

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

# 神谷・片瀬研究室

Kamiya & Katase Laboratory

物質理工学院 材料系 C 群 (無機材料分野)  
に属しています

本研究室は、細野・平松・松石研究室と共同して運営しています

◎ 2020 年度の大学院の入試案内・募集要項は以下のサイトで入手できます。  
[https://www.titech.ac.jp/graduate\\_school/admissions/guide.html](https://www.titech.ac.jp/graduate_school/admissions/guide.html)

◎ 入学試験情報および昨年度までの過去問は、以下のサイトから入手できます。

入学案内：<https://educ.titech.ac.jp/mat/admissions/>

過去問：

[https://www.titech.ac.jp/graduate\\_school/admissions/past\\_exam\\_papers.html](https://www.titech.ac.jp/graduate_school/admissions/past_exam_papers.html)

## 研究室の構成

### ■ スタッフ

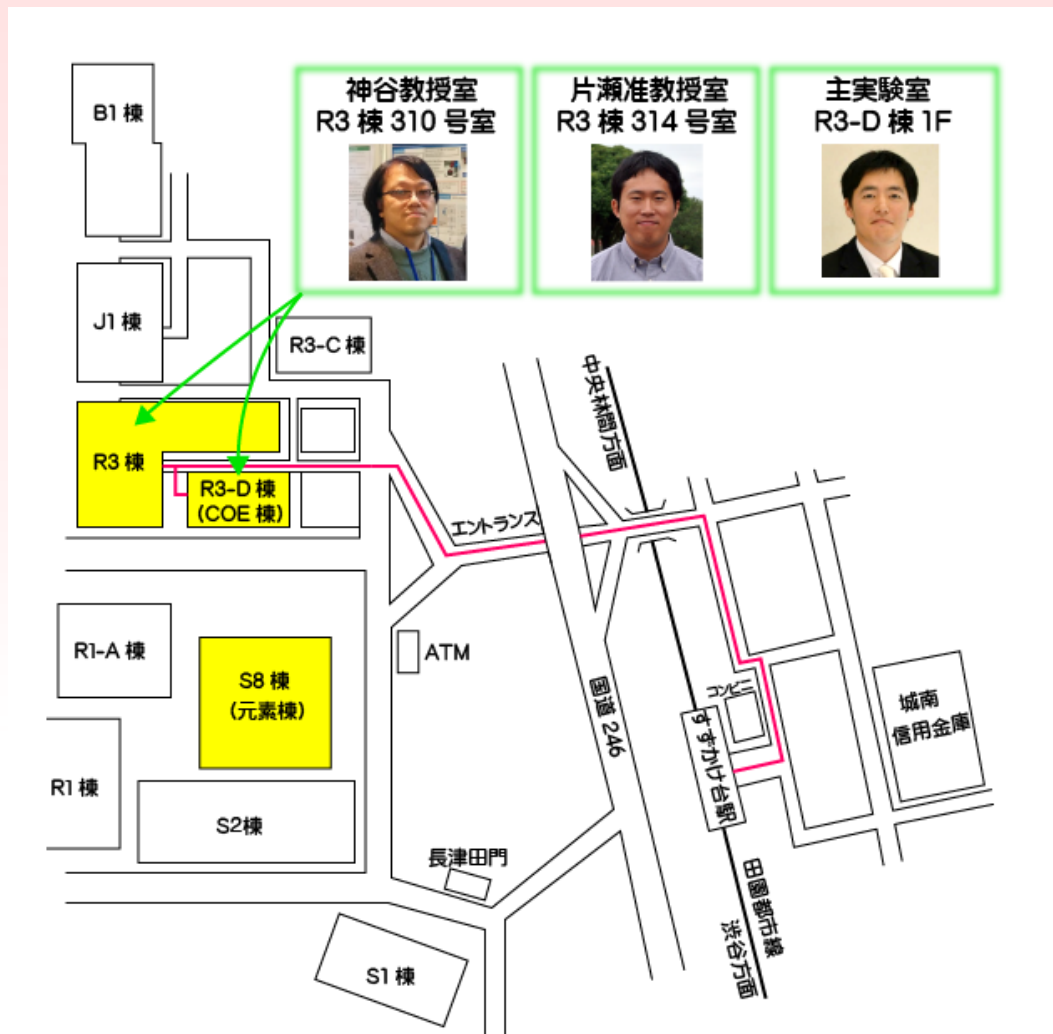
- ・ 神谷 利夫 教授
- ・ 片瀬 貴義 准教授
- ・ 井手 啓介 助教
- ・ Christian Niedermeier 研究員

### ■ 学生

- ・ 博士課程 2 名
- ・ 修士課程 13 名 (M1: 9 名、M2: 8 名)
- ・ 学士課程 2 名

住所：〒226-8503  
神奈川県横浜市緑区長津田町 4259  
(すずかけ台キャンパス)  
東京工業大学 科学技術創成研究院  
フロンティア材料研究所 R3 棟 316 号室

# 神谷・片瀬研究室マップ



神谷 利夫 TEL 045-924-5357  
片瀬 貴義 TEL 045-924-5314  
井手 啓介 TEL 045-924-5325

E-mail [tkamiya@mssl.titech.ac.jp](mailto:tkamiya@mssl.titech.ac.jp)  
E-mail [katase@mces.titech.ac.jp](mailto:katase@mces.titech.ac.jp)  
E-mail [keisuke@mces.titech.ac.jp](mailto:keisuke@mces.titech.ac.jp)

# 一緒に学びたい学生を歓迎します

私たちは、物質理工学院 材料系 に所属しています。大学院入試では出身学科の問題を選択して受けられますので、現在どの学科で勉強していても不利はありません。東工大の大学院は学部と違い、研究を中心に研究者を育てる教育を行ないます。そのため、研究室を選ぶことが重要です。実際に訪問して自分にあった研究室を見つけてください。神谷・片瀬研究室の見学はいつでも歓迎しますので、遠慮せずに連絡をください。

## 東工大 3 年生の方へ

4 年次に進級する際に、神谷・片瀬研究室を選択し卒業研究を行うことができます。神谷・片瀬研への配属を検討の方は、気軽に神谷または片瀬までご連絡ください

## 大学院入試を受験する学部 4 年生・修士 2 年生の方へ

修士課程から入学するためには、物質理工学院 材料系 の受検が必要です。入試に関する詳細は下記をご参照ください。博士後期課程での入学を希望する方は、ご自分の指導教員とよく相談してください。下記、説明会日時以外の研究室訪問も随時歓迎しています。お気軽に神谷または片瀬までご連絡ください

<http://educ.titech.ac.jp/mat/admissions/>

### ★オープンキャンパス・進学説明会日程

- ・ 2020年3月31日（火）  
物質理工学院 大学院進学説明会（すずかけ台）
- ・ 2020年4月11日（土）  
物質理工学院 大学院進学説明会（すずかけ台）
- ・ 2020年5月15日（金）：オープンキャンパス  
物質理工学院 大学院進学説明会（すずかけ台）
- ・ 2020年5月16日（土）：オープンキャンパス  
物質理工学院 大学院進学説明会（すずかけ台）
- ・ 2020年6月6日（土）  
物質理工学院 大学院進学説明会（すずかけ台）

午前中に材料系 C 群全体の説明会があり、午後からはポスターによる各研究室の説明会があります。その後、当研究室ではデモ実験・研究室案内・相談会を開催しています。当日でも参加可能ですし、事前に連絡を頂ければ午前中でも、一人一人親身に対応しますので、お気軽にお越しください。

# 神谷・片瀬研究室

Kamiya & Katase Laboratory



教授  
神谷利夫  
博士(工学)

准教授  
片瀬貴義  
博士(工学)

## 常識を覆す新しい機能材料を創り、 新デバイスを実現する

「太陽電池、エネルギー変換素子、ディスプレイなどの性能は **★新材料★** で決まります」

◆ **研究目的**：酸化物を中心に新しい機能材料を創り、その特長を生かしたデバイスを開発しています。現在のコンピュータやディスプレイ、太陽電池などにはSiやGaNなどの共有結合性半導体が使われていますが、現在のSiでは、有機ELテレビや低コスト高効率の太陽電池を作るのが難しいなど、限界があります。当研究室では、今まで使われてきた電子材料とは**全く違った材料系を自ら見出し、今までは作れなかった光・電子・エネルギーデバイスに挑戦しています**。材料設計を大きな武器として用い、太陽電池・トランジスタ・熱電変換素子・発光素子・レーザーなどのありとあらゆる環境デバイスの劇的な性能向上を目指しています。

### ◆ 研究テーマ

#### ・使える新しい機能材料とデバイスの開発 アモルファス酸化物半導体 (AOS)

2004年以前は、Si, GaN や ZnO のような結晶でないと「良い半導体」はできないと信じられていました。それに対して私たちは、In-Ga-Zn を成分とする酸化物 **IGZO** が、アモルファスであるにもかかわらず、高性能のトランジスタを作れることを実証し、図1のような**透明でフレキシブルな高性能トランジスタ**を発明しました。この技術は、iPad, Surface Pro4 や 88型8K有機EL TV などに使われています。さらに最近では、図2のように、**世界で初めて無機の発光薄膜の室温形成**に成功し、**有機ELを超える新しい発光デバイス・ディスプレイ**の実現も視野に入ってきました。[関連論文] K. Nomura et al., Nature (2004), Science (2003).

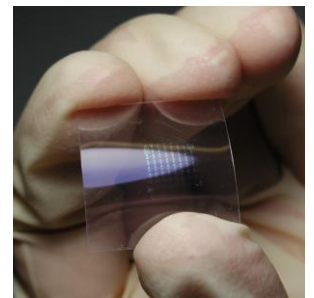


図1 IGZOを用いた  
透明フレキシブルトランジスタ

#### ・今まではできないと信じられてきた材料を実現

##### 4 eV 以上の非常に大きなバンドギャップを持つアモルファス半導体

上でも述べたように、アモルファス半導体の特性は良くないと信じられてきました。私たちはこの迷信を AOS によって覆したわけですが、次には「**バンドギャップの大きいアモルファス半導体は作れない**」という迷信がありました。私たちは、アモルファス酸化物における**ドーピング機構と欠陥をきちんと理解することにより**、バンドギャップ 4.12 eVのアモルファス酸化物半導体の開発に成功しました。[関連論文] J. Kim et al., NPG Asia Mater. (2017).

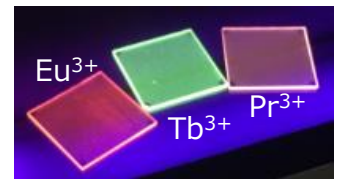


図2 室温でガラス上に作製可能な  
無機発光薄膜

#### ・コンピュータを利用して科学者の常識を覆す新しい材料の設計

##### 絶縁体と信じられていた元素から半導体を創る

新材料は、行き当たりばつりに材料合成をしても見つけることはできません。量子計算やデバイスシミュレーションなどのコンピュータ支援と、材料研究者としてのひらめきを組み合わせ、教科書に書いてあることを超える新しい材料を設計、開発しています。

例えば、酸化Geや酸化Siは 6 eV 以上の大きなバンドギャップを持ち、非常に良い絶縁体として知られています。しかし、図3のような量子計算によって電子構造を正しく理解すると、立方晶構造のSrGeO<sub>3</sub>はバンドギャップが 2.7 eV へ、BaSiO<sub>3</sub>も4.1 eVへと極端に小さくなり、良い透明半導体になることが予測されました。前者は実験的にも実現しました。このように、**計算機シミュレーションを援用することにより、物質に関する新しいセンス**を身につけ、画期的な新材料を開発することが可能になります。[関連論文] H. Mizoguchi et al., Nature Commun. (2011).

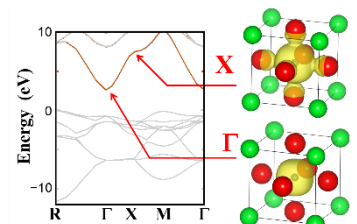


図3 量子計算で描いた  
SrGeO<sub>3</sub>の波動関数

#### ・超精密薄膜化技術と電界変調法を駆使して新しい機能・デバイスの開発

原子層で人工的な界面を形成したり、外部電場などで物質中の電位や電子濃度を制御することによって、天然材料では実現できない、新しい機能が発現します。**原子一層毎に積層できる精密薄膜化技術**(図4)と**巨大電界変調法**を駆使して、新しい機能薄膜と光・電気・磁気機能を制御・利用するデバイスの開発を進めています。例えば、人工粒界を形成することで鉄系超伝導体ジョセフソン接合素子を初めて実現しました。陽イオンを網目状に整列させる固相エピタキシー法を独自に開発し、室温強磁性酸化物半導体薄膜を実現し、全酸化物強磁性接合素子への応用が期待されています。

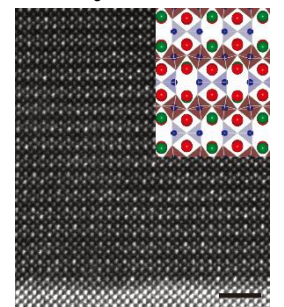


図4 超精密な薄膜合成法により  
作製した室温強磁性半導体薄膜

#### ・微少な熱を集めて使えるエネルギーを創りだす新材料: あらゆるものが「つながる」社会へ

私たちの周りには「熱」という無限のエネルギーが至る所に存在しますが、現在は使うことができていません。化学的に安定で無害な酸化物で**微少な熱を電気に変えてエネルギーを高効率に回収できる新材料**を創れば、身の周りのあらゆる「もの」を、充電しなくても永遠に自律的に動作する電子情報端末へと変貌させるIoT社会が実現できます。このような高効率・超省電力デバイスを実現するため、強力な電子格子相互作用などの酸化物の特長を利用する新しい発想と上記の超精密薄膜化・人工超格子技術を駆使し、室温での熱電変換性能を10倍以上に高めて実用になる材料の開発に挑戦しています。





助教  
井手啓介  
博士(工学)



### ・コンピュータを利用した材料科学・材料設計

新しい材料を見つけるというのは、大変な仕事です。化学組成を変えてたくさんの物質を合成するというのは有効な研究方法ですが、それだけなら大学院で勉強する必要はありません。当研究室では、「**なぜこの材料がいい特性を示すのか**」を理解し、「**もっと特性をよくするためにはどうしたらよいのか**」を予測(期待)し、「実際に材料を合成して確かめる」ということを学んでもらいたいと考えています。しかし、そのようなことをいうと「科学というと難しい」「量子力学はわからない」と思うかもしれません。確かに、教科書には、わざと難しく書いているのではないかと思うほど、わかりにくいものがあります。また、教科書に書いてある方程式は、実際に私たちが扱う実際の材料についての電子構造や物性について、何も教えてくれません。幸いなことに、現在のコンピュータやソフトウェアを使うと、**教科書に書いてあることを「視て簡単に理解できる」**ようになります。また、コンピュータを使うことにより、実際の材料について、結晶構造、原子配列、電子構造、電子分布、波動関数の形や、半導体に重要な物性がわかるようになってきました。新しい材料を創るためには、実験が一番大事ですが、実験をしながら、必要な場合にはコンピュータによる理論計算をして、実験と理論の両面から研究を進める必要があります。当研究室では、分子動力学法、第一原理量子計算、デバイスシミュレータなどを使いながら、研究を進めています。一つの例が、図5です。普通の半導体では電子は原子の上を動いて電気伝導を起こします。ところが、0.4 nm のかご構造からできているC12A7では、電子はかごの中にいて、この**電子がかごからかごへ動くことで、いろいろな電子デバイスを動作させている**ことが、量子計算からわかるのです。

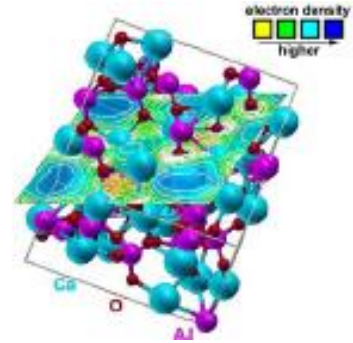


図5 セメント半導体C12A7の原子配列(結晶構造)と、第一原理プログラムで計算した波動関数。



作製した薄膜やデバイスは自ら測定して評価します

### ◆ 指導方針

- ・ 細野・平松・松石研究室と協力して研究をしています。
  - ・ 当研究室だけでなく、総勢20名以上の学生がお互いに助け合いながら勉強・研究に取り組んでいます。
  - ・ 当研究室の学生は、物理、電気、化学など、大きく異なる学科の卒業生ばかりです。そのため、入学後に、ゼミ、輪講などを通じて 研究を進めるのに必要な知識を学んでいきます。**新しい分野に挑戦する**のに最適な環境です。
  - ・ **電子材料・環境・エネルギー分野**に関連した研究開発に必要な技術と知識 (パルスレーザー堆積・スパッタリング・分子線エピタキシー法などの薄膜成長プロセス、薄膜トランジスタなどのデバイス作製・リソグラフィ加工、ホール効果や光吸収などの光・電子物性計測) を学ぶことができます。
  - ・ 教科書を読むだけではなく、データベース、計算ソフトなど、コンピュータ支援を積極的に使い、電子構造、物性物理、デバイス動作機構などを学んでいきます。
- 私たちが独自に培ってきた材料設計の考え方を学び、実際の研究開発にどのように応用するかを習得していきます。

### ◆ゼミ、学会発表を通して「伝える力」を養う

- ・ **ゼミは20名程度**で行います。十分な時間を取って、学生が自分で考えとともに、専門的な考え方を学ぶことができます。
- ・ 研究では、「自分のやったことがどれだけすごいのか」、「何をやろうとしているのか」、「そのためにどのような工夫をしたのか」を、他人に「わかりやすく」説明する必要があります。
- ・ これは就職活動でも同じことです。「どんなすごいことをできたのか」、「何をやりたいのか」、「何ができるか」を、わかりやすく説明し、「納得してもらう」ことが必要です。
- ・ ゼミ・学会発表などは、実験結果を発表するだけの場ではありません。「わかりやすい説明・発表」ができるように指導します。
- ・ 修士学生は、卒業までに最低一回、国内学会で発表をしています。博士学生は、毎年一回以上、国際学会で発表をしています。
- ・ 修士学生でも、成果が出れば、国際学会で発表したり、国際英文誌に英語で筆頭著者として論文を書いています。英語が不得意と言っていた学生も、国際学会で発表したり英語論文を書くと、すぐに英語でコミュニケーションが取れるようになります。頑張ってください。



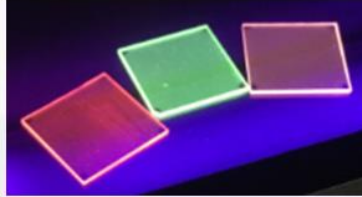
# 研究目的・テーマ

**常識を覆す新しい機能材料を創り、  
新デバイスを実現する**

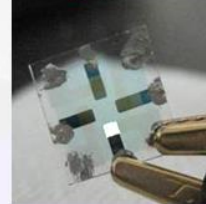
透明で曲げられる  
薄膜トランジスタIGZO



室温で作れる  
無機蛍光体



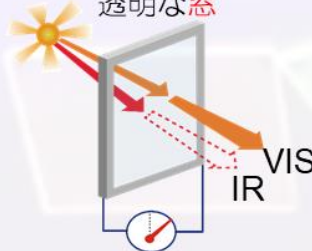
高効率に光る  
有機EL



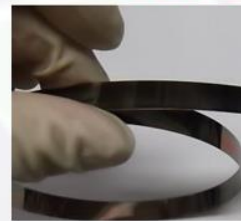
色・情報を操作する  
抵抗変化メモリ



電流を流して熱を遮断する  
透明な窓



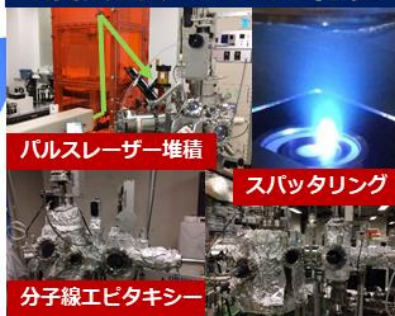
抵抗ゼロで大電流を  
流せる超伝導線材



**研究方針** 自らの手で薄膜デバイスを作製・計測する  
計算科学を併用して材料を設計する

我々独自に培ってきた  
**材料設計**の考え方を学  
び、実際の研究開発に  
どのように応用するか  
を習得できます

**薄膜合成・デバイス作製**



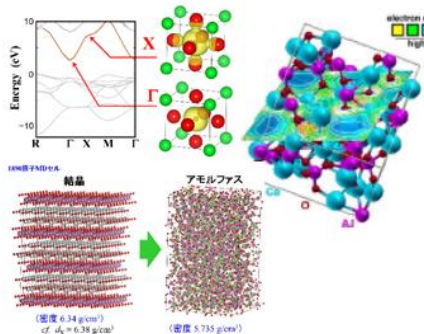
パルスレーザー堆積

スパッタリング

分子線エピタキシー

**電子材料・環境・エネ  
ルギー・情報分野**に関  
連した研究開発に必要  
な技術と知識を学べ  
ます

**コンピュータ支援  
による材料設計**



**計測・分析**

電気・磁気・熱電・イオン伝導特性計測

デバイス計測

光物性計測

構造解析



# 研究室での生活

## ☆年間スケジュール

---

- 4月 新入生歓迎会
  - 5月 オープンキャンパス
  - 7月 中間発表会+前期打ち上げ
  - 8月 夏休み、フロンティア研合同バーベキュー
  - 9月 学会発表（応用物理学会、日本セラミックス協会等）
  - 12月 中間発表会+忘年会、冬休み
  - 1月 博士論文公聴会+新年会
  - 2月 修論・卒論発表会+打ち上げ
  - 3月 学会発表、追い出しコンパ、卒業式
- 

それぞれ綺麗な個人用デスクとパソコンが支給されます。拘束時間はありませんが、基本的に平日朝 10 時には学校に来ることを薦めています。社会に出てから困らないように、研究室生活で基本的なマナーを身に付けて欲しいと思っています。研究室ゼミは週に 1 度、定期的で開催して、先生方から研究のアドバイスをもらったり、議論をする場を設けています。比較的自由な環境ですが、入ったばかりの 4 年生・修士 1 年生でも、努力次第で結果を出して、国内外の学会に参加して研究発表をしています。気概とやる気に溢れた学生さんにはとても良い環境です。



ある日の実験風景

（学生さん自ら、超高真空装置を使ってあらゆる材料の薄膜やデバイスを作製して評価しています）



懇親会

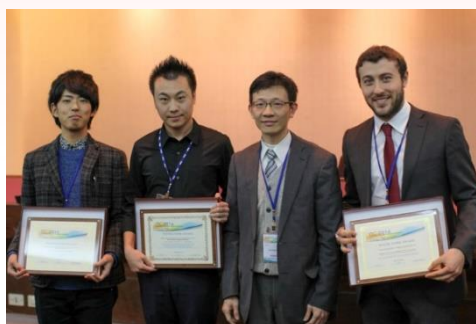


# 学生の活躍

## ■ 過去 6 年間における学生の受賞歴（抜粋）

国内だけでなく、国際学会においてもその研究と発表が認められ、毎年多くの学生が受賞しています。

- |       |                                |                                 |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|
| 2019年 | B4 木村君, M2 樋口君                 | 国際会議 TOEO11 Silver Poster Award |
|       | D1 He さん                       | 国際会議 STAC11 Silver Poster Award |
| 2018年 | M1 樋口君                         | 薄膜材料デバイス研究会 スチューデントアワード         |
|       | D2 渡邊君                         | 薄膜材料デバイス研究会 スチューデントアワード         |
| 2017年 | M2 二角君                         | 国際会議 TOEO10 Silver Poster Award |
|       | M2 渡邊君                         | 物質科学創造専攻 土肥賞                    |
|       | D2 金君                          | 井上研究奨励賞                         |
| 2016年 | D2 金君                          | 応用物理学会講演奨励賞                     |
|       | M1 岸田君                         | 国際学会 ITC2016 Poster Paper Award |
|       | M2 Tang 君, D2 Kim 君, D3 Xiao 君 | 物質科学創造専攻 土肥賞                    |
| 2015年 | D2 Kim 君                       | 薄膜材料デバイス研究会 スチューデントアワード         |
|       | D2 Chris 君                     | 国際学会 TOEO9 Gold award           |
| 2014年 | M2 石川君                         | 薄膜材料デバイス研究会 スチューデントアワード         |
|       | B4 Johanness 君                 | EPL Poster Award of ITC2014     |



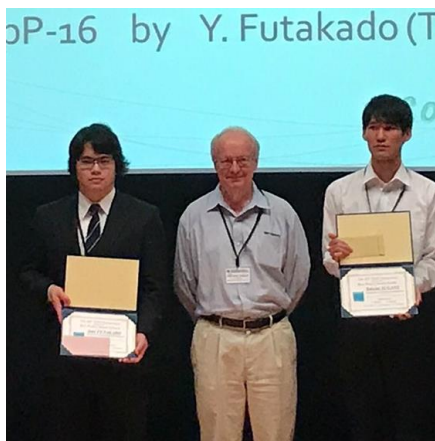
ITC2016@台湾での  
ペーパーアワード授賞式



薄膜材料デバイス研究会  
の京都での授賞式



薄膜材料デバイス研究会  
(2018年)での授賞式  
(右端から2番目がM1 樋口  
君、3番目が渡邊君)



国際会議 TOEO10 での授賞式  
(左端が二角君)



STAC11 で受賞した  
He さん。



国際会議 TOEO11 での授賞式  
(真ん中がB4 木村君 右側がM2 樋口君)



■ 学生の過去 5 年間における国際学会口頭発表

学生自身が国際学会で発表しています。ポスター発表も含めるともっと多くの学生が国際学会の場で積極的に研究発表を行い活躍しています。

2019 年 D3 渡邊君 STAC11(筑波)

D1 He さん Hands on Seminar (イギリス ロンドン)

2017 年 D1 小林君 ICAE2017 (韓国 濟州島)

M2 渡邊君 SID Display Week (アメリカ サンフランシスコ)

D1 渡邊君、M2 太田君、二角君 TOEO10 (東京)

D1 渡邊君、小林君 STAC10 (横浜)

2016 年 M2 岸田君 International Thin-Film Transistor Conf. (台湾 新竹)

M2 渡邊君 iMiD2016 (韓国 濟州)

2015 年 D2 Kim 君 STAC9 (つくば)

D2 Kim 君、D1 Tang 君、M2 菊池君 TOEO9 (つくば)

M2 Tang 君 Int. Meeting on Information Display (韓国 デグ)

D3 Xiao 君 MRS Spring Meeting (アメリカ サンフランシスコ)

M2 Tang 君 International Conference on HAXPES (台湾 新竹)

2014 年 M2 井上君、M2 Tang 君 E-MRS/MRS-J Bilateral Symposia (横浜)

M2 羽生君、M1 石川君 ITC2014 (オランダ)

D2 金君 STAC8 (横浜)

2013 年 M2 金君 ISIEM2013 (フランス レンヌ)

M1 羽生君 Int'l Thin-Film Transistor Conference (東京)

2012 年 M2 宮瀬君 米国材料学会 (アメリカ ボストン)

D1 Xiao 君 STAC7 (横浜)



2015 年 : TOEO-9 国際会議参加  
(Chris 君、Tang 君、菊池君、小林君、渡邊君、岸田君)



2016 年 :  
IMID  
2016 国際



2019 年 :  
TOEO201  
9 国際会議

■ 学生が執筆した筆頭著者の英語論文 (抜粋)

**5報 (2017年), 10報 (2016年), 10報 (2015年)**

2017年現在

- D1 渡邊君 *physica status solidi (a)*
- M2 渡邊君 *ECS J. Solid State Sci. Technol.*
- Kim 君 (卒業後) *NPG Asia Mater.*
- Cris 君 (卒業後) *Phys. Rev. B (Rapid Communications)*

2016年

- D2 Kim 君 *AIP Advances, Thin Solid Films, J. Ceram. Soc. Jpn.*
- D1 Tang 君 *Thin Solid Films*
- M2 井上君 *Chem. Mater.*
- D2 Chris 君 *Appl. Phys. Lett.*
- Xiao 君 (卒業後) *Appl. Phys. Lett.* 等

2015年

- D1 Tang 君 *J. Appl. Phys.*
- M2 井上君 *J. Appl. Phys.*
- D3 Xiao 君 *Phys. Chem. Chem. Phys.*
- M2 大類君 *J. Display Technology*
- D3 Xiao 君 *Appl. Phys. Lett.* 等

2014年

- M2 Tang 君 *J. Ceram. Soc. Jpn.*
- D2 金君 *J. Ceram. Soc. Jpn.*
- D3 Xiao 君 *J. Am. Chem. Soc.*
- M2 宮瀬君 *ECS JSS*
- M2 羽生君 *J. Displ. Technol.*

2013年

- M2 羽生君 *Appl. Phys. Lett.*
- D1 Xiao 君 *Thin Solid Films*
- M2 金君 *Thin Solid Films*
- D3 安部さん *Thin Solid Films*

2012年

- D2 安部さん *Phys. Rev. B*
- D3 李さん *J. Appl. Phys.*
- D3 李君 *Electrochemical and Solid-State Letters*
- M2 井手君 *J. Appl. Phys.*
- M2 井手君 *Thin Solid Films*
- D2 安部さん *Thin Solid Films*
- D3 李さん *Thin Solid Films*



# 最近のイベント



Chrisさん 歓迎会 (2018.5)



卒業生&秘書さん 追いコン



スノボレク



懇親会



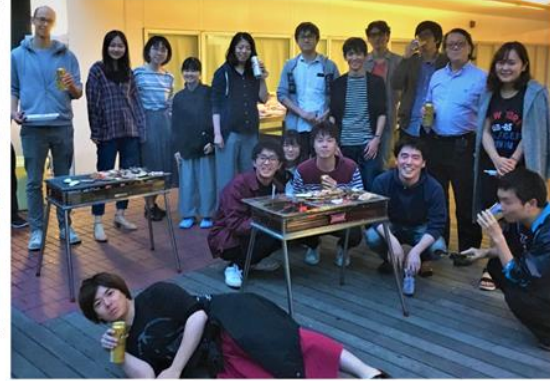
卒業式 (2015年度)



2019.7 研究所合同BBQ



2019.6 第1Qお疲れ会



2019.4 大学院入学式+歓迎会



## 留学生との交流

Wine party



Zhang san's party



Chris san's party

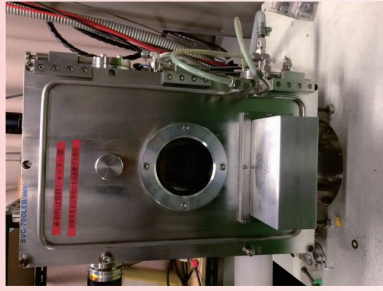


Xiao san's party

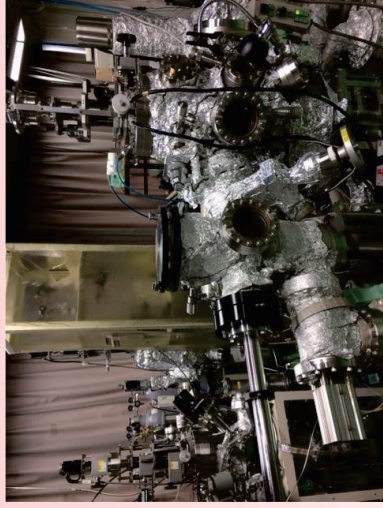




# 研究設備



電子線蒸着装置



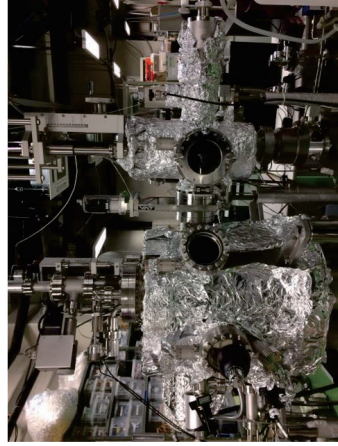
パルスレーザー堆積 (PLD) 装置



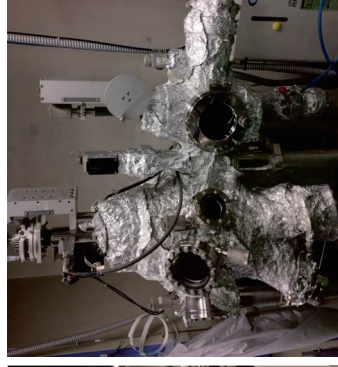
エキシマレーザー



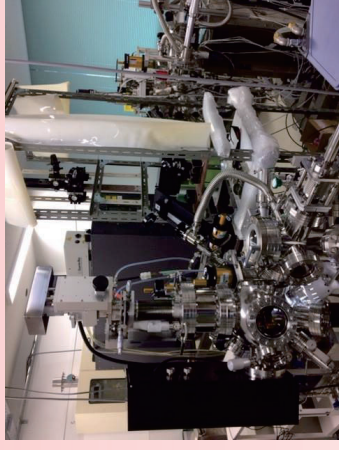
高出力 Nd:YAG レーザー



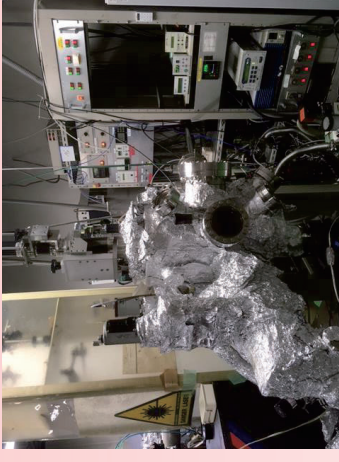
超高真空スパッタリング装置



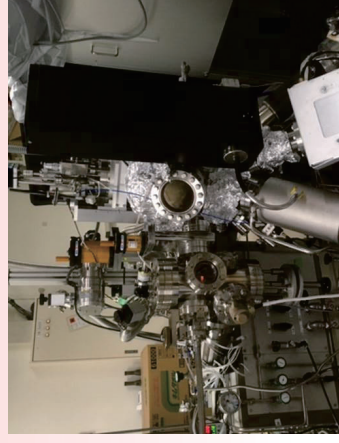
分子線エピタキシー (MBE) 装置



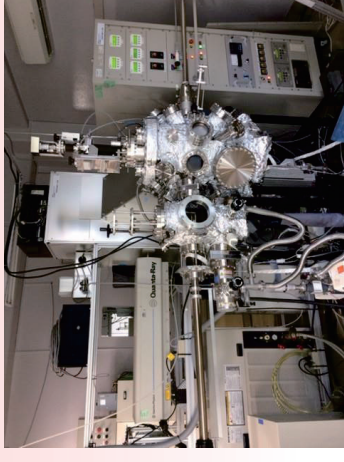
酸化物 PLD 成膜装置



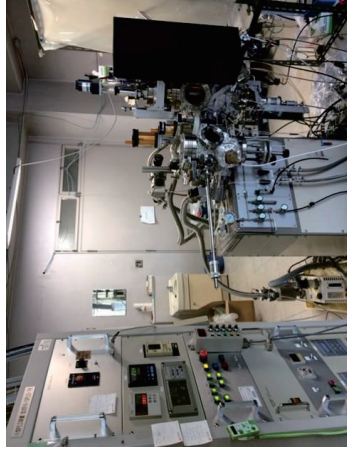
酸化物 PLD 成膜装置 2



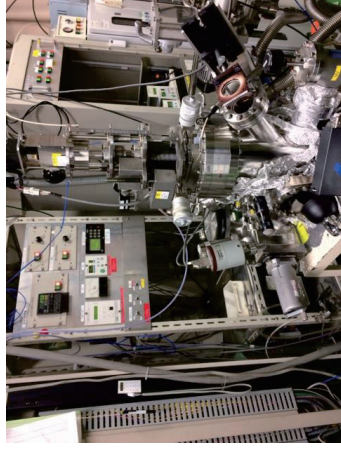
窒化物 PLD-MBE 成膜装置



ニクタイトド PLD 成膜装置



酸化物 PLD 成膜装置

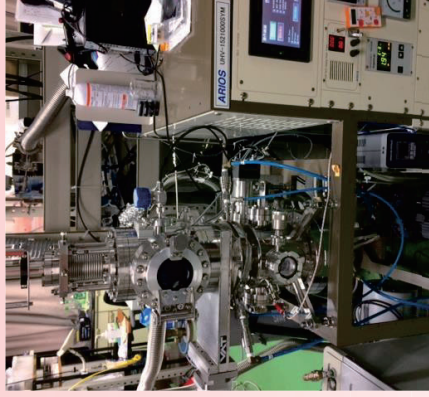


カルコゲン PLD 成膜装置





高速昇温炉



高真空加熱炉



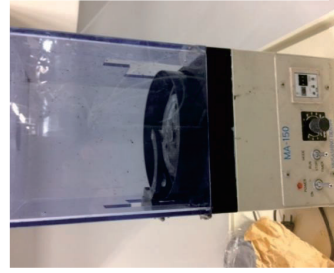
管状炉



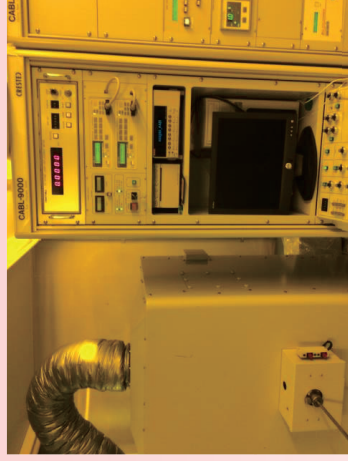
ボックス炉



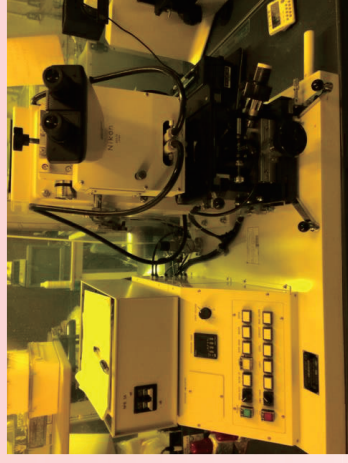
グローブボックス



化学機械研磨機



電子線リソグラフィ装置



マスクアライナー露光装置



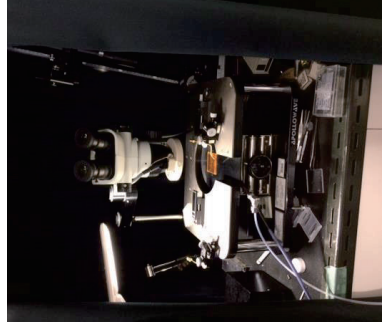
UV&オゾンクリーナー



ワイヤーボンダー



イオンエッチング装置

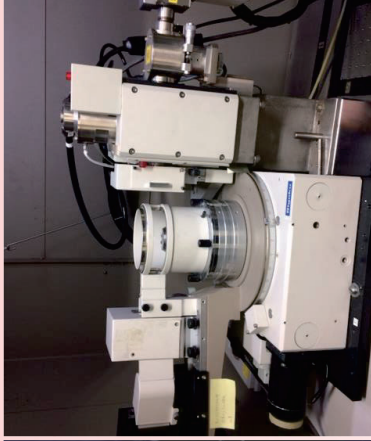


各種マニュアルプロパー





高分解能 X 線回折装置



粉末 X 線回折装置



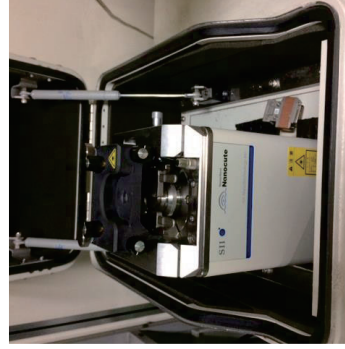
蛍光 X 線分析装置



紫外可視近赤外分光光度計



分光蛍光光度計



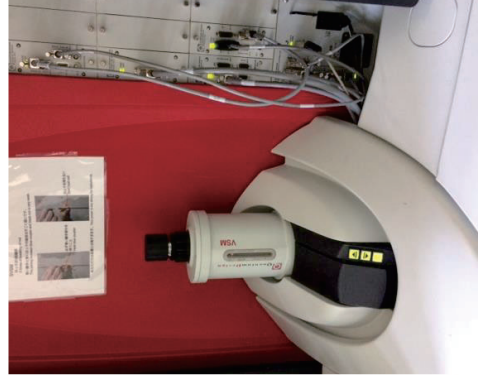
原子間力顕微鏡



AC ホール効果測定装置



DC ホール効果測定装置



磁気特性測定システム  
(SQUID-VSM)



物理特性測定装置 (PPMS)

# コンピュータ支援

恵まれた計算環境があることも特徴です。実験と併用することで効率的に最先端の研究をすることができます。

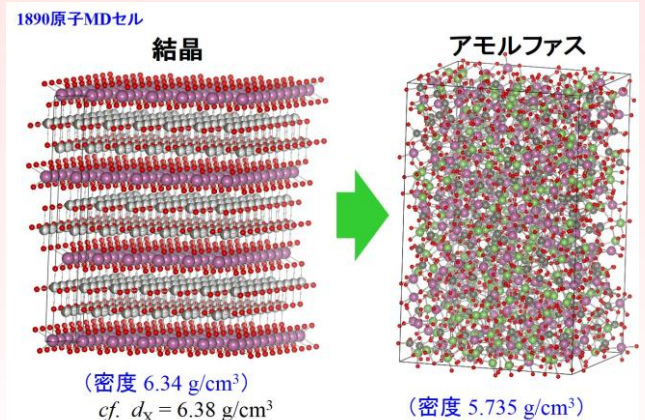
## 第一原理計算

世界的に最も多く用いられている VASP のライセンスおよび CASTEP も使用できます。東工大にはスーパーコンピュータ TSUBAME を有しておりこれを使用することが可能です。我々の用途は大規模計算ではなく、実験結果の解釈や予測、および知見に基づく材料設計の為に使用します。そのため多くの場合は研究室内に備えるワークステーションで気軽に計算を実行することが可能です。



## 分子動力学計算

分子動力学計算も特にアモルファス系の計算の際に必要となることが多くあります。先述の CASTEP や、SCIGRESS のライセンスも保有しいつでも実行可能な環境を整えてあります。第一原理計算とあわせることで非常に強力な、材料探索のツールとなります。

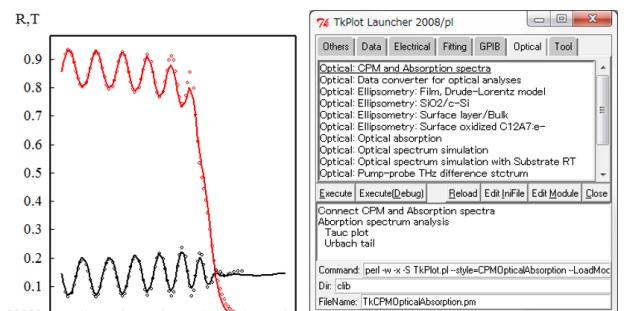


## デバイスシミュレーション

Silvaco 社の ATLAS を使用することが出来ます。これを使って半導体の欠陥を定義することで、デバイス特性と材料の欠陥準位を対応させることができます。またデバイス内でのポテンシャル分布、電荷密度を計算し可視化できるため、容易にデバイス動作を理解することができます。

## データ解析

右図はお手製の解析プログラムです。最小二乗法を駆使したあらゆるデータ解析に使用することができます。特に光学スペクトルの解析のような沢山のパラメータが存在する場合に有効で、膜厚・誘電関数を簡単に算出することができます。他にも光電子分光や X 線回折や数値処理に使うことが出来ます。必要があれば、自分仕様へ書き換えも教えてもらえるので、挑戦してみてください。





# 著書

## 透明金属が拓く 驚異の世界

不可能に挑む  
ナノテクノロジーの錬金術

細野秀雄・神谷利夫

science | サイエンス・アイ新書 | SoftBank Creative

話題の高温超伝導の発見につながった

電子ペーパー  
(凸版印刷)

透明電導性酸化物と  
半導体の  
すべてがわかる!

有機ELディスプレイ(サムスン)

## 薄膜トランジスタ

薄膜材料デバイス研究会 編

Thin-Film Transistor

コロナ社

# 放射光が明らかにしたIGZO半導体の構造とデバイス性能の劣化原因

—不純物水素や過剰酸素がつくったバンドギャップ内欠陥—



## 神谷利夫

東京工業大学  
応用セラミックス研究所

### 研究の背景

アモルファス酸化物半導体(AOS)は、透明・フレキシブル・高電子移動度の薄膜トランジスタを室温で作製できることから、次世代の薄膜トランジスタ用材料として注目されています。AOSの材料として代表的なのが、「a-IGZO」という、In(インジウム)、Ga(ガリウム)、Zn(亜鉛)、酸素(O)から構成される半導体です。われわれは、2004年にa-IGZOを材料にした高性能の薄膜トランジスタを動かすことに成功し、2012年から、タブレット、スマートフォン、パソコンモニター、大型有機ELテレビなどに実用化されています。

しかし、a-IGZOの薄膜トランジスタには、印加電圧や光照射によって、その動作特性が変化する「劣化」の問題があります。この原因を解明し、解決法を見いだすには、a-IGZO半導体の原子配列や電子構造、欠陥構造などを明らかにしなければなりません。

### 研究の概要

AOSは非晶質であるため実験上の難しさがあります。そこで、古典分子動力学と第一原理計算によりa-IGZOの構造モデルを組み立て(図1)、その妥当性をSPiNG-8のビームラインBL01B1の薄膜蛍光EXAFS測定によって確認しました。

その結果、a-IGZOを構成する原子の最近接の配位距離は、結晶中とほとんど同じで、配位数は結晶より少ないということが明らかになりました(図2)。ただし、最近接の配位数は、EXAFS測定では過小評価されてしまうという課題も出てきました。

また、酸化物半導体では、結晶でも非晶質でも、電子の有効質量に大きな差がないことを理論的に証明しました。

一方、a-IGZOにどんな欠陥があるかを、SPiNG-8のBL47XUおよびBL15XUの硬X線光電子分光(HAXPES)によって測定したところ、 $10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上という多くの欠陥が価電子帯の直上に検出されました。

## Point

- 次世代の薄膜トランジスタ材料として期待されるIGZO半導体の構造を放射光で解析
- IGZO半導体の劣化原因を解明
- 劣化しないIGZOの薄膜トランジスタをつくるための提案

た。シリコンなどの通常の半導体では、「バンドギャップ中に $10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上の欠陥があるとデバイスが動かない」とされているため、これは従来の半導体の常識を覆す結果です。AOSでは、バンドギャップが3eV程度と非常に大きいため、価電子帯側に非常に大きなギャップに非常に深い欠陥があっても、デバイスに深い影響がないのではないかと考えられます。

また、a-IGZOの欠陥の起源は、空孔、弱結合酸素、不純物酸素が寄与していることも、HAXPESとそ

の他の測定を組み合わせたことで明らかになってきました。

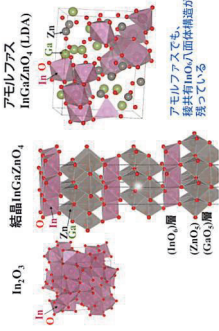


図1 酸化インジウム系の構造モデル  
酸化インジウム系は八面体が共有してIn間距離が近いいため電子移動度が比較的高くなるのが特徴であり、非晶質でもこの構造が残っている。

### 今後の展開

見かけ上きれいに動くa-IGZOの薄膜トランジスタをつくらうと思えば、悪いa-IGZO膜をつくっても熱処理をすればいいのですが、そうすると欠陥が残って、その後のデバイスの安定性などに重要な問題が生じてしまいます。最初に熱処理をしなくてもきちんと動く薄膜トランジスタをつくるのが高安定TFIをつくるのに必要です。この条件を見つげるために、今後も総合的に検討していく予定です。

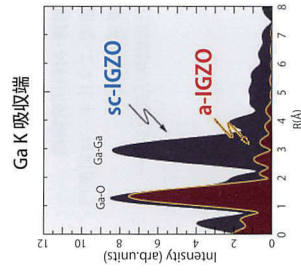
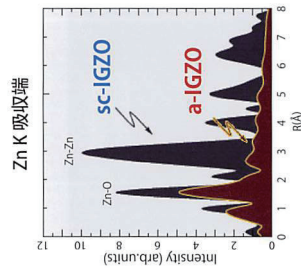
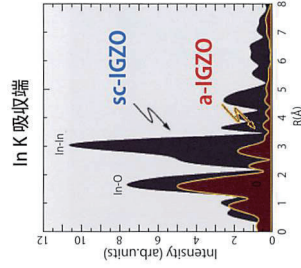


図2 EXAFS測定で得られた動径分布  
非晶質のIGZO(a-IGZO：赤いグラフ)と結晶のIGZO(sc-IGZO：青いグラフ)を比べると、最近接の原子間距離は同じで、配位数は非晶質のほうが少ないことがわかったが、第二近接の配位数は非晶質に少なく測定された。

連名者(共著者)：井手啓介・細野秀雄(東工大)、上田茂典・大橋直樹(物質・材料研究機構)

もっと知りたい人へ  
 <http://www.tites.titech.ac.jp/>





は光源となる白色バックライトと、透過率を制御するために液晶部からなる。ここで、液晶部に印加する電圧を変え、液晶層を透過する率を変え、その前方に赤色・緑色・青色 (RGB) の CF を置くことで、R・G・Bの光量を変えて多色表示を行っている。TFT は液晶の各素子に印加する電圧を一定時間記憶するのために使われている。ここで消費電力が一番大きいのはバックライトであり、たとえば5型スマートフォン用液晶では250~1000mW程度の電力を使っている。後述するが、TFT部の消費電力は160mW程度である。しかしながら、偏光板によって光の透過率は50%程度に落ち、さらにCFによりさらに1/3程度に落ちる。その他、TFT、電圧状態を記憶するための蓄積層電容量、画素分離部(ブラックマトリックス)により(開口率)、LCDの光の透過率は10%より小さくなる。しかも、バックライトは常時点灯状態のため、画面が黒い場合でもバックライト分の消費電力が発生する。要するに、LCDでは投入電力のうちせいぜい数%しか表示光として使われていない。電力効率を改善するには、バックライトの省電力化・有効利用、開口率の改善、TFTの低消費電力化などがキーとなる。特に、CFを使わずに多色表示が可能になれば、電力効率は3倍程度になる。

バックライトに関しては、以前は冷陰極蛍光管が使われていたが、薄型化と省電力化から、現在では白色LEDと導光板を組み合わせたものが増えている(図3(a))。さらに最近では、スペクトル幅の広い白色LEDに換えて、R・G・Bで鋭い発光がでる量子ドットを利用したQLEDが使われている(図3(b))。たとえばAmazonのKindle Fire HDX7など。この場合は、青色LEDを光源とし、赤色、緑色を発光する量子ドットを蛍光体-光変換材料として白色光

源としている。光源が純色に近いRGBを出すために色域・色再現性が高くなるが同時に、図3(a)に見られるような、RGBのいずれにも使われないスペクトルが少なくなるため、省電力化にも寄与する。

#### 4 OLEDの動作機構と課題

OLEDでは、R・G・Bを発光する素子をTFTに直列接続し、流す電流値をTFTで制御する(図4)。LCDと異なり、発光している素子の消費電力を消費するため、原理的には電力効率が高い。特に、黒色表示では消費電力をゼロにできる。また、RGBの発光スペクトルは図3(b)のように鋭いため、QLEDと同様、色域・色再現性が高い。ただし現状のOLEDでは、発光層からの光取り出し効率が低いこと、反射光を切るために円偏光板が必要なこと、TFTにも電流が流れるために有機EL部と同程度の電力が消費されること、などの理由によって、LCDと比較しても省電力となっていない製品も多い。

理想的な構造は図4(a)の三色塗り分け方式であるが、特に55型TVのような大面積で有機ELの各素子を精密に塗り分けることが難しいことが問題である。サムスンのスマートフォンのGalaxyやアップレットのGalaxyなどの小型OLEDではこの方法が大量生産に使われている。一方、ソニーの25型以下のOLEDやサムスンの55型OLED TVにもこの方法が使われているが、生産性の問題もあり高価なものとなっている。

このため、簡単にOLED層を作る方法として、図4(b)のように、微細パターンニングなしで白色OLED層を作製し、CFを通してRGBを出す「白色発光+CF方式」があり、LG社の55型OLED TVで使われている。ただしこの場合は、CFによって白色OLEDの発光のうち1/3程度しか使えないため、三

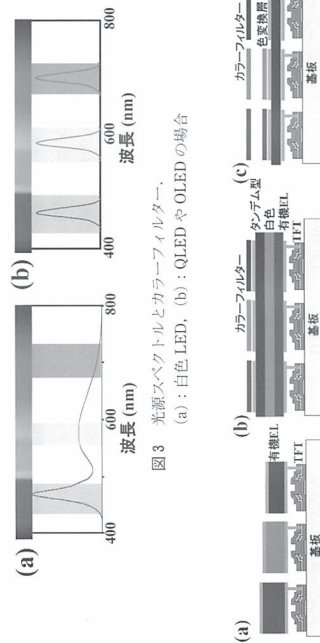


図3 光源スペクトルとカラーフィルター。(a): 白色LED, (b): QLEDやOLEDの場合

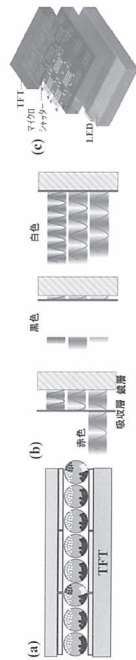


図5 他のディスプレイの構造

(a): 反転型黒マトリクスTFT<sup>7)</sup>, (b): Mirasol MEMSディスプレイ<sup>8)</sup>, (c): Pixtronix MEMSディスプレイ<sup>9)</sup>

G・BのLEDバックライトをパルス駆動し、短い時間間にR・G・Bの発光を切り替える、マイクログリッターの閉閉を同期して多色表示するものである。CFを使わないため、LEDの発光を効率よく利用できる。ただし、R・G・Bを時間によって切り替えるため、通常のLCDに比べ、3倍以上速く動作するTFTが必要である。各色の輝度はマイクログリッターを開ける時間によって調節するため、TFTにはさらに高速な動作が必要になる。このため、a-Si TFTではなくIGZO TFTで駆動している。また、マイクログリッターの駆動に20Vと高い電圧が必要のため、多結晶Si-TFTが使えないことも、IGZO TFTが使われている理由である。

#### 5 他のFPD

FPDで一番電力を消費するのは発光部であり、そのため、自発光のない反射型ディスプレイが究極の省電力ディスプレイになる。代表的な例が、Amazonの電子ブック Kindle paperwhiteなどで使われている電子ペーパーである(図5(a))。E-Ink社が供給している電気泳動型電子インクでは、マイクログリッター内に白と黒の粒子を閉じ込め、電圧により白・黒を反転させる<sup>7)</sup>。マイクログリッターにある程度のメモリー効果があること、反射型であるため、電力を消費するのはほぼ画像更新時のみである。これを多色化するにはCFを使えばよいが、そうすると、環光の1/3しか利用できず、輝度が稼げないことが反射型フルカラー電子ペーパーの問題である。

これに対して、QualcommはMirasolと呼ばれるMEMSディスプレイ(図5(b))を開発している<sup>8)</sup>。これは、環光を鏡層で反射させることで干渉波を作り、前面に光吸収層を置き、光吸収層の位置で干渉波の強度がゼロでなければその波長の光は吸収され、光吸収層位置で強度がゼロの色のみが見える。この構造ではCFが必要ないため、環光の利用効率が非常に高い。現時点でQualcomm社のスマートウォッチ Toqに実用化されているものでは、RGB画素を別々に作っているためRGBのそれぞれに環光の1/3しか利用できていない。次世代のSingle Mirror (SMI)型では、図5(b)のように、RGBに分割せずに一画素すべての色を表示するため、主にTFTが電力を消費する。Mirasolは反射型であるため、環光が電力を消費する。そのため、図1で説明した、AOS TFTの低いオプト電力を利用すると、究極の低消費電力フルカラーディスプレイが実現できる。実際にSID2014においてSMI MirasolとIGZO TFTの組み合わせが報告されている<sup>8)</sup>。

反射型ではないが、CFを使わずにバックライト光の利用効率を上げる方法に図5(c)のQualcommのPixtronix MEMSディスプレイがある。これはフルカラーのTFT部を消費電力が160mWであるものが、

#### 6 AOS TFTが省電力ディスプレイに使われている理由

前章までで、すでにいくつかのAOS TFTの省電力ディスプレイへの応用を述べてきた。本章では、他のAOS TFTの省電力用途について紹介する。

図2で説明したように、LCDの消費電力の大部分はバックライトによる。一方、液晶に印加されている電圧は蓄積層電容量に記憶され、TFTをオフ状態にすることでこの電圧を一定時間維持しておく。静電容量に貯められた電荷はTFTのオフ電流によってリークするため、静電容量値とTFTのオフ電流で決まる保持時間内に画像をリフレッシュ処理する必要はない。リフレッシュ時にはリークした電荷を戻さなければならないため、これがTFT部の消費電力を決める。通常のa-Si TFT LCDでは、a-Si TFTのオフ電流が60Hz、つまり16msほど印加電圧を維持できるように静電容量値が決められている。IGZO TFTではオフ電流がSi-TFTよりも数桁以上低くなるため、リフレッシュレートも1/60Hzまで落とすことも問題ないことが実証されている<sup>10)</sup>。また、量産品では、シヤープのIGZO TFTを使ったスマートフォンの、ターゲットにおいて、静止画表示時にリフレッシュレートを1Hzまで落とす「液晶アイドリングストップ」技術が実用化されており、5型ディスプレイで60Hz動作時のTFT部の消費電力が160mWであるものが、

図4 OLEDの構造。

(a): 三色塗り分け方式, (b): 白色発光+CF方式, (c): 色変換方式



1Hz動作時には30 mW程度となる(CEATEC2013で展示)。逆に、リフレッシュレートを落とす必要がなければ、蓄積静電容量が必要なくなり、開口率を向上できる<sup>11)</sup>。

有機ELの電力損失では、TFTを通過する電流によるジュール熱が大きい。TFTの動作電圧を下げることでこれが改善でき、この点でIGZO TFTの利点が活かされている。しかしながら、さらに電力損失を下げるためには、より移動度の高いAOS TFTのほうが望ましい。移動度が高い多結晶Siを使えばよいが、粒界の電気特性のパラつきにより、TFTごとの電気特性のパラつきを補償するため、一面素ごとく、生産効率の低下、コスト増大の原因ともなる。AOS TFTを使ったOLEDではこのような補償回路を使わない試作品の動作実証も多数報告されてきたが、量産品(LGの55型OLED)では、動作特性のパラつきと経時変化のために、やはり数個のTFTを使った補償回路が必要となっている。AOS TFTの均一性、安定性を改善することにより、開口率が改善されることが期待される。

ディスプレイ以外の省電力用途について紹介する。もっとも簡単な構造のメモリーは、トランジスタ1つと静電容量1つを組み合わせたDRAMであるが、トランジスタのリーク電流のため、リフレッシュ動作が必要になり、消費電力が大きい。トランジスタを4つ利用したSRAMではリフレッシュ動作が必要ないが、トランジスタのリーク電流による貫通電流が消費電力の原因となる。いずれも、電力供給を経つと記憶状態が消える揮発メモリーである。一方で、DRAMの構造のままでトランジスタのリーク電流をゼロにできれば、不揮発メモリーとして使える。実際にIGZO TFTを使った不揮発DRAMの動作が報告されている<sup>12)</sup>。また、IGZO TFTの構造を調節することにより、1.5Vの低電圧でも動作する。これにより、RF IDタグが試作されている<sup>13)</sup>。

## まとめ

以上みてきたように、グリーン技術の視点から酸化物半導体の特徴としては、(i)室温で作製しても動作する半導体デバイスを作れるために生産時の熱効率が良い、という点が挙げられる。これはZnOなど、多結晶酸化物半導体でも同様であるが、本稿では、試作・実用例の多いアモルファス酸化物半導体を中心に紹介した。また、室温で形成できるとはいっても、上述の通り、均一性、安定性を確保するためには300~400°Cでの熱処理が必要であり、この意味ではa-Si TFTと比較した熱コストの利点は少ない。真空装置

を使わない溶液プロセスや大気圧CVDによるTFT、ディスプレイ作製も報告されており、インフラコスト・真空コストの点でも利点があるといえるが、これらの非真空プロセスが実用に耐えるかどうかは未知数である。資源面では、希少なIn, Gaを使うことが問題であり、これらを使わないZn-Sn-Oなどの材料系の報告もある。しかしながら、現状で実用化されたものはIn-Ga-Zn-Oのみであり、実用化に向けて検討されているものも、In-Sn-Zn-O, In-Al-Zn-Oなど、高移動度を確保するためにInが必須となっている。この点は将来の新材料開発に期待したい。

もっとも省電力に寄与しているのは、AOS TFTの移動度が高くS値が低いため動作電圧が低いことであり、特に電流駆動で発光するOLEDでは重要である。高速動作が可能であることから、フィールドシークンシャル式のディスプレイへの応用も可能であることも紹介した。オフ電流が低いことにより、特に発光源による消費電力のない反射型ディスプレイではその特徴が活きる。

その他、オフ電流が低いことを活かした不揮発メモリーや動作電圧が低いことを利用したRF IDなどへも応用が可能であることを紹介した。

## 文 献

- 1) T. Kamiya, K. Nomura, H. Hosono, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **11**, 044305-1-23 (2010).
- 2) H. Hosono, N. Kikuchi, N. Ueda, H. Kawazoe, *J. Non-Cryst. Solids*, **198-200**, 165-169 (1996).
- 3) K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono, *Nature*, **432**, 488-492 (2004).
- 4) T. Kamiya, H. Hosono, Chap. 13 Amorphous In-Ga-Zn-O thin film transistors: fabrication and properties, *Handbook of Zinc Oxide and Related Materials* (Taylor & Francis, 2012/9/10) p. 485.
- 5) H. Hosono, 5.3.4. Oxide TFTs, *Handbook of Visual Display Technology* (ISBN 978-3-540-79566-7) (2012) p. 730.
- 6) T. Tanabe, K. Kusumoki, Y. Sekine, K. Furutani, T. Murakawa, T. Nishi, Y. Hirakata, H. Godo, J. Koyama, S. Yamazaki, K. Okazaki, T. Handa, M. Sakakura, *Digest of AM-FPD*, 109-112 (2011).
- 7) M. Ito, M. Kon, C. Miyazaki, N. Ikeda, M. Ishizaki, Y. Ugajin, N. Sekine, *IEICE Trans.*

*Electron*, **E90-C**, 2105-2111 (2007). 図は論文中 Fig. 3 を改変。  
 8) J. Hong, E. Chan, T. Chang, R. Fung, C. Kim, J. Ma, Y. Pan, B. Wen, I. Remes, C. Lee, *SID Symposium DIGEST*, 793-796 (2014). 図は論文中の Fig. 3 を改変。

9) Qualcomm パネルレットの図を改変。

10) H. Harada, A. Umezaki, S. Amano, T. Nishi, K. Moriya, K. Wakimoto, J. Koyama, S. Yamazaki, *Digest of AM-FPD*, 199-202 (2010).

11) R. Arasawa, H. Shishido, T. Nishi, K. Moriya, H. Godo, J. Koyama, S. Yamazaki, Y. Oikawa, T. Handa, M. Sakakura, *Digest of AM-FPD*, 203-206 (2010).

12) T. Nishijima, S. Yoneda, T. Ohmaru, M. Endo, H. Denbo, M. Fujita, H. Kobayashi, K. Onshima, Y. Shionoiri, K. Kato, Y. Maehashi, J. Koyama, S. Yamazaki, "SID Symposium DIGEST" (2012) p. 583-586.

13) H. Ozaki, T. Kawamura, H. Wakana, T. Yamazoe, H. Uchiyama, *IEICE Electron. Exp.*, **8**, 255-231 (2011).

筆者紹介  
 神谷利夫 東京工業大学応用セラミックス研究所/元素戦略研究センター教授  
 連絡先 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259

豊見日出也 東京工業大学元素戦略研究センター特任教授  
 連絡先 神谷氏に同じ。

細野秀雄 東京工業大学フロンティア研究機構/応用セラミックス研究所/元素戦略研究センター教授  
 連絡先 神谷氏に同じ。

(2014. 7. 23 受付)  
 (2014. 7. 29 受理)







ば、「透明で電気を流すこと」を「不思議だ」と思うようになっただけではないか。透明で電気を流す物質として現在広く使われているのは、酸化インジウム ( $\text{In}_2\text{O}_3$ )、酸化スズ ( $\text{SnO}_2$ )、酸化亜鉛 ( $\text{ZnO}$ ) などの「透明導電性酸化物」がほとんどである。特に酸化インジウムは、携帯電話、液晶テレビなどで必ず使われている。

ところが、酸化インジウムが良い透明導電性酸化物であることが見つかったのは意外と最近のことなのである。金属を熱すると融解して液体になり、少しずつ蒸発するが、この蒸気を真空装置中でガラス板などに集めて、金属の非常に薄い膜をつくることができる。1954年にドイツのルパレヒト (Rupperecht) は、金属のインジウムと同じことを行い、それを空気中で加熱、酸化したところ、透明なものによく電気を流すことを発見した。その後1968年に、フィリップス (Philips) が酸化インジウムに酸化すずを混ぜると電気伝導性が500倍も高くなることを発見した。これが「すずドーパド酸化インジウム」であり、ITOと呼ばれる。一番使われている透明導電性酸化物である。

ただし、「透明で電気をよく流す物質」が当時からそれほど注目されたわけではなく、本格的にその重要性が認識されるようになったのは、ノートパソコンに液晶ディスプレイが使われたり、薄型太陽電池の開発が進んだりした1980年代からである。液晶テレビの出産額がプラズマ管テレビ (CRT) を上回ったのが2003年のことであるから、ルパレヒトの発見から半世紀もかかったことになる。

### 5 矛盾している？：半導体からのヒント

前置きが長くなったが、ここからが本来の課題である。「なぜ透明導電性酸化物はよく電気を流すのか」「透明して電気を流す物質を流さないと説明してきたのに、矛盾している」と怒られている読者は、研究者にならなければならず成功するだろう。ちょっと知識があると、「透明」と「高い電気伝導性」は矛盾しているように思ってしまうが、これを「不可能とは思わず」「困難とは思っても挑戦していく」気持ちのある人が、大発見をするのである。専門の研究者でない人が違う分野で大発見をすることがあるが、中途半端な知識は、実は大発見の邪魔をすることも多い。この場合も、「透明」と「高い電気伝導性」は、ちょっと説明を聞いた限りでは矛盾するようには思えないが、決して矛盾しているものではないのである。

これを、シリコンの例で説明したい。シリコンは周期表ではMgとAlの次に来るが、マグネシウム、アルミニウムが金属であるのにシリコンは半導体である。これは、シリコンが共有結合でできている物質であり、電子配置が図4のように、酸化物と似ているためである。つまり、シリコンのことを「半導体」と呼びはするものの、電子配置は酸化物と同じ「電気絶縁体」なのである。ただし、電気伝導

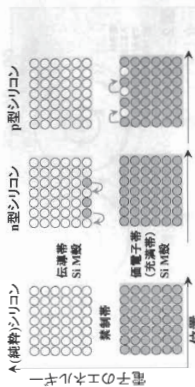


図4 シリコンの電子配置。純粋なシリコン (左側) は酸化物と似ているが、禁制帯のエネルギーが小さい。電子を余計に入れたり (中央)、少し減らしたりする (右側) ことで、n型半導体やp型半導体を作れる。

性は大きく異なる。電気を流さない酸化物の代表は窓ガラスなどに使われている  $\text{SiO}_2$  であり、シリコンの酸化物である。ところが、シリコンの電気伝導性は  $\text{SiO}_2$  よりも12桁も高い。ただしそれでも金属と比べると非常に低く、電気伝導性が悪い黒鉛と比べても10桁も小さい。このため、純粋なシリコンの電気伝導性を持つという意味で「半導体」と呼ばれるわけだが、基本的には図3、図4のように、シリコンの電子配置は酸化物に近い。

ところが、シリコンがコンピュータの頭脳であるCPUやメモリーなどの電子素子の中心材料として使われていることからわかるように、「半導体」というのは非常に多くの機能を持つ材料であり、酸化物のような「電気絶縁体」とは大きく違うように見える。電子配置が似ているのに、この違いはなぜ起こるのであろうか。一つの理由は、図3で「禁制帯」と書いた、「電子が取れないエネルギー領域」が、酸化物と比べて非常に小さいことである。このため、シリコンに電圧をかけると、電気伝導性を10桁以上変えることができる。これが「トランジスタ」と呼ばれる電子スイッチ素子で、電気信号によって電気を流したり電気を蓄えたりを制御することができる。もう一つの重要な理由は、100万分の1程度の微量の不純物を混ぜることで、電気伝導性を何桁も変えることができることにある。この不純物としてリン(P)やホウ素(B)などが使われており、それぞれ、電子が電気を流す「n型半導体 (図4右)」と電子の空いた穴である正孔が流す「p型半導体 (図4左)」を作り分けられるので、いろいろな電子素子を作れるのである。

このことは、上述の「常識」を考え直さる重要なヒントを与えてくれる。P原子では、最外電子殻にある電子の数が5個であり、Si原子より1個多いため、P原子を不純物として加えるとシリコンに電子を余計に入れることができ、B原子の最外電子殻の電子の数は3個であり、不純物として加えると、シリコンから電子を抜くことができる。図4の中央、右側は伝導帯中の空殻を介して自由に移動できることになる。電子を抜いても、周りの電子が新たにで

### 7 おわりに

専門家にとっては当たり前の「常識」を疑い、その根拠を物理・化学の知識と併せて理解しなおすことで、実は今まで常識と思っていたことが単なる思い込みであったということがよくある。そして、大発見はそのような「常識」を覆すことから始まる。どうやって「透明導電性酸化物」をつくるかという語は、その典型的な例ではなからうか。

前章の最後に説明した、「 $\text{In}^+$ 、 $\text{Sn}^+$ 、 $\text{Zn}^+$ 」などが透明導電性酸化物をつくりやすいうという「常識」も最近では、 $\text{TlO}$  や  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  といった新しい透明導電性酸化物が発見されており、「真理」ではなく「作りやすい透明導電性酸化物を探す指針」に過ぎないことが実証されている。手前味噌で恐縮であるが、「酸化物半導体はシリコンよりも悪い電子素子しか作れない」という「常識」をうちやぶり、今では、次世代の有機ELテレビや電子ペーパーに酸化物半導体トランジスタを使う研究が本気で進められている (図1)。本稿が、読者の常識を見る目を変え、近い将来に大発見につながってくれれば幸甚である。

### 参考文献・注釈

- 1) 透明で曲げられる高性能のトランジスタ開発。朝日新聞、2004年11月5日。
- 2) 凸版印刷。曲がる電子ペーパー。日経産業新聞、2006年3月31日。
- 3) 細野秀雄、神谷清夫。透明金属が輝く黒黒の黒黒。サイエンス・アイ新書、ソフトバンククリエティブ、2006。
- 4) 透明導電膜の技術。改訂2版。黎明酸化物光・電子材料第166委員会編。オーム社、2007。
- 5) n型半導体とp型半導体をつくつと、電流が片方向へしか流れない「ダイオード」という電子素子を作ることができる。
- 6) 図4左側は簡便のために伝導帯に電子がまったくないように描いてあるが、純粋なシリコンでも、1/10<sup>17</sup>とほんのわずかな割合ではあるが、電子が伝導帯から伝導帯へ飛び上がっている。同じことが、単色発光ダイオード (LED) の材料であるGaNでも問題であった。p型のGaNを作るのが難しくかつたのだが、作り方と不純物を入れた後の処理工夫することによりp型GaNの作製と単色LEDの開発に成功した。



かみや・としお  
 著者紹介「経歴」1991年東京工業大学大学院理工学研究科無機材料工学専攻中退、同工学部助手。96年総合理工学研究科、応用化学工務研究助手。講師を経て、2003年助教授 (07年より准教授に改称)。途中、00年~02年に発光材料として英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所マイクロエレクトロニクス研究室に滞在。[専門] 無機材料科学。[連絡先] 226-8503 横浜市磯区長津田町4259、メールボックスR0-4 東京工業大学応用セラミクス研究所 (勤務先)。



# 孤独な(?)材料屋の 英国ケンブリッジ留学記

——キャベンディッシュ研究所  
マイクロエレクトロニクス研究センター——

神谷利夫

## はじめに

筆者は、2000年4月から2年近く、英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所マイクロエレクトロニクス研究センター(MRC)に滞在する機会に恵まれた。最近の日本の大学では、特に助手の人数が少なくなっていることもあり、留学する機会が得られない若い研究者も多くなっているなかで、筆者が長い期間留学できたことには特別な事情があった。2000年3月に、当時のポストでは残りの博士課程が満了し、筆者は大卒のポジションに残っているという状況になっていたが、幸いにも周りの先生方のご厚意で、留学できることになったのである。もしも当時、次のポストがあれば、留学する機会はかなり速のいていただろうから、何が幸いするかわからない。

## 材料屋がデバイス研究を選んだわけ

筆者は、無機強誘電性材料の研究から研究生活を始めた。

根っからの材料屋である。1996年に清水研究室に移り、シリコン薄膜の研究を始めた。その応用として、太陽電池や撮像素子などのデバイスも研究していたが、材料屋主体のグループでデバイスの研究をすることに限界を感じていた。1999年10月には、科学技術振興財団の戦略的基礎研究推進事業(CREST)のプロジェクト研究として、東京工業大学のグループがナノ構造をもつシリコン材料を供給し、MRCがデバイス作製と評価を行う、相補的な国際共同研究を始めた。

ところが、前述のような状況で、突然留学できることになった。MRC以外にも候補はあったのだが、ただ単に“新しいこと”を始めたいという希望もあり、また、東工大グループ独自の方法で作った材料を自分自身でデバイスまで作って評価できる機会に恵まれたという理由で、MRCに留学することに決めた。

## デバイス研究室で唯一の材料屋

MRCでは、超微細加工を基盤技術として、メゾスコピック領域の物理現象やデバイスの研究を行っている。そのため、留学したときには、材料の専門家は筆者一人だった。伝統的な半導体デバイスについては、何と知っていても、研究テーマである単電子デバイスについては、何も知らない上、周りの人と専門が違いうので、最初は英語と専門用語の両方の問題で苦労した。一方で、CRESTプロジェクトが材料面の研究に焦点を絞っていたため、材料屋として貢献する機会も多くなった。

MRCでの仕事を決めるときも、実験かコミュニケーションかという選択肢があったが、コミュニケーションの仕事はどこでもできると思い、実験を選んだ。デバイス作製や測定については、CRESTプロジェクトに働いていた学生のY-T. Tan君が教えてくれ、比較的短い間にマスターすることができた。Tan君は2001年10月にPh.D.を取り卒業したが、材料面の評価、解釈な



**EKO**  
EKO INSTRUMENTS  
MANUFACTURING LTD.

極めて再現性の高い結果が得られる、  
コンスタントシステム。

**特徴**

- ・ 高圧・高電圧コントロールによる高い再現性
- ・ 人に触れない自動化システム
- ・ サンプルに接触する部品点数が少なく洗浄が容易
- ・ 製品のオートチューブ処理可能
- ・ 装置は狭小でメンテナンスが容易
- ・ 操作が簡単で安全、小型
- ・ サンプルは液体だけでなくペースト状、細胞の凍結が可能

**動作の原理**

- 1 サンプルをシリコン管に充填します。
- 2 ピストンにより高圧にされたシリコン管内のサンプルはオリフィス口(小さな穴)を通過し、高速度で押し出されます。
- 3 さらにサンプルは、高速度でサブマイクログラムの管に注ぎつけられます。
- 4 破砕されたサンプルは最終的に広がり層を形成する上、同時に、凍結され、凍結チャンバーに集められます。
- 5 このマイクロ粒子を凍り速で凍結破砕が可能になります。

**アプリケーション**

- ・ 細胞破砕
- ・ タンパク質およびDNA
- ・ 遺伝子破砕
- ・ 単細胞分離

**高圧式細胞破砕装置**

高圧  
高電圧  
高速度

**EKO 英弘精機株式会社**

〒201-8581 東京都千代田区千代田 1-10-10  
TEL: 03-5561-1111 FAX: 03-5561-1112  
E-MAIL: info@eko.co.jp

http://www.eko.co.jp



奥がDr. Y-T. Tan, 右がDr. P. Lewis, 左が筆者。  
ケンブリッジ名物のパント、ケム川にて

で、筆者が助けられたこともあったし、自分自身、英国でPh.D.システムに関与することができたことは、二重にうれしい経験だった。

異質な分野の研究室に入るといえるのは大変なこともあるが、それ以上に得るものも多いと思う、これからも機会があれば、分野の異なる研究者と一緒に仕事をしたいと考えている。

## もう1年

幸い、1年間の留学期間で、まとまった研究結果が得られた。が、やり残したことも多く、また、幸か不幸か、まだ次のポストも決まっていなかったため、再度わがままを聞いていただき、もう1年滞在することになった。

日本で研究室を移ったときもそうだったが、1年目と2年目では、自分の置かれる立場が大きく変わる。研究環境に慣れるということもあるが、新しい学生も入ってくるし、上の先生にも信用されてきて、装置の扱いや学生の世話もまかされてくる。日本ではあたりまえのことだが、同じことでも、外国でするとは、ずいぶん違うと感じた。英語の訓練という意味でも留学期間は長いほうがいいのだろうか、それだけではなく、経験できることの種類と質がずいぶん変わるのではないだろうか。

## Ph.D. 学生事情

米国でも同様と聞くが、MRCでも、母国のPh.D.学生がほとんどいない。英国で一番学生に人気がある進路は、オックスブリッジ(オックスフォード大学、ケンブリッジ大学)を出て、

留学先：英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所(ケンブリッジ市)

研究所名：The Microelectronics Research Centre (MRC) Cavendish Laboratory, University of Cambridge

滞在期間：2000年4月～2002年2月

研究生活について一言：  
留学は、異文化を学ぶとともに、自分の研究を見つめ直す上よい機会です。新しいテーマを始めるきっかけにもなります。積極的に挑戦してみてください。

MRCのURL：<http://www.phy.cam.ac.uk/>

筆者の連絡先：東京工業大学応用セラミックス研究所  
神谷利夫 tkamiya@riem.titech.ac.jp





## 応用物理学会講演奨励賞 & 井上研究奨励賞を受賞して

D2 金正煥

博士課程での研究業績が評価され、応用物理学会講演奨励賞および井上研究奨励賞を受賞しました。応用物理学会講演奨励賞は、応用物理学の発展に貢献しうる優秀な一般講演論文として、井上研究奨励賞は、理学・医学・工学・農学全ての分野で優れた博士論文を提出した研究者（合計40名のみ）に授与される、非常に名譽のある賞です。私は、超ワイドバンドギャップアモルファス酸化物半導体を独自のアイデアで実現してきました。これまで絶縁体と知られていた非晶質酸化ガリウムのキャリア生成を阻害する欠陥を見つけ出し、それを制御する方法を見いだすことで、半導体化することに成功しました。些細な変化でさえ、必ずそこには原因があるはずで、そこに着目すればきっと普段見えていなかったものが見えてくる、それが私の思う科学の魅力です。神谷研究室で学んだことを活かして、世の中に役に立つ材料やデバイスを開発していきたいと思っています。



It was great honor to receive “土肥賞” as a result of master-course in Kamiya-Lab.

M2 Tang Hao-Chun

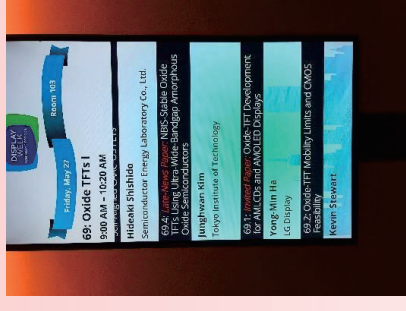
It's my great honor to receive “土肥賞” given from the Department of Innovative and Engineered Materials after receiving the master degree in Kamiya-Lab. During the two-year master course, I mainly focused on the researches relating to the defect states in amorphous In-Ga-Zn-O semiconductors. In addition to conducting my own researches, I also attended many international conferences to present my results. Those are priceless experiences in my life. I am happy to say I am one the members in Kamiya-Lab.



## 海外渡航記

D2 金正煥

2016年5月にアメリカのサンフランシスコで開催された Society for Information Display (SID) の Display Week に参加し、“NBIS-Stable Oxide TFTs using Ultra-Wide-Bandgap Amorphous Oxide Semiconductors” というタイトルで口頭発表しました。SID 学会は、企業からの参加者が大半であり、学界と産業界の活発なコミュニケーションができる点が最大の魅力です。企業の研究所からも大勢参加しますので、量産化に向けた現実的な問題点など、大学では聞けないような話を直接聞くことができました。また、どのような材料が産業界にとって魅力的か、直接的なニーズも聞くこともでき、世の中に役に立つ材料を目指す私にとっては、非常に有意義な会議となりました。今後も、世界中の情報が集まる学会へ参加し、世の中の動向を把握するとともに、に取り組んでいきたいと思っています。



潮流を生み出す革新的な研究

M2 渡邊脩人

2016年8月に韓国の jeju で開催された International Meeting on Information Display (IMID 2016) に参加しました。自身初の国際会議でしたが、“Light-Emission Properties and Electronic Structure of Amorphous Oxide Thin film Phosphor, a-GaO:Eu” という題目で口頭発表する機会を頂きました。開催場所も韓国とあって、LG や SAMSUNG といった韓国の大企業が自社の新作のディスプレイを展示しており、非常に感動したので覚えております。私が本学会で発表した材料は現状では美用化に程遠いものですが、将来的に使用される可能性があると考えると、日々の研究に身が入る想いです。また、当研究グループでは学術的に興味深い材料を研究するだけでなく、実際に世の中に見える材料の開発に力を注いでいます。実際に当研究グループが開発した a-IGZO が有機 EL に応用されるなど、その成果は非常に身近な存在となっております。未だ見ぬ材料の開発が世の中を変える。それを自分の手で出来るのが、当研究室の魅力だと日々実感しています。





## 卒業

### 2011年修士卒 菊池優友

私は神谷研究室で、IGZO-TFTのフレキシブルデバイスへの応用展開を目指した低温熱処理効果の研究に従事していました。IGZO-TFTの表面積化を視野に、スパッタリングやデバイス作製を最適化する過程で、しきい値電圧の異常シフトを発見し、その原因を明らかにすることで、国際学術論文に発表してきました。さらに、そのIGZO-TFTを酸素やオゾン雰囲気での熱処理により特性が大幅に改善することを発見し、国内・国際会議に計3件発表してきました。



神谷研を卒業後、半導体メーカーに就職し、本社研究所で化合物半導体ウエハーに関する一連のOJTを受けた後に、工場への技術移管を行っています。神谷研で「得た課題を解決する能力」は、就職後も大いに役立っています。新規の案件では前例の無いトラブルが発生することが多々あります。それを解決するためには「自分の見立て」を持ってデータと向き合い、文献を調べて、周囲の協力を得ながら解決策を考えて、進めていく必要があります。神谷研で身に付けた研究に取り組み姿勢が活かされた一例であると考えています。修士課程では、二年目から一日の殆どを実験に当てられるようになります。ゼミ前や学会発表前の準備で泊り込むこともありました。普段は規則正しい生活を意識していました。可能な限り日中は実験や資料作成を行い、往復の電車で論文や資料を読むことを心掛けていました。私は基本的に夜型でしたが、朝型の生活をお勧めします。

神谷研での研究生活は、研究テーマを通じて、課題解決能力の向上、また知識の幅を広げられる良い機会だったと思います。IGZOの材料やプロセスの知識だけではなく、知的財産関連の話（例えば特許や商標について）を理解する助けにもなりました。私は他大学の理学部物理学科出身で卒研テーマが理論系だったため、初めは相当な不安がありました。当然初めは大変に思うことや、思い通りの結果が得られないことも多々ありました。しかし継続的に取り組むことで、学会で発表できるデータが得られたときは非常に嬉しく思いました。さらにはなんと、卒業後に周囲の人から研究テーマやその周辺知識について聞かれる機会が非常に多く、IGZOの社会的な役割、インパクトを実感しています。

興味を持たれた方は是非、神谷研の門を叩いてください！

## 卒業

### 2014年修士卒 井上岳士

【神谷研究室で学んだこと】

当時の研究はSnS(硫化スズ)を用いた太陽電池の作製とp-n接合の界面状態の物性評価、およびSnSe(セレン化スズ)の物性調査、準安定相のエピタキシャル成長でした。成果を出すために、粘り強く取り組む姿勢の重要さを学びました。地道なデータ取りが続いたり、自分の予想と反する結果が出るときも多々ありました。色々と壁にぶつかりましたが、まずは自分で考察し、その後先生や同期との議論を行うことで新たな見方を得て、再度実験に取り組みすることで、成果に近づくことができました。最後には先生方の多大なご協力をいただき、学術論文を2報発表することが出来ました。

【社会人になって】

社会人になり目標達成に対して何度も壁にぶつかりましたが、そこで諦めずに、見方を変えるなどして突破口を探す、という姿勢は神谷研で培ったと思います。社会人になると、自分から提案していく機会も自然と増えます。私が学生の頃は、興味を持った材料の研究がしてみたい、という一心で、先生に色々と提案させていたただく機会もありました。このような姿勢が、社会人となった今でも役立っていると思います。

【当時の学生生活】

研究に没頭するタイプだったので、気が済むまで実験に取り組んでいました。毎週のゼミは勿論ありましたが、学生が自主的に集まって勉強会を開くこともありました。さまざまな分野を強みとした学生が神谷研には来るため、自分の強みの分野の話をしてもらうことで、新たな知見や、興味を持つ機会が増えるよい機会だったと思います。気分転換する時は、研究室のメンバーでご飯を食べに行ったり、スポーツしたりしていました。また、一人で気分転換をする時は、美術館巡りなどしていました。

【最後に】

やってみようことを、とことん追求できます！神谷研では、やりたいことができる環境が整っています。とことん勝負させてもらえます。先生方の豊富な知識、研究室の実験設備。会社でも、こんなに環境のよいところは滅多にないと思います。

## 卒業

### 2016年修士卒 菊池満帆

神谷研究室では、アモルファス IGZO の膜密度に着目し、欠陥密度がトランジスタの性能に与える影響の研究を 2 年間行っておりました。薄膜デバイス材料研究会を始めとする国内学会で 2 度発表し、国際学術論文も 2 報発表しました。



私は現在、関西の総合電機メーカーで家電

の機構設計を行っております。現在の仕事では院生時代で得た半導体の知識を活かす機会は始どありませんが、分野は違えども研究も開発も“考え方”は共通すると感じていきます。仮定したことを実験で確かめその結果から再度新たな仮定をたて検証していくといった流れです。設計開発職であっても、このような一連の流れによって納期やスベックを達成します。神谷研でこの姿勢・考え方を身につけておいたお陰で、今の会社での成果につながっていると感じます。特に神谷研の特徴は、高性能な研究設備が非常に多く、自由に使えることです。一つの実験結果だけでなく、データを組み合わせることで多面的な考察能力を養える環境にあり、コミュニケーションと実験の両観点から物事を見る力も養えると思っております。

大きな会社でも開発の仕事は納期が厳しく常に人手が足りない環境にあるので、シミュレーションを用いて理論予測し、最適解を見つかるまでの時間を少しでも短縮する流れは、IT の発展とともに今後も加速していくと思えます。この感覚を学生時代に体験できるのは財産になると思いますし、また神谷研ならではの特徴だと思っております。

学生生活を振り返ると、本当に研究環境に恵まれた 2 年間だったと思います。世界中見てもこれだけ装置の揃っている研究室は他にないと思います。2 年間で 10 種類ほど装置を使い研究を行うことができたが、それでもほんの一握りしか使っていない。自分がやりたいと思えば、何でもできる環境があると思います。学生のみならず、スタッフの方もたくさんいるので、様々なバックグラウンドと強みを持った方と議論できることもこの研究室の特徴かなと思います。社会生活も研究生活も一人でなし得ることは非常に少ないと思います。ぜひ自分で調べられることは自分で行い、分らない部分は周りの方に助言をもらいながら、自分のできる領域を少しずつ広げて行ってほしいと思います。その環境が神谷研究室であれば卒業生として嬉しく思います。

## 卒業後の進路

東京工業大学、パナソニック、特許庁、日立、日産、キャノン、コニカミノルタ、アップル、凸版印刷、東芝、日本 GE、シャープ、トヨタ自動織機、フジクラ、村田製作所、ソニー、旭硝子、NEC、シチズン、富士通、サムソン電子など