

## 電子材料開発における性能と環境の調和

工学研究科電子工学専攻（協力講座）  
機能創成工学分野  
藤田 静雄

### 1. はじめに

1997年12月11日、国立京都国際会館における第3回気候変動枠組条約締約国会議（地球温暖化防止京都会議、COP3; The 3rd Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change）の議論をふまえ、その後の地球環境保護に関する議定書が議決されました。京都で研究に従事する私たちにとって、環境保護への寄与は私たちの責任です。折しもこの原稿を書いているのは洞爺湖サミットの最中で、その大きな話題が「環境問題」です。いまさら1900年前半の暮らしに戻れない私たちは、その解決には科学技術の進歩に頼ることが必要です。

私たちの豊かな暮らしは、半導体をはじめとする多くの電子材料に支えられています。コンピュータや携帯電話の高性能化、インターネットの普及、ハイビジョン映像の放送・録画、大型フラットパネルディスプレイ、太陽電池、低燃費の自動車など、例は限りありません。1947年にゲルマニウム（Ge）を用いたトランジスタが発明されて以来、研究者たちは新しい半導体を開拓し、用途を広めてきました。それはひたすら新しい性能、高い性能を求めるレースであったといっても過言ではありません。

しかし、地球温暖化、資源の枯渇という人類の危機とさえ比喩される問題に直面している私たちは、この輝かしい半導体・材料技術に新しいパラダイムを求められるようになってきました。それは、環境にできるだけ優しい方法で高性能を求めること、高性能をもって環境保護に貢献すること、つまり「性能と環境の調和」です。これを果たす新しい技術を世に出すことが、研究者に対する大きな責務として懸けられるようになってきました。

### 2. レアメタルに支えられる私たち

私たちの暮らしにあるさまざまな電気製品、機械製品では、多様な元素がその性能を支えています。鉄（Fe）にクロム（Cr）やニッケル（Ni）を加えると耐蝕性が増し、これがステンレス鋼として厨房器具や車両の外面等に利用されています。チタン（Ti）合金は軽量で強度に優れ、飛行機の部材に用いられ燃費と性能の向上に寄与しています。高性能バッテリーにはリチウム（Li）、コバルト（Co）、ニッケル（Ni）、超小型スピーカーにはネオジウム（Nd）、ハードディスクにはコバルト（Co）、白金（Pt）などが用いられています。

一方、さまざまな金属資源には埋蔵量や産出量に限界があります。なかでも、地球に存在量が少ない、精錬が難しい、高純度の鉱石がない、といった理由で安定的に大量の材料を手に入れることが難しい元素を、希少金属すなわちレアメタル（rare metal）と呼んでいます。レアメタルは図1に示すように31種類あります。これらレアメタルは、古くにはステンレス鋼の例のように母体金属の特性を改善するための添加剤として少量利用されていました。ところが最近ではレアメタル自体の特性を主材料として利用する分野が増し、いっそうその使用量が増すことになっています。

いま、私たちが面している大きな問題の一つとして、インジウム（In）への不安があげられます。



せん。そこで開発されてきたのが複数の元素から構成される化合物半導体です。ガリウム砒素 (GaAs)、インジウム燐 (InP) はその代表で、携帯電話、DVD/CDプレーヤ、光通信などに広く用いられています。しかし、砒素や燐は毒性の強い元素で、ガリウムやインジウムはレアメタルです。毒性については、機器の中では化合物として利用され量も少ないためあまり危険ではありませんが、鉱石をもとに超高純度のガスを製造し、またそれを用いて実際の半導体を製造する過程での危険や環境汚染を避けるため、大規模な安全施設や高度な廃棄物処理が必要で、その分地球に過度のエネルギー負担をかけていると言えます。

それなら安全で地球に優しい材料を使った半導体で現在の半導体を置き換えることはできないでしょうか。残念ながら、GaAsやInPの素晴らしい性能を他の半導体で実現することは現時点では不可能です。しかし、本当に不可能なのか、さらにもっとすばらしい性能を持つ半導体があるのではないかと、そこに研究者の挑戦があります。このような観点で研究の対象とされている半導体を「環境半導体」と言います。具体的にはシリサイドと呼ばれるSi化合物 ( $Mg_2Si$ 、 $FeSi_2$ 、 $Ca_2Si$ )、炭化ケイ素 (SiC)、酸化物 ( $Cu_2O$ 、 $ZnO$ ) などがあげられます。この中でSiCは本学科で世界をリードする先端的な研究が行われ、地球に優しい材料を用いて電気エネルギーの効率的な利用に貢献することが期待されています。

最近になって、酸化物の半導体を開発しようとする動きが活発になってきました。私たちもこの点に注目しています。多くの元素は容易に酸化物を形成し、また酸化物は物質にとってもっとも安定な形です。「地球上に多く存在する元素の酸化物」を半導体として利用することができれば、資源の有効利用、地球への優しさ、という点で理想的であると言えるでしょう。しかし、酸化物というと半導体とはほど遠いものと考えられてきました。長い間「酸化物」のイメージは「セラミック」＝「陶器」でした。瀬戸物は $SiO_2$ です。CuOは陶器の着色剤です。歯科で詰めものに使われるセメントは $ZnO$ です。「錆」のイメージもあります。 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ などはいわば「錆」です。しかし最近の研究でいくつかの酸化物が「半導体」としての性質を持つことが明らかになってきました。いろいろな元素の酸化物が半導体として用いられれば、地球への優しさという点でとてもすばらしいことと思いませんか？

#### 4. 半導体を作るためのエネルギーを減らしたい

半導体を作るためには膨大なエネルギーが必要です。大型装置、真空装置、安全対策、廃棄物処理などの要求からです。その大きな理由は「酸素との戦い」と「毒物を外に出さない」なのです。例えばGaAsを作ることを考えてみます。GaAsを作る装置に少しでも酸素が入ってしまうとGaAsではなくGaの酸化物ができてしまいます。装置に少しでも漏れがあると毒物のAsが外に出て大変なことになります。これを防ぐために、外界と完全に遮蔽された複雑なシステムで半導体の育成を行う必要があります。それに加え、育成に用いた原料の余りを絶対に外に出さないための廃棄物処理システムが必要です。

それなら、半導体として酸化物を使うのならどうでしょう？「酸素歓迎」なのです。しかも大気中でもものを加熱すると必ず酸化されます。大気中の窒素と化合する(窒化)ことはありません。つまり、「酸素との戦い」と「毒物を外に出さない」という姿勢を大幅に緩めることができます。それだけ装置は簡単、使うエネルギーは少なく、廃棄物処理も不要です。あとは性能です。酸化物がなんとか半導体として使うことができたなら・・・

#### 5. 酸化亜鉛 (ZnO) :化粧品やセメントが半導体になる!

いま、世界的に注目を集め積極的な研究開発が進められている半導体材料があります。それは酸化亜鉛 (ZnO) という半導体です。ZnOは地球に大量に存在する元素 (Zn) の酸化物で、上で述べてき

た地球への優しさという観点にマッチする材料です。しかしZnOが注目されるのは単に元素の観点だけでなく、現在の半導体の性能を上回る働きが期待されるからです。その例を以下にいくつか示します。

- (1) 紫外線の光を出す、光を受ける、という性質に優れています。
- (2) 可視の光に対して透明です。見えない半導体というわけです。
- (3) 同じ材料で絶縁体から半導体、導体までの幅広い電気的性質を制御することができます。
- (4) 磁性を持つことで、スピンをを用いる新しい原理の動作が期待されています。
- (5) 電子の移動度（半導体中での走行速度）が大きいと期待されています。
- (6) 放射線への耐性が強く、宇宙空間で使う半導体として優れています。
- (7) 化学物質を吸着し検出する能力に優れています。
- (8) プラスティックフィルム、ガラスの上にも半導体の性質を持つ膜を作ることができます。
- (9) 直径数nm～数十nmの構造が自然に形成され、これらを極微小の素子として利用できます。

このような性質ゆえに、紫外線の発光・受光、電子タグ、ヘッドアップディスプレイ、液晶・有機ELディスプレイ駆動回路、電子ペーパー、透明の太陽電池、低消費電力論理回路、超高周波回路、光論理回路、宇宙船制御、ガス・バイオセンサなどの広い分野で従来の半導体を環境に優しい半導体で置き換える、あるいは従来の半導体にはない働きをする、という大きな期待が寄せられています。また、上記(3)の性質により、レアメタルを使うITOに代わり透明の電極・配線材料としてフラットパネルディスプレイに用いる計画が進んでいます。

実はZnOは10年あまり前までは半導体であると思われていませんでした。ZnOは単なる「白い粉」(図2)だったのです。その主な用途は、文字どおりの白粉(おしろい)、日焼け止めクリーム、ベビーパウダー、歯科治療用セメント、陶器、ゴム添加剤、傷スプレー、帯電防止塗料などなど。もっとも圧電性(圧力を加えると電気信号が発生する、およびその逆)を利用して周波数標準やフィルタなど電子部品にもかなり用いられてはいましたが、いわゆる半導体としての応用はありませんでした。それが「半導体として利用できたら素晴らしい」という研究者の挑戦意欲をかきたて、世界的な研究開発競争がわきあがったのです。

半導体としてのZnOの開発は、原子を丁寧に制御良く積み重ねるといふ、これまでに培われてきた半導体製造技術に支えられて急速に進んでいます。図3は私たちがZnO半導体の作製に用いている装置です。(a)はZnを含むガスとOを含むガスを基板の上で反応させてZnOを作製するもの、(b)は真空中でZn固体を加熱して得られるZnのビームとOとを基板の上で反応させてZnOを作製するものです。いわば近代の技術がこれまで化粧品やセメントとして用いられてきた材料に半導体としての命を与えたのです。

## 6. 環境に優しい方法でのモノづくりを目指して

図3に示すような装置を用いた場合に品質に優れたZnO半導体を得られるようになり、世界的に見れば、5年前くらいから青色や紫外の発光ダイオード、紫外線センサ、高速のトランジスタ、ガスセンサなどが出来るようになってきました。しかし、レアメタルや毒物を含まない酸化物なのに、それを作るためにこれまでの半導体製造技術を使っていたのでは勿体ない気がします。3(a)の装置ではZnOを作製する原料として発火性の強い危険な材料を使います。図3(b)の装置では装置を真空に



図2. ZnOの粉末

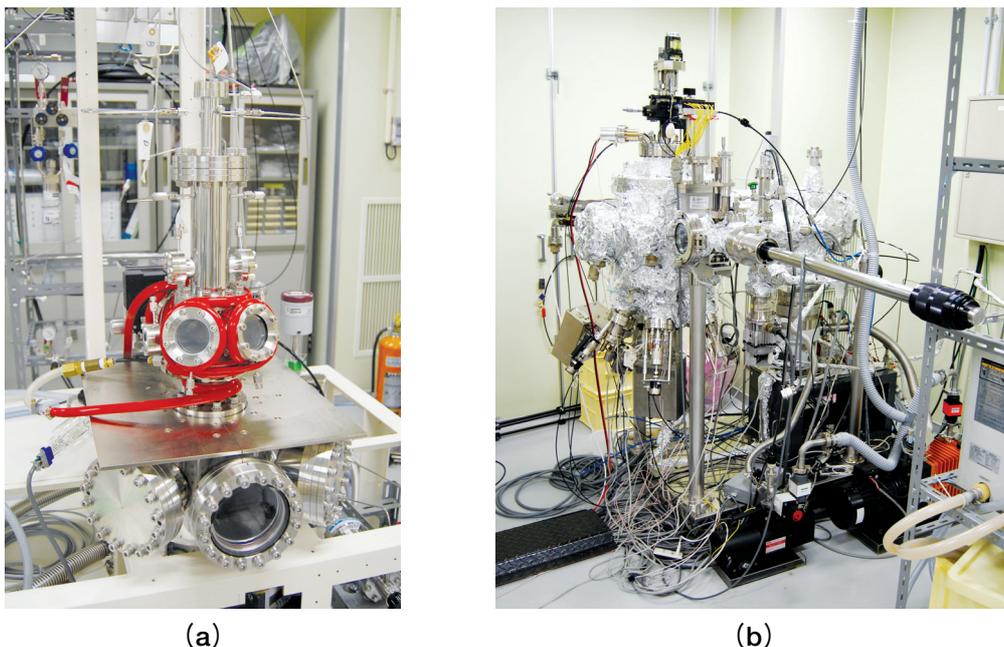


図 3. ZnOの作製に用いられている装置の例

保つための膨大なエネルギーが必要です。酸化物の原点に戻って、「酸素歓迎」であることを考えると、これまで「酸素との戦い」を元に確立してきた半導体清掃技術とは、まったく異なった方法で、エネルギー消費が少なく安全な技術で酸化物の半導体が作製できるのではという発想が生まれてきます。

ひとつの鍵は「大気の中で半導体を作る」。これで大掛かりな真空装置は不要になります。次に安全な原料の探索です。ZnOを作るには、Znを含むガスを原料として準備する必要があります。しかしZnを含むようなガスは発火性の強いものがほとんどです。そこでもう一つの鍵は「霧」(図4)。「霧」は液体が微粒子状になったもので、ガスではありませんが、風に乗って流れて行く挙動はガスのようなものです。そこで酢酸亜鉛など安全な原料の水溶液に超音波を加えて「霧」を作り、これを酸素ガスなどで基板の上へ送り届けます。喉を痛めた時に「ネブライザー」から薬液を吸入すると同じ原理です。

このようにエネルギー消費が少なく安全な技術でZnOを作製することができるようになりました。しかし半導体に求められるのはその性能です。わたしたちはこの技術に改良を加えつつ、得られたZnO半導体の物性を仔細に解析してその高性能化を追求しています。面白いことに、これまでの半導体製造技術である「外界から遮蔽された空間」ではZnOは酸素の不足に苦しんでいます。それに対してわたしたちの技術では十分な酸素に恵まれてZnOが育ちます。まさに「酸素歓迎」なのです。図5は単なるガラスのようですが、ガラスの上にZnO半導体が形成されています。この技術では、ZnOだけでなく、さまざまな元素の酸化物を作ることができます。その多くはもしかしたら半導体として素晴らしい性質を持つかもしれない、と期待されるものです。酸化物という安全な半導体を安全な技術で作製し、それらがわたしたちの将来の暮らしを支えてくれることは夢ではなさそうです。



図 4. 液体に超音波を加えることで得られる「霧」

## 7. できたモノが私たちの環境を守る

ZnOを例にとって、「環境に優しい材料を環境に優しい方法で作る」という将来の社会に向けたわたしたちのメッセージを述べてきました。それに加えてこのZnOは、さまざまな半導体機能を示すとともに、私たちの環境を守ることに寄与してくれると期待されています。半導体としてのZnOは紫外線の検出に適しています。わたしたちがこれから向き合わなければならない環境問題の一つに、オゾン層の破壊があげられます。オゾン層は地球に降り注ぐ紫外線を防ぐ役割をしていますが、その破壊により危険な紫外線の量が増してきます。図6に紫外線の波長を示しますが、紫外線はその波長が短いものほど危険です。危険な紫外線がどの程度増しているのか、ZnOはそれを私たちに教えてくれます。おそらく将来は携帯電話に紫外線のモニタが付き、今日は紫外線が多いので危険ということを教えてくれるようになるでしょう。また水道水の殺菌に、現在用いられている塩素に代わり、紫外線を照射するという技術が使われるようになっていきます。そうすると常に十分な紫外線が照射されて殺菌されていることを保証する必要があります。そのためにZnOによる紫外線モニタが期待されます。さらにガスセンサ、バイオセンサへの応用も進んでいます。このようにこの半導体は私たちの健康が外界によって侵されることのないよう守ってくれるのです。

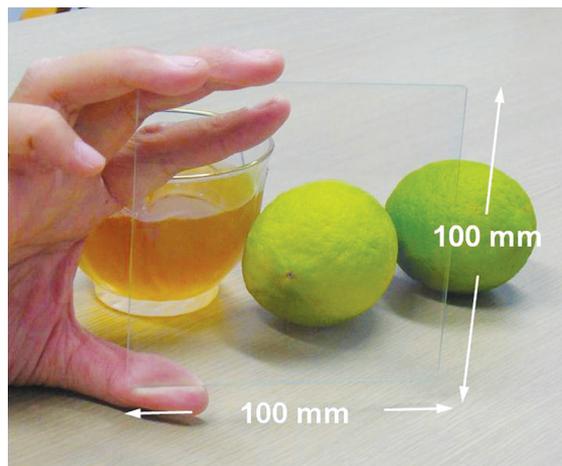


図5. ガラス基板の上に作製されたZnO半導体

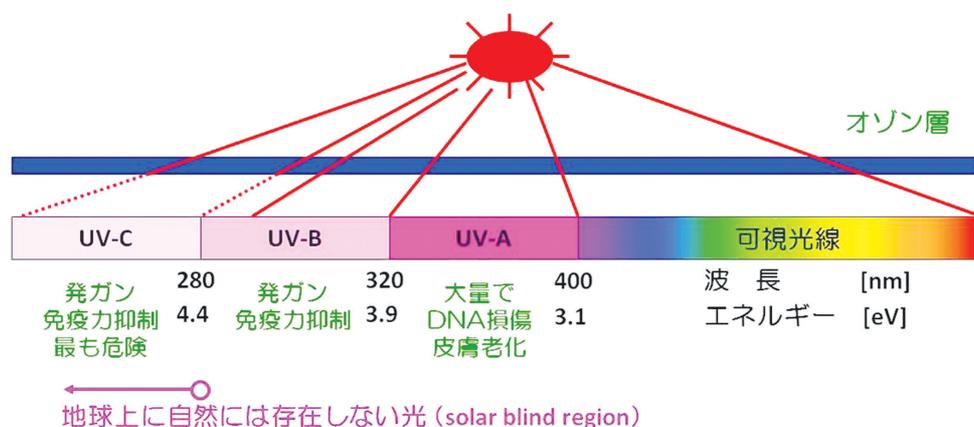


図6. 紫外線の波長

## 8. おわりに

環境に優しい酸化物を半導体として開発してゆく、それを作るのに環境に優しい技術を使い、応用として将来のわたしたちの環境を守るのに役立てて行く、この一連の意義ゆえにわたしたちの研究開発に各界から多くの期待をいただき、共同研究を進めています。そのため現状をお知らせする限界にきました。私たちは今の豊かな生活を捨てることはもはやできないところに居ます。それならば、この豊かさと、環境・地球への優しさをどのように両立してゆくのかということが、科学技術の大きな課題です。それを支えるのは若い人たちであり、地球の未来はその手に委ねられていると言っても決して過言ではないでしょう。