

太陽電池の発電力向上に向けた透明酸化物導電膜の作製

[研究代表者] 一野祐亮 (工学部電気学科)

[共同研究者] 森 竜雄、清家善之 (工学部電気学科)

研究成果の概要

瀬戸物など身の回りにありふれている酸化物は電気絶縁体であるものがほとんどである。しかし、酸化物の作製方法を工夫することで、絶縁体だけでなく半導体にも金属にも、また超伝導体にもなる。そこで、我々はパルスレーザー蒸着 (PLD) 法を用いて酸化物薄膜を作製することで、酸化物に電氣的機能性を付与する検討を行っている。

2021 年度は透明酸化物導電体(Transparent Conducting Oxide, TCO)膜に着目した。再生可能エネルギーである太陽電池の発電効率を上げることは非常に重要である。最大発電力は発電モジュールの内部抵抗に反比例する。つまり、内部抵抗が低いほど最大発電力は向上する。太陽電池の場合、内部抵抗を構成する各要素の内、透明導電膜の抵抗率ももっとも高く、影響が大きい。そこで、シャープ株式会社の液晶ディスプレイに用いられて話題となった透明酸化物半導体 IGZO (In-Ga-Zn-O) に着目し、低抵抗率透明導電膜の作製を目的とした。

IGZO 膜の作製には 3 倍高調波 Nd:YAG レーザーによる PLD 法を用いた。InGaO₃+ZnO 焼結体をターゲットとして、薄膜作製時のレーザーエネルギーが IGZO 膜の抵抗率に与える影響について検討した。成膜条件は、酸素圧力 1 mTorr、基板温度を室温とし、レーザーエネルギーを 30~130 mJ の間で変化させた。その結果、レーザーエネルギーが高くなるほど抵抗率が低下して、130 mJ では約 11 mΩcm を示した。太陽電池の透明導電膜としてよく用いられている ITO (Inドープ酸化スズ) は、1 mΩcm 以下の抵抗率であるため、さらなる作製条件の最適化が必要である。また波長-透過率特性の測定結果から、一部の可視光に対して 80%の透過率を示したものの、全体的 50-70%程度であり、光学特性に関しても成膜条件のさらなる最適化が必要である。

研究分野：機能性酸化物薄膜工学

キーワード：超伝導、透明導電膜

1. 研究開始当初の背景

2021 年度は透明酸化物導電薄膜 (Transparent Conducting Oxide, TCO) に着目した。再生可能エネルギーである太陽電池の発電効率を上げることは非常に重要である。最大発電力 P_{max} は発電モジュールの内部抵抗 r_s と太陽電池による起電力 V を用いて、

$$P_{max} = \frac{V^2}{4r_s} \quad (1)$$

と表される。つまり、 r_s が低いほど P_{max} は向上する。図 1 のように、太陽電池の場合、内部抵抗を構成する要素は、金属電極抵抗、接触抵抗、配線抵抗、そして TCO の抵抗である。この内、TCO の抵抗率ももっとも高い。そこで、シャープ株式会社の液晶ディスプレイに用いら

れて話題となった透明酸化物半導体 IGZO (In-Ga-Zn-O) に着目した。IGZO 膜はアモルファス状態でも高い電荷移動度を示すため、低い抵抗率、かつ可視光透過特性に優れた透明電極の実現が期待できる。

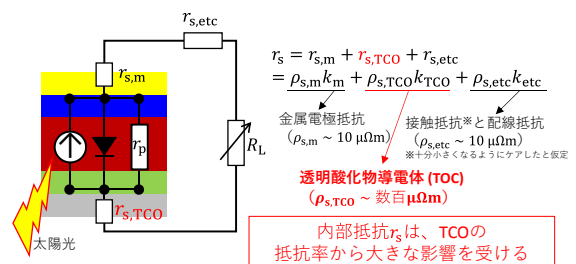


図 1 太陽電池の等価回路と内部抵抗成分。

2. 研究の目的

IGZO のキャリアは主に電子であり、アモルファス薄膜にすることで生じる酸素欠損がキャリアを供給している。また、余剰金属元素からもキャリアが供給される。図2にIGZOのバンド構造と種々の欠陥によって生じるエネルギー準位を示す。

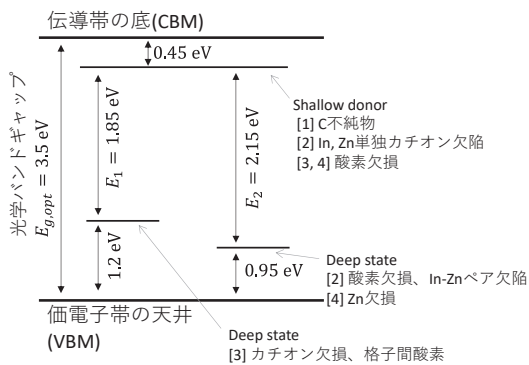


図2 IGZO のバンド構造と欠陥によるエネルギー準位。

我々は、パルスレーザー蒸着 (PLD) 法を用いて酸化物薄膜の作製を行ってきた。PLD 法をはじめ、薄膜作製方法の多くは高真空中で薄膜を作製するため多くの酸素欠損が自然に含まれる。しかし、予備実験の結果からIGZO膜は酸素欠損が多すぎると絶縁体となり、かつ可視光を透過しない黒色膜になることがわかった。そこで、今回は比較的高い酸素圧力 1 mTorr の雰囲気下でレーザーエネルギーが電気特性、光学特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

アモルファス IGZO 膜は、3 倍高調波 Nd:YAG パルスレーザーを用いた PLD 法によって作製した。基板には石英基板を用いて室温で、酸素圧力 1 mTorr の下、レーザーエネルギーを 20~310 mJ まで変えて成膜した。また、成膜時間 30 分であり、膜厚は 80~360 nm と、レーザーエネルギーの上昇に伴って厚くなった。

IGZO 膜の電気抵抗は直流四端子法を用いて評価し、光学特性は 300~900 nm の光に対する透過率測定で評価した。

4. 研究成果

図3に作成したアモルファス IGZO 膜の光学顕微鏡像

を示す。いずれも下地が透けて見え、可視光に対してほぼ透明であることがわかった。レーザーエネルギーに対して抵抗率をプロットすると図4のように、レーザーエネルギーが増加するほど抵抗率が低下していることがわかった。

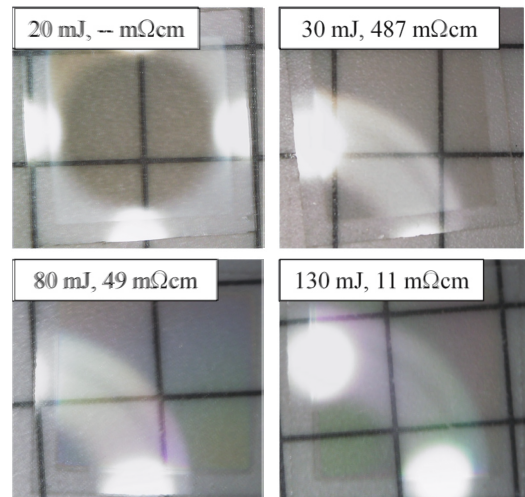


図3 レーザーエネルギーに対するアモルファス IGZO 膜の光学顕微鏡像。各画像左上の数値は、レーザーエネルギーと抵抗率である。

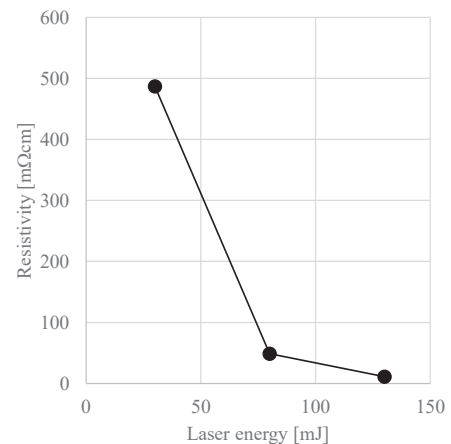


図4 レーザーエネルギーに対するアモルファス IGZO 膜の電気抵抗率。

本研究では、酸素雰囲気中に置かれた IGZO 焼結体ターゲットに 355 nm の紫外線レーザーを照射している。そのため、レーザーエネルギーが高くなるほど雰囲気中の酸素が一部活性化され酸化力の高い活性酸素原子が生成[5]された結果、IGZO 膜中の過剰な酸素欠損を補った結果、抵抗率が低下した可能性がある。また、IGZO ターゲットの中にも酸素は含まれているため、レーザー

エネルギーの増加に伴ってターゲット由来の活性酸素も増加していることも考えられる。以上から、薄膜作製時の酸素圧力だけでなくレーザーエネルギーも IGZO 膜の電気特性に大きな影響を与えることが明らかになった。

図 5 にこれらの IGZO 膜の可視光透過率を示す。

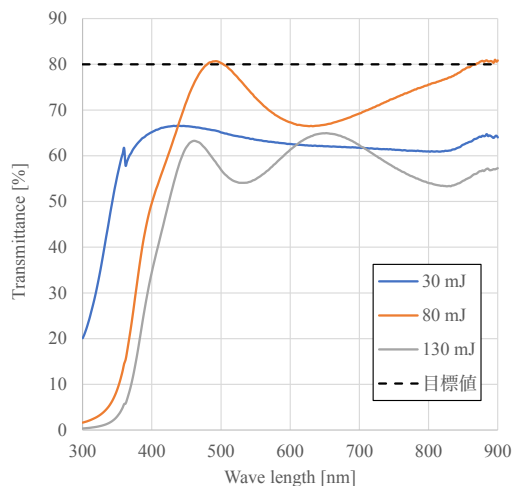


図 5 アモルファス IGZO 膜の可視光透過率。

現在、透明導電膜としてよく使われているスズ添加酸化インジウム (ITO) の可視光透過率は約 80%程度であるため、80%を目標値としている。図から、80 mJ で成膜した試料において一部の波長に対して 80%に達しているが、全体的には 50-70%と透過率が低い結果となった。

参考文献

1. J. L. Lyons ら, Phys. Rev. Appl. 2 (2014) 064005
2. W. H. Han ら, Phys. Rev. Appl. 6 (2016) 044011
3. Junjun Jia ら, Phys. Rev. Appl. 9 (2018) 014018
4. Kyle T. Vogt ら, Phys. Rev. Res. 2 (2020) 033358
5. M. Mukaida ら, Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 4521

謝辞

本研究は、令和 3 年度愛知工業大学「教育・研究特別助成」を受けて実施した。