

変調アドミタンス法を用いた酸化物半導体 InGaZnO_4 の欠陥評価(II)

日大生産工 (院) ○刀根 仁 日大生産工 清水 耕作

1.はじめに

現在、液晶表示装置、プラズマパネル、蛍光表示版や太陽電池基板の大きさは 1m^2 を超える。現在主流である水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) は低温では十分な性能が得られず、また十分な性能を得るためには 250°C 以上で製膜しなければならないため、廉価なプラスチック基板には製膜することは困難である。そこで、非晶質酸化物半導体 InGaZnO_4 (IGZO) は透明な半導体であり、室温で作製しても $\sim 2\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度の電界効果移動度を持ち、様々な分野において応用が期待されている。

我々はこれまでに CPM(光電流一定)法を用いて、a-IGZO の禁制帯中に存在するギャップ内準位について評価し、深い位置に平均的に分布していることを報告してきた⁽¹⁾ (Figure1)。CPM 法は、サブギャップ吸収の評価をしているので、結合状態が信号として反映されている。伝導帯、価電子帯の両方の情報を反映してしまう。

a-IGZO は n 型半導体であるので電子の挙動を解析する必要があり、伝導帯側の準位の情報、また裾の状態を知ることは極めて重要である。

本研究では、変調アドミタンス法を用い、a- InGaZnO_4 の伝導帯側のギャップ内準位の挙動を明らかにし、その界面の特性が TFT 特性に与える影響について検討する。

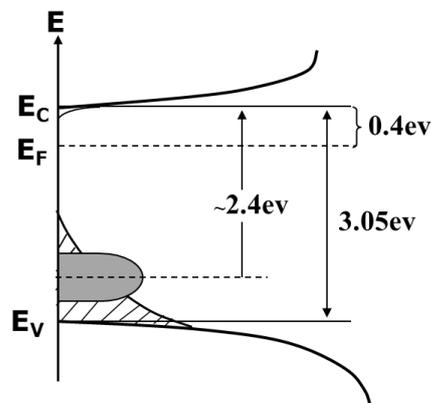


Figure 1 Schematic illustration of subgap bandprofile of a-IGZO

2.実験方法

・素子構造

変調アドミタンス法に用いた試料は熱酸化膜付の P 型 Si ウェハに RF マグネトロンスパッタリング法により、製膜ガス圧 6Pa 、投入電力 100W 、ターゲット-基板間距離 35mm としてチャンネル層に a-IGZO 薄膜を約 30nm 堆積させ、MOS ダイオードの構造とした。また、上部電極は Cr、Al の 2 種類とした。

TFT はボトムゲート型を採用し、ギャップ幅 10mm 、ギャップ長 0.03mm 、ソースドレイン電極は Cr と Al を用いた。(Figure2 (a)、(b))

大気圧下 $50, 100, 150, 200^\circ\text{C}$ で 20 分間のアニール処理を行った。

Defect Characterization of Amorphous Oxide Semiconductor InGaZnO_4

by Modulated Admittance Method

Hitoshi Tone and Kousaku Shimizu

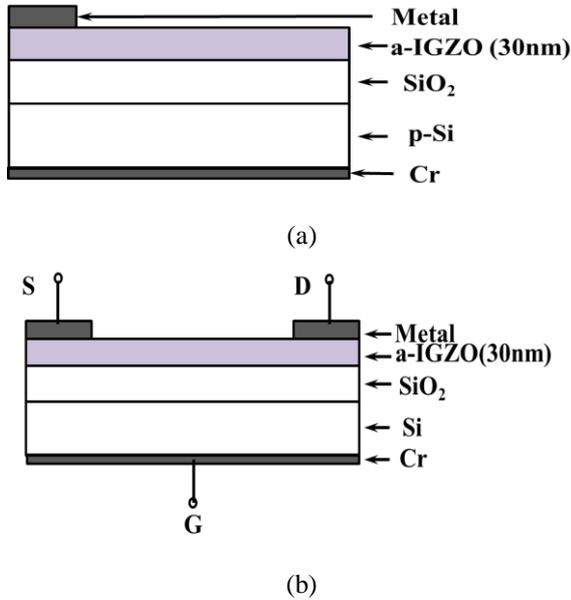


Figure 2 (a) Cross Sectional view of a-IGZO MOS Structure. (b) Cross Sectional view of a-IGZO TFT

また、温度依存性については、ヒーターを用いて室温、50,60,70,80,90,100℃で昇温しながら測定を行った。

・変調アドミタンス法

コンダクタンスの周波数依存性、電圧依存性から界面準位密度を評価する方法で、界面準位に存在するキャリアが一定の充放電時定数を持っていることを利用して半導体と界面準位の間でのキャリアの放出を信号として得る。Figure3(a)にMOSダイオードのエネルギー帯図の一例を示す。このバンド図における界面準位を考慮したMOSダイオードの等価回路を(b)に示す。半導体と界面準位における容量が並列に接続され酸化膜容量が直列に接続されている。

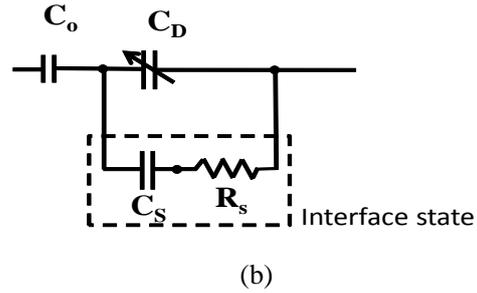
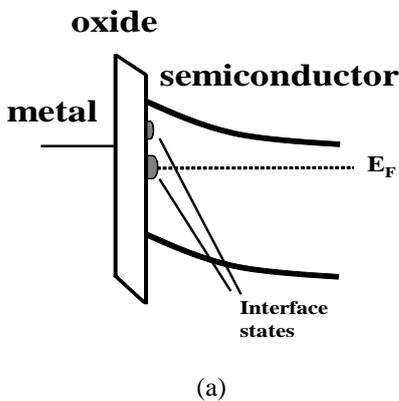


Figure 3 Interface state density-correct of MOS diode, energy band diagram (a) and equivalent circuit(b)

ただし、 C_o :酸化膜容量、 C_D :半導体の空乏層容量、 C_s :半導体の界面準位の容量、 R_s :界面準位の容量である。ここで重要なのは、本来は、界面準位の情報のみを得たい、しかし、空乏層容量と界面準位における容量が並列に接続されているため、界面準位の情報のみを得ることはできない。そこでFigure3の等価回路を(1)、(2)式を用いてFigure4のように変換する。

$$C_p = C_D + \frac{C_s}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1)$$

$$G_p = \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2)$$

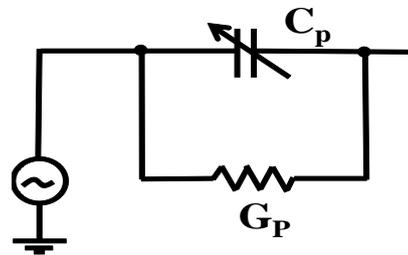


Figure 4 Equivalent circuit

G_p は界面準位におけるコンダクタンスを示し、 C_p は合成容量を示す。この回路のアドミタンスは、

$$Y_{in} = G_p + j\omega C_p \quad (3)$$

となり、この界面準位の充放電に基づくアドミタンスは、

$$Y_{ss} = j\omega \left(\frac{q^2}{kT} \right) \int \frac{N_{ss} f_0 (1 - f_0) d\phi}{(1 + j\omega f_0 / c_n n_{so})} \quad (4)$$

で表わされ、 q :電荷素量、 τ :電子の熱放出緩和時間、 ω :時定数、 N_{ss} :界面準位密度、 k :温度、 f_0 :フェルミ関数、 C_n :電子捕獲率、 n_{so} :キャリア密

度である。

$$f_0(1-f_0) = \frac{kT}{q} \cdot \frac{df_0}{d\phi}, \quad \tau = \frac{1}{c_n n_{so}} \quad (5)$$

(5)式を(4)式に代入するとアドミタンスは簡略化することができ、次式のように表される。

$$Y_{ss} = \frac{qN_{ss}}{2\tau} \ln(1+\omega^2\tau^2) + j\omega \frac{qN_{ss}}{\tau} \tan^{-1}(\omega\tau) \quad (6)$$

ただし、 q :電荷素量、 τ :電子の熱放出緩和時間、 ω :時定数、 N_{ss} :界面準位密度、 k :温度、 f_0 :フェルミ関数、 C_n :電子捕獲率、 n_{so} :キャリア密度である。この変調アドミタンス法は、周波数を与えてフェルミレベルの上下を変調させ、共鳴が起こることを利用する方法でありアドミタンス共鳴が起こるとき、(6)式においてコンダクタンス成分のみとなる。コンダクタンスの成分を G_p として、右辺を $\omega\tau$ の関数として $G_p/\omega\tau$ とすると、アドミタンスシグナルは次式のように表すことができる。

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qN_{ss}}{2\omega\tau} \ln(1+\omega^2\tau^2) \quad (7)$$

ただし、 G_p :コンダクタンス、 q :電荷素量、 τ :時定数、 ω :周波数、 N_{ss} :界面準位密度、 k :温度、 f_0 :フェルミ関数である。ここで(7)式の $G_p/\omega\tau$ が最大値(ピーク)をとる時は、必ず $\omega \cdot \tau = 1.98$ となるしたがって周波数に対するアドミタンスシグナル $G_p/\omega\tau$ を求めれば(7)式より界面準位密度の算出をおこなうことができる。

次に界面準位の深さの算出方法は、アドミタンスシグナルが最大値をとる時の周波数より電子の放出率を求めることができる。電子の放出率 e_n は次式で表され、

$$e_n = A^* \cdot \frac{2}{q} \cdot T^2 \sigma_n \exp\left[-\frac{E_c - E_d}{kT}\right] \quad (8)$$

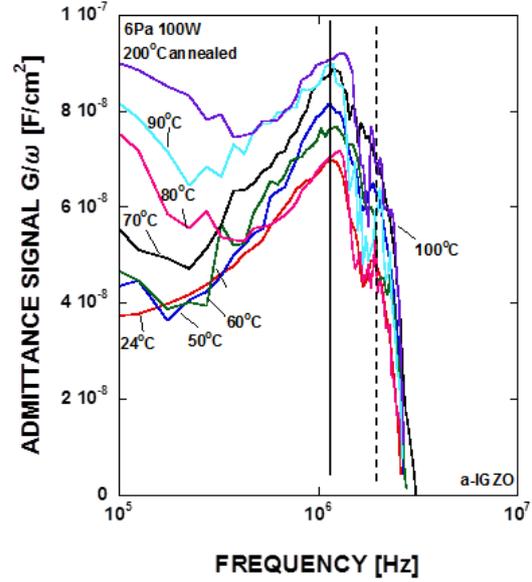
ただし、 k :ボルツマン定数、 σ_n :キャリア捕獲断面面積、 A^* :Richardson定数である。この両辺に対数をとると、(9)式のように変換できる。

$$\ln\left(\frac{e_n}{T^2}\right) = \frac{E_c - E_d}{k} \cdot \frac{1}{T} + \ln\left(A^* \cdot \frac{2}{q} \cdot \sigma_n\right) \quad (9)$$

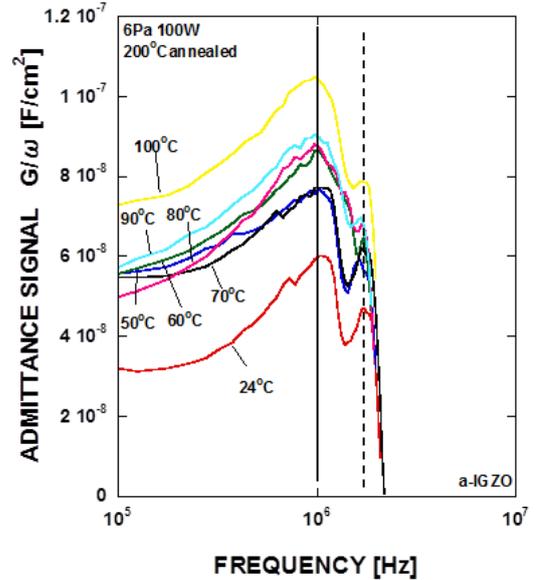
これより各温度に対する電子の放出率に対するアレニウスプロットをとり、界面準位の深さ、キャリアの捕獲断面面積を求めることができる。

3.結果および考察

Figure5 に変調アドミタンス法を用いて行った評価の結果を示す。



(a) Cr 電極



(b) Al 電極

Figure 5 Admittance Spectra for a-IGZO under 200°C annealed conditions

横軸に周波数、縦軸にアドミタンスシグナルを示す。2つのピークが確認できた。Cr電極では1.2と1.7MHzでAl電極では1.0と1.7MHzであった。この2つのピークは素子構造より、a-IGZO/SiO₂と熱酸化膜/Si界面を反映するシグナルであることが明らかである。また、1.7MHzのピークは熱酸化膜を反映していることがす

に報告されている⁴ので、1.2 および 1.0MHz が a-IGZO を反映していることがわかる。この界面準位の深さを算出した結果を次に示す。

Table 1 Deep of interface state for annealing temperature

Metal	Annealing Temperature			
	as-deposited	100annealed	150annealed	200annealed
Cr	45.2[meV]	50.6[meV]	68.9[meV]	92[meV]
Al	50.8[meV]	59.9[meV]	78.3[meV]	81.8[meV]

アニール処理により界面準位が深くなっていることがわかる。また、電極の種類とは関係なく同じ傾向をもって深さ方向にシフトしたことから、界面準位の深さは電極材料に依存しないことがわかる。

しかし、準位の位置は製膜された段階で決定されることから、アニール処理をすることで移動することは考えられないため、裾の傾きが急峻になったことで、見かけ上深くなったと考えられる。(Figure6)

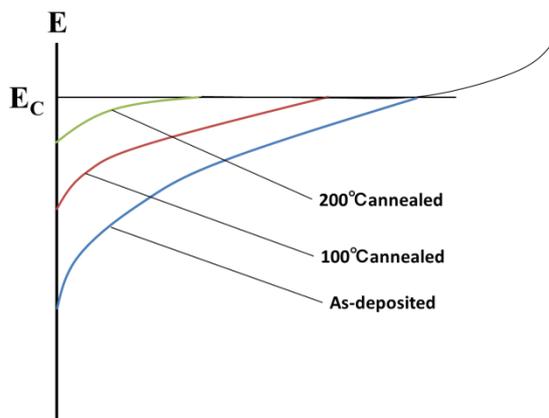


Figure 6 Schematic illustration of conduction band tail slope

4.まとめ

変調アドミタンス法を用いて a-IGZO の伝導帯側のギャップ内準位について観察した。その結果、電極材料によって、ピーク周波数が変化した。しかし、界面準位深さには影響がないことがわかり、アニール処理によって裾の傾きが改善されることが分かった。また、この裾の傾きは TFT 特性との相関を検討した結果、TFT のサブスレッショルドスイング値と相関があることが分かった。今後は、デバイスの信頼性との相関を評価するため、バイアスストレス依存性、ギャッ

プ光による特性の変化について検討を行う。

5.参考文献

- 1)前田、清水 アモルファス InGaZnO₄ 薄膜のギャップ内準位の評価、日本大学生産工学部第 42 回学術講演会電気電子部会概要集(2009)
- 2) 刀根、前田他 酸化物半導体薄膜を用いた欠陥評価 5p-41 薄膜材料デバイス研究会(2010)
- 3)刀根、清水 第 72 回応用物理学会学術講演会 31p-ZH-2(2011)
- 4)小林、清水 第 72 回応用物理学会学術講演会 31p-ZH-3(2011)
- 5)S.M.Zee 「半導体デバイス基礎理論とプロセス技術」産業図書
- 6)薄膜材料デバイス研究会編「薄膜トランジスタ」コロナ社
- 7)井上真雄、白藤純嗣 SiO₂ 薄膜の絶縁劣化とコンダクタンスの関連 電子情報通信学会 (1993)