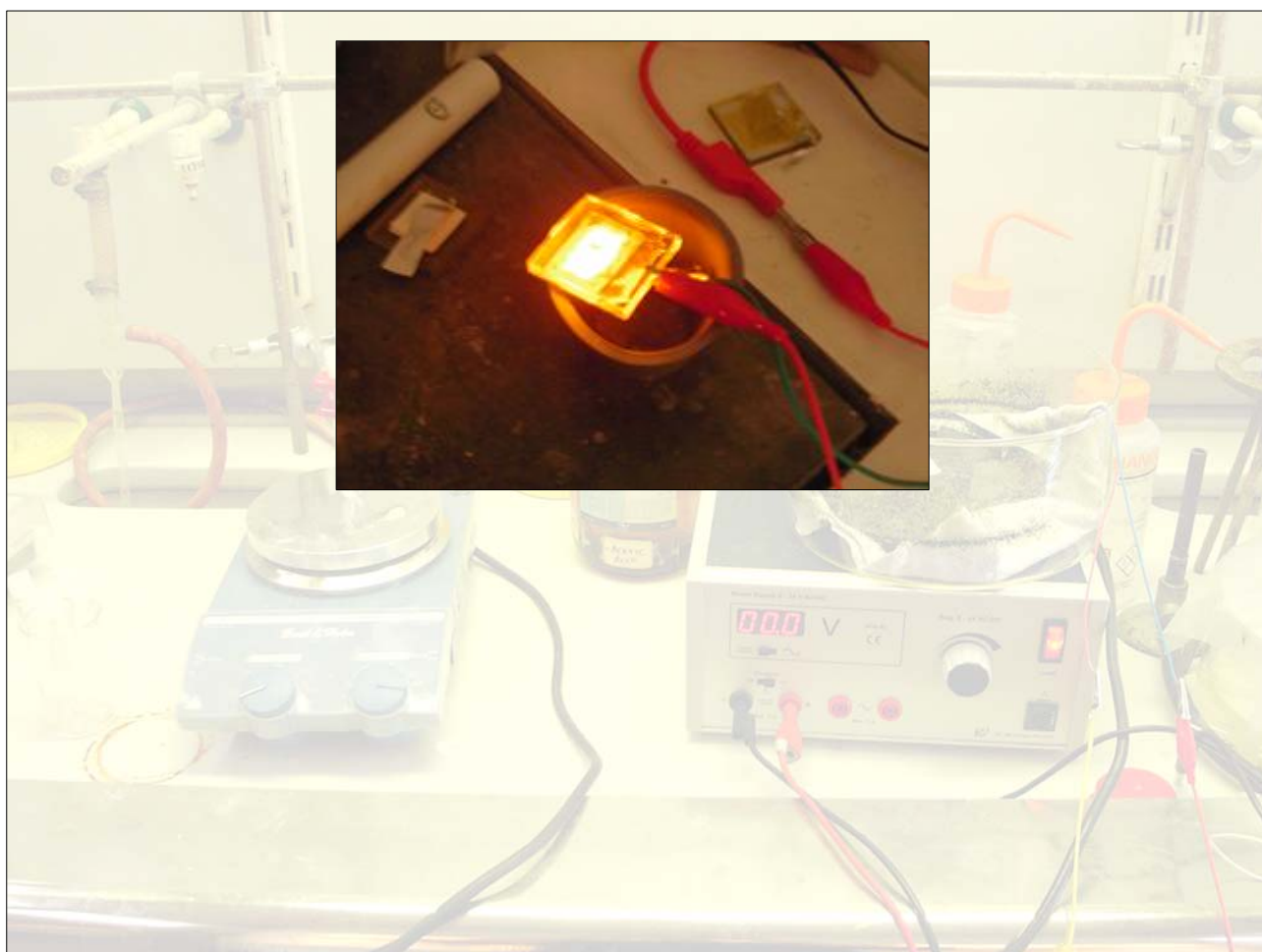


Gustav Skands
3x – Johanneskolen
20/12-2007 SRP

Stor skriftlig opgave – 3.g

Nanoteknologi – Molekylære transistorer og dioder



Lavet af: Gustav Skands

Underskrift: _____

Abstract:

During the recent years, major efforts have been spent in worldwide attempts to achieve electronic paper technology. There are many applications where electronic paper technology can be put to good use. These applications range anywhere from refreshable newspapers to large updateable billboards. It is a nice thought to think, that one day you would be able to have only one single newspaper in your house and when the next day comes, you could simply plug it into your computer and update it – it would definitely save a lot of recycling. My paper is about organic transistors and organic light emitting diodes. I review the studies done on the electrochemical switching of Pedot:PSS. For this material both the electrical conductivity and the optical absorption is controlled by the oxidation state. I'm going to use this solution of Pedot:PSS to create an organic electrochemical transistor, which in theory could easily be made completely from organic materials. These transistors operate at quite low voltages compared to a commercial transistor, which is another thing I will try to demonstrate through experiments and measuring. All of my experiments turned out well, and I'm very happy with the results. There's a great future ahead for this technology and I'm sure my paper won't be the last about the subject. I hope you enjoy reading my paper as much as I have been enjoying writing it.

Introduktion:

Jeg valgte at skrive denne opgave, fordi jeg finder nanoteknologi spændende og jeg kunne godt se mig selv have en fremtid i det. Min opgave handler om ledende polymere og hvordan man kan lave transistorer af organiske materialer. Der er meget debat for tiden om, at vores forurening her på jorden er ved at blive for stor. Det smarte set fra et økologisk synspunkt med organisk elektronik er, at det er let nedbrydeligt, dvs. at det kan brændes eller nedbrydes organisk, hvilket konventionelle elektroniske komponenter ikke kan. Desuden kan man "tune" sine molekyler til at have præcis de egenskaber man ønsker. Jeg lavede mine forsøg ude på H.C. Ørsteds ungdomslaboratorium sammen med min vejleder Marc Cedenius. Det var nogle meget lærerige tre dage, som jeg brugte derude, og det lykkedes mig i sidste ende at få alle mine planlagte forsøg til at lykkedes. Nogle enkelte initiativer som Marc og jeg kom på undervejs blev dog ikke gennemført, bl.a. fordi vi havde problemer med at finde det korrekte udstyr.

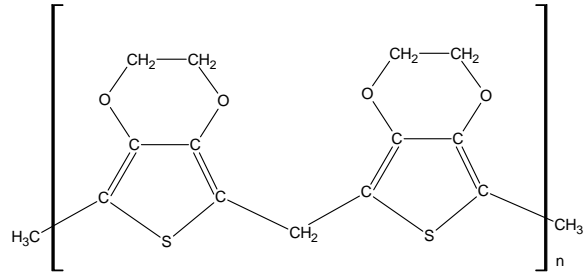
Indholdsfortegnelse

1 <u>Introduktion til organiske transistorer og dioder</u>	2
2 <u>Ledende polymere</u>	4
2.1 Pedot	4
2.2 Pedot:PSS	4
2.3 Elektrokemien	7
2.4 Elektrolytten	9
3 <u>Redoxvindue</u>	10
3.1 Fremstilling af et redoxvindue	10
3.2 Resultater	11
4 <u>Organiske Transistorer</u>	12
4.1 Transistorerne – Teori	12
4.2 NAND og NOR gates	13
4.3 Fremstillingen af en organisk transistor	14
4.4 Målinger på en organisk transistor	14
4.5 Målinger på NAND og NOR gates	17
5 <u>Organisk lysdiode</u>	18
5.1 Lysdioden	18
5.2 Ruthenium-komplekset	18
5.3 Fremstilling af lysdioden	20
5.4 Resultater med lysdioden	21
6 <u>Konklusion</u>	22
7 <u>Vurdering og perspektivering</u>	22
8 <u>Litteraturliste</u>	24
9 <u>Bilag</u>	26

2. Ledende Polymere

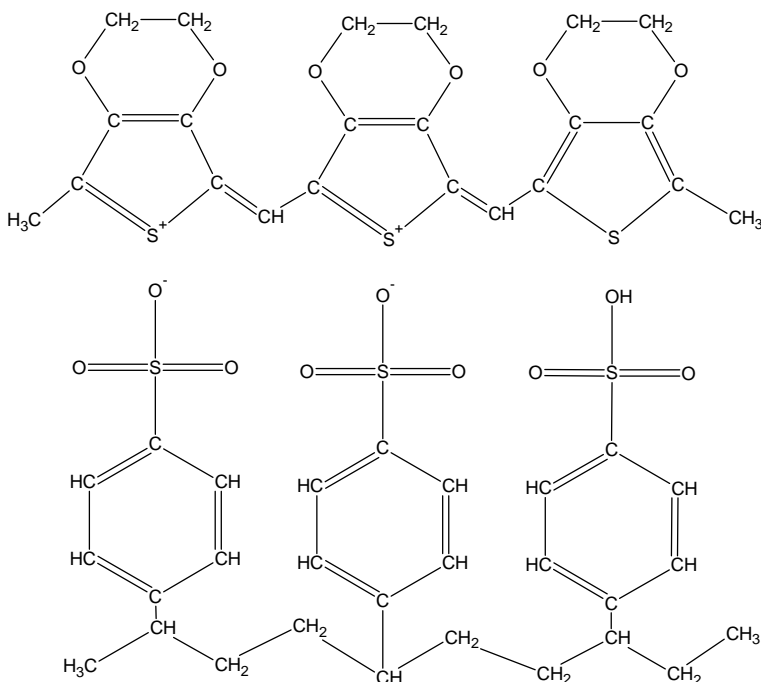
2.1 Pedot

Pedot (Poly Ethylendioxythiophen) er grundstenen i mine forsøg og min opgave. Jeg vil dog ikke komme til at arbejde direkte med Pedot, da jeg bruger en optimeret form for ledende polymer, hvor Pedot er sat sammen med PSS og kaldes for Pedot:PSS. I forhold til Pedot:PSS kan Pedot ikke opløses i vand, hvilket er en ærgerlig egenskab, da det både bliver mere besværligt at pålægge det på en plade, og laget er stort set umuligt at få af igen [1]. Denne pedot er stabiliseret af toluensulfonsyre, mens sammenlignet er Pedot:PSS stabiliseret i en polymer som ligner toluensulfonsyre.



To Pedot-monomere (2x ethylendioxythiophen)

2.2 Pedot:PSS

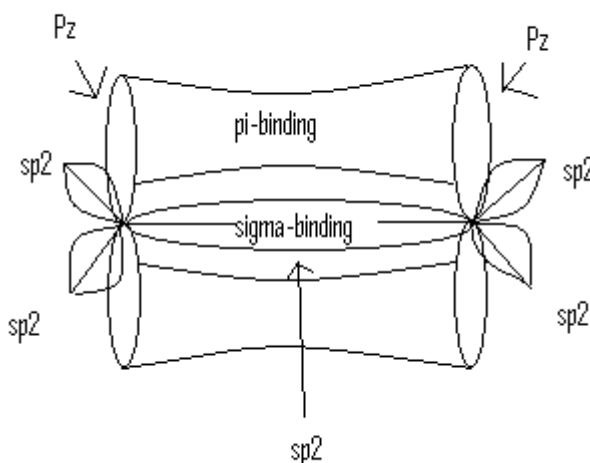


Her ses et tilfældigt udsnit af min Pedot:PSS sammensætning. Jeg kan ikke kalde dem for monomerer, da noget af Pedotten (øverst) ikke er oxideret og dette kan være tilfældigt hvor henne. Den modstående PSS monomer vil så optage et H, når S på Pedotten ikke har en positiv ladning. Det er monomer et og to i Pedot kæden som er oxideret og klar til at lede strøm.

Pedot:PSS er den opløsning, som der bruges i forsøgene, og det ledende organiske materiale som hele min opgave bygger på. Pedot:PSS, poly(3,4-ethylendioxythiophen), er en af de mest almindelige polymere, som man bruger til at lave organiske ledere, grundet at den er meget nem at fremstille og dens høje stabilitet selv under atmosfæriske forhold. Pedot er optimeret med PSS. Det er to separate kæder, der holdes sammen af plus ladningerne i de oxiderede områder af Pedot og de negative ladninger på PSS. Hvis man reducerer Pedot helt vil de kæder højst sandsynligt skvatte fra hinanden. Der er altså fortrinsvist

ionisk tiltrækning mellem de to polymerkæder, og dermed ingen direkte kovalente forbindelser. Sandsynligvis er der også en hvis mængde Van Der Waals tiltrækning mellem de to kæder, specielt i de aromatiske områder. Se figuren ovenover for en illustration. [2] Pedot:PSS kendetegnes specielt ved, at den er en halvleder, hvor redoxstadiet er afgørende for hvor meget den leder – og at det kan ses visuelt hvilket redoxstadie Pedot:PSS befinder sig i. I sin delvist oxiderede form, hvilket er den grundform Pedot:PSS altid vil ende i hvis der på nogen måde er ilt tilstede, er Pedot:PSS næsten helt gennemsigtigt med et lille blå/lilla skær. Det er muligt, at oxiderer Pedot:PSS endnu mere end grundformen, men dette er næsten usynligt for det menneskelige øje – farven vil kun blive mindre tydelig. Hvis man derimod reducerer Pedot:PSS, så vil den blive kraftig mørkeblå, med en absorbans der topes ved cirka 640 nm [3].

Det der kendetegner en ledende polymer, er den sammensatte kæde – hvori der skiftevis kommer enkelt og dobbeltbindinger efter hinanden. I sådan en polymer-kæde, vil alle carbon atomerne i kæden være sp^2 -hybridiseret – som illustreret på tegningen til højre. På hvert carbon-atom er der 1s og 3p orbitaler, 1s og 2p orbitalerne går sammen og danner 3 sp^2 -orbitaler. De tre sp^2 -hybridiserede orbital vil danne tre rotationssymmetriske bindinger (sigma-bindinger) når de binder sig med andre carbon-atomer (eller svovl hvis det er nabo-atomet i kæden), mens den resterende p_z -orbitalen danner en π -binding. P_z -orbitalerne overlapper nabo-carbonatomerne med en π -binding, mens en af sigma-bindinger binder til samme carbon atom, hvilket fører til dobbelt binding og elektronfrihed langs hovedkæden på polymeren – og en ledende egenskab. [4]



Her ses dobbelt bindingen i polymerkæden. Som man kan se, består dobbelt bindingen af en sigma- og en pi-binding. De to andre sp^2 orbitaler på hver side, binder enten til to andre carbon atomer, eller til et carbon-atom og et svovl-atom – alt afhængig hvor i polymerkæden man befinder sig. Begge bindinger er sigma-bindinger.

I en neutral tilstand vil Pedot:PSS, og andre ledende polymerer, variere fra at fungere som en isolator, til at være en halvleder. Det kan dog lade sig gøre, at få deres konduktivitet til at blive

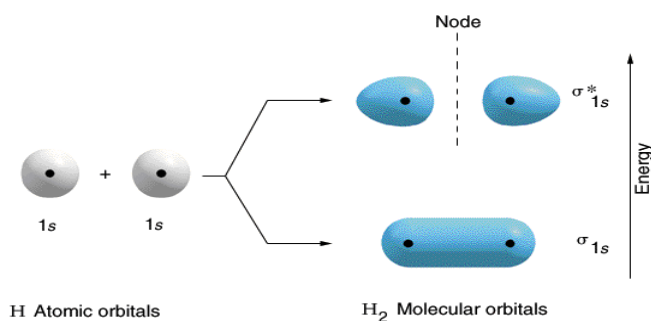
meget større, ved at man 'doper' dem. I modsætning til silicium og germanium f.eks., så er det et krav for en ledende polymer, at en stor del af kæden bliver dopet. Hvis hver monomer i kæden er en mulig kandidat til at blive dopet, så kræver det at en høj procentdel af monomererne bliver dopet for at opnå en stærkt ledende polymer. [5] For at dope disse ledende polymere, deriblandt Pedot:PSS, laver 'doperen' et ionkompleks med polymerkæden. Det er muligt, at dope polymerer på mange forskellige måder, bl.a. ved kemisk doping, elektrokemisk doping, photo-doping og charge-injection doping. Jeg vil kun beskæftige mig med elektrokemisk doping, da mit Pedot:PSS allerede er kemisk dopet, idet PSS er blevet sat på Pedot. Sammensatte polymerer kan blive dopet til to forskellige doping-tilstande – p-doped og n-doped. Når man oxiderer polymerkæden, kalder man det en p-doping. Mens når man reducerer polymerkæden, og dermed tager elektroner fra π -bindingen i hovedkæden langs polymeren (beskrevet ovenover), kaldes det en n-doping. Normalt ville man dope polythiophener med I_2 , men i tilfældet med Pedot, sker det under polymerisationen hvor det er Fe^{3+} der oxiderer, og dermed omdannes til Fe^{2+} . [6]

For at skabe den ledende egenskab, som det er vi gerne vil have fat i, må bruge noget som kan bære ladningen gennem polymeren. Disse ladningsbærere laves ved n-doping og p-doping som beskrevet ovenover. De bevæger sig langs π -bindingerne i polymerkæden. Jeg har ikke kunnet finde noget, der beskriver dette fænomen på dansk, derfor vil jeg kalde disse ladningsbærere, hvad de hedder på engelsk. Ladningsbærerne kan være enten solitoner, polaroner eller bipolaroner. Det er ikke fysiske genstande, men kvasipartikler. For kvasipartikler gælder ikke vores normale fysiske love, men derimod kvantemekanikken. Jeg vil ikke forklare præcist, hvad der sker med disse kvasipartikler, da jeg mener det ligger for langt fra mit niveau på nuværende tidspunkt. I mit tilfælde er det dog polaroner, der bruges som ladningsbærere. [7]

2.3 Elektrokemien; forklaring på en halvleder:

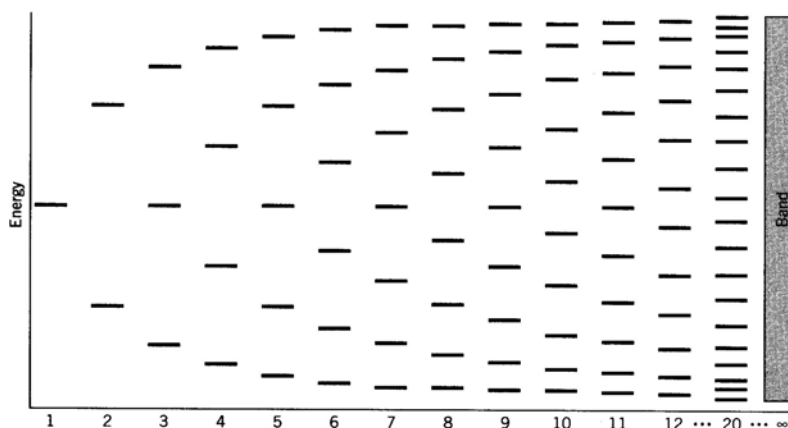
Når man sætter to atomorbitaler sammen, som man gør i f.eks. metaller, får man to nye orbitaler ud, med to nye energiniveauer, nemlig en høj og en lav – som vist på figur z1.

Figur z1:



Derefter kan man sætte tre atomorbitaler sammen, hvorefter man vil få tre nye orbitaler, en med lav, en med midt imellem og en med et højt energiniveau. Dette vil sige, at hvis man sætter uendelig mange orbitaler sammen, vil man få uendelig mange molekylorbitaler, fordelt ud i et kontinuert bånd som vist på Figur z2.

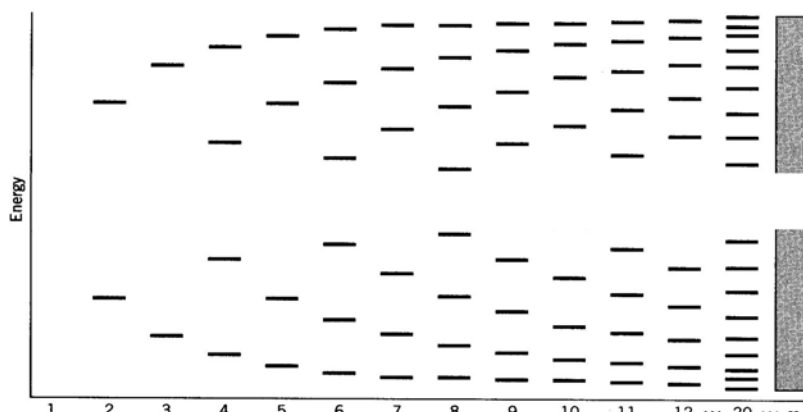
Figur z2:



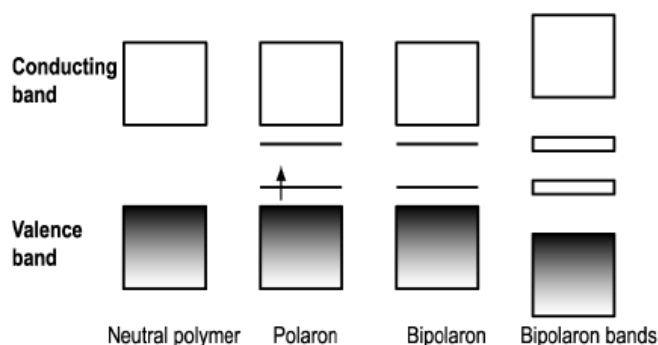
Sætter man derimod ikke ens atomer sammen, men forskellige atomer, sker det samme, udover man ikke får energibåndet i midten, fordi der sker en skævvridning af energierne når man blander forskellige atomer med forskellige energiniveauer sammen. Heraf får vi et såkaldt båndgap – figur z3 skal sammenlignes med figur z2, læg mærke til at energien i midten er forsvundet. Det er P_z orbitalerne i Pedot der overlapper hinanden. Hvis man umiddelbart ser på Pedot, er det kun carbon-

atomerne der har P_z -orbitaler, men der sidder også en P_z -orbital på S som blander sig, og dermed sker skævvridningen.

Figur z3:



Dette båndgap, er det der bruges til at definerer en halvleder, hvilket Pedot:PSS er. Hvis dette båndgap er meget stort, fungerer Pedot:PSS som en isolator, hvilket den også er i reduceret tilstand. Bliver båndgabet mindre, vil den begynde at fungerer som en halvleder. Det er denne proces, med at båndgabet bliver



mindre, der sker når vi oxiderer dele af Pedot:PSS. Båndgabet bliver så lavt, at vi får en halvleder ud af det. Det kan ses ovenover. I reduceret tilstand vil Pedot:PSS være en neutral polymer (isolator) ifølge illustrationen. Vi skaber derefter polaroner ved at oxidere til at bære strømmen, hvorefter dette båndgap får grænser, som ligger inde for rækkevidden af hvor langt elektronerne kan springe. Jo mere Pedot:PSS oxideres, jo længere til højre på illustrationen ovenover skal man kigge.

Dette vil sige, at i modsætning til normale metalliske ledere, som f.eks. kobber, så er Pedot:PSS en leder, som fungerer bedre, jo højere temperaturen bliver. Selvfølgelig kan temperaturen ikke blive ved med at stige (ligesom man kan køle en kobbertråd ned til næsten 0K, så den bliver en superleder), grundet at Pedot:PSS på et tidspunkt når en temperatur, som gør at den dekomponerer og går i stykker. Da Pedot:PSS virker bedst ved en stor termisk energi, betyder det også, at den er en 100% isolator ved 0K – da der slet ikke er nogen termisk energi tilstede.

2.4 Elektrolytten [8]:

Ideen med min elektrolyt var, at den kommer med de stabiliserende ioner til min Pedot:PSS opløsning, og dermed sørger for, at Pedot:PSS kan blive til henholdsvis en leder og en isolator. Det er dog ikke elektrolytten, som sørger for at oxiderer og reducerer Pedotten, det gør elektronerne som løber igennem Pedot:PSS.

Elektrolytten bestod af:

100 mg LiClO_4

900 mg Polyethylenglycol

2 ml Ethannitrit

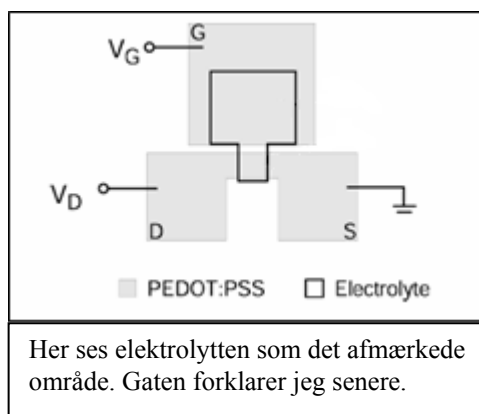
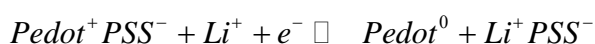
I min transistor er Pedot:PSS det ledende lag mellem 'source' og 'drain' (mere om dem senere) hvor der ligger et lag elektrolyt ovenpå.

Til følgende forklaring anbefales der, at bilag 1 ligger ved hånden. Når jeg har Pedot:PSS på oxideret form, hvilket er den form, som den altid vil søge hen mod,

hvis man kører strøm gennem transistoren, er den ledende. Derefter sættes positiv spænding på gaten, hvilket gør at ClO_4^- går mod gaten, mens Li^+ søger hen mod PSS^- for at stabilisere, da elektroner fra minus-polen nu har reduceret den oxiderede (positivt ladet) Pedot.

Når man fjerner den positive spændingen på gaten igen, vil ClO_4^- ionerne gerne hjem til deres Li^+ ioner igen. Dette kan kun lade sig gøre hvis Pedot igen oxideres til at være positiv og derved stabiliserer PSS^- . Reaktionen forløber helt af sig selv, da Pedot nu afgiver elektroner via den positive elektrode og det hele oxideres igen.

Reaktionen kan beskrives vha. følgende ligning:



Hvor reaktionen fra venstre til højre, er når den bliver reduceret og dermed ikke leder mere, mens reaktionen fra højre til venstre, er når den bliver oxideret og dermed kan lede igen.

Som en lille slut note, er man ikke helt sikker på hvad der sker på gaten som stabiliserer ClO_4^- . det kan være der dannes frie Cu^+ ioner (gaten består af kobber) eller også er der bare positive huller i metallets ledende bånd der stabiliserer minus ladningerne.

3. Redoxvindue

3.1 Fremstilling af et redoxvindue:

I det første forsøg skal jeg lave et redoxvindue, hvor jeg skal bevise visuelt at Pedot:PSS bliver oxideret og reduceret. Som beskrevet i min teori, skifter Pedot:PSS farve, når man reducerer og oxiderer den.

Først skal jeg lave min elektrolyt, dette gøres ved at opløse:

100 mg LiClO_4

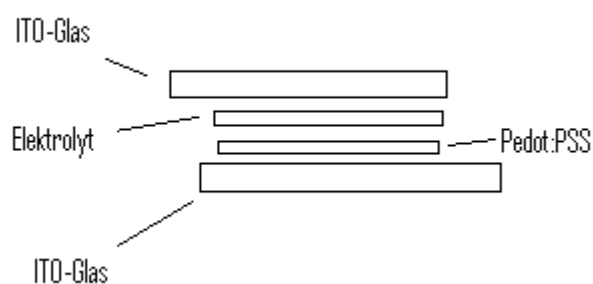
900 mg Polyethylenglucol

2 ml Ethannitril

Under opløsningen af de i alt 1g faste stoffer, tilsætter jeg først en magnet som skal bruges til omrøring, og derefter tilsætter jeg 2 ml ethannitril som fungerer som opløsningsmiddel af de to stoffer. Dette skal stå i cirka 15 minutter, hvor magneten får lov til at rører rundt i opløsningen.

Mens dette står og rører rundt, tager jeg to glasplader med en film af ITO (Indium-tin-oxid), hvor jeg lægger et fint lag Pedot:PSS på. Når det

tynde lag Pedot:PSS er lagt på med en pipette, lægger jeg det på en spincoater, hvorefter jeg sætter strøm til blæseren så den drejer rundt og laget bliver fordelt tæt på perfekt. Dog er der selvfølgelig den ulempe, at hastigheden på glaspladen med Pedot:PSS drejer hurtigere, jo længere væk fra



Her ses den skematiske opbygning af mit redoxvindue.

centrum man kommer – derved bliver laget en smule tykkere i midten. Når Pedot:PSS er lagt på, lægger jeg dem ind i et varmeskab ved 120 grader i cirka 10 minutter for at alt vandet kan dampe af, så laget bliver fast.

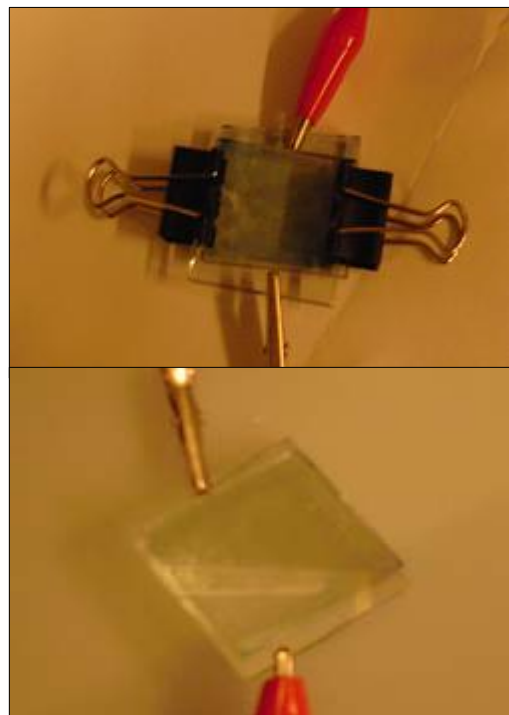
Nu er min vandige elektrolyt færdigopløst, og jeg tilsætter den på hver af de to glasplader ovenpå det inddampede Pedot:PSS, derefter spincoater jeg begge glasplader og sætter dem ind i ovnen ved 120 grader, for at dampe ethannitrillen af, så mit elektrolyt lag bliver fast.

Når de har stået inde i ovnen i cirka 10 minutter til, så laver jeg to andre gladplader med Indium-Tin-Oxid (hvilket bruges som en gennemsigtig leder) klar hvorefter jeg sætter dem sammen to og to.

Efter jeg har clipset dem sammen, kan jeg begynde mine visuelle målinger på dem.

3.2 Resultater:

Ideen med mine redoxvinduer var, at når jeg sendte strøm igennem dem ved at have minus-polen gjort fast på den ITO plade med Pedot:PSS, ville de blive reduceret, og skifte farve til mørkeblå (*se figer x1*). Derefter når jeg vendte polerne (det var jævnstrøm), så ville de blive oxideret, og dermed farveløse igen. Vi endte med at få en flot blå farve, hvilket også var forventet. Dog var reaktionstiden fra hvert farveskift helt oppe på cirka et sekund.

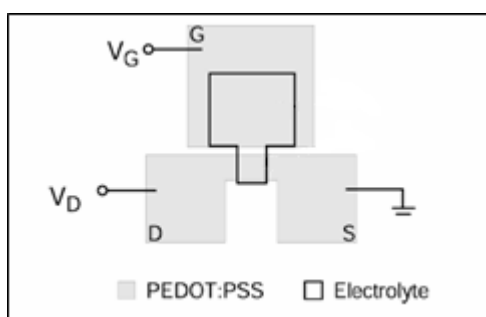


Figur x1: Redoxvinduet i henholdsvis reduceret og oxideret tilstand.

4. Organiske transistorer

4.1 Transistorene - teori:

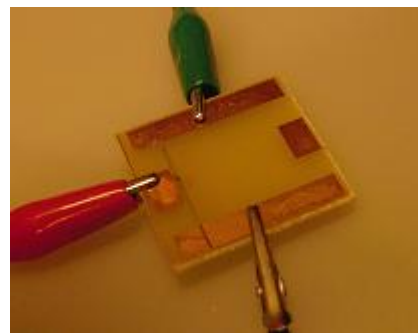
En form for transistor, som man ikke hører så meget til i dagligdagen, er de såkaldte elektrokemiske transistorer. I en elektrokemisk transistor, er det både elektroner og ioner som bruges som ladningsbærere. Man modulerer strømstyrken mellem 'drain' og 'source' ved at oxidere og reducerer polymeren som ligger i kredsløbet – i mit tilfælde er polymeren Pedot:PSS. En konsekvens ved at bruge denne form for elektrokemiske transistorer, er at der ikke kræves nogle ultra-små eller kritiske størrelser. [9]



Figur y1: G er gate, D er drain og S er source.

Mine gates, og dermed transistorer, er opbygget ved, at man har en gate-, source- og drain-flade. Jeg pålagde Pedot:PSS mellem drain og source med en rørpen. På noget af denne strækning af

Pedot:PSS, pålægger jeg elektrolytten, som også har forbindelse med gate elektroden.



Figur y2: Min rigtige transistor opbygning.

Nu kan jeg ved at sætte spænding på gaten, styre hvor meget strøm der løber mellem drain og source, fordi elektrolytten hjælper til med at oxidere og reducere Pedot:PSS strækningen (se afsnit 2.4). Til venstre ses opbygning tegnet, og til højre ses opbygning som jeg lavede den. Det er en smule svært at se, men kobber stykket i midten er gaten, og der ligger en gennemsigtig masse som er elektrolytten. Den tynde blå streg er Pedot:PSS, som jeg har tegnet på med en fyldepen. Det er meget vigtigt, at gaten og polymeren ikke rører ved hinanden, ellers kortslutter systemet.

Pedot:PSS er, som beskrevet før, ledende når den er oxideret. Derfor vil det sige, at når der ikke er positiv spænding på gaten i min transistor, vil det kun være Pedot:PSS der begrænser hvor meget strøm der kan løbe igennem. De fleste transistorer vil normalt virke ved, at den forstærker et signal. Min organiske transistor svækker til gengæld signalet, så snart man sætter spænding på gaten. Idet man sætter spænding på gaten, bliver Pedot:PSS reduceret, hvorefter der så skabes en lille strækning i strengen som ikke er ledende, og det bryder kredsløbet. Det kan sammenlignes med en

stikkontakt, som man tænder og slukker – plus at det er muligt, at reducerer mængden af strøm gradvist, man kan sige, at transistoren har en negativ forstærkning - det hele foregår bare elektrokemisk.

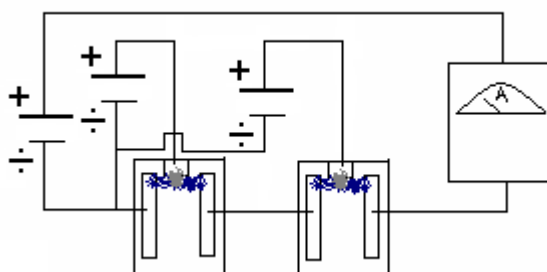
4.2 NAND og NOR gates:

Jeg skal fremstille to forskellige gates, en NAND og en NOR gate. En gate bestemmer om der kan løbe en strøm gennem en ledning f.eks. Der er forskellige typer af gates, hvor de hver har en bestemt kombination af inputs, der skal til, for at man får et output eller intet output.

NAND:

Ga	Gb	OUT
1	1	0
0	1	0
1	0	0
0	0	1

En NAND gate, skal have slukket for begge signaler gate signaler, for at den giver et output. Dette kan illustreres med et skema, som ses højre for.



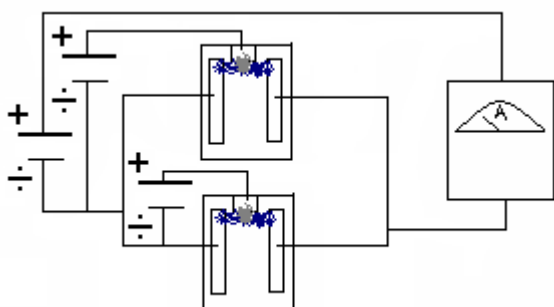
Figur y3: En NAND gate. Det blå er Pedot:PSS mens det grå er elektrolyt. Fælles minus-pol.

I mit tilfælde, vil det sige, at hvis der er høj spænding på begge gates, løber der ikke strøm

igennem. Hvis der henholdsvis høj og lav, så er der også lukket for strømmen, kun hvis begge gates er lave, vil der løbe strøm. Dette illustreres bedst med en tegning, der ses ovenfor. Som man kan se på tegningen, er de to transistorer koblet sammen i en serie. Derfor er det meget logisk, at hvis der bare er lukket for et af dem, kan der ikke komme strøm igennem. Derudover vil jeg lave nogle målinger, med de forskellige inputs kontra outputs.

NOR:

En NOR gate, er modsat en NAND gate, som er sat op som en serie forbindelse, sat op som en parallelforbindelse



– se figureren til højre. Dette betyder så, at der kan løbe strøm igennem, hvis bare der er åbnet for en af portene (se skemaet til højre). Den fungerer vha. samme princip som

Ga	Gb	OUT
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

NAND gaten og transistor-teorien. Hvis jeg sætter spænding på gaten, vil der blive lukket for strømmen, men holdes bare en af gatene åben, løber der masser af strøm igennem. Lukkes de begge to, kommer der heller ingen strøm igennem, hvilket er logik, men alligevel laver jeg en tabel ved mit forsøg med disse gates – se afsnit 4.5.

4.3 Fremstillingen

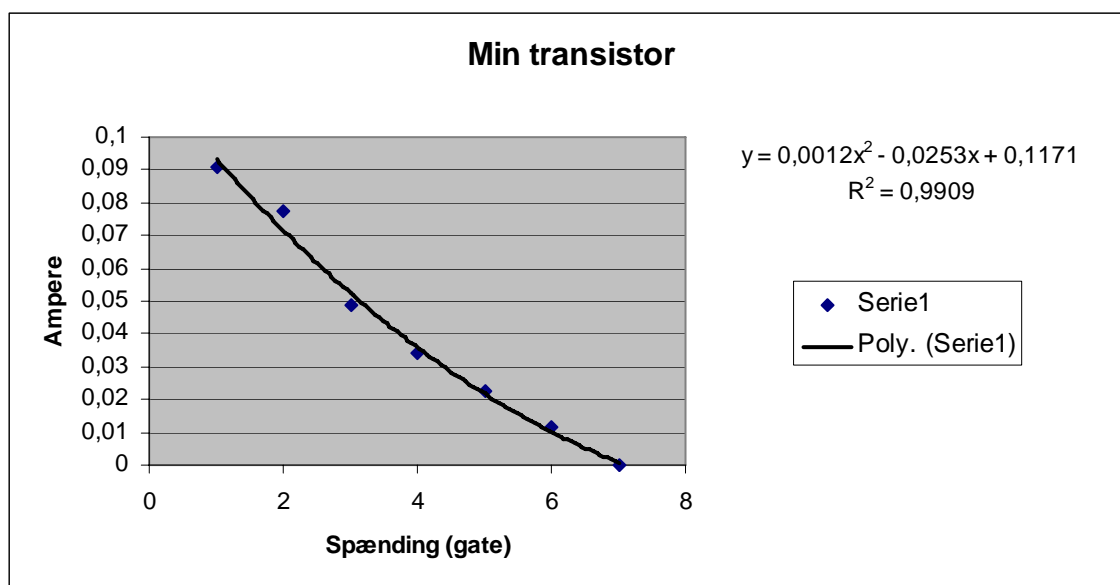
For at lave disse gates, skal jeg fremstille nogle transistorer. Transistorerne fremstillede jeg ved, at min vejleder allerede havde skaffet nogle printplader med det korrekte print på. Der hvor jeg ville have strømmen til at løbe til og fra, skulle jeg tegne en tynd linje med en tusch, hvori jeg brugte Pedot:PSS som blæk. Dette skulle gøres nogle gange, indtil jeg kunne trække en strøm lydende på mindst 100 mA og 5V – gerne flere ampere. Oprindeligt var det meningen, at jeg ville have drevet min lysdiode (se afnist 5), med disse gates, det kunne dog desværre ikke lade sig gøre – fordi lysdioden endte med at brænde af, da jeg testede den ved høj spænding. For hver gang, jeg lavede en streg med Pedot:PSS blækket, skulle jeg varme mine printplader i ovnen, for at det kunne størkne. Efter jeg succesfuldt havde lavet stregerne med de korrekte egenskaber, brugte jeg den samme polymer-elektrolyt, som jeg også anvendte i forsøget med redoxvinduet. Jeg brugte polymer-elektrolytten til at lave en lille klat, som forbandt Pedot:PSS strengen, og et stykke print, hvor jeg kunne monterer en strømkilde, der bestemte om Pedot:PSS var reduceret eller oxideret – og dermed om der kunne gå strøm igennem eller ej. *Se figuer y2 over opstillingen.*

4.4 Målinger på transistoren:

Spænding (kredsløb) V	Spænding (gate) V	Ampere
3,0	0,0	0,0909
3,0	1,0	0,0909
3,0	1,5	0,0909
3,0	2,0	0,0775
3,0	2,5	0,0489
3,0	2,8	0,0339
3,0	3,1	0,0228
3,0	3,4	0,0118
3,0	4,0	0,0000

I hele opstillingen kørte jeg med fælles minus-pol, for at kunne reducere gaten korrekt. Som man kan se, kørte jeg med fast spænding på hele kredsløbet – men varierede spændingen på gaten. Derfor havde jeg naturligvis to strømforsyninger. Når man ikke havde spænding på gaten, var der så meget gennemløb, som min Pedot:PSS elektrode kunne trække. Det var først oppe omkring 2,0V på gaten, at ampererne begyndte at falde. Dette skyldes, at man først skal over redox-potentialet i Pedot:PSS'en. Derefter faldt ampererne, næsten lineært med hvor meget spænding jeg satte på gaten. Jeg kunne godt have lavet en måling ved 3,7V, men jeg turde ikke, i frygt for at over-reducere min Pedot:PSS, så den ikke virkede.

Jeg lavede derefter en graf over disse måleresultater, jeg kan umuligt vide om grafen skulle se ud som den gjorde, men jeg har lavet den, med den bedst passende R-konstant.

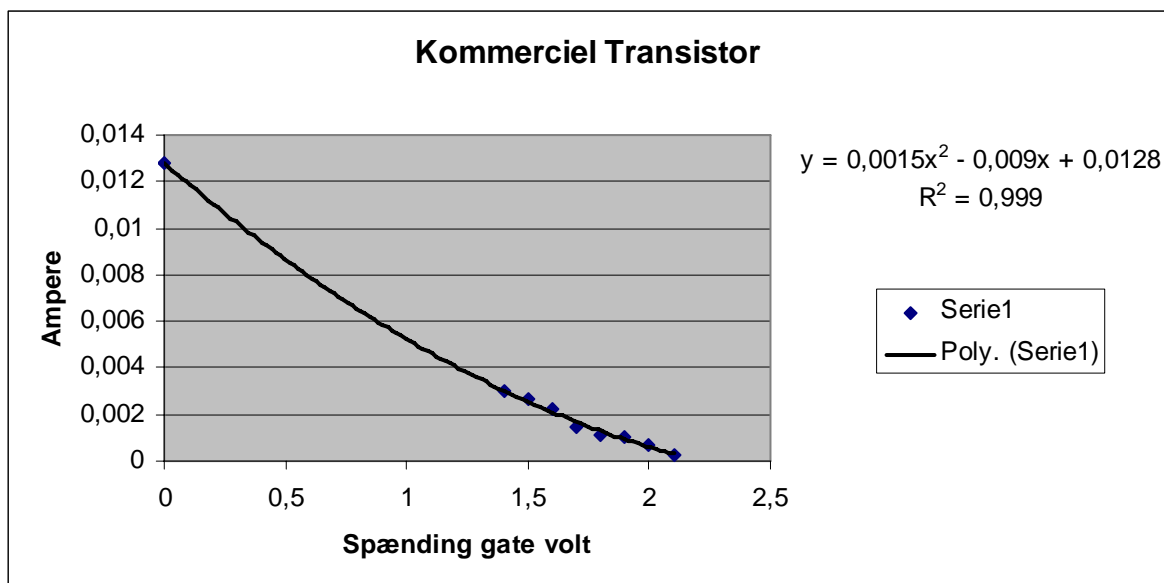


Som man kan se på grafen, aftager ampererne næsten lineært med hvor stor en spænding jeg sætter på gaten. Dog skal der lidt mere spænding til sidst, for at slukke helt for transistoren. Som jeg nævnte, har jeg ikke nogen ide om, hvordan sådan en graf skulle se ud – derfor sammenlignede jeg med en kommerciel transistor, som var bygget op på præcis samme måde, bare ikke organisk. Det gav følgende resultater:

Spænding (kredsløb)	Spænding (gate)	Ampere
6,8	0	0,0128
6,8	1,4	0,0030
6,8	1,5	0,0027
6,8	1,6	0,0022
6,8	1,7	0,0015
6,8	1,8	0,0011
6,8	1,9	0,0010
6,8	2	0,0007
6,8	2,1	0,0003

Denne transistor virkede ved over 1,4V, og da spændingen oversteg de 1,4V skete der en stor negativ forstærkning.

Ud fra disse målinger, lavede jeg en graf, som kunne sammenlignes med grafen for min transistor.



Som man kan se ud fra grafen for den kommercielle transistor, så ligner de to grafer meget hinanden. Ligningerne er også minimalt forskellige. Det er dog værd at lægge mærke til, hvor lidt spænding der kræves i denne transistor, for at reducere strømstyrken og dermed lukke for kredsløbet. Jeg tror, hvis jeg gjorde min transistor lidt mindre, ville jeg kunne komme ned i noget der minder om denne kommercielle transistor. Dette har jeg dog ikke forsøgt, da det ville blive

noget rod at arbejde med. Transistoren brugt her, er en P-junction felteffekt transistor. P betyder, at den er p-dopet, ligesom det anvendte Pedot i den organiske transistor. Felt effekt princippet er næsten det samme, som den organiske transistor jeg brugte, bortset fra at der ikke er nogen elektrolyt, men at det elektriske felt fra gaten samler og eller spreder polaronerne, hvilket resulterer i en lokal dårligere eller bedre ledning fra source til drain. [10]

4.5 Målinger på NAND og NOR gates:

Der var ikke meget at måle på mine NAND og NOR gates, jeg skulle dog undersøge om teorien holdt stik.

NAND gate:

Input A	Input B	Output
0V	0V	0,121mA
4,0V	0V	0 mA
0V	4,0V	0 mA
4,0V	4,0V	0 mA

NOR gate:

Input A	Input B	Output
0V	0V	0,124mA
4,0V	0V	0,119mA
0V	4,0V	0,114mA
4,0V	4,0V	0 mA

Heraf kan man tydeligt konkludere og se hvordan gatene virker. Grunden til mit strømstyrke output varierer lidt, er fordi det tog en rum tid før gaten var fuldstændig indstillet til den spænding man havde sat til den. Derudover bestød dog også en lille smule, hvilket transistor man brugte, da de ikke havde ens modstand alle sammen – det afhang af hvordan min Pedot:PSS streg var osv.

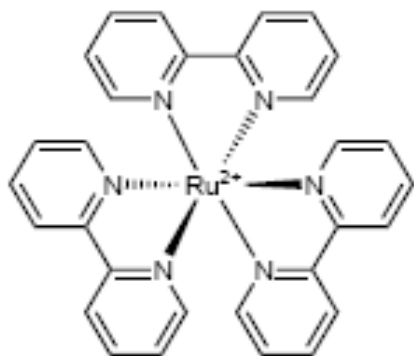
5. Organisk lysdiode

5.1 Lysdioden:

En Lysdiode, er en lysafgiver, som kun virker hvis strømmen sendes den ene vej. Typen jeg har konstrueret, er en halvleder diode, som der netop fungerer ved hjælp af en katode og en anode. Min lysdiode, som jeg har bygget, består af flere forskellige segmenter. Den består af en glasplade belagt med Indium-Tin-Oxid, som kunne fungerer som en hole injector (en hole injector, er det lag som leder hullerne til ruthenium-laget), et lag med Pedot:PSS, som er den aktive hole injector i denne opbygning, et lag med ruthenium-kompleks (lysudsender) og en elektron-injektor (gallium indium metal). I teorien kunne ITO-glaspladen sagtens bruges, uden at der blev lagt et lag med Pedot:PSS ovenpå, da den i sig selv er en hole injector, men jeg vælger at bruge Pedot:PSS som en holeinjector til ruthenium-komplekset, hvilket forøger effektiviteten. Elektron-injektoren som jeg anvender, består af en 75.5/24.5% galium-indium opløsning. Det er en flydende legering over 288K, og dermed meget nemt at dyppe på pladen.

5.2 Ruthenium-komplekset:

Ruthenium er ionen i det kompleks, som jeg anvender til at udsender fotoner og dermed lys, når jeg



laver min lysdiode. Som det kan ses på tegningen

nedenunder, er det et oktaederkompleks, da den udviser

symmetri langs y-, x- og z-aksen. Derudover prøvede jeg, at

bygge en model af komplekset ud fra plastik kugler og

stænger, hvoraf jeg opdagede, at komplekset også udviste

spejlbillede-optiskisomeri – det var umuligt at spejle

komplekset. Man kan tydelig se, at komplekset består af en

Ruthenium-ion i midten, hvor den så er omgivet af tre

bipyridyl grupper, som igen fungerer som bidentate ligandere, da de hver er i stand til at binde to

steder. Det er værd at lægge mærke til, at ruthenium-ionen ikke danner ion- eller

kovalentebindinger. I stedet for dannes der coordinative-kovalentebindinger, hvor den ene part

(bipyridyl-gruppen) kommer med begge elektroner i form af et lonenpar på N, mens ruthenium kun

kommer med tomme d-orbitaler.

Når der passerer strøm gennem min Pedot:PSS på lyspladen, oxideres ruthenium (II) ionerne til Ru^{3+} ved anoden og reduceres til Ru^{1+} ved katoden. Elektronerne bliver ledt mod anoden, ved at 'hoppe' fra en ruthenium-ion til en anden. Mens elektronerne hopper fra ion til ion, bliver Ru^{3+} og Ru^{1+} trukket mod centrum af laget, hvor de så møder og danner en normal Ru^{2+} ion, og en Ru^{2+} ion med et højere energiniveau – dette energiniveau kommer Ru^{2+*} ionen så af med, ved at udsende en

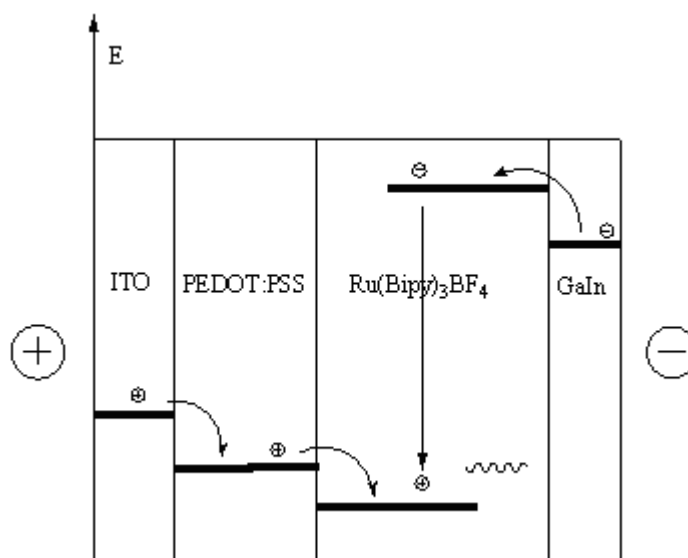
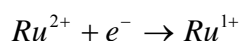


Fig. d1: Energien sænkes ved ITO og ved pedot, mens energien er høj ved GaIn elektroden. Der er et stort energi gab elektronerne falder igennem under redox processen af ruthenium komplekset

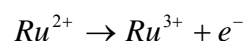
foton og dermed lys. Det ville ikke være muligt, at vende strømmen og stadig for lysdioden til at lyse. Dette skyldes at elektronerne altid vil gå mod et højere energiniveau (mod 0 i vores tilfælde), og hullerne altid vil bevæge sig ned i energiniveau. Som man kan se på figur d1, er min lysdiode designet til at, på den ene side ved ITO/Pedot går vi ned i energi og den anden ved Ga/In op i energi, og derfor kan der kun ledes den ene vej – hvilket også klassificerer den som en lysdiode. [11] Ovenfor på figur d1 ses et diagram, hvordan processen forløber.

Reaktionerne kan beskrives således.

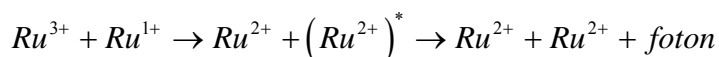
Reduktion ved katoden:



Reaktionen ved anoden:



Lysudsendelsen:



For at denne reaktion kan blive ved med at forløbe, bliver man nødt til at skabe et flow af elektroner. Som beskrevet i min øvelsesvejledning, er laget med ruthenium-komplekset helt tørt, derfor sidder ruthenium-ionerne fysisk fast. Elektronerne vil altid blive dannet ved anoden, der hvor

min elektron-injektor ligger, derefter bevæger de sig som sagt ind mod midten og mod anoden. Når der er blevet dannet en Ru^+ -ion ved katoden, vil elektronen hoppe mod anoden ved at springe fra ion til ion. Grundet denne elektronbevægelse, bliver Ru^+ ionen som elektronen blev dannet udfra, til en Ru^{2+} -ion igen – mens den næste ion på vejen til anoden bliver til en Ru^+ -ion. Mens sker det modsatte i enden ved anoden, der bliver afgivet en elektron, hvorefter Ru^{3+} kommer nærmere centrum af filmen (uden at ionerne rykker sig fysik) – hvor den så til sidst mødes med en Ru^+ -ion og danner fotonen. [12]

Når elektronerne bevæger sig mod anoden, må der være mod-ioner som bevæger sig i den modsatte retning, for at bringe balance i laget. I min film, bruger jeg BF_4^- (tetraflouorborat) som mod-ion, fordi de er en smule mere mobile i min Pedot:PSS, og dermed bliver responstiden på lysdioden kortere. Sammen med redox potentialet for ruthenium-komplekset, samt potentialerne for hole- og elektroninjektoren, er mod-ionerne den begrænsende faktor, som gør, at det tager cirka ét sekund, for lysdioden at nå op på fuld lysstyrke, hvis man tænder for den med f.eks. 3,5V. [13].

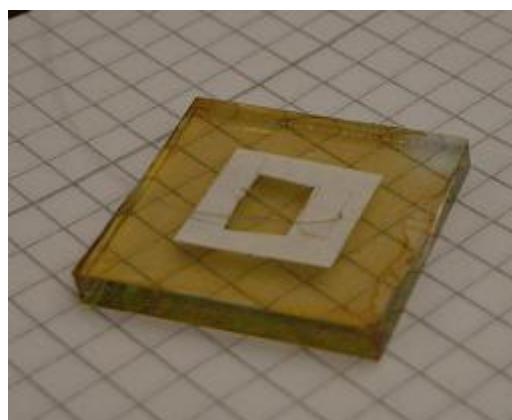
5.3 Fremstilling af lysdioden:

Først tager jeg tre glasplader med ITO film, hvor jeg lægger et lag af Pedot:PSS ovenpå og spincoater det, derefter sætter jeg glaspladerne i ovnen ved 120 °C og lader dem stå der i 10 – 15 minutter.

Når mine glasplader har stået inde i ovnen længe nok, tager jeg dem ud, og påfører tre lag Ruthenium-tris(2,2'-bipyridyl)tetraflouorborat.

Ruthenium-tris(2,2'-bipyridyl)tetraflouorborat er opløst i vand, som indeholder polyvinylalkohol (PVA), PVA holder rutheniumsaltet fast som en matrice [14]. Efter hvert lag er påført, skal de ind i ovnen ved 120 °C og stå, dette er for at fordampe i hvert lag, så lagene bliver faste.

Nu er de tre glasplader færdige, og der er påført tre lag Ruthenium-tris(2,2'-bipyridyl)tetraflouorborat på hver. Derefter skraber jeg et hjørne fri på hver af de tre plader, så jeg kan komme ned til laget med Pedot:PSS/ITO'en. Dette hjørne skal fungerer som en af



Figur d2: Min lysdiode klar til Indium-Galium. Bemærk det skrabede øverste højre hjørne og den tynde tintråd.

polerne. Den anden pol laver jeg, ved at skære et hul ud i et papir, og sætte en kobbertråd fast *se figur d2*. Derefter belægges jeg denne udskæring med indium-galium som er en flydende form for metal ved stuetemperatur.

For at tænde lysdioden, sættes den positive pol fast i det afskrabede hjørne, på ITO fladen (holeinjector siden), mens den negative pol sættes fast i kobbertråden (som har forbindelse med galium-indium metallet, elektron injektoren). Dette skaber et flow af elektroner, som får Ruthenium-komplekset til at lyse, der hvor jeg har lagt Indium-Galium på. Det skal selvfølgelig noteres, at lysdioden lyser på undersiden.

5.4 Resultater:



En fungerende lysdiode. Rummet var helt mørk, så den lyste meget!

Før jeg fik min lysdiode til at virke, lavede jeg omkring otte prototyper. Jeg kunne ikke få det afmærkede område til at lyse, men hvis derimod bare satte min krokodillenæb-katode et hvilket som helst andet sted på pladen, hvor der også lå et lag Ruthenium, kom der en fin lille lysprik. Det endte så med, at jeg foreslog, at vi

skulle prøve at lave en ny Indium-Galium opløsning, hvilket også viste sig at være løsningen. Mit bud på hvorfor den gamle

Indium-Galium opløsning ikke virkede, er at opløsningen sandsynligvis har krystalliseret sig på en eller anden måde. Dette har så ført til, at når jeg dypper den på min plade (Figur d2), har krystallerne revet hul i Ruthenium laget, fordi laget netop er så tyndt. Dette fører så til en kortslutning, da der kommer et direkte gennembrud ved hullet i Ruthenium laget. Da det endelig lykkedes, at få lysdioden til at virke, endte lysdioden også med at lyse særdeles kraftigt. Jeg fik bl.a. den ide, at vi kunne måle hvor meget den egentlig lyste, mens min vejleder supplerede med at vi kunne måle effektiviteten af den. Desværre endte det med, at vi ikke kunne få måleapparatet til at fungere korrekt, så derfor måtte jeg undlade denne undersøgelse.

Jeg ville ellers have målt dens lysstyrke, og så sammenlignet den med nogle officielle tal for f.eks. en normal plasma-skærm man har i dag. Jeg er ret sikker på, at mine tal mht. lysstyrken ville have ligget meget tæt på hvad en plasmaskærm kan præsterer, men effektiviteten af min lysdiode (dvs. hvor mange elektroner jeg skød ind i systemet, i forhold til hvor mange fotoner jeg fik ud) ville sandsynligvis være tæt på 1% - jeg brugte meget energi for, at sådan et lille areal kunne lyse. For en

sikkerhedsskyld vente jeg også polerne om, for at bevise det var en lysdiode. Ikke overraskende lyste den ikke når der blev sat strøm til.

6. Konklusion:

Mange af forsøgene blev jeg nødt til at lave to gange, det lykkedes mig dog til sidst, at få dem alle sammen til at virke. Jeg synes specielt det er ærgerligt, at jeg ikke fik mulighed for at måle lysstyrken på min lysdiode, da dette kunne have været noget spændende fysik at have haft med i sin opgave. Jeg kunne godt tænke mig, også at få eftermålt effektiviteten, da min vejleder Marc Cedenius mente, at lysdioden jeg fik fremstillet til sidst var særdeles kraftig i forhold til, hvad han havde fremstillet før i tiden. Den normale effektivitet som min kilde bl.a. opnåede lå mellem 0,8% og 1,4%. [15] Jeg er meget tilfreds, med hvor flot jeg har fået det hele til at passe sammen, og jeg vil synes bestemt min tid ude på HC Ørstedes ungdomslaboratorium har været godt givet ud.

7. Vurdering og perspektivering:

Som skrevet i mine kommentarer var mine forsøg særdeles vellykkede. Det smarte ved denne teknologi er, at den er uhyggelig nem at arbejde med. I mit forsøg med transistorerne tegnede jeg som sagt Pedot:PSS på med en fyldepen. Jeg ved, at det også er muligt at hælde Pedot:PSS i en printerpatron, da Pedot:PSS på opløst form har cirka samme konsistens som normalt printerblæk, og så dermed kunne være i stand til at printe meget nøjagtige mønstre – kun ved hjælp af en normal printer! Man kunne få ledende papir, som igen ville være byggestenen til en elektronisk avis på bøjeligt plastik. Lysdioden var bygget op med to glasplader og den lyste ud af bunden. Hvis man vendte opstilling om, og lavede en meget tynd elektroninjektor på plastikken, og derefter kun lagde Pedot:PSS ovenpå Ruthenium-komplekset, rullede det hele ind i en isolerende film, så ville man have en organisk lysdiode på et stykke papir. Derefter ville det gælde om, at finde andre komplekser, som ville udsende lys med andre bølgelængder. Selvfølgelig skulle hele opbygningen også effektiviseres først, så man ikke behøvede at gå rundt med et bilbatteri på ryggen, men jeg tror bestemt der ville være fremtid i sådan noget. Derudover er materialerne rent organiske, og siden man har så meget debat om miljø osv., ville det være genialt med denne form for elektronik, da man ville kunne brænde det normalt bagefter. Meget af den elektronik som bliver smidt ud i dag, kræver nemlig en særdeles besværlig nedbrydningproces.

Sammenligner man den transistor jeg lavede med den kommercielle transistor, vil man kunne se, at min transistor er i stand til at opererer ved meget lavere spænding (og dermed spare strøm hvis den effektiviseres mht. strømstyrken). Derudover er min transistor bedre til at modulerer signalet gradvist, den har ikke et stort hul, ligesom der ses i grafen for den kommercielle transistor. Igen er det vigtigt at nævne, at min transistor vil kunne laves udelukkende på organiske materialer. Dette er en stor bonus med det rama-skrig der er omkring miljøet i øjeblikket, da man ville kunne få stor støtte til at videreudvikle på sådanne transistorer.

Alle disse kredsløb jeg har fremstillet, kan selvfølgelig skaleres ned i nano-skala. Jeg var kun nede i nano-skala, idet mine påførte lag af diverse opløsninger blev 50-100 nm tykke. Transistoren og OLED displayet var opskaleret, for at det var nemmere at arbejde med. Hvis man skalerede størrelserne ned i nano-skala, så ville det være muligt, men den transistor jeg har bygget, at lave en hel computer. Min transistor, som i sig selv er en NAND gate, kan bruges til, at bygge alle de forskellige typer af transistorer der findes. Dermed er det muligt, at bygge en computer i af organiske materialer, som tilmed fungerede bedre jo varmere den blev.

Jeg vurderer til slut, at der er stor fremtid i denne teknologi. Den er miljøvenlig, den har egenskaber man ikke har set før og den er meget nem og billig at anvende. Det ville ikke undre mig, hvis man om ti eller tyve år havde elektroniske aviser bygget op, på netop det princip min opgave har handlet om.

8. Litteraturliste

Kilde [1]: **Reference: Marc Cedenius**

Marc Cedenius var min vejleder ude på HCØ Ungdomslaboratorium. Han er uddannet Cand.scient i kemi, og snart også Ba.sc i Biologi og har arbejdet med dette emne i et par år.

Kilde [2]: **Reference: Marc Cedenius**

Kilde [3]: **Reference: Linköping Studies in Science and Technology. Licentiate Thesis No. 1237. Electrochromic Polymer Devices: Active-Matrix Displays and Switchable Polarizers af Peter Andersson (2006) – side 19**

Peter Andersson har skrevet denne formulering af hvordan Pedot:PSS bruges I Active-Matrix Displays og et andet emne. Han kommer fra Linköpings universitet i Sverige og jeg anser hans udgivelse for at være en meget pålidelig kilde. Kilden var på engelsk.

Kilde [4]: **Reference: Linköping Studies in Science and Technology. Dissertation No. 921. An Organic Electrochemical Transistor for Printed Sensors and Logic by David Nilsson (2005) – side 5**

Igen er det en svensker som har skrevet en opgave om mit emne. Denne udgivelse handler om de organiske transistorer, dog ikke kun den jeg har arbejdet med, men også andre former. Kilden anser jeg igen for at være yderst pålidelig. Kilden var på engelsk.

Kilde [5]: **Reference: Linköping Studies in Science and Technology. Dissertation No. 921. An Organic Electrochemical Transistor for Printed Sensors and Logic by David Nilsson (2005) – side 6**

Kilde [6]: **Reference: Marc Cedenius**

Kilde [7]: **Reference: Marc Cedenius**

Kilde [8]: **Reference: Marc Cedenius**

Hele emnet om elektrolytten fik jeg forklaret af Marc Cedenius, da hverken opgaven lavet af David Nilsson eller Peter Andersson omtalte hvilken elektrolyt de brugte. Det var et emne, hvor der stort set ikke fandtes noget om det på nettet.

Kilde [9]: **Reference: Linköping Studies in Science and Technology. Dissertation No. 921. An Organic Electrochemical Transistor for Printed Sensors and Logic by David Nilsson (2005) – side 22**

Kilde [10]: **Reference: Marc Cedenius**

Kilde [11]: **Reference: Marc Cedenius**

Kilde [12]: Reference: Learning About Materials Science by Making Organic Light-Emitting Electrochemical Thin Film Devices – H. Sevian, S. Muller, H. Rudmann, M. F. Ruber (2004)

Denne udgivelse er lavet af H. Sevian *et al.* og omhandler fremstillingen og teorien bag en organisk lysdiode. Den er lavet til lærere, om hvordan de underviser deres elever. Kilden er meget pålidelig, da den er skrevet om officielt undervisningsmateriale. Kilden er på engelsk.

Kilde [13]: Reference: Using Organic Light-Emitting Electrochemical Thin-Film Devices To Teach Materials Science - H. Sevian, S. Muller, H. Rudmann, M. F. Ruber (2004)

Dette er næsten den samme udgivelse som i kilde 10, dog er den omformuleret en del og går en del mere i dybden. Kilden er meget pålidelig, da den er skrevet om officielt undervisningsmateriale.

Kilden er på engelsk.

Kilde [14]: Reference: Marc Cedenius

Kilde [15]: Reference: Using Organic Light-Emitting Electrochemical Thin-Film Devices To Teach Materials Science - H. Sevian, S. Muller, H. Rudmann, M. F. Ruber (2004)

9. Bilag

1. Bilag

Fig. 1

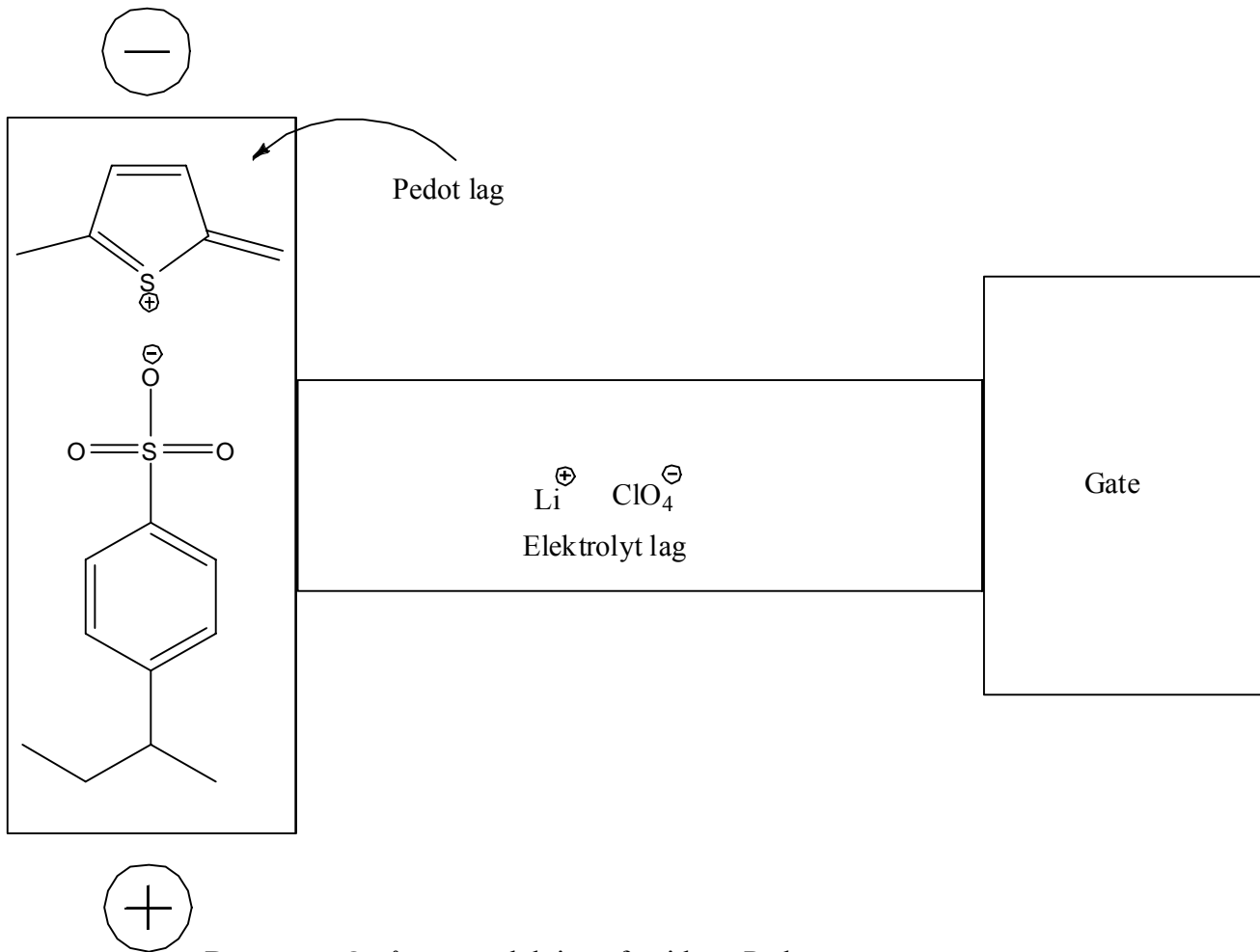


Fig. 2

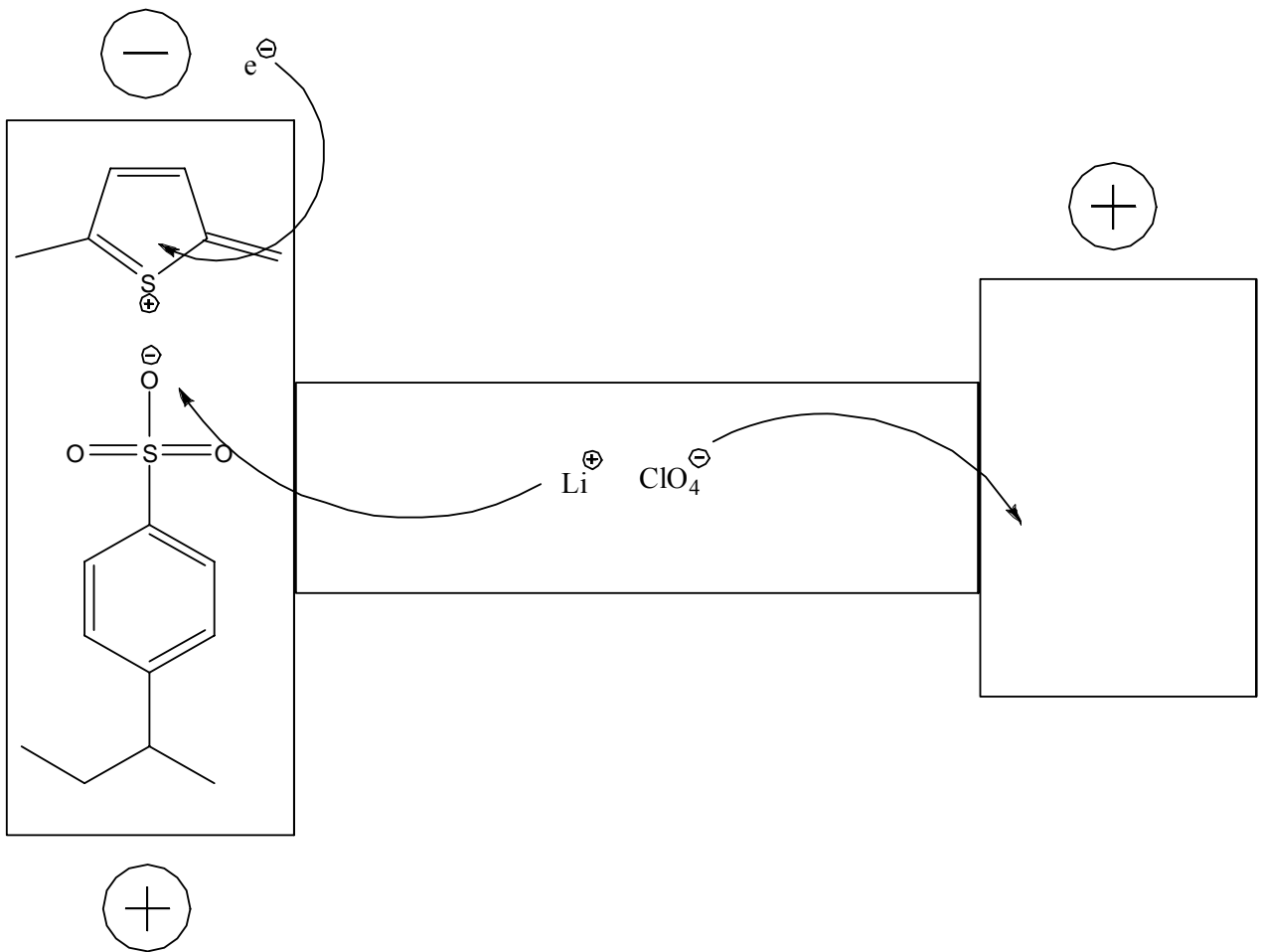


Fig 2. → Fig. 3

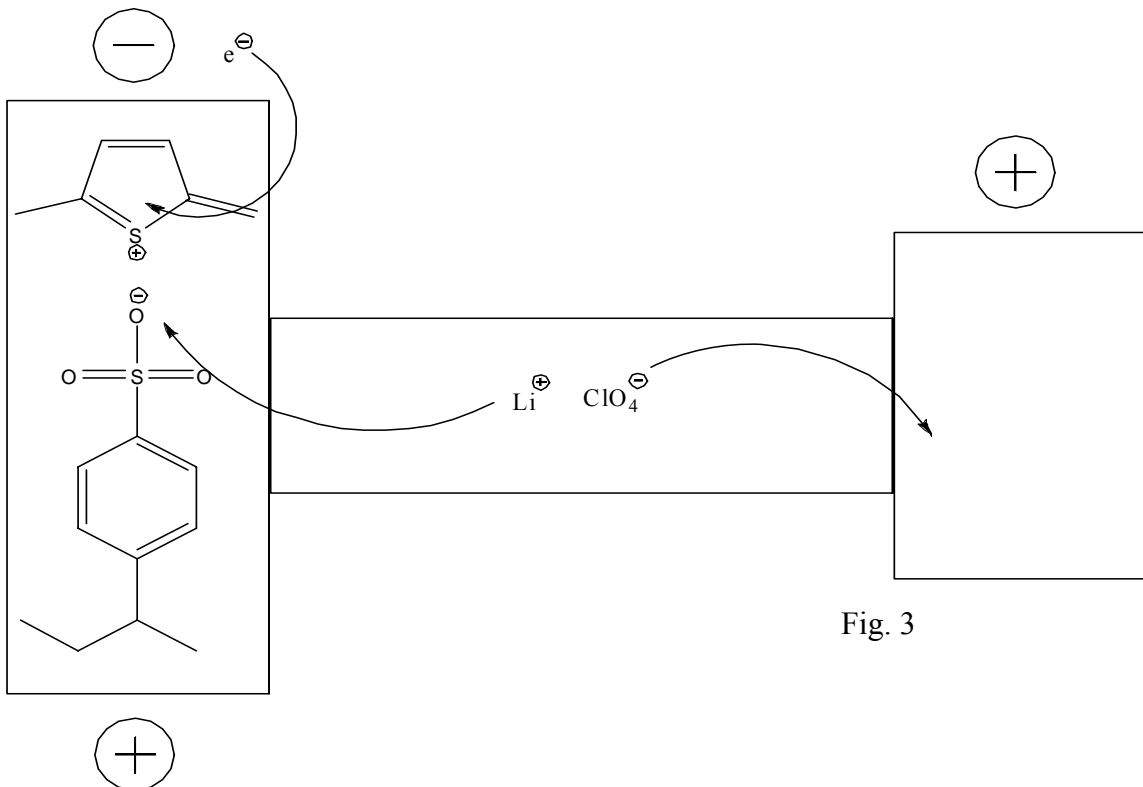
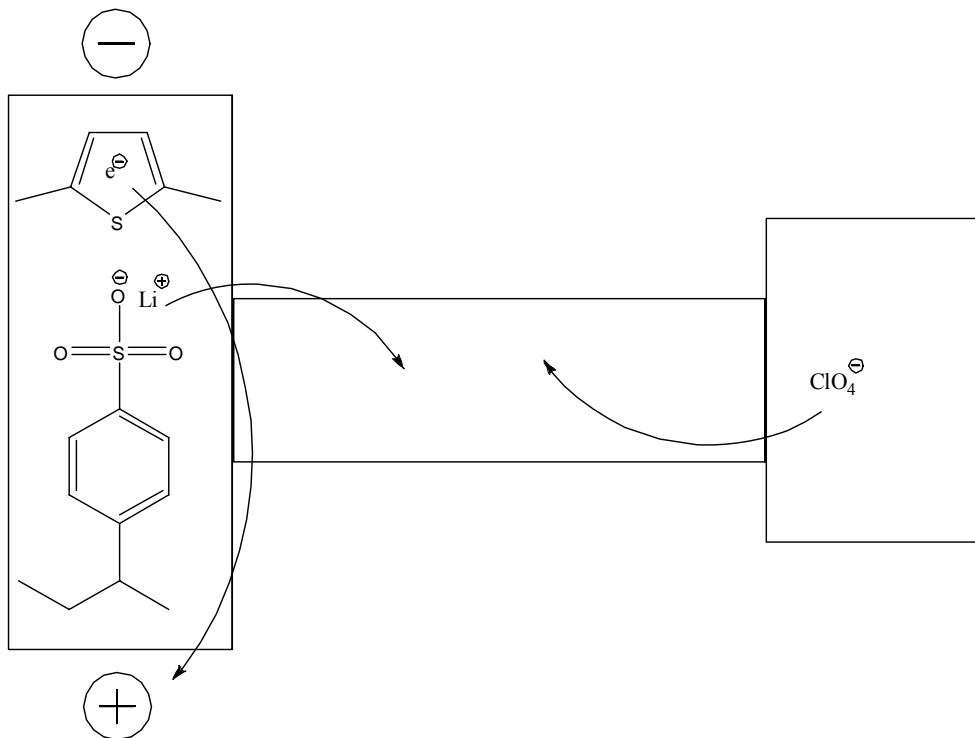


Fig. 3

⊕ Fjernes fra gate, oxidation af reduceret pedot

Fig. 4



Herefter starter det forfra, fra figur 1.