

8-27
2007

NE



透明回路

NIKKEI ELECTRONICS
日経エレクトロニクス



■ コンセントになる「USB」

■ 「組み込み大学院」が日本にできたわけ

東海大学・大原隆之氏 対 トヨタ自動車・櫻井隆夫

■ 論文 電気製品はどこから発火したのか

■ 論文 「燃えない電池」を求めて

■ 論文 2Mビットのスピンの注入方式RAMを試作

「水晶の製造過程と同じ水熱合成法¹が利用でき、装置も水晶のものを流用できる」(東京電波)。このため、量産が進めば、 Al_2O_3 (サファイア)基板に迫る低コストで生産が可能になるという。この点に注目しているメーカーは多いようだ。「ZnO基板は2006年ころから急激にメーカーへのサンプル出荷が多くなった」(東京電波)。

東北大学はp型ZnOについて、現在はロームと共同研究を進めている。ロームはこれまでに、GaNを用いたLEDの電極に透明なZnOを使い、金属電極の場合に比べて2倍の発光効率を達成している²。一方、東北大学は基板と電極以外はZnOで構成したLEDを開発している。このため「電極から基板まですべてをZnOで作製することは可能」(ローム)という。半導体中のキャリア濃度はn型でも $10^{17}/\text{cm}^3$ 程度であるため、透明性に影響はない見通しである。

ZnOが「本当の半導体」に

ZnOのp型半導体の実用化について、東北大学の川崎氏は強気の見方をしている。「ZnOをp型にするのが大変なのは確かだが、p型にならない理由はない」(同氏)と断言する。

川崎氏によれば、ZnOをp型にするのが難しい理由は電子を供給する不純物が多いことにある。ZnO結晶中では一般には不純物が多く、それが原因で電子濃度が高い。その結果、半ば自然にn型半導体、あるいは導電膜として機能する。これをp型にするには「まずは徹底的に不純物を減らして純度を上げなければならない。その後、そこにホールを供給する窒素(N)を添加するというのが我々の方針である。ある意味、海から塩を抜いて「真水」を作るような作業だが、それはかつてのSiでも行われてきたこと」(川崎氏)。2004年の成果もこの方針で達成したという。

これを裏付けるように川崎氏の研究グループは2007年1月、ZnOとZnMgOのヘテロ構造の酸化物で量子ホール効果³を観測したと発表した⁴。量子ホール効果は「それ自体が実用につながるわけではないが、半導体として高い性能を発揮できることを証明するもの。ZnOの純度が高く、欠陥のない「真水」の結晶を作製できたことで観測が可能になった。これだけでZnOが本当の半導体の仲間入りをした」(川崎氏)という⁵。現在はこの質の高いZnOを用い、キャリア濃度

を高める開発を進めている。

多結晶では課題残る

透明半導体のZnOには、p型半導体の開発のほかにもう一つ大きな課題がある。結晶粒子間の境界である「粒界」の問題だ。むしろp型半導体よりも厄介な問題で、解決にはやや時間がかりそうだ。

ZnOは単結晶であれば $100\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える高いキャリア移動度が得られているが、多結晶では1〜数十 cm^2/Vs 止まり。キャリア移動度が粒界によって抑えられてしまうためだ。しかも、結晶粒子の大きさがバラついている場合、TFT特性のバラつきも大きくなる。比較的低いキャリア移動度では、特性バラつきの小さいa-IGZO TFTなどが強力なライバルになる(表1)。キャリア移動度が多少高くても、既存の低温多結晶Si TFTが前途に立ちほだかる。結局、ZnOが半導体として大きく飛躍するには、多結晶でかつ単結晶並みの高いキャリア移動度が必要になる。

粒界を透明にしたい

東北大学の川崎氏の研究グループは、ZnOのp型半導体の開発と同時に、この粒界の問題にも取り組んでい

表1 ZnOとa-IGZOの性能と課題

半導体材料	現在のキャリア移動度	主な製造プロセス	プロセス温度	基板	主な課題
ZnO(多結晶)	1〜66 cm^2/Vs	マグネトロン・スパッタリング、レーザー蒸着など	200℃以下	ガラス、Siなど	結晶粒子を密着とする結晶のバラつき。水酸、アルカリに弱い
ZnO(単結晶)	70〜250 cm^2/Vs	分子線エビタキシャル法(MBE)など	500℃前後(半導体)	Al_2O_3 系、ZnOなど	製造コストが高い
アモルファスInGaZnO(a-IGZO)	1〜100 cm^2/Vs	マグネトロン・スパッタリングなど	室温〜150℃	プラスチック基板も可能	厚膜にする場合はInやGaの材料コストが課題

¹水熱合成法=水晶など単結晶の製造方法の一つ。水にアルカリ液で溶かした水晶などを、温度を数百℃、時間を数百〜1000分ほどにすることで結晶成長状態に保ち、時間をかけて自結晶化させる。東京電波によれば、結晶成長の時間は、水晶の場合は2〜3カ月だが、ZnOは4〜5カ月かかるという。

³量子ホール効果=ヘテロ構造の半導体の界面などに生じる2次元電子ガス(2DEG)を強い磁場中に置くと、電子のホール伝導率が離散的な値を持つ現象。2次元電子ガスとは、ヘテロ構造の半導

る。川崎氏は最近の研究で「粒界を電子にとって透明にする手掛かりが出てきた」という。つまり、粒界があっても、そこで電子や正孔といったキャリアがトラップされず、キャリア移動度が落ち込まないようにする条件が分かってきたとする。

同氏のグループは、結晶粒子が非常に大きい多結晶のZnOを作製し、その粒界の性質を詳細に調べた。その結果、ダイオードなどで知られるショットキー障壁が粒界の両側に生じており、それがキャリア移動度が下がる主な原因ということが分かった。一方、「結晶粒子ごとに結晶方位が変わることに対しては電子や正孔は鈍感で、キャリア移動度はあまり左右されない」(同氏)。

ただし、実際の多結晶においてショットキー障壁をどのように制御していくかについてはこれからの課題である。粒界を制御した多結晶ZnOの実用化は、キャリア濃度の高いp型ZnOよりもやや先になるかもしれない。

Siを超える性能も可能か

ZnOはGaNやダイヤモンド半導体と同様、ワイド・バンドギャップ半導体の一つである。このためp型ZnOを使わなくとも、キャリア移動度が高い

体の界面に広がる高濃度の電子の層。HEMTは、電子濃度が高く移動度も大きい2次元電子ガスをチャネルとすることで、トランジスタの感度を高めスイッチング周波数を高速化する。

注1) Si系半導体では1980年、GaAs系半導体では1982年にそれぞれ初めて量子ホール効果が観測された。

単結晶ZnOが手に入れば「単結晶Siの性能を超え、GaNなどと同様に高電子移動度トランジスタ(HEMT)やパワー半導体として使える可能性もある」(大阪工業大学 電子情報通信工学科 教授の矢野満明氏)と考える研究者もいる。実際、前述した単結晶のZnOとZnMgOの組み合わせでは、GaNを用いたHEMTにもある2次元電子ガスが確認されている。

矢野氏の研究グループは、血液の成分などを詳細に調べるためのヘルスケア・チップで利用するZnOを使うトランジスタを開発中である。ヘルスケア・チップには、①血液を透かしてみたり、トランジスタが光に反応して誤った結果を出したりしないために透明であることが必要、②微小な電圧の変化をとらえられる高性能トランジスタを利用、③使い捨てにするため、材料が安くて捨てられる、といった条件が

ある(図3)。こうした点で、ZnOトランジスタが第1候補になった。

矢野氏らはまず、ZnOとZnMgOを利用するヘテロMISFET(metal-insulator-semiconductor field effect transistor)と呼ぶ構造のトランジスタを作製した。p型半導体を必要としないため、実現に向けて大きなハードルはない。2007年7月にはキャリア移動度 $240\text{cm}^2/\text{Vs}$ を確認した論文を発表した。「今後は、今のサファイア基板をガラス基板にすることが課題」(矢野氏)という。

参考文献

- 1) Takasaki, A., et al., "Blue Light-Emitting Diode Based on ZnO," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.44, no.21, pp.L643-L645, 2005.
- 2) 田村ほか, 「ZnO透明電極をLEDで実用化、発光効率8%増電極の2倍に」, [日経エレクトロニクス], 2004年9月13日号, no.882, pp.143-151.
- 3) Takasaki, A., et al., "Quantum Hall Effect in Polar Oxide Heterostructures," *Science*, vol.315, pp.1388-1391, 9 Mar. 2007.
- 4) Sasa, S., et al., "Improved Stability of High-Performance ZnO/ZnMgO Hetero-MISFETs," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 28, no.7, pp.543-545, Jul. 2007.

