磁場印加したパルスレーザー堆積 (PLD) 法で作製した 酸化亜鉛系透明導電膜*

鈴木 晶 雄^{*1}

Transparent Conducting Zinc Oxide Films Prepared by Pulsed Laser Deposition in Magnetic Field

Akio SUZUKI

Department of Electronics, Information and Communication Engineering, College of Engineering,
Osaka Sangyo University, 3-1-1 Nakagaito, Daito, Osaka 574-8530, Japan

(Received May 8, 2006, Accepted October 14, 2006)

1. 透明導電膜の現状と今後の動向

現在、透明導電膜は液晶ディスプレイやプラズマディスプレイの透明電極として不可欠な存在となっている。また次世代フラットパネルディスプレイの有力な候補として有機 EL (エレクトロルミネッセンス) ディスプレイが有望視されているが、ここでも透明導電膜は必要不可欠な電極材料である。特に液晶ディスプレイでは従来困難とされていた大型化、応答速度の高速化の問題がブレークスルーされ携帯電話の小型画面からプロジェクター用、パソコン用モニター、そして大型液晶テレビまで対応できる技術が確立され実用化に至っている。2005年5月には液晶テレビ総数の出荷台数でブラウン管テレビを越え、さらに国内大手のガラスメーカーでもブラウン管用ガラスから全面撤退を発表したことから今後ディスプレイのフラットパネル化 (薄型化) は一気に進むと考えられる。これらのフラットパネルディスプレイに使われる透明導電膜として要求される基本性能は、可視光領域で光の透過率と電気の導電率が高いことが挙げられる。さらに電極部材としての特性では表面形態がフラット、耐プラズマ特性が高く、パターンニング過程においてエッチング特性が優れていなければならない。また、生産レベルにおける技術面では薄膜化するときには大面積化・均一(質)化・低抵抗化技術が必須条件となり、コスト面では材料が豊富で安価、製造コストが低いことが挙げられる。一方、環境面では毒性が皆無でリサイクルが可能な材料を使用し、さらには製造工程においても汚染物質などが排出されないなど環境保護の観点に立って生産できるものでなければならない。その点において比較的高性能な特性を示すカドミウム系酸化物については日本では透明導電膜材料から完全に除外されているのが現状である。

上記の条件を満足し現在までに実用化に至った透明導電膜の材料としては酸化インジウム系 (In_2O_3) の ITO (Indium Tin Oxide の略で In_2O_3 に SnO_2 を添加) が透明導電膜の全生産量の90%以上を占めるが、古くからタッチパネルなど

多用途に使われてきた酸化スズ系 (SnO_2 に Sb や F を添加) があり、最近では ITO の主材料のインジウム元素が枯渇の危機に瀕しているため ITO の代替材料として豊富な亜鉛 (インジウムの10万倍以上の埋蔵量) を用いた AZO (ZnO に Al_2O_3 を添加), GZO (ZnO に Ga_2O_3 を添加) などの酸化亜鉛系 (ZnO) が大きな注目を浴び、これらは透明導電膜材料の三本柱と位置づけられている¹⁾。

透明導電膜のほとんどを占める ITO の主原料のインジウムは亜鉛精錬時の副産物でレアメタルと呼ばれクラーク数 (地球全質量の約0.7%の地殻において構成する元素の割合) が全元素中68位 (地殻含有量: 0.21 ppm) の希少元素である。そのため世界の生産量はリサイクルを含めて年間500トン前後といわれている。さらにインジウム地金が欧州での亜鉛精錬事業からの撤退、2001年中国の南部の亜鉛鉱山での大事故が追い討ちをかけ枯渇・高騰の危機にさらされている。最近のロンドンメタルブリテン (LMB) 誌の市況データでは、インジウム地金の価格がこの1~2年間で8~10倍に高騰した。それに加えてフルスペックのデジタルハイビジョン対応の超大型画面の薄型テレビが急速に市場に出回り、執筆時点で65インチの液晶テレビやプラズマテレビが店頭によく並び、研究試作・受注生産レベルでは100インチを超えるものが次々と発表されている。さらに2011年の地上波デジタル放送への全面移行により薄型テレビの需要は益々増加することが予想される。液晶パネルメーカーでは大型化・量産化に対応するため大型ディスプレイパネルの原材料ガラスのサイズが第8世代ガラス (2.1 m×2.4 m で、さらに第9世代ガラスでのサイズは2.4 m×2.8 m となる) へと超大型化が進み ITO の需要が急増している。また、太陽電池分野では原材料の太陽電池用シリコンの不足が恒常化しているため太陽電池メーカーでは省シリコンから脱シリコンへの取組姿勢変更を余儀無くされ、薄膜化した CIS 型 (Cu, In および Se の化合物、または CIGS 型では Ga も添加される) 太陽電池が市販されるまでに至った。CIS 型太陽電池のような薄膜化した太陽電池では透明導電膜が不可欠であるが、太陽電池は面積=電力のため既述のフラットパネルディスプレイより桁違いの広い面積で使われ、今後太陽電池の電極に ITO が使われた場合、主原料インジウムの需要増にさらに拍車がかかると予想される。

* 平成18年2月24日 日本真空協会2006年度2月研究例会・日本表面科学研究会で講演

^{*1} 大阪産業大学工学部電子情報通信工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

このように ITO の主材料のインジウム事情については関係業界では既述した多くの悲観論（絶好調の液晶ビジネスの“アキレス腱”とまでいわれている）と若干の楽観論（高騰すれば採掘が再開され増産につながる、また投機筋からの在庫の放出など）が交錯しているが、ITO の発現→高性能・高品質なため ITO が中心→主材料枯渇危機、この産業パターンは見直す必要があり新たな材料開発の図式を構築しなければならない。つまり資源枯渇を優先的に視野に入れた ITO の代替材料（脱インジウム材料）の開発が緊急の課題となったと捉えるべきであろう²⁻⁵⁾。

筆者の研究室では以前より ITO 代替材料の最有力候補の酸化亜鉛系透明導電膜、特に低抵抗化成膜技術を中心に研究を行ってきたので以下に紹介する。

2. パルスレーザー堆積（PLD）法により作製した酸化亜鉛系透明導電膜

資源・環境面で大きな優位性を示す酸化亜鉛系の透明導電膜については以前より有望視され、精力的に金沢工業大学の南らによりスパッタリング法・CVD 法・アークプラズマ法などを用いて詳細に亘り報告されてきた⁶⁾。この酸化亜鉛系透明導電膜をパルスレーザー堆積法⁷⁾（以下 PLD 法と略す、図 1 に本実験に用いた代表的な PLD 法の実験装置の概略を示す）で作製するにあたり、筆者は酸化亜鉛に種々ドーパントを添加した酸化亜鉛系透明導電膜の特性について調べた。その結果、AZO ($\text{ZnO} : \text{Al}_2\text{O}_3$) および GZO ($\text{ZnO} : \text{Ga}_2\text{O}_3$) 透明導電膜で低抵抗率を示し且つ平滑な表面形態を有する透明導電膜が得られることがわかり、それらについて詳しい報告を行った⁸⁻¹¹⁾。

さらに低抵抗と優れた表面形態を両立させるため AZO + GZO 積層型透明導電膜を作製したことについて報告した¹²⁾。また、Nd : YAG レーザーを光源に用いて大きな光閉じ込め効果を有するテクスチャー構造を有するミルキー GZO 透明導電膜を作製したことについて報告した¹³⁾。以前に $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの抵抗率を達成した ITO 透明導電膜が相次いで報告されたが¹⁴⁻¹⁷⁾、筆者の研究室ではブルームに対して垂直な磁場を印加した PLD 法を用い、極めて低い

抵抗率の AZO 透明導電膜が得られたことについて報告した¹⁸⁾。この場合、単にブルームに磁場を印加するだけでは低抵抗化は実現できず成膜条件のすべてについて詳細に見直しを行い、徹底的に最適化をはかった結果として $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの抵抗率が得られた。以下に、最適なドーパントの確認実験および低抵抗 AZO が得られた実験結果について紹介する。

3. 種々ドーパントを添加した酸化亜鉛系透明導電膜の電氣的・光学的特性

筆者が AZO ($\text{ZnO} : \text{Al}_2\text{O}_3$) 透明導電膜の作製^{8-10,12)}に着手するまでに、ノンドープ ZnO 薄膜^{19,20)}と ZnInO 系薄膜²¹⁾を作製した報告はあったが、PLD 法による AZO などの透明導電膜作製の報告は殆どなかった。その後、PLD 法の発展とともに多くの報告が相次いだ。筆者が以前に酸化亜鉛へのドーパントの種類による電氣的・光学的特性の違いをまとめた結果を表 1 に示す¹²⁾。

成膜条件は比較目的のため表記条件で統一したので、一概に比べることはできないがおおよその傾向を把握できる実験結果といえる。これより、 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの低抵抗率と 85% 以上の可視光平均透過率が両立しているのは Al_2O_3 と Ga_2O_3 だけである。また、同一のレーザー照射条件であるため、膜厚の違いはドーパントの違いによるアブレーションの度合いを反映していると考えられる。ここでドーパントが In 系 (In_2O_3 と ITO) の場合 200 nm 以上の膜厚が得られ、堆積レートが大きくなっている。 Al_2O_3 , CuO, Ga_2O_3 および SnO_2 の場合は堆積レートに大きな差はないが、 Ag_2O は若干レートが下がり In 系と比較すると 2 分の 1 程度になっている。これらの理由として、ドーパントの種類を変えることにより、すなわち種々不純物混入により主成分の酸化亜鉛のエネルギーバンド構造・結晶構造・結合エネルギー状態（主に亜鉛原子と酸素原子）が不純物に対応した変化を起し、レーザー光（波長 193 nm）の吸収に差が生じアブレーション

表 1 ArF エキシマレーザー（波長 193 nm）を使用した PLD 法を用いて種々ドーパントを 2 wt.% 添加したターゲットで作製した酸化亜鉛系透明導電膜の電氣的・光学的特性（ドーパント依存性を調べるため、成膜条件はレーザーエネルギー：100 mJ、繰り返し周波数：10 Hz、ターゲット基板間距離：50 mm、成膜時間：20 分、基板温度：室温、雰囲気ガス：なし（到達真空中で成膜）の同一条件とした）

ZnO への ドーパントの種類 (2 wt.% 一定)	膜厚 (nm)	抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	可視光平均透過率 (%) (波長域：400~700 nm)
Al_2O_3	167	9.49×10^{-4}	92.2
Ag_2O	108	2.68×10^{-2}	65.1
CuO	145	2.71×10^{-2}	81.4
Ga_2O_3	142	7.20×10^{-4}	85.8
In_2O_3	253	2.36×10^{-3}	75.5
ITO ($\text{SnO}_2 : 10 \text{ wt.}\%$)	203	2.55×10^{-3}	79.1
SnO_2	176	1.31×10^{-2}	63.3

図 1 酸化亜鉛系透明導電膜の作製に用いた代表的な PLD 装置の概略

ン過程に差異が現れたと考えられる。さらに、このような微視的な状態変化に起因する物性定数、例えば融点・沸点・粘性係数などに違いが生じ2倍以上の膜厚（堆積レート）の差に現れたと考えている。

4. $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの低抵抗化が実現できた AZO

現在までに酸化亜鉛系透明導電膜で最も低抵抗な値が得られているのが ZnO に Al_2O_3 に添加した AZO（または ZAO と呼ばれている）透明導電膜である^{1,6)}。また、前節で述べたように筆者の実験結果でもドーパントの中では Al_2O_3 が抵抗率・透過率とも優れた値を示した¹²⁾。そこで、筆者は既述した一般的な PLD 成膜装置を用いて最適な成膜条件下で AZO (Al_2O_3 が 2 wt.%) 透明導電膜を作製し、最小抵抗率

$1.43 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ の優れた値が得られたことについて報告した^{8,12)}。

以前に筆者は ITO 透明導電膜を作製するときに、図 2 に示すように強力な希土類永久磁石でブルームに対して垂直な磁場を印加できるような独特の工夫を施した PLD 成膜装置を用い、 $7.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ の極めて低い抵抗率が一般的なガラス基板上で得られたことについて報告した¹⁶⁾。

本手法を AZO 透明導電膜に適用し $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの低い抵抗率を有する AZO を実現することを目指したが、単に磁場を印加するだけではこの値は達成できないため同時に徹底的に成膜条件の見直しを行った。成膜条件を最適化するにあたり、主に AZO ターゲットのドーパント量、レーザー出力（レーザーエネルギー密度）、基板温度を見直した。その結果、不純物の Al_2O_3 のドーパント量はスプリットターゲット法 (Al_2O_3 が 1 wt.% と 2 wt.% を 2 分の 1 ずつ組み合わせ、レーザービーム照射比を詳細に変えることにより結果的にドーパント量を変化させる手法：この場合極めて高速に交互に 2 種類の薄膜を堆積させるため積層構造にはならない) を用い 1.8 wt.%（従来は 2 wt.%）、レーザー出力は 15 mJ（従来は 100 mJ）、基板温度は 230°C （従来は 300°C ）が磁場を印加した PLD 法で $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの抵抗値を得るための最適値であることが判明した¹⁸⁾。

図 3 に $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの抵抗率が得られた AZO 透明導電膜の電氣的・光学的特性を示す。同図 (a) に電氣的特性のレーザーエネルギー密度依存性を示す。レーザーエネルギー密度が増加するに伴い抵抗率が上昇する傾向を示した。酸化亜鉛系透明導電膜としては現在までに報告された中で最小の抵抗率 $8.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ が最小のエネルギー密度 0.75 J/cm^2 で得られた。このようにレーザーエネルギー密度の減少と共に高い導電性つまり大きなキャリア密度および移動度が得られた要因として以下のことが考えられる。図 2 に示したブルームへの磁場印加、特に (b) の磁束分布からわかるようにブルーム中心付近でターゲット基板方向に対して垂直で一方に強められた磁場によりターゲットより放出されたアブレーション粒子群（荷電粒子）の運動エネルギーがローレンツ力により大きく変化し、特に低エネルギー密度のプ

図 2 ブルームに対して垂直に磁場を印加する方法(a)とそのときの可視化した磁束分布(b)および磁石配置の詳細(c)

図 3 筆者が磁場を印加した PLD 法で作製した AZO 透明導電膜の電氣的・光学的特性

図4 磁場を印加して作製した AZO 透明導電膜の X 線回折パターン(a)と断面 TEM 写真(b)

ルーム（基板方向への潜在的な運動エネルギーが小さい荷電粒子が支配的な状態）では、その効果が顕著となる。その結果キャリアの生成・結晶形態に大きく影響し極めて大きな導電性が得られたと考えられる。一方光学的特性として同図(b)に、この AZO 透明導電膜の透過率スペクトルと成膜した AZO 透明導電膜の実際の写真を示す。赤外領域では大きなキャリア密度のためプラズマ共鳴現象で900 nm 付近から透過率が急激に低下し、一方、拡大挿入図の紫外領域では Burstein-Moss 効果のため吸収端波長が酸化亜鉛のバンドギャップ (3.37 eV : $\lambda \approx 370$ nm) より若干短波長側にブルーシフトしている。次に大きな移動度が得られた機構を解明するために AZO 透明導電膜の結晶構造解析を行った。図4に X 線回折パターンと基板界面付近の断面 TEM 像を示す。同図(a)より磁場を印加して作製した場合、ZnO の(0002)面と(0004)面のピークが明確に現れ、ガラス基板に対し強く C 軸に配向していることがわかる。また同図(b)より、磁場を印加して作製した場合、ガラスとの界面から結晶配列に乱れが少ないことがよくわかる。これらの結果より、 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの抵抗率に大きく寄与した高い移動度は、ガラス基板との界面付近からの結晶成長に依存し、磁場を印加して成膜することで大きく改善されたことがわかった¹⁸⁾。

5. ま と め

ArF エキシマレーザーおよび Nd : YAG レーザーを用いた PLD 法で酸化亜鉛系透明導電膜を作製したことについて述べてきたが、酸化亜鉛に対して良好な特性が得られるドーパントとしては Al_2O_3 (AZO) と Ga_2O_3 (GZO) が有力であることがわかった。

超低抵抗 ($10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの抵抗率) な酸化亜鉛系透明導電膜得るためには、徹底的に成膜条件を最適化し（主

にターゲット組成、レーザーエネルギー密度、基板温度）、強力な磁束密度 (1.25 T) を有する希土類磁石 (NdFeB) を用いルームに垂直に磁場を印加することが可能な装置でアプレッション粒子群にローレンツ作用を生じさせ基板への衝突エネルギーの緩和をはかり結晶性の良い膜を堆積させることにより低抵抗化が実現できた。

その結果として、 Al_2O_3 添加量が 1.8 wt.%, 基板温度が 230°C 、レーザーエネルギー密度が 0.75 J/cm^2 の条件下で作製した場合、現在までに報告された中で最小の抵抗率 $8.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ が得られた。

6. 最 後 に

実用化に向けて一番大きな問題点とされる AZO および GZO の抵抗率について歴史的な開発経緯を表2にまとめた。これより、図3に示す筆者が磁場を印加した PLD 法で作製した AZO 透明導電膜の電氣的（同図(a)）・光学的特性（同図(b)）で達成した $8.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ の抵抗率は、ITO のチャンピオンデータに匹敵し遜色はない。尚、 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの超低抵抗な透明導電膜が得られた成膜方法は ITO, AZO 共ほとんどが PLD 法である。

PLD 法は大面積化には不向きとされるが材料が有する潜在的な極限性能を引き出すことができる成膜方法のため、研究レベルでは広く用いられ材料固有の到達目標値の設定には大きく貢献している。また筆者の研究室では最近、電界を印加した PLD 法で膜厚分布が抑制でき大面積化の可能性を見出したこと²²⁾、さらに有機基板などへの室温成膜にも PLD 法は有効な成膜手段であることを報告した²³⁾。

この PLD 法を用いた研究室段階の抵抗率については ITO と AZO では限界値はどちらも 10^{-5} オーダーが得られているが、実用化レベルの成膜技術のほとんどを占めるマグネトロ

表2 AZO および GZO 透明導電膜の低抵抗化技術の推移

年	AZO の抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	GZO の抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	成膜方法など	備考
1984	1.9×10^{-4}		RF スパッタ	1-3,6)
1985	2.0×10^{-4}		無電界メッキ	
1995	1.7×10^{-4}		反応性 DC スパッタ	
1995		1.2×10^{-4}	減圧 CVD	サファイヤ基板上
1996	1.4×10^{-4}		PLD (ArF エキシマ)	筆者 ^{8-10,12)}
1996		1.7×10^{-4}	PLD (ArF エキシマ)	筆者 ^{9,11)}
1999	1.4×10^{-4}		PL (XeCl エキシマ)	
2001	1.5×10^{-4}		ゾルーゲル	
2001		1.6×10^{-4}	アーク放電イオン	
2003	1.0×10^{-4}		DC スパッタ	対抗ターゲット
2003	8.5×10^{-5}		PLD (ArF エキシマ)	筆者 (磁場印加) ¹⁸⁾

ンスパッタリング法を用いた場合は基板付近の結晶構造、グレインサイズの違いなどにより ITO より抵抗率が上がる。この差を埋めるには AZO の短所（基板付近の結晶不均一性など）を克服する成膜技術の開発が急務である。一方、大面積化・高速成膜が可能なアークプラズマ法も GZO では有望とされているため実用化への壁をブレイクスルーする日も近いと思われる²⁴⁾。

以上のように成膜技術で大きく特性が変化する酸化亜鉛系透明導電膜は既存の ITO 用の成膜・加工技術+アルファで転用が可能ではないかと筆者は考えている。

現在最も多く使われているディスプレイ用の透明導電膜である ITO の代替材料の候補は現時点では酸化亜鉛系透明導電膜を描いて存在しない。しかしながらインジウムの希少性・ディスプレイ需要の拡大から考えれば代替の可能性の有無を論ずるのではなく、代替材料の酸化亜鉛系透明導電膜の開発は早晩に実用レベルに引き上げなければならない。歴史的に見て、ITO はノンドープ In_2O_3 の出現以来約50年、それに比べて酸化亜鉛系透明導電膜はノンドープ ZnO の出現以来約25年で、ちょうど2倍近い差がある。これは酸化亜鉛系透明導電膜には、まだまだ発展の余地があり実用化への道が確実に拓けることを示唆している“希望の数字”ではな

いだろうか。

〔文 献〕

- 1) 例えば、日本学術振興会透明酸化物光・電子材料第166委員会編：透明導電膜の技術，オーム社（1999）。
- 2) 鈴木晶雄他：脱 ITO に向けた透明導電膜の低抵抗化・低温・大面積化技術，㈱技術情報協会（2005）。
- 3) 鈴木晶雄他：最新透明導電膜動向～材料設計と製膜技術・応用展開～，㈱情報機構（2005）。
- 4) 鈴木晶雄：PLD 法により作製した超低抵抗透明導電膜，HITACHI SCIENTIFIC INSTRUMENT NEWS, **48**, No 1（2005）10。
- 5) 鈴木晶雄：ITO 代替材料の最有力！！酸化亜鉛の応用製品が未来を切り開く—酸化亜鉛系透明導電膜—，MATERIAL-STAGE, ㈱技術情報協会, **3**, No 1（2006）1。
- 6) 例えば，T. Minami, H. sato, H. Nanto and S. Takata: Jpn. J. Appl. Phys., **24**（1985）L781。
- 7) 例えば，電気学会編：レーザアブレーションとその応用，コロナ社（1999）。
- 8) A. Suzuki, T. Matsushita, N. Wada, Y. Sakamoto and M. Okuda: Jpn. J. Appl. Phys., **35**（1996）L56。
- 9) A. Suzuki, T. Matsushita, Y. Sakamoto, N. Wada and M. Okuda: Transactions of the Material Research Society of Japan, **20**（1996）526。
- 10) 鈴木晶雄，松下辰彦，坂本吉亮，和田直己，奥田昌宏：真空，**39**（1996）331。
- 11) A. Suzuki, T. Matsushita, N. Wada, Y. Sakamoto, T. Fukuda, H. Fujiwara and M. Okuda: Jpn. J. Appl. Phys., **35**（1996）5457。
- 12) 鈴木晶雄，松下辰彦，福田智也，藤原秀規，奥田昌宏：電気学会論文誌 A, **117**（1997）405。
- 13) A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki, Y. Yoneyama and M. Okuda: Jpn. J. Appl. Phys., **38**（1999）L71。
- 14) H. Ohta, M. Orita, M. Hirano, H. Tanji, H. Kawazoe and H. Hosono, J. Appl. Phys., **76**（2000）2740。
- 15) F. O. Auduodija, H. Izumi, T. Ishibashi, H. Yoshitake, M. Motoyama and K. Murai: Jpn. J. Appl. Phys., **39**（2000）L377。
- 16) A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki, Y. Yoneyama and Okuda: Jpn. J. Appl. Phys., **40**（2001）L401。
- 17) A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki, A. Mori and M. Okuda: Thin Solid Films, **441**（2002）263。
- 18) H. Agura, A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki and M. Okuda: Thin Solid Films, **445**（2003）263。
- 19) V. Craciun, J. Elders, J. G. E. Gardeniers and I. W. Boyd: Appl. Phys., Lett., **65**（1994）2963。
- 20) S. Hayamizu, H. Tabata, H. Tanaka and T. Kawai: J. Appl. Phys., **80**（1996）787。
- 21) J. M. Phillips, R. J. Cava, G. A. Thomas, S. A. Carter, J. Kwo, T. Siegrist, J. J. Krajewski, J. H. Marshall, W. F. Peck, Jr., and D. H. Rapkine: Appl. Phys. Lett., **67**（1995）2246。
- 22) 安倉秀明，青木孝憲，鈴木晶雄，松下辰彦，奥田昌宏：電気学会論文誌 C, **125**（2005）1641。
- 23) 前田 剛，安倉秀明，青木孝憲，鈴木晶雄，松下辰彦，奥田昌宏：電気学会論文誌 C, **126**（2006）132。
- 24) S. Shirakataa, T. Sakemi, K. Awai and T. Yamamoto: Superlattices and Microstructures, **39**（2006）218。