

## 次世代の光、現る！

### 原子制御が切り拓く 酸化物エレクトロニクスの世界

6月に発行したTOHOKU WPI通信vol.1では、世界トップレベルの研究拠点を日本につくるWPIプログラムと、それによって設立された私ども東北大学原子分子材料科学高等研究機構（WPI-AIMR）の概要を紹介しました。vol.2からは、WPI-AIMRで活躍している各研究室を紹介していきます。トップバッターは「酸化物エレクトロニクス」で世界的に知られている川崎雅司教授の研究室です。地球上のいたるところにある酸化物。古い材料と思われていた酸化物。そんな身近な酸化物を原子レベルで制御することにより、全く新しいエレクトロニクス材料に変身させた、その注目の研究室を訪ねてみましょう。

# 川崎研究室

常に新しい  
材料世界を  
求め続ける  
川崎雅司教授



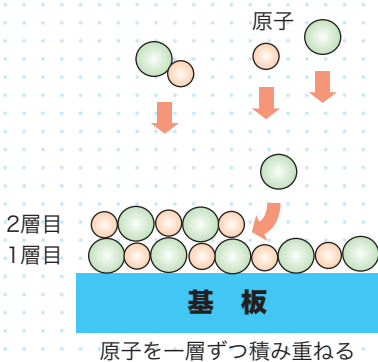
パルスレーザー  
加熱機構付き  
分子線  
エピタキシー  
装置



## 酸化物エレクトロニクス 身近な材料に新しい生命を



川崎先生、こんにちは。  
今日はよろしくお願いいたします。  
酸化物というと耐火レンガのような電気とは関係のない材料を思い浮かべてしまうのですが、どうやったらエレクトロニクスの材料になるのですか？



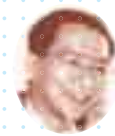
KAWASAKI

酸化物の中にも半導体の性質を示すものや、超伝導になるものも知られていますし、資源として豊富なことも酸化物の長所ですが、何といても精密な取り扱いが難しく、電子材料として育てていく機運がなかなか熟さなかったのです。  
私たちは、酸化物を**原子レベルで制御する技術**を確立したことで、最先端のエレクトロニクス材料に変身させることができました！

例えば、写真の装置はレーザー分子線エピタキシー装置と言って、物質をレーザーのパルス光で加熱して蒸発させ、それを基板の表面に付着させ、原子を一層ずつ積み重ねていくことができます。酸化物は従来の加熱方法ではうまく蒸発させることができませんでしたが、レーザーによる瞬間加熱装置を合体させたことによって高精度蒸発が可能になり、酸化物を原子一層ずつ積み重ねることができるようになりました。



原子を一層ずつ積み上げていくなんで、なんか想像できない世界ですが、それによって何が実現したのですか？



KAWASAKI

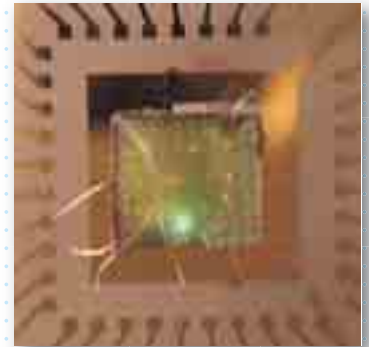
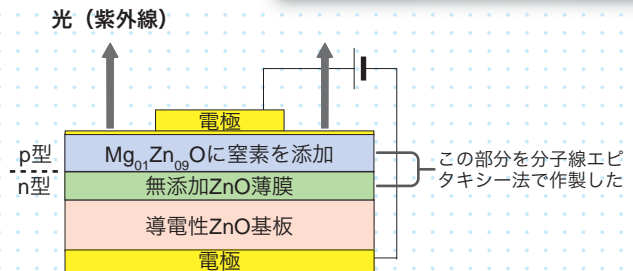
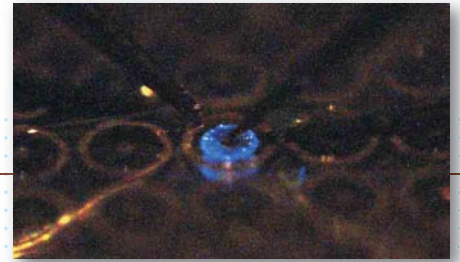
それでは、最近の成功事例を2つ紹介しましょう。



# 酸化物が光る！

発光ダイオード (LED) は低電力・長寿命であり、最近では身の回りの至る所で使われています。青色LEDの発明と実用化が日本人によってなされたことをご存知の方も多いことでしょう。青色LEDの開発で鍵となったのは窒化ガリウム (GaN) という材料です。私たちは窒化ガリウムに近い性質をもち窒化ガリウムよりも資源的に豊富で安価な酸化亜鉛 (ZnO) に着目し、青色よりも更に短波長の紫外線LEDの開発に挑みました。半導体はマイナスの電荷 (電子) を多く含むn型と、プラスの電荷 (ホール) を多く含むp型に分類され、n型とp型を接合させるとLEDになるのですが、酸化亜鉛は通常n型であり、高品質のp型が得られないという問題がありました。今回、私たちは、分子線エピタキシー装置の中で、酸化亜鉛 (正確にはマグネシウムを含んだ酸化亜鉛) とアンモニアガスを同時に基板に付着させることによって高精度のp型薄膜を作製することに成功し、結果として、これまでの酸化亜鉛LEDよりも輝度が1万倍も高い紫外線LEDを作ることができました。

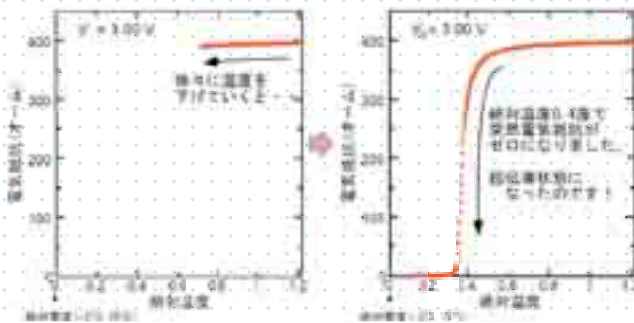
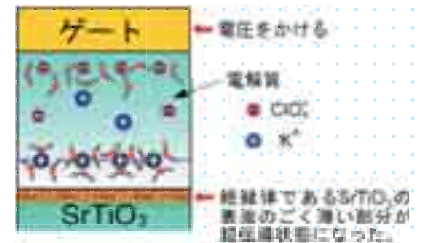
表紙の写真は、この紫外線を使って緑色の蛍光体を光らせたものです。ひとたび紫外線LEDができると、それを使ってさまざまな蛍光体を光らせ、あらゆる可視光をつくることができますので、白色照明に応用することも可能です。消費電力は電球の1/10、蛍光灯の1/2ですから、将来この光がご家庭のリビングを照らす照明に使われる可能性もあります。



# 超伝導になった！

チタン酸ストロンチウム (SrTiO<sub>3</sub>) は通常は電気を流さない絶縁体です。しかし、右図に示した電解質溶液を使った「電界効果ドーピング」という方法で、このチタン酸ストロンチウムのごく表面 (原子数層) に多量のマイナス電荷 (電子) を注入することができ、これによって超伝導状態が実現しました (下のグラフ)。

これまでは、超伝導にしたい物質に、不純物を入れて電荷を注入する方法 (化学ドーピングと呼ばれる) が主流でしたが、今回、不純物を使わないクリーンな方法で超伝導が実現したことで、今後の超伝導研究の流れが変わってくると予想されます。これも原子レベルの制御によって実現した世界初の成果です。



夢に向かって  
突き進む、  
川崎研究室の  
みなさん

川崎先生、今日は案内をありがとうございました。  
酸化物が低消費電力の照明材料になったり、超伝導体になったり、なんだか、とてもわくわくしてきました。これからも夢のある研究を続けてください。



KAWASAKI

今回はあまり強調しませんでした。酸化亜鉛などには、透明であるという特色があります。透明ということは光の透過をじゃましないわけですから、照明やディスプレイなどに応用するには非常に重要です。でも、この性質も酸化物が持っている魅力のほんの一部。きっとこれから、もっともっと面白い発見や発明がなされると思います。期待しててください。

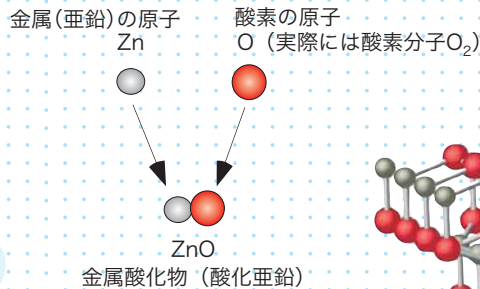
## ポイント解説!

川崎研究室の紹介、いかがでしたか？

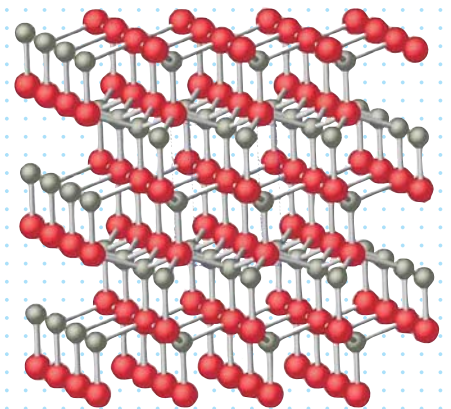
「難しすぎた・・・」というご意見もあるかもしれません。世界最先端の研究ですので、研究内容も、使っている装置も難しいと思います。でも、難しいながらも、どこがすごいのか、何が面白いのか、そしてどんな役にたつのかを、ここでは何とかお伝えしたいと考えています。「もう少し知りたい」という方は、ぜひこのページも読んでみてください。

### Point 1 酸化物

もう少し正確に表現すれば「**金属酸化物**」です。例えば金属の亜鉛 (Zn) が酸素 (O) と結びついてできる金属酸化物が酸化亜鉛 (ZnO) です。酸化物以外には窒素 (N) が結びつく窒化物 (窒化ガリウム GaN など) や硫黄 (S) が結びつく硫化物 (FeS など) などがあります。地球の、特に人間の生活圏に近い「地殻」を構成する元素の何と約50%が酸素です (F.W.クラーク他の研究による)。これにケイ素 (シリコン) 約26%が続き、この2元素で地殻の3/4が作られています。身の回りの岩石に、石英、長石などの主に酸素とケイ素からなる鉱物が多いのはそのためです。地殻の半分が酸素でできているわけですから、酸化物 (金属酸化物) が豊富であることは想像できると思います。

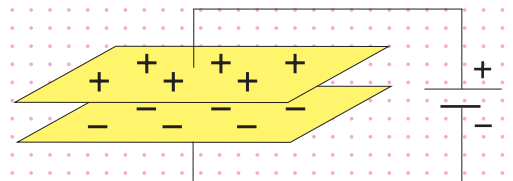


通常はこのような分子 (2原子の結合) で存在するのではなく、右の図のように、原子が規則正しく配列した「結晶」として存在します。



### Point 3 電界効果ドーピングと電気二重層

最後に電界効果ドーピングに関して説明します。電気の流れやすさには、どれだけたくさんの電荷 (プラスの場合とマイナスの場合がある) が入っているかが重要です。ドーピングとはこのような電気伝導の性質を変えるために絶縁体や半導体中に電荷を注入する方法です。電界効果ドーピング法は、従来不純物を添加して行っていた化学ドーピングに比べ、よりクリーンで扱いやすく、材料そのものに手を加えないので、物理現象を解析しやすいドーピング法といえます。



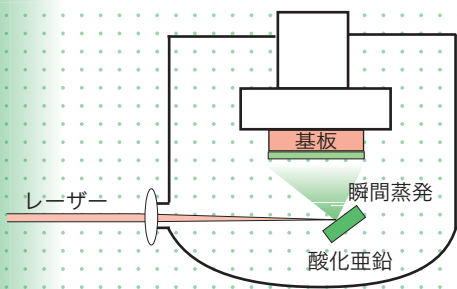
2枚の金属板を接しない程度に近づけていき電圧をかけるとそれぞれの板にマイナスとプラスの電荷が溜まる (充電) ことが知られています。電子部品のコンデンサはこの原理を利用しています。



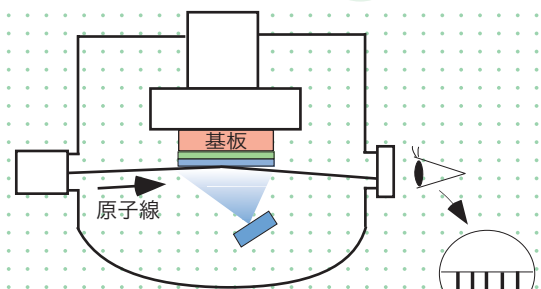
## Point 2 酸化物の高品質な薄膜づくり

高品質な薄膜を作りたい場合、2~3ページで紹介した「分子線エビタキシー装置」を使います。極めて高品位の真空の中で、薄膜にしたい物質をヒーターで加熱し、蒸気にし、それが原子・分子のビームになって飛んでいき、基板の表面に積ります。ところが、酸化物は非常に高温まで安定な物質で、なかなか蒸発させることができません。そこで登場するのがレーザー加熱システム。高強度のレーザービームを絞って原料に当て、瞬間的に原料の蒸気を作ります。レーザーの強度、当てる回数によって飛ばす量を正確に制御できます。こうして、原子レベルで乱れない、精密な酸化物薄膜を得ることができるのです。

ここでは、レーザーによる加熱蒸発のことを書きましたが、実際にはレーザーを使わない方法もあり、状況に応じて使い分けます。

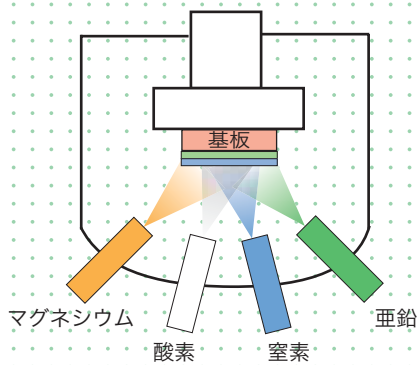


酸化物をそのまま蒸発させる方法。パルスレーザーアブレーション法と言います。レーザーをレンズで絞って酸化物原料で焦点させ、瞬間的に加熱して蒸気を出します。この方法の確立によって酸化物の制御精度が飛躍的に向上しました。



原子が本当に、1原子層ずつ規則正しく積み上がっているかは、試料表面に電子線を当て、その回折像を解析することによって「その場で」確認できます。

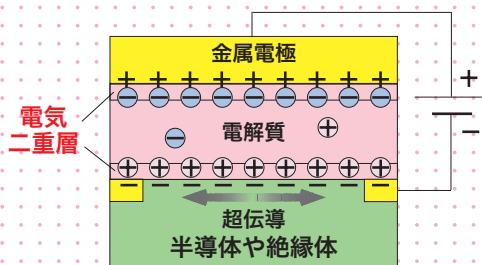
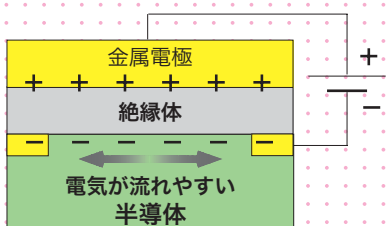
電子線回折像が見える



酸化物を作るための原料（個々の原料はレーザーでなくても飛ばすことができる）を個々に供給する方法。不純物を一定の割合で混入させたいときに有効です。高輝度紫外線LEDはこの方法で高品質のp型（マイナス電荷のホールがたくさんある）酸化亜鉛薄膜を作製することにより実現できました。



原子1層ずつ積み重なっている様子を電子顕微鏡で観察したもの



絶縁体を挟んで金属-絶縁体-半導体の3層構造を作製して電圧をかけると、コンデンサと同じ原理で、半導体の表面に電荷を注入することができ、これによって半導体は電気を流しやすい状態になります。

左図の絶縁体の部分を電解質に換えると、電解質中の正イオン・負イオンが両極側に引き付けられ、電気二重層を形成します。この電気二重層の効果で半導体（または絶縁体）には極めて多量の電荷（図ではマイナス電荷である電子）が注入され、もともと電気を流さなかった絶縁体ですら、金属として振舞うようになり、更に低温にすることによって超伝導状態にまでなるのです。

# 1 科学・技術フェスタ in 京都

6月5日（土）に国立京都国際会館にて行われた「科学・技術フェスタ in 京都」に当機構も出展しました。この催しは平成22年度産学官連携推進会議の併設イベントとして行われたもので、関係者、出展者を含め5,121人が集いました。今回は5つのWPI拠点が一か所に集合しての出展となり、初めて5拠点が合同して一般向けにWPIの広報を行う機会にもなりました。パネルや広報誌、動画による拠点紹介を行ったほか、金属ガラスのかたまりや実用製品の展示を行い、多くのお客様にお立ち寄りいただきました。また、当日、産学官連携功労者表彰文部科学大臣賞を受賞した当機構主任研究者の阿尻雅文教授の研究内容を紹介するブースも設けられました。



世界トップレベルの研究を分かりやすく紹介



研究成果に見て、触れて何を感じてもらえたかな？

# 3 東北大学 オープンキャンパス2010

7月28日（水）・29日（木）に行われた本学オープンキャンパスに出展しました。ポスターや広報誌による機構紹介のほか、金属触媒、振動反応、ナイロン合成の化学実験、有機半導体を用いた物理実験（有機半導体トランジスタの測定）を通じ、ブースを訪れた皆様に、WPIについてよりよく知っていただきました。また、理学部キャンパスにある3つのWPI研究室（材料物理先端分光研究室、電子材料研究室、有機ソフト・ハイブリッド材料研究室）の見学会も企画しました。



熱心に説明を聞く未来の研究者たち

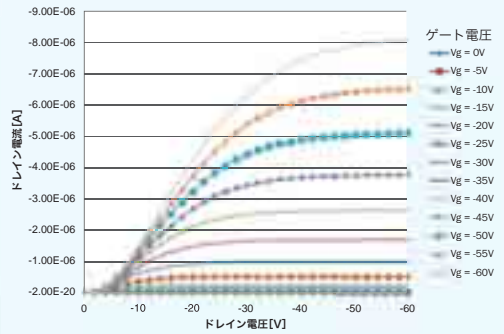


# 2

## 学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ2010

7月11日(日)に東北大学川内北キャンパス講義棟にて行われた学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ2010に、「有機半導体でトランジスタを作るう」をテーマとして出展しました。午前と午後に1回ずつ開講し、合わせて22名の皆さんと、次世代エレクトロニクス材料として注目される有機半導体を使ってトランジスタ作りに挑戦しました。大学で行われている実験にできるだけ近い内容で体験していただくことを目指しましたが、準備できる機材の制約もあるため、通常は顕微鏡下で行う作業も肉眼でせねばならず、スタッフも事前練習してのぞみました。トランジスタが見事に動作した時の(大人も含めた)子供たちの歓声が忘れられません。

- ① トランジスタの基板にするシリコンウエハを縦割へきかいます。結晶には割れやすい方向があることを体験。
  - ② シリコン基板に有機半導体レゾンの結晶を貼り付ける。薄い結晶を選ぶのがコツ。
  - ③ 銀ペーストで2つの電極(ソース、ドレイン)を作る。電極をショートさせないよう慎重に。
  - ④ フローハ装置でソース、ドレイン、ゲート電極を配線し、トランジスタ特性を測定する。
- (シリコン基板は表面を酸化してあり、その酸化膜がゲート絶縁膜として働きます)



出来上がったトランジスタで、このような電流-電圧特性が測定できました。



いつもの授業とは  
 ちょっと違う  
 体験をしました



講座にご参加くださった皆様、  
 ブースにお立ち寄りくださった皆様、  
 ありがとうございます。

これらのイベントについてはWPI-AIMRのホームページ  
<http://www.wpi-airm.tohoku.ac.jp/modules/newsinfo/>  
 でも紹介しています。  
 ぜひホームページにもお立ち寄りください。



## NEWS ニュース

5.14

幾原 雄一 客員教授  
2010年第7回本多フロンティア賞 受賞

6.5

阿尻 雅文 教授  
第8回産学官連携功労者表彰  
「文部科学大臣賞」受賞

6.20

A. カテムホッセイニ 主任研究者  
(Harvard Medical School)  
「the 2010 American Chemical Society  
(ACS) Unilever Award」受賞

7.4

K. ゲオガリス 助教  
ISMANAM (International Symposia on  
Metastable and Nanostructured  
Materials) の「Young Scientist Prize  
2010」受賞

9.14

野内 亮 助教  
第28回応用物理学学会講演奨励賞 受賞

## INFORMATION インフォメーション

10/18

東北大学  
イノベーションフェア  
2010 in 仙台

ブース出展No.9  
「融合研究によって切り拓く最先端材料科学」  
WPI-AIMRが推進する異分野間の融合研究を紹介。  
<http://www.rpip.tohoku.ac.jp/inv2010/index.htm>

11/20

サイエンスアゴラ  
2010

「一緒に考えよう！日本の未来戦略」  
東京国際交流館に5つのWPI拠点関係者が集まり、  
外部の有識者も交え日本の科学技術政策の未来戦  
略を議論します。一般の方も参加可能ですが、詳細  
はアウトリーチ担当者に問い合わせください。  
[http://www.scienceagora.org/scienceagora/  
agora2010/index.html](http://www.scienceagora.org/scienceagora/agora2010/index.html)

## 編集後記

vol.1は当機構のパンフレットの冊子でしたので、今回のvol.2で、TOHOKU WPI通信の形が整ったといえます。世界最先端の研究は難しい概念や手法を含むものが多く、それを如何にわかりやすく紹介するかが、本誌編集者の務めです。読者の皆様からのご意見を伺いながら、よい広報紙にしていきたいと思っています。

当機構の全体像を紹介したvol.1は、お届け先をご連絡いただければお送りいたします。

当機構のホームページ▼

[http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jp/modules/kenkyu/index.php?content\\_id=22](http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jp/modules/kenkyu/index.php?content_id=22) からダウンロードすることもできます。

## SQUARE

### 読者の皆様との “交流スクエア”

小学校5年生（仙台市太白区）からの  
質問を紹介します。



Q

「原子・分子」の「分子」は算数で習う分数の「分子」と同じですか？  
「分子」があるなら「分母」もあるのですか？

A

確かに小学生が習う「分子」は分数の分子ですね。vol.1を編集しているときは思いつきませんでした。原子・分子の「分子」は英語で書くとmolecule（モレキュール）、分数の「分子」は英語で書くとnumerator（ヌーメレーター）で、違うものを表していますが、日本語で書くとどちらも「分子」です。

分数の「分母」「分子」などの言葉は、中国の漢の時代の書物「九章算術」に出ているそうで、2000年以上の歴史があり、これが遣隋使や遣唐使によって日本に伝えられました。一方、モレキュールの「分子」ですが、これは幕末～明治時代に西洋の言葉を漢字を使って和訳した「和製漢語」のひとつで、「原子」も和製漢語だそうです。これら日本で作られた「原子」、「分子」はその後、中国でも使われるようになりました。

今のところ、材料科学の分野には「分母」というものはありません。

どちらも「分子」ですが、  
違うものです。

1  
—  
10

