

高周波スパッタリングによる ZnO 薄膜作製における Al ドーピング (II)

清水 秀己* 萩原 基文**

*技術教育講座

**株式会社ヤガミ

Al Doping on Formation of Zinc Oxide Films by RF Sputtering (II)

Hideki SHIMIZU* and Motofumi HAGIWARA**

*Department of Technology Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

**Yagami Co Ltd, Nagoya, 460-0002, Japan

1. はじめに

近年, ZnO は光電子デバイス材料として, また薄膜トランジスタや透明導電性薄膜の応用にも期待され, 多くの研究者により各種の方法による ZnO 薄膜の作製に関する研究が行われてきた。

我々の研究室では比較的簡単, 安全, かつ低温で大面積薄膜作製の可能な高周波スパッタリング装置を用いて, 良質な ZnO 薄膜を作製するための基礎的データの取得を目指している。

これまでの ZnO 薄膜の作製に関する研究では, ASP (スパッタリングターゲット: 焼結 ZnO ディスク, スパッタリングガス: Ar) と AOSP (スパッタリングターゲット: Zn ディスク, スパッタリングガス Ar-O₂) の 2 種類の方法について調べてきた^{1,2)}。前回の報告³⁾では, AOSP と ASP における Al のドーピングについて両者の方法を比較検討した。その結果, AOSP 法においては, スパッタリングガス Ar-O₂ における酸素の影響でアモルファス Al₂O₃ の膜中への混入が著しく, 抵抗率の低下は困難であることが認められた。一方, ASP 法においては, Al の導入により, ノンドープの抵抗率から 4 桁から 5 桁低下し, Al のドーピング効果があることが示された。しかしながら, 抵抗率低下の機構が明確でなく, また, 抵抗率を下げるための最適 Al% 等が明確に示されなかった。

今回, ASP 法に焦点を絞り, ドーピング用 Al シートを前回の 10mm 角から 5mm 角にし, Al% の比較的低い領域の電気的特性, 結晶性, 光学的特性を詳細に調べ, さらに膜が堆積する基板の位置の影響についても調べ, 検討した結果を報告する。

2. 実験方法

ASP 法は, ZnO 焼結体 (純度 99.999%, 直径 100mm φ, 厚さ 3 mm) ディスクをスパッタリングターゲットとして用い, 純アルゴン (Ar) でスパッタリングし, ZnO 薄膜を得るものである。

今回, 高周波投入電力を 100W, 堆積時間 30 分一定とした。また, スパッタリングガス圧力並びに基板温度は, 最も結晶性が良好であった 4 mTorr と 300°C を採用した。

ZnO ターゲットに純度 99.99%, 5mm × 5mm × 0.5mm Al シート (前回報告³⁾: 純度 99.99%, 10mm × 10mm × 0.5mm) を導電性両面接着テープ (電子顕微鏡用シルバー粘着シート) で所定の枚数を設置することで Al のドーピングを行った。尚, Al のドーピング割合は, 下地の ZnO ターゲットとの面積比で表した。この Al の面積割合を, 以後この報告では Al% として表す。Fig. 1 に Al シートを下地の ZnO ターゲット上に配置した分布パターンを示す (参考のために前回の分布パターンも示す)。今回は基板の配置の影響を調べるため, 基板の配置を Fig. 2 に示すように, 基板 (ガラス基板, 石英基板, Si (100) 基板) を中心から 1cm, 3cm, 5cm の部分に設置した。以後この報告では基板の中心からの距離を d_s として表す。

実験手順および実験方法は以下の通りである。

・ Si (100) 基板 (10mm × 10mm), ガラス基板 (10mm × 10mm), と石英基板 (8mm × 8mm) を超音波洗浄器によりアセトンで 10 分間洗浄を行った後, 直ちにチャンバー内の基板ステージに設置する。

・ Si 基板はガラス基板の上部に設置し, シャッターにて基板を覆う。その後, 拡散ポンプで 5×10^{-6} Torr まで真空にし, また同時に基板温度を所定の温度にまで昇温しておく。

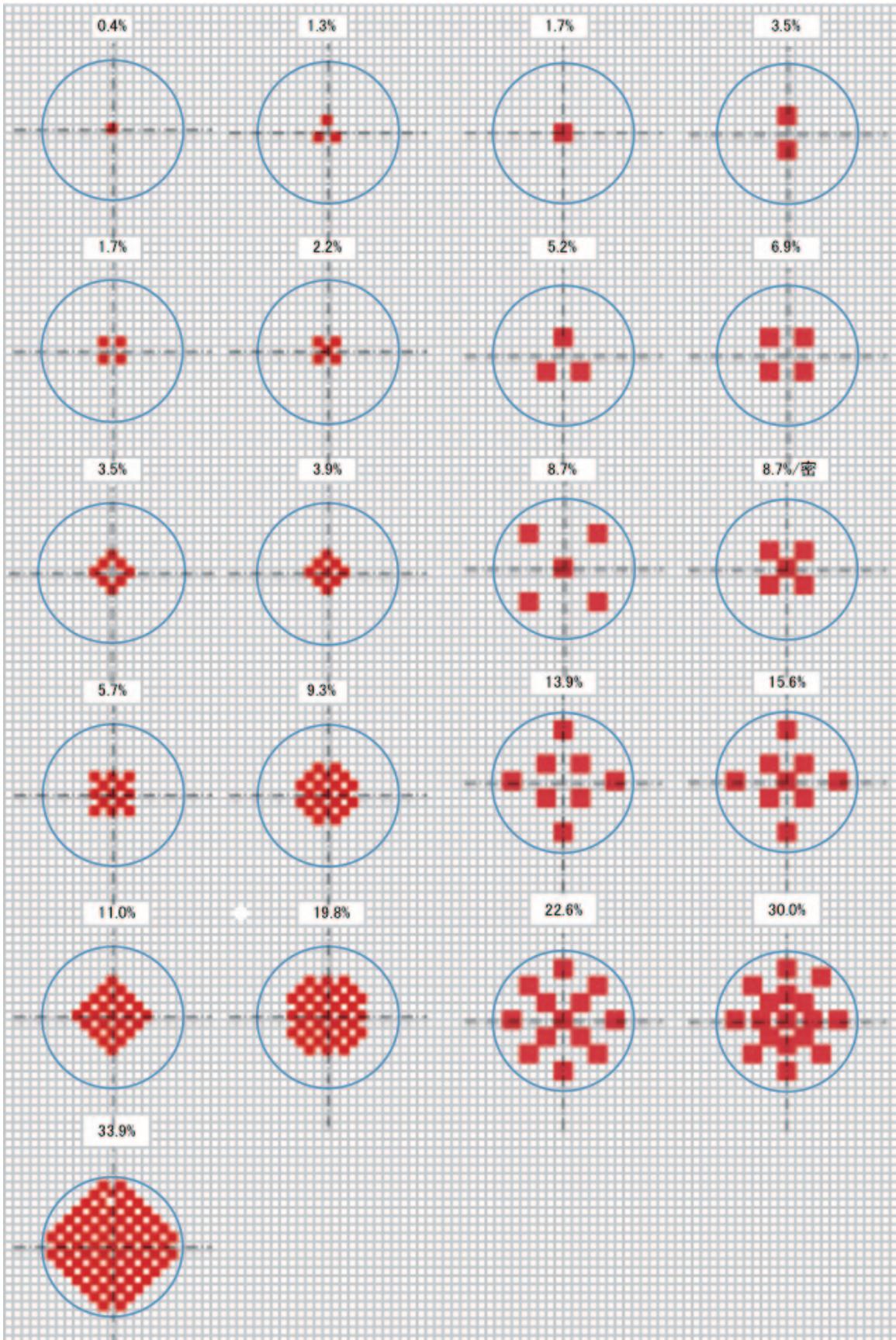


Fig.1 Schematic illustration of 5mmx5mm Al sheet array on ZnO target. A Circle in figure shows 85mm in diameter.

・次に、ガスを100scm程度導入し、メインバルブで所定のスパッタリング圧力に調整する。

・その後、高周波電力を投入し、マッチングボックスにより所定の電力に調整し、シャッターを開きスパッタリングを開始し、所定の試料を作製した。

試料の分析には、電子線反射回折法 (RED), 偏光解析法 (エリプソメトリ法), X線回折法 (XRD) を使用した。試料の結晶構造の評価は, RED, XRD により行い, 膜厚及び光学定数の導出は偏光解析法 (エリプソメトリ法) によって行った。また, サンプルを設置するときに使った石英ガラスをキセノンランプで照射し, 洗浄直後の石英ガラスと堆積直後の石英ガラスとの光透過特性から試料の光透過特性と光吸収特性を調べた。抵抗率は Van der Pauw 法によってホール効果測定装置 HL5500PCM (Bio-Rad Laboratories) により測定した。

尚, 今回用いたスパッタリング装置, 試料の分析装置並びに分析方法は, 前回の報告に詳細に示されている²⁾。

3. 実験結果および検討

3-1 電気的特性

3-1-1 抵抗率

中心からの距離 ($ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}, 5\text{cm}$) をパラメータとしてガラス基板上に堆積した ZnO 薄膜の Al% の変化に対する抵抗率の変化を Fig. 3 に示す。Al% の低い領域における抵抗率の変化を詳細に見るため 0% ~ 5% の拡大図を挿入した。Al% が 0% であるノンドーピング試料に関しては, $ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}$ の位置で堆積した薄膜試料の抵抗率は, ともに測定不能 ($100\ \Omega\ \text{cm}$ 以上) であった。Al% が 0.4% で測定可能になり, ともに $30\sim 100\ \Omega\ \text{cm}$ の抵抗率を示し, Al% が 1.3% で抵抗率が 3 桁もの急激な低下を示し ($1\sim 2 \times 10^{-1}\ \Omega\ \text{cm}$), その後 Al% が 4% までは $10^{-1}\ \Omega\ \text{cm}$ オーダで横ばいあるいは若干の増加を示し, その後 Al% が 20% までは徐々に低下し $10^{-2}\ \Omega\ \text{cm}$ オーダの値に達し, その後 Al% が 34% で測定不能である $100\ \Omega\ \text{cm}$ 以上に増加する。Al% が 3~4% までは, $ds = 1\text{cm}$ と $ds = 3\text{cm}$ の基板位置による抵抗率の有意差は見られないが, それ以上の Al% では $ds = 1\text{cm}$ が $ds = 3\text{cm}$ より 3~5 倍程度低い値を示す。 $ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}$ に関しては, Al% が 1.3% の低い値で Al のドーピングが効果的に作用していることが示唆される。 $ds = 5\text{cm}$ に関しては, ノンドーピングで抵抗率が $10^{-2}\ \Omega\ \text{cm}$ オーダの低い値を示し, Al% の増加に対して $10^{-2}\ \Omega\ \text{cm}$ オーダでの若干の増減を示し, Al% が 34% で若干増加する。若干のデータのばらつきはみられるが Al% の変化に抵抗率は殆ど影響を受けていない。

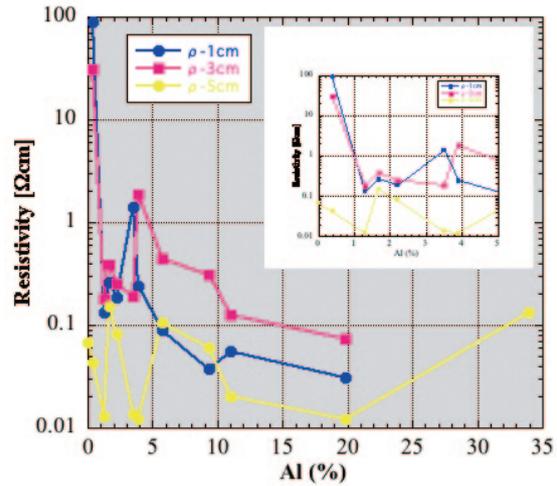


Fig.3 Changes of resistivity of the films deposited on the substrate at different distance from center position, as a function of the area rate of Al (Al%).

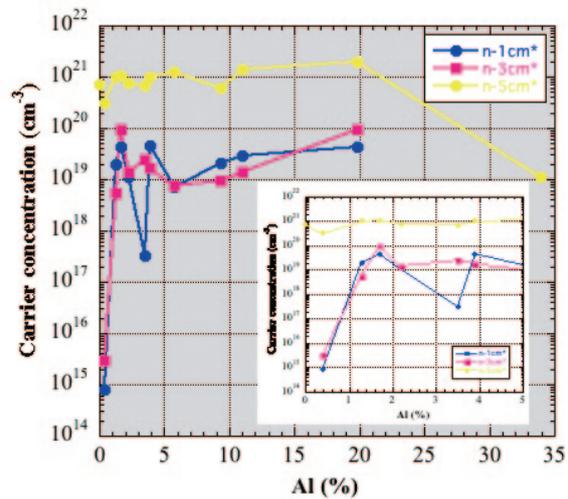


Fig.4 Changes of carrier densities of the films deposited on the substrate at different distance from center position, as a function of the area rate of Al (Al%).

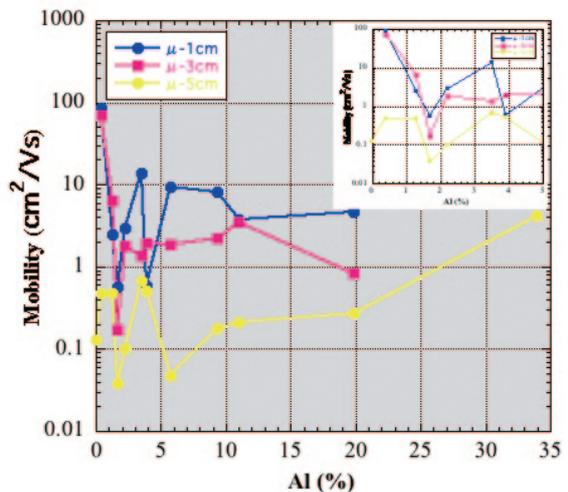


Fig.5 Changes of mobility of the films deposited on the substrate at different distance from center position, as a function of the area rate of Al (Al%).

3-1-2 キャリア濃度

中心からの距離 ($ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}, 5\text{cm}$) をパラメータとしてガラス基板上に堆積した ZnO 薄膜の Al% の変化に対するキャリア濃度の変化を Fig. 4 に示す。Al% の低い領域でのキャリア濃度の変化を詳細に見るため 0% ~ 5% の拡大図を挿入した。Al% が 0% であるノンドープ試料に関しては、 $ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}$ の位置で堆積した薄膜試料は、ともに測定不能であった。Al% が 0.4% で測定可能になり、ともに 10^{15}cm^{-3} オーダのキャリア濃度を示し、Al% が 1.3% で 4 桁もの急激な増加を示し (10^{19}cm^{-3})、その後若干の増加を示し Al% が 2% 以上で 10^{19}cm^{-3} 後半の値で飽和する。Al% が 35% に対するキャリア濃度のデータがないのは、高抵抗率のための測定不能による。測定可能範囲であった Al% が 0.4~20% では、 $ds = 1\text{cm}$ と $ds = 3\text{cm}$ の基板位置によるキャリア濃度の有意差は見られない。 $ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}$ に関しては、Al% が 1.3% までの急激なキャリア濃度の増加から、Al% が 1.3% の低い値で Al のドーピングが効果的に作用していることが示唆される。 $ds = 5\text{cm}$ に関しては、ノンドープでキャリア濃度が $7 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ の高い値を示し、Al% の増加に対して若干のデータのばらつきは見られるものの Al% の変化にキャリア濃度は殆ど影響を受けていないと見ることができる。しかし、Al% が 35% でキャリア濃度が 2 桁程度低下し、 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ を示した。

3-1-3 移動度

中心からの距離 ($ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}, 5\text{cm}$) をパラメータとしてガラス基板上に堆積した ZnO 薄膜の Al% の変化に対する移動度の変化を Fig. 5 に示す。Al% の低い領域での移動度の変化を詳細に見るため 0% ~ 5% の拡大図を挿入した。Al% が 0% であるノンドープ試料に関しては、 $ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}$ の位置で堆積した薄膜試料は、ともに測定不能であった。Al% が 0.4% で測定可能になり、ともに $70\sim 80\text{cm}^2/\text{Vs}$ の値を示し、Al% が 1.7% で移動度が 2~3 桁もの急激な低下を示し ($0.17\sim 0.5\text{cm}^2/\text{Vs}$)、その後若干の増加を示し Al% が 2% 以上で $1\sim 10\text{cm}^2/\text{Vs}$ の値で飽和する。Al% が 35% に対する移動度のデータがないのは、高抵抗率のための測定不能による。測定可能範囲であった Al% が 2% までは、 $ds = 1\text{cm}$ と $ds = 3\text{cm}$ の基板位置による移動度の有意差は見られないが、それ以上の Al% では $ds = 1\text{cm}$ が $ds = 3\text{cm}$ より 3~5 倍程度高い値を示す。 $ds = 1, 3\text{cm}$ に関しては、Al% が 1.7% までの急激な移動度の低下から、Al% が 1.7% の低い値で Al のドーピングが移動度の低下に影響を及ぼしていることが示唆される。 $ds = 5\text{cm}$ に関しては、ノンドープで移動度が $0.13\text{cm}^2/\text{Vs}$ の低い値を示し、Al% の増加に対して若干のデータのばらつきがみられるが、Al% の変化に移動度は殆ど影響を受けていないと見ることができる。し

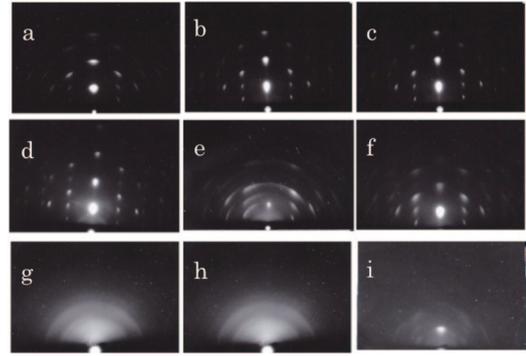


Fig.6 RED of the films / a: $ds=1\text{cm}$, Al%=0%, b: $ds=3\text{cm}$, Al%=0%, c: $ds=5\text{cm}$, Al%=0%, d: $ds=1\text{cm}$, Al%=11%, e: $ds=3\text{cm}$, Al%=11%, f: $ds=5\text{cm}$, Al%=11%, g: $ds=1\text{cm}$, Al%=34%, h: $ds=3\text{cm}$, Al%=34%, i: $ds=5\text{cm}$, Al%=34%.

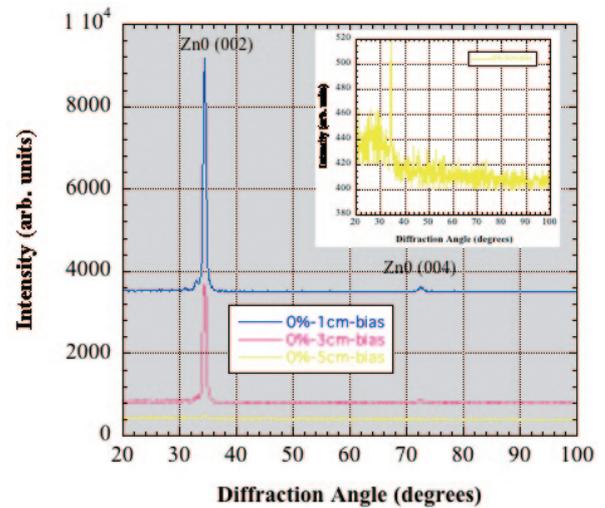


Fig.7 X-ray diffraction (XRD) spectra of non-doped films deposited on the substrate at different distance from center position (ds).

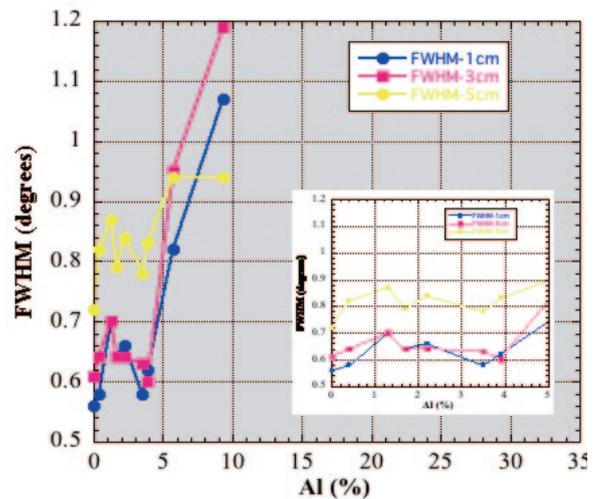


Fig.8 Changes of the Full Width at Half Maximum (FWHM) at the peak originated from ZnO (002) crystal face as a function of the area rate of Al (Al%).

かし、Al%が35%でキャリア濃度が2桁程度増加し、 $4.2\text{cm}^2/\text{Vs}$ を示した。

3-2 結晶構造

3-2-1 反射電子回折 (RED)

中心からの距離 ($ds = 1\text{cm}, 3\text{cm}, 5\text{cm}$) をパラメータとして Si 基板上に堆積した ZnO 薄膜の Al% の変化に対する反射電子回折像 (RED) の変化を Fig. 6 に示す。ノンドープに関しては、RED パターンは概ねスポットパターンを示しており、中心からの距離 ds に対して大きな違いは見られない。ZnO (002), ZnO (004) が他のスポットより強く、c 軸配向性を示している。詳細に ZnO (002) スポットの形状を観察すると、基板が中心から離れるとスポット形状が軸方向に流れ、結晶性が劣る傾向にある。Al% の増加に関して、Al% が低い領域ではそれぞれの ds に対してノンドープの RED パターンと違いは認められず、Al% が11%で RED パターンがリングパターンや拡散スポットになり結晶性が低下し始めていることを示している。Al% が34%になるとすべての ds に対してハローパターンを示し、試料薄膜がアモルファスになっていることを示す。しかし、 $ds = 5\text{cm}$ の試料に関しては、全くのハローパターンではなく、Al% が11%での RED パターンの痕跡を残している。 $ds = 1, 3\text{cm}$ ほど Al% の影響を受けていないことを示唆している。

3-2-2 X線回折 (XRD)

X線回折 (XRD) の一例として、中心からの距離 ds の違いによるノンドープ試料の XRD スペクトルを Fig. 7 に示す。回折ピークは、回折角 (2θ) $34.6^\circ, 72.6^\circ$ で観測される。これらのピークは ZnO (002), ZnO (004) からの回折ピークにそれぞれ対応する。その他の ZnO 結晶に関わる回折ピークは観測されず強い配向性を示唆している。 ds の増加、即ち基板の中心から離れるに従って ZnO (002) に対応する回折ピークの強度は低下する。この低下は、膜厚の低下に対応しており、スペクトルに対する大きな変化は認められない。図中には、 $ds = 5\text{cm}$ を拡大して示してある。Al% の増加に対して、新たな回折ピークは見られないが、ZnO 自身の膜厚の低下による ZnO (002) に対応する回折ピークの強度の低下が認められた。Al% の増加による膜厚の減少より、回折ピーク強度の変化からの結晶構造評価は困難なため、ZnO (002) 面からの回折ピークの半値幅を用いて結晶性の評価を行った。Al% の変化による ZnO (002) 面からの回折ピークの半値幅 (FWHM) の変化を Fig. 8 に示す。Al% がノンドープから1.3%まで FWHM が緩やかに増加し、Al% が4%以上で急激に増加している。X線回折ピーク半値幅が結晶粒の粒径と関わることから⁴⁾、Al% が4%の低領域では、Al のドーピングにより僅かな影響を受

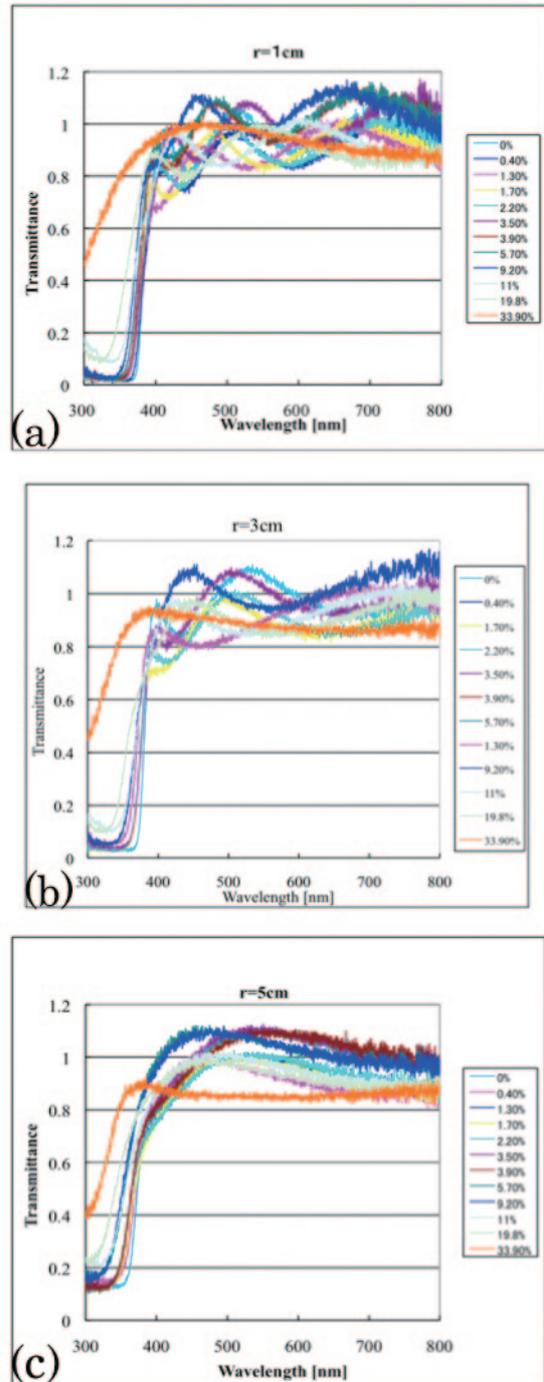


Fig.9 Transmittance spectra of the films deposited at different area rate of Al (Al%) under the substrate at different distance from center position (ds). (a), (b), and (c) show $ds=1\text{cm}, 3\text{cm}$ and 5cm respectively.

け、4%以上では大きな影響を受けていることが示唆される。尚、Al%が10%以上では、回折ピーク強度が弱く FWHM の評価は困難であった。(その意味では、試料膜厚が薄い領域では、RED による評価が XRD より信頼性は高い。)

3-3 光学特性

3-3-1 透過率特性とバンドギャップ Eg

Al のドーピングならびに中心からの距離 ds の違いによる透過率への影響を調べた結果を Fig. 9 示す。どの条件においても、400nm 以上の可視光領域では80%以上の値を示している。中心からの距離 $ds = 1\text{cm}$, 3cm に関しては Al% の変化を含めて、370nm ~400nm 付近の立ち上がり領域での大きな違いはみられないが、ともに Al% の増加にしたがって立ち上がりが短波長側にシフトしていることがみられる。 ds の違いによる影響を強いて評価するならば370nm 以下での膜厚の違いによる透過率の違い程度である。 $ds = 5\text{cm}$ に関しては、ノンドープの立ち上がりが $ds = 1\text{cm}$, 3cm の立ち上がりより短波長に位置し、緩やかに立ち上がっている。 ds の違いによる Al% の影響は、Al% が33.9%の透過スペクトルを比較すると明確になる。可視光領域でのスペクトルの干渉の形を比較するとほぼ同程度の干渉を示しており、膜厚の違いはさほど大きくないと考えることができる。立ち上がり付近のスペクトルの形に注目すると明らかに $ds = 5\text{cm}$ のスペクトルが $ds = 1, 3\text{cm}$ のそれと比べると長波長側であり、Al% の影響が少ないことを示唆している。

この透過率特性を用いて、ZnO 薄膜のバンドギャップを計算し、 ds の違いによる Al% に対するバンドギャップ E_g (eV) の変化を求めた図を Fig. 10に示す。Al% の増加に対して、ノンドープから2%まで E_g は僅かに増加し、Al% が10%以上で急激に増加する。前回の報告で示した Al% の増加に対して Al_2O_3 の含有率が増加したのと同様にバンドギャップ E_g (eV) が増加しており、 Al_2O_3 の影響により ZnO の見かけのバンドギャップ E_g (eV) が増加すると考えられる。 ds の違いによる影響に関しては、 $ds = 1, 3\text{cm}$ における E_g の変化は Al% の変化に対しても同様な変化を示し、 E_g の値も殆ど同じと見ることができる。一方、 $ds = 5\text{cm}$ に関しては Al% の変化に対して同様な変化を示すが、ノンドープでの E_g の値が $d = 1, 3\text{cm}$ の E_g の値より高くその E_g の差を Al% の変化に上乗せした状態で変化しているように見られる。

3-3-2 屈折率と膜厚

Si 基板上に堆積した ZnO 薄膜をエリブソメータにより測定し、その結果を ZnO 薄膜と表面層(表面粗さ: ZnO とポイドの混合層)の2層構造を仮定し、シミュレーションを行った。ZnO の屈折率 n は1.8と2.0で消衰係数 k は0でほぼ理論曲線と測定結果はフィティングした。Al% の変化に対する膜厚ならびに屈折率の変化を Fig. 11と Fig. 12にそれぞれ示す。膜厚について、 $ds = 1, 3\text{cm}$ に関しては Al% が10%まで $ds = 1\text{cm}$ で若干の膜厚の低下がみられるがともに大きな変化は見られない。10%以上になるとともに大きく減少す

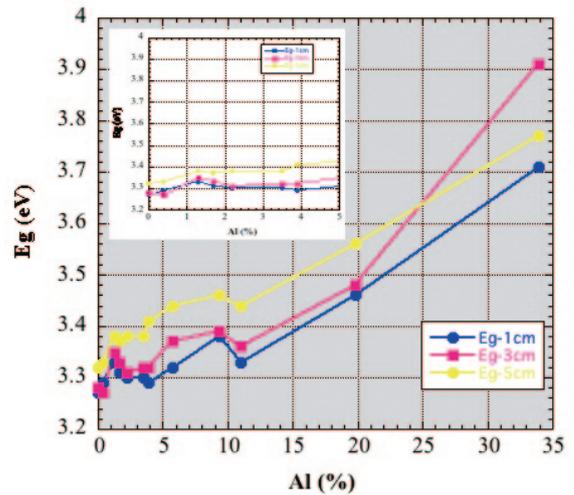


Fig.10 Changes of optical band gap (E_g) of the films deposited on the substrate at different distance from center position (ds), as a function of the area rate of Al (Al%).

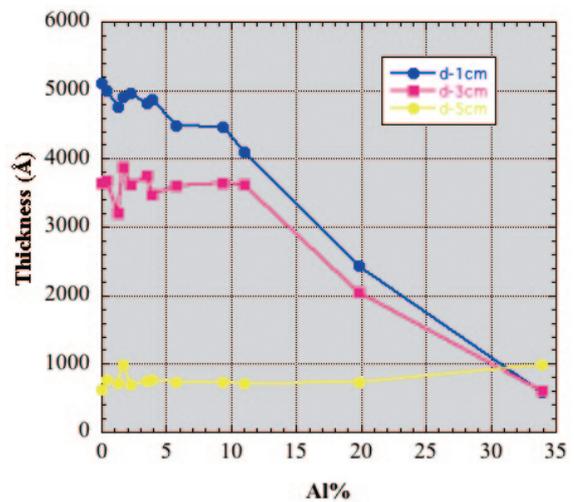


Fig.11 Changes of the thickness of the films deposited on the substrate at different distance from center position (ds), as a function of the area rate of Al (Al%).

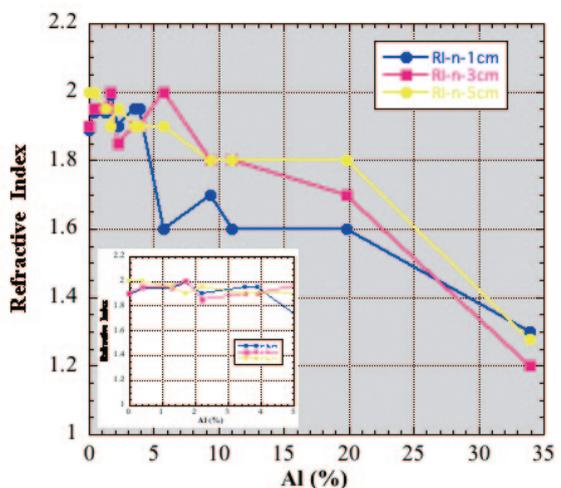


Fig.12 Changes of the refractive index of the films deposited on the substrate at different distance from center position (ds), as a function of the area rate of Al (Al%).

る。ds = 5cm に関しては、Al% の変化に膜厚は殆ど影響されない。

屈折率に関して、Al% が 4% まで殆ど変化なく、その後 Al% の増加とともに減少する。Al% を 100%、即ちターゲットを Al ターゲットにして、Ar-O₂ (20%) の条件でスパッタリングし堆積した薄膜の屈折率 n は 1.45 であった。結晶 Al₂O₃ (サファイア) の屈折率 n が 1.76~1.77 であることを考えると、Al% を増加し堆積した薄膜試料の屈折率 n が低下する要因は、アモルファス Al₂O₃ が膜中に形成されることによると考えられる³⁾。これらのことより、Al% が 4% 以上の屈折率の低下はやはりアモルファス Al₂O₃ が膜中に形成されると考えることができる。

3-4 電気的特性を軸にした検討

電気・光学的特性ならびに結晶構造についての実験結果を示してきた。ここでは、電気的特性を軸にして検討を加える。ZnO に対する Al のドーピングの目的は抵抗率を低下させることにある。Al% の変化に対する抵抗率の変化は、Al% が 0~1.3% の狭い範囲で急激に低下し、対応するキャリア濃度に関しても 4 桁も増加しておりキャリア生成という意味では十分なドーピング効果があると考えられる。一方、対応する移動度は 2~3 桁程度低下し、移動度の低下があまりにも大きすぎるように思われる。この移動度の低下を押さえることが可能ならば、さらなる抵抗率の低下を期待することができる。マグネトロンスパッタリングで生成された AZO 膜の抵抗率は $10^{-4} \sim 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ のオーダーを示しており⁵⁾、今回の抵抗率と比べると 1~2 桁低い抵抗率であり、やはり Al ドーピングによるこの移動度の低下を押さえることが大きな課題となる。Al% が高い領域では、キャリア供給サイトとして寄与しないアモルファス Al₂O₃ の増加による抵抗率の増加と考えることができる。ds の影響に関しては、中心から最も遠い距離である ds = 5cm の抵抗率は、ノンドープ試料で $10^{-2} \Omega \text{ cm}$ と低い値を示しており、キャリア濃度も $7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の高い値を示す。これは、ZnO のキャリア供給サイトを結晶表面に存在する酸素ベークンシによると考えると、結晶構造で示したように ZnO 結晶粒が非常に小さいために低抵抗率になったと考えることができる。移動度は 10^{-1} オーダと低く、Al% の変化に対しては殆ど変化がなく、この移動度の低さは、結晶粒の大きさからくるもので、改善する余地はないように思われる。

4 ま と め

高周波スパッタリング法を用いて電子材料としての良質な ZnO 薄膜を作製するための基礎データを得るため研究を行ってきた。その結果、得られた ZnO 薄膜

の結晶性ならびに光学的特性は電子材料として有用な特性を示したが、電気的特性である抵抗率が高く、電子デバイスとしては実用段階ではないことが示された。ASP 法は、Al の導入により、ノンドープの高抵抗率から 4 桁から 5 桁低下し、Al のドーピング効果があることが示された。しかしながら、抵抗率低下の機構が明確でなく、また、抵抗率を下げるための最適 Al% 等が明確に示されなかった。

今回、ASP 法に焦点を絞り、Al シートを前回の 10mm 角から 5mm 角にし、Al% の比較的低い領域の電気的特性、結晶性、光学的特性を詳細に調べ、さらに膜が堆積する基板の位置の影響についても調べ検討した結果のまとめを以下に示す。

- ・ Al% の変化に対する抵抗率の変化は、Al% が 0~1.3% の狭い範囲で急激に低下し ($10^{-2} \Omega \text{ cm}$)、Al% が 13.9% 以上で堆積した薄膜試料の抵抗率は Al% の増加とともに増加した。

- ・ この低い Al% での抵抗率の低下は、キャリア濃度の増加も著しく、Al によりドナーサイトが形成されたと考えられる。

- ・ 過剰な Al の導入は、Al₂O₃ の生成を引き起こし抵抗率が増加する。

- ・ 基板設置位置 ds に関しては、中心からの距離 ds が 1cm、3cm の試料は、電気的・光学的特性ならびに結晶構造も同様な特性を示し、本質的な有意差はなかった。

- ・ 基板設置位置 ds に関しては、中心から最も遠い距離 ds = 5cm の ZnO 薄膜は、微結晶粒から成っており、ノンドープ試料で $10^{-2} \Omega \text{ cm}$ の抵抗率を示し、Al ドーピングの影響を受けない。

最後に、前回の報告で『ASP は、Al のドーピングにより結晶性が乱されず、むしろ改善される傾向にあり、移動度の改善が抵抗率の低下に大きく寄与したと考えられる。しかしながら、Al のドーピングにより結晶性が改善される理由は不明であり、今後の課題としたい。』と最後に述べたが、今回の Al% の低領域での詳細な検討より、Al のドーピングによりキャリア濃度は増加するが移動度は低下した。また、前回の報告では RED だけの結果を受けて述べており、かなり説明としては苦しいと思われ、前回の課題も含め詳細な微細構造を透過型電子顕微鏡で詳細に調べ、今回の Al ドーピングによる著しい移動度の低下の問題を明らかにしたい。

謝 辞

X 線回折は大同大学の X 線回折装置 (理学電機社製 ATX-G) を使用させていただきましたことに感謝します。さらに X 線回折データに関して多くのご指導を頂

きました同大学教授・坂 貢 氏に深く感謝します。
また、ホール測定装置を利用させて頂きました中部大
学電気工学科教授・井戸敏之氏に感謝します。

参考文献

- 1) 清水秀己, 岩田 航: 愛知教育大学研究報告, 芸術・保健
体育・家政・技術科学・創作編. 2004, 53, pp. 25-33
- 2) 清水秀己, 岩田 航: 愛知教育大学研究報告, 芸術・保健

- 体育・家政・技術科学・創作編. 2008, 57, pp. 43-49
- 3) 清水秀己, 徳重雄紀: 愛知教育大学研究報告, 芸術・保健
体育・家政・技術科学・創作編. 2010, 59, pp. 56-61
- 4) B. D. Cullity: Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley,
Reading, MA, 1978
- 5) H. Zhu et al.: Thin Solid Films 518 (2010) pp. 4997-5002

(2010年9月17日受理)