

植物育成用光学薄膜の設計と簡易温室への適用

木下 理裕^{*1} 佐々木 圭介^{*2} 岩森 暁^{*3}

Design of Optical Thin Films for Plant Growth and Application for Simple Greenhouse

by

Masahiro KINOSHITA^{*1}, Keisuke SASAKI^{*2} and Satoru IWAMORI^{*3}

(Received on Mar. 27, 2018 and accepted on Jul. 5, 2018)

Abstract

Optical thin films were designed for plant growth and applied for simple greenhouse. Refractive index of fluorocarbon thin film prepared by r.f. sputtering is lower than that of glass slide, and that of zinc oxide is much higher than that of the glass slide. We have prepared thin film laminate, i.e., sputtered PTFE / ZnO / sputtered PTFE laminate are formed onto glass slide substrates and employed for simple greenhouse. As a result, we succeed in enhancement of the visible light transparency, whose wavelength is 400 to 650 nm, and decrease of the infrared light transparency in the simple greenhouse. We have cultivated pea sprout into the greenhouse, and confirmed that growth rate of pea sprout in the greenhouse employing the sputtered PTFE / ZnO / sputtered PTFE laminate is faster than those of the sputtered thin film and glass slide without any coating.

Keywords: Optical thin film, Sputtered PTFE thin film, ZnO thin film, Greenhouse, Pea sprout

1. 緒言

現在、日本の農業においては多くが屋外にて農作物を育成している。しかし、屋外育成では天候不順、大雨や災害等、多くの欠点がある。これらの理由により安定した栽培量の確保や品質の一定維持が求められている。そのため、植物工場の普及が進められている。完全制御型の植物工場と太陽光利用型であるハウス栽培が存在する。完全制御型は照明灯や空調で植物に最適な条件を人工的に維持し育成することが可能である。しかし、育成最適条件に常に環境を維持しなくてはならないためにコストが上がる傾向があり、また植物により最適な育成条件が異なるために、育成可能な植物が限られている等の欠点が存在する。

一方で太陽光利用型のハウス栽培には2種類あり、太陽光単体型と人工灯併用型がある。これらの太陽光利用型のハウス栽培では、複数種類の植物が育成可能である等の利点があるが、天候に影響されてしまうことがある。

太陽光単体型では、天候に植物の育成状況が影響されるだけでなく温度調整が難しいために植物工場内で労働している人体に大きな影響も与えることがある。

人工灯併用型では、天候が育成状況に及ぼす影響を低減させることが可能である。しかし、人工灯を多く利用することで太陽光単体型に比べてコストの増大がある。また、太陽光利用型の両方において植物工場内での温度

上昇を防ぐために空調機や冷水器等を用いて温度上昇を防いでいる。様々な機器を用いることで安定した栽培量と一定品質の保持は可能になったが、コストが屋外栽培に比べて増大する傾向にある。そのために、太陽光利用型である太陽光単体型の植物工場において空調機や冷水器等の機器を用いずに植物工場内の温度を低減させることが求められている。

光学薄膜を用いることで空調機等の機器に頼らず温度低減や植物育成に影響を与えずに栽培できる可能性があると考えた。そのために、光学薄膜モデルの構築が必要であり、光学薄膜の作製には酸化亜鉛とポリテトラフルオロエチレン (PTFE) に着目した。

酸化亜鉛は、金属酸化物であり耐久性に優れており屈折率が2.0である。また、スパッタリング法を用いて成膜を行うと温度上昇に影響を与える赤外線を反射させる光学特性を有する^{1,2)}。酸化亜鉛膜では、Pranav Y. Daveらが報告しているように透過率は可視光領域においても80%程度であるために本研究においては植物育成には不向きであると考えられるために酸化亜鉛膜のみは作製しない³⁾。

PTFEは、フッ素原子と炭素原子から成り立つフッ素樹脂であり耐熱性や科学的安定性が優れており屈折率が1.34である。また、スパッタリング法を用いて成膜を行うと植物育成に必要な可視光の透過率が向上し光の反射を抑える光学特性を有する^{4,6)}。これらの屈折率や光学特性の異なる材料を用いることで温度上昇の低減だけでなく植物育成に影響を与えることがない光学薄膜を作製することが可能であると想定できる。

*1 総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程

*2 工学部機械工学科

*3 工学部機械工学科教授

本研究では、植物の成長に必要な波長の光を効果的に取り込み、ハウス内の温度上昇の低減させるための光学薄膜モデル構築の検討を行った。

2. 実験方法

2.1 成膜方法及び光学薄膜のモデル構築

本実験では、高周波スパッタリング装置（ULVAC 社製）を使用した。光学薄膜基板としては、無色透明かつ高耐熱性、高耐久性を有するスライドガラス（S1112、松浪硝子工業㈱）に種々の材料を成膜した。大きさは、26 mm×76 mm、厚さ 1.5 mm、であり屈折率は 1.5 である。成膜においてはスパッタリング法を用いているために基板にはスライドガラス以外でも成膜可能である。しかし、ビニールハウスに実際に使用する際はスライドガラスを用いることはないが本実験においてスライドガラスを使用したのは、簡便な成膜と正確な評価が可能であるため。

Fig. 1 に高周波スパッタリング模式図を示す。また、Table1 には成膜条件を示す。Fig. 2, Fig. 3 には積層膜のモデルを示す。材料には高屈折材料である酸化亜鉛と低屈折材料である PTFE を使用した。

植物育成に必要である 500 nm 付近の可視光が必要である⁷⁾。(1) 式は、 d を膜厚、 λ を必要波長、 n を屈折率とする。これより必要光領域は 550 nm の可視光とした場合 (1) 式を用いて PTFE を 100 nm の厚さとした。また、酸化亜鉛は 130 nm とした。Fig. 2 に示すようにスライドガラスの両面に PTFE を成膜することで植物育成に及ぼす影響を確認する。

Fig. 3 では、酸化亜鉛を挟むように PTFE を成膜することで三層膜を形成した。三層膜を形成したのは赤外線反射と可視光透過の特性を得るためである。これらの特性を有することで植物育成と温度に対する影響を確認する。

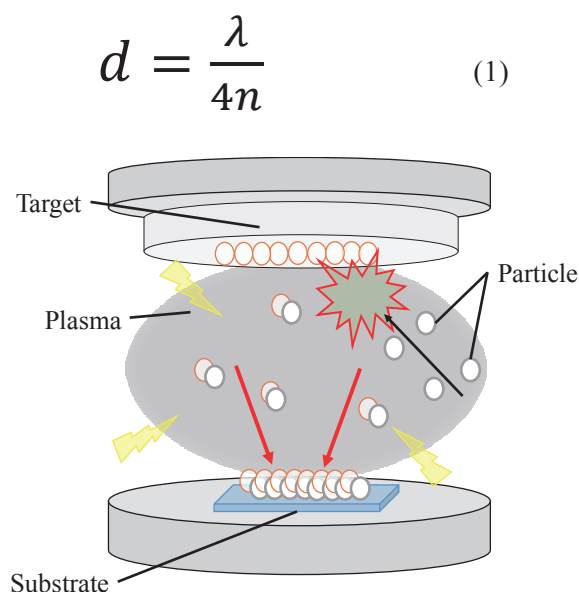


Fig. 1 Schematic diagram of sputtering equipment.

Table 1 Deposition conditions.

Target material	PTFE	ZnO
Gas	Ar	O ₂
Discharge power (W)	35	150
Deposition time (min)	10	12
Film thickness (nm)	100	130

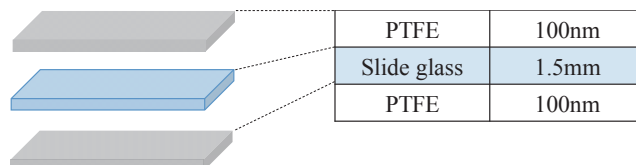


Fig. 2 Schematic diagram of sputtered PTFE thin film structure.

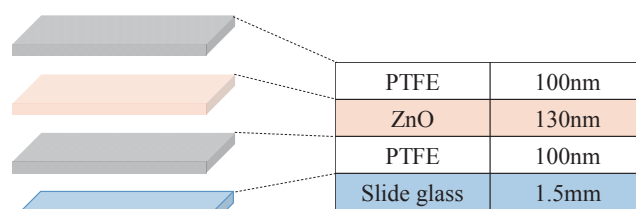


Fig. 3 Schematic diagram of sputtered PTFE and Zinc oxide (ZnO) thin film.

2.2 植物育成実験方法

Fig. 4 (a. b. c. d)に簡易温室の簡略図を示す。簡易温室には、外部からの温度影響を防ぐために断熱性の高い発泡スチロールを用いた。大きさとしては、95 mm×380 mm、高さ 295 mm であり、3 個使用した。簡易温室内部全体に光を照射するために発泡スチロールの上部中央部分をスライドガラス 8 枚分くり抜いた。光の照射は太陽光に似せるために 2 種類のライトを使用した。赤外線領域のためにハロゲンランプ（JDR110V75W-E11、株式会社ラウダ）を使用し、可視光領域では白色 LED 灯（LDA14D-G/K100/W パナソニック）を使用した。

簡易温室の上部表面からの高さを、ハロゲン灯、LED 灯ともに 5 cm とし平均温度は未処理のガラス板を基準に 30 °C とした。

安価に購入が可能な豆苗を育成に使用した。この植物は土の交換や肥料の散布などの育成費用のかからない水耕栽培による育成が可能で、なおかつ茎の長さの調節が可能で成長変化の様子を確認することができる。水耕栽培では成長が早く 1 週間前後で模擬温室上部に設置したガラス板に茎が到達するために育成期間は 6 日間とした。根元から切り落とすと成長に時間を要してしまうため、測定前の茎の高さは 110 mm とし全ての茎を同じ高さに調整し切り落とした。茎の測定は 2 日おきに水の交換と同時にいった。茎 1 本の測定では成長がしにくいことに加え、茎それぞれの成長には誤差が生じるため豆苗をパックの状態で育成を行い、評価には茎のそれぞれの高さを測定したものを平均した。スライドガラス下部に温度

計を設置することで常時、内部温度を測定可能とした。

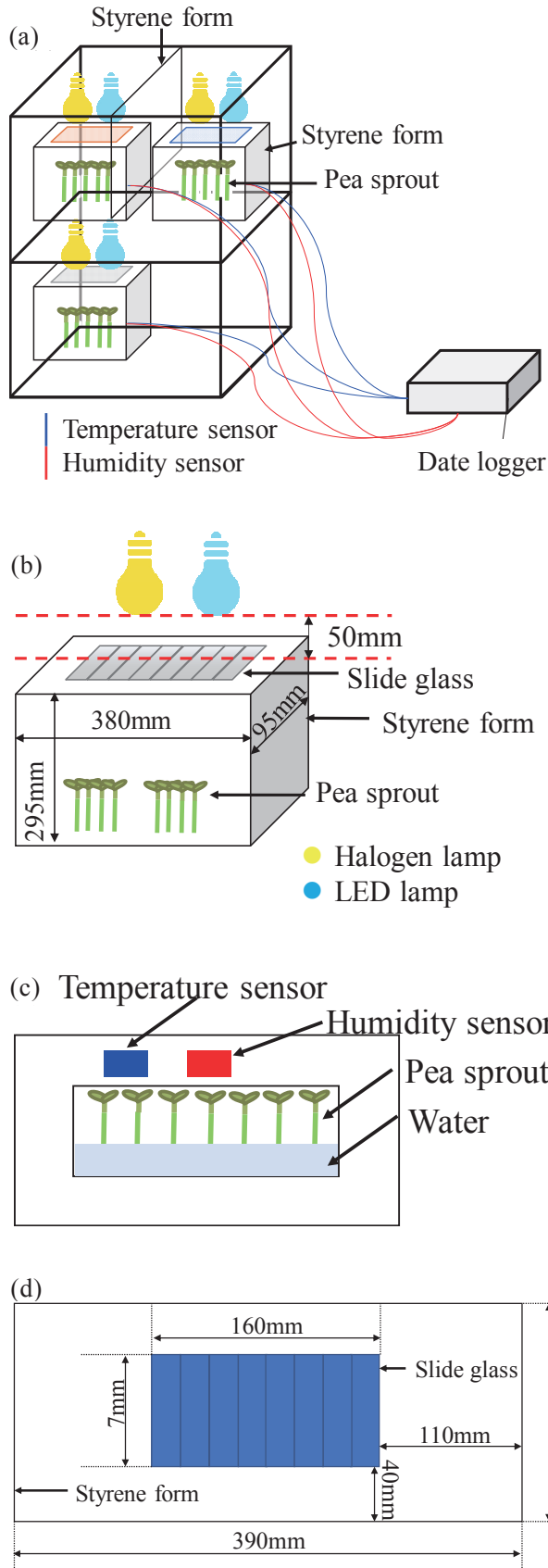


Fig. 4 Schematic diagram of simplified greenhouse, (a)Overall simplified diagram, (b)Single schematic, (c)Internal schematic, (d)Top schematic.

2.3 評価方法

光学薄膜の評価としてスライドガラスに光学薄膜を成膜したものと同処理のスライドガラスを分光光度計にて透過率の測定を行った。測定条件は、光波長範囲 300 nm-800 nm, スリット幅 1.0 nm とした。発泡スチロール内に設置した温度計はデータロガー (GL220 GRAPHTEC 製) を用いた。計測間隔は 10 秒とした。

3. 結果および考察

3.1 透過率測定結果

Fig.5 に透過率測定結果を示す。未処理のスライドガラスと PTFE 両面に成膜したものでは、透過率に大きな変化は見られなかった。しかし、植物育成に必要とされる 550 nm 領域付近では、PTFE 両面のサンプルが微量ではあるが透過率が上昇していた。これは、低屈折材料である PTFE を両面に成膜することで光の反射を抑えているからだと考えられる。

PTFE/ZnO/PTFE 三層膜は、他のサンプルより 500 nm ~600 nm 領域において透過率が上昇していた。その他の領域においては透過率が低下していた。特に紫外光領域では大きく透過率が低下している。これは、低屈折率の PTFE を再表面とすることで 500 nm ~600 nm 付近の透過率は上昇させることができ、PTFE 膜の下層に高屈折率を有する酸化亜鉛を挟むことにより 500 nm ~600 nm 領域以外での波長領域の透過率を低減させたものと考えられる。

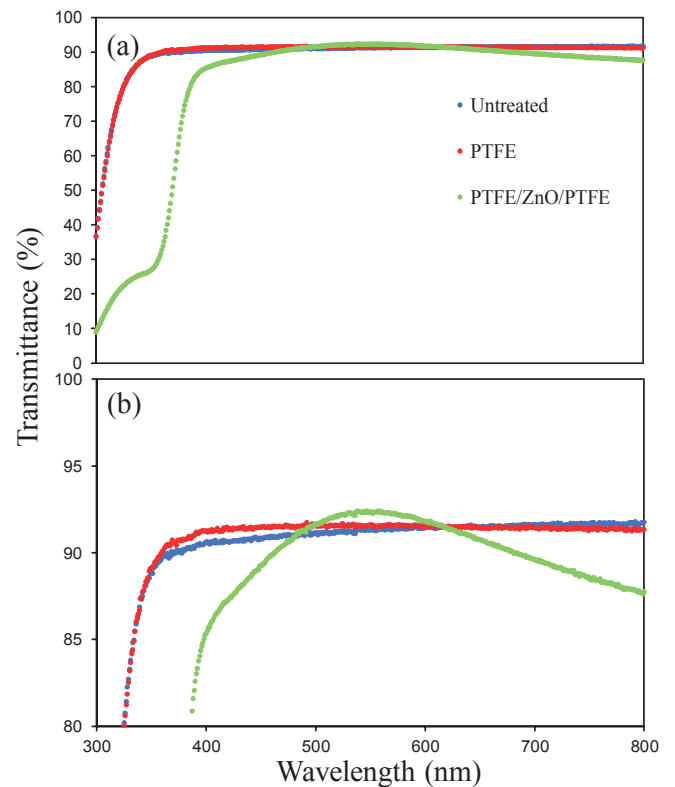


Fig. 5 Transmittance spectra of PTFE and PTFE/ZnO/PTFE laminate thin films sputtered onto glass side.

3.2 湿度と温度測定結果

Fig. 6 に湿度測定結果を示す．全てのサンプルにおいて 80 % 以上の高湿度であった．

Fig. 7 に温度測定結果を示す．PTFE 膜と未処理スライドガラスでは温度に大きな差は見られなかった．これは、PTFE 膜と未処理スライドガラスの透過率が同程度であったためと考えられる．

三層膜のみランプを点灯している際に温度上昇の低減が確認された．これは、透過率測定において温度上昇に必要なとなる赤外領域の透過率低減が影響していたと考えられる．

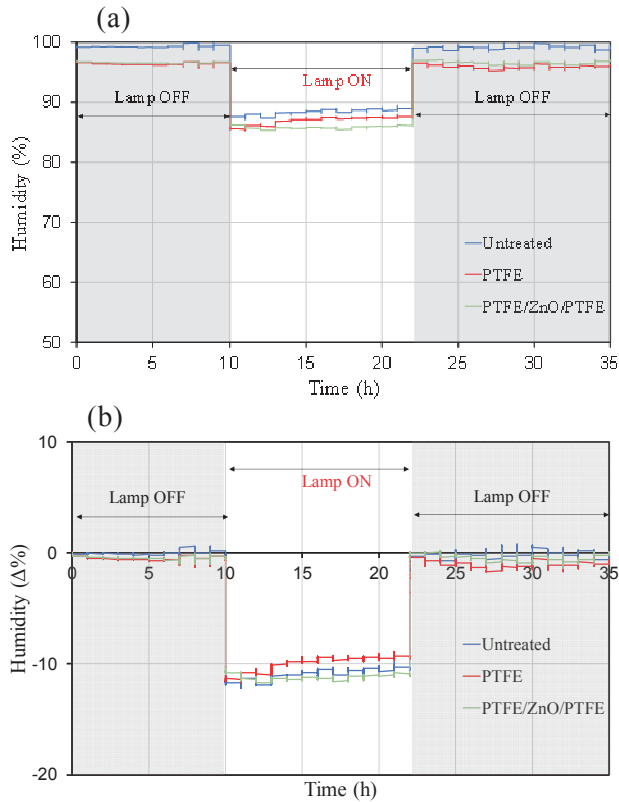


Fig. 6 Humidity measurement (a: Absolute value b: Relative value).

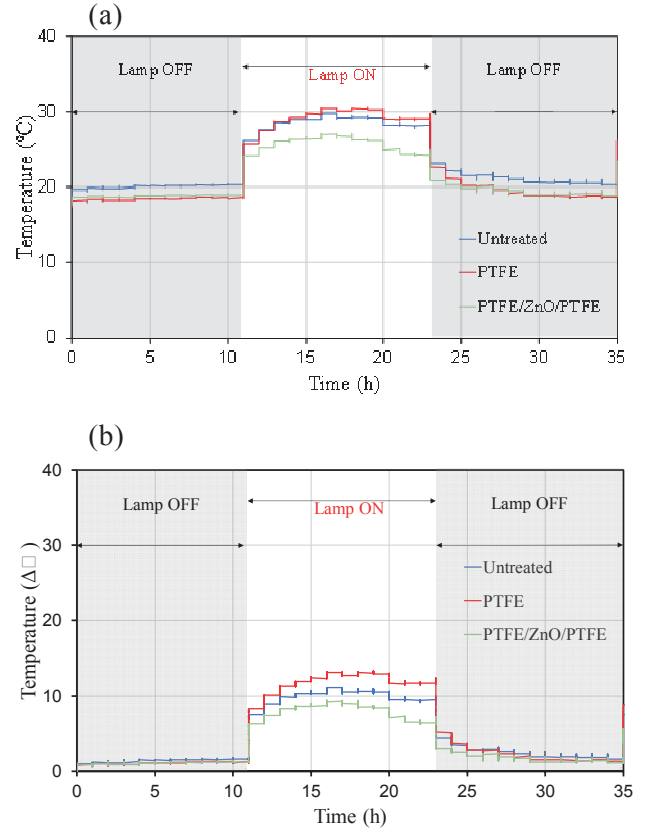


Fig. 7 Temperature measurement (a: Absolute value b: Relative value).

3.3 豆苗測定結果

Fig. 8, Fig. 9 に豆苗の成長測定結果を示す．6 日目において三層膜を使用した豆苗が最も成長していた．PTFE 膜を用いた簡易温室において未処理のスライドガラスを用いた簡易温室で生育させた豆苗より成長が早まっていたのは植物の成長に必要な可視光領域の透過率が上昇していたからだと考えられる．温度はスライドガラスより上昇しているが可視光の影響が成長に起因していたと考えられる．三層膜を用いた簡易温室において豆苗が最も早く成長していた主な理由は、光合成に必要な光の波長域の透過率が最も上昇していたためと考えられる．一方で紫外光領域において植物の育成に影響を与えるという報告がある^{7,8)}．紫外光領域の透過率が減少しているために他のサンプルより成長していたとも考えられる．さらに、三層膜においては温度上昇低減の効果が得られたことから豆苗の適正育成温度になったために最も成長したと考えられる．

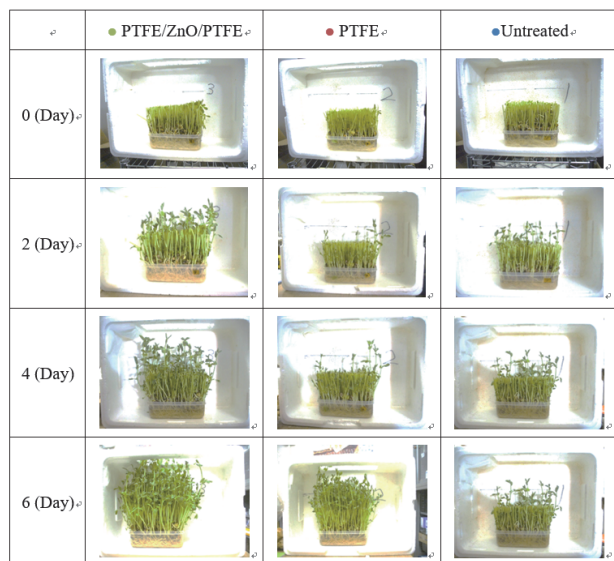


Fig. 8 Pea sprout growth record.

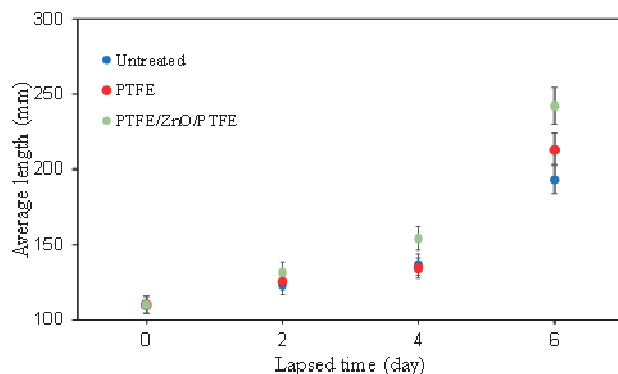


Fig. 9 Growth measurement.

4. 結言

現在のビニールハウスでは、主にポリオレフィン系フィルムを使用して作製しているがそのフィルムには着色料やフィルムに加工を施し光線透過を抑えるだけのものである。しかし、植物育成に必要な光線を取り入れつつ温度上昇低減を行えるものはない。本研究では、植物の成長に必要な波長の光を効果的に取り込み、ハウス内の温度上昇の低減させるための光学薄膜の設計を行った。光学薄膜を低屈折率のスパッタ PTFE 薄膜と高屈折率の酸化亜鉛膜を挟みこむ三層膜を使用することで、植物育成に必要な可視光を上昇させることができ赤外光を低減させることで温度上昇を低減させることができた。そのため、成長を促進することが判明した。現在のビニールハウス素材に対して簡便な成膜だけで行える今回の研究結果は植物育成に最適なものだと考えられる。これらの結果より、植物育成に必要な可視光を上昇させながら温

度上昇を低減できる光学薄膜の構築が可能であることが判明した。

謝辞

本論における実験は 2018 年度東海大学修論生である下山勇太氏にスパッタ膜調整に関して有益な意見を頂きましたことに謝意を表す。

参考文献

- 1) C. Besleaga, G.E. Stan, A.C. Galca, L. Ion, S. Antohe: Double layer structure of ZnO thin films deposited by RF-magnetron sputtering on glass substrate, *Applied Surface Science*, 258 (22), pp.8819–8824 (2012).
- 2) Y. Okuhara, T. Kato, H. Matsubara, N. Isu, M. Takata: Near-infrared reflection from periodically aluminium-doped zinc oxide thin films. *Thin Solid Films*, 519 (7), pp. 2280–2286 (2011).
- 3) Pranav Y. Dave, Kartik H. Patel, Kamlesh V. Chauhan, Amit Kumar Chawla, Sushant K. Rawal: Examination of zinc oxide films prepared by magnetron sputtering. *Procedia Technology*, 23, pp.328–335 (2016).
- 4) S. Iwamori, K. Noda,: Optical property of fluorocarbon thin films deposited onto polyester film substrate by an r. f. sputtering, *Materials Letters*, 66 (1) pp.349–352 (2012).
- 5) S. Tripathi, S. M. Haque, K. D. Rao, R. De, T. Shripathi, U. Deshpande, V. Ganesan, N.K. Sahoo: Investigation of optical and microstructural properties of RF magnetron sputtered PTFE films for hydrophobic applications, *Applied Surface Science*, 385 pp.289–298 (2016).
- 6) S. Seino, Y. Nagai, M. Kobayashi, S. Iwamori and K. Noda: Transparent Thin Films Deposited onto Polyester Film Substrate by Radio Frequency Sputtering with a Poly (tetrafluoroethylene) Target, *Japanese Journal of Applied Physics*, 52 (2013).
- 7) H. M. H. Salama, A. A. Al. Watban, A. T. Al-Fughom: Effect of ultraviolet radiation on chlorophyll, carotenoid, protein and proline contents of some annual desert plants, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 18 (1), pp79- 86 (2011).
- 8) S. Kataria, A. Jajoo, K. N. Guruprasad: Impact of increasing Ultraviolet-B (UV-B) radiation on photosynthetic processes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 137, pp55-66 (2014).