

エレクトロニクス材料・素子の新しい可能性を求めて



小林 猛*

Quest for New Functional Electronic Materials and Devices

Key Words : oxide, diamond, medical, laser, GaN

1. はじめに

大阪大学大学院基礎工学研究科・電子光科学分野・量子機能デバイス講座・小林(猛)研究室の紹介をさせていただき機会をニューミレニアム・イヤーの初頭に頂き、まことに光栄なことと編集委員会に感謝する次第である。

エレクトロニクス材料・素子の研究開発が情報通信と同様に如何に大事であるかという事実は近年の米国の好況ぶりからも一目であり、21世紀にもこの流れは続いていくと考えられている。当研究室ではながくエレクトロニクス材料・素子の教育・研究に携わり、大学院生や学部学生の気持ちの中にとくに“チャレンジ精神”を育むよう教育指導に注意を払ってきた。その意味からも研究において、「常に特徴のある創意豊かな課題」の設定が心がけている。紙面に限りがあることから、本稿では現在進めているテーマの中から2~3のトピックスについて紹介させていただく。

2. 研究テーマの概要

職員5名(事務補佐を除く)、大学院博士後期課程4名、前期課程12名、学部8名の多人数研究室なるが故にテーマも多い。大分類すると4項目ある。すなわち(1)機能性酸化物導体(超伝導体、導体、半導

体、磁気抵抗材料)、(2)ワイドギャップ半導体(ダイヤモンド、GaN)、(3)酸化物超伝導量子干渉装置(SQUID)の医用応用、(4)レーザーアブレーションの基礎研究、である。総じて言えることは、扱っているいずれの研究内容も実用にまだ距離を残しているのでリスクな感を拭い去れないが、そこはチャレンジ精神でカバーしている。

3. 酸化物能動素子の可能性を求めて

酸化物の機能は多様であり、固体レーザー・強誘電・磁性・焦電、等々は個々の機能を活かして広く実用されている。酸化物系に半導体素子並みの能動性が備われれば(キャリアーの概念、少数キャリアー注入の概念など)、その応用の途は飛躍的に膨らむと期待される。当研究室では酸化物半導体によるpn接合やpnpバイポーラトランジスタの実現を目指し、薄膜の成長研究を鋭意おこなってきた。レーザーアブレーション技術の改善により、ようやく最近になって結晶欠陥の改善が進み、p形、i形およびn形酸化物半導体の高品質薄膜を得ることができるようになった。この成果をもとに、1998年度に世界に先駆けて全酸化物半導体pinダイオードの作成に成功し、酸化物能動素子の実現可能性を示した。

$p\text{-(Ni}_{0.99}\text{Li}_{0.01}\text{)O/i-SrTiO}_3/n\text{-(La}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{)TiO}_3$ ダブルヘテロ接合で構成するpinダイオードをNbドープSrTiO₃単結晶基板の上にエピタキシャル成長した。3つの層はかなりよく格子整合しているためにヘテロエピタキシャル成長に関わる問題は大幅に軽減した。研究開始当初は格子欠陥にトラップされる空間電荷によりダイオード電流は殆ど制限され(SCL電流)、挫折寸前まで追いやられたことも今では楽しい思い出の一つである。計測不能の高レベルにあったトラップ密度は現在では 10^{16}cm^{-3} オーダーにまで低減できている。試作した全酸化物半導体



* Takeshi KOBAYASHI

1944年4月18日生
1972年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程修了
現在、大阪大学大学院・基礎工学研究科・物理系・電子光科学分野・量子機能デバイス講座、教授、工学博士、電子材料・素子
TEL 06-6850-6310
FAX 06-6850-6341
E-Mail kobayashi@sup.ee.es.osaka-u.ac.jp

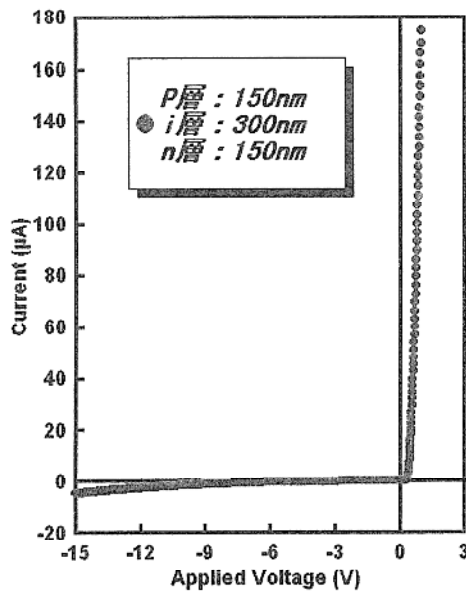


図 1

pinダイオードの華麗な電流-電圧特性を図1に示しておこう。詳細な説明は省略するが、ダイオードの各種のデータを解析することから、半導体で一般に使われている接合のバンドダイアグラム記述が酸化物系にも適用できることが判明したのは学術的な面から意義深い。周知のように酸化物導体(半導体)の中では電子相関が強いためにバンドダイアグラムの記述を案じる声があったが、我々の結果はその種の懸念を一掃したように思える。

我々の実験素子では真中のi-SrTiO₃層に電子・正孔が注入されて再結合していることになる。半導体DHレーザーでよく知られている注入モデルである。磁気抵抗材料の(LaSr)MnO₃をp層に使うと、p層で電子注入・再結合させることができる。このような電子ダイナミクスを利用すれば新しい光・磁気・誘電機能酸化物デバイスの誕生も可能になるかもしれない。

簡便な生体磁気計測の可能性を求めて

SQUIDは電子の波動干渉性を使う量子機能装置の代表格の一つであり、超微弱磁気計測において代替のない突出した性能を発揮する超伝導エレクトロニクス装置である。近年、液体窒素冷却だけで十分に作動できる高温超伝導SQUIDができるようになり、低廉な実験用のキットが市販されるようになった。筋肉の動きに付随して生体の各所から磁気信号が発生しており、その信号を計測して診断に生かす

ことができる。現在、脳情報処理解析・心臓磁気解析・胎児心磁解析に向けてSQUID利用の研究に視線が集まっている。SQUID磁気計測は非接触計測ながらも空間分解能が高いことに加え、ベクトル解析もできるので情報量が豊富である、という大きな特徴があることを強調したい。

高感度特性を達成するには、(1)SQUIDの接合の研究、(2)接合における量子磁束(ボルテックス)ダイナミクスの把握、(3)信号処理、(4)耐環境磁気雑音特性の向上、等々の基本事項に進展が望まれる。幸い平成10年度から12年度までの3年間の予定で文部省科学研究費補助金「特定領域研究A」(ボルテックス・エレクトロニクス)の採択を得ることができ、プロジェクト研究として基礎研究部分を進めることができる機会を獲得できたのは誠にありがたいことであった。研究室では上述した課題の中で(1)、(3)、(4)に関して取り組みを行っている。

昨年度の7月に高校生向けにエレクトロニクス1日体験入学を学科行事として開催した際に、40人以上の高校生の心臓磁界を次々に表示していく様子は圧巻であり、(図2)、簡便な高温超伝導SQUIDの威力を遺憾無く発揮する一幕を眼にすることができた。超伝導研究の観点から言えば、少し前には高温超伝導体のデモンストレーションと言えは“くるくる回る円盤”であったのは記憶に新しいが、ようやくしてデモンストレーションの内容を前進させることができたのは意義のあることであろう。



図 2

5. レーザーアブレーションの基本に立ち返って

新しい材料・素子の研究を進める上で薄膜成長は最も重要なパートである。当研究室ではLPE、

CVD, MBE, スパッターなど各種の手法に関わってきたが、10年前よりレーザーアブレーションの研究を開始し、現在では3台のPLD装置を整えて酸化物(各種酸化物)、窒化物(GaN)、フッ化物(CaF₂)の薄膜材料研究に当たっている。

レーザーアブレーションの研究開発当初のことであった。どのような機構でターゲットから粒子がアブレートするの？、なぜ粒子が高速飛行するの？、なぜ飛行粒子がプラズマ化するの？、薄膜表面にミクロン径のドロップレットが飛散するのはなぜ？、等々の首を傾げる疑問が続出の状態であった。国内外の研究者の間でもレーザーアブレーションについては十分理解されていない状況であった。「レーザーアブレーションの基礎過程をきちっと解明」を合言葉に、急がば回れの精神で研究を進めることに決めたのはこのときであった。超高速フレーミング・ストリークカメラを整備して、50ナノ秒単位で粒子が飛行する様子を連続撮影しながらアブレーション基礎過程の解析を進めると同時に問題解決に向けた新しいアブレーション手法の開発を行ってきた。

アブレーション粒子が真空中を飛行する際、粒子のエネルギー分布はシフトド・マクスウェリアンには従わないとする定説ができていたが、我々の詳細な解析(カメラの焦点深度を考慮した解析)によりシフトド・マクスウェリアンそのものであることが判明し従来の考えを正した。ドロップレット問題を根底から解決する“エクリプス・レーザーアブレーション法”、

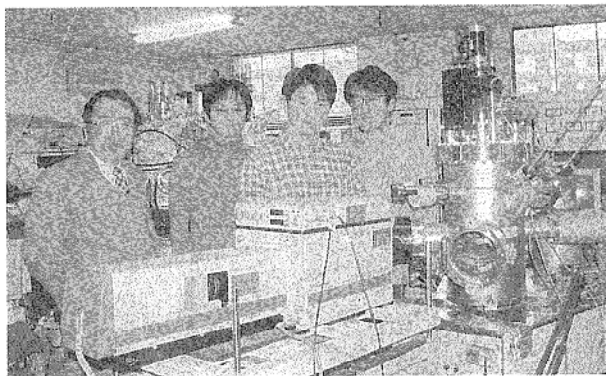


図 3

アブレーション粒子のイオン化を強化する“アルゴン・マジック法”を提案しい高品質薄膜成長に貢献してきた。(図3)

最近の成果として“オーロラ・レーザーアブレーション”があるので是非ここで紹介したい。アブレーション粒子はイオンとレーザーの瞬時(～ナノ秒)の相互作用により大きなエネルギーを吸収し、基板に向かって高速飛行を始めるが、飛行中に背景ガス粒子と衝突しながらエネルギーを失うためにブルームの発光は低下し、最終的に粒子は基板に軟着陸することになる。高品質薄膜成長には着陸した粒子に泳動エネルギーが必要である。飛行粒子の活性度をコントロールするために考案した手法が“オーロラ・レーザーアブレーション”である。基板ホルダー背面に永久磁石を配置して粒子飛行の軸方向に収束磁界を与えるだけのことであるが、磁界ミラー効果とラーマー運動による電子衝突確率の向上によりアブレーション粒子のプラズマ・ブルームの様子を激変させることができた。これにより、基板近くに粒子が進行したときにプラズマのイオン化を急激に強めることができ、活性度を上昇させてから粒子を基板に着陸させることができるようになったのである。実際に反強磁性NiO薄膜をエクリプス・オーロラ法でMgO単結晶基板の上に堆積させたときに実に室温状態でエピタキシャル成長が可能であった。オーロラ法を使わないと不可能なことであった。現在、オーロラ・レーザーアブレーション法は実用化に向けて企業開発の最中である。

6. お わ り に

紙面の都合で3つのトピックに絞って紹介させて戴いた。ダイヤモンドやGaNはワイドギャップ半導体として今後必要度が増してくる材料である。現在CREST, FCTのプロジェクトの中で鋭意研究に進めていることを記しておく。これからの国際競争に勝ち抜くために新技術の創製が叫ばれている。しかし挑戦的な研究には周囲の理解と支援が不可欠である。今後とも暖かい不断のご支援を戴きますようお願いする次第である。