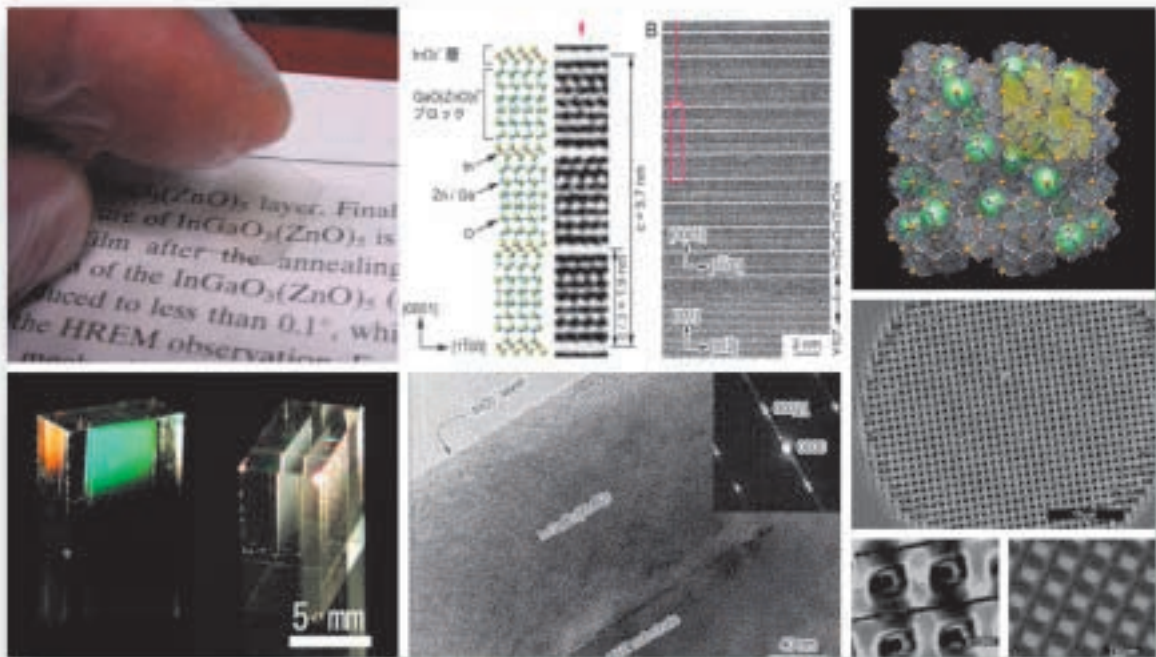


# 透明電子活性

透明な酸化物を舞台とした電子が主役となる  
新しい機能の開拓



東京工業大学

応用セラミックス研究所  
材料物理学専攻

細野・神谷研究室

URL: <http://lucid.msl.titech.ac.jp/~www/>

# 目次



細野・神谷研究室へようこそ	1
研究室紹介	3
コンピューターが視界から消える (ニュートン2003年10月号)	7
電子がアニオンとしてはたらく室温で安定な結晶をつくる (現代化学2004年2月号)	13
一枚の写真 (O plas E 2004年3月号)	20
<b>研究成果報告</b>	
材料の自然ナノ構造を利用したナノデバイスの開発	神谷利夫 22
新規透明P型半導体BaCuSFの合成	柳 博 23
2次元層状構造を有するオキシカルコゲナイドの光電子物性	平松秀典 24
高性能透明トランジスタの開発	野村研二 25
ナノポーラス単結晶中の高濃度電子アニオン： $[\text{Ca}_{24}\text{Al}^{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{e}^-)_4$	松石 聡 26
C12A17: $\text{e}^-$ 電子放出特性と電界放射型発光素子への応用	戸田喜丈 27
LiF単結晶へのフェムト秒レーザー照射による光デバイスの書き込み	高水大樹 28
<b>海外渡航記</b> アンペール会議に参加して	松石 聡 29
<b>速報</b> MRS Gold Graduate Student Award受賞	野村研二 29

## 細野・神谷研究室へようこそ

本研究室は1999年に川副博司教授（現 名誉教授。KFT 代表取締役）の定年退官の後、細野が研究室を引き継ぎ発足しました。2002年1月には神谷利夫先生を迎え、細野・神谷研究室となりました。また、研究室の発足時からの助手であった植田和茂氏が2003年4月から九州工業大学の助教授として栄転され、後任として、柳 博氏が着任し、現在に至っています。

研究室のメインテーマは、「透明な酸化物を舞台とした電子が主役となる新しい機能の開拓」です。このテーマにこだわる背景を説明します。

地球の表面付近に存在する元素のうち、その存在比（重量%）の示すクラーク数をみてみましょう。トップは酸素で、以下にシリコン、アルミニウム、鉄、カルシウム、ナトリウム、カリウム、マグネシウム、水素、チタンと続きます。水素は最も軽いので、元素の数で存在比をみるとその量は酸素に次いで2位になります。すなわち、私たちが資源として利用出来る物質は、水と上記の金属と酸素が結合した酸化物であることがわかります。歴史をみても、これらの酸化物から構成される石器がまず道具として使われ、石器時代から文明が始まりました。次いで、鉄の時代になり、現代の高度情報化時代に至っています。現代の文明を支えているのはコンピュータと光ファイバーですが、それを構成する物質はシリコンと二酸化ケイ素です。

このように人類は身の周りのありふれた物質を細工して、文明をつくって発展してきました。これからの未来もこの方向は変わらないでしょう。あまたある物質の中で、人類の生活に直接的に役立つ形に工夫したものが「材料」です。いつの時代でもその時代の制約があり、材料の研究者はその制約下で革新的なものを創り出す必要があります。資源・環境問題の制約が今世紀の課題です。ありふれた、そして環境調和性の高い物質を使って、これまでにない新しい機能やより高い性能をもつ材料を創り出すことが、これからの研究の方向でしょう。上記のありふれた酸化物は、鉄を除くとすべて透明（粉の状態では白色）です。また、これらの物質は、教科書に載っているような代表的な絶縁体であるように、電子が主役となるアクティブな機能はこれまで殆ど見出されていませんでした。しかしながら、電子の状態からこれらの物質を眺めてみると、工夫次第で新しい機能を発現できるものが数多くあることがわかります。要は「アイデアと工夫次第」で石ころを透明半導体など高機能材料に変身させることができるということです。少し長くなってしまいましたが、これが研究室のテーマの背景です。

簡単に言えば、知恵と現代流の最新鋭の道具を駆使して、酸化物という古い物質に、機能材料としての新しい命を吹き込み、「現代の石器を創ろう」ということです。とても挑戦的なテーマだと思っています。また、口はぼったいのですが、川副先生以来、殆どゼロからこの領域を開拓し、過去7年間に *Nature*、*Science* に4報、*Physical Review Letters* に8報、*Advanced Materials* に5報の論文

が掲載されるなど、この分野に国際的に潮流を起こしつつあると自負しています。1999年10月からスタートした科学技術振興機構 創造科学技術推進事業 (ERATO) 細野透明電子活性プロジェクトによっても、この領域の研究が大きく進展しています。このプロジェクトは2004年9月末をもって終了しますが、この領域を更に進展する必要性が認められ、その後5年間の継続研究が10月から開始されることになりました。研究室と相補的になって、強力に開拓的研究を推進したいと意気込んでおります。

研究のやり方としては、「どういう機能を狙うか」、「いかにしてつくるか」、「どんな物性か」、そして「どんなデバイスができるか」までの一連のことを100%とまではいきませんが、主要部分を研究室で取り組むことにしています。すなわち、自分たちで設計し、それにあった物質を探索し、薄膜も含め試料を合成し、物性を調べ、デバイス特性を評価します。取り上げる物性は、光、電子、磁気、化学と多岐に渡りますが、いずれも電子が主役となるものです。もちろん、人によって興味や得意なことが違いますので、個人を生かした研究をできると思います。

自分の名前がつくような新機能の発見を志す人、革新的デバイスを創って200億円を狙おうという野心に満ちた人、自分の感性や個性を活かした機能材料の研究をやってみたい人、学部時代はろくに勉強しなかったけど大学院に入ったなら心機一転 研究に集中してみたい人を大歓迎します。

この小冊子は研究室としてこういう形で発行する初めてのものです。不備や説明不足な点多々あるかと思います。また、研究は生き物ですので、このパンフでは進行中で書けないテーマもあります。興味を持っていただいた方は是非 研究室を訪問してください。“Seeing is believing”は、いつの時代でも真実だと思います。

細野秀雄



# 細野・神谷研究室

<http://lucid.msl.titech.ac.jp/~www>

## 1. 所属、メンバー

応用セラミックス研究所 セラミックス機能部門 <http://www.msl.titech.ac.jp/>  
 大学院 総合理工学研究科 材料物理学専攻 電子活性物質講座 <http://www.materia.titech.ac.jp/>  
**修士・博士課程学生は材料物理学専攻に志願・所属することになります。**

スタッフ：細野秀雄（光材料、電子物性、磁気共鳴）  
 神谷利夫（計算材料設計、半導体薄膜、電子デバイス）  
 柳 博（固体電子物性、物質探索）  
 学 生：博士課程 8名、修士課程 9名、学部 4年生 1名  
 プロジェクト：科学技術振興事業団 創造科学技術推進事業「細野透明電子活性プロジェクト」  
 （期間：1999.10~2004.9、博士研究員 10名）と緊密な連携をしています。

## 2. 連絡先

研究室のホームページ <http://lucid.msl.titech.ac.jp/~www/>  
 研究室 細野 J1-6F 606 室 Tel: 045-924-5359 E-Mail: [hosono@msl.titech.ac.jp](mailto:hosono@msl.titech.ac.jp)  
 神谷 J1-6F 615 室 Tel: 045-924-5357 E-Mail: [tkamiya@msl.titech.ac.jp](mailto:tkamiya@msl.titech.ac.jp)  
 学生室 J1-6F 605 室 研究室の様子は学生に聞いてください

## 3. 教育方針

領域にとらわれずに世界で活躍できる一流の研究者を育てるため、実施研究と輪講を中心とした教育方針を採っています。最先端の設備を自由に使える環境の中で、個々の学生が高い独立性を持って研究をするとともに、テーマの異なる学生・職員間でも忌憚のない自由な議論、情報交換をすることを重要視しています。

優れた成果が得られれば、学生自身が国際学会へ参加したり一流国際学術誌に論文を書いたりしています。2003年には修士1年の新生が2週間の米国大学滞在をして刺激を受けて帰ってきました。また、学生の研究成果が評価され、以下のような表彰を受けています(過去6年間)。この中には、修士1年の時に出した成果も含まれています。

(国内)	応用物理学会	講演奨励賞	7名
	応用物理学会	論文奨励賞	1名
	日本セラミックス協会	最優秀論文賞	1名
(国際)	米国材料学会	Student award	1名
	TOEO-3	Best paper award	1名
		Best poster award	1名

多くの学生が学術振興会特別研究員、育英会などの奨学金をもらって研究生生活をサポートしてもらっています。また、学生は材料物理学専攻に所属することになりますが、21世紀COEプログラムのプロジェクトマネージングコース(PMコース)あるいはナノマテリアルイニシアチブコース(NIコース)に受ければ、奨学金と3ヶ月間程度海外滞在する機会と資金援助が得られます。学生が自力で世界に挑戦できる機会があります。

学術振興会特別研究員:

2004年度	博士課程3年生	2名	
2003年度	博士課程3年生	1名	
2001年度	博士課程3年生	2名	など

その他については、ホームページ(<http://lucid.msl.titech.ac.jp/~www>)を見てください。



## 4. 研究室の目指すもの

資源的に無尽蔵でかつ環境調和性に優れた酸化物は、陶磁器やガラスなどの伝統的なセラミックスの素材として広く利用されています。それにもかかわらず、酸化物中で電子が主役を演ずるアクティブな機能はこれまで殆ど見出されていませんでした。これは酸化物の本質によるものではありません。従来の発想を離れて偏見を捨て、材料を基礎からみつめなおしてみれば、必ず新しい発見があります。本研究室では、酸化物に固有の構造、特性を利用して新しい機能を創り出すことを目的に、透明酸化物の新機能探索を行っています。

## 5. アプローチの特徴

私たちは、酸化物結晶に内在する特徴的なナノ構造に着目し、その電子状態や欠陥構造を制御・活用することで、新しい光・電子および化学機能をもつ材料を創り出すことを目指しています。ただ試料を作るだけではなく、計算と実験の両面から電子状態を調べて物質のイメージを作り、研究方法を考えています。独自の視点からのアイデアに基づいたアプローチで、世界で「初めての」、「最高の」、あるいは「唯一の」結果を出せるよう、研究を進めています。

## 6. 研究テーマ

### (1) 目に見えない機能を創る: 透明酸化物半導体

当研究室が1997年に世界で初めて、透明酸化物でP型伝導性を持つ物質の設計法と例をNatute誌に報告して以来、透明酸化物エレクトロニクスという新しいフロンティアが拓けつつあります。実際に、紫外発光ダイオード、高性能透明トランジスタ、室温で作製したアモルファス酸化物 p/n 接合などを開発し、透明酸化物半導体が高い潜在能力を持つことを実証してきました。

また、原子レベルから見直してみると、酸化物にはナノメートルサイズの超構造を自然に形成する材料があるという特長があります。このような超構造をうまく利用すれば、量子効果などを利用したデバイスを自己組織的に形成できると考えています。

### (2) ナノ籠構造と包接イオンが創り出す多彩な機能: 究極の環境調和多機能セラミックス C12A7

これまで、酸化物の多様な機能は陽イオンを変えることで実現してきました。私たちは発想を変え、陰イオンの状態を制御することで新しい可能性が拓けないか、という視点からアプローチをしています。

$12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  (C12A7)は、酸化カルシウムと酸化アルミニウムというありふれた酸化物から構成されている、何の変哲もない物質と考えられてきました。ところが、原子レベルで結晶構造を見直してみると、この材料は、陰イオン(通常は  $\text{O}^{2-}$  イオン)を包接できるナノ籠構造を持っていることがわかります。合成法を工夫することで、ナノ籠構造中に様々なイオンを包接させることができます。空気中では不安定ですが最強の酸化力を持つことで知られる  $\text{O}^-$  イオンを、 $10^{20}\text{cm}^{-3}$  以上の高濃度で安定に含有させることに成功し、最も安定な白金さえ容易に酸化できることを実証しました。また、 $\text{H}^+$  イオンを包接さ



図1. 透明電子活性の樹(こんな具合に育って欲しいという図)

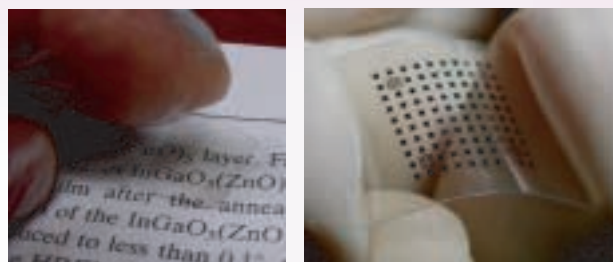


図2. (左) 透明電界効果トランジスタ。(右) プラスチック上に作製したアモルファス酸化物 p/n 接合ダイオード。

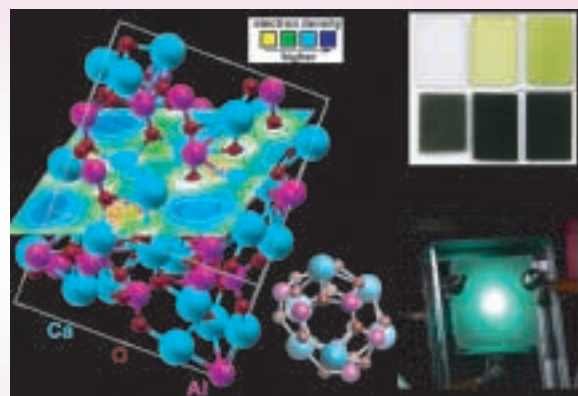


図3. (左)エレクトロイドC12A7:e<sup>-</sup>の結晶構造と電子分布。(中央) ナノ籠構造(籠の内径は~4Å)。(右上) 電子が生成する様子が色の变化でわかる。(右下) 電界放射型発光デバイス。



せることで、これまで典型的絶縁体であると信じられていたこの材料を、透明で電子がよく流れる状態に変えることに成功しました。さらには、電子を包接させることで、世界で初めて、室温で安定なエレクトライド  $C12A7:e^-$  を実現し、電界放射型ディスプレイへ応用できることを実証しました。

### (3) 21 世紀の万能彫刻刀：フェムト秒レーザーパルスによるナノ 3 次元加工

パルス幅が  $10^{-13}$  秒という極めて短いパルスレーザーを干渉させることで、地球上のあらゆる物質—ダイヤモンド、サファイヤ、ガラスなど—の内部に、たった一発のパルスで回折格子や周期的ナノ構造を書き込む方法（フェムト秒ホログラム）を開発しました。この方法を使って LiF 単結晶中に分布帰還型 (DFB) レーザーを作製し、発振に成功しました。これは、レーザーだけを用いて 3 次元光集積回路を実現した、世界最初の例です。マイクロ光デバイスやメモリーとしての応用も期待されています。

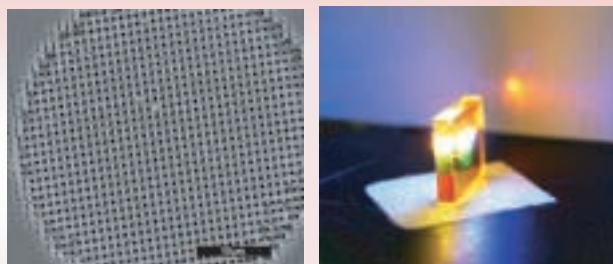


図4. (左) たった2発のレーザーパルスで書き込んだマイクロ・ナノ構造。(右) LiF 結晶中に作製した DFB レーザーが発振している様子。

### (4) 最先端ナノテクノロジーを切り拓く：真空紫外域用光学材料

コンピュータの CPU やメモリーの高集積化がすさまじい勢いで進んでいますが、将来も IT 技術が発展し続けるためには、波長が  $157\text{nm}$  という、極短波長のフッ素分子レーザーを光源とする微細加工が不可欠になります。ところが、これに耐えられる適当な光学材料がなく、研究が滞っていました。私たちは 1999 年に、フッ素ドープしたシリカガラスがこの仕様に耐えることを見出しました。これは今では “modified  $\text{SiO}_2$ ” の名前で知られ、これを用いたフォトリソグラフィマスク用ガラスと、 $190\text{nm}$  の短波長まで透明でレーザー損傷耐性の優れた光ファイバーをはじめ実現し、実用化に成功しました。現在は、極短波長光透過性と電子活性という透明酸化物の長を活かし、バイオテクノロジー分野への展開を進めています。

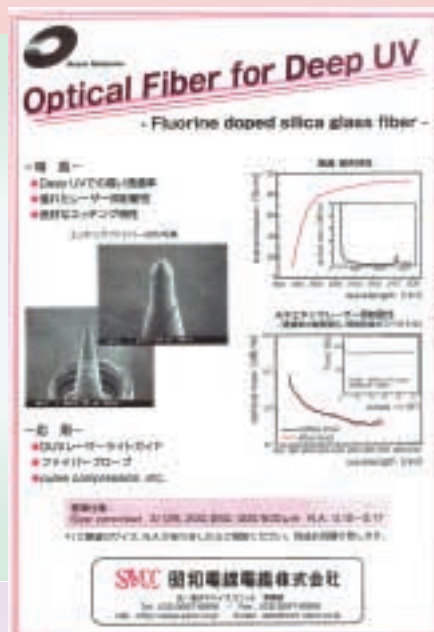


図 5. 実用化された深紫外ファイバー (応用物理学会誌広告)

### (5) 新材料・機能を創るために：理論と実験による電子状態の解析

やみくもに実験をしても、新しい機能・材料を見つけることはほとんど不可能です。私たちは、正・逆光電子分光法やパルス電子スピン共鳴法を用いて、物質や欠陥の電子状態を直接的に実験で観察しています。さらに第一原理計算を併用することで物質のイメージを作り、物質探索や材料設計の指針をたてて開拓研究を進めています。

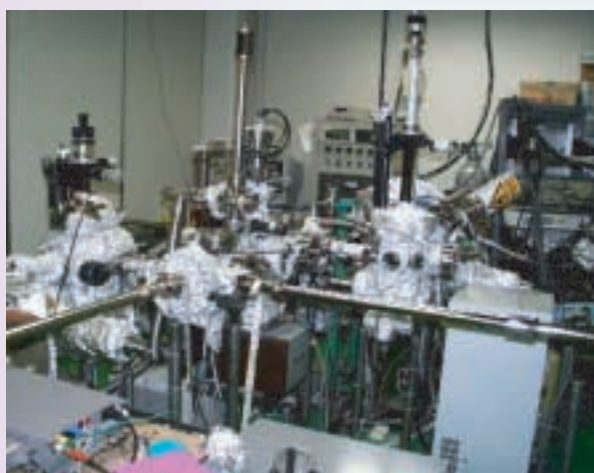


図 6. 物質の電子構造を観察する正・逆光電子分光装置。

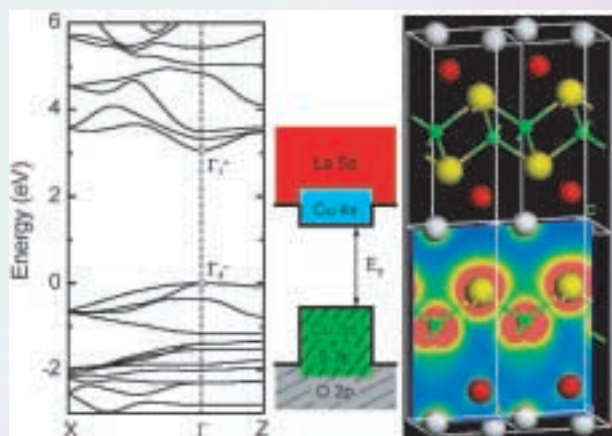


図 7. 第一原理法で計算した、透明 p 型半導体である LaCuOS の電子構造。層状構造を構成する CuS 層に正孔が閉じ込められていることが優れた光・電気特性の起源であることを明らかにできました。

## 細野からひとこと

膨大な物質の中から独自の視点で、「磨けば光る原石」をピックアップして、新しい機能をもつ材料に仕立て上げることに情熱を持っています。材料は温故知新です。独自の視点や道具があれば、将来大化けする素材がごろごろ眠っているのです。ニュートンのりんごはいつでも落ちているのです。「紫外発光ダイオード」や「白金さえ酸化できる夢のセラミックス」はほんの一例です。それから、本当にオリジナルな研究の種は、実は小さいことであまりカッコいいものではないと私は思います。大事なことは、地味で誰も気づかないことの中に、本質的に重要な真理を見つけ出す眼力を持つことです。オームの法則や中村ダイオードのように、個人の名前がつくような発見や材料開発をやりたいものです。



2002年1月から新しいスタッフとして神谷利夫先生が加わり、細野・神谷研究室になりました。新物質探索から機能設計、そしてデバイスの試作までオリジナリティにこだわった研究を本格的に展開できる体制が出来ました。2003年4月1日からは植田和茂助手が、九州工業大学工学部物質工学科の助教授として栄転しました。替わって、2003年7月1日から新しく柳博助手が加わりました。細野プロジェクトにもすばらしい眼力と意欲を持った若い研究者がたくさんいます。

東工大の材料系は、今年データによれば、世界12位にランクされる世界でも卓越した材料研究拠点(COE)です。もちろん、文部科学省が昨年選抜した21世紀COEにも選ばれています。

このような環境の中、世界で活躍できる人材を育てると共に、この分野で世界一を狙っています。これから飛躍期に入る若い研究室と自負しています。是非、やりたい研究領域の研究室を選んで、充実した大学院生活にしてください。

**当研究室は、世界トップを目指す心意気のある、ファイトあふれる学生を歓迎いたします。**

## 神谷からひとこと

まず、大学院を選ぶにあたって、みなさんが何を本当にしたいのか、真剣に考えて欲しいと思います。大学院での勉強、研究はこれからの人生に大きな影響を与えますが、修士課程2年間、博士課程3年間というのは実は非常に短い時間です。また、卒業して会社に勤めてしまったらできなくなることも、大学では自由にできることがあります。このようなことを考えて、大学院の短い貴重な時間を有効に活かす選択をして欲しいと思います。



東工大、特に応用セラミックス研究所は大学の附置研究所という非常に恵まれた環境にあります。大学の教育課程を受けるのと同時に、世界一級の研究を実経験できます。多くの高価な装置を自由に使えますし、研究報告で海外に行く機会もたくさんあります。研究の相談に乗ってくれるスタッフも、研究室内だけではなく、学内に大勢います。研究も語学も、実戦で自分自身を鍛えていく、絶好の環境です。

学生時代には勉強や研究の他に大事なことがあるということを、否定するわけではありません。将来、もっと良い環境の職場を見つけることもできるかもしれません。しかし、そのためにも、自分自身を鍛えておかなければ、チャンスをつかむこともできません。その意欲があるのなら、是非当研究室を志望してください。共に素晴らしい研究ができるよう、がんばりましょう。





Tokyo Institute of Technology

# 材料の自然ナノ構造を利用した ナノデバイスの開発

神谷利夫 助教授

材料の自然ナノ構造を利用したナノデバイスの開発を試みた。非平衡プロセスであるプラズマCVD法を用い、直径4nm程度のナノ結晶シリコン粒からなる超薄膜を堆積した。幅20nmのナノワイヤ構造を電子線リソグラフィで作製し、さらに粒界の選択酸化によりトンネル障壁を形成することで、単電子トランジスタを作製した。このデバイスで、300Kでの単電子トランジスタ動作を確認した。

**単電子デバイス** 単電子トランジスタ(SET)は、2つのトンネル障壁と、微小な静電容量を持つ帯電島から構成されている。現在広く使われているトランジスタと異なり、帯電島へ電子が一つ充電される際のエネルギー変化(帯電エネルギー $E_C$ )によって電子一つの移動を阻止したり許容したりできるクーロンブロッケード効果を利用している。On/Off状態を単一電子によって制御可能なこと、動作に必要な帯電領域が10nm以下と小さいことから、究極の低消費電力・超高密度集積回路素子と期待されている。

単電子回路の実用化のためには、室温以上で動作するデバイスを作る必要がある。そのためには、 $E_C$ が熱エネルギー(室温で $k_B T = 26\text{meV}$ )より十分大きくなければならない。これは、10nmよりもはるかに小さい大きさの帯電島をつくる必要があることを意味している。また、高速動作をさせるためには1nm程度の厚さのトンネル障壁を形成する必要がある。

このような構造を微細加工技術で作ることも可能であるが、精度、再現性やスループットを考えると、材料の作製過程で自己組織化的に形成される「自然ナノ構造」を利用できるのではないかと期待される。そこで、プラズマCVD(PECVD)法のような非平衡プロセスによりナノ結晶シリコン薄膜を利用し、ナノ結晶を帯電島として利用した単電子デバイスを開発することを試みた。

**実験: 超薄膜の作製とナノデバイス構造の形成** シリコン薄膜は100MHz VHF PECVD法とフッ化物原料( $\text{SiF}_4/\text{H}_2/\text{SiH}_4$ 混合ガス)を用いて300°Cで堆積した。膜厚は20nmで、ナノ結晶粒サイズは4~8nmであった。作製したSETは、面内に2つのサイドゲート電極と、ナノワイヤをチャンネルとして持つトランジスタ構造となっている(図1)。この構造は、電子線リソグラフィでパターンニングをした後、反応性イオンエッチングによりよけいな薄膜部分を除去して作製した。ナノワイヤ部分は650°Cの酸化と1000°CのAr中アニール処理により、粒界を選択酸化してトンネル障壁として働くように構造改質を行った。

**結果: 室温で単電子トランジスタ動作を確認** 図2にデバイスの動作特性の温度依存性を示す。 $I_{ds}-V_{ds}$ 特性(出力特性)に強い非線形性が認められる。ゲート電圧 $V_{gs}$ をスキャンした $I_{ds}-V_{gs}$ 特性では、周期的な振動構造が見られる。これはクーロン振動として知られるSET特有の現象であり、クーロンブロッケード効果が発現していることを示している。これらの構造が300Kでも観察され、室温で単電子トランジスタ動作をしていることが確認できた。

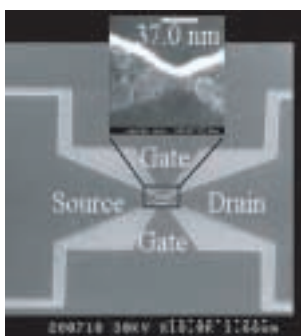


図1 作製したSETのSEM像

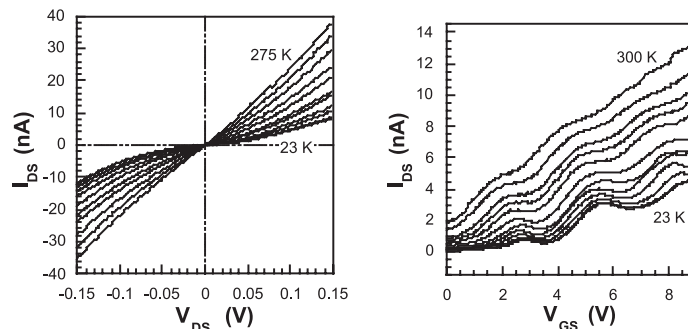


図2 酸化処理したnc-Si:H SETの $I_{ds}-V_{ds}$ 特性(左)と $I_{ds}-V_{gs}$ 特性(右)の温度依存性。

参考文献 T. Kamiya, K. Nakahata, Y.T. Tan, Z.A.K. Durrani and I. Shimizu, J. Appl. Phys. 89, 6265 (2001); Y.T. Tan, T. Kamiya, Z.A.K. Durrani and H. Ahmed, Appl. Phys. Lett. 78, 1083 (2001); T. Kamiya, Z.A.K. Durrani and H. Ahmed, Appl. Phys. Lett. 81, 2388 (2002); Y.T. Tan, T. Kamiya, Z.A.K. Durrani and H. Ahmed, J. Appl. Phys. 94, 633 (2003).





# 新規透明 P 型半導体 BaCuSF の合成

柳 博 助手

Delafossite 型結晶構造を持つ酸化物  $\text{CuMO}_2$  ( $M = \text{Al, Ga, In}$ ) が透明で P 型の電気伝導性を示すことをこれまでに見出してきた。更なる高い P 型の電気伝導性の実現を目指し、 $\text{BaCuSF}$  の合成を試みた。得られた焼結体は、 $80 \text{ S/cm}$  という高い P 型伝導性を示した。焼結体の電気伝導度は薄膜のものより数桁小さい。また、拡散反射スペクトルから見積もったバンドギャップは約  $3.1 \text{ eV}$  であった。よって、本物質を薄膜化することにより透明で高い P 型電導性を示す薄膜が得られることが期待される。

**透明 P 型半導体** 1997 年に  $\text{CuAlO}_2$  が透明 P 型電導性酸化物として当研究室が報告するまで、既存の透明電導性酸化物は全て N 型であった。 $\text{CuAlO}_2$  が見出された後、いくつかの透明 P 型電導性酸化物が見出されてきたが、その電気伝導度は N 型のものより数桁劣っている。本研究では、透明で更に高い P 型電導性を実現するために、酸化物から離れて物質探索を行った。その結果、 $\text{BaCuSF}$  が透明で P 型の伝導性を示すことを見出した。図 1 に  $\text{BaCuSF}$  の結晶構造を示す。本物質の結晶構造は、 $\text{BaF}$  層と  $\text{CuS}$  層が  $c$  軸に沿って交互に積み重なった層状構造をしており、先に当研究室で見いだされた  $\text{LaCuOS}$  と、 $\text{LaO}$  層が  $\text{BaF}$  層に置き換わっただけの同じ結晶構造をしている。本結晶構造中では、 $\text{BaF}$  層がドーピングサイトとして、 $\text{CuS}$  層がホールの伝導路として機能していると考えられる。

**実験: BaCuSF の合成**  $\text{BaCuSF}$  は固相反応法で合成した。出発原料  $\text{BaCO}_3$ 、 $\text{Cu}_2\text{S}$ 、 $\text{BaF}_2$  を化学量論比で秤量、混合し、硫化水素中、 $550^\circ\text{C}$  で 1 時間保持することにより目的の試料を得た。得られた粉末を成型し、石英管中に真空封入して  $650^\circ\text{C}$  で 1 時間保持することにより焼結体を得た。また、電気伝導度を制御することを目的に、 $\text{Ba}$  サイトへの  $\text{K}$  の置換ドーピングを試みた。この際は出発原料に  $\text{KF}$  を用いて合成を行った。

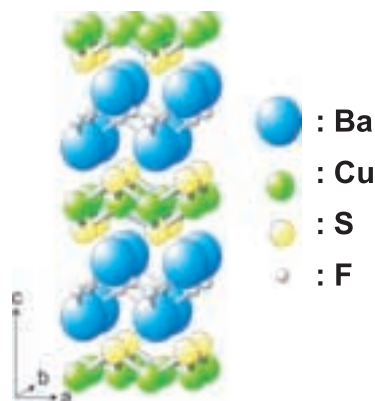


図 1 BaCuSF の結晶構造

**結果: P 型の電気伝導性を確認** 図 2 に  $\text{BaCuSF}$  の電気伝導度の温度依存性を示す。 $\text{K}$  を添加していない試料の室温での電気伝導度は  $0.09 \text{ S/cm}$  であったのに対し、 $\text{K}$  を添加するに従って電気伝導度の上昇が認められ、 $\text{K}$  を 10at% 添加した試料では  $80 \text{ S/cm}$  に達した。室温での電気伝導度、ゼーベック係数を  $\text{K}$  の濃度に対してプロットしたグラフを図 3 に示す。先程も述べたように、電気伝導度は  $\text{K}$  の濃度が増加するにつれ連続的に上昇していく様子がわかる。つまり、 $\text{BaCuSF}$  の電気伝導度は、 $\text{K}$  を添加することにより制御できることがわかった。さらに、 $\text{S}$  サイトを  $\text{Se}$ 、 $\text{Te}$  で置換していった試料についてバンドギャップを見積もったところ(図 4)、作製した組成範囲でバンドギャップの値を約  $3.1 \text{ eV}$  から  $2.7 \text{ eV}$  の範囲で制御できることが明らかになった。

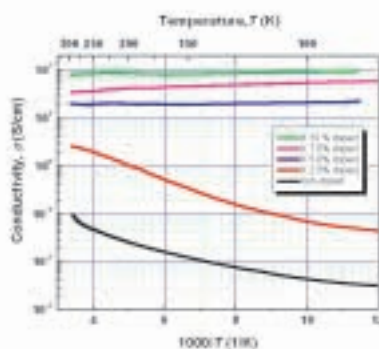


図 2 電気伝導度の温度依存

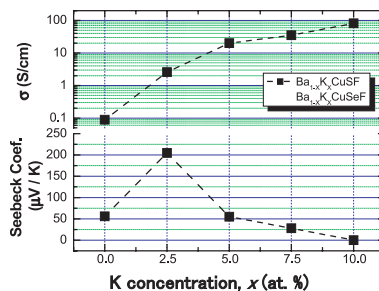


図 3 室温での電氣的性質

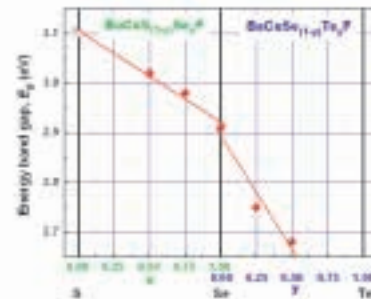
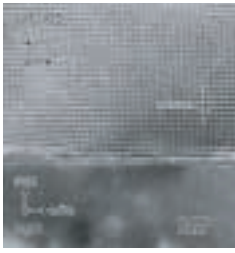


図 4 バンドギャップの Ch 依存性

参考文献 H. Yanagi, S. Park, A. D. Draeseke, D. A. Keszler and J. Tate, J. Solid State Chem. 175, 34 (2003); H Yanagi, J. Tate, S. Park, C. Park, and D. A. Keszler, Appl. Phys. Lett. 82, 2814 (2003); S. Park, D. A. Keszler, H. Yanagi, J. Tate, Thin Solid Films, 445, 288 (2003).



# 2次元層状構造を有するオキシカルコゲナイドの光電子物性

平松 秀典

酸化物層とカルコゲナイド層が交互に積み重なったユニークな層状構造を有するオキシカルコゲナイド  $\text{LnCuOCh}$  ( $\text{Ln}$ =ランタノイド,  $\text{Ch}$ =カルコゲン)のエピタキシャル薄膜の光電子物性を検討した。透明 P 型縮退伝導性、可視域で透明な広いバンドギャップ、室温で安定な励起子を見だし、これらの物性は、層状オキシカルコゲナイドに特有の 2 次元構造に由来するものであることを明らかにした。

**層状オキシカルコゲナイド** III-V 族化合物半導体 (ex.  $\text{AlGaAs-InGaAs}$ ) に代表される人工超格子は、そのキャリア閉じこめ効果を利用して量子井戸レーザーなどの光デバイスへ応用されている。しかしながらそういった人工超格子は分子線エピタキシー (MBE) などを駆使し、積層させる層の厚みと化学組成を原子レベルで厳密に制御することにより初めて作製される。このような積層構造は、実は天然の化合物においても多く存在する。そういった天然の層状化合物においてもキャリアの閉じこめが実現されれば、高効率な光電子デバイスへの応用が可能となるであろう。

そこで、バンドギャップの広い酸化物層 ( $>5\text{ eV}$ ) と狭いカルコゲナイド層 ( $<2\text{ eV}$ ) が原子レベルで交互に積層した層状構造 (図 1) を有するオキシカルコゲナイド  $\text{LnCuOCh}$  ( $\text{Ln}$ =ランタノイド,  $\text{Ch}$ =カルコゲン) に着目し、その層状構造に特異な光電子物性を検討した。

**実験: エピタキシャル薄膜の作製と評価**  $\text{LnCuOCh}$  ( $\text{Ln} = \text{La, Ce, Pr, Nd}$ ,  $\text{Ch} = \text{S, Se, Te}$ ) の高品質エピタキシャル薄膜は、薄い ( $\sim 5\text{ nm}$ )  $\text{Cu}$  を用いた反応性固相エピタキシャル成長法を用いることによって合成できた (左上: 断面 TEM 像)。得られた薄膜の光電子物性を評価した。

**結果: 透明 P 型縮退伝導・室温励起子**  $\text{Mg}$  ドープによって透明 P 型半導体では初めての  $10^{20}\text{ cm}^{-3}$  を越える正孔濃度、そして金属的な伝導性 ( $140\text{ Scm}^{-1}$ ) を実現することができた (図 2)。代表的なワイドギャップ p 型半導体  $\text{GaN:Mg}$ 、 $\text{ZnSe:N}$  ではアクセプターレベルが深い ( $>100\text{ meV}$ ) ため金属的伝導性を示すほど正孔濃度を高めることができない。 $\text{Mg}$  イオンは  $\text{La}$  サイトを置換し、正孔輸送層である  $\text{CuSe}$  層中に散乱要因を作らない。このような変調ドープの実現が高正孔濃度と同時に高移動度 ( $4\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ ) の達成につながった。図 3 に  $\text{LaCuOSe}$  の青色発光写真を示す。この青色発光は励起子由来のもので、室温でも観察された。また  $\text{Ln}$ ,  $\text{Ch}$  イオンを置換することによりその発光波長は  $386\sim 429\text{ nm}$  の間で連続的に制御できた。以上のような、変調ドープ、室温励起子はこの層状化合物の 2 次元的な電子構造に由来している。つまり、正孔・励起子はその 2 次元構造内に閉じこめられており、このオキシカルコゲナイドは層状構造自体に、人工超格子のような多重量子井戸構造を内包していることがわかった。

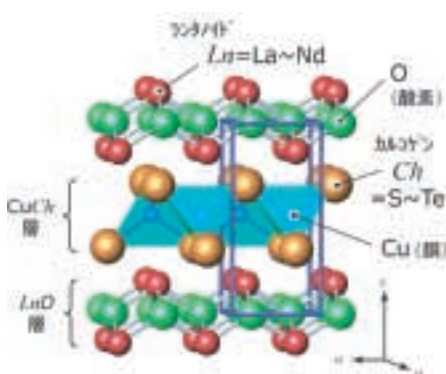


図 1 層状オキシカルコゲナイド  $\text{LnCuOCh}$  の結晶構造

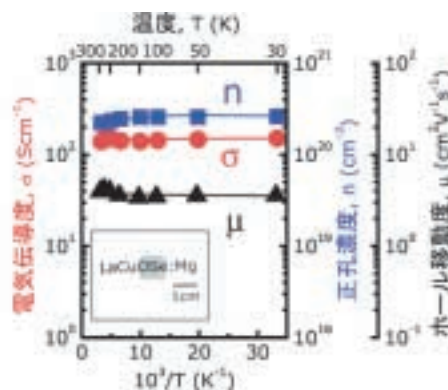
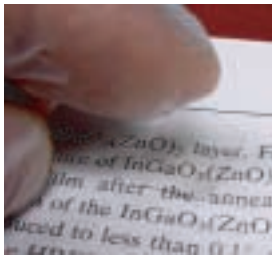


図 2  $\text{Mg}$  ドープ  $\text{LaCuOSe}$  の正孔輸送特性の温度依存性と試料写真



図 3  $\text{LaCuOSe}$  の青色発光写真 (励起:  $\text{He-Cd}$  レーザー  $325\text{ nm}$ )

参考文献 H. Hiramatsu et al., Appl. Phys. Lett. 81, 598 (2002); Appl. Phys. Lett. 82, 1048 (2003).; J. Appl. Phys. 94, 5805 (2003).; Cryst. Growth Des. 4, 301 (2004).



# 高性能透明トランジスタの開発

野村 研二

高品質な透明酸化物半導体ホモロガス化合物  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$  単結晶薄膜を用いた高性能透明トランジスタを開発した。単結晶薄膜は独自に開発した反応性固相エピタキシャル成長により作製した。作製した透明トランジスタは可視光領域で完全に透明(透過率  $\sim 100\%$ )であり、そのトランジスタ特性(電界効果移動  $\sim 80\text{cm}^2(\text{Vs})^{-1}$ , 電流 ON/OFF 比  $10^6$ 、ノーマリー・オフ特性)も大幅に改善された。

**透明トランジスタ** 透明酸化物半導体 (TOS) は、可視域における光学的透明性と伝導キャリアの極性・濃度の制御性の両方に優れていることから、透明電界効果型トランジスタなどの新しいデバイスを実現する新材料として期待されている。しかし、n型 TOS である  $\text{SnO}_2$  や  $\text{ZnO}$  などの材料ではその残留キャリア濃度を  $10^{17}\text{cm}^{-3}$  以下に低減した高品質な単結晶薄膜の作製が困難であるため、作製した透明 FET の特性はノーマリー・オン型、電界効果移動度 ( $\mu_{\text{eff}}$ )  $\sim 5\text{cm}^2(\text{Vs})^{-1}$  程度にとどまっていた。ホモロガス化合物  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$  (IGZO) は、 $\text{ZnO}$  をベースとする  $\text{MO}^+(\text{ZnO})_m$  層と  $\text{RO}_2$  層が交互に積み重なった層状構造を有する新しい TOS である。そこで IGZO のキャリア濃度を  $10^{14}\text{cm}^{-3}$  以下に低減した高品質な単結晶薄膜を作製し、これを n 型チャンネルに用いた透明 FET を作製した。

**実験: 単結晶薄膜と透明トランジスタの作製** IGZO 単結晶薄膜は反応性固相エピタキシャル成長法により作製した。作製した IGZO 単結晶薄膜はその層状構造に起因する周期的コントラストが薄膜全体に観察された (図 1)。また、薄膜表面は原子レベルで平坦なテラスとステップから構成されていた。この薄膜の可視光領域における光学透過率は  $100\%$ 、電気伝導度は  $>10^{-5}\text{Scm}^{-1}$  (キャリア濃度  $<10^{14}\text{cm}^{-3}$ ) であった。この高品質 IGZO 単結晶薄膜 (膜厚  $\sim 80\text{nm}$ ) を n 型チャンネル層に用いたトップゲート型の金属-絶縁体-半導体透明電界効果型トランジスタを作製した。ゲート絶縁膜には高誘電体材料であるアモルファス  $\text{HfO}_x$  を用い、ドレイン/ソース/ゲート電極には ITO をそれぞれ用いた。

**結果: 高性能透明トランジスタを実現** 図 2 に透明トランジスタのデバイス特性を示す。出力特性より明確なピンチ・オフ特性が認められ、良好に動作していることが確認できる。電界効果移動は  $\sim 80\text{cm}^2(\text{Vs})^{-1}$  が得られ、従来作製された透明トランジスタの特性を大幅に改善した。また、このデバイスは閾値電圧  $+ \sim 3\text{V}$  で動作する“ノーマリー・オフ”型であり、電流 ON/OFF として  $10^6$  が得られた。以上、適切な材料選択とその固有な物性を示す高品質単結晶薄膜を活性層に用いることにより透明電界効果トランジスタとして多結晶シリコントランジスタに匹敵する性能を実現できることを示した。

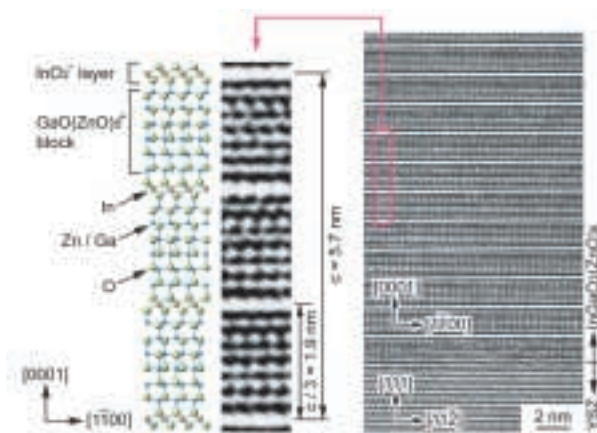


図 1  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$  の結晶構造と高分解能断面電子顕微鏡写真

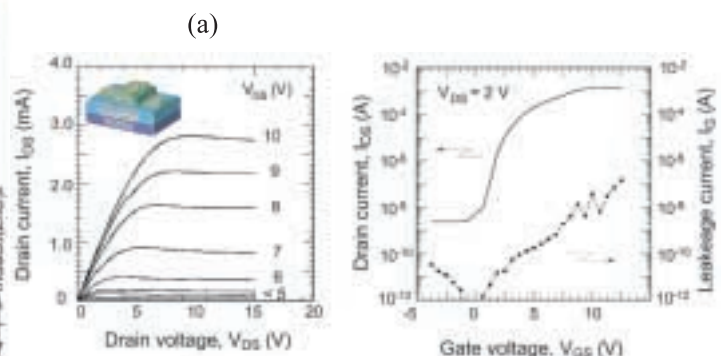
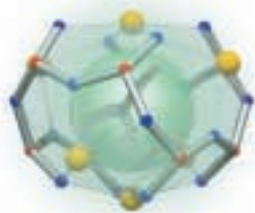


図 2 トランジスタ特性 (a)出力特性 (b)利得特性

参考文献 K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono, Science 300, 1269 (2003).; H. Ohta, K. Nomura, M. Orita, M. Hirano, K. Ueda, T. Suzuki, Y. Ikuhara and H. Hosono, Adv. Funct. Mater. 13, 139 (2003).





# ナノポーラス単結晶中の高濃度電子 アニオン: $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{e}^-)_4$

—絶縁体  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  から電気伝導性を有する“エレクトライド”へ—

松石 聡

$12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  結晶(C12A7) は正に帯電したナノメートルサイズの籠状構造(ケージ)をもち、その中には酸素イオン( $\text{O}^{2-}$ )が包接されている( $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{O}^{2-})_2$ )。金属カルシウムを用いた還元処理により、C12A7 単結晶のケージから殆ど全ての酸素イオンを引き抜き、代わりに電子を包接させることに成功した。この処理の前後で結晶の骨格構造は全く変化せず、C12A7 は電子がアニオンとして振舞うイオン性結晶“エレクトライド” $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{e}^-)_4$  に変化したことがわかる。この電子は隣接するケージ間を移動することができるため、C12A7 は室温で約  $100 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$  という典型金属酸化物としては特異的に高い電子伝導性を示すようになった。

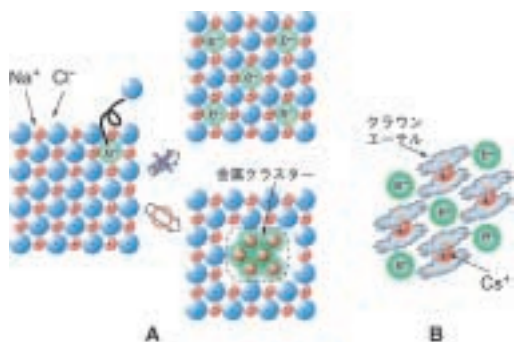


図1 エレクトライドとは？

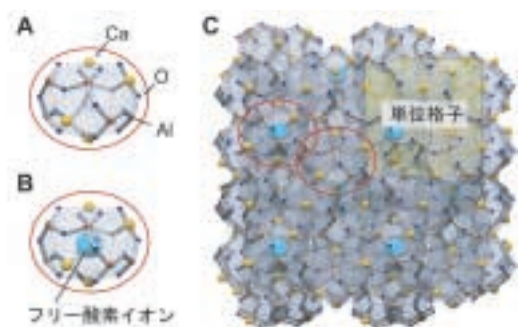


図2 C12A7の結晶構造

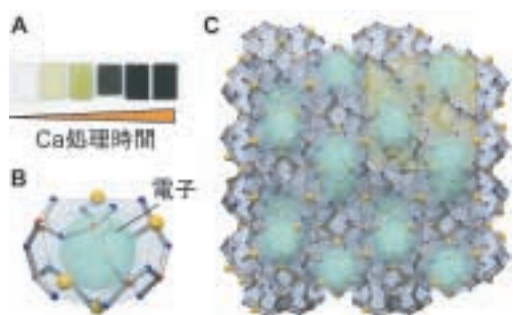
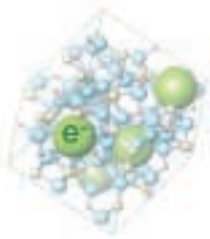


図3 Ca処理に伴うC12A7単結晶の色の  
変化とC12A7エレクトライドの結晶構造

**エレクトライド** イオン結晶である  $\text{NaCl}$  は、カチオン( $\text{Na}^+$ )とアニオン( $\text{Cl}^-$ )が周期的に並んで構成されている。これを金属  $\text{Na}$  の蒸気に曝すと  $\text{Cl}^-$  の空孔ができることが知られている(図 1-A 左)。このとき、電気的中性を保つために結晶に電子が導入されるが、それは金属中のような自由電子にはならず、 $\text{Cl}^-$  の抜けたサイトに束縛されていて、一種のアニオンとみなせる。もし、 $\text{Cl}^-$  を周期的に抜き取れるなら、電子アニオンが並んだ結晶を作ることができるだろう(図 1-A 右上)。そして、 $\text{NaCl}$  という成分は変化しないまま、電子アニオンのスピンの由来する磁性などの新物性が期待される。しかし、この状態は現実には存在せず、実際は空孔が連結し、金属  $\text{Na}$  のクラスターができてしまう(図 1-A 右下)。そこで、米ミシガン州立大の Dye 教授らはクラウンエーテル(環状の有機分子)でカチオンを挟んで電子と空間的に分離し、電子がアニオンとして振舞うイオン結晶「エレクトライド」の合成に成功した(図 1-B)。しかし、このエレクトライドは室温・空気中では不安定で、また大型の単結晶が作れないといった問題もあり、応用研究は進んでいなかった。

**C12A7からエレクトライドを作る** 本研究グループでは、有機分子の代わりに、強固なナノポーラス構造をもち、大型単結晶の合成が可能な C12A7 を用いることでエレクトライドの欠点を克服した。C12A7 の単位格子の組成は  $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{O}^{2-})_2$  と表され、 $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}$  の部分が 12 個のケージ(図 2-A)を形づくり、残り 2 個の  $\text{O}^{2-}$  はフリー酸素とよばれ、ケージに 1/6 の割合で包接されている(図 2-B)。高温ではフリー酸素がケージ間を移動できるため、C12A7 は高い酸素イオン伝導性を示す。このような性質の C12A7 単結晶を金属  $\text{Ca}$  の蒸気に曝すと、結晶構造を維持したまま、フリー酸素だけが引き抜かれ、 $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{e}^-)_4$  という組成に変化する(図 3-B, C)。このとき生成した  $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  という大量の電子アニオンにより、C12A7 は透明な絶縁体から濃緑色の電子伝導体へと変化する(図 3-A)。このエレクトライドは空気中・室温はもちろんのこと、数百 $^{\circ}\text{C}$  の高温でも安定なため、電子放出源などの応用が期待される。参考文献 S. Matsuishi, Y. Toda, K. Hayashi, T. Kamiya, M. Hirano, I. Tanaka and H. Hosono, Science, 301, 626 (2003).



# C12A7:e<sup>-</sup>の電子放出特性と電界放射型発光素子への応用

戸田 喜丈

私たち研究室で初めて合成に成功した無機エレクトライド C12A7:e<sup>-</sup><sup>(1)</sup>は結晶内に内径~0.4nmの細孔を持つ。そこに高濃度の電子が緩やかにトラップされていると予想できる事から電子放出源としての応用が期待される。C12A7:e<sup>-</sup>の電子放出特性を評価し、C12A7:e<sup>-</sup>を電子源とした電界放射型発光素子の室温での動作を確認した。

**電子放出と電解放射型発光素子** 電子放出機構は熱電子放出、電界電子放出、光電子放出、二次電子放出などが知られているが、本研究では熱電子放出と電界電子放出の特性を調べた。

★**熱電子放出**…固体（連続、安定といった制限がなければどのような物質からでも電子は取り出せる）を加熱することで内部の電子にエネルギーを与え、固体表面の電子のエネルギーが固体の真空準位を超えたとき表面から電子が飛び出し得る状態になる電子放出機構で、その特性は Richardson-Dushman (解析者の名前) の式 ( $\ln(I)$  と  $1/T$  ( $I$ :電流値、 $T$ :温度) が直線関係) に従う。

★**電界電子放出**…表面に作用する強電界の影響で電位障壁の厚みが数 nm となり、伝導帯の電子がこの障壁をトンネリングして真空中へ飛び出してくる現象で、その特性は Fowler-Nordheim (解析者の名前) の式 ( $\ln(I/V^2)$  と  $1/V$  ( $V$ :電圧) が直線関係) に従う。

電界放射型の電子源は電場を印加するだけで電子が放出されるので数 $\mu\text{m}$  ~ 数十 $\mu\text{m}$  程度の小型化が可能である。この電子源と蛍光板による発光素子は数百 $\mu\text{m}$  ~ 数 mm 程度の厚みで実現でき、多数を平面状に敷き詰める事によりディスプレイデバイスとする事ができる。薄型で画素一つ一つが発光するので高輝度、広視野角で電力効率が良い為次世代のディスプレイデバイスとして期待されている。

**実験: C12A7:e<sup>-</sup>の電子放出特性の評価と電界放射型発光素子の作成** 真空度  $6 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、試料に対して  $300^\circ\text{C}$  までの加熱と 5kV までの電圧印加が可能な真空チャンバーを用い、C12A7:e<sup>-</sup>の電子放出特性を測定した。電界集中が起こるのを防いで基礎物性を評価するため、電子放射面は鏡面研磨面とした。電子放出面とコレクタ電極間の距離は天然雲母をスペーサーに用い 50 $\mu\text{m}$  に調整した。また、コレクタ電極を蛍光材を塗布した透明電極に変え、電界放射型の発光素子を試作した。

**結果: C12A7:e<sup>-</sup>の電子放出特性と電界放射型の発光素子の動作を確認** 印加電圧 1000V 以下の領域では電子放出特性は Richardson-Dushman の式に従い、比較的大きな温度依存性が確認された。印加電圧が 1700V を超えると温度に依存しない急激な電流値の立ち上がりが見測されたが、これは Fowler-Nordheim の式に従う電界電子放出によるものであることが確認できた (図 1)。また、試作した電界放射型の発光素子の常光下での十分な発光を確認した (図 2)。

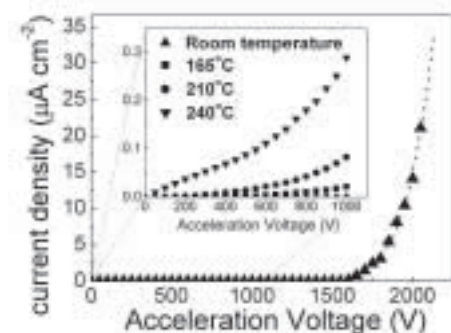


図1 電子放出の電流-電圧特性

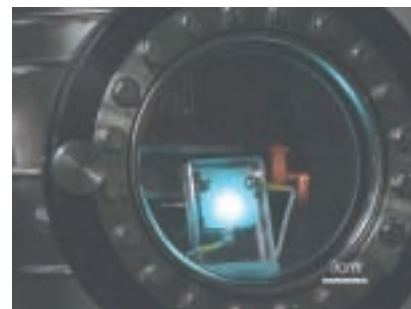
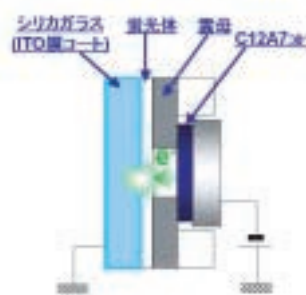
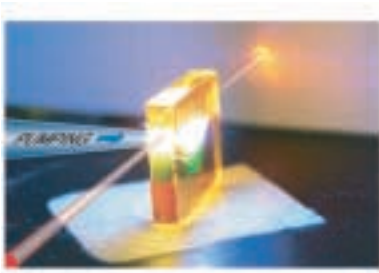


図2 試作した電解放射型発光素子の模式図(左)と動作時の写(右)

参考文献 (1) S. Matsuishi, Y. Toda, M. Miyakawa, K. Hayashi T. Kamiya, M. Hirano, I. Tanaka, and H. Hosono, Science 301, 626 (2003)





# LiF 単結晶へのフェムト秒レーザー照射による光デバイスの書き込み

高水 大樹

アルカリハライド結晶は、数多くのレーザー活性化色中心を持つ。その中でもLiF結晶は難潮解性であると同時に、室温で安定かつ、可視域で発振可能な色中心を持つため、実用的なレーザー媒質としての可能性がある。しかし、その光学バンドギャップは14eV以上と大きく、光による色中心の誘起は不可能とされている。通常、電子線、X線、 $\gamma$ 線照射などが色中心生成に使われるが、実用的なデバイス作製に必要な微細なパターンニング、特に結晶内部に3次元のパターンなどは困難となる。そこで本研究は、近赤外高強度フェムト秒パルスレーザー光をLiF単結晶に照射し色中心生成を試みた。さらに、フェムト秒レーザー照射で生成した色中心を使い、単結晶内部に3次元光導波路や、干渉露光法によるグレーティングの作製、また、そのグレーティングを使った分布帰還形 (DFB) レーザーの作製を試みた。

**実験** 試料は、光学研磨した純粋LiF単結晶を用いた。光源には再生増幅ML-Ti:Sapphireレーザー (中心波長800 nm、パルス幅100 fs、繰返し周波数10 Hz、パルスエネルギー 70mJ/pulse のパルス光を厚さ1 mmのLiF単結晶の表面または内部に集光し、照射部位の光吸収および蛍光スペクトルの測定を行った。またシンドリカルレンズを用いて、試料内部に光導波路を作製した。フェムト秒シングルパルス干渉露光法を使い、試料表面から100  $\mu$ mの深さにグレーティングアレイを作製し、DFBレーザーの作製を試みた。

**結果** 図1にフェムト秒レーザー照射直後の光吸収スペクトルを示す。1パルスの照射で、F、 $F_2$ 、 $F_3^+$ 、 $F_2^+$ 中心の生成が認められた。 $F_2$ 中心の濃度は約 $10^{16}$  cm $^{-3}$ と見積もられた。また蛍光測定からも、 $F_2$ および $F_3^+$ 中心による強い蛍光がそれぞれ710 nm, 532 nmに観察された。

高濃度の色中心が生成した時に誘起される屈折率の増加を利用し、結晶内部に3次元光導波路を作製した。フェムト秒パルス光をシンドリカルレンズで集光し、幅10  $\mu$ m長さ10 mmの光導波路を作製した(図2)。He-Neレーザー(波長633 nm)を導波させたときの入射臨界面角度から、フェムト秒パルス照射で誘起された屈折率変化  $\Delta n$  は約0.5%と見積もられた。

フェムト秒シングルパルス干渉露光法を使い、表面から100  $\mu$ mの深さにグレーティングアレイを作製し、DFB構造とした。グレーティングピッチは $F_2$ 中心の発振可能波長710 nmに合わせ、510 nmとした。また、レーザー発振に必要なゲインを得る為に、グレーティング書き込み後、室温でX線照射をおこなった。図3に作製した試料の発光スペクトルを示す。励起波長450 nm、エネルギー0.8mJ/pulse (10 Hz)を集光し、室温でグレーティングアレイに照射した結果、波長 710 nm、半値幅1 nmでのDFBレーザー発振が観察された。題目左はレーザー発振実験の写真。

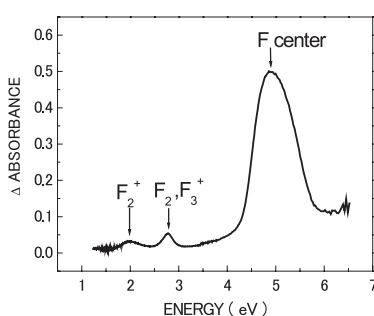


図1. フェムト秒レーザー照射後の光吸収スペクトル



図2. LiF 結晶内部に作成した光導波路の導波実験写真

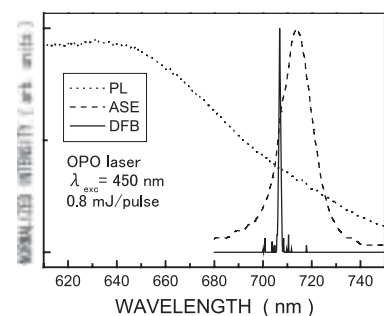


図3. グレーティングを書き込んだ試料の発光スペクトル

**参考文献** K. Kawamura, N. Sarukura, M. Hirano, H. Hosono, Proc. 32<sup>nd</sup> Annual Boulder Damage Symp. Proc. SPIE Vol.4347 p.195.; K. Kawamura, N. Sarukura, M. Hirano, H. Hosono, Appl. Phys. Lett., 78, 99 (2001) ; Ken-ichi Kawamura and Masahiro Hirano Toshio Kurobori Daizyu Takamizu, Toshio Kamiya, and Hideo Hosono Appl. Phys. Lett. 84, 311 (2004)

松石 聡

2003年9月8日から12日まで、スロベニアのアドリア海岸の観光地ポルトローシュで開催された国際会議 Colloque Ampere 2003 に参加しました。Ampere は磁気共鳴に関するヨーロッパの国際学会で、今回の会議は固体 NMR の分野で多くの業績を残されているスロベニア出身の Robert Blinc 博士の 70 歳の誕生日を記念したものであり、C. P. Slichter (Principles of Magnetic Resonance の著者) など磁気共鳴の分野の有名な先生が多く参加していました。内容は超伝導体、強誘電体、強磁性体の NMR、NQR、ESR と多岐にわたっていましたが、私は  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  中の超氧化物イオン  $\text{O}_2^-$  の EPR についての口頭発表を行いました。初めての英語の発表は何とかこなしたというのが実状でしたが、研究内容には自信もあり、質疑応答には対応できました。今後は、国際会議での、もっと高いレベルでの発表を目指し、日常の研究はもちろんのこと発表技術の向上にも力をいれたいと考えています。



## 速報

野村研二君、MRS Gold Graduate Student Award受賞!!  
2004年4月にサンフランシスコで開催されたMaterials Research SocietyのSpring Meetingにおいて野村君が Student Award (Gold) を授与されました。



## ■野村君からひと言

先生方をはじめ研究室の皆さんのおかげで受賞することができました。ありがとうございました。今後もより一層がんばりたいと思います。



所属	<b>東京工業大学</b> 応用セラミックス研究所 セラミックス機能部門 大学院総合理工学研究科 材料物理学専攻
住所	〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259
TEL	細野教授室 045-924-5359 神谷助教授室 045-924-5357
FAX	045-924-5339
URL	<a href="http://lucid.msl.titech.ac.jp/~www/">http://lucid.msl.titech.ac.jp/~www/</a>