

# NIMS NOW

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

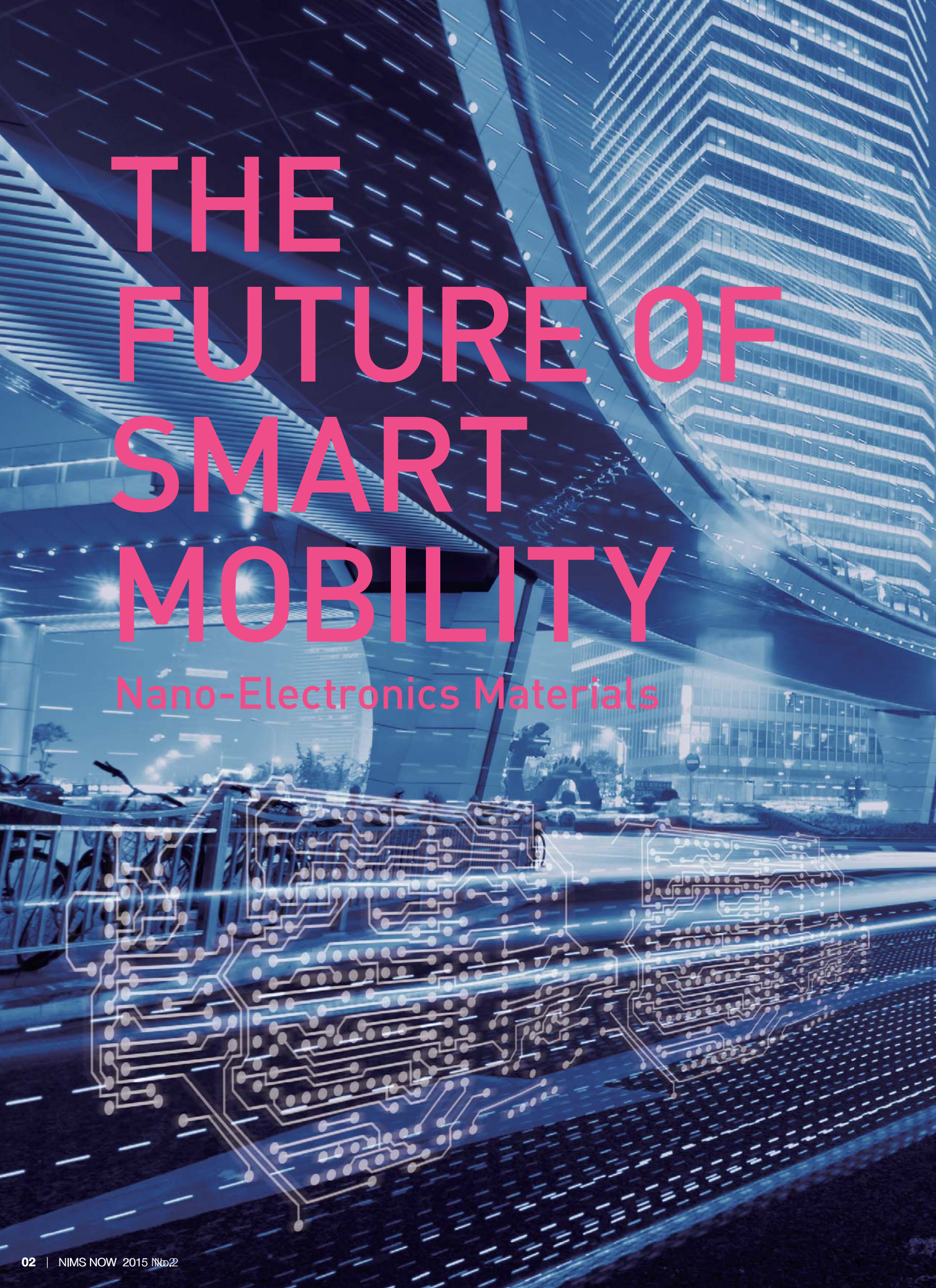
No. 2  
2015



## 明日への スマートモビリティ

ナノエレクトロニクス材料の挑戦





# THE FUTURE OF SMART MOBILITY

Nano-Electronics Materials



# 明日へのスマートモビリティ ナノエレクトロニクス材料の挑戦

1886年、ガソリン自動車ドイツで誕生した。\*

「私は馬を信じる。自動車は一時的な現象にすぎない」

当時のドイツ皇帝ヴィルヘルムII世はこう言った。

そして、現在、人々のモビリティを支える自動車。

近い将来には、私たちはクルマを「信じ」、運転することすら自動車に委ねることになる。

自動運転、そのための車車間通信や障害物の検知など

自動車の電子化は急速に求められている。

一方、世界的な環境面への意識の高まりから、省電力化も重要な課題だ。

車載デバイス業界は、自動車業界だけではなく

IT業界や電子部品業界を巻き込んだ前例のない変革の途に突入した。

本特集では、車載デバイスの微細化、高集積化、省電力化が求められる中、

ナノエレクトロニクス材料研究が貢献する技術に焦点を当て

その技術分野におけるNIMSの研究開発の最前線を紹介する。

人とクルマの快適な関係へ。

ナノエレクトロニクス材料の挑戦は始まっている。

※カール・ベンツが1886年に世界初のガソリン自動車の特許を取得した。



# クルマが人間を理解する日

## 5年後のリアルなクルマの世界とそれを支える新材料

取材・文：池田亜希子

明日のスマートモビリティの姿を、自動車における情報通信の第一人者である  
インテル 野辺継男と MANA 知京豊裕が語り合う。



インテル 野辺継男

インテル株式会社 ディレクタ  
兼 名古屋大学 客員准教授

NIMS 知京豊裕

MANA ナノマテリアル分野  
ナノエレクトロニクス材料ユニット ユニット長

## オンラインゲームが加速させた IoT (Internet of Things)

**知京：**野辺さんは、現在、クルマの自動運転の実現に向けて国内外を問わず広く活動しています。野辺さんとは大学の入学が同じで学科は違いましたが、大学時代は同じ時間を過ごしていましたね。それ以降は別々の進路へと進むわけですが、野辺さんのそれ以降の経歴が大変興味深い。まず、その辺りの経緯を教えてください。

**野辺：**大学では応用物理を学び、卒業後は NEC でパソコン事業に携わりました。その理由は、NEC が 1970 年代から提唱していた「コンピュータ・アンド・コミュニケーション (C&C)」という考えと、私の「コンピュータと通信機器はいつか融合する」という考えが一致したからです。当時 NEC では、98 と呼ばれたパソコンが強かったこともあり、最初の仕事はパソコン事業の海外展開でした。しかし、当初、海外向けのパソコンも国内同様国際標準ではなく、米国市場には受け入れられませんでした。そこで「IT の拡大には標準化が不可欠だ」という以前からの信念により、国際標準である IBM 互換 PC を出す海外

戦略を直訴し、その頃、同様に考える方々の支援も受け、思う存分やらせて頂きました。

1995 年に Windows 95 が登場してオフィスや家庭にインターネットが広がり始めると、「これだ」と思いましたね。その後のマイクロソフト本社での常駐を経て、2000 年末に NEC を思い切って退職しました。そ

の頃、2000 年を前後し、ソフトバンクの孫正義さんがよりネットワーク帯域の広い通信回線である ADSL を利用した Yahoo!BB! を立ち上げておられ、その立ち上げに参加させて頂きました。当時 ADSL の市場拡大が進んでいたのは韓国でした。そして韓国には世界最大のオンラインゲーム会社





があり、これが若者の間で大変なブームとなり、ADSLの普及をけん引していました。いわゆる大規模多人数同時参加型オンラインロールプレイングゲーム「MMORPG」(Massively Multiplayer Online Role-Playing Game)と呼ばれるものです。そのオンラインゲームでは、不特定多数の人がパソコン経由でサーバに集まり、そのバーチャルな世界で互いに友達になります。その中をある意味人工知能で動くあらゆるタイプのモンスターとも遭遇します。

さらにMMORPGの世界では、それぞれのプレイヤーのデータがゲームのフィールドであるバーチャルなマップデータベース上に集まり、1/30秒で解析され、その結果が参加者の存在する国中のネットワークを飛び交います。そのために、ネットワーク遅延が少なく、広帯域、常時接続、定額のADSLによる通信サービスが必要だったんです。データの種類も多く、今で言うSNS

に生活に役に立つサービスが提供出来るだろうと考えました。例えば、ワイパーを強く動かしているクルマが一部に集中している地域があればゲリラ豪雨が発生している可能性がある、と気象情報の判断及び提供にも使えます。これは正に、今でいえばIoTそのものだったと思います。

## EVのIoT化

**知京:** それで日産に移ったのですか?この頃から野辺さんは、講演会などで「次世代車のテレマティクスの中にインターネットを活用すべき。」という話をしていますね。そこで、大学時代に会った野辺さんは今こんなことをやっているのだと知ったのですが、車を「インターネットでつながった移動通信機器」としてみる発想が非常に斬新だと思いました。

**野辺:** そうでした。丁度クルマにもそう

クトは先進的で、2011年に移動体通信分野の世界的な業界団体GSMAの「自動車・輸送部門ベストモバイルイノベーション賞」を受賞しました。このITシステムを使って、具体的にはEVをセンサー群と見立て、バッテリーの劣化状況の管理、走行や環境状況の把握を可能にしました。さらに、クルマによって集められたビッグデータを解析して、新しい充電スポットを見つけたり、気温や走行速度や勾配に応じた走行可能距離を分析する情報サービスも導入しました。

## 人工知能化

**知京:** ITを搭載したクルマがこれからどう変わっていくのか、想像力を掻き立てられますね。例えば、インパネ(自動車などで、運転席に設けた計器盤)は、今のようにスピードメーターがあつて、その横にカーナビがあつて・・・という感じではなく、1つの大きなディスプレイに自分の好きなように表示できるようになるのでしょうか(12頁に関連記事)。

**野辺:** なると思います。ただ、“好きなように”というよりは、運転者に的確に情報を伝えるために、その時に必要な情報を必要な場所に表示することになると思います。制限速度が時速80kmの所を、運転者がそれを超過しているようなら、クルマが道路標識を認識し、ドライバーの目の前に表示し、注意を喚起するといった具合です。

**知京:** そのためには、周りの交通状況をとらえるイメージセンサが非常に重要ですが、今、クルマに搭載されているイメージセンサといえば、衝突を避けるためのドライブモニターくらいです。将来的には、様々なイメージセンサが車内外に配置され、情報を収集するということですね。

**野辺:** 特に、レーダやカメラが重要です。レーダで車間距離を測り、4Kや8Kの高解像度カメラで周囲の状況をとらえ、あらかじめ3次元地図に蓄積されている道路標識の空間位置情報と照らし合わせ必要な部分だけ認識しながら走行する時代が来ます。さらに、アクセルやブレーキを踏んだり、ハンドルを回したりする操作を、人の代わりに人工知能が判断、操作できるようになれば、自動運転が実現するのです。



や“ビッグデータ分析”の先駆けのような仕組みを持っていました。私は、インターネット自体とこのような仕組みを貴重な社会資源と感じ、遊びだけに使うのはもったいないと思い、ゲームのプレイヤーをクルマに置き換え、あらゆるデータを取得し分析すれば、渋滞の状況や情報の共有など非常

した技術が必須になると考えていた所、日産から声がかかり、2004年に移ってから願ひ通りテレマティクスをやらせて頂きました。特に電気自動車(EV)にIT端末を載せ、携帯電話網でインターネットにつなぎ、MMORPGに於けるPCの如く、日米欧のEVをデータセンターに接続したプロジェ



TSUGUO  
NOBE

## THE FUTURE OF SMART MOBILITY

Nano-Electronics Materials

**知京**：自動運転というと、道路や信号機などの社会インフラにいろいろな発信機があつて、それを車が受信しながら走るという考え方もありますが。

**野辺**：以前にはそういう研究も行われていました。しかし国際基準ではない通信インフラ等に依存した自動運転は、海外展開などを考えると現実的ではありません。一方、携帯電話網は世界中で急速に広がりさらに高度化していますから、それを利用してクルマとクラウド、クルマとクルマ、クルマと人をつなぎ自動運転を実現する方がいいと思いますね。というわけで、これからはクルマのITも国際的な標準化が必要だと考え、インテルに移りました。2012年のことでした。

### 成功の鍵を握る材料開発

**知京**：クルマの世界に確実にイノベーションが起こっていると感じますが、発電する仕組みをもっていない電気自動車が、バッテリーの電気容量範囲内ですべてのデバイスをコントロールし、通信も行わなくてはならないとすると、高効率のインバータ(電気の交流と直流の変換装置)などの省電力デバイスが必要になってくるのでしょうか。

**野辺**：その通りです。現実的にエアコンのエネルギー消費が意外に大きく、真夏や真冬は全体の3割もの電力を使ってしまうますが、今後、高度なイメージセンサが搭載されたり、

高速なコンピュータが多くの事を認識・分析・判断しながら走る様になれば、それだけ多くの電力を消費するでしょうし、車載ネットワークも今使われているCAN (Controller Area Network) 以上の高速ネットワークが必要になり、あらゆる面で省電力デバイスへのニーズが爆発的に高まります。

**知京**：NIMSでは、窒化ガリウム(GaN)や炭化ケイ素(SiC)、ダイヤモンドなどの材料に、小型で高性能の次世代パワーデバイスの開発を行っています。また、クルマという限られたスペースに低消費電力で高性能なイメージセンサを搭載することを考え、デバイスの3次元積層という構造的な改良も進めています(10頁に関連記事)。クルマという通常では考えられない温度変化や振動がある環境でも、安定的に動作するデバイスの開発も視野に入れています(8頁に関連記事)。

**野辺**：どれも重要だと思いますね。自動運転では人の代わりに人工知能が運転するわけですが、人工知能を動かすためには10年前のスパコン並の能力をもつコンピュータを搭載しなければなりません。その時に問題になるのがコンピュータのサイズと発熱量です。仮に今の消費電力のままサイズだけ小さいワンチップにしたら、その温度は太陽の表面と同等になると言われています。この話から明らかに、圧倒的な技術の進展なくしては、実現はないということです。

**知京**：NIMSナノエレクトロニクス材料ユニットでは、次世代微細MOSFETのための材料、界面制御技術と新評価手法を開発し、低消費電力で動作する機能性デバイスの開発を目指しています。まさにこれらの技術がこれからのスマートモビリティに貢献できる可能性があるということですね。

### NIMSが手がける 自動車関連の 他の研究開発の一例

材料というアプローチで  
これからの自動車の発展に貢献しています。





TOYOHIRO  
CHIKYOW

## Fun to drive

**知京：**ところで、自動運転の時代になると運転をする楽しみがなくなると想像する人も多いのですが、実際はそうでもなさそうですね。

**野辺：**運転の楽しみ方の定義にもよりますが、例えばこんなことが可能になるかもしれませんが。自動運転モードで、「アイルトン・セナ」を選ぶと、セナの運転が再現され、それをサーキット内で行えば、まさにF1レーサーの運転を自分のクルマの性能範囲で体感する事も可能でしょう。その時速に耐えられるかは別として(笑)。また、自動運転によって、運転に集中する疲労から開放されますからロングドライブを楽しめるでしょう。自動運転の時代となることで自動車の楽しみ方も大きく変化するにちがいありません。まさにこれからの新世代のFun to driveが生み出されていく、その過渡期に私たちはいるのだと思います。

**知京：**さらにその先の話になりますが、私たちが子供の頃に憧れたアニメの「スーパージェッター」やアメリカのテレビドラマの「ナイトライダー」といったクルマは、呼べば迎えに来てくれて、時には冗談を交わすこともできました。そんな車はできるのでしょうか。

**野辺：**技術的にはできるようになると思いますよ。その頃には、人間とコンピュータがうまく共存していると考えられます。そういった世界へ進む一步をリアルに感じさせてくれる一つのきっかけが、自動運転車ということなのかもしれません。

## クルマが人間を理解する日

**野辺：**米国運輸省道路交通安全局(NHTS

A) が、クルマの自動化の度合いをレベル0からレベル4の5段階に分類しています。レベル4では完全な無人運転も想定されていますが、自動運転が期待されている分野の一つとして、過疎化が進む地域に住んでいる高齢者にライフラインとして移動手段を提供することがあります。この時、まったく機械的な自動運転というよりも誰かがやさしく語りかける様な雰囲気も大切かもしれません。実はクルマが乗る人の状況を理解できるようになるのは、とても重要なことです。

**知京：**日本は2020年代前半を目途に準自動走行システム(レベル3)を市場化し、2020年代後半以降には完全自動走行システム(レベル4)の市場化を目指していますね。

**野辺：**その1つ前のレベル3は非常に重要で、ここでは人工知能が運転者の癖を学習するといった事も考えられます。例えば「この人ならこういう時にどの様に運転するか」といった事を学習し、乗る人に違和感のない自動運転を提供するという考え方です。逆に、運転の癖を教習補正する事も可能かもしれません。勿論、そうした事が実現されるには大量のデータを市場から集め、分析するための機械学習やディープ・ラーニングの研究も進める必要があります。クルマが乗る人を理解し、快適に走行する。これが将来の理想的な姿だと思います。もちろん、それらの実現には先ほどもお話しした、材料開発をはじめとした圧倒的な技術の進展が求められるわけですが。

**知京：**新しい社会インフラとしても、自動運転は期待されているのですね。その実現に私たちNIMSの材料開発が貢献できるとわかり、とても意義のあるお話でした。本日はありがとうございました。

## III.



## I. 次世代半導体の欠陥評価・機能制御

次世代パワー半導体の一つであるSiCはSiに比べ、電力損失が10分の1以下であり、200°C以上の高温動作が可能で、SiC素子はHVやEVへの実装が期待されますが、SiCウエハーは、Siに比べ結晶欠陥密度が高く、また酸化膜の性能に劣るのも事実です。そこで欠陥評価・制御が重要となります。NIMSでは各種装置を使用し、次世代半導体の欠陥評価・機能制御をおこなっています。写真はEBIC/CL (カソードルミネッセンス)装置。

## II. リチウム空気電池

低炭素化に向けて電気自動車や太陽電池の普及を促進するためには、二次電池の抜本的な小型化と低価格化が必要です。リチウム空気二次電池は最高の理論エネルギー密度を有する究極の二次電池であり、蓄電容量の劇的な向上と大幅なコストダウンが期待できます。NIMSでは、リチウム空気二次電池の材料、電極反応などの基礎研究からセル設計、試作までの一貫した研究開発を行い、実用電池としての基盤技術の確立を目指します。

## III. 省エネ磁性材料

NIMSでは省エネに大きく貢献する磁性材料と次世代デバイスの開発をおこなっています。ハイブリッドカーや電気自動車普及のための硬・軟磁性材料、ハードディスクの高密度化で省エネを実現する磁気記録媒体ならびに再生ヘッド用磁気抵抗素子、情報通信分野で省エネに寄与する新規不揮発性メモリや次世代ナノデバイスなどです。重希土類元素スズプロシウムを使わない高保磁力ネオジム磁石の研究もおこなわれています。

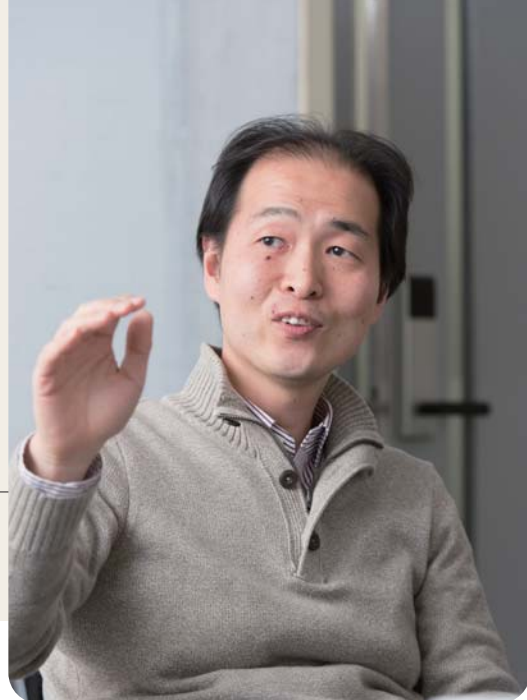
# ワンチップ化を目指す

クルマの消費電力削減に材料で貢献

長田貴弘

TAKAHIRO NAGATA

NIMS MANA ナノマテリアル分野  
ナノエレクトロニクス材料ユニット  
半導体デバイス材料グループ



## 安全な運転制御のために

クルマの自動運転に向けて、搭載される電子機器の急増が予想されている。それらから得られる情報を統合し、安全な運転制御を実現するためには、電子機器の「ワンチップ化」と通信機器の「ワイヤレス化」が不可欠だ。そこで、産学独連携プロジェクトの下、そのために必要な材料の研究開発を進めているのが、MANA 研究者の長田貴弘だ。

## よりシンプルに

クルマの自動運転化が進められている。そしてそのためには、通信機器はもちろん、エンジンや発電機、タイヤの状態、排気ガスの排出量などを監視する各種センサー、車間距離を計測するレーダーやカメラ、そして、それらの電子機器から得た情報を統合して処理し、運転を最適に制御する高性能なコンピューターの搭載が必要となる。

しかし、電子機器の搭載数が増え、クルマの内部で情報のやり取りが頻繁に行われるようになれば、システムや配線の複雑化が避けられない。また、機器の低消費電力化、低コスト化も不可欠だ。そこで、現在、電子機器同士の機能の共有化、つまり「ワンチップ化」と、通信の「ワイヤレス化」に向けた研究開発が国を挙げて進められている。複雑化ではなく、よりシンプルを目指していく。

このような中、ハイブリッドカー（Hybrid Electric Vehicle：以下、HEV）を対象に、高温環境でも正常に動作する各種センサー用「キャパシタ材料」と、パワー半導体の低コスト化を実現する「薄膜基板材料」



スマートウォッチから充電確認や駐車指示が可能になる時代がくる。クルマの電子化を促進するには、電子機器のワンチップ化が重要だ。BMW i Remote App for the Smartwatch Samsung Gear S。 (写真提供 BMW社)

の研究開発を進めているのが、MANA研究者の長田貴弘だ。

## 高温に耐えるか

現在、ガソリン車から、電気自動車（Electric Vehicle：EV）や燃料電池車などエコカーへの移行が進められている。その中でHEVは橋渡的な存在だ。だが、その需要は今後も当然伸び続け、2030年においても、エコカー全体の約50%を占めると予想されている。

HEVの自動運転化に向けては、エンジンの燃焼や排ガスを監視するセンサーと

回路、電力の制御を行うパワー半導体、そして、電力の蓄積や放出を担う素子であるキャパシタなどの温度変化に対する安定性の他、小型軽量化、さらにはワンチップ化が望ましい。

そこで、長田が取り組んでいるのが、250～400℃という高温環境下でも正常に動作する薄膜キャパシタ材料の開発である。

「HEV用に薄膜キャパシタをチップに搭載するには、温度変化に対する信頼性の他、小型化が不可欠です。そのため、産学独連携プロジェクトでは、東京大学のチームが提案した“リラクサ強誘電体材料”の薄膜化に取り組みました」と長田は語る。

リラクサ強誘電体材料とは、特徴的な誘電緩和現象（リラクサ現象）を示し、広い温度領域・周波数領域で、高い誘電率を維持できる材料である。従来、有毒な鉛を使った材料が多かった。それに対し、東京大学のチームは、チタン酸バリウム（BaTiO<sub>3</sub>）という鉛フリーの酸化物材料にビスマス（Bi）を含む酸化物材料を加えると、リラクサ現象が起こることを発見していた。

しかし、これはバルク材料だ。一方、炭化ケイ素（SiC）を材料とするパワー半導体の基板上に、このリラクサ強誘電体材料を



積層し、薄膜キャパシタとして動作させるためには、薄膜化し、原子レベルで構造や組成を制御する必要があったのだ。

長田がこの材料を薄膜化するに当たり注力したことは、大きく分けて2点だった。1点目は、どれくらいの量のBiを加えれば、広い温度領域で求める誘電率を得ることができるか。2点目は、薄膜化する際、高温で処理することにより、内部で拡散して表面に出てしまうBiをいかに制御し、特性の劣化を抑制することができるかだ。

## NIMS だからできる

1点目に関しては、NIMSのお家芸であり、材料探索の重要な手法の1つである「コンビナトリアル手法」を採用した。これは、数種類の元素に対し、ユニークな機能を発現するような材料組成を、効率的に探索するための手法だ。具体的には、例えば、AとBという2種類の元素を使って、求める機能を発現する材料組成を探索するといった場合、スパッタリング法などを用いて、まずA元素の厚さを変えた傾斜膜を作り、さらに、反対側からB元素の傾斜膜を作るのである(図1)。それにより、さまざまな組成比率の材料を連続的かつ一度に作製できるというわけだ。

「この手法により、ターゲット仕込み組成のBiの量を7%過剰に加えると、誘電率が最も安定化することを突き止めました」と長田は語る。

また、2点目に関しては、薄膜の層構造を高度に制御することで、Biの拡散を抑制できるのではないかと考えた。そこで、長田が利用したのが、NIMSが長年にわたり蓄積してきたバルク材料の特性に関する世界最大級のデータベースと、そのアプリケーションシステムの「金属偏析予測システム」だった。

「これにより、チタン(Ti)やタンタル(Ta)、ストロンチウム(Sr)を多く添加した酸化物の層でBiの層を挟むと、Biの拡散が劇的に少なくなることがわかりました。中でもTaは構造内の酸素欠損を防ぐ働きをすることも判明しました。均一にTaを添加しただけではBiの拡散を抑えることは難しかったのですが、高濃度にTaを添加した層とBiの酸

化物層を交互に積層していくことで、課題を解決することができました」と長田は語る(図2)。

こうして長田は鉛フリーでありながら、SiC基板上で400°Cの高温でも動作するキャパシタ薄膜材料の開発を果たした。

## 非極性の窒化ガリウム

一方、パワー半導体の低コスト化を実現する薄膜基板材料の開発も、長田の大きなテーマだ。直流と交流の電力変換時のエネルギー損失が非常に低いことから、省エネの切り札として、現行のシリコン(Si)に替わる次世代パワー半導体、SiCと窒化ガリウム(GaN)に現在、期待が寄せられている。

SiCのパワー半導体はすでに電車のインバーター装置に搭載されているほか、EVやHEVへの採用も進められている。一方で、GaNに関しては、まだまだ研究開発の余地がある。GaN特有の課題とされているのが、まず、低コストではきれいな単結晶が得られないこと、そして、極性を持っているため、電気特性の変化が生じてしまうことだ。極性があると、元来電気が流れてほしくない状態のときにも流れてしまうため、無駄な電力が発生することになる。

そこで、長田がポスドク研究員とともに取り組んだのが、極性を持たないGaNの単結晶を低コストで作るための薄膜基板材料の開発だ。

「サファイア基板ではなく、より低コストな

Si基板を使った場合、そのままGaNを垂直方向に結晶成長させると、極性が発生してしまいます。それを非極性にするには、従来垂直方向に成長していた結晶構造をSi基板に対して、水平方向になるように成長させることです」と長田は語る。

そこで、長田らは、Si基板上にまず硫黄(S)系の薄膜材料をバッファ層として積層し、その上に、GaNを成長させることにした。その結果、非極性のGaNのきれいな単結晶を作ることに見事成功した。

「実はこれは、約10年前にNIMSチームのリーダーである知京豊裕が見出したものです。それを今回、我々のグループで実際に作製し、その性能を確認したというわけです」と長田。

GaNは青色LEDの材料として有名だが、2014年にノーベル物理学賞を受賞した中村修二氏も、LEDの発光効率を高めるためには、結晶を非極性にする必要があると述べている。そのため、非極性のGaNを作製する技術は、今後、さらに重要性を増していくと長田は踏んでいる。

「産学独連携プロジェクトでは、いずれも求める性能を達成することができました。しかし、実用化に向けては多くのハードルが存在します。クルマは人の命を預かるため、究極の信頼性、安全性が求められます。今後も材料開発を通して安全で快適、そして、環境負荷の少ないクルマ社会の実現に寄与していきたいですね」。長田は決意を新たに語る。(文:山田久美)

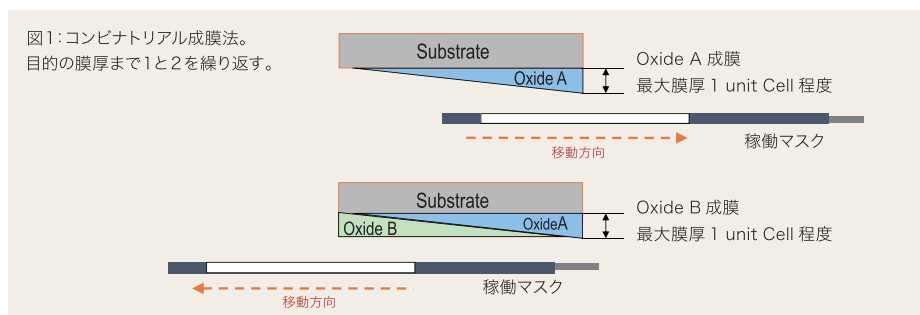
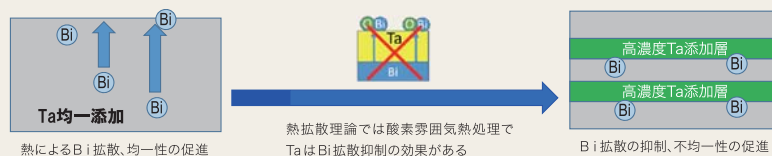


図2: 高濃度Ta添加薄膜層の挿入によるBi拡散の抑制。平均添加濃度が同じTa添加であっても濃度勾配をつけることで高Ta添加層を形成しBiの拡散を効果的に抑制している。





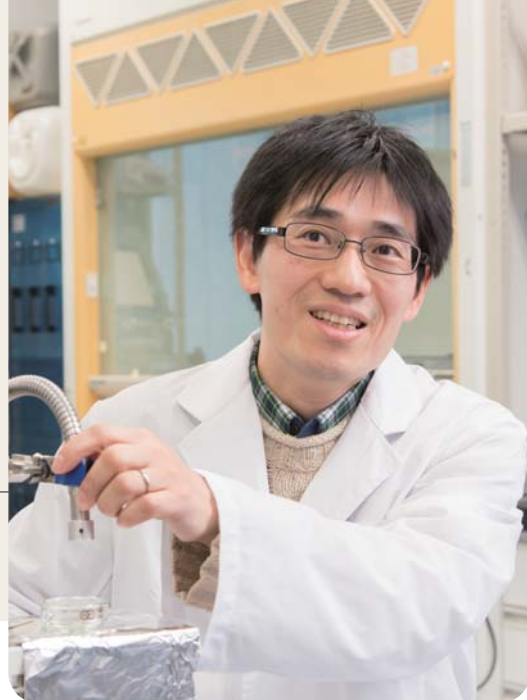
# 3次元 LSI 実装へ 注目の材料と技術

## 10分で作れる低コスト貫通電極

川喜多 仁

J I N K A W A K I T A

NIMS MANA ナノマテリアル分野  
ナノエレクトロニクス材料ユニット  
半導体デバイス材料グループ MANA研究者



## イメージセンサ市場に関わる LSI 高機能化

先進運転支援システム (ADAS : Advanced Driver Assistant System) が近い将来、義務化されると言われている。そのために不可欠なイメージセンサ市場は 2020 年に向けて急成長する可能性がある。これにより、車載用イメージセンサは、さらなる高性能化・省電力化が求められている。実は、この解決策の一つが 3 次元 LSI の実現だ。MANA 研究者 川喜多仁が貫通電極による 3 次元 LSI に挑んでいる。

### 3次元化のパラダイムシフト

電子機器には集積回路 (LSI) が入っている。LSIとは、それぞれセンサやメモリ、CPUなどの機能をもつチップが詰まったもので、各チップを小さくすることで小型化が進んできた。しかし、それも物理的な限界に近づきつつある。そこで期待されている技術の一つが、チップを縦に積み上げる (積層する) 3次元化である (図1)。

特にイメージセンサにおいては、チップ面積全体に占める画素領域の割合を増やすことが高機能化につながるため、LSIの積層 (3次元化) は有効だ。平面上に集積させていた受光素子や論理回路といった構成要素を積層することで受光素子への光の投影面積の向上を狙えるからだ。それだけでなく、構成要素に電気を流すために不可欠な導電配線を貫通電極により最短距離 (垂直方向) とすることで、データ転送速度の向上と消費電力の低減を図ることができる。

「LSIの3次元化では、積層したチップの間にどのように電気を流すかが、課題です。従来技術の展開として、ワイヤボンディ

ングという手法を各層に適用するという方法がありますが、高度な生産技術が必要になるだけでなく配線長の短縮にはほとんど寄与しません。」と話すのはNIMSの川喜多仁。それに代わる方法として、積み上げたチップに縦方向に電極を貫通して電流を流そうとしている。ある試算結果によれば、貫通電極 (Through Silicon Via : TSV) を用いることで、チップ間をつなぐ配線を短くできるため、その抵抗による電力ロスが抑えられ、消費電力を90%も削減できるのだという。さらに、配線を短くすることで、データの転送速度の向上も達成できる。

### 貫通電極を 10 分で作る

数十～数百  $\mu\text{m}$  の孔にいかに電極を通すのか。貫通電極をつくるには、チップが載っている各シリコン層を貫通する孔を開け、導電材料を充填しなくてはならない。貫通電極をいかに短時間で形成するのかが、世界中の3次元LSI研究者の注目するところとなっている。これまでにめっき技術や化学気相成長法によって孔を導電材料で埋め、貫通電極をつくることはできているが、現状、どちらも時間とコストがかかる。それに対して川喜多は「私たちが開発を進めている材料と技術なら、10分で貫通電極をつくることができます。しかも、コストがかかるような大掛かりな装置も必要ありません」とその形成プロセスの優位性について語る。

NIMSの方法では導電性ポリマーと金属が複合したナノ粒子が分散した溶液を用いる (図2)。この溶液はシリコンに対する接触角が小さく、毛細管現象によって小さい穴や間に入り込みやすい性質を有している (図3)。この性質を利用することで、貫通電極用の孔の開いたシリコン基

図1 : LSI高集積化のための3次元化。システムLSIを分割し積み上げることでチップ面積を減らす。

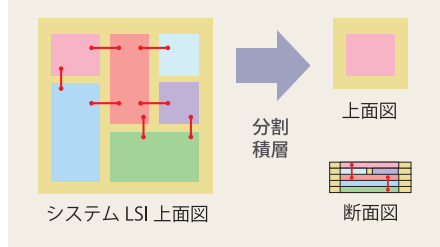




図2:導電性ポリマーと金属が複合したナノ粒子が分散した溶液

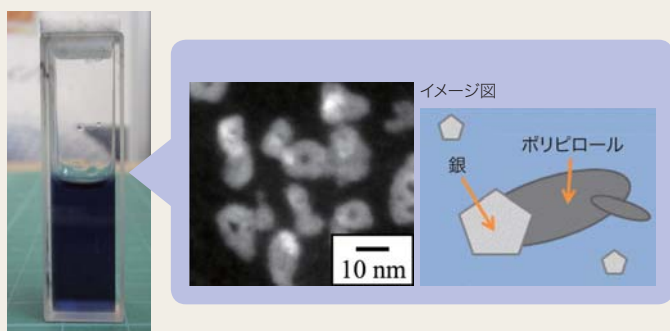


図3:シリコンに対する接触角の違い



板を浸すだけで、孔の中にコロイド溶液が入る(図4)。最後に溶媒を蒸発させれば、孔は埋まっているというわけだ。当初、孔を完全に埋めるのは簡単ではなかったが、今ではその問題も解決されている。

### 実現化に向けて

10分で、しかも低コストで作れる貫通電極。実用化が近いように思えたが、より実装に近づけるために、さらなる課題も見

つかった。

実は、川喜多はこの材料を貫通電極のために開発したわけではない。当初、導電性ポリマーを使って金属材料ではつくることができない細い導線の開発に取り組んでいた。その導線の導電率を上げるために金属微粒子で覆う方法を開発したことが、今回の貫通電極の技術へとつながった。

専用につくった材料ではないため、思わぬ問題が発生した。導電性ポリマーを覆っていた銀がシリコン基板表面の空隙

に入り込んで(Si内部へ拡散して)しまったのだ(図5)。それが原因で誤作動が起こる可能性が指摘された。その対策として、拡散バリア層の開発が必要となり、シリコン表面を処理することで銀の侵入を防ぐ方法を探った。これまでにシリコンの窒化膜では銀の拡散は抑制できるが界面の密着性が低い問題があった。一方、酸化膜では銀の拡散に対する抑制効果は小さいものの、密着性は高いことが分かっていた。そこで、シリコンの酸窒化膜(SiON)で試したところ、これが拡散バリアとして有効であることが証明されたのだ。

これらの技術によって、安定性の高い貫通電極を作ることができる。「車載用イメージセンサの普及・拡大に向けて5年以内の実用化を目指しています。既存技術が存在する場合、製造工程への新しい技術の導入は容易ではないと思われるかもしれませんが、現在は、一般的になった銅めっきによる配線形成技術も、同じように思われていました。」川喜多が見据える「5年以内の実用化」が確かに見えてきた。この材料が、3次元LSIが実用化される布石となるかもしれない。この最先端材料の行く末に、多方面からの注目が集まっている。

(文:池田亜希子)

図4:貫通電極をつくるための充填プロセス

縦孔を設けたシリコン基板をNIMS分散溶液に浸漬

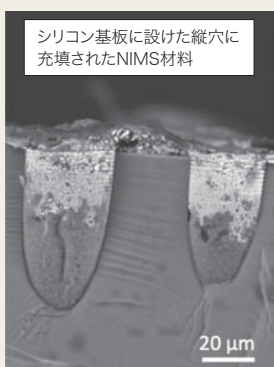
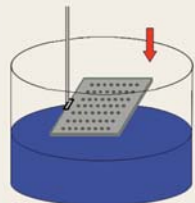
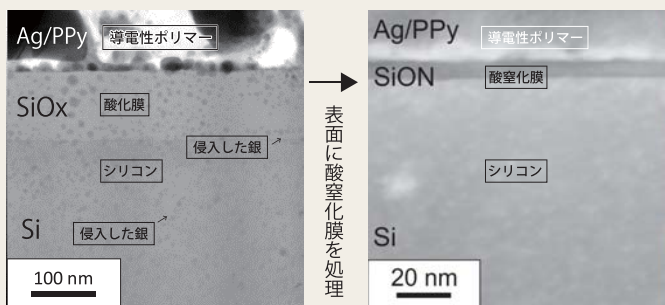


図5:酸窒化膜によるシリコンへの銀の侵入の防止。シリコンの酸化膜では、ポリマーに含まれた銀がシリコンへ侵入するのが見られるが(左)、酸窒化膜を形成することで銀の侵入を防ぐことができた(右)。



銀の侵入が見られない



# エコ・ディスプレイ 第四の新材料

薄膜トランジスタ小型化で低消費電力を実現

塚越一仁

NIMS MANA ナノシステム分野  
パイ電子エレクトロニクスユニット

KAZUHITO TSUKAGOSHI

生田目 俊秀

NIMS MANAファウンドリ  
統括マネージャー

TOSHIHIDE NABATAME



## 次世代ディスプレイのゆくえ

見る、触る。人と機械を結ぶディスプレイの普及が目覚ましい。クルマのインパネも近い将来ディスプレイ化する。クルマに限らず、ディスプレイの普及、高精細化、大画面化は確実に進む。それは大幅な消費電力の増加も意味する。そこで省電力に挑むため、新たな材料を使った薄膜トランジスタを開発したのが、MANAの塚越一仁と生田目俊秀のチームだ。

### 消費電力100億ワット増への対策

HMI(Human Machine Interface)の高度化により、スマートフォンやタブレット端末、各種自動販売機から駅や空港、デパートの巨大表示板に至るまで、気付けば我々の生活はディスプレイであふれ返っている。

現在、クルマの運転席の正面に設置されている速度や走行距離を表示するインパネも、近い将来ディスプレイに置き換わると予想されている。また、フロントフードが透けて見えるディスプレイ技術も開発され、未来のクルマはさながら走るディスプ

レーになるとも言われる。

高精細化、大画面化も急速に進んでいる。2020年開催予定の東京オリンピックでは、現在の4Kのさらに4倍の画素数を誇る8Kの巨大ディスプレイが町中に設置され、観客は競技場に行かずとも、臨場感あふれる競技をパブリックビューイングで楽しめるようになるという。

「しかし、そのためには、乗り越えるべき大きなハードルがあります」。こう苦言を呈するのは、MANA主任研究者の塚越一仁だ。

「現在、日本には、約1億台のテレビがあるとされていますが、もし今後これら

が大型4Kテレビに置き換われば、消費電力量は1台当たり100ワット以上も増大します。地球温暖化防止に向け、消費電力量の低減が急務の中、ディスプレイの大幅な低消費電力化が喫緊の課題となっているのです」

### 省電力の鍵を握る TFT 小型化

ディスプレイの多くは液晶表示素子だ。各画素には、それぞれ1つずつ薄膜トランジスタ(Thin Film Transistor: 以下、TFT)が装備されており、スイッチの役割を果たしている。このオンとオフの切り替えによって、さまざまな画像を表示できるのだ。また、画面を明るくするためにはLEDバックライトが使われている。ディスプレイの中で最も電力を消費しているのは、実はこのバックライトである。

一方で、ディスプレイの高精細化に伴い、画素の面積が小さくなってきている。元来であれば、それに連動してTFTや配線も小さくする必要がある。TFTや配線にさえぎられて、バックライトの光が画素を透過できず、画面が暗くなってしまうからだ。しかし、既存の材料では電子移動度が低



進化するインパネのディスプレイ。  
HONDA「MICRO COMMUTER CONCEPT」。(写真提供:本田技研工業株式会社)



いためTFTの小型化が実現できていない。そのため、現行のディスプレイでは、約半分の面積がTFTによりさげられ、光が透過できないのが現状だ。この課題をクリアするため、現在は、バックライトの輝度を上げることで、画面の明るさを維持しているのだ。その結果、消費電力量が上がってしまっているのである。(図1)

「この課題を解決する方法は2つあります。1つは、LEDの発光効率を上げること、もう1つは、新たな材料を開発してTFTを小型化し、光の透過量を増やすことです。もし、TFTの面積を現行の10分の1以下にできれば、簡単に消費電力量を半減させることができます」と塚越。

そこで塚越と生田目が、2010年から取り組んでいるのが、TFTを小型化するための新たな材料の研究開発である。

### 既存の TFT では 8K に対応できない

現在、TFTの材料は大きく3種類に分けられる。1つ目が、液晶テレビなど比較的大型のディスプレイに採用されている「アモルファスシリコン」、2つ目が、スマートフォンなど中・小型機器に使われている「ポリシリコン」、そして、3つ目が、新たな材料として約10年前に登場した酸化物半導体の「IGZO」だ。IGZOとはインジウム(In)、ガリウム(Ga)、亜鉛(Zn)、酸素(O)から構成されるアモルファス半導体で、現在、一部のスマートフォンやタブレット端末に搭載されている。

しかし、これらの材料には一長一短がある。まず、アモルファスシリコンの場合、約250°Cという比較的低温で製造できるため、大画面化が可能だ。しかし、高精細・高画質を実現するのに不可欠なTFTにおける電子の移動度が低い。移動度を高めるためには、TFTの面積を大きくする必要があり、消費電力の増大につながっている。また、移動度が低いため、8Kなど次世代のディスプレイへの採用はむずかしい。

一方、ポリシリコンは、8Kにも対応可能な高い移動度を持つものの、製造温度が500～600°Cと高く、製造コストもかさむため、大画面化は現実的ではない。

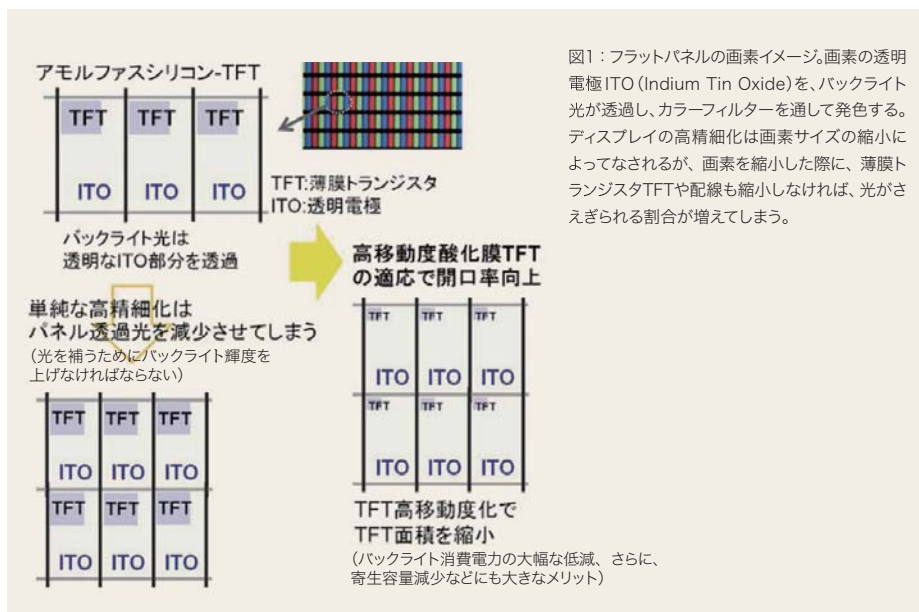


図2: 元素の酸素かき離エネルギー。単体の元素から酸素を引き離す際に必要なエネルギー。

LOW (kJ/mol)	Cd	236	Rh	405	Tc	548	W	720	
	Br	238	Fe	407	Am	553	Nb	726	
	Pd	238	Ir	414	Ba	562	Pr	740	
	Zn	250	Pt	418	Sm	573	U	755	
	Hg	269	Sr	426	Os	575	Zr	766	
	Na	270	D	429	P	589	Ce	790	
	Rb	276	H	429	Er	606	Pa	792	
	Cu	287	Se	429	Dy	615	La	798	
	Cs	293	Sb	434	Re	627	Si	799	
	Bi	337	Be	437	N	631	Hf	801	
	Li	340	Cr	461	V	637	B	809	
	In	346	Eu	473	Pu	656	Ta	839	
	Mn	362	As	484	Ge	658	Th	877	
	Ni	366	O	498	Ti	666	C	1076	
									HIGH

そして、IGZOだが、移動度はアモルファスシリコンの数十倍と非常に高いものの、製造温度が高く、大面積で均質な薄膜を製造することが難しい。そのため、これも大画面化には向かない。

つまり、既存の材料では、消費電力が増大する、製造コストがかさむ、そもそも大画面化がむずかしいなどの理由から、低消費電力で、高精細、大画面を実現する8Kなど次世代ディスプレイには対応できないのである。

「そこで我々が考えたのが、IGZO並みの移動度を持ちながら、低温で製造できる酸化物半導体の開発だったのです」と塚越は語る。

### 酸素かき離エネルギーに着目

塚越らが最初に着目したのが、IGZOという材料の不安定さだった。

「IGZOは、InとGaとZnの原子数が

1:1:1の構成の酸化物です。いずれの元素も、結合している酸素を引き離すのに必要なエネルギー量を示す『酸素かき離エネルギー』の値が低く、酸素がすぐに外れてしまうことを発見しました。これが、材料としての不安定さの原因であることに気付いたので」と塚越。

そこで、塚越らはまず、酸素かき離エネルギーが低く、不安定ではあるものの、移動度が高いInのみの酸化物に的を絞った。さらに、Inの一部を、酸素かき離エネルギーが高い元素と置き換えることで、材料としての安定性を高めようと考えたのだ。そして、あらゆる元素の中から希少な元素や放射性元素など実用化に向かない元素を取り除いていった結果、残ったのが、シリコン(Si)、タングステン(W)、チタン(Ti)の3種類だった(図2)。次に、塚越らは、この中からSiを選び出し、酸化インジウムに、酸化ケイ素を微量に添加したアモルファス薄膜を作製することにしたのだ。こ

れであれば、比較的低温で製造できる上、IGZO並みの移動度を実現できるはずだ。塚越らはこう考えた。

「計算や実験結果から、InをSiに置き換える量は原子数にして非常に微量でよいことがわかりました。Inがほんの少しSiに置き換わるだけで、材料としての安定性が大幅に増すことが確認できたのです。逆に、酸化ケイ素は半導体の絶縁膜に使われるくらいですから、多量に入ると、移動度が下がってしまいます。つまり、材料としての安定性を保ちつつ、移動度を低下させない量を見つけ出すことに成功したのです。」生田目はこう説明する。

しかも、塚越と生田目は、通常であれば何年もかかることを2年足らずで見つけ出してしまったという。それがNIMS オリジナルの「アモルファスInSiO」(酸化インジウムに酸化ケイ素を添加したアモルファス薄膜)だった。

## 高信頼性・高生産性を裏付ける「幸運」

そもそもTFTの製造には「スパッタリング」という成膜方法が用いられている。

「そのため、実際にTFTを作るには、まず、混ぜる元素の割合を算出して、ターゲット(スパッタリングの原材料)を用意し、それを企業の協力の下、半導体製造ラインで成膜してもらい、さらにでき上がったTFTの性能を我々の側で評価しなければなりません。この1回の作業で数か月はかかってしまいます。通常であれば、求める性能を出すまでには、この工程を何度も繰り返す必要があり、数年はかかる場所。それをたった2回で成功できたのは、ある意味、運が良かったかも知れません。しかし、その前段階で、様々な検証は綿密にしていたので、想定通りとも言えるでしょう」。塚越はこう振り返る。

このようにして作製された新たなTFTは、250～300℃という圧倒的に低い製造温度でありながら、従来のアモルファスシリコンの10倍以上の移動度を誇り、薄膜としての物理的、電子的な安定性も高いことが実証された。

「このTFTが実用化されれば、高い移動度は維持しつつ、面積をアモルファスシリコンの10分の1にまで小さくできるので、消費電力量を大幅に削減できるはずですよ」と生田目は語る。

## 大胆な発想ゆえの成功

しかし一方で、この成果に対する業界の反応は意外なものだった。

「従来のTFTの研究者にとって、我々のアプローチの仕方は、非常に斬新です。そのため、面白がってはいただけますが、あまり真剣には受け止められていません」。塚越はこう語る。

そもそもIGZOは、InとGaとZnが1:1:1の割合で含まれている「コンパウンド膜」でバルク材料だ。その半導体的な特性を利用しているのである。一方、塚越と生田目が開発した薄膜は、酸化インジウムに微量に酸化ケイ素をドーピングしたドーブ制御半導体だ。つまり、従来のシリコン半導体を作製するのと同じ発想に基づいたアプローチの仕方なのだ。これは、塚越と生田目が元々企業で長く半導体の研究開発に携わっていた背景と無縁ではない。

「しかも、酸化ケイ素と言えば、半導体では絶縁膜材料です。そんなものをドーブしようとは、良識ある研究者であれば、誰も考えないでしょう」と生田目。

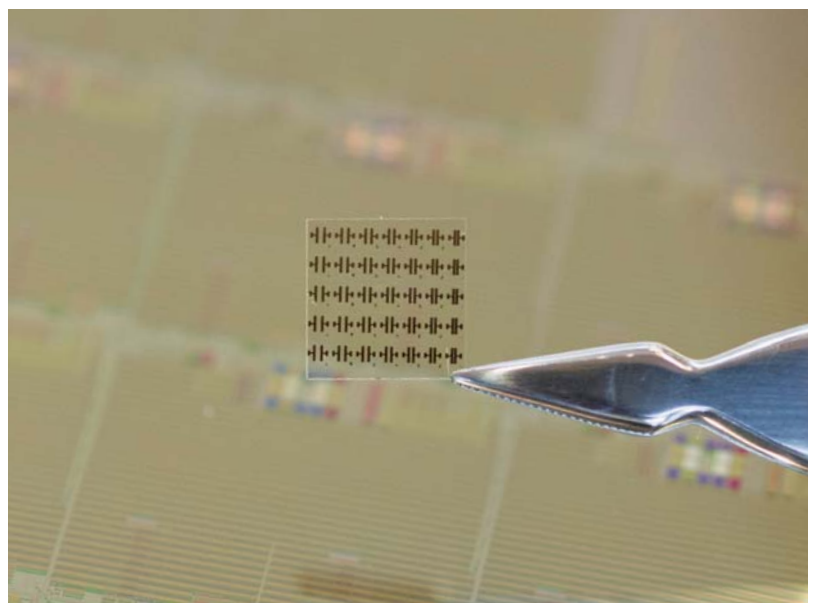
一方、塚越は、逆に原理的な正しさだけを信じて、先入観にとらわれることなく、自由な発想で挑戦したことが、今回の成功につながったと分析している。

加えて、この成功の背景には各企業の協力も欠かせない。ターゲット材料メーカー、製造装置メーカー、ディスプレイメーカーなど多くの企業が共同開発を申し出てくれた。

しかしながら、この新材料の特性にはまだ解明されていない点が多い。そのため、塚越らは現在、SPRING-8などの解析装置を使って、材料の基本的な特性の解明に尽力している。新たな特性が明らかになれば、その原理に基づき、移動度のさらなる向上や最適な製造方法の確立につながる。実用化に向けて大きく前進するはずだ。

「企業がこの材料の実用化、量産化に踏み切るためには、我々が高い信頼性を保証するデータを数多く用意する必要があります。実用化までにはまだ時間がかかりそうですが、第一段階はクリアしているので、是非とも実用化を果たし、低消費電力で駆動する次世代ディスプレイの開発に貢献したいですね。」クルマはもちろん、機械と人とのインターフェースを幅広く担うディスプレイ業界に斬新な風を吹かせる可能性に期待したい。

(文:山田久美)



ガラス上に試作した、NIMS独自の酸化膜トランジスタ。



世界最初のコンピュータが誕生したのは1946年のことです。大砲の弾道計算をすばやくするための計算機として、アメリカのペンシルバニア大学で作られたENIACという機械で、真空管を約18000本もつかった巨大なものでした。この機械が、それまで存在していたさまざまな計算機よりも、圧倒的に速いスピードで計算処理ができたので、コンピュータはしだいに、軍事目的だけでなく、いろいろな計算に用いられるようになりました。

それからわずか70年。いま、このコンピュータが社会のあらゆるところで使用され、私たちの生活を大きく変化させていることを考えると、その進歩のスピードにはまったく驚かされます。

誕生した当時、コンピュータは大きくて重いもの、値段の高いもの、電力を大量に消費するもの、故障しやすいもの、というのが4大特徴でした。そしてそれを動かすためには特別な専門知識が必要だったのです。

しかし、コンピュータは高速で計算処理ができ、大量の情報を的確に処理し、蓄積する能力を備えていたため、事務処理や設計・建築計算、機械の制御などにつきつぎと取り入れられ、新しい技術が応用されるようになって進歩のスピードを早めます。

トランジスタの発明は、その一つの大きなきっかけになりました。真空管のかわりにトランジスタが使われるようになって、「コンピュータは大型で壊れやすい機械」という概念が一掃されたのです。

初期の頃のコンピュータの優劣を判断する基準としてMTBFということばがあったのをご存知ですか。Mean Time Between Failureの略で、平均故障時間ともいいましょうか、たくさんの真空管をオン・オフさせて計算をおこなうので、ときどきタマ切れを起こす。タマ切れとタマ切れのあいだ (MTBF) が長いほどすぐれたコンピュータだということです。トランジスタになってタマ切れの心配がなくなったとたん、MTBFは死語になりました。

ました。

さて、トランジスタ化したコンピュータはまっしぐらに小型化、低価格化、省電力化、高信頼性化の道をつき進みます。コンピュータの値段が1万ドルを切ったとき、世界中が大騒ぎしたのですが、いまでは1台あたりのコンピュータの値段など、他の機械部分に比べて問題にならなくなっています。ちなみに、いま1台の乗用車に何台のコンピュータ (Electronic Control Unit) が積み込まれているかと自動車会社にたずねましたら「約100台です」という答えがかえってきました。

私たちは、コンピュータに囲まれた社会のなかにはいよいよ生きていくというわけでは

2001年、クリントン大統領は、いまに角砂糖1個の大きさの記憶装置のなかに、国会図書館に収められている全ての書籍の内容を記憶させることが可能になると宣言しましたが、コンピュータの進歩はそれにとどまらず、脳の機能に迫るものや、脳のはたらきをこえるものまで作り出すことができるかも知れないといわれるようになりました。

ナノテクの発達は、新しい素子をつぎつぎに生み出しています。ICやLSIの小型化にはそろそろ限界がささやかれています。その先には量子回路や分子・原子回路が実現するかも知れません。

コンピュータの進歩は私たち人間をどこへ連れて行くのでしょうか。

## 驚異的なコンピュータの進歩

文:えとりあきお

題字・イラスト:ヨシタケシンスケ



えとりあきお：1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。

平成27年度  
科学技術  
週間

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

# NIMS 一般公開

NIMS NOW

No.2  
2015

## 材料の研究現場へ、ようこそ。

### 研究所一般公開

4/15 (水)

9:30-16:00 **無料**

【千現地区・並木地区・桜地区】

### NIMSの誇る最先端の研究施設、 研究現場をご覧ください。

普段は見られない最先端の材料や、世界有数の研究設備を研究者自らが解説します。最先端の物質・材料研究について、研究者と直接コミュニケーションができるまたとない機会です。ぜひご来場ください。

### NIMSは企業との共同研究を推進しています。

企業の皆様向けの研究も数多く紹介いたします。

展示会などでご紹介した研究成果について、その研究現場を実際にご覧頂けるこの機会をぜひご活用ください。

### 青少年特別企画

## 子どもから大人まで参加しながら楽しめる！ 面白いイベントがいっぱい

例年好評の「材料の名前当てクイズ」や「刻印で作るキーホルダー」、  
「オリジナルメダル創り」など、参加して楽しむイベントが目白押し！  
ご家族でご来場ください。

4/19 (日)

10:00-16:00 **無料**

【千現地区】



NIMS NOW vol.15 No.2 通巻151号 平成27年3月発行

独立行政法人 物質・材料研究機構

(4月より名称が「国立研究開発法人 物質・材料研究機構」に変わります。)



古紙配合率100%再生紙を  
使用しています



植物油インキを  
使用し印刷しています

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1 TEL 029-859-2026 FAX 029-859-2017 E-mail inquiry@nims.go.jp Web www.nims.go.jp

定期購読のお申し込みは、上記FAX、またはE-mailにて承っております。 禁無断転載 © 2015 All rights reserved by the National Institute for Materials Science

撮影：石川典人 デザイン：lala Salon Associates株式会社