

B ドープ In_2O_3 透明フレキシブル導電膜における水素ドーピング効果

Effect of hydrogen doping effects in B-doped In_2O_3 flexible and transparent conducting film

工学院大学 工学部 電気電子工学科 高機能デバイス研究室

木菱 完太

指導教員 相川 慎也 准教授, 研究協力者 森 峻, 山寺 真理

キーワード: 透明導電酸化物, 薄膜, 酸化インジウム, ホウ素, 水素

1. 緒言

透明導電酸化物(TCO)は、高い導電性・透明性を持つことから、フラットパネルディスプレイや薄膜太陽電池の透明電極に用いられている。また、柔軟性のある基板に成膜することでフレキシブルなウェアラブルデバイスに応用可能なため、近年期待が高まっている。現在商用で用いられている Sn ドープ In_2O_3 (ITO)は、熱処理による結晶化を伴うことで性能向上が見込まれるが[1]、未熱処理ではこれ以上の性能改善が困難である。また、結晶化は柔軟性に対して有効であるか定かではない。

In_2O_3 系透明導電膜は小イオン半径元素をドーピングすることで、電子移動度が向上するとともに[2][3]、アモルファスになりやすいことが報告されている。アモルファス材料は、原子間の結合距離および結合角がランダムであることから形状変化に対して応力緩和が期待でき、柔軟性に対して有効と考えられる。

当研究室では、 In_2O_3 に小イオン半径元素であるホウ素(B)をドーピングしたBドープ In_2O_3 (IBO)を開発してきた。さらなる低抵抗化のためにはキャリア密度向上が必要であるが、BはInと価数が等しいため、キャリア密度向上は期待できない。

本研究では、水素(H)が In_2O_3 中でドナーとして働く先行研究結果にヒントを得て[4]、IBOにHをドーピングし、低抵抗化する成膜条件の最適化を目的とする。また、HドープIBOの柔軟性、透過性も評価する。

2. 実験方法

RF マグネトロンスパッタ装置を用いて基板上へHドープIBO薄膜及び、比較用のIBO薄膜を成膜した。 In_2O_3 ターゲット上にBoron粒(純度99.999%)を1個置き、水素をドーピングするためにAr/ H_2 ガスを用いた。また、成膜圧力0.24 Paに固定しRF電力50 W、および100 Wで膜厚が100 nm程度になるように成膜時間を調整した。

成膜後、電気特性はHall効果測定装置を用いてVan der Pauw法によりキャリア密度 n と電子移動度 μ を測定し、ドルーデ・モデルにより抵抗率 ρ を算出した。

$$\rho = 1/en\mu \quad (1)$$

ここで、 e は電荷素量である。

機械特性は屈曲試験による相対抵抗値で評価した。また、走査型電子顕微鏡(SEM)で屈曲後の表面観察、X線回折装置(XRD)で結晶構造評価を行った。光学特性は紫外可視分光光度計(UV-vis)で透過率を測定した。

3. 実験結果および考察

Hall効果測定の測定結果をTable 1に示す。RF電力100 Wで成膜したHドープIBOをIBOと比較すると電子移動度は劣るものの、キャリア密度は向上し、抵抗率は同等の値となった。この結果より水素はドナーとして働き、キャリア密度向上に寄与したと考えられる。また、RF電力50 Wと100 Wで成膜したHドープIBOを比較すると、50 Wの方が電子移動度およびキャリア密度が向上し、IBOより抵抗

率が低い値となった。したがって、50 Wで成膜を行うことで膜がより緻密になるとともに、水素がよりドナーとして活性化しやすくなったと考えられる[4]。

Table.1 Hall 効果測定による H ドープ IBO と IBO の電気特性評価

サンプル	RF 電力 (W)	電子移動度 (cm^2/Vs)	キャリア密度 (cm^{-3})	抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IBO	100	41.1	4.56×10^{20}	3.33×10^{-4}
H ドープ IBO	100	29.2	5.77×10^{20}	3.59×10^{-4}
H ドープ IBO	50	35.0	6.32×10^{20}	2.83×10^{-4}

屈曲試験における測定結果を Fig.1 に示す。RF 電力 100 W で成膜した H ドープ IBO を IBO と比較すると、相対抵抗は約 3 倍高くなった。また、SEM による表面観察を行ったところ H ドープ IBO の方が、クラックが多く発生していることがわかった。この結果より、成膜時の水素分圧が高いため、IBO よりアモルファスではなくなり、柔軟性が低下したのではないかと考えられる。

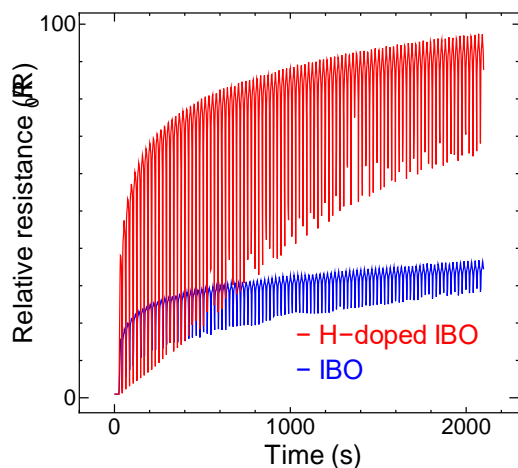


Fig.1 屈曲試験による H ドープ IBO と IBO の相対抵抗値測定結果

UV-vis による透過率の測定結果を Fig.2 に示す。RF 電力 100 W で成膜したサンプルを比較し

た。H ドープ IBO および IBO の可視光領域における平均透過率は、それぞれ 81.8 %、80.1 % と同等の値となった。この結果より、H ドープは可視光領域において影響を及ぼさないと考える。

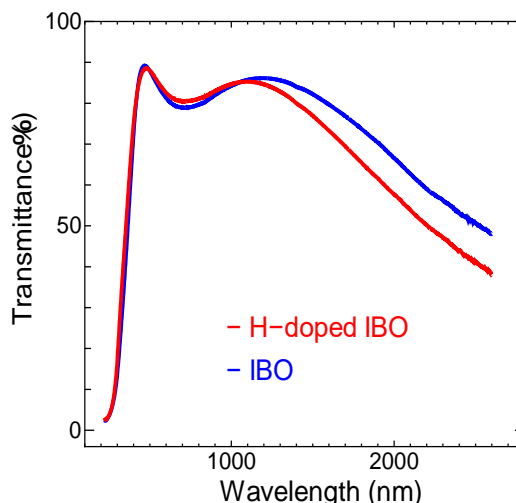


Fig.2 UV-vis による H ドープ IBO と IBO の透過率測定結果

4. 結論

本研究では、H ドープ IBO を成膜し低抵抗化する成膜条件の最適化を行った。その結果、相対抵抗は IBO より高い値となったが、抵抗率 $2.83 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 、平均透過率 81.8 % と優れた値を示した。したがって、水素はドナーとして働く有効なドーパント材料であることがわかった。今後の展望としては、スパッタガス Ar/H₂ の成膜条件と比較するため、水蒸気(H₂O)導入による H ドープで成膜を行う。

5. 参考文献

- [1] Ocal Tunal et al., Phys. D: Appl. Phys. 43, 055402 (2014)
- [2] D. Bruce Buchholz et al., Chem. Mater. 26, 5401-5411 (2014)
- [3] N. Mitoma et al., App. Phys. Lett. 106, p.042106 (2015)
- [4] T. Koida et al./ Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 28 (2007)