶においても再吸収による損失が著しく改善されてきている。今回は入手し得る最も高品質なレーザー結晶を利用することとした。このレーザー結晶により2W程度の発振出力を得るためには、10W近いエネルギーを結晶に吸収させることが必要であり、この吸収による

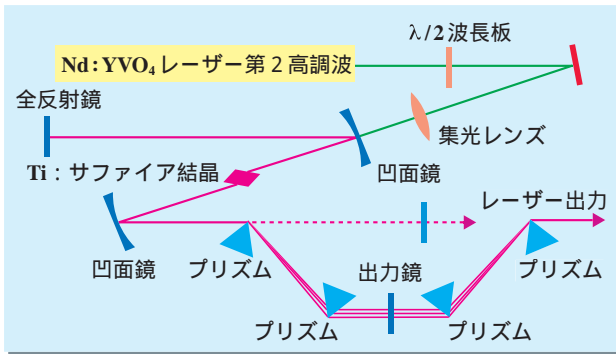


図1 自己モード同期フェムト秒チタン  
サファイアレーザー発振器

熱の発生が無視できなくなる。この熱の発生は発振効率を引き下げることになる。これを避けるため、レーザー結晶は常時-10°Cの冷却水で冷却することとした。

以上のような考察に基づいて試作したチタンサファイアレーザー発振器を図1に示す。レーザー共振器は2枚の凹面鏡、全反射鏡、出力鏡で構成される。レーザー結晶は、2つの凹面鏡のほぼ中央に配置され、半導体レーザー励起Nd:YVO<sub>4</sub>レーザーの第2高調波光によって励起される。図の4つのプリズムは熔融石英製であり、レーザー結晶と出力鏡の群速度分散を補償するためにそれぞれ1対づつ設置されている。CW発振ではプリズムは取り除かれ、図の点線で示された共振器構造となる。

最初に、出力鏡に最適な透過率を調べた。図2は3つの異なった出力鏡に対するCW発振出力の励起出力依存性である。出力光の透過率が20%のとき10Wの励起に対して最大出力3Wが得られている。このため、自己モード同期発振においても20%の出力鏡を

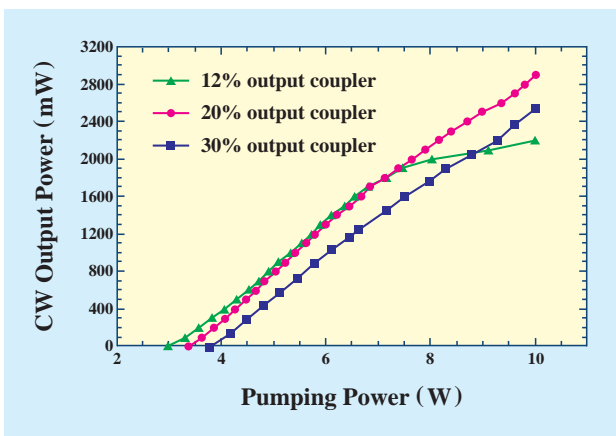


図2 CW発振出力の励起パワー依存性

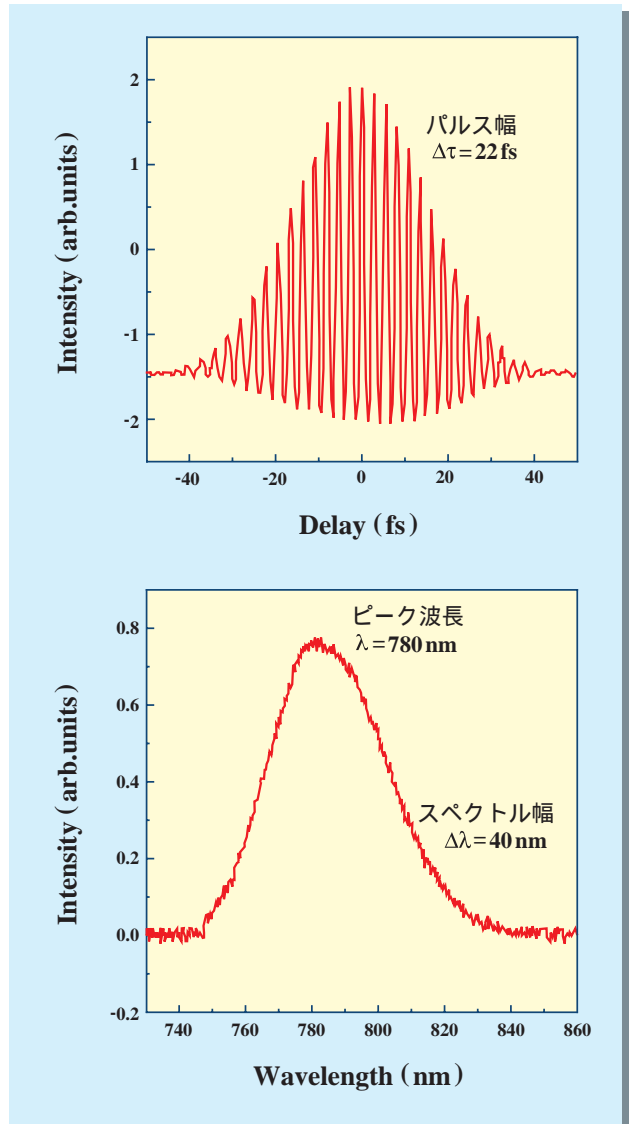


図3 フェムト秒パルスの自己相関波形とスペクトル

使った。チタンサファイアレーザーでは、レーザー結晶とプリズムの最適配置によって比較的容易に自己モード同期発振を得ることができる。図3は図1の共振器配置によって得られたレーザーパルスの自己相関波形とスペクトル波形を示している。これらの波形から22fsのパルス幅がピーク波長780nm、スペクトル幅40nmで得られていることがわかる。このとき8Wの励起パワーにより平均出力1.9Wが得られた。この出力と繰返し周波数82MHzから、得られたフェムト秒パルスの尖頭出力は1.1MWとなり、当初の目標がほぼ達成されたことになる。

### 3 .MW級チタンサファイアレーザーの安定化

図1に示すような構造をもつ共振器構成ではCW発振から自律的に自己モード同期発振へ移行するこ

とはない。自己モード同期のためには、共振器に何らかの機械的な振動を与えることにより十分パルス幅の狭い種パルスを共振器内に作り出す必要がある。このような十分狭いパルスは結晶内で非線形効果を誘起することが可能となり、適切なプリズム配置により自己モード同期発振へと移行する。しかし、このような自己モード同期発振は永続的なものではなく、外乱により容易にCW発振へ逆戻りする。自己モード同期レーザーの安定化のためには、十分パルス幅の狭いパルスを自律的に発生する手法が必要である。このような手法の1つに受動モード同期法があり、超短パルス色素レーザーに広く用いられた方法である。色素レーザーでは可飽和吸収特性をもつ色素が共振器内に導入されたが、同様の動作を半導体量子井戸構造によって実現することができる。これまで0.7~1.5 $\mu\text{m}$ の波長域で発振する種類のレーザーに適用され、安定な自己モード同期発振が実現されている。このような可飽和吸収半導体は図4に示すように共

振器内で全反射鏡も兼ねることから半導体可飽和吸収鏡と称され、その英語表記 (semiconductor saturable absorber mirror) から SESAM と呼び習わされている。

SESAMは半導体に銀などの金属を蒸着した構造となっており、誘電体多層膜鏡のような高反射率を得ることは困難であった。このことはSESAM内での残留吸収が大きいことを意味し、共振器内パワーの増加によりSESAMが破壊されるようになる。今回開発したMW級レーザー共振器では従来のSESAMを使うことは不可能であったが、最近、当所で開発した広帯域高反射率特性をもつSESAM<sup>1)</sup>による実験を試みた。このSESAMは従来の半導体と銀との間に酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 薄膜を蒸着しており、750~900nmの広い帯域で98%以上の反射率をもつ。このような特性をもつSESAMを図1の全反射鏡の位置に図4に示すように配置した。共振器内レーザービームは凹面鏡でSESAM上で集光する必要があることから、SESAMの配置はかなり厳密に調整する必要がある。また、このような集光により集光スポットでの光パワー密度はかなり大きくなり、SESAMは損傷を受けやすくなる。共振器内ビームパワーを小さくするために透過率20%の出力鏡から30%のものに交換した。これらの条件の下で、10Wの励起パワーに対して、1.5Wの平均出力が得られた。このときの自己相関波形とスペクトル波形を図5に示す。スペクトルのピーク波長は変化していないが、スペクトル幅は63nmに拡大している。この結果、図に示すようにパルス幅は16fsまで狭くなった。これは、SESAMの導入が共振器内の分散を補償する方向に作用したこと

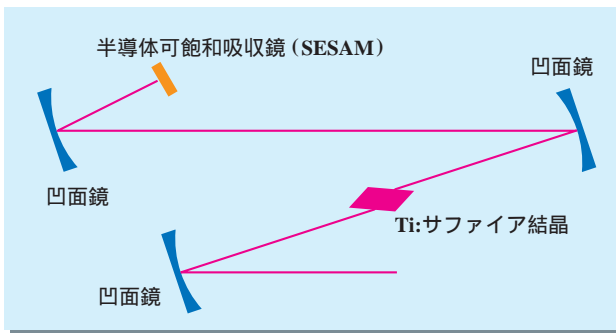


図4 半導体可飽和吸収鏡(SESAM)の設置

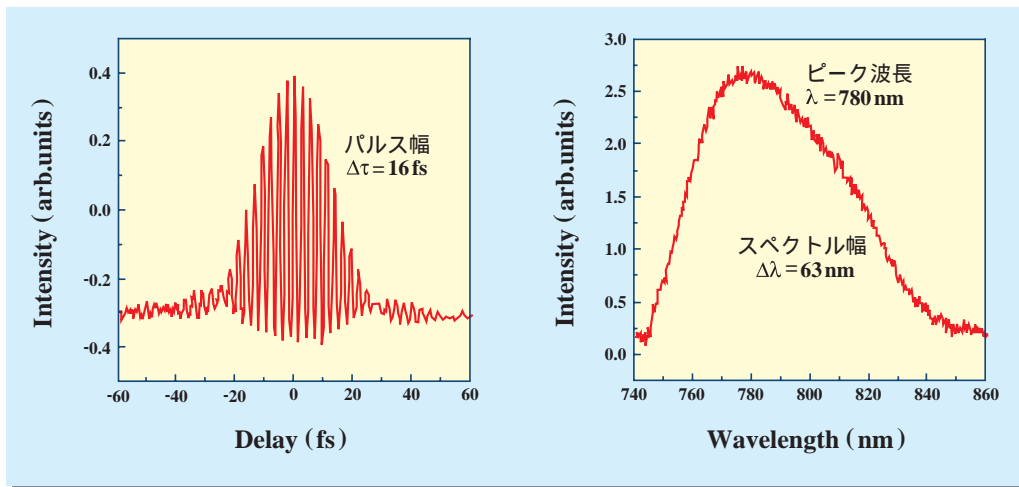


図5 半導体可飽和吸収鏡をもつチタンサファイアレーザー発振器からのフェムト秒パルスの自己相関波形とスペクトル

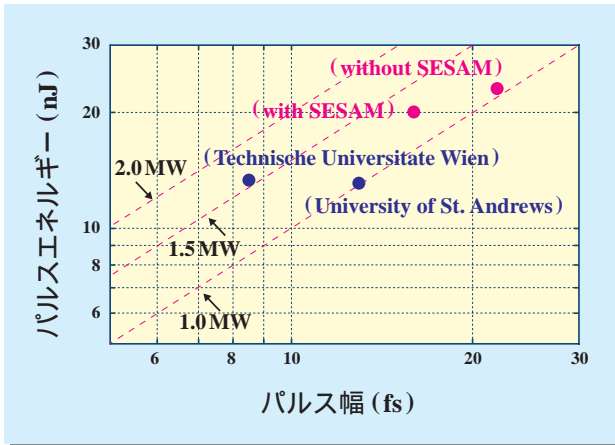


図6 当所で得られた結果と従来の報告

を示している。共振器長がSESAMの設置のため伸びたことにより、発振パルスの繰返し周波数は75MHzに減少した。以上の結果から、このときの尖頭出力は1.25MWと評価することができる。

図6は、これまで報告された100MHz前後で発振するMW級パルス<sup>2,3)</sup>のパルスエネルギーとパルス幅を今回当所で得られた結果とともにプロットしている。図には参考のためにパルスエネルギーをパルス幅で除して得られた結果を破線で示している。今回得られたMWパルスはこれまでの報告に比べパルス幅が広く、パルスエネルギーが大きいことを特徴としている。本装置は非線形相互作用を利用した波長変換用光源として利用しているが、あまりに狭いパルス幅はこのような応用には不適當であり、適度なパルス幅をもつMW級光源として本装置は優れた特性をもっている。

ス幅をもつMW級光源として本装置は優れた特性をもっている。

#### 4. フェムト秒クロムフォルステライトレーザー

クロムフォルステライトレーザーは1.2 $\mu$ m帯を中心に利得を有しており、20fs前後のパルス幅と1W近い平均発振出力を得ることができる。チタンサファイアレーザーと同様自己モード同期発振が可能であるが、自己モード同期条件が厳しく発振が不安定となる傾向がある。SESAMを利用して安定化を図ることは可能であるが、SESAMはあくまで自己モード同期に必要な短パルスを提供するための手段であり、自己モード同期動作の真の安定化はレーザー共振器の適切な配置により達成される必要がある。今回、この適切な配置とレーザービームパターンとの間にある相関があることを見出した。

試作した自己モード同期クロムフォルステライトレーザーは、プリズムが全反射側に1対のみ配置されたことを除いて図1のチタンサファイアレーザーとほぼ同様である。励起レーザーとしては半導体レーザー励起のNd:YVO<sub>4</sub>レーザーを使用した。また、分散補償用プリズムとしてはじめてSF58を使用した。SF58は、これまで多用されてきたSF6とほぼ同程度の分散特性を有しているが、鉛の含有量が少ないため加工性と耐環境性にすぐれている。図7は最も安定な自己モード同期発振が持続するときの自己モード同期発振前後のビームパターンとビーム強度変化の様子を示している。

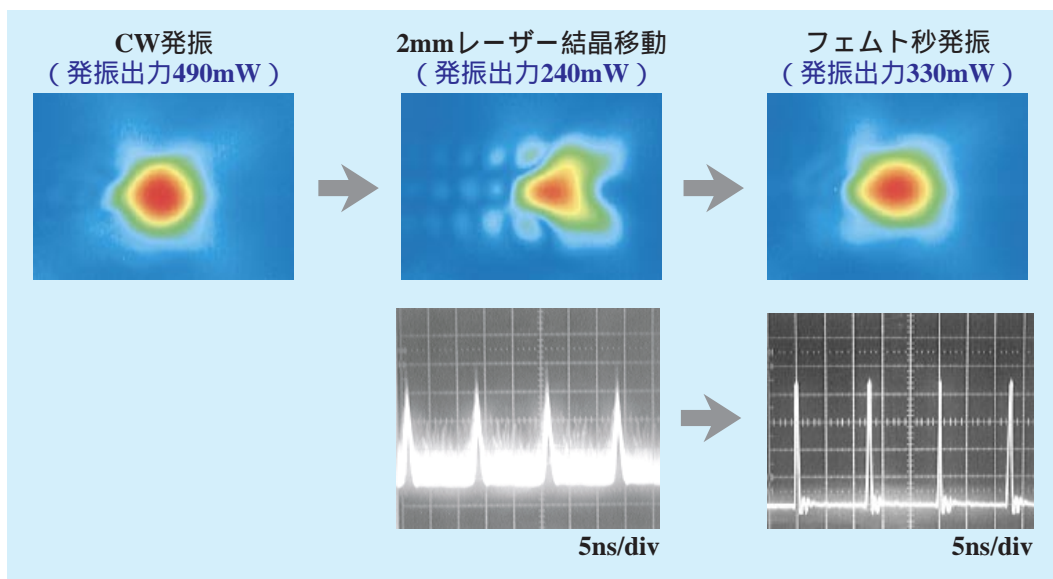


図7 CW発振から安定な自己モード同期発振移行の様子

上段：ビームパターン 下段：ビームのオシロスコープ波形

を示している。図7の中央の奇妙な形のビームパターンは自己モード同期動作前の自由発振時のパターンを示す。このようなビームパターンが得られるように共振器を注意深く調整した後、わずかな変動を共振器に与えることにより、右端図のようなビームパターンをもつ安定な自己モード同期発振が得られる。このときのパルス列が右端下図に示されているが、パルスの自己相関波形からこれらのパルス幅は35fsであった。中央下図に示された自由発振時のオシロスコープ写真はCW発振に重畳したノイズ部分を拡大したものである。このようなノイズパルスの1つが種パルスとなって右図の自己モード同期パルスへと成長する。別の実験結果からこの成長に要する時間は300 $\mu$ sと見積られている。

中央のビームパターンが得られる位置からレーザー結晶を励起光源とは逆の方向に2mm程度移動させることにより、左端図のようなほぼ完全なガウシアンビームを得ることができる。このとき、ノイズパルスは消失し完全なCW発振となる。実際の調整では、最大のCW発振出力ときれいなガウシアンビームが得られるように共振器を調整したのち、中央のパターンが得られるまでレーザー結晶を励起光側へ移動することになる。興味深いことに、この移動で発振出力は490mW(励起パワー6.5Wのとき)から240mWまで減少するものの自己モード同期発振への移行とともに330mWまで上昇する。このようなビームパターン以外の配置でも自己モード同期発振は可能で

あるが、発振は不安定になり、出力も30%程度減少する。本研究で得られたクロムフォスフェイトレーザーの尖頭出力は120kWであり、これまで報告された最大値とほぼ同等である。今後、分散補償の最適化、平均出力の増加により、200kW以上が可能だと考えている。

図7中央に示す奇妙なビームパターンが得られる原因を明らかにするために図8に示すような実験を行った。図には3つのビームパターンが示されているが、上の図はナイフエッジをレーザー出力方向に向かって左方向から挿入しビームの一部をカットしたとき、下の図は右方向からの場合である。共振器内ビームの右側の一部をカットしたとき、水玉模様の多モード発振は完全に消失し、三角状のシングルモード発振のみが現れる。また、左方向からのカットでは両方のモードが変調を受けている。これらの結果から、共振器内にはシングルモード発振と多モード発振が独立して共存していることがわかる。このような2つの発振は結晶の励起光源側への移動により、利得領域が空間的に拡大された結果である。レーザー結晶内でのこれら2つの発振の相互作用が図7で示されたノイズになって現れる。シングルモードをもつ光ビームは種パルスのモード同期パルスへの成長とともに、結晶内にカーレンズ効果を誘起し、その結果多モード発振部分の利得領域を侵食し、ついには図7の右端図に示すようなビームパターンを形成するものと考えられる。

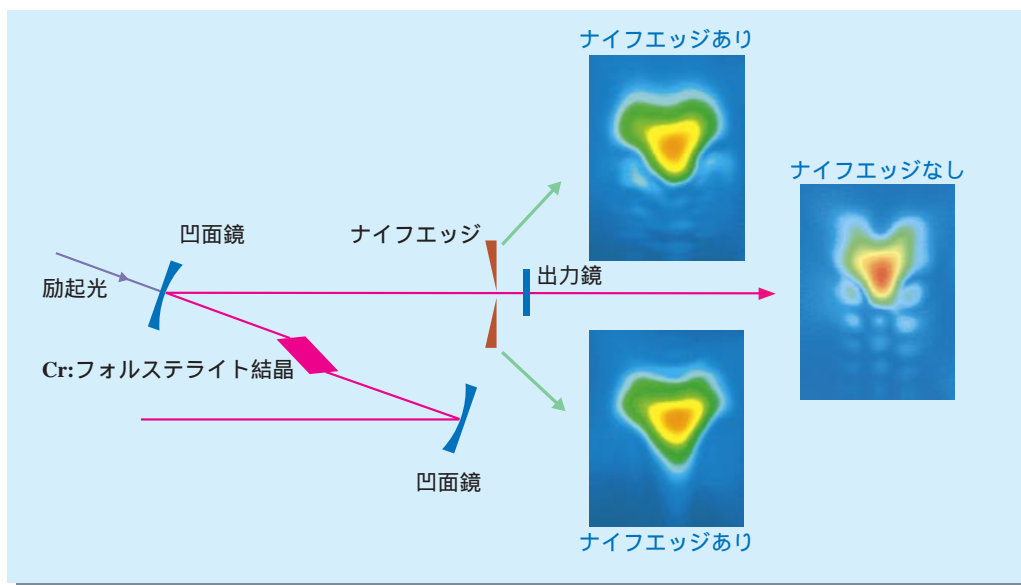


図8 ナイフエッジの挿入によるビームパターンの変化

## 5 .まとめ

応用範囲の広い2つのフェムト秒固体レーザーの高出力化と安定化を行った。チタンサファイアレーザーでは、レーザー結晶および共振器配置の最適化により MW 級フェムト秒発振器の開発に成功した。また、MW 級発振器に当所で開発した低損失半導体可飽和吸収鏡 (SESAM) を内蔵することにより、高安定な MW 級全固体フェムト秒レーザー発振器を実現した。クロムフォスフェイトレーザーでは、安定な自己モード同期発振のための最適配置を高出力発振可能な状態で見出した。本装置に SESAM を導入することにより、高品質高安定な高出力フェムト秒クロムフォスフェイトレーザーの提供が可能となる。

### 参考文献

- 1) Z. Zhang, T. Nakagawa, H. Takada, K. Torizuka, T. Sugaya, T. Miura and K. Kobayashi, Opt. Commun. 176, 171 (2000).
- 2) L. Xu, G. Tempea, Ch. Spielmann, F. Krausz, A. Stingl, K. Ferencz, and S. Takano, Opt. Lett. 23, 789 (1998).
- 3) T. Beddard, W. Sibbett, and D. T. Reid, J. Garduno-Mejia, N. Jamasbi, and M. Mohebi, Opt. Lett. 24, 163 (1999).

### 研究課題

産業科学技術研究開発

超短パルス光エレクトロニクス技術開発評価

### 用語説明

#### カーレンズ効果

レーザー結晶中に誘起された光カー効果によって、結晶中を伝播するレーザービームが凸レンズを通過したのと同値となる効果。光カー効果は物質固有の屈折率より光ビーム強度に比例したある量だけ屈折率が大きくなる効果。パルスレーザービームは時間的にも空間的にも光強度が変化するため、時間的カー効果と空間的カー効果が同時に発生する。時間的カー効果は、フェムト秒パルス形成に必須なスペクトルの拡大を引き起こし、空間的カー効果は、カーレンズ効果となる。カーレンズ効果は自己モード同期の形成を可能にする。

---

### ラボメンバー (Lab. Members)

**挾間 壽文 (Toshifumi Hasama)**

e-mail:hasama@etl.go.jp

**蒋 捷 (Jiang Jie)**

**菅谷 武芳 (Takeyoshi Sugaya)**

**中川 格 (Tadashi Nakagawa)**

**張 志剛 (Zhang Zhigang)**

光技術部 (Optoelectronics Division)

光技術部 (Optoelectronics Division)

電子デバイス部 (Electron Devices Division)

電子デバイス部 (Electron Devices Division)

技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究開発機 (FESTA)

# 光度および光束の国家標準の値の変更について

## Modification of The Values of The National Standard of

### Luminous Intensity and Luminous Flux

当所は、この度、極低温放射計に基づいた新たなる光度・光束の国家標準の値を設定した。また、この新しい標準の値を用いて国際比較に参加し、良好な結果が得られた。この結果を踏まえ、当所で国内供給を行っている光度および光束の国家標準の値を変更する。これに伴ない、関係各機関を通じて今年度中に新たな標準が供給されることになる。

国際単位系(SI)の7つの基本単位に含まれる光度の単位カンデラ(記号cd)の定義は、1979年の第16回国際度量衡総会で採択され、日本においても現計量法に新定義が取り入れられた。

定義に基づき光度の標準値を具現するには、高温黒体炉等の放射源、あるいは電力置換型放射計等の検出器を用いる二つの方法がある。しかし黒体炉が温度目盛の精度の影響を受けるのに対して、電力置換型放射計は、キャピティを極低温(液体He温度)に保つことにより、良好な等価性を実現できることから、各国の標準機関において光度の標準値を具現するために導入・使用されている。当所においても1994年に極低温放射計を導入し、得られた高精度な分光応答度に基づき、新たな光度・光束の国家標準の値の設定を行ってきた<sup>1)</sup>。光束の国家標準の値は、光度の標準の値に基づき、配光測定装置を用いて全光束標準電球の全空間の光度を、5度間隔で測定することにより得られた。光度の測定不確かさは0.28%(1 $\sigma$ )、光束の測定不確かさは0.34%(1 $\sigma$ )である。

国際度量衡委員会(CIPM)測光放射測定諮問委員会(CCPR)主催による基幹国際比較(Key-Comparison)の一環として、光度(CCPR-K3a)ならびに光束(CCPR-K4)の国際比較が、ドイツ連邦物理工学研究所(PTB)を幹事所として1997~1999年に実施され、当所も新たに設定を行った光度・光束の標準値を用い、国際比較に参加した。参加17機関のうち当所を含め6機関が極低温放射計を基準にして仲介用標準電球に値をつけている。同国際比較にはCCPR主催の国際比較として最初にKey Comparison Reference Value(KCRV)が導入された。当所のKCRVからのはずれは、1999年12月の最終報告<sup>2)</sup>にあるように光度:-0.09%、光束:+0.18%である。

新たに設定した光度・光束の国家標準の値を、現行の標準の値による国内供給値と比較した場合、それらの相関は表1のようになる。

| [ 光度 ] |        |               |
|--------|--------|---------------|
| 分布温度   | 現行の標準値 | 新しい標準値        |
| 約2856K | 1.000  | 1.008 (+0.8%) |
| 約2600K | 1.000  | 1.003 (+0.3%) |
| 約2350K | 1.000  | 1.001 (+0.1%) |
| 約2042K | 1.000  | 1.000         |
| [ 光束 ] |        |               |
| 分布温度   | 現行の標準値 | 新しい標準値        |
| 約2790K | 1.000  | 0.993 (-0.7%) |
| 約2357K | 1.000  | 1.010 (+1.0%) |

表1 現行の標準値と新しい標準値との相関

現行の標準の値で校正されている光度標準電球、光束標準電球の校正値を新しい標準の値で表す場合には、表1の新しい標準値の欄に示す数値を係数として掛ければ新しい標準の値で表すことが出来る。

#### 例1) 光度

現行の校正値: 300cd (約2856Kの場合)  
 $300\text{cd} \times 1.008 = 302.4\text{cd}$ : 新しい校正値

#### 例2) 光度

現行の校正値: 100cd (約2350Kの場合)  
 $100\text{cd} \times 1.001 = 100.1\text{cd}$ : 新しい校正値

#### 例3) 光束

現行の校正値: 1000lm (約2790Kの場合)  
 $1000\text{lm} \times 0.993 = 993.0\text{lm}$ : 新しい校正値

光度および光束の国家標準の値の変更に関する不明点は、担当者(量子放射部 齊藤一朗、TEL. 0298-61-5655、e-mail: isaito@etl.go.jp)にお問い合わせください。

#### 参考文献

- 1) 小貫他: 電総研彙報第64巻第8号 57-63(2000)
- 2) G.Sauter et al.: PTB-Opt-62(1999)

# 平成11年度共同研究事例

産学官連携推進センター長 太田公廣

産学官連携研究の重要性がさげばれ、その成果に世間の注目が集まっております。当所では連携研究として、共同研究、技術指導、受託研究、委託研究などの制度がありますが、それらのなかで共同研究が最も多く、その数も年々増加傾向にあります。平成11年度には158件に達しており、ここにその事例の一端をご紹介します。共同研究の詳細、あるいは研究成果の技術移転については産学官連携推進センター (Tel:0298-61-5076) までお問い合わせ下さい。

| 所 属   | 研究担当者   | 相手方機関名    | 研究題目                                | 実施内容   |
|-------|---|-----------|-------------------------------------|--|
| 基礎計測部 | 蘆原 郁  | 日本電気株式会社  | 不快音の評価基準に関する研究                      | オフィス空間における不快音の評価基準を確立するため、OA機器の音響物理測定と音の印象についての主観的評価実験を行った。このうち主に音響物理測定を当所にて行った。測定および実験の結果、10kHzをこえる高周波数領域の音響成分を不快に感じるヒトが存在することがわかった。従来の騒音評価基準では、12kHzをこえる高周波数音についての評価ができないため、新たな評価基準の確立が必要である。しかし、このような高周波数領域では、音圧の精密計測が困難なため、聴力検査法も確立されていない。また、高周波数領域では聴力の個人差がきわめて大きいことから、評価基準の確立は容易ではない。さらに、単純に音の大きさだけではなく、音色が主観的な快/不快の判断に大きな影響を及ぼしていることから、音色も含めた総合的な評価基準が必要であると考えられる。    |
| 首席研究官 | 河野 憲二<br>設楽 宗孝<br>北澤 茂<br>大石 高生<br>松田 圭司<br>他5名 | 科学技術振興事業団 | 運動指令構築の脳内メカニズムの生理学的、行動学的研究(戦略的基礎研究) | 動物の滑らかで素早い運動制御の神経機構を明らかにすることを目標とした。本年度は運動制御の例として、輻輳開散運動の制御機構を対象とし、眼球運動の制御機構を調べた。輻輳開散運動は、物体を見る時に両眼の網膜像を融合させるために起こる眼球運動である。より近くにあるものを見るときには輻輳運動、より遠いものを見る時には開散運動が起こる。この眼球運動が起こるための重要な手がかりの一つは、両眼視差である。両眼視差を与え、サルが輻輳開散運動を起こしているときに、大脳皮質MST野からニューロン活動を記録し、ニューロン活動と眼球運動の関係を調べた。   |
| 電子基礎部 | 岡田 安正   | 茨城大学工学部   | セレン化亜鉛(ZnSe)結晶の化学量論比の制御と評価          | 熱処理されたZnSe結晶の格子定数をBond法によって測った。熱処理は、融液から成長後、Znリザーバーを熱することによって一定のZn分圧下で1000°Cで行った。熱処理中のZnリザーバー温度 $T_{Zn(A)}$ に依存する格子定数は、 $T_{Zn(A)}=450\sim 600^{\circ}C$ で $a=0.566898\pm 0.000005nm$ 、 $T_{Zn(A)}=750^{\circ}C$ で $a=0.566910\pm 0.000005nm$ 、 $T_{Zn(A)}=900^{\circ}C$ で $a=0.566913\pm 0.000003nm$ であった。格子定数のZn分圧による依存性を検討した。ZnSe単結晶の格子定数が(AlI)不純物と熱処理によって、増大することを明らかにした。 |
| 極限技術部 | 大和田野 芳郎<br>加藤 進                                 | 日本原子力研究所  | 電離衝突過程を考慮したレーザー航跡場とX線発生に関する研究       | 短パルスレーザーと物質の相互作用では、レーザーの吸収・伝播機構が非常に特異なものになることが予想されている。しかし、相互作用の非線形性が極めて強いいためその理論モデルの確立はおろか、シミュレーションによる定量的な解析さえ十分に行われていない。このため、本共同研究は新しい計算手法及びシミュレーションコードの開発を目的とした。特に、レーザー加速では、Tキューブレーザーを用いて生成したレーザー航跡場中に、加速する電子ビームをレーザービームと同期を取って入射する。このとき、加速された電子のエネルギー分布が重要な問題となる。特に、エネルギーの単色性の良い電子ビームの生成が、重要な目標となる。本年度は、入射電子の軌道を解析するように電離過程を考慮した粒子シミュレーションコード                             |

| 所 属                 | 研究担当者                            | 相手方機関名     | 研究題目                               | 実施内容  |
|---------------------|----------------------------------|------------|------------------------------------|---|
|                     |                                  |            |                                    | を改良した。また、このコードを用い、電離衝突過程がレーザー航跡場による加速電子のエネルギー分布を評価した。   |
| 知能システム部             | 河井 良浩<br>富田 文明<br>植芝 俊夫<br>宮川 正弘 | 筑波技術短期大学   | 視覚障害者の支援システムに関する研究                 | 視覚障害者が日常生活及び社会生活において、晴眼者と同等に活動できるような支援システムの研究・開発を行うこと目標とし、特に、3次元世界における視覚情報の聴覚情報への変換、3次元音響表示、及びそのインタフェースに重点を置いて研究・開発を進めた。平成11年度の研究内容と成果を以下に挙げる。<br>(1)視覚障害者が全方位カメラをヘルメットに装着し、仮想音を頼りにある色の目標物に近づくタスクの実験を行い、その歩行軌跡を解析し、どのように音を定位しているかを調べた。基本的には音源方向の特定、自分の正面位置へ定位、目標に近づくプロセスを取ることが判明し、初期の同定時間にはかなり個人差が見られた。<br>(2)視覚障害者の視点に近い画像を得るための、ヘッドセットステレオカメラシステムを構築し、ユーザの視点に基づく3次元距離データの獲得に関して実験を行った。<br>(3)ステレオ対応の骨伝導ヘッドホンを開発し、視覚障害者の耳を塞ぐことなく（既存の聴覚感覚を損なうことなく）仮想音を提示する手法を開発した。<br>(4)立体音場システムにおいて、実環境下での使用模擬実験として、交差点の環境音下で視覚障害者用信号機の音を仮想的に生成し、音像位置定位実験を行った。実験結果を解析から、誤認識が上下方向で多発するのが見られ、上下方向は周波数の高低に対比していることから、仮想音源の音のフィルタリング操作により違いを強調する必要があることが判明した。 |
| 量子放射部               | 坂本 勲                             | 武蔵工業大学工学部  | 高機能電子材料創製のためのインピ-ム照射効果の研究          | 本年度においては、内部転換電子メスバウア散乱法(CEMS)及びX線回折法(XRD)を用いたSUS304、304Sオーステナイトステンレス鋼へのHe照射効果、Feイオン注入によるトンネル型巨大磁気抵抗材料の開発について共同研究を進めた。オーステナイトステンレス鋼へのHe照射効果については、SUS304、304Sイオン照射試料のCEMS、XRDによる測定において、相変態の前駆現象と考えている $\gamma'$ 相の存在を確認し、イオン誘起された $\alpha''$ 相の内部磁場が304に比べ304Sにおいて2.4T小さいことが分かった。また、 $^{57}\text{Fe}$ イオンを注入した単結晶 $\text{Al}_2\text{O}_3$ の磁場印加CEMS測定を行い、CEMスペクトルの磁場依存性についていくつかの成分を仮定し解析した。その結果、速度ゼロ近傍のピークがFe微粒子の超常磁性状態に対応するピークであることを確認し、磁気分裂ピークの磁場依存性から $\text{Al}_2\text{O}_3$ 中に分布するFe微粒子半径が、1.5nmと2.1nmの種類であると評価した。   |
| 情報科学部               | 橋田 浩一<br>和泉 潔                    | 科学技術振興事業団  | 人工社会・経済モデルによる意思決定支援システムの構築         | 本研究では、社会的状況での意思決定を支援するための新しいシステムを計算機上に構築する。最初に金融市場を題材として、人工社会・経済アプローチによる意思決定支援システムの構築を行う。具体的な内容としては、仮想的な社会・経済集団のマルチエージェントモデルを構築し、計算機シミュレーションを行う。これにより、対象となる社会的現象と各エージェントの情報処理・相互作用とのミクロ-マクロ関係のメカニズムを明らかにする。   |
| 大阪ライフエレクトロニクス研究センター | 守谷 哲郎<br>中野 洋<br>飯高 弘<br>藤縄 幸雄   | 株式会社サンコ-シヤ | 地震前兆電磁界発生現象の多点計測技術および発生源同定技術に関する研究 | 群発地震が起こっている伊豆半島周囲に観測点を設ける観点から、静岡県内の5点を観測点(平成10~11年度に整備)に加え、当年度から電磁界計測を開始した。年度後半には、伊豆大島及び野でも電磁界計測を開始することとした。多点データから得られる地震の時間的・空間的關係に注目しながら、ELF/VLF帯のパルス状の地中電磁波信号(VPS)の特性解析に着手した。その結果、地震活動に近い測点でのみ検知されるVPSの自動判定がかなりの確度で行えることが判明した。更に信号レベルの比較的小さな信号では、地震との関係が大きいことがわかり、震源域から直接に放射されるVPSの検出が自動的にい行え、発生場所の予測に使える見通しが得られた。  |

| 所 属                             | 研究担当者                                    | 相手方機関名         | 研究題目   | 実施内容  |
|---------------------------------|--|----------------|--|---|
|                                 |  |                |  | ULF帯の信号については、顕著な異常信号が検出されていた1998年の長野県と岐阜県境近くの群発地震が1999年末に収束するにともなって電磁気異常がほとんど消滅し、今回の異常現象が地震活動と密接に関連していたことが、より鮮明となった。また、1999年10月から始まった日光白根山付近の群発地震にともなう栃木県栗野町におけるデータに関しても、伊豆半島東方沖群発地震活動および伊豆大島における小規模噴火活動にともなうデータ等と類似性が高く、「電磁場変動発生メカニズムとしては、マグマ活動等を起源とした地下間隙水の流動による流動電位効果に関係したものである」との、これまでの推測を支持する証拠を得た。  |
| 大阪ライフ<br>エレクトロ<br>ニクス研究<br>センター | 外池 光雄<br>山口 雅彦                           | 聖マリアンナ<br>医科大学 | 人間の嗅覚反応、<br>並びに眼球運動<br>等に関する非侵襲<br>的他覚的計測<br>法に関する研究 | 嗅覚の非侵襲的他覚的計測法の研究は、産業応用や臨床医学の面から強く切望されているにも拘わらず、他の感覚分野よりも研究が遅れているのが現状である。そこで本年度は、能動的嗅覚に関するsniffing実験の検討や、眼球運動や、めまい感覚などをはじめ、高次の精神活動を含む大脳神経活動について、現在、ヒトに対する種々の非侵襲的計測手法によってどのような臨床的検査が可能かについて実験的検討を行った。また、本年度はこれまで蓄積してしてきた共同研究者双方の固有技術をお互いに活かして、例えばfMRIやMEG等による眼球運動の研究のように、新しい非侵襲計測法の開発を行うなど、これらの計測技術を嗅覚の研究や眼球運動等の基礎的並びに臨床的分野に応用するための共同研究を実施した。   |
| 超分子部                            | 守谷 哲郎<br>中井 敏晴                           | 浜松医科大学         | fMRIによる高次<br>脳機能の研究                                  | 本研究は、磁気共鳴機能画像法(fMRI)を用いて、ヒトの言語情報処理過程、特に文字の認知と言葉の聴覚理解の機構を解明し、fMRIを医療福祉技術として確立することを目的としている。具体的には、脳神経外科領域における手術計画や、脳血管障害等における治療効果判定、経過観察への応用を目的とした体系的な言語機能計測法を確立することを目指す。平成11年度は、知能や書字の発達と関連の深い、図形の分節化と模写に関して、見本図形の提示時間と分節化方略の2要因に着目して検討を行った。その結果、いわゆるゲシュタルトの法則に従わない分節化を行って模写する場合は、見本の提示時間に関わらず左運動前野腹側部の賦活が見られた。このことから、発話を含む動作系列の産出に関わるとされるブローカ野近傍は、図形の系列的再生にも関与していることが示唆された。また、言語の聴覚理解において重要なメカニズムである選択的注意の機構について、音韻と意味の弁別を行わせる実験を行い、言語野における音韻処理の機構に対して、前頭連合野における意味的选择的注意のシステムが上位機構として働くことにより、言葉の聞き取りにおける階層的処理システムが構成されていることを見いだした。 |
| 材料科学部                           | 松田 彰久<br>近藤 道雄<br>秦 信宏<br>豊島 安健<br>亀井 利浩 | 東京工業大学<br>工学部  | 薄膜シリコン太<br>陽電池材料の開<br>発と評価                           | ニューサンシャイン計画のもと、薄膜シリコン系太陽電池開発のための、材料・基板技術開発プロジェクトにおける、当所「薄膜シリコン系太陽電池スーパーラボ」とプロジェクト参画企業、大学等との共同研究の一部である。高性能薄膜シリコン太陽電池の実現に向けて、その材料開発及び太陽電池による評価を集中的に行う。具体的には、新しい薄膜形成手法を用いてアモルファスシリコンから多結晶シリコン薄膜までを、低温度において製膜するための技術開発を行う。得られた薄膜を、一定光電流法、ラマン分光法、赤外分光法などを用いて総合的に評価し、膜形成技術へとフィードバックする。さらに、この新手法により作製した膜が、太陽電池用材料として使用可能な特性を有するかどうか、実際にセルを作製して評価する。  |
| 情報アーキ<br>テクチャ部                  | 児玉 祐悦<br>坂根 広史                           | 株式会社画像<br>技研   | 多体問題専用高<br>速計算処理装置<br>の開発                            | 多体問題を解く計算機システムの性能を高める技術を追求めしプロトタイプを開発することを目標として、株式会社画像技研が開発した多体問題専用計算機MD-1と、当所が開発したマルチスレッド並列計算機EM-Xの、両者のアーキテクチャを取り入れた新しい多体問題高速計算システムについて検討を行う。  |

| 所 属    | 研究担当者                                       | 相手方機関名            | 研究題目                         | 実施内容  |
|--------|---|-------------------|------------------------------|---|
|        |   |                   |                              | 分子動力学や宇宙物理学のシミュレーション等に現れる多体問題の大部分は単純な計算の繰り返しであり、ハードウェア化にむいている。その観点で開発されたMD-1は、新たに設計された演算LSIを用いることにより数十GFlopsという非常に高い実効性能を持つが、計算の柔軟性不足や、通信ボトルネックによる性能向上の頭打ち現象が問題点として挙げられている。一方EM-Xは、効率の良い汎用並列計算能力を持つとともにハードウェア拡張性に優れている。本研究では両者の利点を取り入れて、より優れた多体問題計算システムを構築するために、両者のアーキテクチャを融合する方法を検討し、プロトタイプ製作によってその有効性を検証した。   |
| エネルギー部 | 新井 和昭<br>海保 勝之<br>山口 浩                      | 成蹊大学工学部           | 超音波信号を用いた超電導マグネットの状態推定に関する研究 | 交流超電導コイルの状態を、超電導巻線に擾乱を与えない方法として、コイルから生ずる超音波信号及び超電導コイルを透過する超音波の伝達関数を用いて評価する研究を行った。交流コイルは、計測線等の擾乱によりコイルの状態が変化する傾向が強いが、本研究の手法は、超電導巻線に擾乱を全く与えないことからコイルの状態を変えずに超電導状態の変化を分析することができる。本年度は、コイルから生ずる超音波信号を用いて、AE信号に含まれるエネルギーと交流コイルの常電導成分の成長、擾乱によるAE信号とクエンチ現象との関連、これらのAE信号のパターンの特性を明らかにし、交流超電導コイルのAEによる分析法を開発した。<br>伝達関数を用いる方法では、白色雑音を用いてコイルを透過した音響信号をAEセンサーで検出し、その伝達関数の電流依存性を求め、振幅、位相について、クエンチ前後の違いを明らかにした。また、AEによる分法を酸化物超電導コイルに適用するため、銀シースピスマス系2223超電導線材に関して、短時間に通電電流が急激に増加した場合の50~70Aの大振幅、電流上昇率14kA/s~1400kA/sの三角波及び方形波の通電により発生した電圧特性を調べた。 |
| エネルギー部 | 山口 浩<br>佐藤 之彦                               | 東京工業大学工学部         | 超伝導燃線導体の偏流現象に関する基礎的研究        | 大電流容量の超電導導体を実現する場合、多数の素線を撚り合わせた構造にせざるを得ない。しかし、こうした超電導燃線導体には、多数の素線の並列回路が構成され、これら並列回路間のわずかな回路定数の差により、各素線の電流が均一に流れない偏流現象が発生する。この偏流現象の解決は、電力用超電導器機などの開発を行う上で、重要な課題である。偏流現象の解決のため、これまでに解析モデルの提案や、それに基づく理論解析及び偏流抑制法の提案を行ってきた。しかし、提案した解析モデルの等価回路定数の実験的確認は、回路定数が微量であるため、十分に行われていなかった。本研究では、試作超電導コイルを用いて、提案している偏流解析モデルの回路定数測定を行い、各定数の測定に成功した。また、実験結果から、これまでに提案してきた解析モデル及び理論解析の妥当性を示した。   |
| 光技術部   | 仁木 栄<br>山田 昭政<br>ポール・フォンス<br>松原 浩司<br>岩田 拓也 | ローム株式会社           | 酸化亜鉛系化合物半導体薄膜の成長および評価        | ローム株式会社及び京都大学との共同研究により、電子材料品質のZnO単結晶薄膜の作製を目標に、研究を推進した。従来のC面サファイア基板上に成長させたZnO薄膜は、結晶方位の完全に揃った単結晶を得るのが難しく回折ドメインが発生していたが、A面(11-20)サファイア基板を用いることにより、結晶方位の完全に揃った単結晶を得ることに成功した。X線回折による評価では、回折線の半値幅が $0.003^\circ$ と装置の検出限界を越えるほど良質な薄膜が作製できた。サファイアA面(11-20)基板の使用以外にも、低温バッファ層の導入、高温成長等の独自の手法を開発することで、成長後の熱処理無しに、残留電子濃度が $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下、移動度が $120 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 以上、という電子材料品質のZnO単結晶薄膜の作製に成功した。  |
| 光技術部   | 小見山 耕司<br>森岡 健浩                             | 新エネルギー・産業技術総合開発機構 | 電磁環境両立性保証のための標準測定オープン        | 30MHz~1000MHzのアンテナ測定は、波長が長い低周波数帯でアンテナが大きくなるため、電波暗室での測定の困難さやコストの点から、オープンサイトでの測定が行われている。電波  |

| 所 属         | 研究担当者                   | 相手方機関名                   | 研究題目  | 実施内容   |
|-------------|-------------------------|--------------------------|---|--|
|             |                         |                          | サイト評価の基盤技術開発（標準オープンサイトでのアンテナ測定における測定場評価技術の開発） | 暗室は、低反射材料で作られた壁・床・天井により電気的な自由空間を創造した設備であるが、オープンサイトは露天下で、周囲と上空の自由空間を利用するアンテナ測定設備である。しかし、地面の存在が送受アンテナ間の伝播以外の電波の反射を引き起こし、特に、自然のままの地面は、反射状態の予測がつかないため、測定精度の評価が不可能である。標準オープンサイトは、地面に平らな金属接地板（グランドプレーン）を敷くことにより、電波反射を既知の量に近づけて理論的に予測可能な状態を実現し、測定精度を保持するアンテナ測定設備である。そこではグランドプレーン上でアンテナマストに送受アンテナを取り付けて測定を行う。測定にはネットワークアナライザを用い、主に送受アンテナ間の伝播減衰量を測定する。測定実験は当所とトーキン・イ・エム・シ・エンジニアリングで共同で行った。    |
| エネルギー - 基礎部 | 奥尾 隆保<br>加賀 保男<br>門馬 昭彦 | 日本コ - ティ<br>ング工業株式<br>会社 | 溶射技術を用いた固体電解質燃料電池の研究開発                        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) スタックセル用電流捕集型空気極構造「活性層+LSMコア層+電流捕集用多孔質合金層」に於けるLSMコア層と合金層界面の抵抗を高温長時間動作条件下で評価し、そこでの接触抵抗は長時間（約3000時間以上）にわたりきわめて低い値（数mΩ/cell）が保持できることが明らかとなった。</li> <li>2) 多孔質合金層（空気極電流捕集膜）のシントリング防止策を各種酸化物を添加し成膜した試料について検討した。この結果、5%のLaSrCrO<sub>3</sub>を添加したものが比較的良好な結果であった。</li> <li>3) 組立式スタックセル進展構造を試作検討した。これに必要なガスシ - ル並びに導通性を有する接合構造を開発・適用した。</li> </ol> |

## 受賞

つくば奨励賞（若手研究者部門）  
 村川 正宏（情報アーキテクチャ部）  
 （平成 13 年 2 月 5 日）



授賞式会場にて（児玉所長、大津知能情報部長とともに）

研究の名称：進化型アナログ LSI の研究開発

研究の内容：村川氏は、「進化型アナログ LSI」という新しい LSI の概念を提案し、その研究開発に取り組んでいる。同技術は、人工知能の分野において研究されている探索手法の一つである進化型計算を用いて、従来のアナログ LSI の問題点である、歩留まりの低さ、面積増加、消費電力増大という三つの問題を解決する画期的な技術である。

氏は、平成 11 年度に旭化成マイクロシステムと共同で、携帯電話の中間周波数フィルタを実現する進化型アナログ LSI の開発に成功した。同 LSI は、進化型計算を利用した調整機構を内蔵し、これにより、

- 1 96% の歩留まり（製造した全 LSI のうち、仕様を満たす LSI 数の比率）
- 2 LSI の小型化（同社従来品の 5 分の 2 の大きさに縮小（フィルタ部分））
- 3 小型化による消費電力の 40% 低減（同社従来品との比較）

という画期的な性能向上を達成できた。この LSI は、平成 13 年 9 月から大手携帯電話会社での搭載が内定し、月産で約 50 万チップ以上の生産が予定されている。

一般に高性能のアナログ LSI ほど、製造時の性能バラツキのために、仕様どおりの製品が得にくく、これが歩留まりの悪さにつながっている。携帯電話の中間周波数フィルタでは特に製品仕様が厳しく、通過

帯域の中心周波数の 1% のずれも許されない。それゆえに、製造時のわずかな誤差が性能に大きな影響を与えるため、歩留まりの悪さは深刻であった。しかし、開発した LSI では、個々の LSI ごとに進化型計算を用いて調整を行うことによって、製品仕様をみたくすることを可能にした。また従来は、アナログ LSI の性能精度をあげるためには、アナログ素子（抵抗、トランジスタ等）を大きく作る方法をとっていた。しかしながら、これでは回路規模が大きくなると共に、消費電力も増加する。しかし、開発した LSI のように、製造後に LSI ごとの調整が可能であれば、製造直後の精度は悪くてもよいので、アナログ素子を小さく作る（つまりは回路規模を小さくする）ように設計できる。

この技術は、携帯電話用フィルタのみならず、さまざまなアナログ LSI に適用可能である。このような技術が半導体研究においてアカデミアより提案されることは稀有であり、第 2 回進化システム国際会議で最優秀論文賞を受賞したことから明らかのように、国際的にもきわめて高い評価を受けている。また、基本特許および周辺特許を国内・国外で複数出願中であることから、非常に実用性の高い技術であるといえる。なお本研究は来年度つくばに発足予定の「次世代半導体研究開発センター」において、今後の IT 革命を支える根幹技術としてさらなる研究展開が期待されている。

平成 12 年 12 月 18 日、笹川 堯国務大臣（科学技術政策担当）が当所を視察されました。

はじめに所長から当所の沿革、概要等について説明を聞かれ、引き続いて最新の研究成果の中から「フラットパネルディスプレイ」（電子デバイス部：伊藤 順司 主任研究官）、「ウェアラブルビジョン」（知能情報部：蔵田 武志 主任研究官）の研究について各担当者から説明を聞かれました。



当所を訪れた笹川大臣



フラットパネルディスプレイの説明を聞く笹川大臣

平成 12 年 12 月 19 日、北海道大学学术交流会館（北海道札幌市）を会場に「産学官技術移転フォーラム 工業技術院研究所・産学技術交流会」（主催：工業技術院他）が開催されました。

本交流会は、工業技術院傘下 15 研究所の研究成果を紹介し、道内の企業・研究機関との技術交流を積極的に推進することを目的として開催されました。当所からはポスターセッションへの最新技術シーズ紹介パネル出展の他、太田産学官連携推進センター長により研究所概要および最近の技術移転事例が紹介されました。



研究所の概要を説明する太田センター長



ポスターセッション会場

## 技術交流 in つくば 2001

2001.1.19 ~ 1.20

平成13年1月19日～20日の2日間、つくば国際会議場「エポカルつくば」(茨城県つくば市)を会場に「技術交流 in つくば 2001」(主催：筑波研究学園都市機関等連絡協議会他)が開催されました。

本フェアは、産学官の技術交流を目的として毎年開催されていますが、今回から内容を一新し、講演会・パネルディスカッションと研究成果のプレゼンテーションが行われました。当所からは「電子技術総合研究所における情報処理技術」と題するプレゼンテーションを築山産学官連携推進センター副センター長が行いました。



プレゼンテーションを行う築山副センター長

## 東葛・川口地域技術シーズマッチング交流会

2001.1.22

平成13年1月22日、東葛テクノプラザ(千葉県柏市)を会場に「東葛・川口地域技術シーズマッチング交流会」(主催：東葛・川口地域新産業創出推進ネットワーク)が開催されました。

本交流会は、当該地域企業と研究機関および大学との技術交流を目的として開催され、各機関の保有する技術シーズが紹介されました。当所からは「骨導超音波補聴器の開発」、「新型非接触温度計」、「進化型チップによる多自由度筋電義手の操作」の各研究に関するパネルを出展しました。



研究内容を説明する太田センター長

## 工業所有権取得状況

( 2000.4.1 ~ 2001.1.31 )

## 国内特許

は前年度未掲載分 \*は当所職員以外

| 発 明 の 名 称                                     | 登録番号      | 登録日        | 発 明 者   |
|---|-----------|------------|---|
| 電界放出素子及びその製造方法                                | 特 2892587 | 1999.2.26  | 伊藤 順司、金丸 正剛、*伊藤 茂生、<br>*渡辺 照男、*落合 久隆                              |
| ラジオ波磁場強度の勾配を利用する磁気共鳴<br>イメージング装置              | 特 2961229 | 1999.8.6   | 服部 峰之、清水 秀明、守谷 哲郎   |
| アモルファスシリコン系薄膜の製法                              | 特 2975942 | 1999.9.10  | 松田 彰久、*戸田 誠、*藤田 幸治、<br>*真嶋 訓志                                     |
| 光物性評価方法                                       | 特 3005625 | 1999.11.26 | 守谷 哲郎、*平賀 隆   |
| 電子放出素子及びその製造方法                                | 特 3012517 | 1999.12.10 | 金丸 正剛、伊藤 順司、*蒲生 秀典  |
| 薄膜製造装置  | 特 3030309 | 2000.2.10  | 守谷 哲郎、*平賀 隆   |
| 高い第三次光非線形係数を有するJ会合体薄膜、<br>それをを用いた光学素子及びその製造方法 | 特 3032805 | 2000.2.18  | 周 豪慎、本間 格   |
| 積層型超電導ケーブル                                    | 特 3051884 | 2000.4.7   | 近藤 潤次、石井 格、山口 浩、<br>新井 和昭、海保 勝之                                   |
| インピーダンス可変型超電導限流器                              | 特 3051915 | 2000.4.7   | 玉田 紀治、岡野 眞  |
| 磁束バランス型超電導限流器                                 | 特 3051916 | 2000.4.7   | 玉田 紀治、岡野 眞  |
| ガス励起装置  | 特 3051930 | 2000.4.7   | 奥田 功  |
| 画像解析方法  | 特 3051936 | 2000.4.7   | 河井 良浩、富田 文明、*高城 英誌、<br>*石山 豊                                      |
| 画像処理方法  | 特 3054681 | 2000.4.14  | 角 保志、富田 文明、*石山 豊  |
| 画像処理方法  | 特 3054682 | 2000.4.14  | 角 保志、富田 文明、*石山 豊  |
| 結晶方位観察法及び結晶方位可視                               | 特 3054695 | 2000.4.14  | 石田 夕起、吉田 貞史、奥村 元、<br>高橋 徹夫  |
| 左、右カメラの撮像画像の対応点                               | 特 3055721 | 2000.4.14  | 富田 文明、*佐藤 淳   |
| 固体電解質燃料電池                                     | 特 3057342 | 2000.4.21  | 奥尾 隆保、内山 太、塚本 孝一、<br>加賀 保男、*堀内 秀雄、*金澤 基                           |
| 有機系光学薄膜の製造法とその装置                              | 特 3059972 | 2000.4.28  | 守谷 哲郎、*田中 教雄、*平賀 隆  |
| 形状記憶合金を用いた姿勢制御駆動装置及び<br>形状記憶合金の劣化状態の診断方法      | 特 3060015 | 2000.4.28  | 岩田 敏彰、村上 寛  |
| カラー画像画質改善方法及び装置                               | 特 3061614 | 2000.4.28  | 加藤 俊一、小林 裕一   |
| 磁気抵抗効果を有する酸化物薄膜及び<br>その製造方法                   | 特 3062747 | 2000.5.12  | 塚本 孝一、柳澤 武、*沈 鴻烈  |
| 熱電発電モジュール                                     | 特 3062754 | 2000.5.12  | 高澤 弘幸、山本 淳、太田 敏隆  |
| 薄膜作製装置  | 特 3069584 | 2000.5.26  | 清水 貴思   |
| 酸、アルカリ度の測定法                                   | 特 3069671 | 2000.5.26  | 野崎 健、*浜本 修  |
| 有機系光学材料とその成形製造方法                              | 特 3072299 | 2000.6.2   | 守谷 哲郎、*田中 教雄、*平賀 隆  |
| 半導体単結晶薄膜基板光弁装置とその製造方法                         | 特 3072326 | 2000.6.2   | 林 豊、*山崎 恒夫、*田口 雅明、<br>*矢部 悟、*小島 芳和、*鷹巢 博昭、<br>*高野 隆一、*鈴木 宏、*神谷 昌明 |
| 超伝導サンプリング測定回路                                 | 特 3076835 | 2000.6.16  | 青柳 昌宏、赤穂 博司、仲川 博、<br>佐藤 弘   |
| レーザー光集光照射装置                                   | 特 3076836 | 2000.6.16  | 松嶋 功  |
| 実環境適応型ロボットの教示プログラム作成方法                        | 特 3076841 | 2000.6.16  | 音田 弘、小笠原 司、比留川 博久、<br>北垣 高成、中村 晃、築根 秀男                            |
| プラズマビーム生成装置                                   | 特 3076843 | 2000.6.16  | 木山 浩子   |
| 治療用 $\pi$ 中間子照射方法                             | 特 3079211 | 2000.6.23  | 富増 多喜夫、*河合 正之、*大脇 清人  |
| 電界効果装置を動作させるための方法                             | 特 3079215 | 2000.6.23  | 黒沢 格、仲川 博、青柳 昌宏、<br>前澤 正明   |

| 発 明 の 名 称                                      | 登録番号      | 登録日        | 発 明 者   |
|--|-----------|------------|---|
| 結晶成長方法   | 特 3079256 | 2000.6.23  | 荒井 和雄、吉田 貞史、山口 博隆、西澤 伸一                                   |
| 組立式円筒直列型固体電解質燃料電池                              | 特 3079268 | 2000.6.23  | 奥尾 隆保、加賀 保男、門馬 昭彦、*堀内 秀雄、*金澤 基、*藤井 弘二                     |
| 複数物体を分割する画像処理方法および装置                           | 特 3079275 | 2000.6.23  | 市村 直幸   |
| NbN電極を用いた真空気密素子                                | 特 3079352 | 2000.6.23  | 仲川 博、高田 進、*伊藤 茂生、*渡辺 照男、*円谷 和彦、*平田 義彦                     |
| レーザパルス幅圧縮方法と装置                                 | 特 3081889 | 2000.6.30  | 高橋 栄一、松本 裕治、大和田野 芳郎                                       |
| 磁場検出回路   | 特 3081902 | 2000.6.30  | 桐生 昭吾、*清水 信宏、*千葉 徳男                                       |
| III族窒化物半導体膜の成長方法                               | 特 3081914 | 2000.6.30  | 奥村 元、吉田 貞史  |
| 半導体薄膜の堆積方法                                     | 特 3084395 | 2000.7.7   | 林 豊、山中 光之   |
| 超伝導放射線ピクセル検出器                                  | 特 3084400 | 2000.7.7   | 仲川 博、青柳 昌宏、佐藤 弘、赤穂 博司、*アントニオ エスポシト、*ビットリオ パルミエリ           |
| 光ファイバエンコーダ                                     | 特 3084407 | 2000.7.7   | 土田 英実、*塩沢 精治  |
| 光ファイバ削減方法                                      | 特 3084408 | 2000.7.7   | 土田 英実、*塩沢 精治  |
| 義肢用可動指、その可動指を用いた義手、およびその可動指用制御装置               | 特 3086452 | 2000.7.7   | 樋口 哲也、*原田 証英  |
| 電界効果トランジスタ及びその製造方法                             | 特 3086906 | 2000.7.14  | 坂本 邦博   |
| 太陽電池薄膜の作製方法                                    | 特 3089407 | 2000.7.21  | 仁木 栄、山田 昭政、大柳 宏之、ポール ジェームス フォンス                           |
| 全光フェムト秒光変調方法およびその装置                            | 特 3091853 | 2000.7.28  | 小林 俊介、佐々木 史雄  |
| 宇宙ロボットの制御装置                                    | 特 3094091 | 2000.8.4   | 戸田 義継、*福田 靖   |
| 超電導磁気浮上輸送システム                                  | 特 3094104 | 2000.8.4   | 岡野 眞、玉田 紀治  |
| 画像処理方法、画像処理プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体及び画像処理装置 | 特 3096732 | 2000.8.11  | 斉藤 泰一、山田 博三、坂上 勝彦   |
| 分流器  | 特 3099055 | 2000.8.18  | 米崎 源太   |
| 真空蒸着装置   | 特 3099065 | 2000.8.18  | 小倉 睦郎、*福島 正和  |
| 有機・無機複合材料を用いた高温領域プロトン伝導性薄膜及びその製造方法             | 特 3103888 | 2000.9.1   | 本間 格  |
| 放電吸引式ガス処理方法                                    | 特 3106181 | 2000.9.8   | 藤原 正純、谷本 充司、*石田 政義  |
| 静圧流体軸受   | 特 3106189 | 2000.9.8   | 岡野 眞、*十合 晋一、*高藤 直幸  |
| 配向性単層強誘電体酸化物薄膜およびその製造方法並びに該強誘電体薄膜を用いたスイッチング素子  | 特 3111220 | 2000.9.22  | 酒井 滋樹、太田 裕之   |
| 半導体単結晶薄膜基板光弁装置                                 | 特 3113914 | 2000.9.29  | 林 豊、*山崎 恒夫、*田口 雅明、*矢部 悟、*小島 芳和、*鷹巣 博昭、*高野 隆一、*鈴木 宏、*神谷 昌明 |
| 超電導集積回路構造及びその製造方法                              | 特 3118562 | 2000.10.13 | 青柳 昌宏、仲川 博  |
| ダイヤモンド単結晶薄膜製造方法                                | 特 3125046 | 2000.11.2  | 竹内 大輔、大串 秀世、梶村 皓二、*渡辺 幸志                                  |
| 挿入光源のビーム軸アライメント調整装置                            | 特 3128560 | 2000.11.17 | 山崎 鉄夫、山田 家和勝、清 紀弘、*横山 稔、*河合 正之、*濱田 信治                     |
| 超伝導集積回路チップ用ボンディングパッドの構造                        | 特 3128572 | 2000.11.17 | 青柳 昌宏、仲川 博、黒沢 格、*前澤 正明                                    |
| 画像表示装置   | 特 3131631 | 2000.11.24 | 伊藤 順司、金丸 正剛、松川 貴、*高松 範幸                                   |
| 超伝導メモリセル及びこれを用いた超伝導メモリ装置                       | 特 3131632 | 2000.11.24 | 仲川 博、*高田 進  |
| 超電導応用限流装置                                      | 特 3131909 | 2000.11.24 | 大西 利只、*市川 路晴、*門 裕之、*渡辺 泰夫                                 |

| 発 明 の 名 称                | 登録番号      | 登録日        | 発 明 者   |
|--------------------------|-----------|------------|---|
| 冷電子放出素子及びその製造方法          | 特 3135823 | 2000.12.1  | 伊藤 順司、金丸 正剛、*平野 貴之                                |
| ダイヤモンドpn接合ダイオードおよびその作製方法 | 特 3138705 | 2000.12.15 | 竹内 大輔、*渡辺 幸志、大串 秀世、長谷川 雅考、小倉 政彦、小林 直人、梶村 皓二、山中 貞則 |
| 反応解析法及び装置                | 特 3138724 | 2000.12.15 | 金成 克彦、*小沢 丈夫                                      |
| 酸化薄膜形成方法                 | 特 3143670 | 2001.1.5   | 荒井 和雄、吉田 貞史、野中 秀彦、一村 信吾、黒河 明                      |
| 電子放出素子及びその製造方法           | 特 3143679 | 2001.1.5   | 金丸 正剛、伊藤 順司、*蒲生 秀典、*石崎 守                          |
| 半導体装置及びその製造方法            | 特 3148982 | 2001.1.19  | 荒井 和雄、吉田 貞史、奥村 元、永井 清子、関川 敏弘、*福田 憲司               |

## 外国特許

| 出 願 国 | 発 明 の 名 称                 | 登録番号     | 登録日        | 発 明 者   |
|-------|---------------------------|----------|------------|---|
| アメリカ  | 薄膜製造方法および装置               | 5633043  | 1997.5.27  | 守谷 哲郎、*平賀 隆                                   |
| アメリカ  | 冷電子放出素子                   | 6020595  | 2000.2.1   | 伊藤 順司、金丸 正剛                                   |
| 韓国    | 冷電子放出素子                   | 254838   | 2000.2.8   | 守谷 哲郎、*平賀 隆、*田中 教雄、*上野 一郎                     |
| アメリカ  | 画像処理方法及びその装置              | 6028954  | 2000.2.22  | 富田 文明、*高橋 裕行                                  |
| アメリカ  | 平板型光弁駆動用半導体装置             | 6040200  | 2000.3.21  | 林 豊、*神谷 昌明、*小島 芳和、*鷹巣 博昭                      |
| アメリカ  | 防振機能を備えた真空装置用継手           | 6065780  | 2000.5.23  | 廣島 洋  |
| フランス  | 電界放射型カソード                 | 2760893  | 2000.5.26  | 伊藤 順司、金丸 正剛、*伊藤 茂生、*新山 剛宏、*富田 正晴、*鹿川 能孝、*井上 彰 |
| アメリカ  | ビスマス構成元素に含む多元系酸化物薄膜の結晶成長法 | 6071338  | 2000.6.6   | 酒井 滋樹、右田 真司                                   |
| アメリカ  | 極微小顕微鏡分光装置                | 6108094  | 2000.8.22  | 谷 俊朗、横山 浩、*マーチン・バッハ                           |
| アメリカ  | 平板型光弁駆動用半導体装置             | Re.36836 | 2000.8.29  | 林 豊、*神谷 昌明、*小島 芳和、*鷹巣 博昭                      |
| アメリカ  | 発電方法および装置                 | 6127054  | 2000.10.3  | 安藤 祐司、田中 忠良、土井 卓也、高島 工                        |
| アメリカ  | ダイヤモンド単結晶薄膜製造方法及び装置       | 6132816  | 2000.10.17 | 竹内 大輔、大串 秀世、梶村 皓二、*渡辺 幸志                      |
| ドイツ   | 電界放出型電子放出素子およびその製造方法      | 696814   | 2000.11.8  | 伊藤 順司、*植松 隆彦、*了戒 洋一、*西澤 正人、*松崎 一夫             |
| フランス  | 電界放出型電子放出素子およびその製造方法      | 696814   | 2000.11.8  | 伊藤 順司、*植松 隆彦、*了戒 洋一、*西澤 正人、*松崎 一夫             |
| イギリス  | 電界放出型電子放出素子およびその製造方法      | 696814   | 2000.11.8  | 伊藤 順司、*植松 隆彦、*了戒 洋一、*西澤 正人、*松崎 一夫             |

## 人事異動

| 氏名           | (新)   | (旧)  |
|--------------|---|--|
| 平成12年12月20日付 |   |  |
| 植芝 俊夫        | 企画室企画班の併任解除                                   | 知能システム部主任研究官兼企画室企画班                          |
| 平成13年1月5日付   |   |  |
| 佐藤 弘         | 企画室開発班の併任解除<br>工業技術院総務部研究開発官(超電導担当)の併任解除      | 電子デバイス部主任研究官兼企画室開発班<br>兼工業技術院総務部研究開発官(超電導担当) |
| 須崎 有康        | 企画室企画班の併任解除<br>機械情報産業局電子機器課付の併任解除             | 情報アーキテクチャ部主任研究官兼企画室<br>企画班兼機械情報産業局電子機器課付     |
| 平成13年1月6日付   |   |  |
| 立石 裕         | 企画室に併任<br>経済産業省産業技術環境局産業技術政策課技術戦略企画調査官に併任     | 極限技術部主任研究官                                   |
| 吉村 隆         | 企画室企画班に併任<br>経済産業省商務情報政策局情報通信機器課に併任           | 知能情報部  |
| 北垣 高成        | 内閣府技官(参事官補佐(政策統括官(科学技術政策担当)付参事官(重点分野担当)付))に併任 | 知能システム部主任研究官                                 |
| 平成13年1月15日付  |   |  |
| 堀 俊夫         | 企画室に併任<br>産業技術総合研究所筑波研究支援総合事務所先端情報計算センター長付に併任 | 知能システム部                                      |
| 平成13年2月1日付   |   |  |
| 北垣 高成        | 企画室に併任  | 知能システム部主任研究官                                 |