



## プロフィール

B.S.E.E., M.S.E.E., and Ph.D. in electrical engineering from the University of Notre Dame  
 Founder of Ramtron International Corporation  
 Chairman and Founder of Symetrix Corporation  
 2006 IEEE Daniel E. Noble Award "For Fundamental Contributions and Commercialization in the Field of Ferroelectric Random Access Memories (FeRAM)"

University of Colorado Colorado Springs  
 (コロラド大学コロラドスプリングス校)  
 電気・コンピューター工学科 教授  
 研究開発科 副学部長

## Dr. Carlos Paz de Araujo

今回のSamco-Interviewはコロラド大学のDr. Carlos Paz de Araujo にCeRAM( Correlated Electron Random Access Memory )のご研究についてお話を伺いました。CeRAMはSymetrix社が開発している遷移金属酸化物を用いた次世代ReRAM( 抵抗変化型メモリ )です。

### Symetrix社の活動について 教えてください。

Symetrix社は9年前からCeRAMに専念して研究開発を行ってきました。CeRAMは材料科学における真のブレークスルーと言えます。半導体へのドーピングには、ホウ素(B)やリン(P)といった原子が使われています。CeRAMは、世界で初めて分子であるカルボニル(Carbonyl)をドーピングしました。この手法の確立は容易ではなく、理論を構築してから実際のデバイスを確認するまでに長い時間を要しました。

Symetrix社はテクノロジープロバイダーとして、新しい不揮発性メモリの開発のような、社会が実際に直面している問題の解決を目指しています。私たちは外部資金を調達していませんので潤沢な研究開発費はありません。そのため、CeRAMの研究も少しずつ進めてきましたが、同時にその技術の大きな価値に気づいていましたので、特許も取得してきました。

### CeRAMの開発を始められた 動機は何でしょうか。

当初私は低消費電力で良好な不揮発性メモリであるFeRAM(強誘電体メモリ)について研究していました。しかしながら、強誘電体の活性化温度が非常に高いのでハイエンドのリソグラフィにおける応用に対して限界がありました。そこで私は、CMOSに対して互換性のある低温でも不揮発性メモリとして使

えるデバイスの新しい技術の探索を始めました。そして目を付けたのが、ReRAMです。私は、最初は他の多くの企業が考えているコンセプトに従っていましたが、ReRAMを研究していくうちに理論的な欠陥があることがわかりました。これがわかるまでには多くの時間を費やしました。

### 理論的な欠陥とは何ですか。

それは導電性フィラメントの制御です。ReRAMの上部電極と下部電極の間にある抵抗変化層は金属酸化物でできているため、初期状態では非常に高い抵抗値を持ちます。導電性フィラメントとは、抵抗変化層に高い電圧を印加し絶縁破壊することで形成される酸素欠損領域のことです。

人々はフィラメントがReRAMのメカニズムであると考えています。確かにフィラメントが形成されることでデバイスが駆動するように見えますが、実際のメカニズムは電子密度の変化です。また、フィラメントは偶発的に起きる表面効果であり、再現することが難しく、確立した技術とは言えません。その上、フィラメントが物質内部まで伸び、実質的に導通が取れるのは陽極近傍のごく小さな領域です。このことは高電界がかかり、デバイスが壊れやすいことを意味します。

### CeRAMと他の抵抗変化メモリの 主な違いは何でしょうか。

一番の大きな違いは、CeRAMは質量が移動しないことです。通常のReRAMはメモリ内部

をイオンが移動しています。これに対して、CeRAM内部では原子やイオンを動かすことも原子と空孔を反応させることも電子を注入する必要はありません。CeRAMでは、遷移金属原子によって決められるポテンシャル面は電子のみによってコントロールされます。より正確に言えば、遷移金属イオンのサブバンドの電子密度を変えることでポテンシャル面をコントロールすることができます。これにより、フェルミエネルギー近傍の状態密度の変調が可能となり、コントロール可能なバンドギャップが現れます。そのバンドギャップが広がると絶縁体となり、逆にバンドギャップが狭まり、事実上なくなると金属になります。この現象はMott転移と呼ばれています。薄膜状態ではカルボニルをドーピングすることによってのみMott転移を安定化させることができます。

Mott転移を利用するこの仕組みはそれぞれのイオンのエネルギーを単独で操作するようなものです。そのため、単結晶である必要がありません。多くの人は、きれいな単結晶は性能がいいと考え、それを作ろうと研究をします。しかし、CeRAMにおいてそれは何の意味もありません。なぜなら単結晶を作るとは、あくまで原子を遷移するフェーズだからです。これは、k-independent self-energyとして知られ、私たちの論文が『The Journal of Applied Physics』2011年5月31日号に掲載されました。

**耐久性、大容量、高速、低コスト、低消費電力  
 といったメリットのあるCeRAMは、次世代メモ**

りとして実用化が期待されています。そのために、重要と考えられることは何でしょうか。

もう少し時間が必要です。私たちは既に多くの装置メーカーやデバイス設計の会社と協力して開発を進めています。既にCeRAMを待っている会社もあります。ただ、ピッチ22nmの高いレベルのリソグラフィーを使用するため、ファウンドリでしか作れません。ちょうどファウンドリでCeRAMを作り始めたところですが、現在は少し進めて、フィードバックをするという開発プロセスで行っています。技術的にはそれ程難しくありませんが、それでも、連続したすべての工程がうまくいくようにデバイスを設計し、製造することは非常に難しいことです。

**顧客にライセンスを購入してもらったための説得は大変でしたか。**

今回はあまり大変じゃありませんでした。なぜかという、私たちの論文などを見て、CeRAMに関心を持ってくれた会社があったからです。そういった会社の多くは従来型のReRAMに満足していません。うち一社は既にCeRAM技術の独占ライセンス権を取得しており、Symetrix社はその会社のコンサルタントになります。名前は言えませんがこの分野で有名な大手企業で、千社以上の顧客を抱えています。その顧客へもCeRAMのサブライセンスを供与する予定です。

このビジネスモデルであれば、マーケティングコストが必要ありません。また、ライセンスを供与した会社の製造設備を借りれば、洗練されたプロセス装置及び設計をすぐに使用することができます。

**技術を供与する場合、最も大きな課題は何でしょうか。**

技術の説明が一番の課題です。私たちの技術は、普通の半導体物理では使わない、むしろ物性物理などの分野で扱う材料を使う革新的な技術です。それは非常にハイレベルで、標準的な半導体工学では学ばない、理論物理学の分野の理解が必要になります。私たちはCeRAMを完成させるために、Mott転移の根源的な物理的性質をいくつか再発見しました。こういったハイレベルな技術を、ライセンスを供与する人々にわかりやすく伝えることが重要になります。こういった技術の伝達が必要なため、製造プロセスを構築するのに時間がかかります。

**日本との関係についてお聞かせください。**

松下電子工業の研究部門の中心人物であった加納剛太先生と懇意にしています。1980年代に、私たちはガリウムヒ素 (GaAs) のデバイスを手がけました。特にPHSなど初期の携帯電話用のデバイスにGaAsとHigh-k材料を用いたのは私たちが日本で初めてでした。1991年までは、FeRAMの研究をしました。また、2000年代前半には私たちが開発した強誘電体素子を使用したICカードSuicaが世に出ました。その他にも、ソニーやセイコーエプソン、NECとの仕事で日本に来ることもありました。

日本には優秀なエンジニアが多く、私たちが長年夢に描いてきたことをたくさん実現してきました。日本の会社、特に松下電子工業の存在抜きには、今のSymetrix社は存在しえなかったでしょう。

**最後にサムコに対して一言お願いします。**

サムコの装置は、Si半導体ではなく化合物半導体や電子部品など幅広い用途に使われていると聞きました。よい戦略だと思います。Si半導体以外の用途であれば、数十nmピッチといった高度なリソグラフィーにデバイスの製造工程を制限されませんので、さまざまな装置が利用できます。超高機能を追わないで、むしろさまざまな分野の材料を開拓することは、投資利益率が高くよい戦略であると思います。

CeRAMも同様のことが言えます。今、ロジックのみのチップを作成することはありません。その代わりに、不揮発性メモリにロジックを組み合わせたチップが作成されます。CeRAMはその役割を担います。なぜなら、CeRAMには最先端のリソグラフィーは必要ではなく、80nmピッチ程度の技術で製作することができます。これには、FLASHメモリの半分のコストしかかかりません。酸化物にカルボニルをドーピングするという新しい技術は将来的に多くの応用分野で使われると思います。サムコはさまざまな装置を持っていますので、CeRAMや酸化物など新しいデバイスの製造において貢献するだろうと期待しています。サムコと再び仕事ができれば大変光栄です。

**お忙しいところ貴重なお時間を頂き、誠にありがとうございました。**

2016年3月25日、当社生産技術研究棟でのDr. Araujoの講演会の際に取材