

訪問日 2016年8月3日

京都大学大学院 工学研究科 / 株式会社 FLOSFIA

金子 健太郎 助教/ CSO & 共同設立者

研究題名：コランダム構造酸化物を用いた高耐圧トランジスタの研究

京都大学・金子健太郎先生を訪ねて

当日は研究室がある京都大学ローム記念館に先生を訪ね、コランダム構造酸化物による混晶系を利用したパワーデバイスの研究開発という実用応用を目指した課題を中心に、基礎研究である混晶磁性半導体を使ったスピントロニクスの研究と、お忙しい中こちらの質問に対して丁寧に説明いただきました。具体的には、 α - Ga_2O_3 をベースとした α - $(\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})_2\text{O}_3$ 混晶を用いたパワーデバイスで、今この分野で最も脚光を浴びており、国内だけでなく海外からも講演依頼が殺到しているとのこと。先生は、現在の藤田研究室のD1のとき、現(株)FLOSFIA(京大発ベンチャー企業)を現社長の人羅氏らと共に創業、博士学位を取得後に学振PDを経て、再び藤田研に戻りました。FLOSFIAは、研究室が生み出した後述の『ミストCVD成膜技術』を武器に、パワー半導体への応用、更なる応用を目指した企業です。京大桂ベンチャープラザを借りて、現在資本金(資本準備金を含む)が6億円余り、従業員数も20名を超え、京大の新卒者も入っているそうです。自社内で製造から評価まで全て出来るようです。先生は京都大学とFLOSFIAの二足の草鞋を履いて活躍しています。

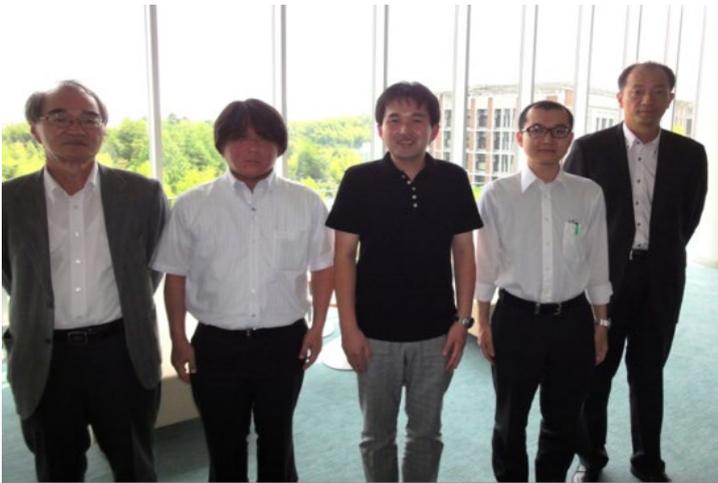
Ga_2O_3 には、大きく分けて α 型と β 型があり、 β 型はよく研究されており、 β ガリア構造という安定ですが、特異な構造をしています。注目している α 型はLEDの基板に用いられているサファイアと同じ構造をしており、サファイア基板上に非常にきれいな結晶ができるのが味噌です。ただ、 α 型は今まで作製できなかったようで、1966年に初めて β から α への相転移が報告されましたが、4.4万気圧、1000℃という作製条件でした。先生らはミストCVD法という独自の方法で作製に成功し、それが一つのブレークスルーになったとのこと。そこまでして α を作る理由は何かですが、パワーデバイス材料を比較すると、SiCはバンドギャップが3.3~3.4eVで、 Ga_2O_3 系は4.8~5.3eVあります。パワーデバイスのオン抵抗低減のポテンシャルを示す総合指数であるバリガ性能指数は、バンドギャップの3乗に比例します。この値が大きい程低オン抵抗が期待でき、 Ga_2O_3 系の潜在能力が覗え、 α 型 Ga_2O_3 だと更に大きいようです。技術の肝ですが、 α - Ga_2O_3 はコランダム構造をとり、よく用いられているサファイア(Al_2O_3)基板と同じ結晶構造で、 In_2O_3 にも α 型があります。それで、Al、Ga、In酸化物の3つのコランダム構造のラインが完成すると、バンドギャップが In_2O_3 の3.7eVから Al_2O_3 の9.0eVまで、非常に広い範囲でチューニングが可能になります。これにはGaNも及びません。ちなみにSiCはバンドギャップを操作できないという大きな欠点があります。 Al_2O_3 から In_2O_3 まで混晶薄膜を作製しても、コランダム構造系ですと比較的綺麗な混晶が作製できることが、X線回折測定から確かめられています。先生がコランダム構造 α - Ga_2O_3 の混晶薄膜を世界で初めて作製したのが2009年です。混晶は構造を維持しながら、 Ga_2O_3 のGaのサイトがFe、Al、In等に置換したものです。ミストCVD法は、粉末状のGaの有機金属の水溶液を超音波振動で霧化して、石英の反応炉に入れ500~800℃にすると、炉中にセットしたサファイア基板上に、大気圧下で結晶性の良い膜ができます。溶液中にドーパントを必要量仕込むだけで、ドーピング量は制御でき、ほぼ100%の再現性を持つ装置です。SiCは製膜温度が1800℃と非常に高温です。筆者は、ミストCVDで均質な膜が大面積に作製できるメカニズムを、共同研究先の東京大学の甘蔗先生の記者発表の席で直接聞くことができ、その不可思議な現象に驚いたことを覚えています。この大きい格子ミスマッチを緩和するために、格子整合ドメイン-マッチエピタキシーという成長

形態がとられています。各格子の最小公倍数の長さで、ピタッとマッチして綺麗に成長します。その周期が 8.6nm で、サファイアの結晶格子 21 個分と Ga_2O_3 の結晶格子 20 個分の長さと同じになっています。サファイアと Ga_2O_3 のミスマッチは大体 4 %位と非常に大きく、半導体屋に言わせると 1%でも大きいようです。多くの酸化物の中でワイドギャップ半導体に使えるものはまず、バンドギャップが大体 5eV 位で電気が流れることで、この値は 10~20 年前の常識では絶縁体で、半導体にならないと言われていました。更に、これほど大きなバンドギャップをもちながら、同じ結晶構造同士でバンドギャップがいじれるものが他に 2 つあるかですが、これは大変なハードルで不可能に近いことです。同じコランダム構造の $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ と $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ がいくらでも混ざり、綺麗な結晶になることが、例えばバンドギャップ 6eV の深紫外のレーザを作る必須条件で、最も苦勞する所です。ちなみに窒化物系の AlN でも高々 6eV です。 AlN-GaN 系では発光波長 200nm 位が限界ですが、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ は 137nm まで短波長化でき、水銀灯、エキシマレーザの代替になりえます。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ はアンドープで製膜すると完全な絶縁体で、Sn ドープして電気を流すことに成功したのが第二のブレイクスルーです。現在では Sn ドープで移動度が 20 cm^2/Vs 前後まで出ています。これは n 型です。現在 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ で最も求められているのが p 型です。まだ公表していませんが、目途が付き近々発表するとのこと。これによりバイポーラトランジスタが実現できます。ちなみに $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ には p 型が見出されていません。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の大きな成果としまして、横軸に絶縁破壊電圧、縦軸にオン抵抗をとると、実際に試作したデバイスにおいて、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のオン抵抗値が市販の SiC の約 1/7 の値まで低減し、世界最小値を実現しています。 α 型は準安定状態ですので、600℃以上で α 型が β になるというのが今までの通説でしたが、Al を少し添加すると 800℃位まで α 型を維持することを見出し、プロセス上の問題をなくすことができました。 Ga_2O_3 に共通した課題はパワーデバイスにとり致命的な熱伝導率の低さです。ミスト CVD では基板上に製膜したものを剥がして銅の基板などに貼り付けることでこの問題に対応できます。 SiC のデメリットはバンドギャップ制御できないことに加え、絶縁層ができ難く、MOSFET が難しいことです。電子移動度が 1000 cm^2/Vs 位ありますが、 SiC で MOSFET を作ろうとすると 1 を切り、途端に悪くなります。ミスト CVD は簡便な製膜装置ですのでコストは圧倒的に他に比べて安くなります。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ はサファイア基板にヘテロエピタキシャル成長させているため、基板との間に応力が発生し、貫通転位や基板のそりが問題となります。そこで、 GaN にも使われている ELO (Epitaxially Lateral Overgrowth) 技術を適用することで、応力が緩和され貫通転位が激減し、高品質な結晶が得られています。これは横方向選択成長ですが、基本的に転位線は成長方向に従って上に伸び、マスクにより横方向に成長させることで、基板に由来する転位線が伝わりません。現在、ユニポーラの SBD(ショットキーバリアダイオード)でやっていますが、やはり次に MOSFET、IGBT を目指したいとのこと。

最後に、大学人としてよりチャレンジングなテーマとして、コランダム構造を利用したスピントロニクスの研究をお聞きしました。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ と磁性材料の例えば $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ とを混晶にすれば、強磁性体であり半導体であるという 2 つの性質を持つ材料になります。その材料を使って、今のスピントランジスタでできないことをやろうとしています。コランダムのよい所はただ混ぜるだけで、ぴたり格子整合する系ができることで、つまり格子長が全く同じ系で、コランダムでしかできません。単に磁性材料が析出、凝集しているのではなく、TEM のスポット観察からも完全なコランダム構造を示され、X 線のロッキングカーブの半値幅の値も 50arcsec と綺麗な結晶を示す鋭いピークが得られています。格子長が同じだと結晶格子に起因するスピン散乱が理論的にはゼロになり、スピンの強磁性体の結晶から実際に電気が流れているチャンネルに無散乱で伝わることです。これによりスピンの寿命が nm オーダーから μm オーダーの飛躍的に伸びます。課題は、今やっている鉄系だと強磁性が弱い、もっと磁気モーメントを大きくして、はっきりしたスピン信号にしたいとのこと。

ベンチャー企業の経営者と第一線の研究者ならではの非常に分かりやすく、メリハリの利いたご説明で

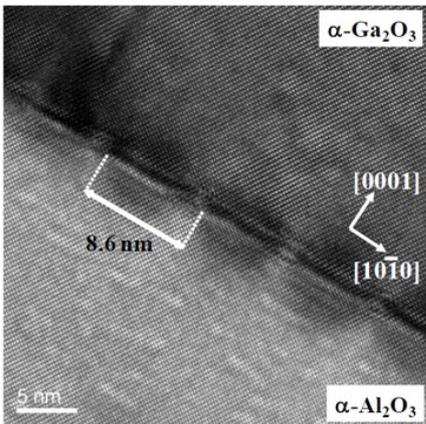
した。日本の競争力はこういうベンチャー企業の活躍に依存することを感じさせた訪問でした。
 (2016年8月3日、技術参与・飯塚)



中央が金子先生



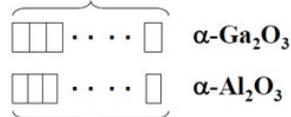
晶帯軸 $[11\bar{2}0]$



$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ と $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の $10\bar{1}0$ 方向の格子長から計算すると

$$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3 \quad d_{10\bar{1}0} = 0.43 \text{ nm}$$

$$n = 20 = 8.6 \text{ nm}$$



$$n = 21 = 8.6 \text{ nm}$$

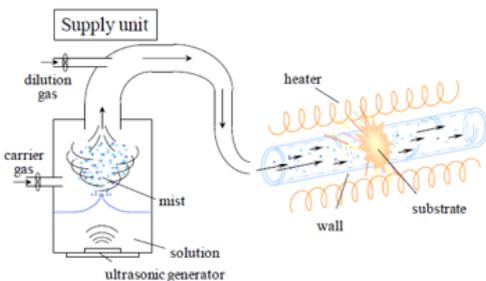
$$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \quad d_{10\bar{1}0} = 0.41 \text{ nm}$$

ドメインマッチングエピタキシー

$[10\bar{1}0]$ 方向に沿った明瞭な周期構造を確認

$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 界面の断面TEM観察

管状炉型ミストCVD装置



- 大気圧下での製膜が可能
- 薄膜作製のサイクルが短い (作製サイクルが短いので物性探索が容易)
- 混晶作製は、前駆体溶液の混合で可能 (供給ラインの増設が不要)
- 高品質酸化物薄膜の製膜が可能
- **準安定相である $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の高品質膜の作製が可能**

ミストCVD法による製膜