

Dadansoddiad o berfformiad lampau electroymoleuol priniedig ar is-haen ddi-draidd

Eifion Jewell, Tim Claypole a David Gethin

Coleg Peirianeg, Prifysgol Abertawe

Crynodeb: Er mwyn archwilio marchnadoedd newydd ar gyfer deunyddiau electronig printiedig, cynhaliwyd astudiaeth ymchwil i geisio deall perfformiad lampau electroymoleuol (EL) a gynhyrchwyd ar is-haen (substrate) ddi-draidd. Daw'r posibilrwydd o greu'r lampau o ddeunydd inc sylffonad polystyren poly(3,4-ethylendeuocsithioffen) (PEDOT:PSS) sy'n ffurfio'r electrod top yn y lamp ac sy'n cael ei amnewid am yr indiwn tin ocsid (ITO) a ddefnyddir mewn lampau confensiynol. Gan ddefnyddio proses printio sgrin syml, cynhyrchwyd lampau ar bedair is-haen ddi-draidd (un blastig a thair bapur) a chymharwyd eu perfformiad drwy fesur lefel eu disgleirdeb. Yn gyffredinol, gwelwyd lleihad o tua 50% yn nisgleirdeb y lampau o'i gymharu â disgleirdeb lampau a gynhyrchwyd gan ddefnyddio ITO. Roedd papur ysgafnach a mwy garw yn lleihau'r disgleirdeb ymhellach. Nid oedd modd cynyddu disgleirdeb y lampau drwy ychwanegu haen ychwanegol o PEDOT:PSS gan fod hynny'n lleihau'r nodweddion tryloyw. Wrth gynyddu maint y lamp, mae effaith gwrthiant y PEDOT:PSS o'i gymharu â'r ITO yn achosi dirywiad sylweddol ym mherfformiad y lamp ac yn cyrraedd lefel o 25% yn unig o ddisgleirdeb lamp ITO o 5000 mm². Nid y lleihad yn nargludedd a thryloywder y PEDOT:PSS o'i gymharu ag ITO yn unig sy'n gyfrifol am berfformiad cymharol wael y lampau di-draidd, ond hefyd natur dopolegol y gronynnau ffosffor, sy'n golygu bod rhai o'r gronynnau y tu hwnt i effaith y maes trydanol a grëwyd rhwng y ddau electrod.

Allweddeiriau: Electroneg brintiedig, dargludydd tryloyw, is-haen bapur, lampau electroymoleuol.

Understanding performance deficiencies in printed thick film EL lamps on paper

Abstract: In order to examine new potential markets for printed electronics, a research study was undertaken to understand the performance of opaque substrate electroluminescent (EL) lamps. Opaque EL lamps are made possible by a PEDOT:PSS top electrode which replaces the ITO used in the conventional lamps. Screen-printed lamps were manufactured

on four substrates (one plastic and three paper) and their performance was measured through brightness measurement. Generally, opaque substrate lamps were 50% less bright than a comparable ITO lamp. Further reductions in brightness were observed with the lighter and rougher papers. Additional layers of PEDOT:PSS increased sheet conductivity but reduced lamp brightness due to a reduction in layer transparency. As lamp size increased, the resistive nature of the PEDOT:PSS caused a significant reduction in lamp output, with a brightness of 25% of a comparable ITO lamp with an illuminated area of 5000 mm². The relatively poor performance of the opaque lamps is derived not only from the reduced conductivity and transparency of the PEDOT:PSS compared to ITO, but is also caused by the topological nature of the phosphor particles which result in some phosphor material lying outside the electric field created between the two electrodes.

Keywords: Printed electronics, transparent conductor, paper substrate, electroluminescent lamps.

Geirfa Dechnegol

Defnyddiwyd y byrfoddau canlynol:

EL: electroymoleuol (electroluminescent)

ITO: indiwm tin ocsid (indium tin oxide)

LCD: dangosydd grisial hylif (liquid crystal display)

OLED: denod organig allyrru golau (organic light-emitting diode)

OPV: ffotofoltaig organig (organic photovoltaic)

PEDOT:PSS: sylffonad polystyren poly(3,4-ethyleneduocsithioffen)
(poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate)

PEN: polyethylen naffthalad (polyethylene naphthalate)

PET: polyethylen tereffthalad (polyethylene terephthalate)

1 Rhagarweiniad

Dros y pymtheng mlynedd ddiwethaf, cynhaliwyd ymchwil helaeth i ddefnyddio prosesau printio neu argraffu er mwyn cynhyrchu dyfeisiau electronig. Prif fantais technoleg electroneg brintiedig yw ei bod yn bosibl defnyddio prosesau printio rhad a chyflym i greu cynnyrch sydd o werth uchel ac sy'n llawer mwy o ran maint na'r hyn a geir drwy ddefnyddio'r dechnoleg draddodiadol o gynhyrchu electronig (Das 2013). Amcangyfrifir y bydd y farchnad ar gyfer dyfeisiau sydd wedi eu cynhyrchu gan brosesau printio yn werth tua \$50 biliwn erbyn 2020 a \$80 biliwn erbyn 2023 (Das 2013). Mae'r potensial i electroneg brintiedig gael effaith ar farchnadoedd yn cynnwys celloedd solar mawr, lampau, dangosyddion, synwryddion meddygol, batris hyblyg a thechnoleg gwybodaeth ar gyfer dillad.

Dyfeisiau ar is-haen blastig (polyethylen tereffthalad, sef PET, a pholyethylen naffthalad, sef PEN) sy'n cael eu hymchwilio'n bennaf gan fod yr is-haen hon yn gyson, yn llyfn ac yn dryloyw. Prif is-haen y diwydiant argraffu yw papur, ac mae iddo sawl mantais fel is-haen i amryw o ddyfeisiau electronig. Gall papur wrthsefyll tymheredd uwch nag y gall deunydd polymer megis PET neu PEN; mae'n hawdd ei ailgylchu; mae'n rhad ac eisoes yn cael ei ddefnyddio fel is-haen mewn miloedd o ffyrdd gwahanol yn y diwydiant argraffu a phacio. Ceir disgrifiad cynhwysfawr o fanteision papur fel is-haen i ddyfeisiau electronig printiedig gan Tobjörk ac Österbacka (2011). Prif wendidau papur ar gyfer dyfeisiau optegol yw ei fod yn ddi-draidd a bod ei arwyneb mandyllog yn amsugno hylif. Ceir rhai anawsterau hefyd sy'n gysylltiedig ag arwyneb mandyllog papur, yr amrywiad naturiol o fewn yr is-haen a'i sensitifrwydd i leithder.

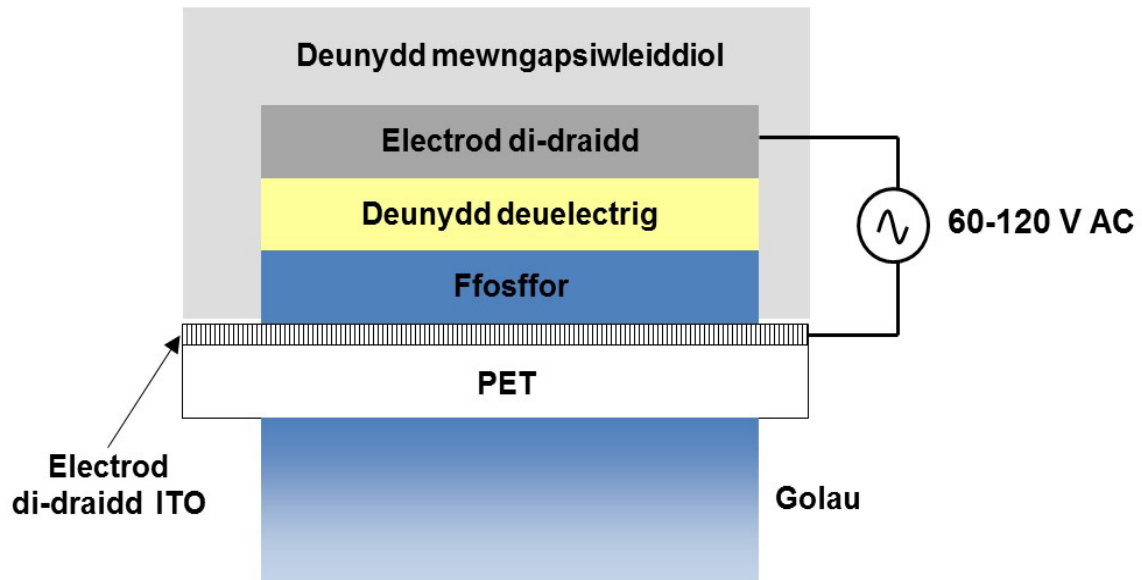
Mae technoleg electroymoleuol (EL) wedi datblygu'n helaeth ac fe'i defnyddir mewn sawl ffordd, er enghraifft i gefnoleuo dyfeisiau â dangosydd grisial hylif (LCD) ac i greu posterï marchnata a goleuadau argyfwng (Lupo et al., 2013, Zovko a Nerz 1999). Sylfaen y dechnoleg yw gronynnau ffosffor sy'n goleuo wrth iddynt ddod dan effaith maes trydanol. Y ffordd fwyaf cyffredin o greu lamp yw gosod haen ffosffor (gronynnau ZnS) rhwng dwy haen o ddeunydd deuelectrig rhwng dau electrod (Bredol a Dieckhoff 2010). Wrth yrru'r lamp â foltedd eiledol (hyd at 200 V a 800 Hz), mae'r gronynnau ffosffor yn goleuo wrth iddynt osgiladu rhwng cyflwr cynhyrfol a'u cyflwr isaf (Consolini et al., 2002). Wrth i amledd a foltedd y signal gyrru gynyddu ceir cynnydd yn y golau a gynhyrchir.

Prif fanteision y dechnoleg yw ei bod yn rhatach na thechnoleg gymharol fel deuod organig allyrru golau (OLED); mae'r dechnoleg yn ddibynadwy, mae'n bosibl cynhyrchu lampau ag arwynebedd mawr a gellir defnyddio proses syml fel printio sgrin i'w cynhyrchu. Er y manteision hyn, mae sawl nodwedd wedi cyfyngu ar nifer y marchnadoedd lle defnyddir y dechnoleg. Ychydig yn unig o liwiau y gellir eu creu, mae'r lampau'n defnyddio foltedd AC uchel, ac felly mae'n rhaid cael dyfais electronig allanol i'w gyrru; tua 1000 o oriau yn unig yw bywyd y ffosffor, sy'n ei wneud yn anaddas i farchnad sydd angen golau cyson. Rhwystr ychwanegol i'r farchnad yw cost yr is-haen ddargludo dryloyw sy'n rhan hanfodol o'r dechnoleg.

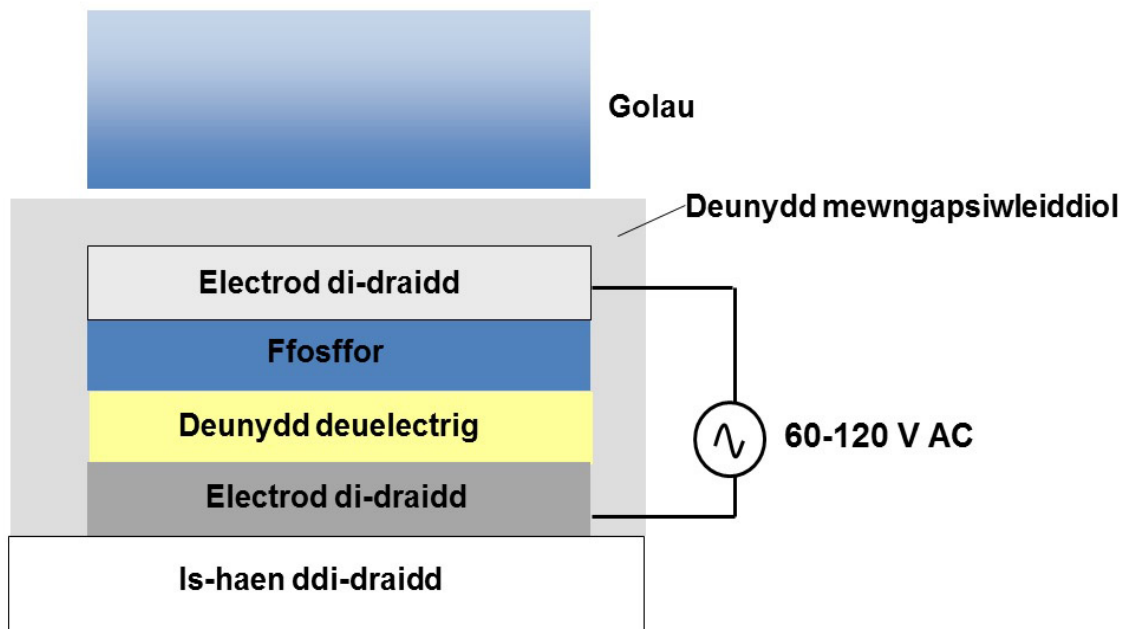
Er mwyn i olau adael y ddyfais, rhaid bod un electrod yn dryloyw; PET neu wydr sydd wedi ei haenu ag ITO a ddefnyddir ar gyfer hyn fel arfer, gweler Ffigwr 1(a). Er bod y dyfeisiau hyn yn gweithio, mae i ITO sawl anfantais. Mae'n ddrud gan ei fod yn defnyddio indiwm (elfen sy'n brin ac felly'n gostus); fe'i gwneir o dan wactod, sy'n cynyddu'r gost, a chan mai cerameg ydyw mae'n hawdd cracio'r deunydd gan achosi lleihad sylweddol yn nargludedd yr arwyneb a lefel golau'r lamp. Oherwydd y problemau sy'n gysylltiedig ag ITO, sefydlwyd prosiect ymchwil i weld a ellid amnewid yr ITO am ddeunydd rhad, haws ei brosesu, a fyddai'n galluogi cynhyrchu lampau electroymoleuol (EL) ar is-haen bapur. Y prif anhawster o greu lampau ar bapur yw fod angen i'r electrod sy'n galluogi i'r golau adael y lampau fod ar ben yr haen ffosffor. Felly, rhaid i'r electrod gael ei osod ar y ffosffor fel hylif a ffurfio haen sych sy'n dryloyw ac yn dargludo trydan. Nod yr ymchwil oedd creu technoleg electroymoleuol sy'n rhad ac yn gydnaws â phrosesau printio i gymharu perfformiad y

lampau â pherfformiad lampau a grëwyd o ddeunydd traddodiadol, a hefyd er mwyn deall tarddiad unrhyw ddiffygion yn eu perfformiad.

(a)



(b)



Ffigwr 1: (a) Dyfais gonfensiynol ar is-haen dryloyw (b) Dyfais newydd ag is-haen ddi-draidd sy'n cynhyrchu golau drwy ei harwyneb uchaf

2 Adolygiad o lenyddiaeth berthnasol

Mae nifer o awduron (Bredol a Dieckhoff 2010, Cież et al., 2007) wedi ymchwilio i berfformiad lampau electroymoleuol confensiynol ond nid oes cynifer o bapurau wedi ymchwilio i berfformiad dyfeisiau heb ITO. Gellir creu lampau sydd â disgleirdeb o hyd at 210 cd/m^2 (Kim et al., 2010), ond yn yr achos hwn defnyddiwyd sawl technoleg brosesu o dan wactod. Er mwyn creu lamp ar bapur, y brif her yw'r angen am ddeunydd sy'n dargludo cerrynt trydanol ond sydd hefyd yn dryloyw ac y gellir ei brosesu fel hylif er mwyn gallu ei brintio. Un ffordd amlwg o wneud hyn yw creu inc ITO. Defnyddiwyd gwasgariad o nanoronynnau ITO gan Straue (Straue et al., 2011), ond nid oedd perfformiad y gronynnau hyn cystal â pherfformiad ITO confensiynol ac roedd angen tymheredd uchel i'w prosesu. Trwy ddilyn proses sol-gel dyfeisiwyd inc ITO (Gan et al., 2006, Kim et al., 1999), ond nid oedd yr ymchwil hon yn barod i'w ddefnyddio'r tu hwnt i'r labordy gan fod angen defnyddio cemegion niweidiol a rheoli'r tymheredd yn fanwl.

Gan na fu'r syniad o greu inc ITO yn llwyddiannus, trodd y byd ymchwil at ddeunydd organig. Dros yr ugain mlynedd ddiwethaf bu ymchwil helaeth i ddeunydd organig sydd hefyd â rhywfaint o berfformiad electronig. Y deunydd sy'n cyflawni rhai o anghenion lamp electroymoleuol yw sylffonad polystyren poly(3,4-ethylendeuocsithioffen) (PEDOT:PSS). Ceir crynodeb o nodweddion y deunydd a'r gwelliant yn ei berfformiad yn adolygiad Elschner et al. (2010), ac ar sail yr ymchwil lwyddiannus hon mae sawl inc ar y farchnad sy'n gydnaws â phrosesau printio. Defnyddiwyd hyn yn llwyddiannus i amnewid ITO mewn sawl dyfais wahanol, gan gynnwys ffotofoltaig organig (OPV) (Aernouts 2004, Krebs et al., 2004) ac OLED (Jabbour et al., 2001), er nad oedd y perfformiad cystal ym mhob achos. Dangoswyd ei bod yn bosibl ffurfio lampau electroymoleuol drwy ddefnyddio PEDOT:PSS ar blastig (Weigelt et al., 2012) ond roedd y lampau yn llai disglair ac nid ymchwiliwyd i'r rhesymau dros y gwahaniaeth yn eu perfformiad. Nid ymchwiliwyd ychwaith i effaith y prif baramedrau ar ddisgleirdeb y lampau. Pan brintwyd PEDOT:PSS ar bapur (Trnovec et al., 2009, Denneulin et al., 2008), gwelwyd gostyngiad oedd yn amrywio rhwng dwywaith a chanwaith yn y dargludiad; awgrymwyd mai'r rheswm dros hyn oedd fod y papur yn amsugno'r hylif. Nid yw'r broses hon mewn gwirionedd yn esbonio'r lleihad yn nisgleirdeb lamp electroymoleuol lle mae'r PEDOT:PSS ar ben y gronynnau ffosffor, oherwydd nid yw'r haen ffosffor yn fandylllog.

Wrth astudio'r cefndir technolegol a'r deunydd sydd wedi ei gyhoeddi, gellir dod i'r casgliad ei bod yn bosibl creu lampau electroymoleuol ar bapur drwy ddefnyddio PEDOT:PSS ond nad yw perfformiad y dechnoleg yn cymharu'n ffafriol â lampau ITO. Nid oes rhesymau pendant am y perfformiad hwn a sut y gellir ei wella. Er gwaethaf gwendidau'r lampau, mae potensial sylweddol i'r dechnoleg oherwydd ei bod yn defnyddio deunydd crai sy'n llawer rhatach (e.e. is-haen $\text{£}0.05/\text{m}^2$ o'i gymharu â $\text{£}30/\text{m}^2$) ac mae'n agor marchnadoedd newydd oherwydd y defnydd o bapur. Am y rhesymau hyn, penderfynwyd ymchwilio i darddiad y gostyngiad yn y perfformiad a sut y gellid ei wella.

3 Dull

Er mwyn astudio perfformiad y lampau, penderfynwyd cynnal arbrawf dan amgylchiadau labordy. Defnyddiwyd tri phapur gwahanol ac un is-haen PET er mwyn edrych ar effaith fandyllog yr is-haen, Tabl 1. Maent hefyd yn gymysgedd o'r math o is-haenau a defnyddir yn y diwydiant pacio, ac yn wahanol o ran eu trwch a nodweddion mandyllog eu harwyneb.

	PET	Cerdyn	Papur sglein	Papur plaen
Trwch (μm)	350	200	130	90
Dwysedd (g/m^2)	-	220	110	100
Garwedd Ra (μm)	0.14	0.83	0.53	2.75

Tabl 1: Nodweddion yr is-haen

Defnyddiwyd deunyddiau masnachol sydd wedi eu datblygu i wneud lampau confensiynol ITO, gweler Tabl 2, i wneud lampau o sawl maint gwahanol. Wrth ddefnyddio deunyddiau i greu'r lamp, rhoddir pwyslais ar effaith yr is-haen ar ddull cynhyrchu'r lamp.

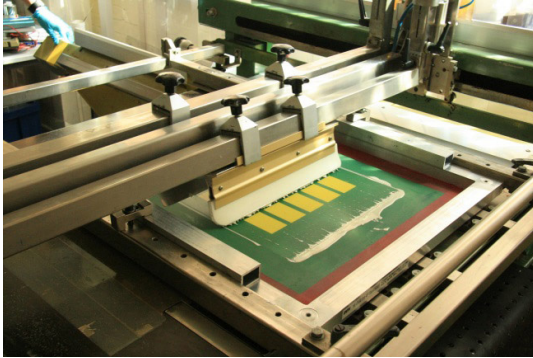
Ffosffor	GEM C2061027D13
Deuelectrig	GEM D2080410D5
Arian (electrod gwaelod)	GEM C2090210D12
PEDOT:PSS	Agfa Orgacon EL-P3040

Tabl 2: Deunydd a ddefnyddiwyd

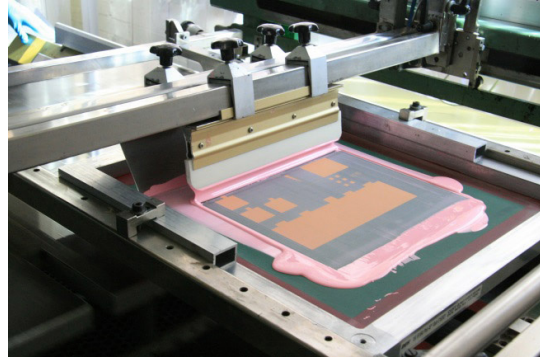
Sychwyd pob haen o'r ddyfais ar dymheredd o 120°C am 4.5 munud. Seiliwyd y system sychu ar arbrofion mewn gwaith blaenorol ar ddyfeisiau ITO a thrwy ddilyn argymhelliad cyflenwyr y deunyddiau. Printiwyd y lampau ar beiriant printio sgriniau Svecia gan ddefnyddio sgrin 61 ffilament i'r centimetr. Ceir cip ar y broses gynhyrchu yn Ffigur 2, sy'n dangos y peiriant printio sgriniau yn gosod pob haen wrth greu'r lampau.

Gan fod yn rhaid cydbwysu nodweddion tryloyw a dargludiant yr electrod a ffurfiwyd gan y PEDOT:PSS, printiwyd lampau â sawl haen o PEDOT:PSS. Drwy hyn roedd yn bosibl cydbwysu anghenion trydanol ac optegol yr haen. Crëwyd pum lamp ar bob is-haen, a dangosir cyfartaledd y mesuriadau yn unig. Er mwyn cymharu perfformiad y lampau a gynhyrchwyd yn y dull hwn â rhai confensiynol, crëwyd lampau ar is-haen PET-ITO hefyd. Defnyddiwyd ITO â gwrthiant llen o $50 \text{ W}/\text{sgwâr}$. Wrth drafod deunydd electronig haen denau, defnyddir y term gwrthiant llen gan mai hon yw'r ffordd orau o ddisgrifio sut mae'r deunydd yn rhwystro symudiad trydan ar draws yr haen a grëwyd o ddeunydd â gwrthedd penodol. Defnyddiwyd Viptronics TP i fesur trawsyriant optegol pob haen dryloyw a mesurwyd y gwrthiant llen gan ddefnyddio amlfesurydd Keithley 2400. Roedd y lampau'n cael eu gyrru gan signal sinwsoidaidd ar amledd o 400 Hz o system Light and Motion LM30. Mesurwyd y disgleirdeb ar sbectroffotomedr Gretag Macbeth spectrolino oedd yn edrych ar gylch 4 mm o ddiamedr. Cafodd pob lamp 50 mm x 50 mm ei mesur, a mesurwyd meintiau eraill yn ôl yr angen.

(a) Ffosffor



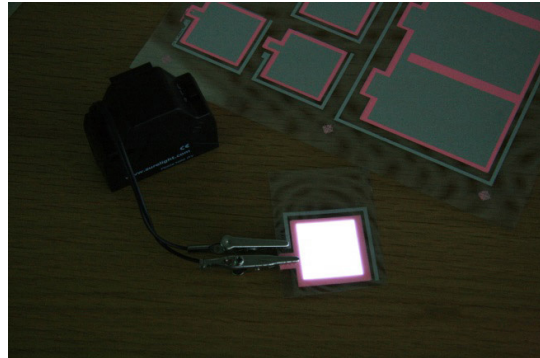
(b) Deuelectrig



(c) Arian



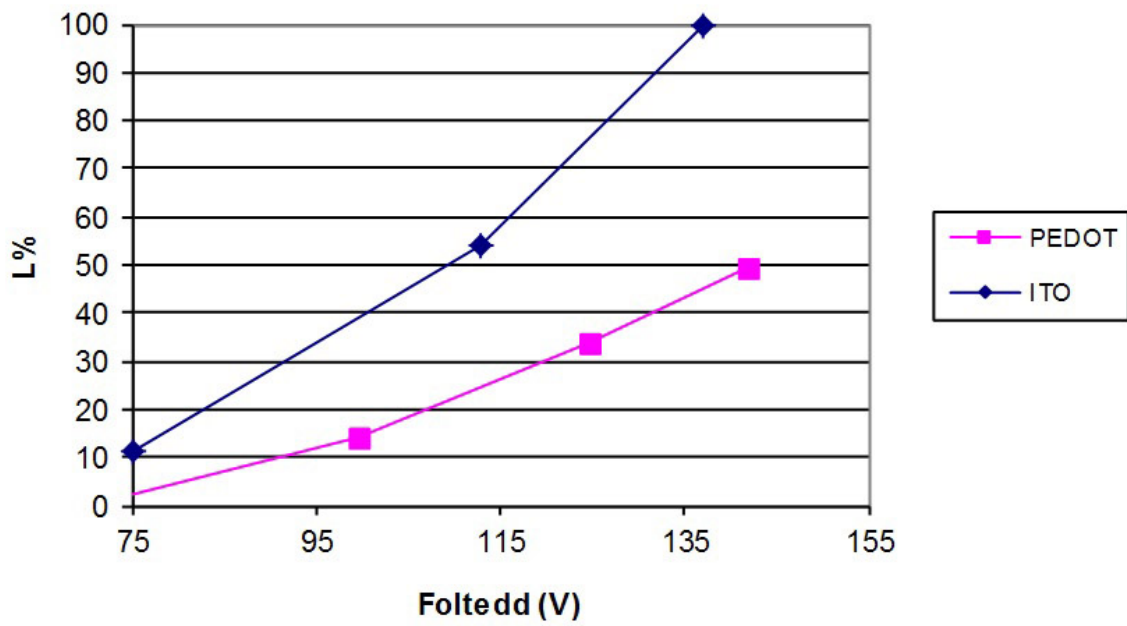
(ch) Lamp orffenedig



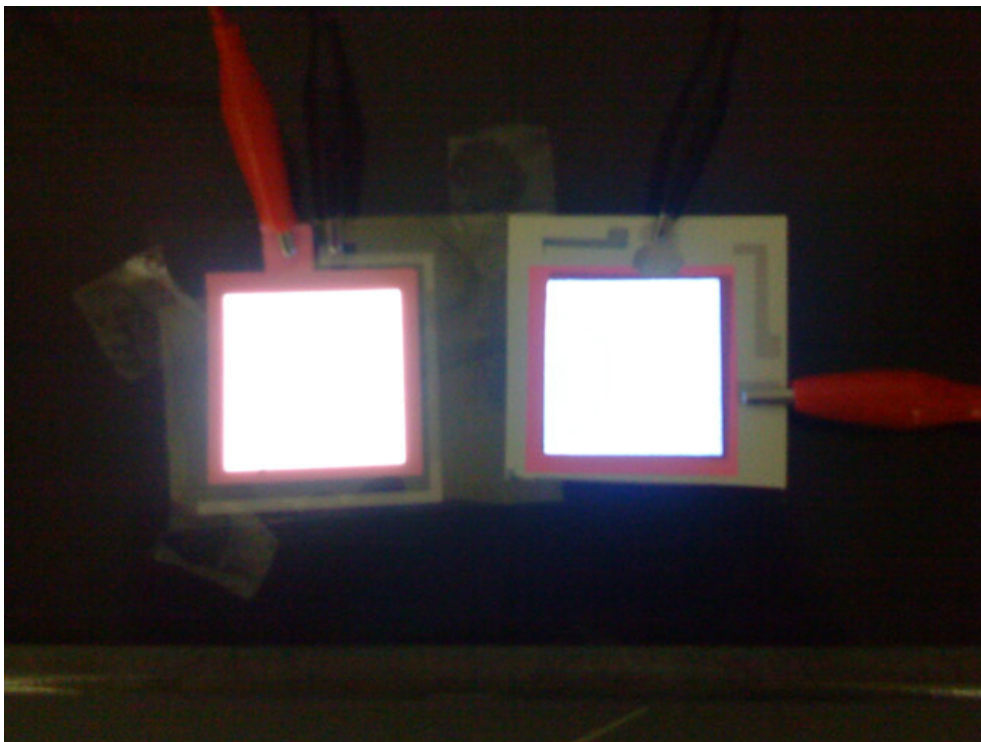
Ffigwr 2: Creu'r lampau drwy ddefnyddio peiriant printio sgriniau. Dangosir y dull o wneudlampau ar ITO. Ar bapur mae'r drefn yn wahanol, gyda haen ychwanegol o PEDOT:PSS ar ben y ffosffor.

4 Canlyniadau

Er mwyn hwyluso cymhariaeth rhwng y lampau, cymharwyd perfformiad pob is-haen ag is-haen dryloyw PET â haen o ITO, sy'n cynrychioli perfformiad safonol y dechnoleg. Diffiniwyd ffactor L sy'n disgrifio'r disgleirdeb fel canran o ddisgleirdeb mwyaf y lamp ITO, h.y. mae L o 100% yn dynodi perfformiad gorau'r lamp ITO. Mae disgleirdeb y lampau a grëwyd yn cynnwys PEDOT:PSS tua 50% llai na'r rhai a grëwyd gan lampau sy'n defnyddio ITO fel is-haen, gweler Ffigwr 3. Wrth gynyddu'r foltedd, mae disgleirdeb y ddwy lamp yn cynyddu, â'r lamp ITO yn dilyn graddfa sydd tua dwbl eiddo'r lamp PEDOT:PSS. Mae'r gwahaniaeth rhwng y lampau yn amlwg wrth edrych ar Ffigwr 3(b), sy'n dangos y lampau'n cael eu gyrru gan yr un foltedd a'r un amledd. Mae'r berthynas rhwng y foltedd a'r disgleirdeb bron yn llinol, sy'n cytuno â'r arsylwadau yn y llenyddiaeth ymchwil (Ibañez et al., 2007, Sharma et al., 2006).

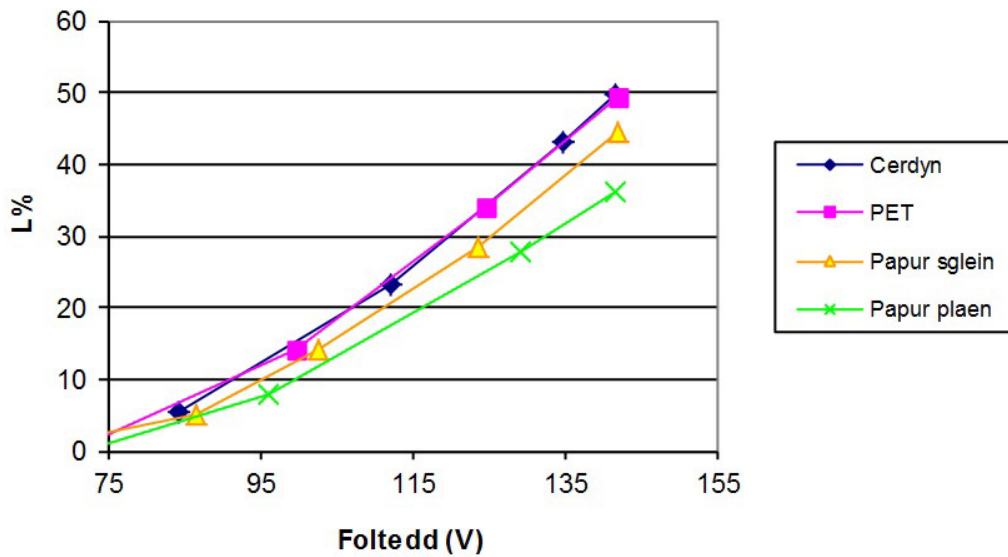


Ffigur 3(a): Perfformiad lampau electroymoleuol a gynhyrchwyd drwy ddefnyddio PEDOT:PSS ac ITO fel yr electrod tryloyw

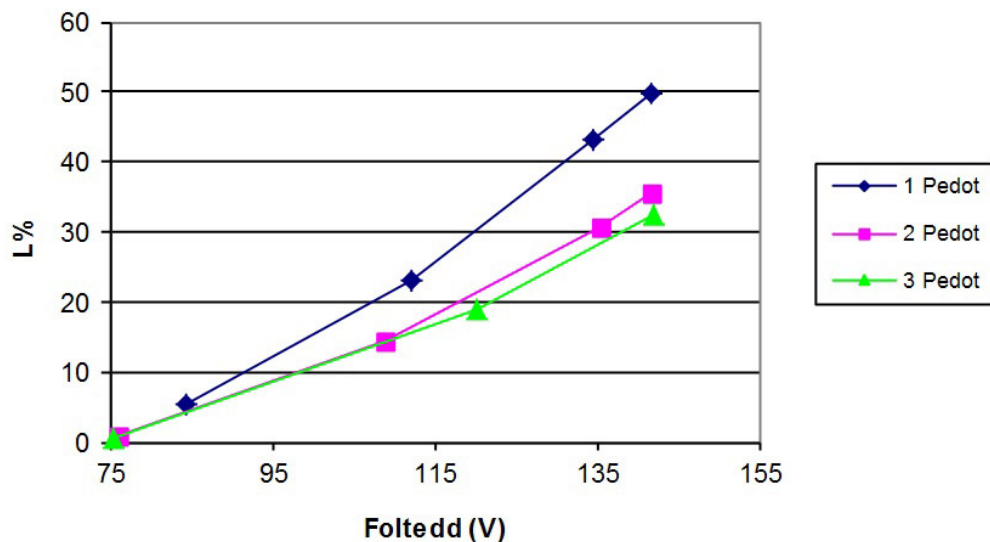


Ffigur 3(b): Cymhariaeth weledol o'r lampau electroymoleuol a gynhyrchwyd drwy ddefnyddio ITO (ar y chwith) a PEDOT:PSS ar bapur (ar y dde) fel yr electrod tryloyw

Mae defnyddio mathau gwahanol o bapur yn newid perfformiad y lampau; mae'r papur ysgafnaf a'r mwyaf mandyllog yn arddangos perfformiad sydd tua 15% yn is na'r papur gorau â'r PET, Ffigur 4. Ceir gostyngiad yn y perfformiad ar yr is-haen bapur oherwydd yr anffurfiad yn y papur ysgafn wrth iddo fynd drwy'r pedair proses sychu sy'n angenrheidiol wrth i'r lamp gael ei chynhyrchu. Nid yw'r cerdyn cadarnach yn dioddef o anffurfiad. Mae gwahaniaeth rhwng y papur garw a mandyllog a'r papur esmwyth oherwydd bod y papur mandyllog yn amsugno rhan o'r haen arian ac felly'n ffurfio electrod llai effeithiol. Er gwaetha'r gostyngiad yn y perfformiad, mae ymchwil wedi dangos ei bod yn bosibl creu lampau electroymoleuol ar bapurau sydd â nodweddion eang o ran trwch a gorfenniad yr arwyneb.



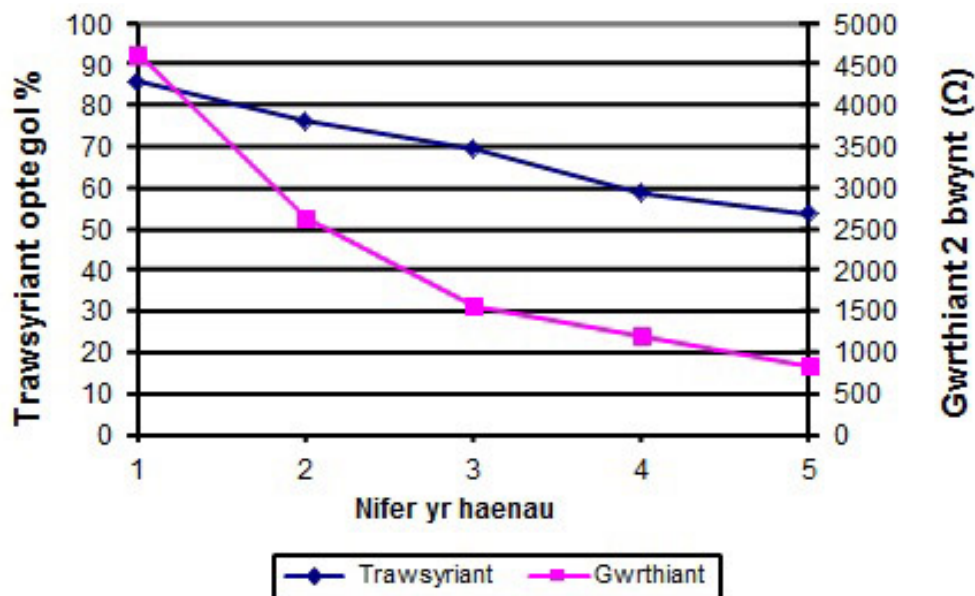
Ffigur 4: Perfformiad y lampau ar bob is-haen



Ffigur 5: Effaith cynyddu nifer yr haenau o PEDOT:PSS ar ben y lamp

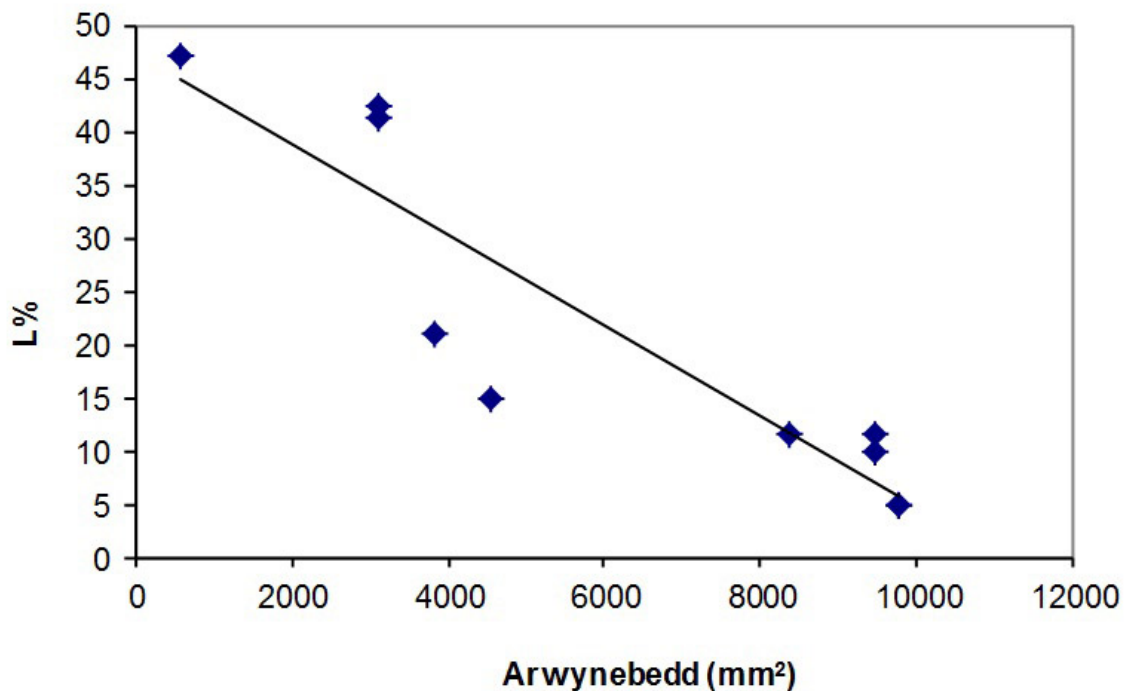
Mae natur y deunydd PEDOT:PSS yn golygu bod haen sy'n fwy trwchus yn ddargludydd gwell ond ei bod yn lleihau'r nodweddion tryloyw. I ddeall a oedd yn fantais cael haen fwy trwchus o PEDOT:PSS ar y lamp ai peidio, cynhyrchwyd lampau â haenau ychwanegol o PEDOT:PSS. Nid oes mantais o ychwanegu mwy o PEDOT:PSS i'r lamp gan ei fod yn cael effaith negyddol ar berfformiad y lamp, fel y gwelir yn Ffigur 5.

Er mwyn esbonio'r perfformiad a welwyd gyda'r haenau ychwanegol o PEDOT:PSS, printiwyd haen o PEDOT:PSS ar is-haen dryloyw PET a mesurwyd gwrthiant a nodweddion tryloyw sawl haen o PEDOT:PSS. Mae'n bosibl esbonio'r gostyngiad yn y perfformiad wrth astudio Ffigur 6, sy'n dangos effaith nifer yr haenau ar wrthiant a thrawsyrant optegol (100% yw haen hollol dryloyw) y PEDOT:PSS. Mae'r lleihad yn y trawsyrant yn cael mwy o effaith ar berfformiad y lamp, er bod gwrthiant yr haen yn lleihau. Y brif nodwedd sy'n rheoli perfformiad y lamp yw tryloywder, yn hytrach na gwrthiant yr haen.



Ffigur 6: Effaith nifer yr haenau PEDOT:PSS ar wrthiant a nodweddion tryloyw

Er mai nodweddion tryloyw'r lamp sy'n effeithio fwyaf ar berfformiad y lampau 50 mm x 50 mm, wrth i faint y lampau gynyddu mae gwrthiant yr haen ychwanegol hefyd yn effeithio ar berfformiad y lamp, gweler Ffigur 7. Er bod y teclyn gyrru yn medru goleuo lamp sydd wedi ei gwneud ag ITO hyd at arwynebedd o 10,000 mm² heb unrhyw ostyngiad ym mherfformiad y lamp, mae gostyngiad sylweddol ym mherfformiad y lampau pan ddefnyddir PEDOT:PSS fel dargludydd tryloyw'r lamp. Er nad yw'r berthynas rhwng perfformiad y lamp ac arwynebedd y lamp yn un llinol, mae patrwm y gostyngiad yn y perfformiad wrth i'r arwynebedd gynyddu yn amlwg. Erbyn i'r arwynebedd gyrraedd 5000 mm², mae'r perfformiad yn llai na 25% o berfformiad y lamp a grëwyd ag ITO.

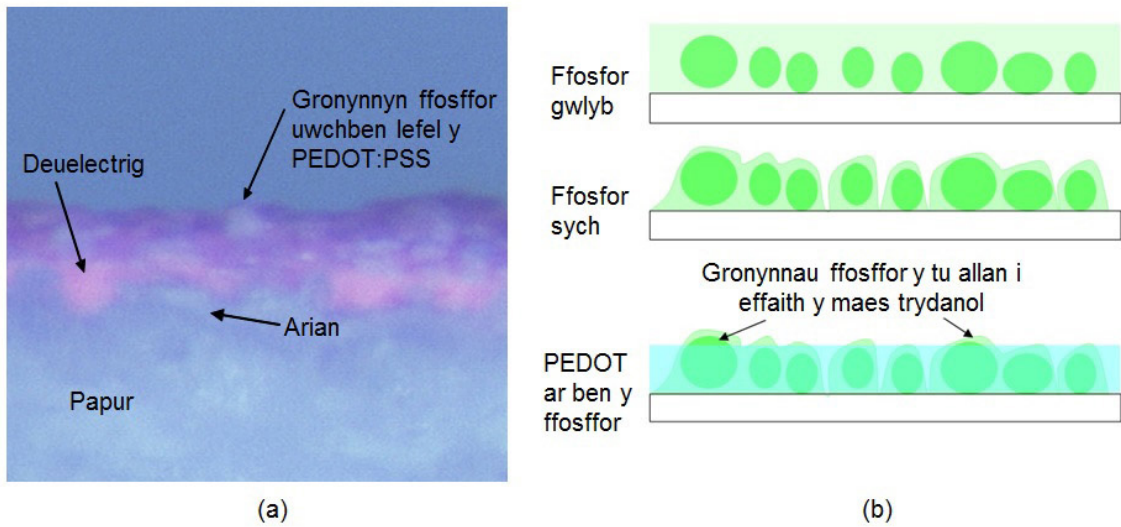


Ffigur 7: Effaith arwynebedd y lamp ar ddisgleirdeb

5 Trafodaeth

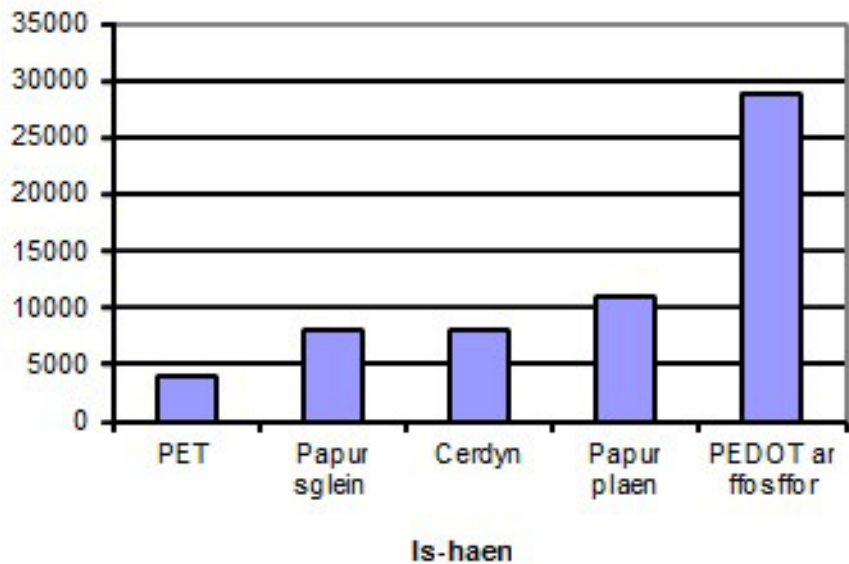
Y rheswm mwyaf amlwg dros y gostyngiad ym mherfformiad y lampau PEDOT:PSS o'u cymharu â lampau a grëwyd gan ddefnyddio ITO yw gwrthiant y deunydd. Gwrthiant ITO yw 80 W/sgwâr tra mae gwrthiant haen o PEDOT:PSS â nodwedd tryloywder yn 350 W/sgwâr (Agfa 2012). Wrth i fformleiddiad yr inc PEDOT:PSS wella, dylai'r gwahaniaeth rhwng gwrthiant y ddau leihau, ond nid yw PEDOT:PSS yn debygol o gyrraedd yr un lefel â'r ITO. Er hynny, nid yw'r gwahaniaeth hwn yn unig yn esbonio'r gwahaniaeth yn y perfformiad; mae gwahaniaeth hefyd yn y modd y mae'r lamp yn cael ei hadeiladu a'r modd y mae'r golau'n gadael y lamp.

Mae'r trawstoriad drwy'r lamp, Ffigur 8, yn dangos pob haen drwy'r lamp. Wrth i'r inc sy'n cynnwys y gronynnau ffosffor sychu, mae gostyngiad yng nghyfaint elfen hylifol yr haen. Gan fod y gronynnau rhwng 5 mm a 20 mm o faint, maent yn ffurfio haen arw sydd â thopoleg bendant â rhywfaint o bolymer yn dal y gronynnau ynghlwm wrth yr haen ddeuelectrig. Wrth osod yr haen PEDOT:PSS, mae tuedd i'r hylif lenwi'r bylchau rhwng y gronynnau yn hytrach na chreu haen homogenaidd ar ben y gronynnau. Gellir gweld hyn yn Ffigur 8(a), lle mae sawl gronyn ffosffor heb ei orchuddio gan PEDOT:PSS ac felly nid yw'n gorwedd o fewn y maes trydanol; o ganlyniad, nid yw potensial llawn y gronynnau hyn i greu golau yn cael ei ddefnyddio. Mewn lamp ITO, gan fod ffosffor yn cael ei osod yn gyntaf, mae'r ail electrod yn cael ei osod ar haen lyfn y deunydd deuelectrig.



Ffigwr 8(a): Trawstoriad drwy'r lamp ar bapur, a (b) darlun sgematig o'r hyn sy'n achosi lleihad yn nisgleirdeb y lampau. Yn (b) mae'r gronynnau ffosfor y tu allan i effaith y maes trydanol.

Mae effaith y gronynnau ffosfor hefyd yn dylanwadu ar wrthiant yr haen PEDOT:PSS gan ei bod yn achosi i'r haen fod yn llai homogenaidd. Mae topoleg yr haen yn achosi gwrthiant uwch na'r gwrthiant a geir pan osodir yr un haen o PEDOT:PSS ar yr is-haen. Pan osodir y PEDOT:PSS ar bob is-haen, mae effaith y dopoleg yn amlwg, gyda gwrthiant sydd ffactor o 6 yn uwch na phan osodir y PEDOT:PSS ar is-haen lyfn (PET), gweler Ffigwr 9.



Ffigwr 9: Effaith yr is-haen ar wrthiant yr haen PEDOT:PSS

Mae topoleg yr haen ffosffor a'i heffaith ar ba mor homogenaidd yw'r electrod uchaf hefyd yn cael effaith ar gynhwysiant y lampau: 1.8nF â'r PEDOT:PSS o'i gymharu â 2.6nF â'r ITO. Wrth adeiladu lampau ar ITO, mae'r haen gyntaf o ddeunydd deuelectrig yn llenwi'r bylchau rhwng y gronynnau ffosffor ac felly, ar gyfartaledd, yn ychwanegu haen denau o ddeunydd deuelectrig rhwng y ddau electrod. Gyda lampau PEDOT:PSS, mae'r deunydd deuelectrig yn cael ei osod ar electrod llyfn o arian. Felly, mae'r haen a grëwyd yn fwy trwchus ac yn lleihau'r cynhwysiant.

Gellir lleihau'r gostyngiad ym mherfformiad y lampau PEDOT:PSS wrth i faint y lampau gynyddu drwy ailgynllunio'r ddyfais electronig sy'n gyrru'r lamp. Bydd yn rhaid i hyn gymryd i ystyriaeth y lleihad yn y cynhwysiant a'r cynnydd yn y gwrthiant, h.y. cynnydd yn R a lleihad, C, yn y llwyth RC. Er bod hyn yn bosibl o safbwynt technolegol, mae'n fwy anodd ei wneud o safbwynt masnachol oherwydd bydd angen amrywiaeth o ddyfeisiau i yrru lampau o wahanol fathau a meintiau. Ffordd arall o leihau gwrthiant y PEDOT:PSS yw ychwanegu patrwm mân o arian ar ben y PEDOT:PSS sy'n anweledig ond sy'n cynyddu'r dargludiad ar draws yr haen. Mae hwn eto'n cynyddu'r costau drwy ychwanegu deunydd arian drud a'r angen am broses a sgrin arall.

Er mai dim ond tua 50% o'r hyn y gellir ei gynhyrchu ar ITO yw perfformiad y lampau, gellir cynhyrchu lampau sy'n goleuo drwy haen o PEDOT:PSS ar is-haen ddi-draidd drwy ddefnyddio proses syml fel printio sgrin. Mae'r canlyniad hwn yn gam sylweddol i alluogi cynhyrchu lampau ar is-haen ratach na rhai di-draidd, traddodiadol. Wrth i berfformiad dargludo PEDOT:PSS wella, bydd disgleirdeb y lampau'n cynyddu, ond ni fydd yn bosibl creu lampau â pherfformiad sy'n cyfateb i lampau ITO gan fod topoleg y ffosffor yn cael effaith sylfaenol ar berfformiad y lamp. Er y gellir lleihau maint y gronynnau ffosffor, mae'r gronynnau llai yn cael effaith negyddol ar oes y lamp.

6 Casgliadau

Ar sail yr arbrawf a ddisgrifiwyd, gellir llunio sawl casgliad sy'n bwysig o ran datblygiad lampau electronig printiedig ar is-haen dryloyw. Gyda'r deunydd PEDOT:PSS diweddaraf, mae'n bosibl creu lamp fach sydd â disgleirdeb o tua 50% o'r hyn a geir gan lamp a gynhyrchwyd o ITO ar ddeunydd tryloyw. Mae sawl esboniad am y gostyngiad yn y perfformiad; mae'n digwydd yn rhannol oherwydd perfformiad trawsyrru optegol y PEDOT:PSS a hefyd oherwydd effaith topoleg yr haen ffosffor.

Llyfryddiaeth

- Aernouts, T. (2004), 'Printable anodes for flexible organic solar cell modules', *Thin Solid Films*, 451 (452), 22–5.
- Agfa, Orgacon Electronic Materials ORGACON Transparent Dual Cure Conductive Screen Printing Ink: Cured Characteristics Typical for EL-P 6010 Mesh / cm. *Datasheet*.

- Bredol, M., a Dieckhoff, H. S. (2010), 'Materials for Powder-based AC- Electroluminescence', *Materials*, 3 (2), 1353–74.
- Cieź, M., et al. (2007), 'Large-dimensional light-emitting elements with printed electroluminophore', *Opto-Electronics Review*, 15 (3), 159–62.
- Consolini, D., Dotti, G., a Depero, L. E. (2002), 'Spectroscopic characterisation of alternate current electroluminescent devices based on ZnS–Cu', *Area*, 341, 79–81.
- Das, R. (2013), 'Printed Electronics Market Forecast 2013', yn *Printed Electronics 2013* (Berlin: IDTechEx).
- Denneulin, A., et al. (2008), 'PEDOT:PSS coating on specialty papers: process optimization and effects of surface properties on electrical performances', *Progress in Organic Coatings*, 63, 87–91.
- Elschner, A., et al. (2010), *PEDOT: Principles and Applications of an Intrinsically Conductive Polymer* (Boca Raton, FL: CRC Press).
- Gan, Y., Liu, J. a Zeng, S. (2006), 'Transparent conductive indium tin oxide film fabricated by dip-coating technique from colloid precursor', *Surface and Coatings Technology*, 201 (1-2), 25–9.
- Ibañez, J., et al. (2007), 'Frequency-dependent light emission and extinction of electroluminescent ZnS:Cu phosphor', *Displays*, 28 (3), 112–17.
- Jabbour, G. E., Radspinner, R., a Peyghambarian, N. (2001), 'Screen printing for the fabrication of organic light-emitting devices', *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 7 (5), 769–73.
- Kim, J., et al. (2010), 'Paper as a Substrate for Inorganic Powder Electroluminescence Devices', *World*, 57 (6), 1470–4.
- Kim, S., et al. (1999), 'Transparent conductive ITO thin films through the sol-gel process using metal salts', *Thin Solid Films*, 347 (1–2), 155–60.
- Krebs, F. C., et al. (2004), 'Production of large-area polymer solar cells by industrial silk screen printing, lifetime considerations and lamination with polyethyleneterephthalate', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 83 (2–3), 293–300.
- Lupo, D., et al. (2013), 'OE-A Roadmap for Organic and Printed Electronics', yn Eugenio Cantatore (gol.), *Applications of Organic and Printed Electronics* (London: Springer), tt. 1–26.
- Sharma, G., et al. (2006), 'Electroluminescent efficiency of alternating current thick film devices using ZnS:Cu,Cl phosphor', *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 131 (1–3), 271–6.
- Straue, N., et al. (2011), 'Tape Casting of ITO Green Tapes for Flexible Electroluminescent Lamps', *Journal of the American Ceramic Society*, 95 (2), 684–9.
- Tobjörk, D., ac Österbacka, R. (2011), 'Paper electronics', *Advanced Materials*, 23 (17), 1935–61.
- Trnovec, B., et al. (2009), 'Coated Paper for Printed Electronics', *Professional Papermaking*, 1, 48–51.

- Weigelt, K., et al. (2012), 'Bidirectional flexible mouldable electroluminescent lamps fabricated by screen printing', *IARIGAI Journal of Print and Media Technology Research*, 1 (2), 97–102.
- Zovko, C. I., a Nerz, T. C. (1999), 'White polymer thick film electroluminescent lamps and their applications for backlighting liquid crystal displays in portable electronic devices', *Science*, 20, 155–9.