

アモルファス InGaZnO 薄膜のギャップ内準位の評価

日大生産工（院） ○前田督快 日大生産工 清水耕作

1. まえがき

非晶質酸化物半導体は透明でありながら半導体であり、室温で作製しても $10[\text{cm}^2/\text{Vs}]$ 程度の高いホール（Hall）移動度を持ち、さまざまな分野において応用が期待されている。

今まで、CPM 法（光電流一定法）を用いて主として価電子帯側の評価をしてきたが、デバイスを動作させるためには、伝導帯側の情報をすることは極めて重要なことである。本研究では CPM 法と TFT（薄膜トランジスタ）を用いて高効率化、長寿命化に向けてギャップ内準位の評価を行った。

2. 実験方法および測定方法

2.1 CPM 法

a-IGZO は、パルスレーザ堆積法（PLD 法）を用いて 200nm-700nm 堆積した。レーザーエネルギー密度を $9\text{J}/\text{cm}^2$ 一定として、CPM に用いた試料はギャップ幅 W を $1000\mu\text{m}$ 、ギャップ長 L を $30\mu\text{m}$ とした。光照射面積はレンズにより直径 10mm 程度に集光をして、光照射エネルギーを 1.5eV から 3.1eV、ステップ eV を 0.1eV とした。

半導体が照射した光を吸収する場合、入射光と透過光強度との関係は式(1)で表される。

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (1)$$

ただし、 I ：光透過強度、 I_0 ：光入射強度、 α ：光吸収係数 $[\text{1}/\text{cm}]$ 、 d ：膜厚 $[\text{cm}]$ である。

吸収された光は、半導体内で電子正孔対が形成されている。この電荷を電場で収集すれば、光電流は次のように表される。

$$I_{ph} = q N(E) (1-R) \{ 1 - \exp(-\alpha d) \} \eta \mu \tau E \quad (2)$$

ただし、 q ：電荷素量 $[\text{C}]$ 、 $N(E)$ ：状態密度 $[\text{1}/\text{cm}^3/\text{eV}]$ 、 R ：反射係数、 α ：光吸収係数 $[\text{1}/\text{cm}]$ 、

d ：膜厚 $[\text{cm}]$ 、 η ：量子効率、 μ ：移動度 $[\text{cm}^2/\text{Vs}]$ 、 τ ：寿命 $[\text{s}]$ 、 E ：電場 $[\text{V}/\text{cm}]$ である。ここで反射係数、量子効率は一定とみなし、電場を一定とする。また光電流を一定とするのは、フェルミ準位の位置に敏感である移動度、寿命を一定にするためである。これらを考慮すると準位密度は次式で表される。

$$\alpha = \frac{\text{const.}}{N(E)} \quad (3)$$

ただし、const.：定数、 $N(E)$ ：フォトン数である。式（3）より光吸収係数を求めることができ、これがギャップ内の準位に相当する。

2.2 TFT

TFT はボトムゲート（逆スタガ）型トランジスタを用いて、ギャップ幅 W を $300\mu\text{m}$ 、ギャップ長 L を $50\mu\text{m}$ とした。伝達特性はゲート電圧を -10V から 20V と変化させ、ソース電圧を 1V 一定とした。また出力特性はドレイン電圧を 0V から 4V と変化させ、ゲート電圧を一定（ 0V から 20V ステップ 5V ）とした。

移動度、しきい値は線形あるいは飽和の条件が満たされていれば、次式を用いることにより求まる。

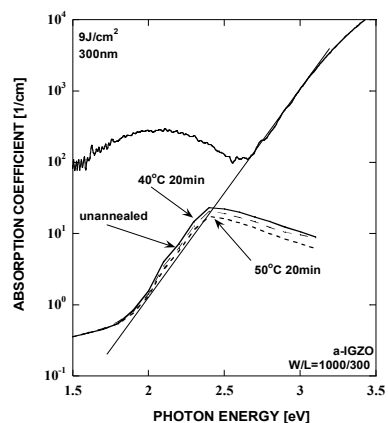
$$I_d = \frac{W}{2L} \mu \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} (V_g - V_T)^2 \quad (4)$$

ただし I_d ：ドレイン電流 $[\text{A}]$ 、 W ：ギャップ幅 $[\mu\text{m}]$ 、 L ：ギャップ長 $[\mu\text{m}]$ 、 μ ：移動度 $[\text{cm}^2/\text{Vs}]$ 、 ϵ_0 ：真空の誘電率 $[\text{F}/\text{cm}]$ 、 ϵ_r ：比誘電率、 d ：膜厚 $[\text{nm}]$ 、 V_g ：ゲート電圧 $[\text{V}]$ 、 V_T ：しきい値電圧 $[\text{V}]$ である。またサブスレッショルドスイングは、伝達特性のオフ領域からオン領域へと遷移するしきい値領域下において、対数グラフの傾きが最大のと

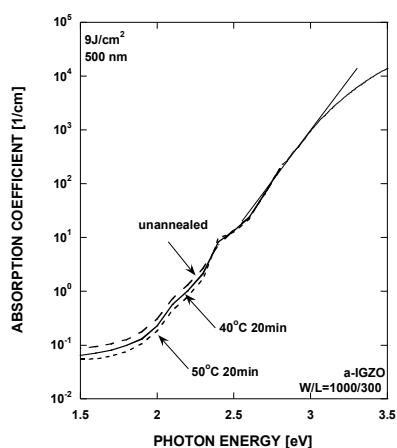
ここで、ドレイン電流が1桁分増加するために必要なゲート電圧の増分である。

3. 実験結果および検討

Figure1 は 300nm の光学吸収スペクトルを示している。実用に近い 300nm の薄膜においても、CPM 法により製膜条件に関わらず存在している 2.4eV の準位を確認することができた。しかしこれ以上薄い膜では確認ができなかった。詳細に検討を行うため 400nm 以上の薄膜について検討をした。膜厚依存性をみると準位の大きさはほぼ一定であり膜の中に平均に分布していると考えられる。アニール温度依存性についてみると低エネルギー側のスペクトルが下がり傾きが急峻となり 2.4eV の準位は増えることがわかった。



(1)



(2)

Figure1. Absorption spectra by optical transmission and gap state in amorphous InGaZnO deposition conditions (1) 300nm, (2) 500nm.

光吸収係数は伝導帯、価電子帯の両方の情報を反映しているためどちらか一方のみを知ることができない。そこで、トランジスタの特性を検討して伝導帯側の情報を得た。Figure2 は 600nm におけるトランジスタの特性を示している。それぞれの膜厚についてもトランジスタの基本的な特性がとれていることを確認した。

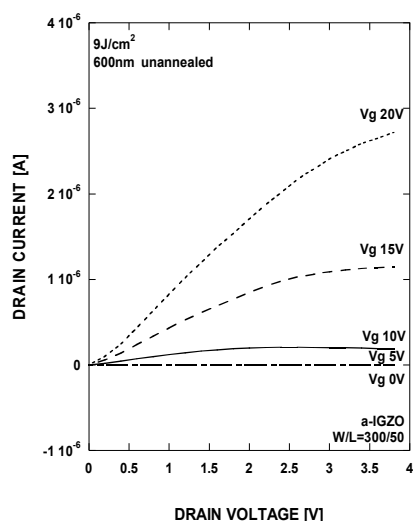
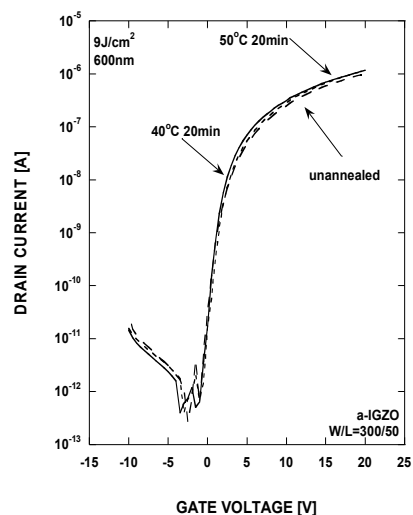
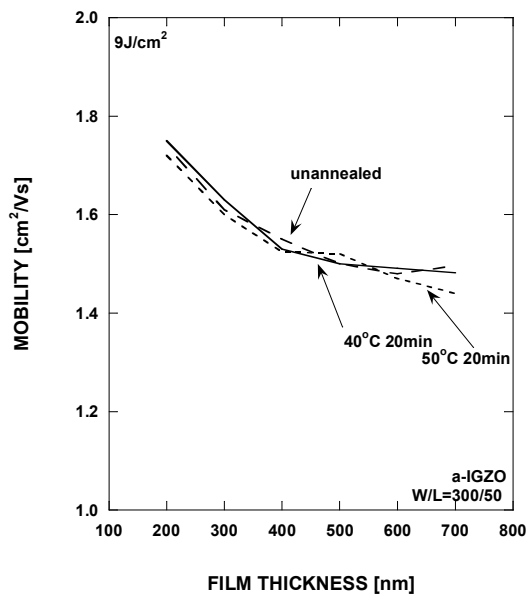
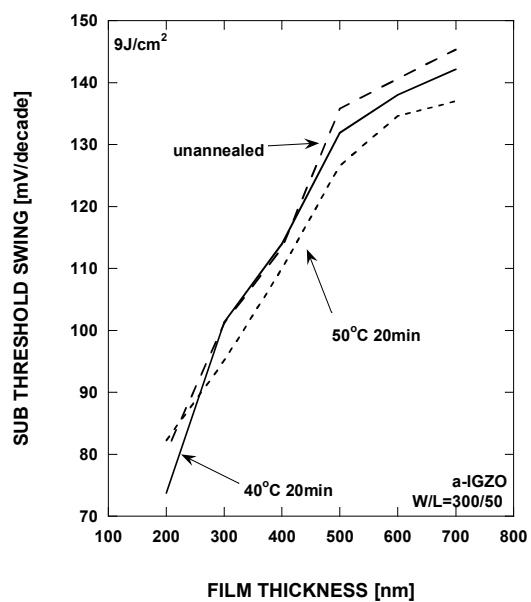


Figure2. Transfer characteristic and saturation characteristic of n-channel amorphous InGaZnO thin-film transistor.

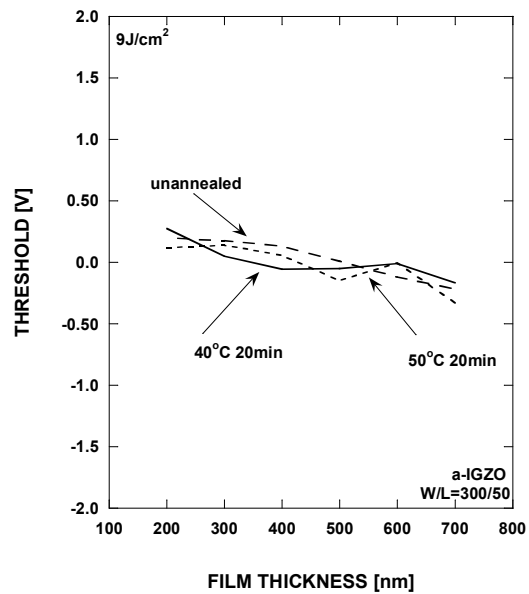
膜厚依存性をみると膜厚が厚くなるほど移動度は減少し、サブスレッショルドスイングは大きくなった。アニール温度依存性はアニールをすることでサブスレッショルドスイングの傾きが変った。この結果から、Figure5 に示すように伝導帯側にも大きさは分からないが裾が存在している可能性があることがわかってきた。



(1)



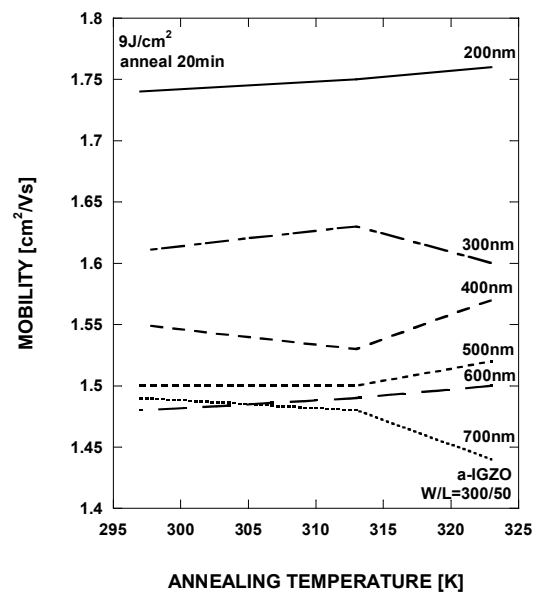
(2)



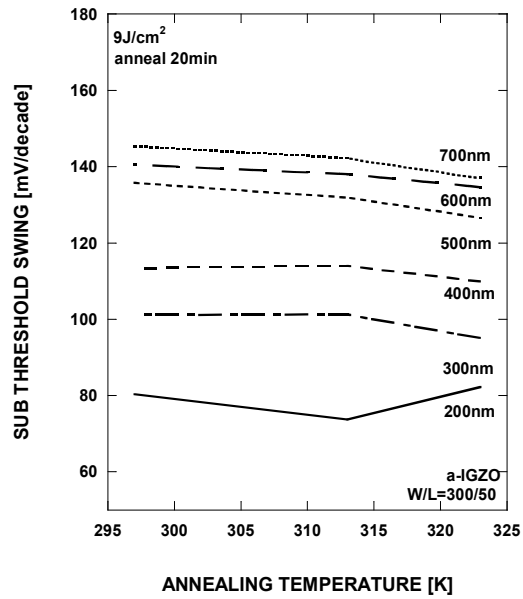
(3)

Figure3. Mobility and sub threshold swing and threshold voltage show dependences on film thickness.

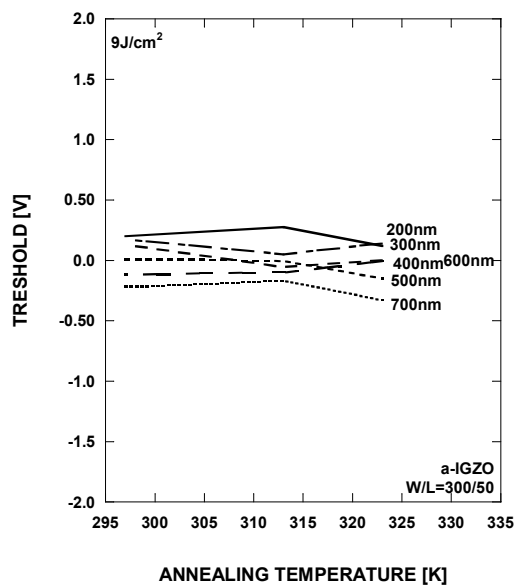
(1) MOBILITY, (2) SUB TRESHOLD SWING, (3) TRESHOLD VOLTAGE.



(1)



(2)



(3)

Figure4. Mobility and sub threshold swing and threshold voltage show dependences on annealing temperature.

(1) MOBILITY, (2) SUB TRESHOLDSWING, (3) TRESHOLD VOLTAGE.

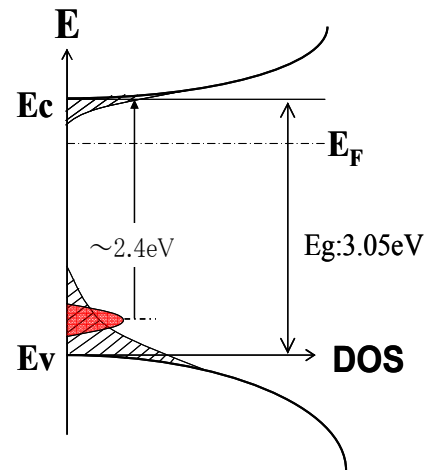


Figure5. Schematic illustration of tail state and gap state. Tail of conduction band get in forbidden band.

4. まとめ

薄膜とトランジスタを評価することによりギャップ内の準位の存在を確認した。アニールをすることで光学吸収スペクトルの傾きが変化をし、またサブスレショルドスイングの傾きが変化した。このことから、伝導帯側にも裾が存在していることが予測される。

これまでの検討により、価電子帯側の状態は理解されてきた。今後は、TFT に着目をして伝導帯側の情報をより詳細に得ること、またデバイスをフレキシブルな基板に作製するために、実用的な範囲内(～100℃程度)でアニールをすることにより温度の信頼性、デバイスの特性の再現性を検討する。

5. 「参考文献」

- 1) 清水耕作, ギャップ内準位の光学的評価方法, 日本大学生産工学部第 40 回学術講演会予稿集, (2007), pp55-56.
- 2) 前田, 清水, 野村, 平野, 神谷, 細野, CPM 法によるアモルファス酸化物半導体 In-Ga-Zn-O 薄膜の裾状態評価(4), 第 70 回応用物理学会学術講演会予稿集, No2, (2009), P891.
- 3) 薄膜材料デバイス研究会編, 「薄膜トランジスタ」, コロナ社, (2008), pp13-16, pp41-53.