

2018 年度 芝浦工業大学大学院

修 士 論 文

題目：太陽光採光式屋内照明灯への利用を目指した
EWOD 光学セルの性能評価

専 攻 理工学研究科（修士課程）機械工学専攻

氏 名 なかがわ ゆうせい
中川 祐盛

指導教員 田中耕太郎

目次

第 1 章	序論	- 1 -
1.1	背景	- 2 -
1.2	目的	- 2 -
1.3	本論文の構成	- 3 -
第 2 章	原理	- 4 -
2.1	ElectroWetting - On - Dielectric	- 5 -
2.2	太陽光採光方法	- 6 -
第 3 章	集光セルの光学性能設計	- 8 -
第 4 章	四角錐台形セルに向けた 3 次元メニスカス形状計算手法	- 13 -
4.1	計算モデル	- 14 -
4.2	離散化	- 15 -
4.3	最小化計算	- 16 -
第 5 章	実験装置と実験手順	- 18 -
5.1	実験装置および方法	- 19 -
5.2	セル製作方法	- 19 -
第 6 章	解析結果ならびに考察	- 21 -
6.1	矩形装置構造の決定	- 24 -
6.1.1	使用液の組み合わせ	- 24 -
6.1.2	壁面による効果	- 26 -
6.1.3	使用液量の決定	- 29 -
6.1.4	セル高さ：幅の比率	- 32 -
6.1.5	各条件における最適セルサイズの検討	- 35 -
6.2	四角錐台装置	- 38 -
6.2.1	光線射出面長さの検討	- 38 -
6.2.2	傾斜角度の検討	- 40 -
6.2.3	セルサイズの検討	- 42 -
6.2.4	使用液の体積比率検討	- 45 -
6.3	矩形装置・四角錐台装置 性能	- 48 -
6.4	セルの設置方法	- 51 -
第 7 章	実験結果ならびに考察	- 53 -
7.1	セルの製作ならびに組立て	- 54 -

7.2	製作セル内メニスカス形状変化	- 56 -
第 8 章	結論	- 59 -
8.1	矩形装置の光学的解析結果の検討	- 60 -
8.2	四角錐台装置の光学的解析結果の検討	- 61 -
8.3	製作したセルについての検討	- 63 -
<謝辞>	- 65 -
<参考文献>	- 65 -

第 1 章 序論

1.1 背景

太陽エネルギーは太陽電池により電気変換され活用されていることがよく知られている。市販の太陽電池，LED の効率は各 23 % [1]，32 % [2] 程度であり，組み合わせた利用を考慮すると実際に利用されるエネルギーは 7 % 程度と低い。そこで我々は光エネルギーを太陽電池のようなモジュールを介さず無変換で利用する方式として太陽光照明に注目した。太陽光照明とは太陽光を直接照明に使用する方式である。

近年，太陽光照明の方式には数多くの提案があり伝送距離が短いものから長いものまで，オフィスビル，地下施設などの用途に合わせて多くの有望な方式がある [3]。その中でも高性能な照明として中・長距離伝達が可能な電気照明とのハイブリッド式照明用光ダクト，光ファイバー伝送方式が挙げられる。これらの方式はエネルギー変換が行われなため，変換ロスをほとんど伴わないエネルギーの利用が期待できる。一方で，ダクト方式は伝送に必要なダクト体積が大きく，ファイバーは採光に追尾装置が必要となるため，装置サイズとコストが高くなる点が課題となっている。

本研究では，EWOD (ElectroWetting-On-Dielectric) と呼ばれる現象を利用する。誘電膜に接地した透明液体と下部電極間で形成されたキャパシタに外部電場を与えると，キャパシタへ蓄えられた静電エネルギー分だけ膜-液間界面張力が減少する。この結果，界面の表面自由エネルギーが変化し形状が変化する。平板電極上の液滴に EWOD を発生させた場合，液滴が潰れる現象として観測される。この技術は液晶制御や可動レンズに応用され実用化されている。電極 - 液滴間に電場を加えるだけで濡れ性の制御を行える簡便さから，複雑な機械的構造を必要としない装置の開発・装置の小型化への貢献が期待されている。

1.2 目的

本研究は，EWOD による界面変化を利用し太陽追尾とファイバーへの集光を目指し，界面形状の数値計算による予測と光学系設計ソフトウェアによる光学的解析により，外部電場による界面変化と採光効率について評価した。この結果を元に最適な装置構造，太陽の位置に対する適切な界面形状を導き報告することを目的とする。また，新たな計算モデルの提案により矩形型以外の容器形状についても自由界面を表しその形状についても評価することを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含めて全 8 章から構成される。第 2 章では EWOD の原理や集光機構について言及する。第 3 章では光学系設計ソフトウェアを用いた光学的解析について、第 4 章では新たに提案した光学セル内メニスカス形状計算手法を、各章計算モデルを交えて説明する。第 5 章では実験方法ならびに光学セル製作方法について解説する。第 6 章では解析結果を検討し、その考察を行う。第 7 章は実験結果を検討する。第 8 章は結論を述べる。論文末尾に解析結果について補足を掲載する。

第 2 章 原理

2.1 ElectroWetting - On - Dielectric

Fig.1 に ElectroWetting – On – Dielectric の原理を示す.

固気界面エネルギーを σ_{SG} , 気液界面エネルギーを σ_{GL} , 固液界面エネルギーを σ_{SL} とすると, 各界面エネルギーのつり合いから, Young の式より式(1)のように表せる.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{GL}} \quad (1)$$

また, Lippmann の式より固液界面エネルギーと電位差 V の関係は式(2)のようになる.

$$\sigma_{SL} = \sigma_{SL}^0 - \frac{1}{2}CV^2 \quad (2)$$

ここで, σ_{SL}^0 は $V=0$ のときの固液界面エネルギーであり, C は単位面積あたりの電気容量である.

Young の式に Lippmann の式を代入すると,

$$\sigma_{GL} \cos \theta = \sigma_{SG} - (\sigma_{SL}^0 - \frac{1}{2}CV^2) \quad (3)$$

$V=0$ のときの $\cos \theta$ を $\cos \theta_0$ と置くと式(1)より

$$\cos \theta_0 = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}^0}{\sigma_{GL}} \quad (4)$$

さらに, C は式(5)のように表せる.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{d} \quad (5)$$

式(3), (4), (5)を組み合わせて整理すると, 接触角 θ と電位差 V との関係は,

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2d\sigma_{GL}} V^2 \quad (6)$$

ここで, θ_0 は初期接触角, ε_0 は真空の誘電率, ε は誘電膜の比誘電率, d は誘電膜の膜厚である. 式(6)から誘電膜上の液滴と電極間で形成されるキャパシタに電位差を与えると, 液滴-誘電膜間の接触角 θ が減少し液滴が潰れた格好になることがわかる. また矩形容器

内で同様に電場を加えると、容器内誘電膜に接地した液体は接触角が減少し壁を這うように液が上昇し、界面が曲面から斜面のように変化する。

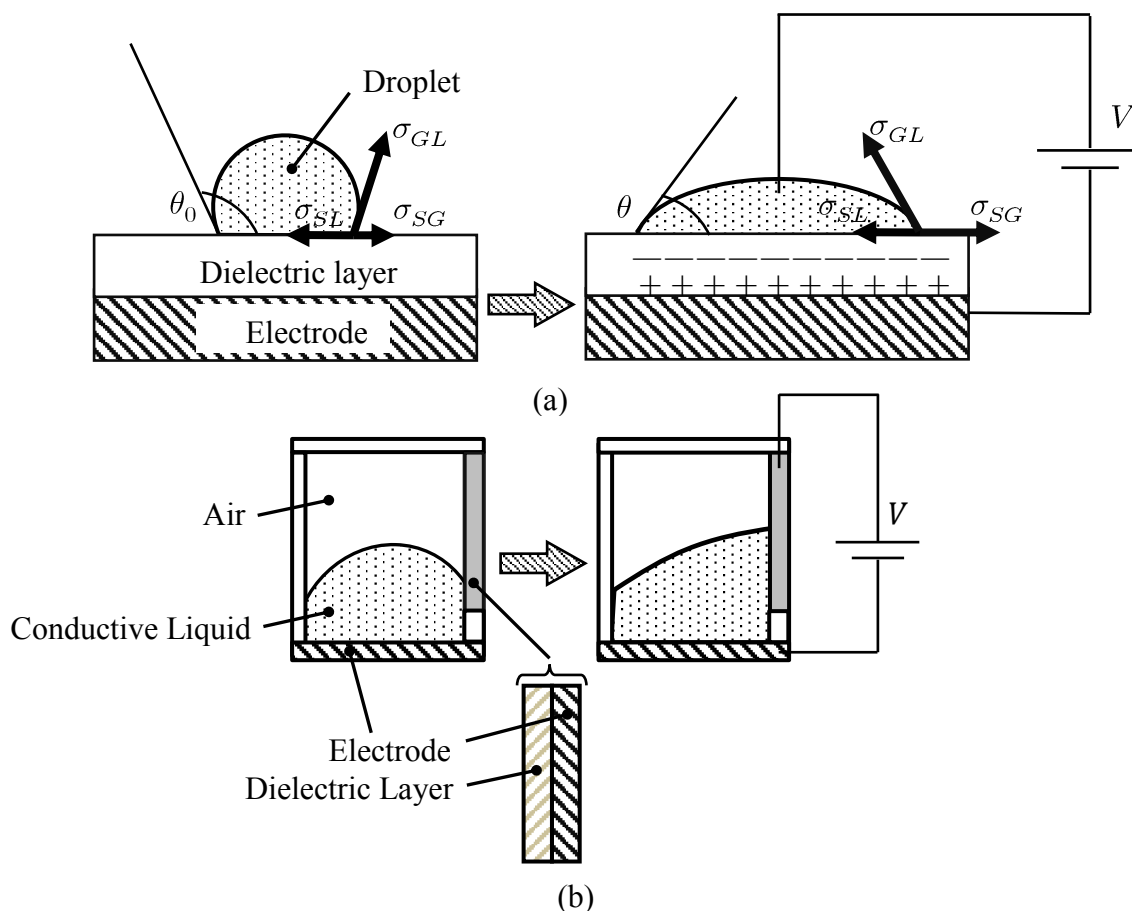


Fig. 1 Principle of ElectroWetting - On - Dielectric : (a) Drop sitting, (b) In a container

2.2 太陽光採光方法

Fig.2 に EWOD 光学セルによる太陽光採光の原理を示す. EWOD 光学セル (以下, セル) は EWOD で変化させた界面を利用し光軸を制御できる装置を指す. 本研究ではこのセルを用いて太陽光集光を行う. EWOD による自由界面の変化を利用すると, 界面で凹レンズや凸レンズ, プリズムを表現でき, 界面を光学レンズの様に扱うことができる. このように光学系を模した界面へ入射した光の射出角を制御することで, 光ファイバーへの集光を行う. 実際に利用する際には, Fig.2 のようにセルを複数並べての利用を想定している.

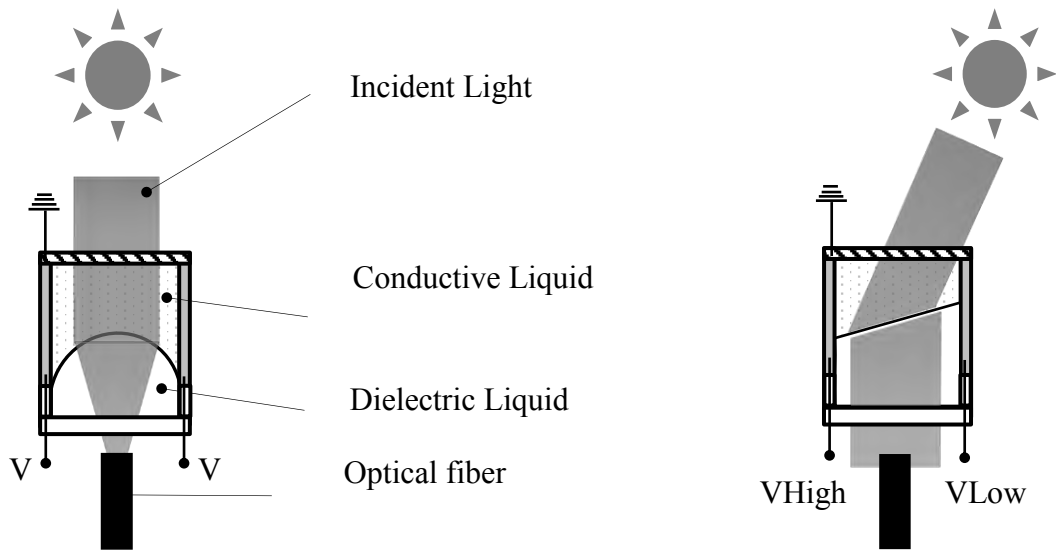


Fig. 2 Principle of EWOD Solar Cell

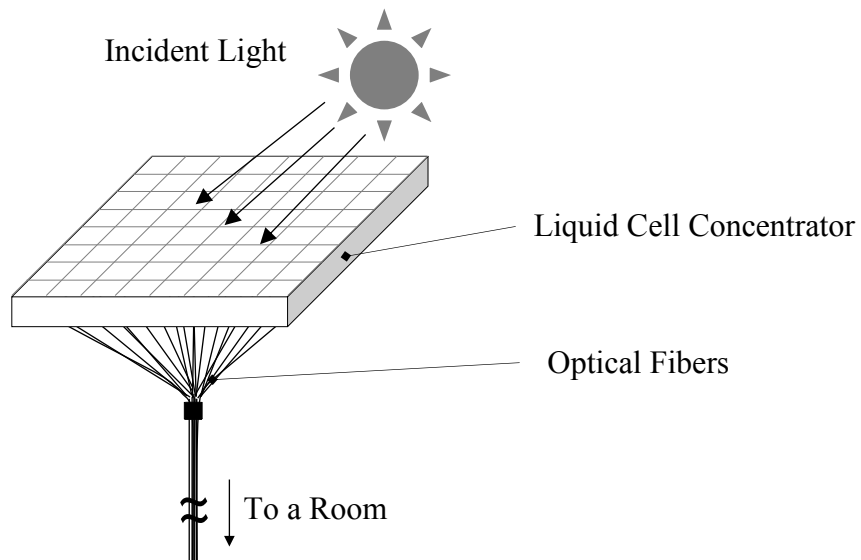


Fig. 3 Layout of EWOD Solar Cells