

3-1 次世代透明導電膜技術の開発（コア研究室）

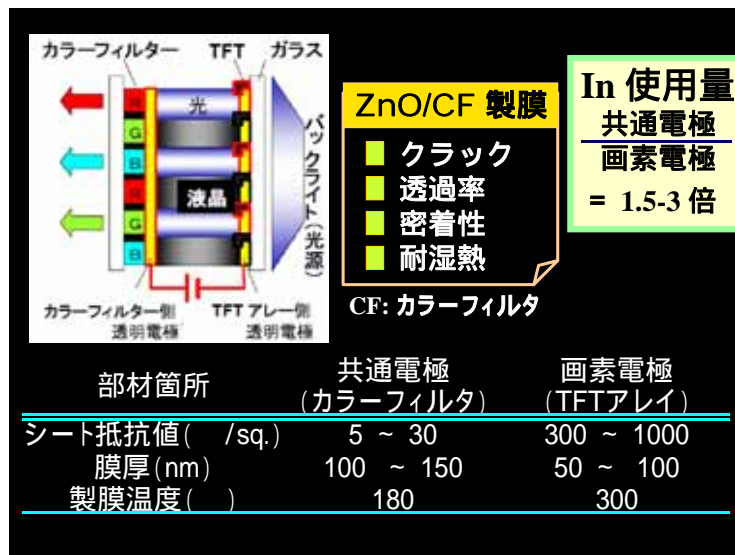
テーマ概要

酸化亜鉛（ZnO）を基材とした液晶表示装置（LCD）などを用途とする透明導電膜の研究を行なう。

具体的には、基礎的研究項目として、低抵抗率（ 10^{-5} cm 台への実現）を目標とする。実用化研究項目では以下の4つを研究項目とする。

- (1) 膜厚 100・150 nm 前後で、シート抵抗 5・30 /Sq.以下、膜厚 50・100 nm で、シート抵抗 100・150 /Sq.以下
- (2) 可視光領域での平均透過率 80% 以上、波長 550 nm で、透過率最高となるような膜厚制御
- (3) 250、3 時間の条件下で、抵抗率変動 15% 以内
- (4) 製膜装置の製膜高速化と表面平均粗さ 1.2 nm 以下。

現在、使用されている LCD において、ITO 透明導電膜の性能などの概要を下図にまとめた。



本テーマでは、基板は、ガラスを用いる。そのために図中のクラック（ひび割れ）の懸念はない。但し、基板温度は可能な限り、200 以下でのプロセス開発を行なう。

フェーズ

（イオンプレATING装置の開発、製膜パラメータの基本データ作成）

前半は、イオンプレATING法製膜装置の開発を中心に行なう。後半は、基板静止製膜法と基板搬送法とにおける薄膜性能の共通点・相違点の解明を行なう。

製膜パラメータとして、プラズマガンにおけるアルゴン（Ar）流量、酸素ガス流量、基板温度、搬送速度、放電電流の5つを対象に、薄膜性能に与える影響の度合いの大小を解明する。加えて、その知見をもとに、薄膜の膜厚と薄膜性能との関係、および成長機構の解明を行なう。

目標値は、膜厚 30 nm で、抵抗率 $8\cdot9\times 10^{-4}$ cm、膜厚 200 nm で、抵抗率 2.7×10^{-4} cm。

【酸化亜鉛透明導電膜の成長機構】

図1に、膜構造の膜厚依存性を示した。成長初期は、成長核が高密度であることを反映し、グレインサイズが小さいが、膜成長とともに、グレイン同士の合体も生じ、結果として、大きなグレイン

ンサイズへと変化していく。この過程では、結晶性も向上し、その結果、後述するが、ホール移動度が膜厚とともに増大していくことが判明している。すなわち、キャリアの伝導を支配する散乱機構において、膜厚増大とともに、粒界散乱機構から不純物散乱機構へと変化していく。

1つのグレインの中では、原子が秩序高く、構造を成している様子がわかる。解析（EDX（エネルギー分散型X線分析装置）など）の結果、（1）膜厚が厚くなるにつれて、グレインサイズが増大する、（2）粒界に空隙は見られない、（3）粒内（グレイン内）、粒界で大きな組成の違いは見られない、などが判明している。

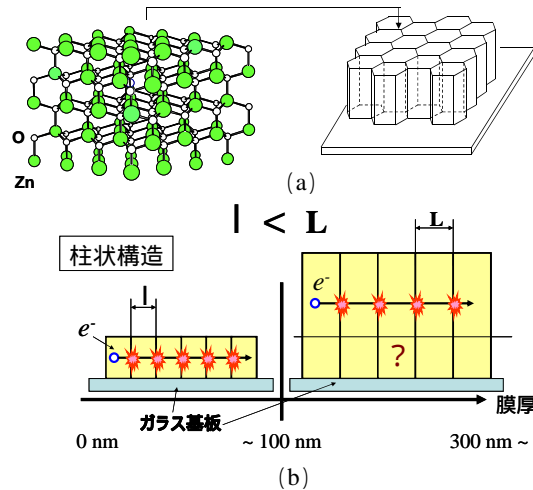


図1. (a) 各結晶子の構造、(b) 柱状構造と膜厚との関係

【各種製膜法との比較】

本テーマで研究開発した反応性プラズマ蒸着法（RPD）においては、他の製膜法とは異なる特徴などがある。それを表1にまとめた。

表1. 本テーマ開発の反応性プラズマ蒸着法（RPD）と5つの異なる製膜法との比較

項目	真空蒸着	RPD	DCスパッタ	RFスパッタ	マグネトロンスパッタ	イオンビームスパッタ
蒸着原理	熱的に蒸気化して蒸着	昇華した粒子をイオン化し加速して陰極に蒸着	スパッタリング現象を利用した蒸着	スパッタリング現象を利用した蒸着	スパッタリング現象を利用した蒸着	スパッタリング現象を利用した蒸着
蒸着材料の材料制約	高融点材料は困難	蒸気圧差が大きい材料同士の同時蒸着は困難	絶縁物では、表面にイオンが堆積し、放電が止まる	絶縁物	強磁性体は使用不可	ターゲットの導電性に全く左右されない
蒸着材料の供給形態	固体(方式差有)	固体(粉末、タブレット)	固体	固体	固体	固体
真空度(Pa)	$1 \sim 10^{-8}$	$1 \sim 10^{-5}$	$1 \sim 10^{-2}$			
利点	簡便	高速製膜、高密度性 / 金属、酸化物など、あらゆる蒸着材料の使用が可能 / 低温での成膜が可能	装置の構造が簡単		高周波でも使用可 / プラズマが試料付近にできずダメージを受けない / スパッタ量が多くより高速製膜可	プラズマなし。高真空中でも可能(不純物なし) / イオン源が独立、条件設定が容易 / ターゲットの導電性によらない
欠点	組成変化、坩堝からの汚染	試料も高温のプラズマにさらされる。温度上昇などで損傷をうける。	グロー放電のため、低真空度 / 残留ガスの影響 / 試料も高温プラズマにさらされる / 温度上昇などでの損傷		ターゲットの減り方にムラができる(磁力の強いところが早く削られる。N極とS極の間は減りにくい)。	装置が複雑で高価になる / 成膜速度は速くない
蒸着速度	低速	高速(最速)	低速	低速	高速	低速
膜厚の均一性	良	優	優	優	優	優
製膜面積	中	大	大	中	大	中

本フェーズでは、イオンプレーティング法において、下記の2つを検討した上で、直流アーク放電を用いた反応性プラズマ蒸着法（RPD）を最終的に採用した。

イオンプレーティング法の原理を図2に、反応性プラズマ蒸着法の概要図を図3にまとめた。イオンプレーティングは、蒸気をイオン化させ（+（プラス）の電荷を帯びさせ）、基板に-（マイナス）の電荷を印加し、基板に+（プラス）電荷の蒸気を引き寄せることにより密着性の良い膜を作る方式である。

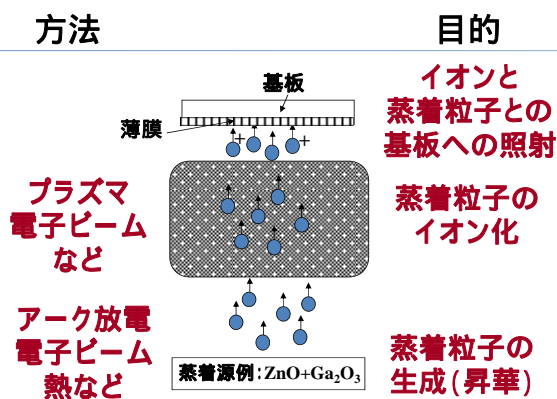


図2. イオンプレーティングの原理の概要

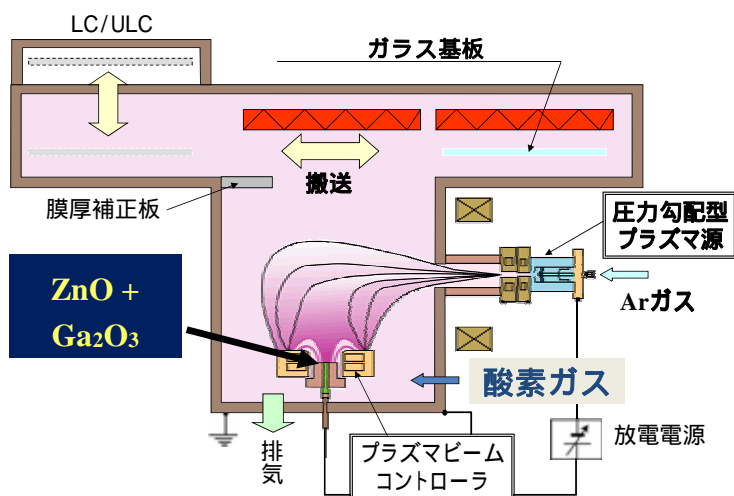


図3. 反応性プラズマ蒸着法の概要

反応性プラズマ蒸着法（RPD）によって、ガラス基板上で製膜した ZnO 薄膜の成長機構に関するこれまでの知見に基づいた特徴をまとめる。

- (1) 初期核発生密度が大きい
- (2) 初期核が配向している
- (3) 2次核発生が少ない
- (4) 結果的に配向面の成長速度が最も大きい

上記、特徴(1)は飛来粒子のもつエネルギーからの帰結である。特徴(3)は、反応性プラズマ蒸着法では、プラズマ発生における異常放電を失くすこと、蒸発材料中の組成成分の分布を抑えること、製膜室内における残留水を可能な限り失くす（基底圧力を下げる）こと、など制御すること

で満たされる。上記条件(4)については、ウルツ鉱型の ZnO を用いる場合については、本質的に満足されると考えている。特徴(2)をもたらず機構および最適製膜条件については、現在、検討中である。

以下、本技術のコアなる部分について、説明する。

【アーク放電】

アーク放電陰極には、LaB₆ 陰極を用いる。LaB₆ は導電性 ($6.67 \times 10^6 / \Omega\text{m}$) セラミック結晶体である。その仕事関数は 2.7 eV でタングステンの 4.5 eV よりも小さく、熱電子放出特性に優れる。また小さな仕事関数のため、使用温度を低くすることが可能となり、蒸発による消耗を低く抑えることができる。そのため、電子顕微鏡(走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM))用電子源として応用されている。しかし、一方で、水分を含みやすいこと、均等加熱が難しく熱応力で割れてしまうこと、さらには酸化され易いため、酸素分圧の低い状態で使用することが望ましいなど、課題もある。

さて、前記 LaB₆ を使用することで、大電流による蒸発が可能となり、その結果、製膜速度は大きく、7~11 $\mu\text{m}/$ 時間 である。これまでの ZnO 透明導電膜面積の実績は ~1m 角である。

アーク放電はスパッタ蒸着やエッチングなどで利用される異常グロー放電状態より、さらに放電電流を増加させたときに、ある電流値で放電電圧が急激に低下する際、実現する状態である。アーク電圧は 10 ~ 数 10 V の低電圧であり、アーク電流は 100 ~ 1000 A の高電流であることがアーク放電の特徴である。

グロー放電は 作用による 2 次電子放出を基本とする持続放電である。ここで 2 次電子放出とは、金属などの固体表面に電磁波(X線、電子線)や粒子(電子、イオン)を照射(衝突)させると、その表面から(別の)電子が放出されることをいう。

一方、アーク放電は、陰極からの熱電子放出(金属などの表面を加熱すると、表面から熱励起された電子が飛び出してくる現象をいう)が基本となる。しかし、放電の持続は熱電子だけではなく、陰極のごく近傍に陽イオンが密集して形成される強電場によって放出される電子も関与する。

われわれは、通常、Ar を作動ガスとして用いるが、Ar アークの電流密度を高めるためには、分子量が小さい水素やヘリウムガスを混合して、その混合ガスの解離によるアークの強い冷却作用(熱的ピンチ効果)を利用することが効果的である。

工業的な面を補足すると、アーク設備費は比較的廉価であることが挙げられる。アークの場合には高周波放電やレーザに比べて、設備費はおよそ 1 桁少なくすむ。

図 3 にあるプラズマガンは浦本が考案した圧力勾配型式である。陰極部と製膜室との間に中間電極をもたせることで、圧力勾配を実現しているガンであることが特徴である。メッキ金属イオンの逆流衝突に曝されず、陰極寿命が長いので長時間成膜が可能となる。陰極構成材料の薄膜への混入もなく、良質な薄膜形成が可能である、といった優れた特徴をもつ。

【蒸発源】

蒸着源は導電性をもった焼結体(ハクスイテック社製、純度:4N)を使用している。真空中で蒸発材料(ターゲット)にアークプラズマビームを照射して加熱すると、蒸発材料はある温度に達した時点で昇華し、原子状態で均一な昇華が始まる。この際に、均一な蒸発ガスに混じって数 μm ~ 1000 μm 程度の目に見える大きさの飛沫が蒸発材料から飛び出して、堆積膜に衝突する現象が見られることがある。この現象("スプラッシュ"と呼んでいる)は、飛沫の衝突によって堆積膜にピンホール欠陥(薄膜成長中は、ゴミとともに膜内にあるが、成長後は剥離する)を起こす原因と

なり、堆積膜の均質性を著しく害するばかりか、導電膜としての性能（電気特性・光学特性）を著しく劣化させる。

このような現象が起こる原因としては、ターゲット内に含まれる気泡が、アークプラズマビームの高エネルギーによる熱衝撃や静電荷チャージアップ等によって爆発したものと考えているが、成型後の焼結温度やターゲットを構成する粒子の粒径分布などを工夫して、その問題を解決している。

【基板温度】

基板温度の制御は、薄膜の配向性の高低や薄膜の付着力に影響する。もともと付着力の強いRPDでは、基板温度上昇による付着力の増大は、これまで議論の焦点にはなかった。一方で、配向膜の実現の有無には直接関わる。特にホール移動度やキャリア密度の制御には必要不可欠である。

基板は高温のアークプラズマに曝されている。高速製膜といった特徴をもつため、膜厚 200 nm 程度の製膜での基板温度の上昇は、基板温度 200 ℃ 程度では、プラス 20 ℃ 程度である。すなわち、製膜中の基板温度変化は無視できる。一方で、基板無加熱製膜条件では、成長条件、特に膜厚を厚くするために低速で搬送させる場合は、製膜中に 100 ℃ を越えることもある。特に、プラスチックフィルム基板の場合、製膜中の温度上昇は、クラック（ひび割れ）発生を誘導することがわかっている。各種プラスチック基板の荷重たわみ温度を考慮した処理（基板の冷却、ハードコートなど）や製膜プロセス開発が必要となる。

フェーズ

本フェーズでの研究開発成果は下記の通りである。

【電気特性・光学特性】

ガリウム添加酸化亜鉛透明導電膜（GZO）において、基板温度 200 ℃、基板搬送条件で、膜厚 30 nm では、抵抗率 $4.4 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 、膜厚 200 nm では、抵抗率 $2.1 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ なる結果を得た。膜厚の制御により、波長 550 nm で、透過率最高が実現できるようになり、さらに可視光領域における平均透過率 90 % 以上が実現できた。測定評価はホール効果および分光光度計を用いた。

【耐性】

250 ℃、3 時間、雰囲気（大気、酸素ガス、窒素ガス、水素ガス）中で、抵抗率変化率最大 5 % なる耐性となった。

【製膜装置の製膜高速化と表面平均粗さ】

放電電流制御をすることで、従来のスパッタよりも、3 から 5 倍の速さを実現、かつ低抵抗率化を実現した。表面平均粗さは膜厚によるが、膜厚 150 nm 以下では、1 nm 以下となる。但し、測定評価は原子間力顕微鏡を用いた。

ここでは、GZO の特性について報告する。

【薄膜構造の膜厚依存性とその制御】

われわれは、反応性プラズマ蒸着法を主に用いて、第Ⅲ族元素、ガリウム（Ga）をドーピング（ Ga_2O_3 : 4 wt.%）した、多結晶 ZnO 薄膜（GZO）のミクロ構造、電気特性、光学特性を検討した。

以下は、反応性プラズマ蒸着法による GZO 薄膜における成果である。膜厚は段差計（Alfa-Step,

IQ) および XRD の反射からの解析などのクロスチェックを行なっている。

これまでの研究から、ZnO 薄膜の最大の解決すべき課題は、抵抗率の大きな膜厚依存性(特に数 10 nm での大きな抵抗率増大)である。これは製膜法に依らない。一方、ITO においては、抵抗率の膜厚依存性は、ほとんどなく、数 10 nm から 350 nm の広い膜厚領域において、 $1.3\text{-}1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}$ なる低抵抗率を実現させる。

図 4 に、無アルカリガラス基板上に、基板温度 200 で製膜した膜厚 30 nm の GZO における高分解能 X 線回折装置(リガク製: ATX-G)による out-of-plane XRD の結果を示した。

NH テクノグラス株式会社製、NA35(以下のデータは当該社ホームページによる)は板厚= 0.7 mm、密度= 2.49 g/cm^3 、歪点= 650、および熱膨張係数= $37.3 \times 10^{-7}/(50\sim 300)$ なる性能をもつ。特に熱膨張係数は酸化亜鉛のそれに近く、界面などにひずみが入らないことがわかっている。

図中、挿入図では(0002)面回折ピークの半値幅(FWHM: Full-Width of Half-Maximum、配向程度の分布のばらつきを表わすもの)の膜厚依存性を示した。

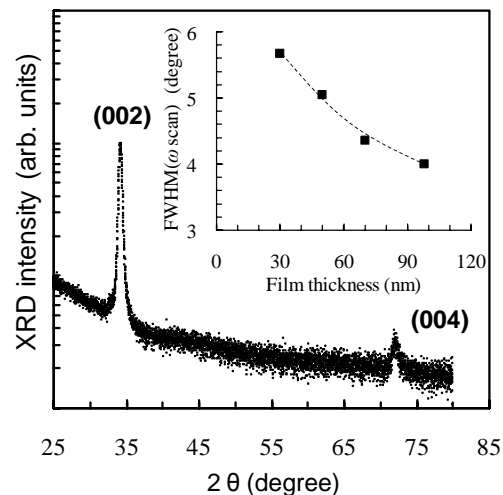


図 4. 膜厚 30 nm の GZO 薄膜における out-of-plane XRD 回折ピーク

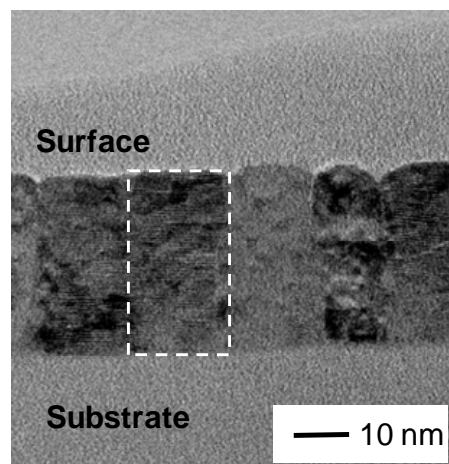


図 5. イオンミリングで加工した GZO 薄膜の断面透過型電子顕微鏡 (TEM) 像

図 5 にイオンミリングで加工したサンプルによる断面透過型電子顕微鏡 (TEM) 像を示した。

基板に垂直、かつほぼ真っ直ぐに成長している柱状構造が観察される。

図 4 から、ウルツ鉱型 ZnO であることが同定され、かつ (0002) および (0004) 面回折ピーク以外は、ほとんど無視できることがわかる。このことから、*c* 軸配向していることが結論される。一方で詳細に解析をしていくと次のようなことがわかる。

GZO 薄膜は多結晶薄膜であり、図 4 から、膜厚の増加とともに FWHM の大きさが減少し、配向性が著しく改善していく様子がわかる。実際、図 5 に示されるように、膜厚が 30 nm の GZO 薄膜では、ガラス基板との界面付近で、配向性の乱れがある。

In-plane XRD による格子定数の算出、平面 TEM 像などから得たデータを基にモデル化した、薄膜形態の膜厚依存性の概要図が先に表記した図 1 である。

図 1 は、膜厚が 100 nm 以下では、基板に平行な結晶子のサイズが 10 – 15 nm と小さく、かつ少々ランダム配向であり、結晶子相互の配向性 (*c* 軸間の平行性の度合い、結晶子同士の回転のずれによる粗い粒界) に劣る。特に、成長初期から、膜厚が 70 nm 近傍までは、高分解能 XRD (リガク ATX-G) による解析によれば、結晶格子の *a* 軸の大きさは、バルクのその値に比べて、小さく、反対に *c* 軸の大きさは、バルクのその値に比べて、大きいことがわかった。このことから核発生密度の大きい成長初期状態では、薄膜には圧縮応力が働いていることが考えられる。

粒界サイズの膜厚依存性を端的に示す平面 TEM 像を図 6 に示す。膜厚とともに粒界サイズが大きくなっていくのがわかる。

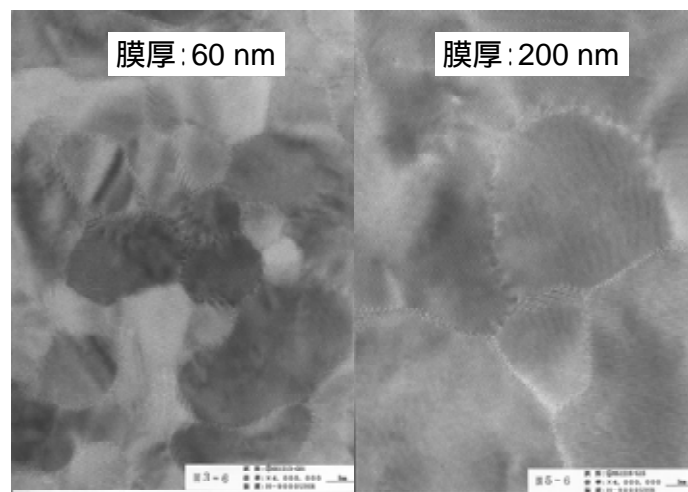


図 6 . GZO 薄膜の平面 TEM 像。左図は膜厚 30 nm、右図は膜厚 200 nm。

Ga 添加 ZO 薄膜におけるホール測定

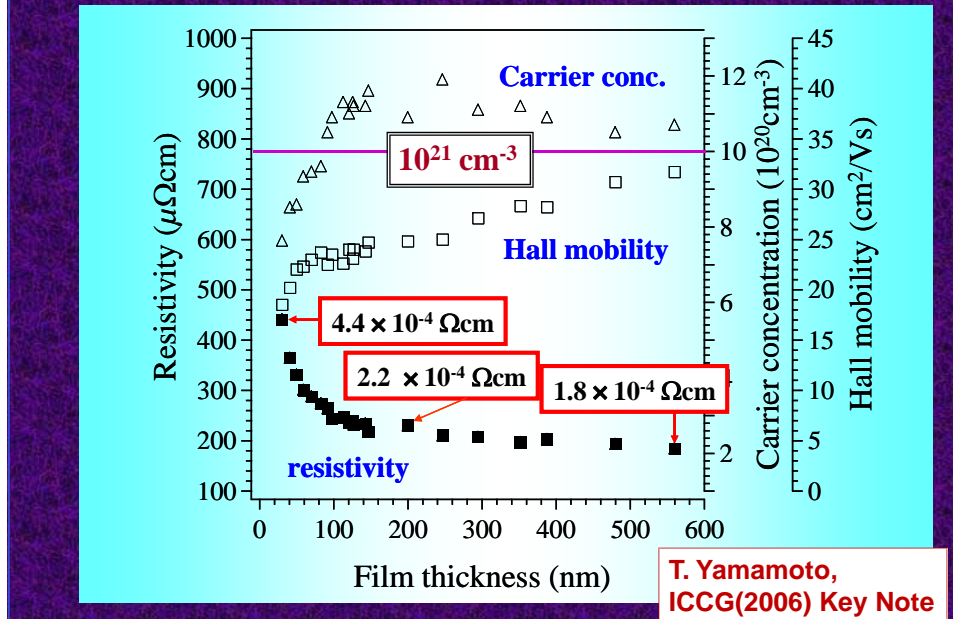


図 7 . GZO 薄膜 (Ga_2O_3 : 4wt%) における抵抗率、キャリア密度、ホール移動度の膜厚依存性

膜厚が 100 nm を越えると、前記の結晶子相互の配向性の改善と共に、結晶子内での構造秩序の乱れも軽減される。

Out-of-plane および in-plane XRD の測定結果から算出された格子定数から、計算される単位格子の体積は、膜厚にほとんど依存せず、一定である。いふなれば、GZO 薄膜内での密度の膜厚依存性は小さいことがわかった。

【電気特性】

これまで ZnO 薄膜では、膜厚が 100 nm よりも薄い膜厚では、大きく抵抗率が增大することが応用への面で、課題であった。膜厚依存性が完全に解決されたわけではないが、応用といった観点からは、十分、ITO 代替として使用可能な技術レベルに到達するデータが、われわれのグループによって最近報告された。抵抗率では、従来の ITO 膜とほぼ同程度の抵抗率を、数 10 nm の膜厚において、再現性よく確認している。この節では、そのデータをもとに議論していく。

図 7 に GZO 薄膜 (Ga_2O_3 : 4 wt%) の抵抗率、キャリア密度、ホール移動度の膜厚依存性を示した(本件は国際会議 ICCG にて基調講演として発表した)。電気特性は、ホール効果測定装置(アクセントオプティカルテクノロジー社製 HL5500PC)によって、室温条件で得られたものである。製膜における基板温度は 200 °C とした。基板は無アルカリガラスを用いている。

図 7 が示すように、GZO 薄膜の抵抗率は膜厚依存性をもつ。すなわち、膜厚の増大と共に抵抗率が減少する。特に膜厚 100 nm 以下の薄膜では、その度合いが大きいことがわらう。この膜厚依存性は図 7 が示すように、主にホール移動度の膜厚依存性にその原因がある。キャリア密度増大と共にホール移動度も増大するのは、粒界散乱で典型的に見られる現象である。

具体的なデータは以下の通り(図 8 参照)である。膜厚 30.5 nm では、抵抗率 $4.4 \times 10^{-4} \text{ cm}$ (キャリア密度: $7.63 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、ホール移動度: $18.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)、膜厚 200 nm では抵抗率 2.2

$\times 10^{-4}$ cm (キャリア密度: 1.09×10^{21} cm $^{-3}$ 、ホール移動度: 24.8 cm 2 /V \cdot s) および膜厚 560 nm では抵抗率 1.8×10^{-4} cm (キャリア密度: 1.07×10^{21} cm $^{-3}$ 、ホール移動度: 31.7 cm 2 /V \cdot s) といった膜厚依存性を得ている。

比較として、MBE (分子線エピタキシー) および PLD によるデータを以下の通りである。

MBE による GZO 薄膜 (基板温度: 800) において、抵抗率 1.9×10^{-4} cm (キャリア密度: 8.1×10^{20} cm $^{-3}$ 、ホール移動度: 42 cm 2 /V \cdot s) の低抵抗 GZO 薄膜の報告が中原らによってなされている。彼らは、この薄膜を青色 LED 用電極として応用し輝度の向上を実現させている。一方、Al 添加 AZO 薄膜においては、PLD 法で製膜、膜厚 280 nm において、低抵抗率 8.54×10^{-5} cm が、大阪産業大によって報告されている。現在では、このグループによる ZnO 薄膜が最も低い抵抗率である。

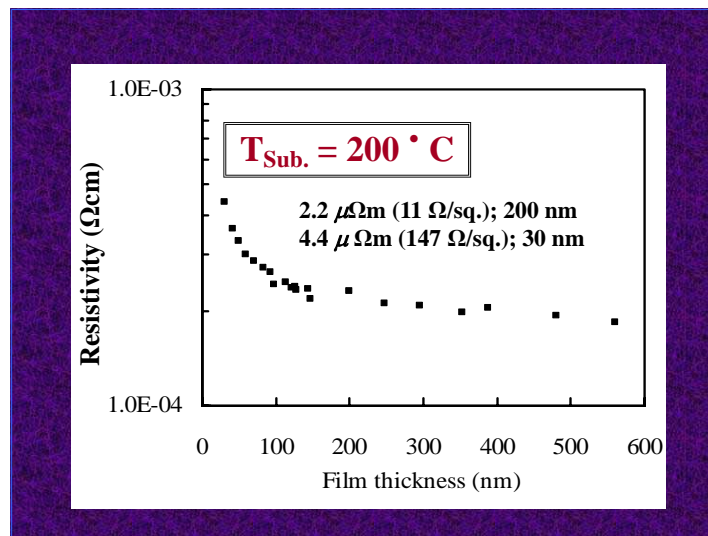


図 8. GZO 薄膜 (Ga_2O_3 : 4 wt%) における抵抗率の膜厚依存性

Takahiro Yamada, Aki Miyake, Seiichi Kishimoto, Hisao Makino, Naoki Yamamoto and Tetsuya Yamamoto, "Low-resistivity Ga-doped ZnO thin films of less than 100 nm thickness prepared by ion plating with direct current arc discharge", Appl. Phys. Lett. 91(2007)051915.

【光学特性】

図 9 に、GZO 薄膜 (Ga_2O_3 : 4 wt%) における紫外光領域・可視光領域・近赤外光領域での分光透過率 (入射光の強さに対する透過光の強さの比率) の測定データをまとめた。

測定は分光光度計 (HITACHI 製、U-4100) を使用した。赤外・可視光領域にはハロゲンランプ、紫外光には重水素ランプを使用した。リファレンスは無アルカリガラス基板である。また各波長領域での代表的な応用も図中に記した。

図中、数字は GZO 薄膜の膜厚 (単位: nm) を示している。膜厚に応じた干渉が観測されており、光学的なレベルで平坦な薄膜がガラス基板上に製膜されていることがわかる。

紫外線カット領域は、ZnO 薄膜のバンドギャップに対応する。吸収端波長は、キャリア密度の制御で、カット率良く、制御できる。それゆえ、紫外線センサーへの応用が期待される。

可視光領域 (波長領域: 380 – 780 nm) では図が示すように、全ての膜厚で、ほぼ 90% 以上の高い透過率を示す。近赤外領域での反射による熱線カットとしての特徴は、応用面で興味深い。

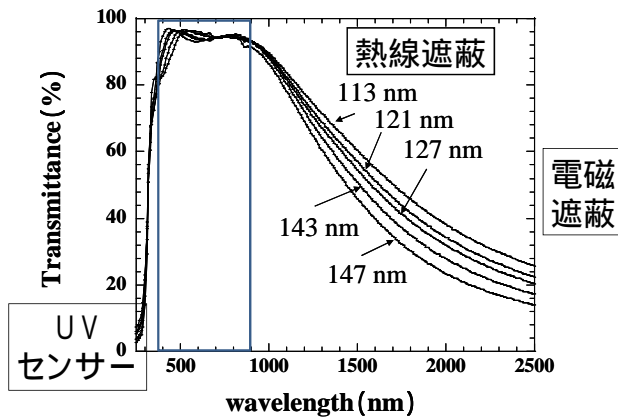


図 9 . GZO 薄膜の分光特性

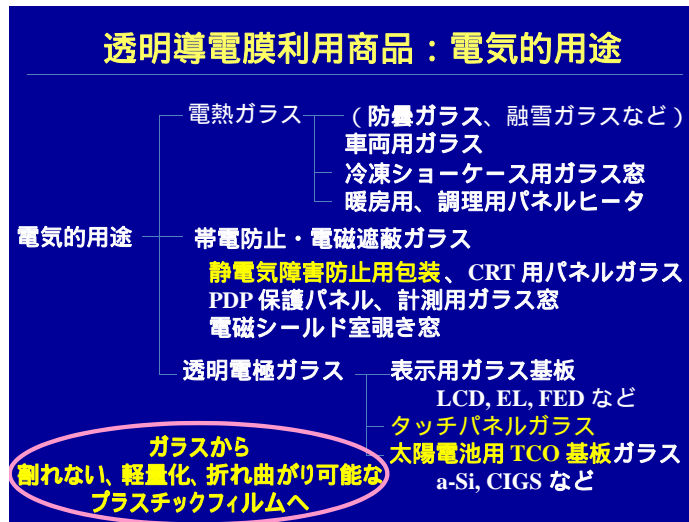


図 10 . 酸化亜鉛透明導電膜の応用：電気的用途

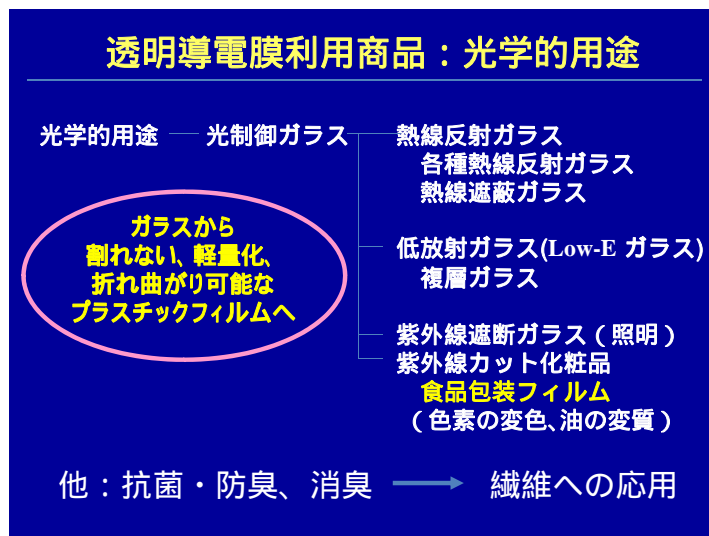


図 11 . 酸化亜鉛透明導電膜の応用：光学的用途

今後の展開

本テーマでは、LCD用透明導電膜に絞り、研究開発を実施した。出口のターゲットを絞り込んだことから、しっかりとした成果が、5年間で得られた。この研究開発テーマは、今後、経済産業省による「希少金属代替材料開発プロジェクト」として展開を図る予定である。基板の基材は、これまでのガラス基板から樹脂基板へ変えて、さらに厳しい温度制御の条件で、性能、コストを見極める予定である。

特に、熱線膨張率に関しては、温度が200以下の条件下で製膜した場合には、製膜プロセスの工夫をしてはじめて、クラック（ひび割れ）のない薄膜の実現が可能である。荷重たわみ温度が低く、また吸水率の高いエステル系プラスチックでは、酸化亜鉛薄膜との間に、バッファ層の必要が出るかもしれない。

製膜装置および製膜プロセスの新規開発が必要である。

さて、図10、図11に酸化亜鉛透明導電膜の応用を電気的用途、光学用途にそれぞれ分けて、その可能性をまとめた。

該当する市場はいずれも成長が見込まれるものである。原料供給の問題や、原料コストの問題が本質的に回避できる強みが酸化亜鉛の場合にあるものの、製膜プロセスの内容によっては、高価格となる恐れもある。

今後は、改めて製膜装置の改造およびこれまでのバッチ形式からインライン形式への形式改良の必要がある。来期には、その予定を立てている。

その他

本テーマにおける研究開発期間において、その成果を順次、まとめることが書籍発刊によって可能であった。関係者に紙面をもって感謝の意を表したい。なお、詳細な解説は下記5冊の書籍を参照していただきたく、下記の通り、書籍案内を列記する。

1. 最新透明導電膜大全集～材料別特性と代替展望/リサイクル・工程別ノウハウ・

応用別要求特性等～

出版社：情報機構

発刊 2007年12月17日 体裁 B5判 866ページ 定価 72,450円（税込）

ISBN 978-4-901677-87-5

第4章 酸化亜鉛透明導電膜

第9章 第1原理電子構造計算法による酸化亜鉛マテリアルデザイン

2. 最新 導電性材料 技術大全集 【下巻】

出版社：株式会社 技術情報協会

発刊 2007年10月31日 B5判 【応用、特許動向編】（下巻）約540頁上製本

ISBN 978-4-86104-193-8 C3042

第16章第2節[2] アーク放電蒸着法

3. ZnO系の最新技術と応用 ZnO its Most Up-to-date Technology and Application ,Perspectives

出版社：株式会社 シーエムシー出版

監修：八百隆文（東北大学 学際科学国際高等研究センター 教授）

発刊：2007年01月

体裁：B5 判, 237 ページ

ISBN 978-4-88231-661-9 C3054

第 3 章 透明導電膜

4. 脱 ITO に向けた透明導電膜の低抵抗・低温・大面積製膜技術

出版社：株式会社 技術情報協会

発刊 2005 年 7 月 29 日 体裁 B5 判 344 ページ 定価 86,100 円 (税込)

ISBN 4-86104-078-7 C3058

第 2 章第 3 節[2] アーク放電蒸着法

5. 最新透明導電膜動向～材料設計と製膜技術・応用展開～

出版社：情報機構

発刊 2005 年 1 月 24 日 体裁 B5 判 342 ページ 定価 72,450 円 (税込)

ISBN 4-901677-33-0

第 6 章 酸化亜鉛、第 13 章 次世代透明導電膜としての酸化亜鉛透明導電膜