





## Forord

---

Denne masteroppgaven representerer slutten på studiet Miljøfysikk og Fornybar Energi ved Norges Universitet for Miljø og Biovitenskap (NMBU), Institutt for Matematiske realfag og Teknologi (IMT). Masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng.

Jeg vil takke mine veiledere Espen Olsen, Ingunn Burud og Andreas Flø for deres hjelp og veiledning under arbeidet med denne oppgaven. I tillegg vil jeg takke min samboer Hedda Brisendal og min mor Toril Øiaas for oppmuntrende kommentarer og korrekturlesing.

Oslo, den 15.12.2014

---

Morten Solstad Øiaas

## Sammendrag

I denne studien ble to sett à 6 multikrystallinske silisiumwafere fra samme område i en silisiumblokk sammenlignet ved studering av utvalgte spektrale kanaler fra hyperspektral avbildning, levetidsmåling av minoritetsladningsbærere ved bruk av QSSPC-utstyr og MCR-analyse. Det ene wafersettet har gjennomgått et ekstra prosesstrinn i form av fosfordiffusjonsgettering. De hyperspektrale bildene ble tatt ved to forskjellige temperaturer for begge wafersettene,  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De Defekt-Relaterte Signalene (DRL) som ble undersøkt i denne studien stammer fra SRH-rekombinasjon inne i det forbudte båndgapet til silisium, og består av D-linjene D1, D2, D3, VID3 og D4. I tillegg ble spektrale kanaler som dekker Bånd-til-Bånd (BB)-signalet trukket ut. Levetidsmålingene ble tatt for fem faste områder i romtempererte wafere.

En klar forbedring av BB-signalet i de nedkjølte, gettrede waferne ble observert. Endringer i DRL-signal for de nedkjølte, gettrede waferne varierte i forhold til hvilken D-linje som ble studert og hvilket wafersett som ble sammenlignet. Det ble observert en generell reduksjon av DRL for D1, D2 og D3 i de gettrede waferne, men også enkelte områder med økt DRL fra disse defektlinjene. For DRL fra D4 og D075 var det en økning i signalstyrke for de gettrede waferne. Ingen klar sammenheng mellom endringene i BB-signalet for de nedkjølte prøvene og levetidsmålingene ble observert. Heller ingen klare sammenhenger mellom DRL-signalet for de nedkjølte waferne og levetidsmålingene kunne konstateres. MCR-analysen for nedkjølte wafere avdekte signaler for D1, D2, D3, VID3, D4 og BB, og det ble observert færre komponenter som tilsvarte DRL i MCR-analysen av de gettrede waferne. DRL fra D1 antas å være funnet i MCR-analysen av de ugettrede, romtempererte waferne.

Denne studien har vist at gettering har hatt en positiv effekt på de aktuelle waferne i forhold til økt BB-signal og økt levetid til minoritetsladningsbærerne, men en varierende effekt i forhold til DRL med både forbedring og forverring av signalet i forskjellige områder av waferne.

## Abstract

In this study, two neighbour-sets of multicrystalline silicon wafers containing 6 wafer samples each were studied using hyperspectral imaging, QSSPC-measurements and MCR-analysis. One of the wafer sets had previously received an additional treatment in the form of phosphorus diffusion gettering. The hyperspectral images were taken at two different temperatures, -180 °C and 25 °C for both wafer sets. Defect-Related-Luminescence (DRL) originating from SRH-recombination inside the forbidden bandgap of silicon was studied, and spectral ranges corresponding to the DRL-emission-lines from D1, D2, D3, D075 and D4 were extracted from the hyperspectral images. In addition, the Band-to-Band-signal (BB) from the silicon bandgap was extracted for further comparison. The QSSPC-measurements of the minority carrier lifetime were executed for five different areas in the wafers.

A clear improvement of the BB-signal in the gettered wafers was observed. Changes in the DRL-signal for the gettered wafers varied with the different DRL-emission-lines and the different wafer sets analyzed. A general decrease of DRL from D1, D2 and D3 was observed in the gettered wafers, but an increase of the signal was also observed for some areas. DRL from D075 and D4 was observed to have increased in the gettered wafers. Comparisons of the BB-signal and the lifetime measurements showed no clear correlation. Neither did the comparisons between DRL-changes in the cooled wafers and the lifetime measurements. The MCR-analysis for the cooled wafers discovered signals from D1, D2, D3, D075, D4 and BB. There were fewer signals observed in the gettered wafers than in the non-gettered wafers. DRL from D1 is assumed identified in the MCR-analysis of the data from the room-tempered, non-gettered wafers.

This study has shown that phosphorus diffusion gettering has had a positive effect on the BB-signal, and the lifetime of the minority carriers in these wafers. No clear connection was found between the effect of gettering and changes in the DRL-signal.

## Innholdsfortegnelse

Forord .....	i
Sammendrag .....	ii
Abstract .....	iii
Innholdsfortegnelse .....	iv
1. Introduksjon .....	1
1.1 Solen som energikilde .....	2
1.2 Jordens atmosfære.....	2
2. Teori.....	4
2.1 Silisium.....	4
2.1.2 Prosessering av Silisium.....	5
2.2 Halvleder-teknologi .....	7
2.2.1 Båndgap og Fermi-Dirachs fordelingsfunksjon.....	7
2.2.2 Doping av silisium.....	9
2.2.3 Pn-overgang.....	11
2.2.4 Lysabsorpsjon i halvledere .....	13
2.2.4.1 Direkte og Indirekte båndgap.....	15
2.2.5 Temperaturavhengighet.....	17
2.2.5.1 Temperaturavhengighet til båndgapet .....	17
2.2.5.2 Temperaturavhengighet til ladningsbærere .....	18
2.3 Rekombinasjon .....	21
2.3.1 Radiativ rekombinasjon.....	22
2.3.2 Auger rekombinasjon .....	22
2.3.3 Overflaterekombinasjon.....	24
2.3.4 SRH-rekombinasjon .....	24
2.4 Hovedurenheter og krystalldfeakter i multikrystallinsk silisium.....	25
2.4.1 Segregeringskoeffisient og utfelling .....	26
2.4.2 Løselighet og diffusivitet .....	26
2.4.3 Gettering og passivering.....	28
2.5 Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) .....	29
2.6 Hyperspektrale bilder og multivariate curve resolution (MCR) .....	29
2.7 Fotoluminesens og D-linjer .....	30

3 Eksperiment.....	32
3.1 Utstyr .....	32
3.1.1 Silisiumwafere .....	33
3.1.2 Kamera og rigg.....	33
3.1.3 Laser .....	33
3.1.4 Høypassfilter.....	33
3.1.5 Kryogenisk beholder.....	34
3.1.6 Termometer .....	34
3.1.7 QSSPC-utstyr.....	34
3.2 Fremgangsmåte.....	34
3.2.1 Hyperspektrale bilder.....	35
3.2.2 QSSPC-målinger .....	36
3.2.3 Bearbeiding av data.....	36
4 Resultater og diskusjon .....	37
4.1 QSSPC-målinger .....	37
4.2 Hyperspektrale bilder av nedkjølte wafere.....	40
4.3 MCR-analyse.....	42
4.4 Utvalgte hyperspektrale bilder for nærmere analyse.....	43
4.4.1 Nedkjølt wafer 1-4 og 3-4.....	43
4.4.2 Nedkjølt wafer 1-14 og 3-14.....	49
4.4.3 Nedkjølt wafer 1-16 og 3-16.....	59
4.4.4 Nedkjølt wafer 1-18 og 3-18.....	62
4.5 Romtempererte wafere.....	65
4.5.1 Romtemperert wafer 1-14 og 3-14 .....	65
4.6 Oppsummering av resultater .....	70
4.6.1 DRL fra de hyperspektrale bildene .....	70
4.6.2 QSSPC-resultater .....	73
4.6.3 MCR-komponenter .....	74
5 Konklusjon .....	77
5.1 Videre forskning .....	77
Referanser .....	79
Vedlegg.....	81

## 1. Introduksjon

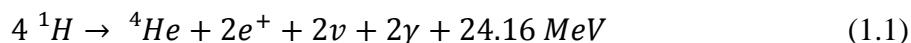
Hovedkildene til energi i dag er fossile ressurser. Olje, gass og kull trekkes gjerne frem, og det er de som har mye av æren for vår teknologiske utvikling de siste tre hundre årene. Med et samfunn som er bygd opp rundt bruken av disse energikildene, vil enhver overgang til andre energikilder bli mer utfordrende enn i utgangspunktet nødvendig. Men disse fossile energikildene har flere svakheter som man ikke kan unngå å legge merke til. De er alle begrensede ressurser, samtidig som de er store bidragsytere til global oppvarming gjennom utslipp av blant annet karbondioksid ( $CO_2$ ) og metan ( $CH_4$ ) til atmosfæren. Disse ulempene har ført til et økt fokus på å finne andre energikilder som er fornybare, og som ikke fører til økte utslipp av drivhusgasser. Solenergi utnyttet gjennom solcellepanel er et eksempel på en slik fornybar energikilde, og energien som kommer fra solen er mer enn tilstrekkelig til å dekke alle våre energibehov. Utfordringen ligger i å utnytte så mye som mulig av denne energien, samtidig som kostnaden knyttet til produksjon av solceller må ned på et nivå som gjør at teknologien gir økonomiske fordeler i tillegg til de miljømessige fordelene.

Innen solcelleteknologi forskes det på metoder som kan øke utnyttelsesgraden, og kunnskap om urenheter i selve materialet er et felt som er særdeles viktig for å kunne forbedre effektiviteten til solceller. Det er kjent at selv små mengder av urenheter vil føre til vesentlig dårligere effektivitet. Noen av de viktigste urenheterne sett fra den periodiske tabell, er 3d-overgangsmetallene jern, kobber, molybdendum og nikkel, og disse introduseres ufrivillig i forskjellige steg av produksjonsprosessen. En metode for å forbedre effektiviteten til solceller er å utsette silisiumskivene for en behandlingsmetode kjent som gettering. I denne oppgaven er det gjort en sammenligning av Defekt Relatert Luminesens (DRL) og BB (Bånd-til-Bånd)-signal for to sett multikrystallinske silisiumwafere. Sammenligningen er gjort på bakgrunn av resultater fra tre forskjellige metoder; hyperspektrale bilder, QSSPC-målinger og MCR-analyse. Waferne er tatt fra samme område i en silisiumblokk, og det ene settet har fått en ekstra behandling i form av fosfordiffusjonsgettering.



## 1.1 Solen som energikilde

Energien som kommer fra solen er hovedårsaken til at det eksisterer liv her på jorden. Solen drives av fusjonering av hydrogen til helium etter følgende totalreaksjon:



På utsiden av jordens atmosfære er den gjennomsnittlige innstrålte effekten målt og beregnet til å være  $1366 \text{ W/m}^2$  (Chen 2011). Dette er kjent som solkonstanten,  $S$ , og gjennom beregninger med jordradien som basis, samt tilnærmelsen om at jorden mottar sollyset som en skive på grunn av den store avstanden til solen, finner vi at jorden blir bestrålt med nærmere  $1.73 \times 10^{17} \text{ W}$ . Dette gir en årlig innstrålt energi på  $5.46 \times 10^{24}$  Joule. Til sammenligning er verdens årlige forbruk av energi ca.  $5.5 \times 10^{20}$  J. Vi trenger med andre ord kun å utnytte ca. 0,01% av energien som kommer fra solen for å dekke hele verdens energibehov. Men det er mange begrensninger som gjør dette utfordrende.

## 1.2 Jordens atmosfære

Selv om sollyset har stort sett fri bane til jordens atmosfære, vil ikke all energien komme ned til jordoverflaten. Rundt 30% av solstrålene blir reflektert i atmosfæren, hvor 6% reflekteres av luft, 20% reflekteres av skyer, og 4% reflekteres av jordens overflate. Ytterligere 20% blir absorbert i atmosfæren av vannmolekyler, karbondioksid, ozon og aerosoler, og 50% av strålingen blir absorbert ved jordoverflaten. Selv om bare 50% solstrålene blir absorbert ved jordoverflaten, er det rundt 70% av energien som absorberes her. Dette skyldes at solstråler med lengre bølgelengde, altså lavere energi, absorberes/reflekteres lettere i atmosfæren enn solstråler med høyere energi. Energien til de innkommende fotonene beregnes gjennom følgende formel (Tipler & Mosca 2008):

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

Hvor  $E_f$  er fotonenergien,  $h$  er Plancks konstant,  $c$  er lysfarten og  $\lambda$  er bølgelengden til lyset.

Solstrålenes vekselvirkning med atmosfæren tilskrives tre fenomener i hovedsak. Rayleigh-spredning, Mie-spredning og absorpsjon. Rayleigh-spredning innebærer at innkommende

sollysenergi blir spredt når det treffer molekyler i atmosfæren. Denne effekten er for eksempel avgjørende for at himmelen på en skyfri dag oppfattes som blå. Mie-spredning skjer når sollyset møter større hindringer, som aerosoler eller andre støvpartikler. Absorpsjon skjer via elementer i atmosfæren som vanndamp, luft, ozon med flere.

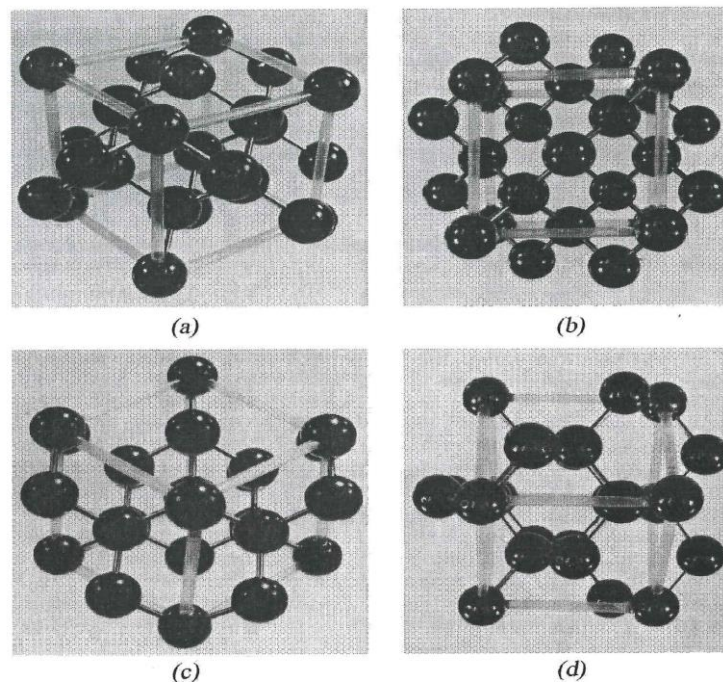
For å standardisere målinger av innstrålt effekt fra solen, brukes begrepet "air mass" (AM) (Chen 2011). Dette fordi innstrålt effekt er avhengig av hvor mye atmosfære solstrålene må passere før de når jorden. AM1 tilsvarer at solen står i senit, og AM1.5 tilsvarer en senitvinkel på ca.  $37^\circ$ . Det vil si at solstrålene passerer 1.5 ganger så mye atmosfære som de ville gjort dersom solen hadde stått i senit.

## 2. Teori

I dette kapitlet vil relevant teori for oppgaven bli gjennomgått. Det er etterstrevet å bruke godkjente lærebøker som referanser, da disse er de mest pålitelige kildene.

### 2.1 Silisium

I jordskorpen er silisium det vanligste grunnstoffet etter oksygen, og det opptrer oftest som silisiumdioksid ( $SiO_2$ ). Dette er hovedbestanddelen i blant annet sand. Silisium er grunnstoff nummer 14 i den periodiske tabell, og har elektronkonfigurasjon  $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^2$ . Silisium er et halvleder-metall fra gruppe IV, og har fire elektroner i sitt ytterste skall. Silisium vil kunne fungere som en leder dersom temperaturen er tilstrekkelig høy, eller det blir utsatt for en ytre spenning. I fast silisium danner elektronene kovalente bindinger mellom atomene, og krystallstrukturen til silisium er kubisk, med et silisiumatom sentrert på hver side av kubens hjørner og et i hvert hjørne, som vist i figur 1.



Figur 1: Atomstrukturen til typiske halvledere, sett fra forskjellige vinkler (Green 1982)

### 2.1.2 Prosessering av Silisium

Dette delkapittelet er ment som bakgrunnsinformasjon for hvordan prosessen fra sand til ferdig solcellewafer kan foregå, og dekker på ingen måte alle metoder og prosessstrinn som eksisterer.

Som nevnt tidligere er silisiumdioksid ( $SiO_2$ ) hovedbestanddelen i sand, og for å få ut silisiumet som ligger bundet til oksygenet, blir silisiumdioksid redusert sammen med karbon i store ovner. Reaksjonen er som følger (Green 1982):



Silisium fra ovnene blir så ført videre og utsatt for oksygenstrømmer eller oksygen/klorstrømmer, før det deretter ender opp i traue og går over fra flytende til fast form. Resultatet er metallurgisk silisium (MG-Si) som har en renhet på 98-99%. Dette er en billig og effektiv prosess, og mesteparten av silisiumet går videre til stål og aluminiumsindustri. Dersom silisiumet skal brukes i solceller, må det flere prosesseringstrinn til. Siemensprosessen er en kjent prosess for å oppnå halvleder-renhetsgrad (SolarGrade-Silisium), hvor kravet til kvalitet er høyere enn 6N (Pizzini 2012). 6N tilsvarer 99.9999% renhet og silisiumet må gjennom ytterligere to bearbeidingstrinn før den oppnår denne kvaliteten. I det første trinnet reagerer silisiumet med saltsyre og gir triklorsilan: (Green 1982)



Det andre trinnet består av å redusere  $SiHCl_3$  med hydrogen: (Green 1982)

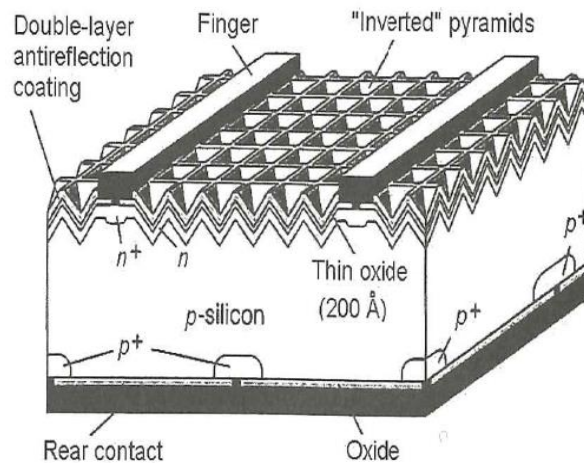


Silisiumet samler seg i form av multikrystallinsk silisium på elektrisk oppvarmede staver lagd av silisium. En ulempe med det siste steget er at det både er kostbart, og har en lav utnyttelsesgrad (ca. 37%). Silisiumet som nå er veldig rent, blir så smeltet og tilsatt doping i form av et grunnstoff fra gruppe III eller gruppe V i det periodiske system. Dette er kjent som henholdsvis p-doping og n-doping, og vanligvis brukes enten bor eller fosfor. Mengden doping som tilsettes varierer, men er i størrelsesorden 0,5 ppm (parts per million). Prosessen videre avhenger av om målet er å produsere monokrystallinske wafere, eller multikrystallinske wafere. Monokrystallinske wafere og multikrystallinske wafere

prosesserer likt når de er i wafer-form, men dersom monokrystallinske wafere er målet kan Czochralski-prosessen brukes. Denne prosessen medfører at en enkeltkrystall av silisium med kjent gitterstruktur senkes ned i smelten, og en stav av silisium trekkes sakte opp samtidig som den roteres med jevn hastighet. Denne prosessen er mer kostbar enn tilsvarende prosess for multikrystallinsk silisium, og med en forventet effektivitet på 18% på monokrystallinske wafere til sammenligning med 15% for multikrystallinske wafere, foretrekkes produksjonen av multikrystallinsk silisium i solceller for kommersielt bruk.

Multikrystallinsk silisium produseres gjennom å sage ut blokker av det stivnede silisiumet med tilsatt doping, for deretter å sage opp blokken i tynne wafere. Tykkelsen på waferne er en utfordring, da teknologien setter grenser for hvor tynt skivene kan kuttes, men en solcelle-wafer er typisk rundt  $200\mu\text{m}$  tykk. Halvparten av silisiumblokken går bort som "sagestøv" som deretter smeltes og brukes på nytt. Waferene blir så utsatt for en overflateetsing gjennom bruk av enten salpetersyre ( $\text{HNO}_3$ ) eller lignende. Det er ønskelig at overflaten skal være mest mulig absorberende, så for å optimalisere waferene kan overflateetsingen lage en overflate full av bittesmå inverterte pyramider. Alternativt gjøres dette i et separat trinn etter overflateetsingen. Tilsetningen av doping for å danne pn-overgangen innebærer at waferene blir utsatt for en gass under en temperatur på rundt  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Gassen inneholder et grunnstoff fra gruppe III eller V i det periodiske system, og dersom n-doping er ønskelig brukes flytende fosforoksyklorid ( $\text{POCl}_3$ ) i kombinasjon med en transportgass. I løpet av ca. 20 minutter vil fosforen utkonkurrere p-dopingen i waferen, og pn-overgangen er dannet. N-dopingen kan variere i styrke.

Deretter slipes baksiden og kortsidene av waferen, og et antirefleksjonsbelegg påføres. Dette belegget er optimalisert for å slippe gjennom lys med høy energi, og reflektere lys med lav energi. Silisiumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) brukes ofte, og i tillegg til å øke absorpsjonen av innkommende lys minker belegget overflaterekombinasjon ved at det passiverer overflaten. Kontakter i form av strømførende metall blir så påført gjennom en teknikk kjent som fotolitografi, hvor et metallgitter legges på framsiden av waferen, og et smørbrød av henholdsvis titan, palladium og sølv blir påført gjennom vakuumfordamping av metallet. Palladiumet brukes for å hindre at titan og sølv skal reagere med hverandre. Når dette er gjort er neste steg å montere de ferdige waferene i solcellemoduler. En framstilling av det ferdige produktet kan ses i figur 2.



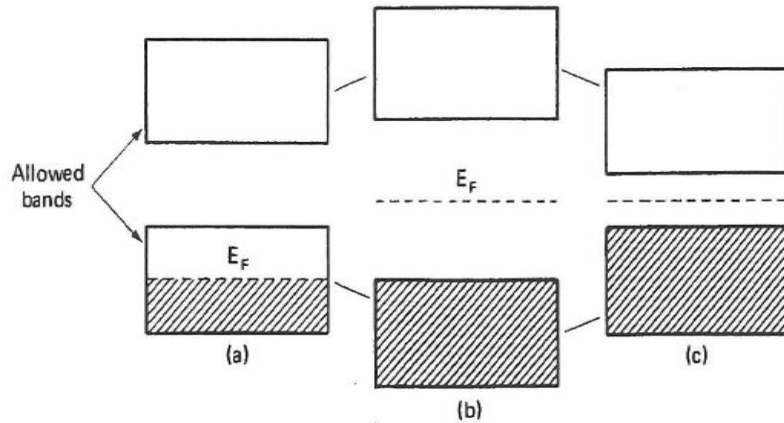
Figur 2: En skisse av en ferdig prosessert silisiumwafer som er overflateetset og har antirefleksjonsbelegg, baksidekontakter og framsidekontakter (Chen 2011).

## 2.2 Halvleder-teknologi

Halvledere har den egenskapen at de leder strøm under visse betingelser, og de kjennetegnes ved at de har et relativt smalt båndgap. Båndgapet er minimumsenergien som kreves for å bryte den kovalente bindingen til et elektron i valensbåndet og dermed sette elektronet i en fri tilstand, også omtalt som ledningsbåndet.

### 2.2.1 Båndgap og Fermi-Dirachs fordelingsfunksjon

Båndgapet til et grunnstoff varierer avhengig av hva slags grunnstoff det er. Grunnstoffene kan deles opp i tre kategorier - halvledere, ledere og isolatorer. Halvledere har et smalt båndgap til sammenligning med isolatorer, som vist i figur 3, og dette utnyttes blant annet i solcelleteknologi.



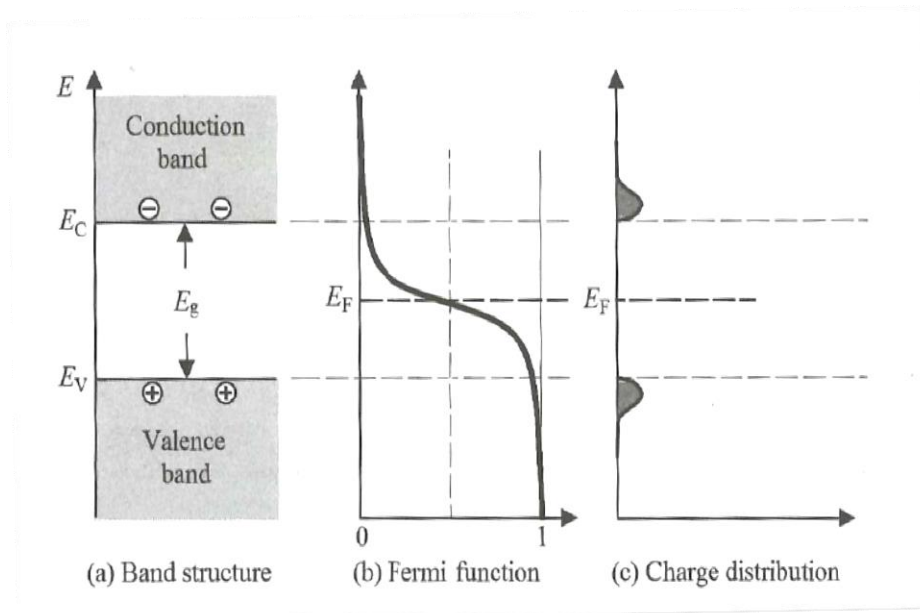
Figur 3: Båndgap og Fermi-nivå for ledere (a), isolatorer (b) og halvledere (c) (Green 1982).

Et fritt elektron i rommet kan i praksis oppta et hvilket som helst energinivå, men når atomene i silisium samler seg og danner en gitterstruktur vil de bundne elektronene ha et begrenset antall energinivåer de kan oppta (Green 1982). Med mange atomer tett inntil hverandre som i gitterstrukturen til silisium, kan disse energinivåene betraktes som energibånd som skilles av det forbudte båndgapet. Det forbudte båndgapet ( $E_g$ ) er ekvivalent med den energien som må tilføres et elektron for at det skal eksiteres fra valensbåndet ( $E_v$ ) og til ledningsbåndet ( $E_L$ ). Ved svært lave temperaturer vil termisk eksitasjon opphøre, og elektronene i krystallgitteret opptar kun de lavest mulige energinivåene. Med Paulis eksklusjonsprinsipp tatt i betraktning, vil hver energitilstand kun ha plass til to elektroner med forskjellig spinn. Dette betyr at elektronene opptar alle energitilstander fra den laveste og opp til et bestemt energinivå. Dette energinivået er kjent som Fermi-nivået, og dersom temperaturen i krystallgitteret øker er følgende funksjon, Fermi-Dirachs fordelingsfunksjon, en måte å beregne sannsynligheten for at et elektron befinner seg på et gitt energinivå (Green 1982):

$$f(E) = [1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}]^{-1} \quad (2.4)$$

Hvor  $k_B$  er Boltzmanns konstant,  $T$  er temperaturen gitt i Kelvin,  $E$  er energinivået til elektronet og  $E_F$  er Fermi-nivået. Figur 4 viser hvordan fermi-funksjonen ser ut i en udopet halvleder. Fermi-nivået til metaller/ledere ligger forøvrig i midten av et energibånd, noe som gjør at elektronene enkelt kan flytte på seg. Dette er ikke tilfellet for halvledere og isolatorer, hvor fermi-nivået ligger mellom de to energibåndene. Forskjellen mellom disse er størrelsen

på det forbudte båndgapet, og siden halvledere har et relativt smalt forbudt båndgap vil det kunne foregå termisk eksitasjon av elektroner dersom temperaturen er tilstrekkelig høy. For silisium er dette båndgapet omtrent 1,12eV ved romtemperatur (Rein 2005).



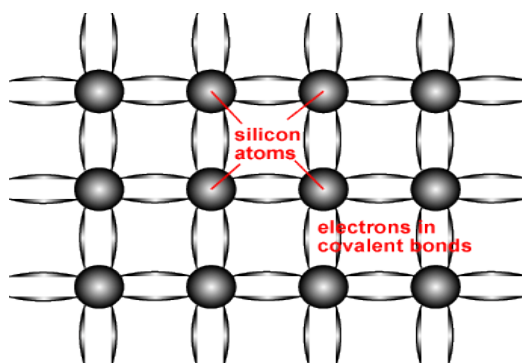
Figur 4: Her vises sannsynligheten for at et gitt energinivå i en intrinsikk halvleder er okkupert av elektroner. Sannsynligheten minsker jo høyere energinivået er (Chen 2011).

I udopede halvledere vil Fermi-nivået ligge midt i det forbudte båndgapet, men dette endrer seg dersom urenheter introduseres i krystallen.

### 2.2.2 Doping av silisium

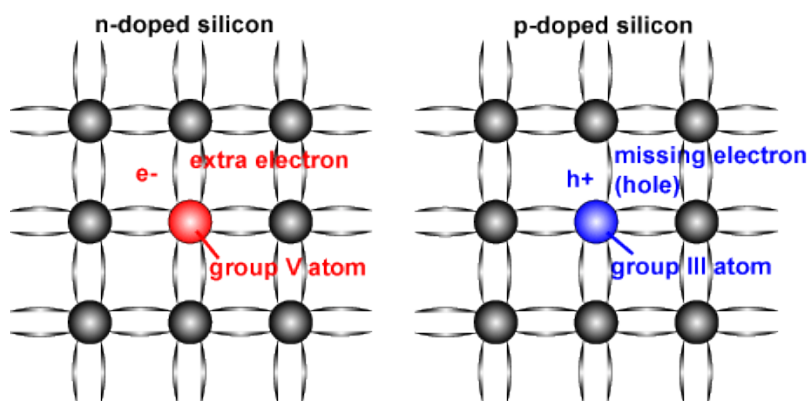
Silisium er som tidligere nevnt et grunnstoff fra gruppe IV i den periodiske tabell, og i figur 5 vises gitterstrukturen til rent silisium.





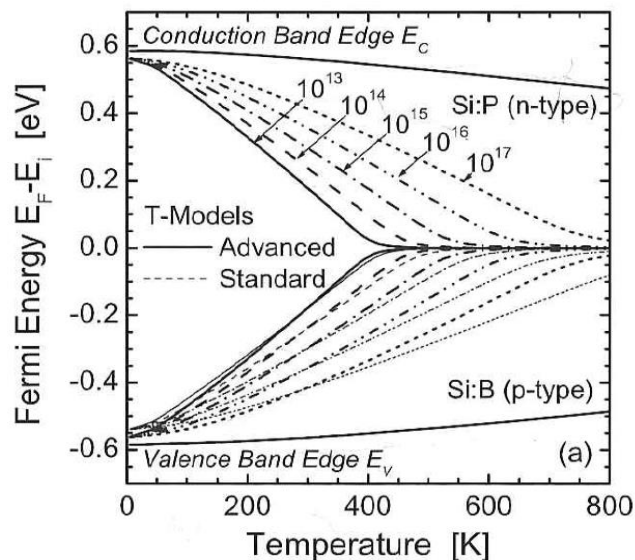
Figur 5: Silisium i gitterstruktur med elektroner i kovalente bånd mellom atomene (pveducation.org).

Dersom urenheter introduseres i silisiumet vil de introduserte atomene finne seg en plass i krystallen, enten ved at de erstatter et silisiumatom og bevarer gitterstrukturen (substitusjonell urenhet) eller ved at de trykker seg inn og endrer krystallstrukturen i det området (interstitiell urenhet). Det kan skilles mellom urenheter som er tilført med viten og vilje, og urenheter som sniker seg inn underveis i produksjonsprosessen. Doping av silisium er en bevisst tilførsel av urenheter for å øke antallet av frie ladningsbærere, og de urenhetene som ofte brukes er fosfor (gruppe V) og bor (gruppe III) (Green 1982). For en p-type solcellewafer er konsentrasjonen av fosfor og bor i størrelsesorden  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  for fosfor og  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  for bor. Dette varierer, men det vil alltid være en forskjell da dette bidrar til en økt spenningsforskjell mellom lagene. Doping med bor og fosfor omtales som henholdsvis p-doping og n-doping. Begge disse er i utgangspunktet substitusjonelle urenheter, og figur 6 viser hvordan de innretter seg i krystallstrukturen til silisium.



Figur 6: Venstre del av figur viser hvordan et grunnstoff fra gruppe V i den periodiske tabell innretter seg i krystallstrukturen til silisium. Høyre del av figuren viser tilsvarende for et grunnstoff fra gruppe III (pveducation.org).

Fermi-nivået for n-dopet og p-dopet silisium kan ses i figur 7. I øvre del av figuren er ferminivået nærmere ledningsbåndet på grunn av n-doping som bidrar med en tillatt energitilstand rett under ledningsbåndet i silisium, og i nedre del av figuren bidrar p-dopingen med en tillatt energitilstand rett over valensbåndet. Dette betyr at ladningsbærerne til fosfor og bor krever lite energi for å eksiteres til henholdsvis ledningsbåndet og valensbåndet, og dermed øke andelen ladningsbærere betraktelig. Plasseringen av fermi-nivået i forhold til valensbåndet og ledningsbåndet er avhengig av både dopingtype, temperatur og dopingkonsentrasjon (Rein 2005). Fra figuren konkluderes det med at fermi-nivået i dopet silisium nærmer seg valensbåndet eller ledningsbåndet jo sterkere dopingkonsentrasjonen er, og jo lavere temperaturen er.



Figur 7: Fermi-nivå i dopet silisium for p-type halvleder og n-type halvleder som funksjon av temperatur og dopingkonsentrasjon. Denne modellen tar hensyn til temperaturavhengighet til både båndgap og ladningsbærere. (Rein 2005)

### 2.2.3 Pn-overgang

I en pn-overgang er elektroner og hull referert til som majoritetsladningsbærere og minoritetsladningsbærere avhengig av om det er n-dopet eller p-dopet side vi snakker om. Fra

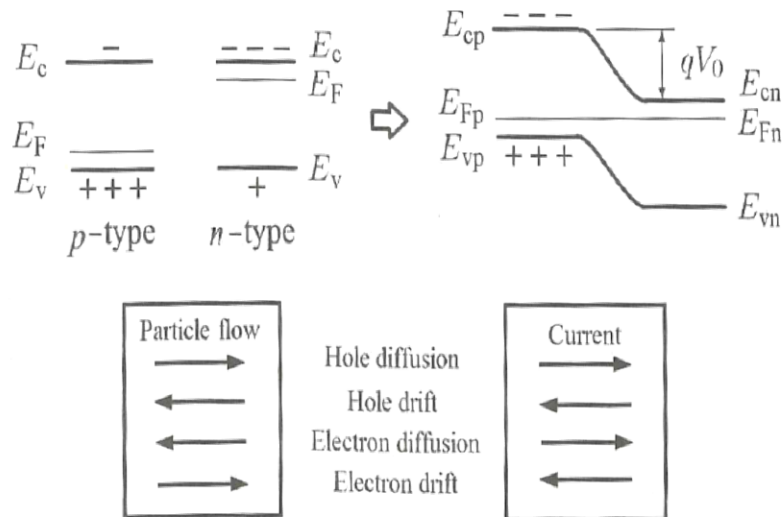
delkapittel 2.1.2 er det kjent hvilke prosesstrinn som danner en pn-overgang, men selve fysikken bak ble ikke berørt.

Når n-dopingen er gjennomført vil solcellewaferen bestå av et tykt lag med p-dopet silisium og et tynt lag med n-dopet silisium. Fermivået til de to lagene må være det samme, og for at dette skal oppfylles må det skje en endring i spenningspotensialet til pn-overgangen (Chen 2011). De overflødig elektronene i det n-dopede laget vil begynne å diffundere over til den p-dopede siden, og hullene i den p-dopede siden vil diffundere over til det n-dopede laget. Etter en liten stund vil det dannes et depleksjons-sjikt uten frie ladningsbærere i skillet mellom n-dopet side og p-doped side. Over dette sjiktet vil det stå et elektrisk felt på grunn av de ioniserte dopingatomene som ikke kan bevege seg i krystallstrukturen. Dette feltet prøver å motsette seg den naturlige diffusjonen av elektroner og hull og opprette likevekt. Bevegelsen av ladningsbærere som tvinges motsatt vei av den opprinnelige diffusjonsretningen omtales som drift av elektroner og hull, og når likevekt oppnås vil strømmen være lik 0. Likning 2.5 og 2.6 beskriver konsentrasjonen av hull i det p-dopede laget og elektroner i det n-dopede laget: (Rein 2005)

$$p_0 = N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.5)$$

$$n_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \quad (2.6)$$

Hvor  $E_L$  er energien til ledningsbåndet,  $E_V$  er energien til valensbåndet,  $p_0$  er konsentrasjonen av hull i det p-dopede laget, er  $N_L$  tettheten av ladningsbærere i det ledningsbåndet,  $N_V$  er tettheten av ladningsbærere i valensbåndet,  $k_B$  er Boltzmanns konstant og  $T$  er temperaturen. Figur 8 viser fermi-nivået til n-dopet og p-dopet halvleder, separat og i pn-overgangen. Samtidig vises strømretningen for diffusjon og drift av ladningsbærere som følge av konsentrasjonsgradient og spenningspotensiale over depleksjonssjiktet.



Figur 8: Figuren viser fermi-nivået for n og p-dopet halvleder, og driftretning og diffusjonsretning i pn-overgangen (Chen 2011).

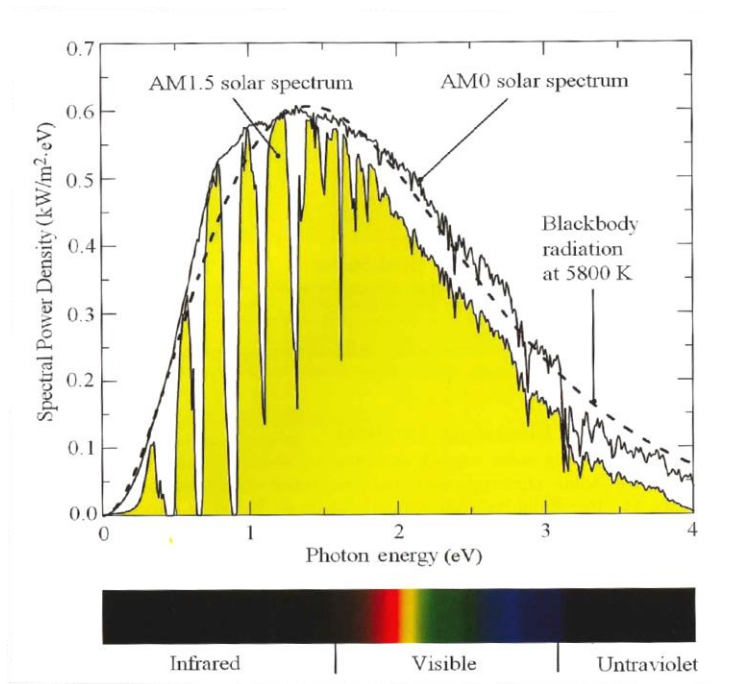
Tykkelsen på deplesjons-sjiktet i pn-overgangen kan variere dersom det utsettes for en ytre spenning, også omtalt som "forward bias" eller "reverse bias" (Chen 2011). Ladbingsbærerne må da overvinne den nye spenningsforskjellen for å krysse sjiktet. I en ferdig solcelle kobles n-siden og p-siden sammen i en elektrisk krets, og de elektronene som krysser deplesjons-sjiktet vil kunne rekombinere med et hull gjennom å gå via den ytre kretsen, og dermed produsere strøm.

## 2.2.4 Lysabsorpsjon i halvledere

Innkommende lys som treffer et materiale har tre mulige veier videre. Det kan reflekteres ( $R(\lambda)$ ), absorberes ( $A(\lambda)$ ) eller transmitteres ( $T(\lambda)$ ) (Chen 2011). Hvordan lyset fordeles er hovedsakelig avhengig av bølgelengden til lyset og hvilket materiale lyset treffer. I solcelleteknologi er det viktig at lyset som kommer inn blir absorbert i så stor grad som mulig, og ikke minst at det blir absorbert innenfor riktig område. Når lys treffer silisium og eksiterer elektroner, snakker vi om generering av ladbingsbærere.

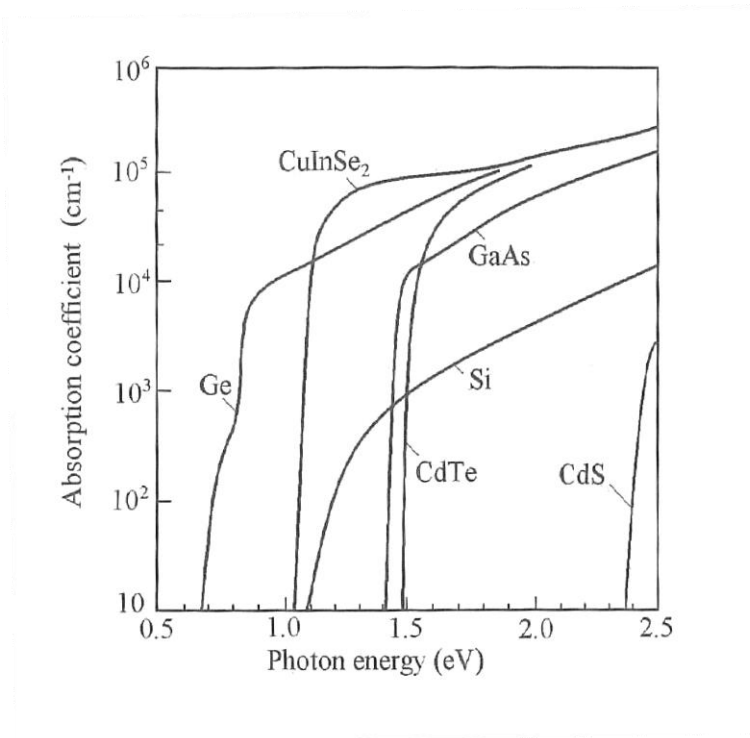
Som tidligere nevnt er en solcellewafer av silisium typisk rundt  $200\mu\text{m}$  tykk, hvorpå det n-dopede laget er mindre enn  $1\mu$  tykt. Det er ønskelig at sollyset trenger ned gjennom det n-dopede laget og eksiterer elektroner fra det p-dopede laget og over deplesjonssjiktet for å

bidra til strøm i kretsen. Silisium er en velegnet halvleder til utnyttelse av solenergi fordi båndgapet til silisium tilsvarer ca. 1,12 eV. Som vist i figur 9 er dette i det området hvor innstrålt effekt fra solen nærmer seg sin største verdi.



Figur 9: Solspekteret ved tre forskjellige betraktninger: Innstråling fra et sort legeme med temperatur lik 5800 K, innstråling utenfor atmosfæren (AM0) og innstråling ved AM1.5. Silisium med et båndgap på 1.12 eV ligger i det infrarøde området. Synlig lys har litt høyere energi (Chen 2011).

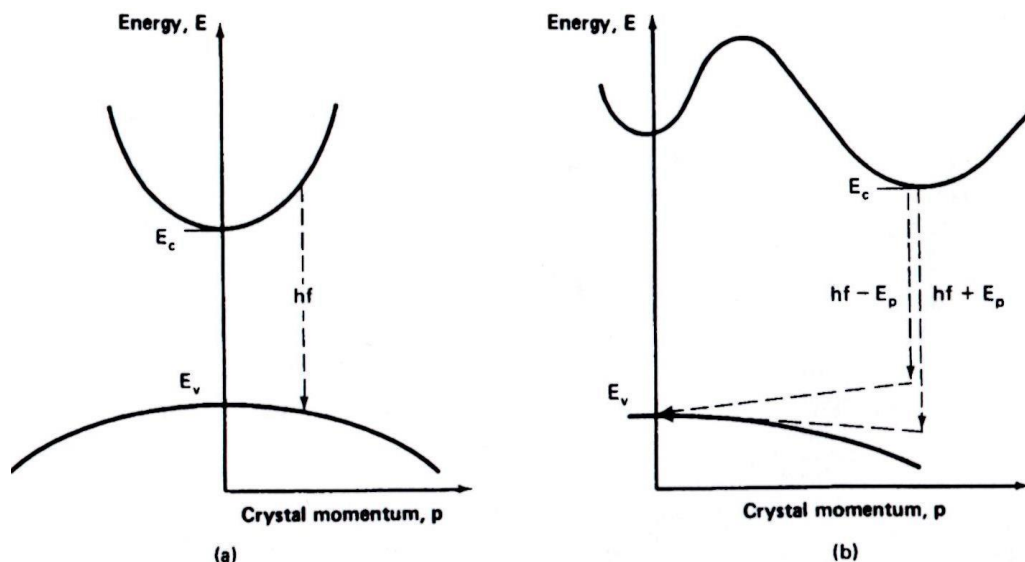
Absorpsjonskoeffisienten til et materiale forteller hvor langt et foton med en gitt energi trenger inn i materialet før det absorberes. For silisium vil fotoner med energi lavere enn båndgapet passere upåvirket gjennom materialet og ikke bidra til eksitasjon av elektroner. I figur 10 vises hvordan absorpsjonskoeffisienten endrer seg med fotonenergien til det innkommende sollyset.



Figur 10: Absorpsjonskoeffisienten til forskjellige halvledere som funksjon av fotonenergi. (Chen 2011)

#### 2.2.4.1 Direkte og Indirekte båndgap

I halvledere som galliumarsenid (GaAs) og cadmiumtellurid (CdTe) er båndgapet mellom valensbåndet og ledningsbåndet direkte (Chen 2011). Dette betyr at et innkommende foton kan eksitere et elektron direkte opp til ledningsbåndet, hvor energi og bevegelsesmengde er bevart. Silisium har derimot et indirekte båndgap, noe som betyr at valensbåndet og ledningsbåndet har forskjellig bevegelsesmengde. Dette gjør at energien til de innkommende fotonene må være mye større enn båndgapsenergien for at elektronet skal kunne eksiteres direkte opp til ledningsbåndet. Men fotoner med energi nær båndgapsenergien kan også bidra til eksitasjon av elektroner til ledningsbåndet ved hjelp av fononer, også kalt gittervibrasjoner. (Chen 2011) I motsetning til fotoner har fononer høy bevegelsesmengde og lav energi, så elektronet kan oppnå korrekt bevegelsesmengde dersom det enten absorberer eller sender ut et fonon. Dette kommer klart fram av figur 11 (Mehl 2014).



Figur 11: Venstre side viser en halvleder med direkte båndgap, hvor momentet i valensbåndet og ledningsbåndet er likt, og et foton med energi  $hf$  kan eksitere et elektron direkte opp i ledningsbåndet. Høyre side viser en halvleder med indirekte båndgap hvor eksitasjonen av elektronet opp til ledningsbåndet må skje via enten absorpsjon eller emisjon av et fonon med energi  $E_p$ .

Eksitasjon av elektroner ved hjelp av fotoner med energi nær båndgapsenergien og fononer med høy bevegelsesmengde gjør dette til en 2-steps prosess, noe som minsker sannsynligheten for at det skjer (Green 1982). Dette er årsaken til at absorpsjonskoeffisienten til silisium er mindre enn for andre halvledere med direkte båndgap. Tabell 1 viser absorpsjonskoeffisienten til noen kjente halvledere (Chen 2011).

Egenskaper til kjente solcellematerialer					
Materiale	Ge	CuInSe <sub>2</sub>	Si	GaAs	CdTe
Type	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Direkte
Båndgap (eV)	0,67	1,04	1,11	1,43	1,49
Absorpsjonskant ( $\mu$ )	1,85	1,19	1,12	0,87	0,83
Absorpsjonskoeffisient ( $cm^{-1}$ )	$5,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^3$	$1,5 \times 10^4$	$3,0 \times 10^4$

Tabell 1: En oversikt over båndgap, absorpsjonskant og absorpsjonskoeffisient for noen kjente halvledere.

En lavere absorpsjonskoeffisient gjør at lyset i gjennomsnitt trenger lengre inn i silisiumwaferen før det eksiterer et elektron. Dette må tas hensyn til når tykkelsen på silisiumwaferene skal bestemmes, selv om det naturligvis er en grense for hvor tynne de kan skjæres før de blir for skjøre til å kunne håndteres videre i prosessen.

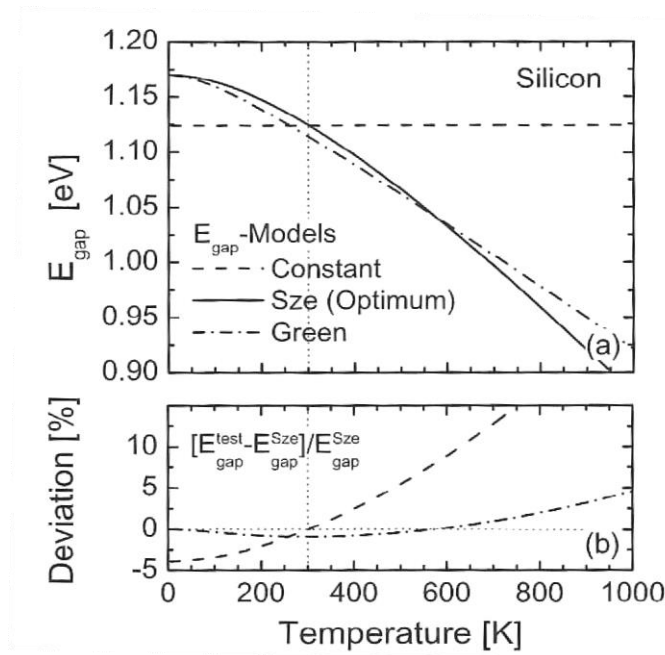
### 2.2.5 Temperaturavhengighet

Temperatur er en variabel som har innvirkning på alle fysiske prosesser som skjer. I et solcellepanel i drift vil effektiviteten reduseres dersom solcellepanelets temperatur øker i forhold til omgivelsene. Ved utregning basert på realistiske verdier, får et solcellepanel en nedgang i spenningspotensial på  $2.3\text{mV}/\text{C}^\circ$  med en referansetemperatur på 300 K (Green 1982). Hvis vi ser på fysikken på det mikroskopiske plan så er det i hovedsak to ting som påvirkes av temperaturen, og det er båndgapet og ladningsbærerne. Tre forskjellige temperaturmodeller ligger til grunn for disse beregningene (Rein 2005).

#### 2.2.5.1 Temperaturavhengighet til båndgapet

Størrelsen på båndgapet varierer med temperaturen, og dersom temperaturen minker vil båndgapsenergien øke (Rein 2005). Figur 12 viser forholdet mellom båndgapsenergi og temperatur, og likning 2.7 beskriver båndgapsenergien som funksjon av temperatur (Rein 2005).





Figur 12: Temperaturavhengigheten til båndgapet for tre forskjellige modeller.

$$E_G(T) = E_G(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.7)$$

Hvor  $E_G$  er båndgapsenergien,  $E_G(0)$  er båndgapsenergien ved 0 K,  $T$  er temperaturen,  $\alpha$  er en temperaturkoeffisient lik  $4.73 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ , og  $\beta$  er temperaturavviket lik 636 K. I tillegg tar høyre del av figuren for seg temperaturavhengigheten til båndgapet med hensyn på konsentrasjon av p-doping i waferen. Konklusjonen fra dette er at endringen i båndgapsenergi som funksjon av dopingkonsentrasjon varierer såpass lite innenfor et realistisk område av p-doping ( $< 10^{16} \text{ cm}^3$ ) og et realistisk temperaturområde (100-650 K), at den kan neglisjeres.

### 2.2.5.2 Temperaturavhengighet til ladningsbærere

Massevirkningsloven peker mot en inndeling av elektroner og hull til majoritetsladningsbærere og minoritetsladningsbærere i en intrinsikk halvleder. Loven kommer som et produkt av likning 2.5 og 2.6 (Rein 2005).

$$n_0 p_0 = N_L N_V \exp\left(-\frac{E_G}{k_B T}\right) = n_i^2 \quad (2.8)$$

Hvor  $n_0$  er konsentrasjonen av elektroner i ledningsbåndet,  $p_0$  er konsentrasjonen av hull i valensbåndet,  $N_L$  er tettheten av ladningsbærere i ledningsbåndet,  $N_V$  er tettheten av

ladningsbærere i valensbåndet og  $n_i$  er den intrinsiske ladningsbærerkonsentrasjonen. Denne loven sier at i en intrinsikk halvleder er produktet av konsentrasjonen til elektroner og hull konstant dersom halvlederen er stabil og i termisk likevekt.

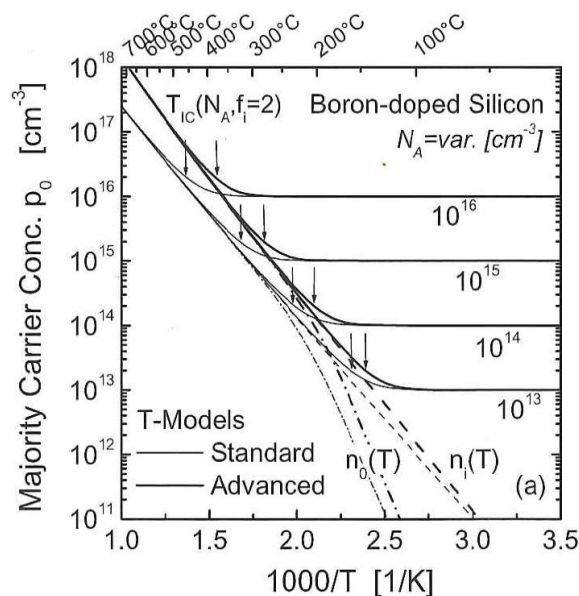
I en dopet halvleder derimot er fermivået, og dermed likevektskonsentrasjonen av  $n_0$  og  $p_0$  avhengig dopingtype og konsentrasjon. De nye konsentrasjonene kan beregnes gjennom likning 2.9 og 2.10 (Rein 2005):

$$p_0 = N_A \quad (2.9)$$

$$n_0 = N_D \quad (2.10)$$

Disse likningene sier kort sagt at konsentrasjonen av hull i valensbåndet er lik tettheten av akseptoratomer  $N_A$  og konsentrasjonen av elektroner i ledningsbåndet er lik tettheten av donoratomer  $N_D$ .

Denne sammenhengen baserer seg på to antagelser for å være gyldig. Den første antagelsen er at alle dopingatomer er ionisert, og den andre antagelsen er at bidraget av intrinsiske ladningsbærere er neglisjerbart målt opp mot konsentrasjonen av den dopinginduserte majoritetsladningsbærerkonsentrasjonen. Konsentrasjonen av majoritetsladningsbærere i p-dopet silisium er tilnærmet lik dopingkonsentrasjonen ved en temperatur på 300 K. Dette er fordi bidraget av termisk eksiterte ladningsbærere ikke endrer seg i særlig grad innenfor et spesifisert temperaturområde. Dersom temperaturen avviker mye fra 300 K, vil derimot konsentrasjonen påvirkes i betydelig grad, og konsentrasjonen av majoritetsladningsbærere kan deles inn i tre regioner basert på temperaturområder. Figur 13 viser konsentrasjonen av majoritetsladningsbærere som funksjon av temperatur og dopingkonsentrasjon for p-dopet silisium.

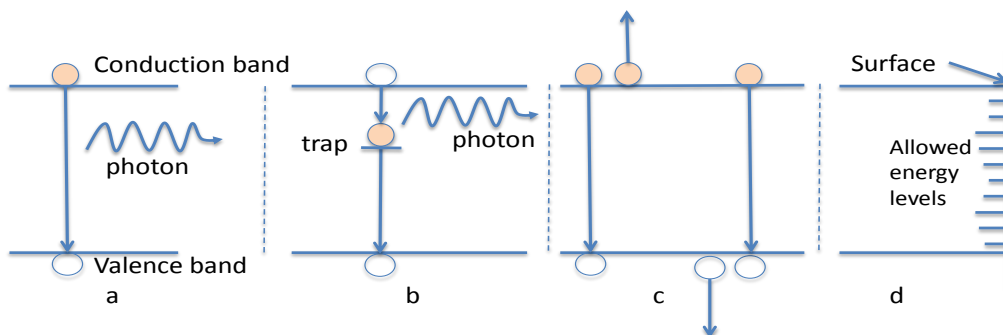


Figur 13: Majoritetsladningsbærerkonsentrasjon som funksjon av temperatur og dopingkonsentrasjon for p-dopet silisium (Rein 2005).

De tre temperaturregionene er "freeze-out"-regionen i området 0-150 K, ionisering av dopingatomer i området 150 - 500 K, og intrinsikk eksitasjon fra 500 K og oppover (Rein 2005). I "freeze-out"-regionen vil ikke dopingatomene ha tilstrekkelig termisk energi til at hullene og elektronene eksiteres til henholdsvis valensbåndet og ledningsbåndet, dette til tross for at energien som kreves bare er ca. 0,02 eV (Green 1982). Dette gjør at konsentrasjonen av majoritetsladningsbærere er mindre enn dopingkonsentrasjonen. I regionen med ionisering av dopingatomer vil den termiske energien i silisiumet være tilstrekkelig høy slik at dopingatomene ioniseres, og konsentrasjonen av majoritetsladningsbærere vil være tilnærmet lik konsentrasjonen av dopingatomer. I regionen med intrinsikk eksitasjon er den termiske energien tilstrekkelig for å eksitere elektroner direkte fra valensbåndet og opp til ledningsbåndet i silisium. Dette gjør at konsentrasjonen av majoritetsladningsbærere blir større enn dopingkonsentrasjonen, og andelen termisk eksiterte ladningsbærere vil etterhvert overstige andelen ladningsbærere som kommer fra doping.

## 2.3 Rekombinasjon

For å finne den ultimate effektiviteten til en solcelle er det mange tilnærmelser og forenklinger som kan gjøres. Man kan anta at solen oppfører seg som et sort legeme, og man kan si at strålingen fra solen ikke reduseres gjennom atmosfæren. Shockley-Queissers effektivitetsgrense baserer seg for eksempel utelukkende på radiativ rekombinasjon av ladningsbærere (Chen 2011). Men i virkeligheten er det flere typer rekombinasjonsmekanismer som reduserer effektiviteten i en solcelle. Vi deler dem inn i fire forskjellige mekanismer. I tillegg til radiativ rekombinasjon er det overflaterrekombinasjon, Auger rekombinasjon og Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasjon. Sistnevnte er rekombinasjon gjennom feller i båndgapet, også omtalt som urenheter. I figur 14 vises de forskjellige rekombinasjonsmekanismene.



Figur 14: Skjematisk figur av rekombinasjonsmekanismene i silisium. (a) Radiativ rekombinasjon gjennom utsendingen av et foton. (b) Rekombinasjon gjennom feller i båndgapet, hvor de utsendte fotonene har lavere energi enn ved radiativ rekombinasjon. (c) Auger rekombinasjon hvor energien overføres til en tredjepart. (d) Overflaterrekombinasjon hvor "dangling bonds" som følge av en diskontinuetet i krystallstrukturen gir opphav til nye tillatte energinivå i båndgapet (Flo et al. 2013).

Den totale rekombinasjonslevetiden til ladningsbærerne er gitt gjennom summering av rekombinasjonslevetiden for de fire forskjellige rekombinasjonsmekanismene (Rein 2005):

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{surface}} \quad (2.11)$$

### 2.3.1 Radiativ rekombinasjon

Radiativ bånd-til-bånd rekombinasjon vises i (a) i figur 14, og er den direkte annihileringen av et elektron-hullpar som resulterer i en utsending av et foton med energi tilnærmet lik båndgapet (Rein 2005). I silisium må dette skje i to steg med involveringen av et fonon siden silisium har et indirekte båndgap. Rekombinasjonsraten avhenger både av konsentrasjonen av frie elektroner og konsentrasjonen av hull. Et uttrykk for den gjennomsnittlige rekombinasjonsraten er gitt i likning 2.12 (Rein 2005):

$$U_{rad} = B(n_0 + p_0)\Delta n + B\Delta n^2 \quad (2.12)$$

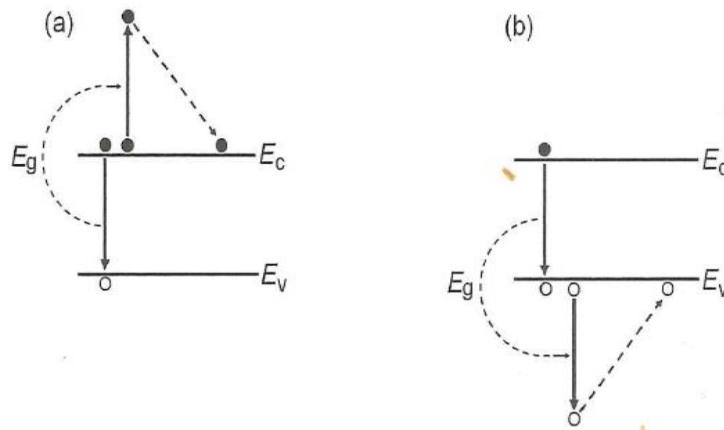
Hvor  $B$  ( $cm^{-3}s^{-1}$ ) er en koeffisient som reflekterer den kvantemekaniske sannsynligheten for en radiativ overgang. For silisium er denne mindre enn for direkte båndgaps halvledere. I likning 2.13 finner vi et uttrykk for levetiden til ladningsbærerne ved radiativ rekombinasjon:

$$\tau_{rad} = \frac{1}{B(n_0 + p_0) + B\Delta n} \quad (2.13)$$

Radiativ rekombinasjon er typisk den dominante rekombinasjonsmekanismen i halvledere med direkte båndgap, men for silisium er den lav i forhold til andre rekombinasjonsmekanismer, med unntak av når temperaturen passerer 500 K, som nevnt i kapittel 2.2.5.2.

### 2.3.2 Auger rekombinasjon

Ved Auger rekombinasjon blir energien til et elektron overført til en tredjepart som vist i (c) i figur 16. Dette kan være enten et elektron eller et hull. Energien som tredjeparten får, avgis deretter gjennom termalisering ved fononer overført til krystallgitteret. Figur 15 viser hvordan termaliseringsen foregår (Chen 2011).



Figur 15: (a) Elektronet gir fra seg energien til et annet elektron i ledningsbåndet, som deretter termaliserer. (b) Hullet gir fra seg energien til et annet hull i valensbåndet.

Den gjennomsnittlige rekombinasjonsraten ved Auger rekombinasjon er gitt ved likning 2.13 (Rein 2005). Levetiden til ladningsbærerne for svake og sterke dopingkonsentrasjoner for henholdsvis n og p-doping er gitt av likningene 2.14, 2.15 og 2.16.

$$U_{Auger} = C_n(n^2p - n_0^2p_0) + C_p(np^2 - n_0p_0^2) \quad (2.13)$$

Hvor  $C_n$  og  $C_p$  er Auger koeffisientene ved (a) og (b) i figur 15.

$$\tau_{Auger}^{LLI,n} = \frac{1}{C_n N_D^2} \quad (2.14)$$

$$\tau_{Auger}^{LLI,p} = \frac{1}{C_p N_A^2} \quad (2.15)$$

$$\tau_{Auger}^{HLI} = \frac{1}{(C_n + C_p)\Delta n^2} \quad (2.16)$$

Hvor LLI og HLI står for "Low-Level-Injection" og "High Level Injection". Disse likningene er dog idealiserte, og avviker noe fra eksperimentelle observasjoner (Rein 2005).

### 2.3.3 Overflaterekombinasjon

En upassivert silisiumwafer har en overflate med "dangling bonds", såkalt løse bindinger som gir opphav til rekombinasjon. De mange introduserte energinivåene i det forbudte båndgapet som følge av dette vises i (d) i figur 14. Overflaterekombinasjon er et spesialtilfelle av SRH rekombinasjon, men skiller seg ut ved en kontinuerlig fordeling av tillatte energitilstander inne i det forbudte båndgapet, ikke bare enkeltnivå som ved standard SRH rekombinasjon. Typiske metoder for å passivere overflaten til silisiumwaferer er enten gjennom oksidasjon for å danne en overgang mellom silisium og silisiumdioksid ( $\text{SiO}_2$ ), eller ved å bruke aluminium for å danne aluminiumjodid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Chen 2011).

### 2.3.4 SRH-rekombinasjon

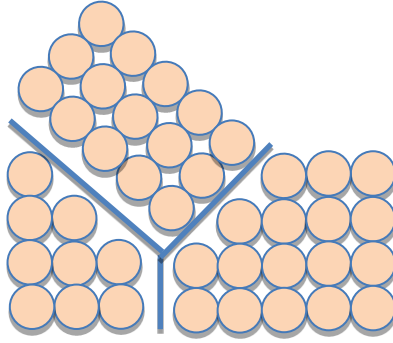
Urenheter som introduserer et tillatt energinivå nær midten av det forbudte båndgapet er de mest effektive rekombinasjonssentrene (Green 1982). Figur 14 (b) viser hvordan et elektron rekombinerer med et hull i valensbåndet ved utsending av et foton som tilsvarer energimengden mellom ledningsbåndet og urenheten. I silisium vil det være utsending av både fotoner og fononer på grunn av det indirekte båndgapet, og krystalldetekter i gitterstrukturen til silisium vil også gi opphav til rekombinasjon. Vekselvirkningen mellom defektsentrene og ladningsbærerne kan deles inn i tre kategorier. Defektsentrene kan fungere som rekombinasjonssentre, generasjonssentre og felle-sentre (Rein 2005).

Når defektsentrene fungerer som rekombinasjonssentre kan rekombinasjonen av hull og elektroner skje i det introduserte defektsenteret, eller ved at et elektron beveger seg fra ledningsbåndet og ned til defektsenteret, for så å hoppe videre ned til valensbåndet og annehilere med et hull der. Denne prosessen er snudd på hodet når defektsenteret fungerer som generasjonssenter.

Ved å fungere som et felle-senter, vil defektsenteret ta imot elektroner eller hull fra valensbåndet eller ledningsbåndet, og sende ladningsbæreren tilbake til det samme energibåndet.

## 2.4 Hovedurenheter og krystalldringer i multikrystallinsk silisium

Multikrystallinsk silisium består av mange små enkeltkrystaller som adskilles av korngransene mellom hver enkelt krystall, som vist i figur 16 (Flo et al. 2013).



Figur 16: Korngranser mellom enkeltkrystaller i multikrystallinsk silisium.

Som nevnt i kapittel 2.1.2 er renhetsgradkravet til SoG silisium 6N eller høyere. Urenhetene som må fjernes for at denne kvaliteten skal oppnås, kommer fra forskjellige steder i produksjonsprosessen. I tillegg til urenheter i den opprinnelige kvartsen, vil det introduseres ytterligere urenheter som følge av reaktanter i de forskjellige kjemiske prosessstrinnene, og gjennom inndiffundering av urenheter fra veggene i smelteovner og annet utstyr (Pizzini 2012). De viktigste urenheterne i multikrystallinsk silisium er jern, nikkel, oksygen, karbon, nitrogen, aluminium, kobber og molybdenum.

Krystalldringer som fungerer som rekombinasjonssentre i silisiumwafere kan deles inn på bakgrunn av deres geometri (Flo et al. 2013). Punktdefekter, linjedefekter, arealdefekter og volumdefekter. Punktdefekter kan være et manglende silisiumatom i krystallgitteret, eller substitusjonelle/interstitielle urenheter, og linjedefekter er kjent som dislokasjoner som kan deles inn kantdislokasjoner og skruedislokasjoner.

Multikrystallinsk silisium har den ulempen at det består av dislokasjoner og korngranser som er inhomogent fordelt. Det er forskjellige typer dislokasjoner i multikrystallinsk silisium avhengig av hva de stammer fra. Mekanisk stress ved temperaturer over 600 K gir opphav til en betydelig andel av dislokasjonene, deriblant skruedislokasjoner. Andre dislokasjoner beskrives gjerne ved vinkelforskjellen de representerer og hvilket plan de er i (Pizzini 2012).



Tilstedeværelsen av korngrenser er et fremtredende trekk i multikrystallinsk silisium. Disse er i hovedsak  $\Sigma 3$  tvillinggrenser, høyere ordens tvillinger ( $\Sigma 9$ ,  $\Sigma 27$ ,  $\Sigma 81$ ) og tilfeldige korngrenser som også inkluderer korngrenser med liten vinkel (Pizzini 2012). Den symmetriske oppbyggingen av disse korngrensene gjør at "dangling bonds" ikke blir et problem, og rekombinasjonen i disse områdene stammer i hovedsak fra urenheter. De to hovedmekanismene som må tas i betraktning når korngrensenes innvirkning på rekombinasjon skal vurderes er utfelling av metalliske urenheter og segregering.

#### 2.4.1 Segregeringskoeffisient og utfelling

Ved produksjon av multikrystallinsk silisium gjennom retningsstyrt solidifikasjon, spiller segregeringskoeffisienten til de forskjellige urenheterne en stor rolle. Med unntak av oksygen har de fleste urenheter en segregeringskoeffisient lavere enn 1, og siden løseligheten til de fleste urenheterne er lavere i fast silisium enn i flytende silisium, vil konsentrasjonen av urenheter i smelten øke etterhvert som solidifiseringen pågår (Pizzini 2012). En konsekvens av dette er at urenheterne samler seg i de områdene som solidifiseres sist. Dette gjør temperaturreguleringen under nedkjøling av silisiumblokken til en viktig faktor. I tillegg vil det bli utfelling i de områdene med høyest konsentrasjon av urenheter. De områdene i silisiumblokken som har høyest konsentrasjon av urenheter kalles "red-zone", og disse områdene kuttet bort før blokken deles opp i wafere.

#### 2.4.2 Løselighet og diffusivitet

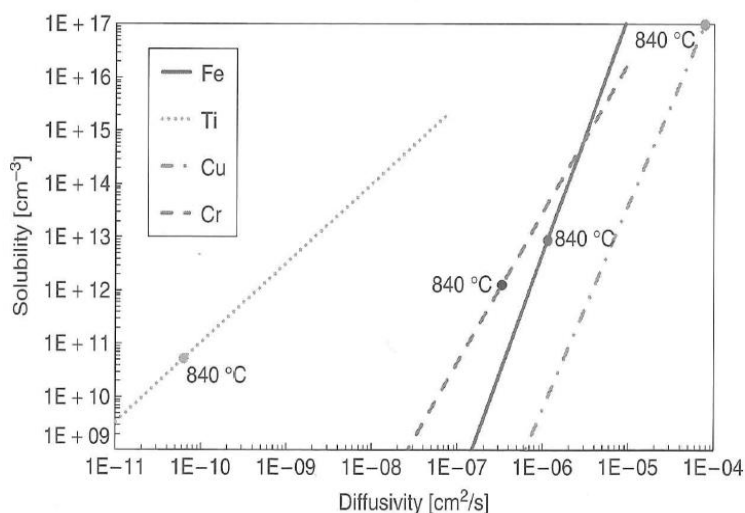
Løseligheten til en urenheter i silisium er definert som den maksimale konsentrasjonen som kan være løst i gitterstrukturen til silisium ved en gitt temperatur (Pizzini 2012). Løseligheten synker drastisk under avkjølingen av silisiumblokken, og utfellinger dannes. Dette skjer gjerne i områder med krystalldfelekter eller andre utfellinger. Diffusiviteten er i likhet med løselighet eksponentielt avhengig av temperaturen, som vist i likning 2.17 og 2.18.

$$S = S_0 e^{-\frac{H_S}{kT}} \quad \text{for } T < T_{eut} \quad (2.17)$$

$$D = D_0 e^{-\frac{H_m}{kT}} \quad (2.18)$$

Hvor  $H_S$  er løsningsentalpi,  $S_0$  er en temperatuavhengig pre-eksponensiell faktor,  $T_{eut}$  er den eutektiske temperaturen,  $D_0$  er en temperatuavhengig pre-eksponensiell faktor og  $H_m$  er migrasjonsentalpien.

Det skilles mellom trege diffusere og raske diffusere, og i figur 19 vises løselighet som funksjon av diffusivitet for både trege og raske diffusere ved en temperatur på 840 °C. Dette er en realistisk verdi for temperaturen ved inndiffusjon av fosfor i en p-type silisiumwafer.



Figur 17: Løselighet i silisium som funksjon av diffusivitet for urenheterne jern, titanium, kobber og krom ved 840 °C (Pizzini 2012).

Diffusjonslengden til minoritetsladningsbærere er en nøkkelparameter for å beskrive kvaliteten til silisiumsolceller, og denne er en funksjon av levetiden til ladningsbærerne. Kun de elektronene som har en lang nok levetid til at de kommer seg over deplesjonssjiktet vil bidra til strøm i kretsen. Diffusjonslengden kan beregnes ut fra likning 2.19 (Pizzini 2012):

$$L_D = \sqrt{D\tau} \quad (2.19)$$

Hvor  $D$  er diffusiviteten til minoritetsladningsbærerne og  $\tau$  er levetiden til minoritetsladningsbærerne. Mer om dette i kapittel 2.5.

### 2.4.3 Gettering og passivering

Uttrykket gettering omhandler prosesser som fjerner skadelige urenheter fra aktive områder i elektriske komponenter og lagrer dem på et sted i komponentene hvor de har mindre innvirkning på funksjonaliteten (Pizzini 2012). Innen solceller er det ekstern gettering som foretrekkes, da dette fjerner urenheter i hele waferen og ikke bare fra overflaten. De mest foretrukne metodene i bruk for gettering av solceller er fosfordiffusjons-gettering, aluminiumsgettering og bor-diffusjonsgettering, og de fysiske mekanismene innen gettering kan igjen deles inn i tre kategorier (Pizzini 2012): Segregeringsgettering, relaksasjonssgettering og injeksjonsgettering. Felles for alle er at de utnytter forskjellen i kjemisk potensial mellom urenheter og silisiumet ved forskjellige temperaturer. Segregeringsgettering innebærer at urenheter som ligger fordelt i silisiumkornene drives mot dislokasjonene/korngrensene hvor de har et lavere kjemisk potensial. Relaksjonsgettering brukes når det er mye urenheter og dermed utfelling. Prinsippet er å samle ytterligere urenheter i utfellingene som følge av metning i silisiumet. Som nevnt tidligere er løseligheten av urenheter i silisium større ved høyere temperaturer, noe som gjør at det blir utfelling under nedkjøling av silisiumblokken. Injeksjonsgettering går ut på at interstitielt silisium bytter plass med substitusjonelle urenheter under visse temperaturer avhengig av hvilken type urenheter det er snakk om.

Gettering ved fosfordiffusjon består av at n-doping i form av fosfor blir inndiffundert i det øverste laget av silisiumet. Urenheter beveger seg naturlig inn i det n-dopede laget, og etter en viss tid blir det n-dopede laget etset vekk, og silisiumwaferen står igjen med et betydelig lavere innhold av urenheter.

Gettering utnytter den fysiske virkeligheten hvor kjemisk potensial endrer seg som funksjon av temperatur og følgelig endrer hvordan forskjellige molekyler forholder seg til hverandre i en halvleder. Siden det potensielt eksisterer veldig mange forskjellige sammensetninger av urenheter i silisium, og når disse samtidig blir påvirket av hverandre og de fysiske forholdene i krystallstrukturen, blir det vanskelig å definere getteringparametre som er optimale på generell basis. Dersom temperaturen holdes for høy over lengre tid vil dislokasjoner som ideelt sett skal fungere som mottagere av urenheter, fungere som kilder for spredning av urenheter i silisiumkrystallen.

Passivering av solcellewafere er en prosess for å minimere overflaterrekombinasjon gjennom å la overflaten av waferen reagere med et eller flere andre grunnstoff. Dette gjøres gjerne i sammenheng med påføring av antirefleksjonsbelegget, og en av de mer brukte passiveringsmetodene er hydrogenpassivering. Overflaten danner et  $SiN_x:H$ -lag hvor det ikke introduseres noen dype feller i båndgapet som kan gi opphav til økt rekombinasjon.

## 2.5 Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC)

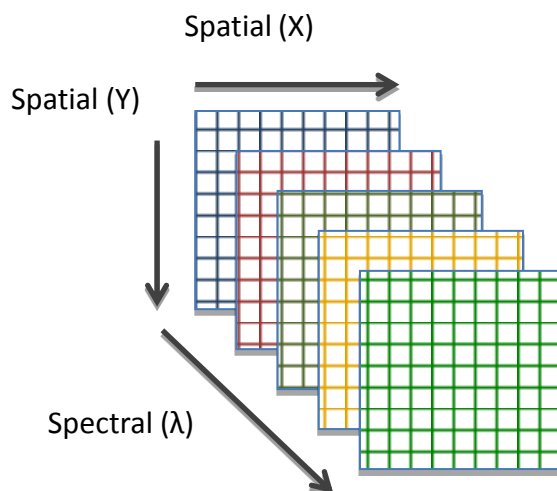
For å få et innblikk i hvor god levetid minoritetsladningsbærerne til en halvleder har i et gitt område brukes en teknikk kjent som "Quasi-steady-state photoconductance technique" (QSSPC). Denne metoden går ut på at minoritetsladningsbærere genereres av en fotografisk blits hvorpå levetiden beregnes gjennom en målt endring i permeabilitet og dermed ledningsevne via likning 2.20 (Rein 2005):

$$\tau_{eff} = \frac{\Delta n_{av}}{G_{av}(t)} \quad (2.20)$$

Hvor  $\Delta n_{av}$  er den gjennomsnittlige genererte ladningsbærerkonsentrasjonen og  $G_{av}$  er den gjennomsnittlige generasjonsraten. Under målingen brukes en referansesolcelle og et oscilloskop for å bestemme tidsavhengigheten til både den genererte ladningsbærerkonsentrasjonen og lysglimt/blitsen. Ved en QSSPC-måling reduseres lysintensiteten til generasjonskilden over flere millisekunder for å oppfylle "quasi-steady-state" kriteriet. Tykkelsen på waferen og injeksjonsnivået er faktorer som spiller inn på resultatet ved bruk av denne metoden.

## 2.6 Hyperspektrale bilder og multivariate curve resolution (MCR)

Hyperspektrale bilder består av en spektral dimensjon i tillegg til de to dimensjonene som vanlige bilder har. Dette gir spektral informasjon for et gitt antall bølgelengder for hver eneste piksel i bildet. Hvilke bølgelengder som trekkes ut, samt antallet bølgelengder, er utstyrsspesifikt. Hyperspektrale bilder kalles også for hyperkuber, da de kan representeres som tredimensjonale matriser. Figur 18 viser hvordan denne hyperkuben kan fremstilles.



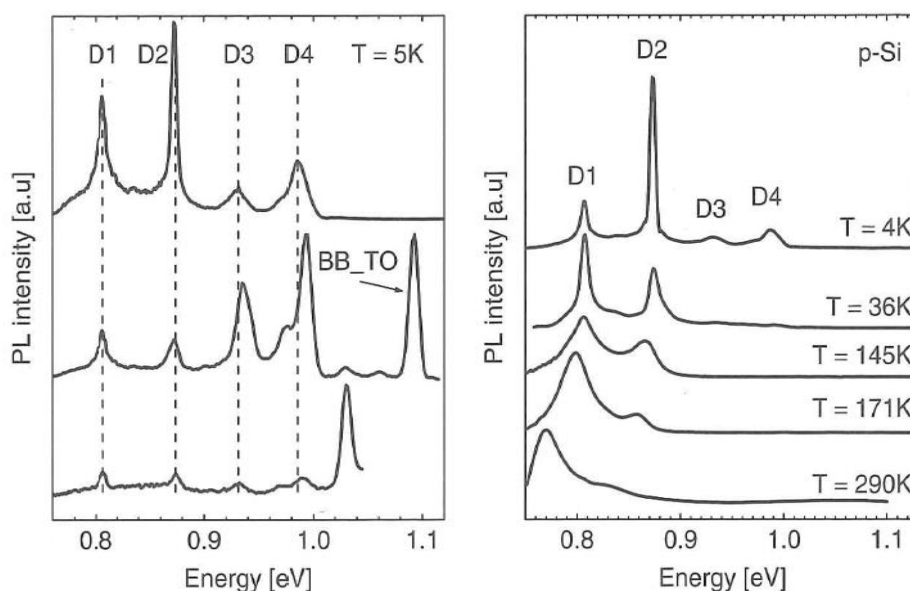
Figur 18: hyperkube som representerer dataene fra den hyperspektrale bildetakingen (Flo et al. 2013).

Multivariate Curve Resolution (MCR) trekker ut den spektrale informasjonen fra en hyperspektral datafil og deler denne inn i separate komponenter. MCR er en iterativ oppløsningsmetode som prøver å få frem de spektrale komponentene i en spektral blanding av forskjellige signaler uten noen forhåndsinformasjon om blandingen (Flo et al. 2013). MCR er basert på en bilinear modell som krever en lineær kombinasjon av signalene av de rene komponentene til prøven.

## 2.7 Fotoluminesens og D-linjer

Fotoluminesens er utsending av fotoner fra et materiale som følge av absorpsjon av fotoner og energiutveksling i materialet. Fotoluminesensspekteret kan brukes til å identifisere energinivåer inne i materialet. Innen studier av fotoluminesens fra multikrystallinske silisiumwafere er det Defekt-Relatert Luminesens (DRL) som følge av SRH-rekombinasjon inne i det forbudte båndgapet som er i fokus, da dette kan fortelle oss noe om urenheter og dislokasjoner i materialet. Rekombinasjon fra ledningsbånd til valensbånd i silisium omtales som bånd-til-bånd (BB). D-linjene ble først beskrevet av (Drozdov et al. 1976) som foreslo at disse defektlinjene oppstod som følge av dislokasjoner i silisiumwaferen. D-linjene er navngitt D1, D2, D3 og D4 med sine respektive energinivåer på 0,8 eV, 0,87 eV, 0,94 eV og 1,0 eV. Flere teorier om D-linjene og annen DRL er presentert i ettertid. Det er blitt foreslått at D1-D4 skyldes relaksasjonsdislokasjoner (Sauer et al. 1985), at overgangsmetaller er

opphavet til D-linjene (Higgs et al. 1992), at oksygen og/eller tungmetaller påvirker bredden og intensiteten til D1 (Ostapenko et al. 2000), at oksygenutfellinger i silisiumwaferne kan være opphavet til D-linjene (Pizzini et al. 2000) (Tajima et al. 2012), at D1 og D2 stammer fra overganger mellom en-dimensjonale bånd i  $60^\circ$  dislokasjoner og at D3 og D4 har sitt opphav fra dislokasjoner med metalliske urenheter (Arguirov 2007). I tillegg er det funnet et signal som er navngitt Very Intense D3 (VID3) på 0,93-0,94 eV som antas å stamme fra punktdefekter (Flo et al. 2013). Ifølge Pizzini (Pizzini 2012) er det bred enighet om at D4 stammer fra fononuavhengig rekombinasjon av elektroner i dissosierte  $60^\circ$  dislokasjoner, og at D3 er fononreplika av D4. Opprinnelsen til D1 og D2 er mer usikkert. Observasjon av DRL fra D-linjene i romtemperatur er sjeldnere på grunn av støy og svakere signal. Figur 19 viser signalintensiteten og energiområdet til DRL for D1-D4 og BB-signalet som funksjon av temperatur.



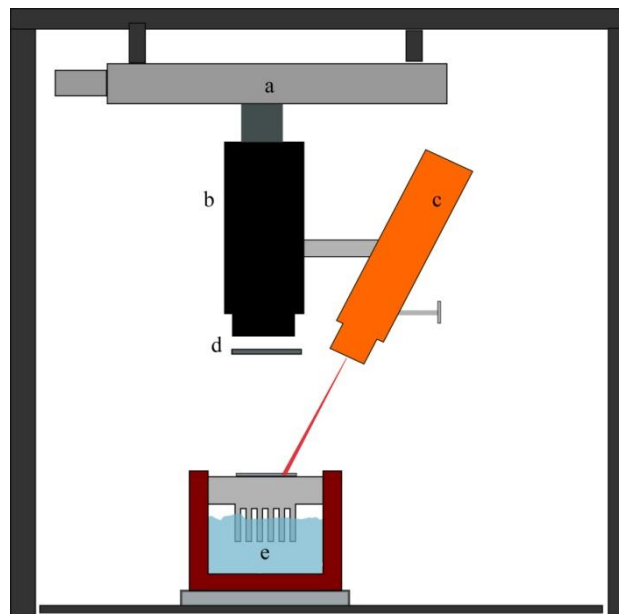
Figur 19: Venstre side av figuren viser intensiteten til DRL og bånd-til-bånd (BB) luminesens ved 5 K i krystallinsk silisium. Høyre side viser hvordan DRL-signalet endres ved varierende temperatur (Pizzini 2012).

### 3 Eksperiment

I denne oppgaven er det tatt hyperspektrale bilder av to sett à 6 silisiumwafere, hvor det ene settet har fått en ekstra behandling i form av fosfordiffusjonsgettering. Waferene stammer fra samme høyde i to forskjellige blokker skåret ut av en ingot bestående av multikrystallinsk silisium. Bildene er tatt ved to forskjellige temperaturer for hvert sett wafere, og en laser er brukt som eksitasjonskilde. I tillegg er det utført en MCR-analyse og en levetidsmåling på fem faste punkter for hver wafer ved bruk av QSSPC-utstyr. Dataene er behandlet og bearbeidet i MATLAB, Gimp, Fiji og Excel.

#### 3.1 Utstyr

Figur 20 viser utstyrsoppsettet under den hyperspektrale bildetakingen. Dette utstyret inkluderer en motorstyrt rigg, et hyperspektralt kamera, en laser brukt som eksitasjonskilde, et høypassfilter, en kryogenisk beholder, multikrystallinske silisiumwafere.



Figur 20: Skjematisk figur av det eksperimentelle oppsettet. (a) Motorstyrt rigg, (b) hyperspektralt kamera, (c) laser, (d) høypassfilter, (e) kryogenisk beholder (Flo et al. 2013).

### 3.1.1 Silisiumwaferer

Waferne som brukes i denne oppgaven kommer fra Institutt For Energiteknikk (IFE), hvor det ene wafersettet har fått en ekstra behandling ved fosfordiffusjonsgettering. Waferne er p-type multikrystallinske silisiumwaferer med en tykkelse på 164  $\mu\text{m}$  etter behandling, og en resistivitet på 1-1,5  $\Omega\text{cm}$ . De er overflateetset og passivert ved hydrogenert, amorft silisium, og måler 50  $\times$  50 mm etter å ha blitt kuttet fra den opprinnelige waferstørrelsen på 156  $\times$  156 mm (Flo et al. 2013).

### 3.1.2 Kamera og rigg

Kameraet brukt i dette eksperimentet er av typen HgCdTe SWIR (Specim, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland). Kameraet har en nominell spektral rekkevidde på 1000 - 2500 nm fordelt på 256 spektrale kanaler og med en oppløsning på 14 bit. Kameraet utfører linjescanning av 1 x 320 piksler per linje, og en motor beveger kameraet og laseren slik at hele waferen belyst og fotografert. Både riggen og kameraet er koblet til en datamaskin hvor parametre som bildetakingsfrekvens og scannehastighet kan justeres.

### 3.1.3 Laser

Til belysning av silisiumwaferer ble det brukt en laser av typen Lasiris Magnum II. Den opererer med en bølgelengde på 808 nm  $\pm$  1 nm, og har en innstrålt effekt på omtrent 2 W/cm<sup>2</sup> og en uniform intensitetsfordeling i lengden.

### 3.1.4 Høypassfilter

Et høypassfilter på 850 nm ble plassert foran kameralinsen for å forhindre andreordens brytning på 1616 nm inne i kameraet som følge av refleksjon av laserinnstrålingen på 808 nm. Filteret stenger ute all innkommende stråling som har kortere bølgelengde enn 850 nm, slik at unødvendig støy i bildene unngås.



### 3.1.5 Kryogenisk beholder

Til nedkjølingen av silisiumwaferene ble det brukt en kryogenisk beholder fylt med flytende nitrogen. Beholderen er bygd av overingeniør Arne Svendsen ved NMBU, og er dekket av et tykt isolerende lag bestående av styrofoam. På oversiden av beholderen er det en plate av aluminium hvor waferene kan legges. I kontakt med denne aluminiumsoverflaten er det kjøleribber som er senket ned i det flytende nitrogenet. I tillegg er det laget små dyser på oversiden av aluminiumsplatene som fører nitrogendamp over silisiumwaferen for ytterligere kjøling og reduksjon av luftfuktigheten samtidig som rimdannelse minimeres.

### 3.1.6 Termometer

Temperaturen til silisiumwaferene som ble plassert på den kryogeniske beholderen ble avlest på TENMA 72-7712 T-type. Termometeret kan registrere temperaturer i temperaturområdet - 250 °C til 400 °C, med en usikkerhet på  $0,5 \% \pm 0,8$  (Tenma. (2012)).

### 3.1.7 QSSPC-utstyr

Utstyret som ble brukt til levetidsmåling av minoritetsladningsbærere bærer navnet "BCT-400 Photoconductance Tool". Det er spesialbestilt og levert av Sinton Consulting Inc. Høypassfilteret på 850 nm er opprinnelig en del av dette utstyret.

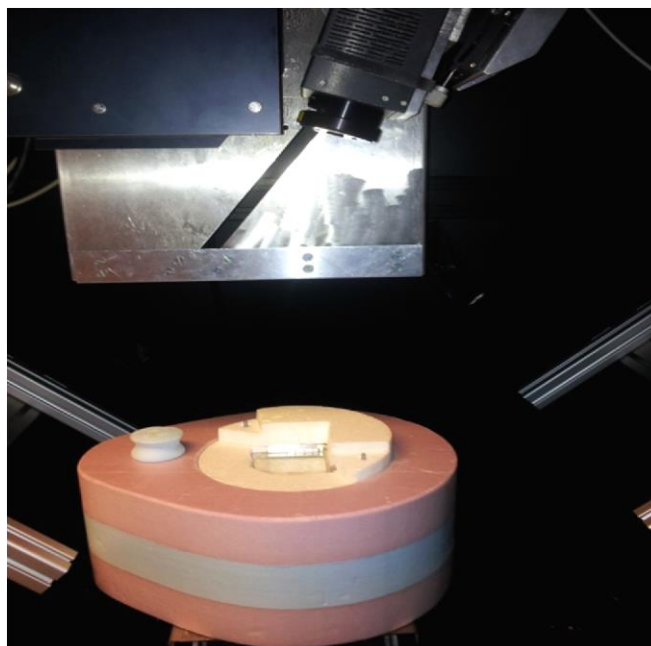
## 3.2 Fremgangsmåte

Dette delkapittelet dekker behandlingen av utstyr og wafere, samt hvordan dataene ble uthentet og bearbeidet.

### 3.2.1 Hyperspektrale bilder

Silisiumwaferene ble håndtert ved hjelp av to pinsetter for å unngå fett og annen forurensning av waferne. En pinsett med flate klemmer ble brukt for å løfte waferne, og en for å støtte og presse imot så det gikk an å få grep med den første. Når de hyperspektrale bildene skulle tas ble den kryogeniske beholderen plassert på et justerbart stativ, hvor det ble utført en høydejustering for å få waferene i optimalt fokus. Dette var tilfellet for både de nedkjølte bildene og de romtempererte bildene. Avlest temperatur når de hyperspektrale bildene ble tatt var  $-180\text{ °C}$  for de nedkjølte bildene, og  $25\text{ °C}$  for de romtempererte bildene. Bildene av waferne ble tatt i en konsekvent rekkefølge og med samme fysiske orientering for å lettere kunne sammenligne bildene senere. Høypassfilteret ble tapet fast under katedralinsen for å fjerne uønskede signaler.

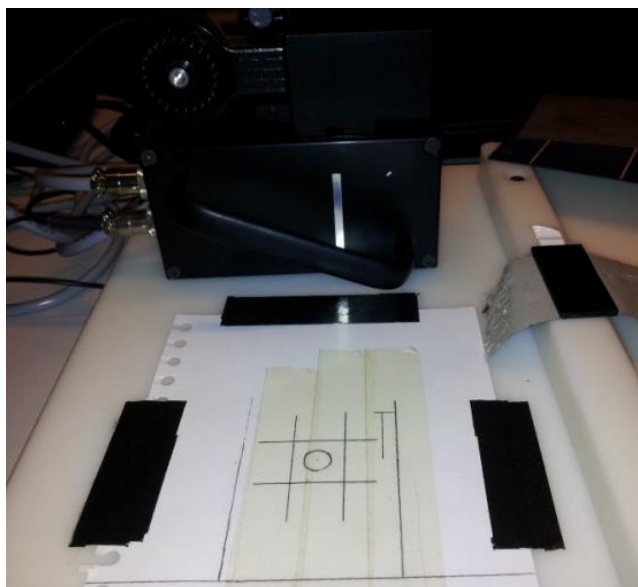
Etter at kameraet hadde tatt bilde av en wafer ble det tatt et nytt bilde med lukkeråpningen igjen. Dette for å kunne trekke fra støy og korrigere for pikselvariasjoner i det opprinnelige bildet. Dataene fra bildene ble lagret som raw-filer og hdr-filer på datamaskinen som kameraet var koblet opp mot, og disse ble overført til en annen datamaskin og prosessert videre. Figur 21 viser utstyrsoppsettet for den hyperspektrale bildetakingen.



Figur 21: Utstyrsoppsettet for bildetakingen. Den kryogeniske beholderen står i bunn av bildet, kameraet er bak den svarte boksen oppe til venstre og laseren henger oppe til høyre.

### 3.2.2 QSSPC-målinger

For å sikre at QSSPC-målingene ble tatt i de samme områdene for hver wafer, ble det tegnet opp et rutenett som igjen ble dekket over med gjennomsiktig teip for å minimere forurensning av waferne. I likhet med fremgangsmåten for de hyperspektrale bildene ble waferne håndtert ved hjelp av to pinsetter. Under avlesningen av levetiden til minoritetsladningsbærerne ble det tatt utgangspunkt i samme injeksjonsnivå for å bedre kunne sammenligne dataene. Disse målingene ble kun gjort i romtemperatur (25°C). Hvert waferpunkt ble målt tre ganger for å minimere målefeil. Utstyret som ble brukt vises i figur 22.



Figur 22: QSSPC-apparatet med rutenettet brukt til levetidsmåling av minoritetsladningsbærerne.

### 3.2.3 Bearbeiding av data

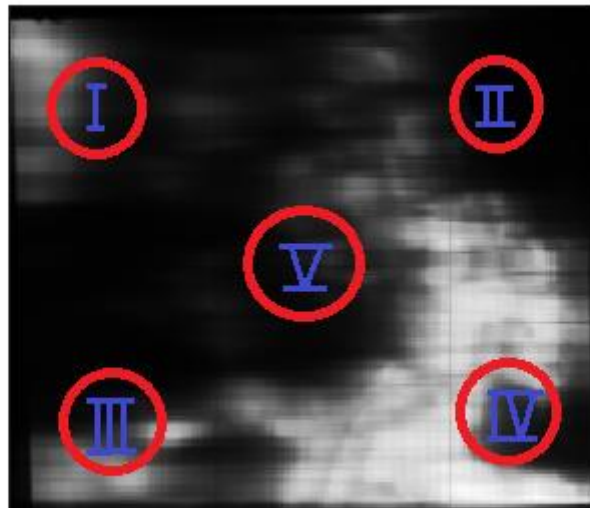
De hyperspektrale bildene ble lagret i to deler på datamaskinen som var tilknyttet kameraet og riggen. Hoveddataene ble lagret i en raw-fil, og en header-fil med informasjon om blant annet kamerainnstillinger og bølgelengdeverdier for de 256 spektrale kanalene. Disse datafilene ble overført til en annen datamaskin, hvor de ble videre prosessert. Forskjellige MATLAB-script ble brukt for å fjerne uønsket støy og redusere størrelsen på bildene for å bare få med waferne. MCR-analysene ble gjort ved hjelp av utvidelsespakken Solo+MIA og PLS\_Toolbox fra Eigenvector Research Inc., USA.

## 4 Resultater og diskusjon

Resultater av de hyperspektrale bildene, QSSPC-målingene, og MCR-analysen vil bli presentert og diskutert i dette kapitlet.

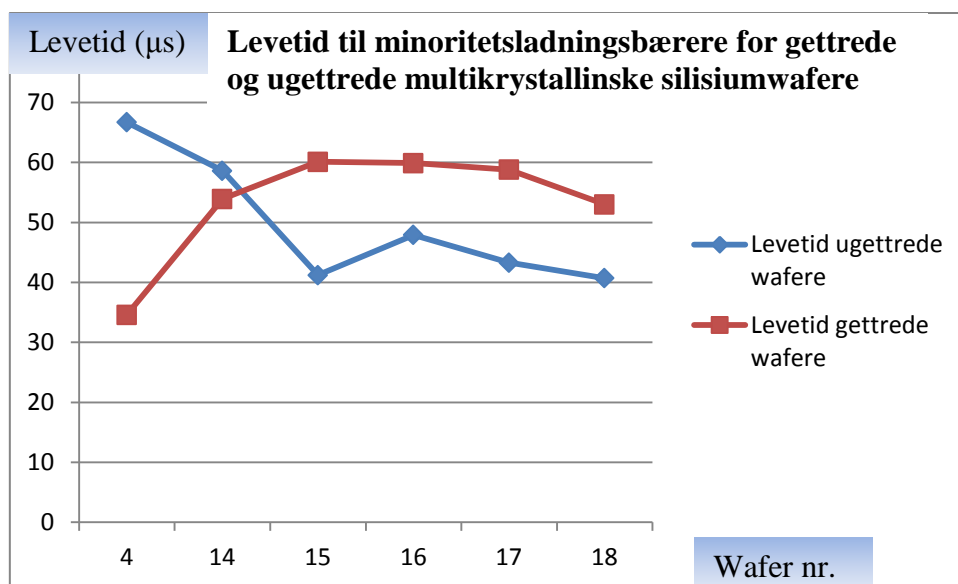
### 4.1 QSSPC-målinger

Levetiden til minoritetsladningsbærerne ble avlest i fem punkter for hver av de totalt 12 waferne som ble inkludert i denne studien. Figur 23 viser hvilke områder av waferne som ble undersøkt, og for hvert punkt ble det foretatt tre målinger med et tidsopprom mellom hver enkelt måling.



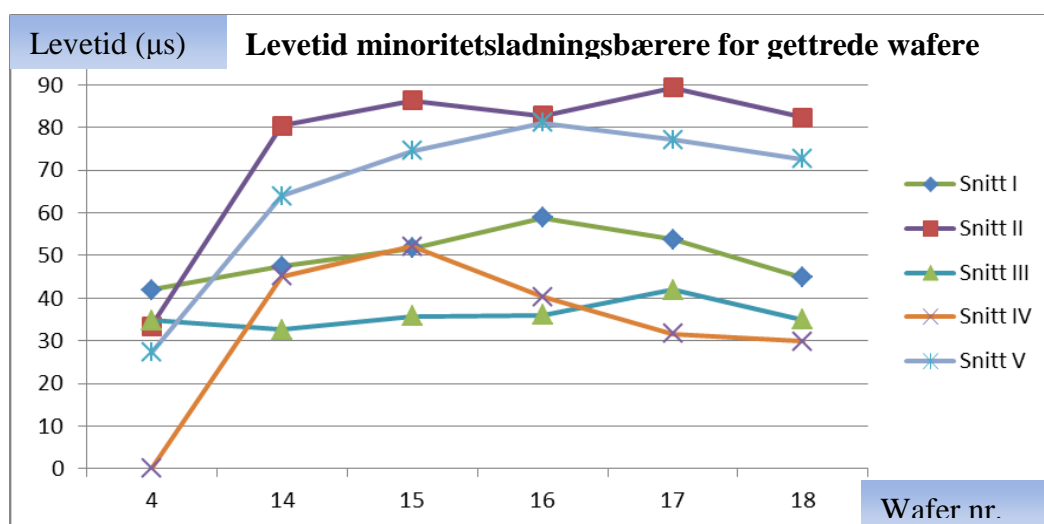
Figur 23: *Hyperspektralt bilde av bånd-til-bånd (BB) luminesens i en av waferne i studien med markering av punktene hvor levetiden til minoritetsladningsbærerne ble målt.*

Målingene ble gjort i romtemperatur og avlesning av verdiene ble gjort med et utgangspunkt i injeksjonsnivå på  $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  for alle waferne. Alle måledataene fra QSSPC-målingen kan ses i vedlegg A. En oversikt over den gjennomsnittlige levetiden til minoritetsladningsbærerne vises i figur 24.



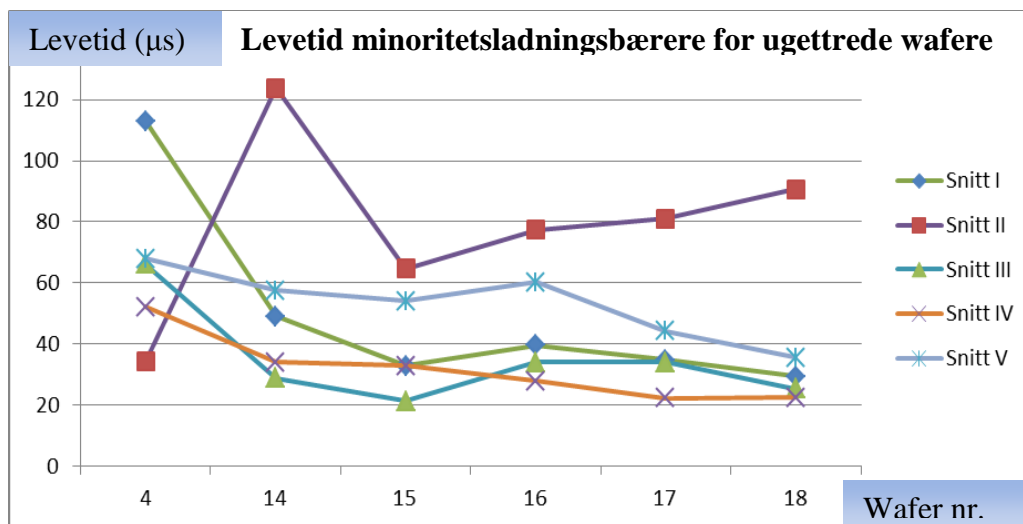
Figur 24: Figuren viser den gjennomsnittlige levetiden til minoritetsladningsbærerne for hver wafer.

Levetiden til minoritetsladningsbærerne i de gettrede waferne er høyere enn i de ugettrede waferne for wafer 15, 16, 17 og 18. For 4 og 14 er levetiden til høyere i de ugettrede waferne. Den gjennomsnittlige levetiden til minoritetsladningsbærerne for hvert enkelt punkt vises i figur 25 og 26.



Figur 25: Figuren viser den gjennomsnittlige levetiden til minoritetsladningsbærerne for hvert av de fem aktuelle punktene i de gettrede waferne.

Det foreligger ingen data fra punkt IV for wafer 3-4 på grunn av at en bit av waferen knakk under håndtering. Dette skjedde under forsøket på å fjerne waferen etter den hyperspektrale avbildningen.



Figur 26: Figuren viser den gjennomsnittlige levetiden til minoritetsladningsbærerne for hvert av de fem aktuelle punktene i de ugettrede waferne.

Det kan virke som levetiden til minoritetsladningsbærerne i de gettrede waferne øker fra wafer 4 og opp til wafer 15, og at det motsatte skjer for de ugettrede waferne. Dette med unntak av punkt II i de ugettrede waferne, som har den klart høyeste, målte verdien i wafersett 14, og som i tillegg ligger et stykke over verdiene for de andre punktene i de ugettrede waferne. Punkt II har høye verdier også i de gettrede waferne, med unntak av verdien for wafer 4. Punkt I i wafer 4 for de ugettrede waferne har også en høy verdi i forhold til de andre punktene for samme wafer. Hva dette skyldes er usikkert, men målefeil og variasjon i waferne kan være mulige forklaringer.

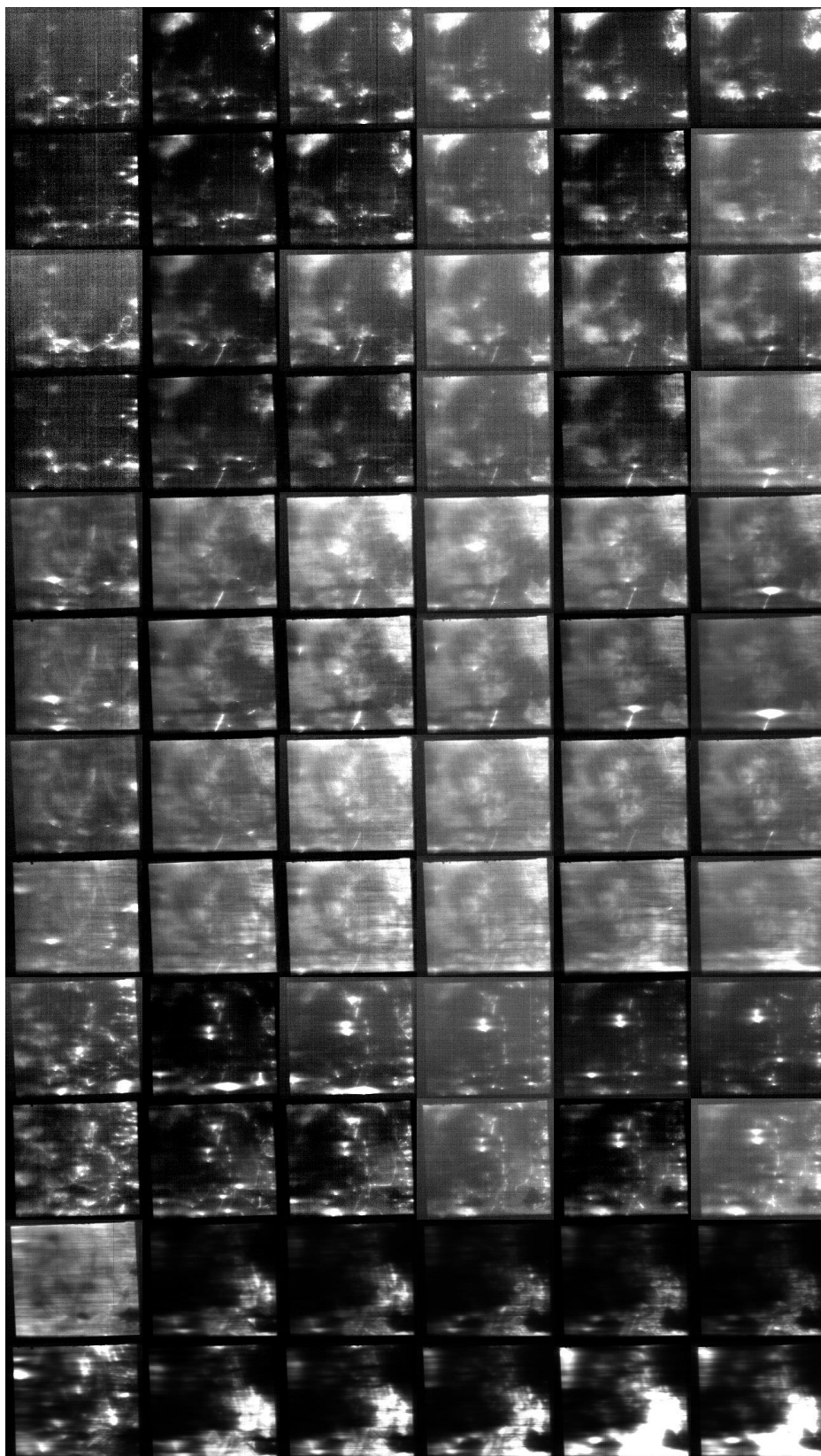
## 4.2 Hyperspektrale bilder av nedkjølte wafere

De hyperspektrale bildene tatt i denne studien består i utgangspunktet av 24 bilder fordelt på 12 wafere. Begge wafer-settene er avbildet både i romtemperatur og avkjølt tilstand. For hvert bilde er det trukket ut forhåndsbestemte spektrale områder som dekker fotonenergien til den tidligere omtalte DRL-en i form av D1, D2, D3, D4, D075. Disse spektralområdene er vist i tabell 2:

DRL + BB	Spektrale bånd	Fotonenergi (E)	Bølgelengder ( $\lambda$ )
D1	( 95:100 )	0,817 eV - 0,800 eV	1519 nm - 1550 nm
D2	( 75:80 )	0,891 eV - 0,871 eV	1393 nm - 1424 nm
D3	( 59:63 )	0,960 eV - 0,942 eV	1292 nm - 1317 nm
D4	( 49:52 )	1,009 eV - 0,994 eV	1229 nm - 1248 nm
D075	( 113:130 )	0,760 eV - 0,714 eV	1632 nm - 1738 nm
BB	( 30:40 )	1,119 eV - 1,059 eV	1109 nm - 1172 nm

Tabell 2: Tabellverdier for de spektrale komponentene trukket ut i de hyperspektrale bildene brukt i denne studien.

Det er også uthentet data om BB-luminesensen fra waferne. Totalt er 144 spektrale bilder trukket ut av de 24 opprinnelige bildene, og de 72 nedkjølte bildene som dekker DRL og BB for både gettrede og ugettrede wafere vises i figur 27.

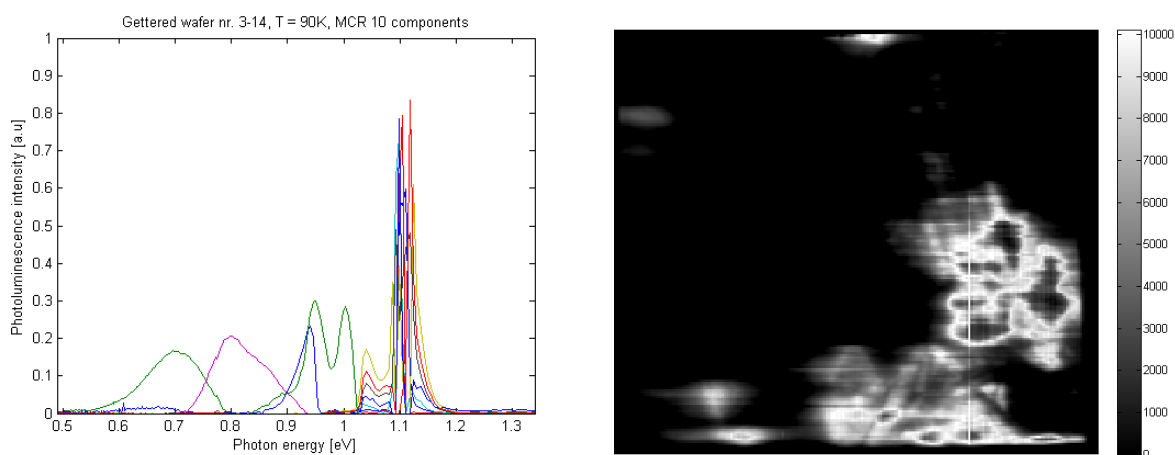


Figur 27: Hyperspektrale bilder av gettrede og ugettrede, nedkjølte wafere.



### 4.3 MCR-analyse

Som nevnt i kapittel 2.6 trekker Multivariate Curve Resolution (MCR) ut den spektrale informasjonen fra en hyperspektral datafil og deler denne inn i separate komponenter. Disse komponentene blir vanskeligere å skille dersom signalet er svakt, og waferne som er studert i denne oppgaven er relativt dårlige wafere med mye urenheter/defekter og tilsvarende dårlig levetid. MCR-analysen har derfor ikke vært så vellykket som den kunne ha blitt med bedre prøver. Noen av MCR-dataene vil likevel bli brukt som resultater, og kommentert med forbehold. Antall uttrukke komponenter varierer for hver wafer, og enkelte signal blir feilaktig delt opp i flere signaler. Støy er også en betydelig faktor som påvirker resultatene. Figur 28 viser data fra MCR-analysen for wafer 3-14.



Figur 28: Venstre side av figuren viser de 10 komponentene som MCR-analysen fikk ut av bildeinformasjonen for wafer 3-14. Høyre side viser signalet fra en av komponentene.

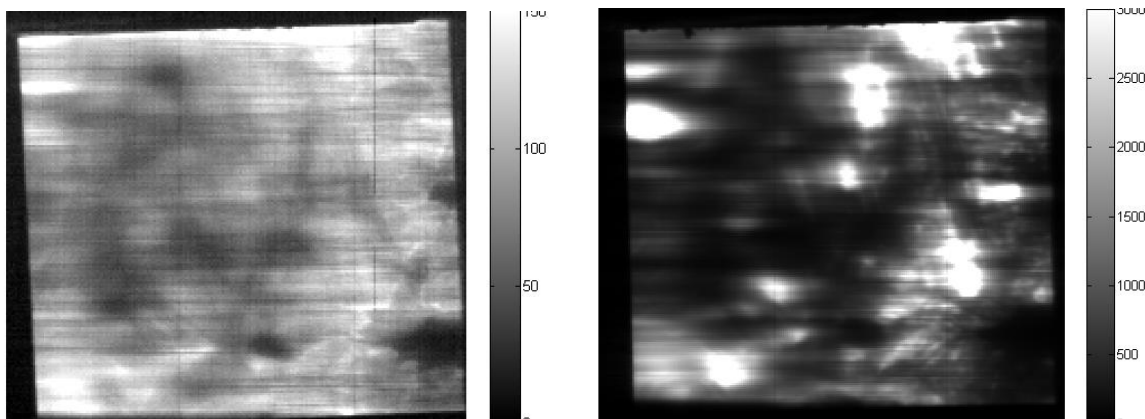
Figur 28 viser noe av resultatet fra MCR-analysen for wafer 3-14. Ut fra bildekomponenten i figuren, er det helt klart noe feil med en av komponentene hvor BB-signalet er trukket ut. Som observert i de nederste hyperspektrale bildene i figur 27, er BB-signalet annerledes enn bildekomponenten i figur 28, og de mørke områdene med lyse omriss representerer ikke den fysiske virkeligheten. Denne forskjellen kan tilskrives MCR-analysens feilaktige vurdering av å dele opp BB-signalet i flere komponenter. Hvorfor denne feilaktige oppdelingen skjer, er usikkert, men det kan ha sammenheng med wafernes relativt dårlige kvalitet.

## 4.4 Utvalgte hyperspektrale bilder for nærmere analyse

Noen utvalgte hyperspektrale bilder vist i figur 27 vil bli trukket frem og analysert nærmere. I denne analysen vil mulige sammenhenger mellom QSSPC-målingene, MCR-analysen og de hyperspektrale bildene bli kommentert. Hovedfokuset i resultatene ligger på sammenligning av DRL for gettrede og ugettrede wafere fra de hyperspektrale bildene, og da særlig for D1. Resultatene fra MCR-analysen brukes for bedre sammenligningsgrunnlag noen steder, men en fullstendig oversikt over de forskjellige signalene fra MCR-analysen vil bli presentert separat i slutten av kapittelet.

### 4.4.1 Nedkjølt wafer 1-4 og 3-4

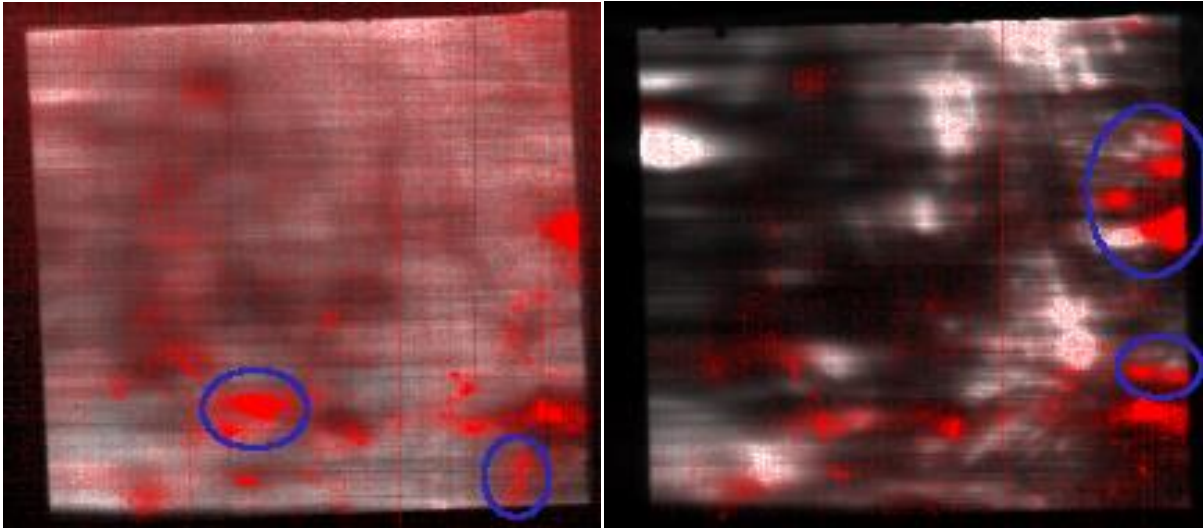
Wafersett 4 er tatt fra toppen av silisiumblokken, og befinner seg mye nærmere "red-zone" enn de andre wafersettene. Resultatene fra dette wafersettet er følgelig mer preget av en større andel urenheter.



Figur 29: Hyperspektrale bilder av *BB*-signal for ugettret (venstre) og gettret wafer (høyre) fra nedkjølt wafersett 4.

Figur 29 viser de skalerte bildene av *BB*-signalet fra nedkjølt wafersett 4. Den ugettrede waferen har et mye svakere signal enn den gettrede fordi den er fra toppen av silisiumblokken, og i den såkalte "red-zone", hvor andelen urenheter er svært høy. Bildene er skalert for å bedre kunne sammenligne styrken på signalet for de forskjellige waferne. For

BB-signalet til wafersett 4 var det ikke mulig å skalere bildene likt, men for øvrige DRL-bilder av D-linjene videre i oppgaven, er skaleringen tilnærmet lik i alle bildene. De to lodrette, mørke strekene i den ugettrede waferen skyldes pikselfeil i kameraet.



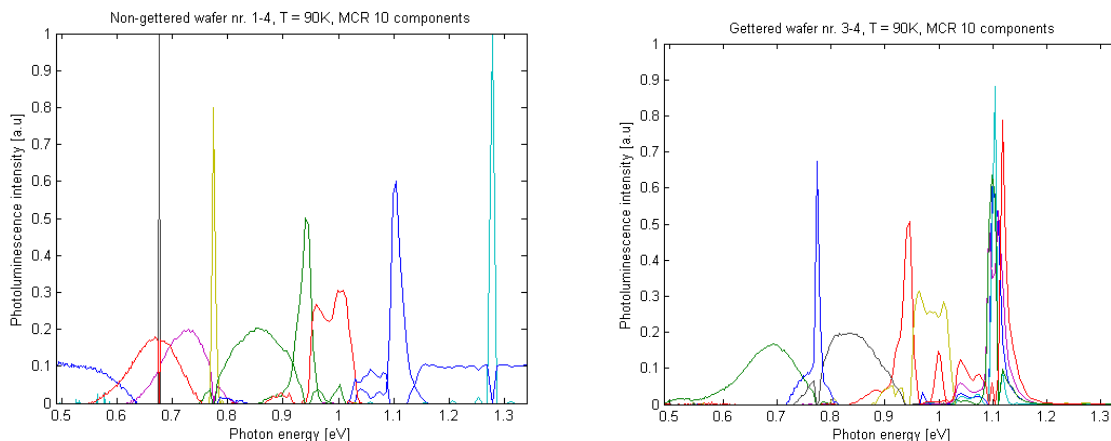
Figur 30: D1-signalet (rødt) lagt over BB-signalet for ugettret (venstre) og gettret (høyre) nedkjølt wafersett 4.

I figur 30 er områdene som skiller seg ut ved sammenligning av DRL fra D1 i nedkjølt wafersett 4, utringet i blått. Signalet fra det venstre utringede området i den ugettrede waferen er både mindre i utstrekning og svakere sammenlignet med tilsvarende område i den gettrede waferen. Signalet utringet i nedre høyre hjørne av den ugettrede waferen er vanskelig å finne igjen i den gettrede waferen, men det tyder på at også dette området har mindre DRL fra D1 i den gettrede waferen. De to punktene utringet i den gettrede waferen viser et sterkere og mer utbredt signal enn i den ugettrede waferen. I det øverste utringede området i den gettrede waferen er det i tillegg tre konsentrerte DRL-signaler fra D1 som ikke kan observeres i den ugettrede waferen, samtidig som D1-signalet for samme område i begge waferne virker sterkere og noe større i den gettrede waferen enn i den ugettrede waferen. En tilsynelatende nedgang av DRL fra D1 i noen områder ved sammenligning av den ugettrede og den gettrede waferen, og en økning av DRL fra D1 ved sammenligning av andre områder, kan tyde på at DRL i dette energiområdet kommer fra flere steder enn kun D1.

Wafer	I	II	III	IV	V	Gjennomsnittlig levetid	Gjennomsnitt wafer
"3-4"	39.6	33	34.9	-	27.3	33.7 $\mu$ s	
"3-4"	42	33	34.3	-	26.5	33.9 $\mu$ s	34.4 $\mu$ s
"3-4"	44.4	34.2	35.3	-	27.7	35.4 $\mu$ s	
"1-4"	116	34.9	69.7	57.8	74.5	70.6 $\mu$ s	
"1-4"	113	34.5	62.1	52.9	66.4	65.8 $\mu$ s	66.7 $\mu$ s
"1-4"	110	33.1	66.8	45.7	63	63.7 $\mu$ s	

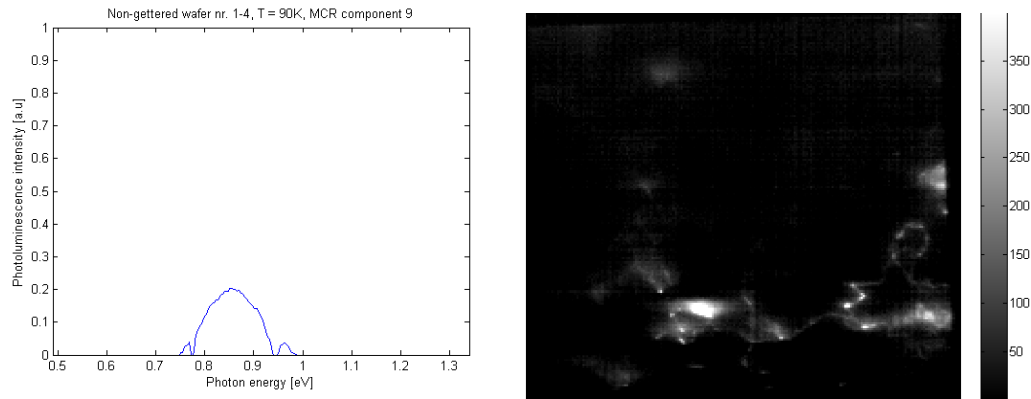
Tabell 3: Data for levetiden til minoritetsladningsbærerne fra QSSPC-målingen for wafersett 4 i gettret (3-4) og ugettret (1-4) wafer.

Kun det utringede defektsignalet i nedre høyre hjørne av den ugettrede waferen er innenfor et av områdene i QSSPC-målingen. Dette er område IV, og fra dataene i QSSPC-målingen for wafersett 4 kommer det frem at det var nettopp denne delen av wafer 3-4 som knakk av på grunn av dårlig håndtering under den hyperspektrale bildetakingen. Dette gjør det umulig å trekke noen paralleller mellom forskjellene i DRL-signalet fra D1 for wafersett 4, og QSSPC-dataene. Noe som er verdt å merke seg ved QSSPC-dataene, er at levetiden til minoritetsladningsbærerne i den ugettrede waferen er overraskende høy med tanke på hvor dårlig BB-signalet er. Særlig i område I, III og V er levetiden mye høyere i den ugettrede waferen enn i den gettrede waferen. Dette svekker potensielt korrelasjonen mellom levetid og BB-signal i denne silisiumwaferen, men årsaken er sannsynligvis målefeil eller feil under den hyperspektrale bildetakingen.



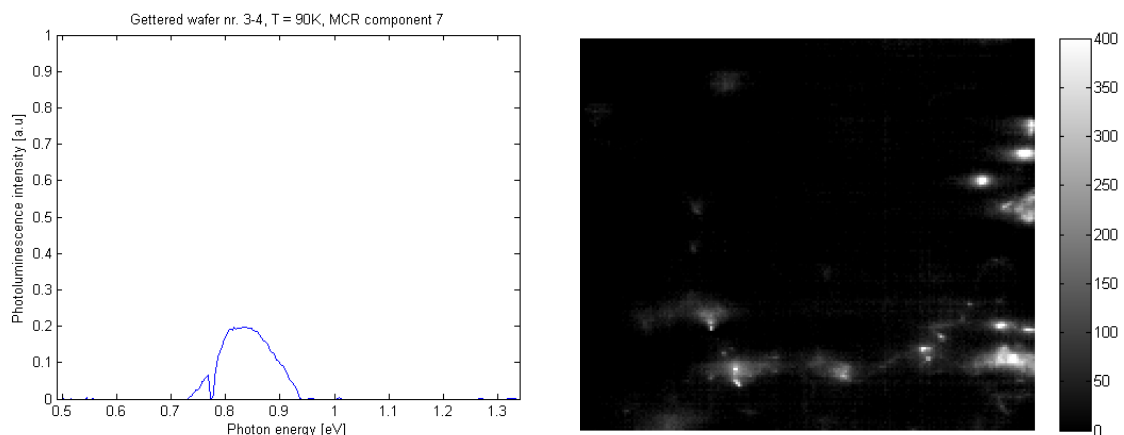
Figur 31: Figuren viser plottene av de 10 spektrale komponentene som MCR-analysen har trukket ut fra det opprinnelige hyperspektrale bildet fra nedkjølt wafer 1-4 (venstre) og 3-4 (høyre). Y-aksen viser signalets relative intensitet, og x-aksen viser fotonenergien forbundet med signalet.

Figur 31 viser en del av resultatet fra MCR-analysen for wafersett 4. Venstre del viser signalet fra ugettet wafer 1-4 inndelt i 10 komponenter, og høyre del viser samme antall komponenter for gettet wafer 3-4. Grunnet støy og i utgangspunktet dårlige wafere, er det noen av komponentene som ikke er brukbare til videre analyse. Det virker også som at MCR-analysen ikke har klart å dele signal fra forskjellige kilder i separate komponenter. Dette gjelder blant annet for noen av D-linjene. Dette kommenteres ytterligere i løpet av de neste sidene. Som figur 31 viser, så er det ikke bare de forventede signalene fra D1, D2, D3, D4, D075 og BB som trekkes ut som komponenter i MCR-analysen. Plottet av ugettet wafer 1-4 i figur 31 har komponenter med energi varierende fra 0,55 eV til 1,28 eV. En oppsummering av komponenter fra plottene for alle waferne vil bli presentert senere i oppgaven.



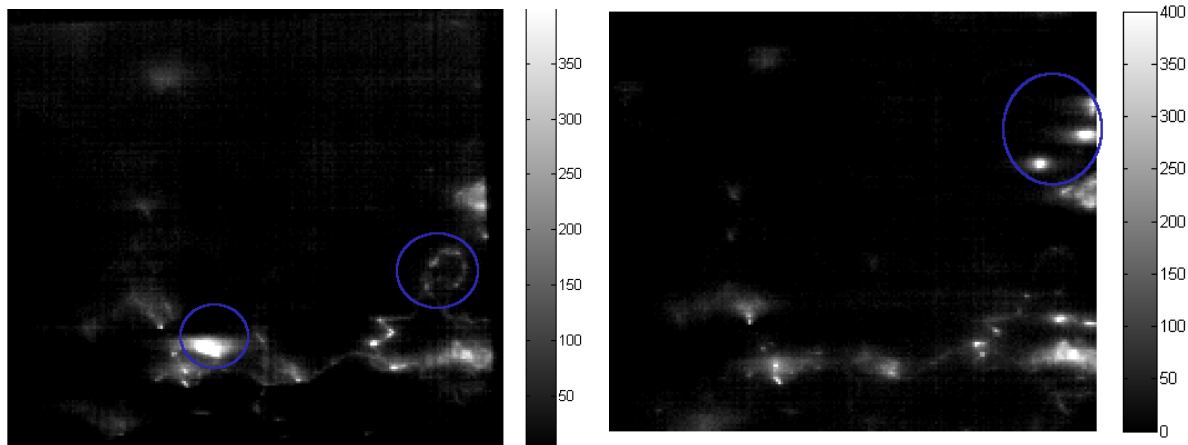
Figur 32: Plot og bildekomponent av D1 og D2 fra MCR-analyse for ugettret wafer 1-4.

Figur 32 viser et av plottene med tilhørende bildekomponent fra MCR-analysen. Fra kurven kan det virke som at signal fra både D1 (0,8 eV - 0,817 eV) og D2 (0,871 eV - 0,891 eV) er trukket ut som en enkelt komponent. Ved nærmere observasjon av hovedkurven i plottet, er det mulig å se en usymmetrisk forhøyning på høyre del av kurven i energi-området til D2. De små forhøyningene på hver side av hovedkurven er trolig en del av hovedkurven. I bildekomponenten vises en distinkt form i nedre, høyre del som minner litt om toppen av en stjerne. Dette signalet har såpass rette linjer at opphavet til signalet trolig er en fysisk skade i overflaten av waferen.



Figur 33: Plot og bildekomponent av D1 og D2 fra MCR-analyse for gettret wafer 3-4.

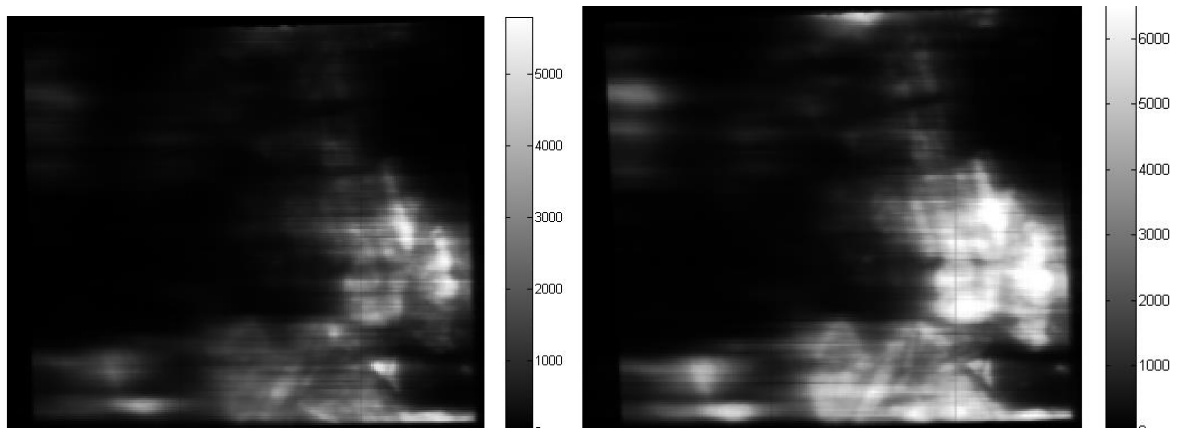
Figur 33 viser plot og tilhørende bildekomponent fra MCR-analysen av D1 og D2 for gettret wafer 3-4. Likheten mellom figur 32 og figur 33 er stor, noe som framgår av figur 34.



Figur 34: *Bildekomponentene til figur 32 og figur 33 fra MCR-analysen for ugettret (venstre) og gettret (høyre) wafer.*

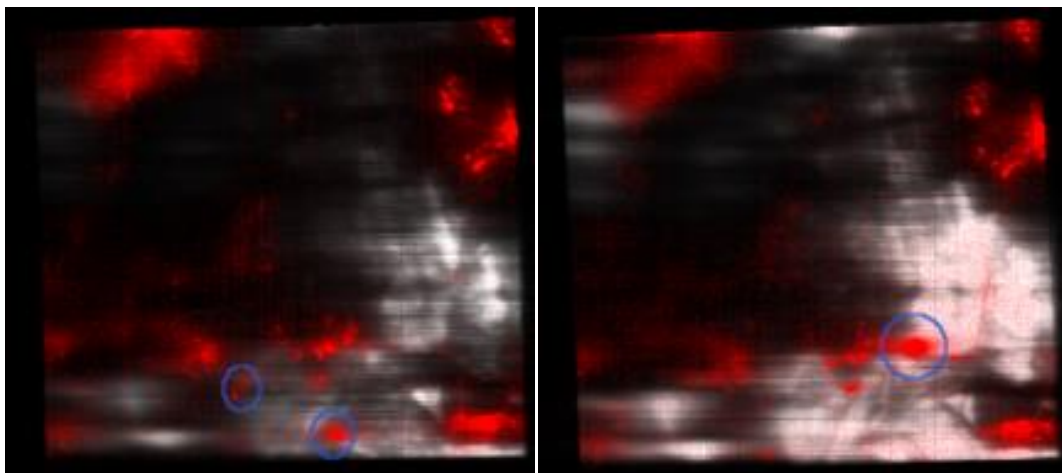
I den ugettrede waferen på venstre side av figur 34 er det utringet to områder med relativt sterkt signal som ikke er til stede i den gettrede waferen til høyre. Samtidig er det utringet et område i den gettrede waferen hvor det kan observeres tre signaler som ikke er å se i den ugettrede waferen. Utringingen til venstre i den ugettrede waferen, og uttringingen i den gettrede waferen samsvarer med to av områdene som ble nevnt i forbindelse med figur 30. I likhet med figur 30, kan det virke som at en del av DRL-signalet i den ugettrede waferen ikke kan observeres i den gettrede waferen, og motsatt. Dette styrker til dels antagelsen fra figur 30 om at signalet kan stamme fra flere kilder, og ut fra plottene i MCR-analysen for figur 32 og 33 er det som nevnt mulig å observere et signal fra D2 som det, ut fra de hyperspektrale bildene, ikke kan nevnes. Dette antyder enten at MCR-analyse gjør det mulig å identifisere sammenhenger mellom DRL som det ellers ville vært vanskelig å finne ved manuell gjennomspøkning av hyperspektrale bilder, eller det kan tyde på at MCR-analysen ikke klarer å skille de forskjellige DRL-signalene. Eventuelt har DRL fra D1 og D2 sitt opphav fra samme type strukturelle feil, noe som gjør at signalet er relativt identisk for D1 og D2.

#### 4.4.2 Nedkjølt wafer 1-14 og 3-14



Figur 35: BB-fotoluminesensbilde med skalering av signalstyrke for wafer 1-14 (venstre) og 3-14 (høyre).

Figur 35 viser BB-signalet for wafersett 14. Det er tydelig at signalet fra BB-fotoluminesensen er kraftigere i den gettrede waferen enn i den ugettrede. Ellers er det klare likhetstrekk mellom de opplyste områdene i waferne.



Figur 36: D1-signalet (rødt) lagt over BB-signalet for wafer 1-14 (venstre) og 3-14 (høyre).

I figur 36 er det tre områder som er utringet i blått. To områder i den ugettrede waferen, og ett område i den gettrede waferen. Det vises at DRL fra D1 i ugettret og gettret wafer er

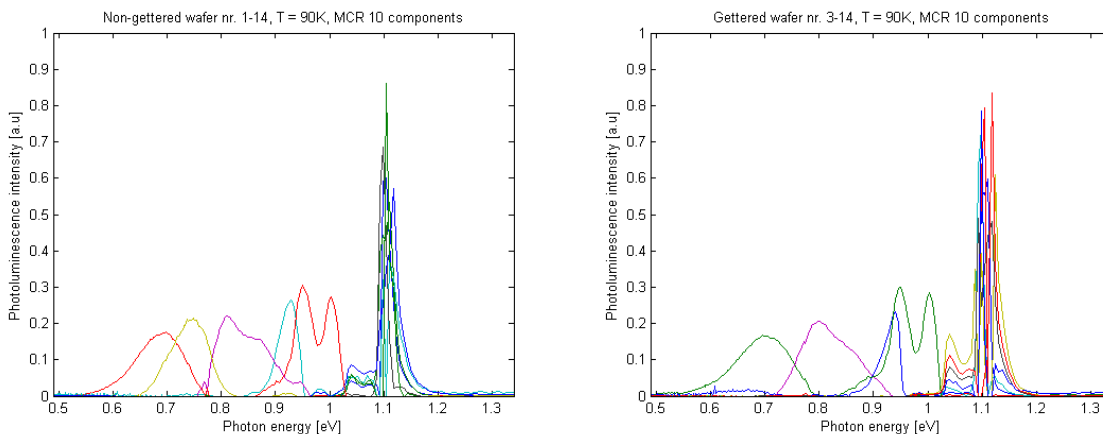


forskjellig særlig i disse punktene, da D1 de to utringede områdene i den ugettrede waferen ikke er observert i den gettrede waferen. Dette kan tyde på at getteringprosessen har vært vellykket i disse områdene med tanke på reduksjon av D1. I tillegg kan det virke som at DRL-signalet fra D1 i øvre, venstre hjørne er gjennomgående sterkere i den ugettrede waferen. Dog er det et utringet område i den gettrede waferen hvor det kan virke som signalet fra D1 har økt betraktelig.

Wafer	I	II	III	IV	V	Gjennomsnittlig levetid	Gjennomsnitt wafer
"3-14"	49,2	79,8	32,8	46,7	61	53,9 $\mu$ s	
"3-14"	47,5	79,4	31,8	43,8	69,5	54,4 $\mu$ s	53,9 $\mu$ s
"3-14"	45,8	81,9	33,3	44,7	61,6	53,5 $\mu$ s	
"1-14"	49,8	132	30,3	35,9	62	62 $\mu$ s	
"1-14"	50,4	123	27,5	34	56,9	58,4 $\mu$ s	58,6 $\mu$ s
"1-14"	46,9	116	28,6	32	53,9	55,5 $\mu$ s	

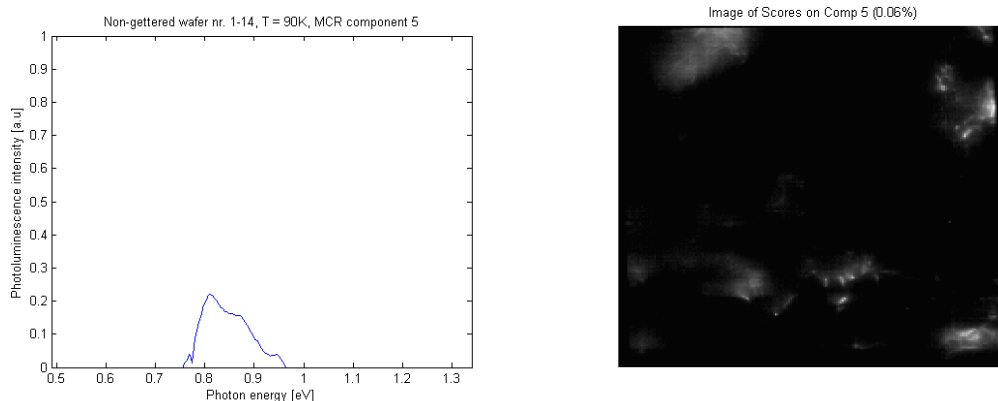
Tabell 4: Data for levetiden til minoritetsladningsbærerne fra QSSPC-målingen for wafersett 14 i gettret (3-14) og ugettret (1-14) wafer.

Fra QSSPC-målingene vises levetiden til minoritetsladningsbærerne for wafersett 14 i tabell 4. Område I, hvor det i figur 36 er tilsynelatende sterkere D1 signal i den ugettrede waferen, er forskjellen i levetid ubetydelig. Det er i tillegg så vidt bedre i den ugettrede waferen, noe som gjør det vanskelig å trekke konklusjoner om korrelasjonen mellom D1 og levetid her. Ellers er det ingen spesielle områder hvor D1 endrer seg merkbart som er innenfor et av QSSPC-målingsområdene. Det kan legges til at levetiden i område II er, relativt sett, høy i begge waferne til tross for at BB-signalet er svært svakt. Område III skiller seg ut som det området med dårligst levetid, men BB-signalet er noe tydeligere enn i område II for begge waferne. Forskjellen i levetid mellom waferne er ikke merkbart stor her, selv om det er et sterkere BB-signal fra wafer 3-14.



Figur 37: Figuren viser plottene av de 10 spektrale komponentene som MCR-analysen har trukket ut fra det opprinnelige hyperspektrale bildet fra nedkjølt wafersett 14. Y-aksen viser signalets relative intensitet, og x-aksen viser fotonenergien forbundet med signalet.

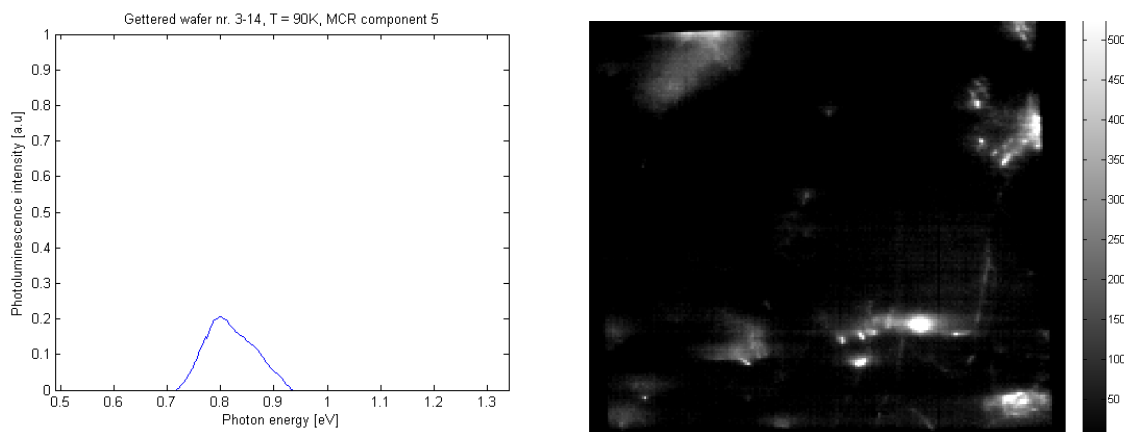
Dataene fra det hyperspektrale bildet av nedkjølt wafersett 14 ble MCR-analysert, og resultatet vises i figur 37. MCR-analysen trakk ut 10 komponenter, hvorav de fleste av disse er BB-signalet (1,059 eV - 1,119 eV). DRL fra D1, D2, D3, D4 og D075 er identifiserbar i utvalgte komponenter, og eksempler på dette vises for wafer 3-14 senere i delkapittelet.



Figur 38: Plot fra MCR-analysen med tilhørende bildekomponent for nedkjølt wafer 1-14.

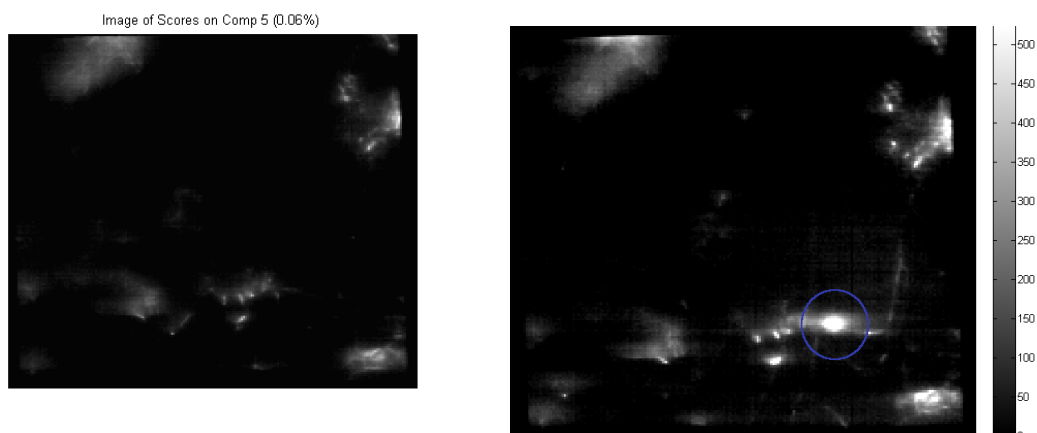
Figur 38 viser komponenten fra MCR-analysen for nedkjølt wafer 1-14 som samsvarer med DRL fra D1 (0,8 eV - 0,817 eV). Det er imidlertid tydelig at MCR-analysen ikke har klart å dele opp signalet tilstrekkelig, da D2 (0,871 eV - 0,891 eV) også kan observeres som en del

av hovedkurven. I tillegg er det et lite signal på ca. 0,92 eV som også er dratt inn i samme kurve. Bildekomponenten i figur 40 viser DRL-signalet som er opphavet til plottet, men det er vanskelig å si hvilke signal som stammer fra de forskjellige områdene av waferen.



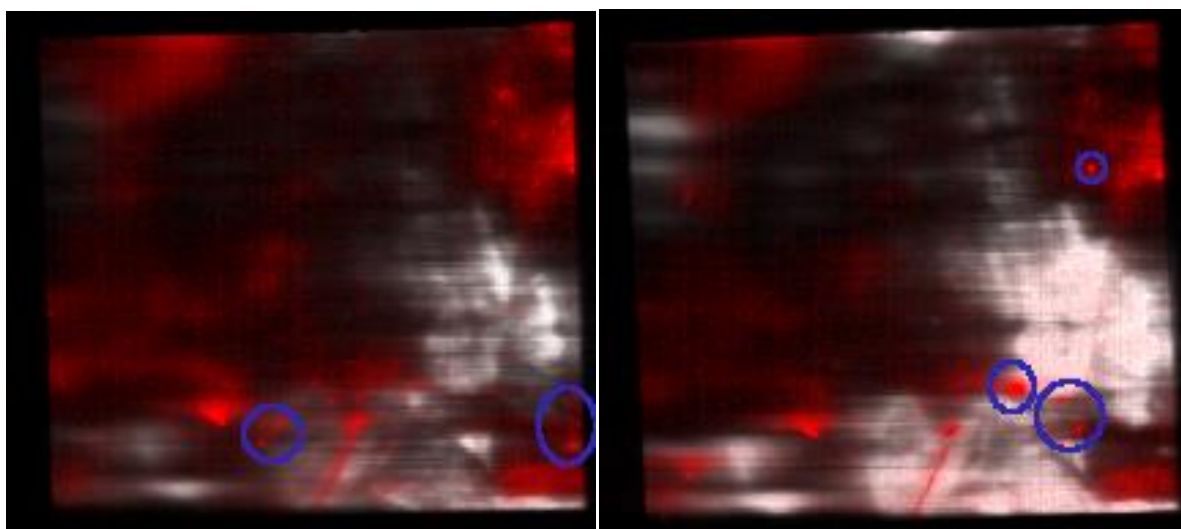
Figur 39: Plot fra MCR-analysen med tilhørende bildekomponent for nedkjølt wafer 3-14.

Figur 39 viser et av plottene fra MCR-analysen hvor signalet med en topp på 0,8 eV samsvarer med forventet signal fra D1 (0,8 eV - 0,817 eV). I likhet med figur 38 er det mulig å observere D2 i hovedkurven, dog litt mindre åpenbar gjennom en forhøyning på høyre side av kurven. Fra tilhørende bildekomponent vises det at DRL fra D1, D2 og eventuelle andre signaler er fordelt over flere områder i wafer 3-14.



Figur 40: Bildekomponentene til figur 38 og figur 39 fra MCR-analysen for ugettret (venstre) og gettret (høyre) wafer.

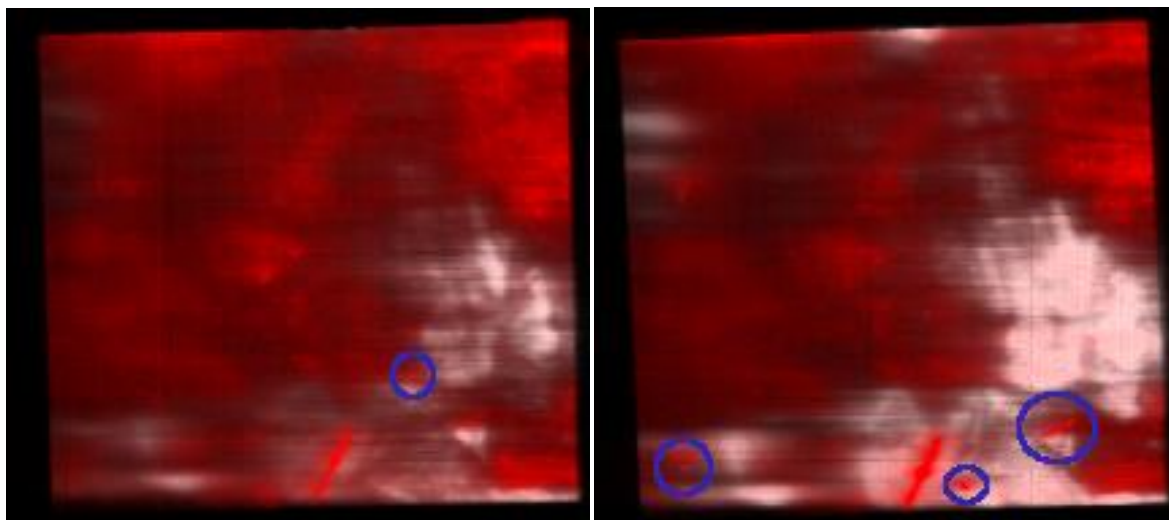
Figur 40 viser bildekomponentene til figur 38 og 39 fra MCR-analysen for wafersett 14. Som forventet er disse forholdsvis like, da plottene for disse komponentene hadde klare likhetstrekk. Ett område i den gettrede waferen er utringet i blått, hvor et relativt sterkt DRL-signal har dukket opp. Det ble observert en lignende endring i dette området i figur 36 fra de hyperspektrale bildene med DRL fra D1, men MCR-analysen har ikke fått med de andre områdene i figur 36 som det ble kommentert en endring i.



Figur 41: Venstre side viser det uttrukkede signalet for D2 lagt over BB-signalet for den ugettrede waferen. Tilsvarende er gjort på høyre side for den gettrede waferen.

I figur 41 vises det områder hvor signalet fra D2 har endret seg for wafersett 14. I den ugettrede waferen, vises to områder markert med blå ring hvor signalet fra D2 ikke er like sterkt eller tilsynelatende har forsvunnet i den gettrede waferen. Ingen av disse områdene ligger innenfor QSSPC-målingen, så noen konklusjoner om korrelasjon mellom disse dataene er det u hensiktsmessig å trekke. Det ble nevnt at område II og område III skiller seg mest ut i QSSPC-målingen for wafersett 14 med henholdsvis best og dårligst levetid. I den gettrede waferen vises tre områder med D2-signal som ikke er observert i den ugettrede waferen. De to signalene nede til høyre i gettret wafer ligger i område IV for QSSPC-målingen, og kan i teorien bidra til redusert levetid i dette området. Fra QSSPC-målingene vises det at levetiden for den gettrede waferen er noe bedre i område IV, noe som gjør at positiv effekt av getteringprosessen i forhold til D2 ikke skal utelukkes, selv om det tilsynelatende har dukket opp mer DRL fra D2 her. Dette økte signalet ligger imidlertid i grenseland til område IV, så

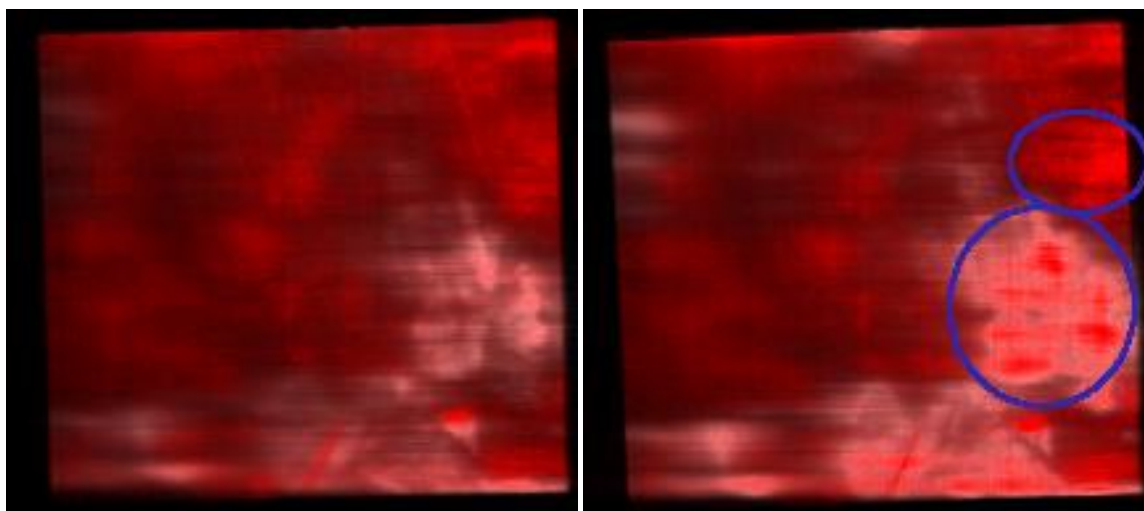
det er vanskelig å si om dette har noen innvirkning på QSSPC-målingen. I tillegg kan det observeres at D2-signalet er noe sterkere oppe i høyre kvadrant av den ugettrede waferen. QSSPC-målingen for dette området sier imidlertid at levetiden til minoritetsladningsbærerne er høyest i den ugettrede waferen.



Figur 42: Figuren viser D3-signalet (rødt) lagt over BB-signalet for nedkjølt wafersett 14. Ugettret wafer vises til venstre, og gettret wafer vises til høyre i figuren.

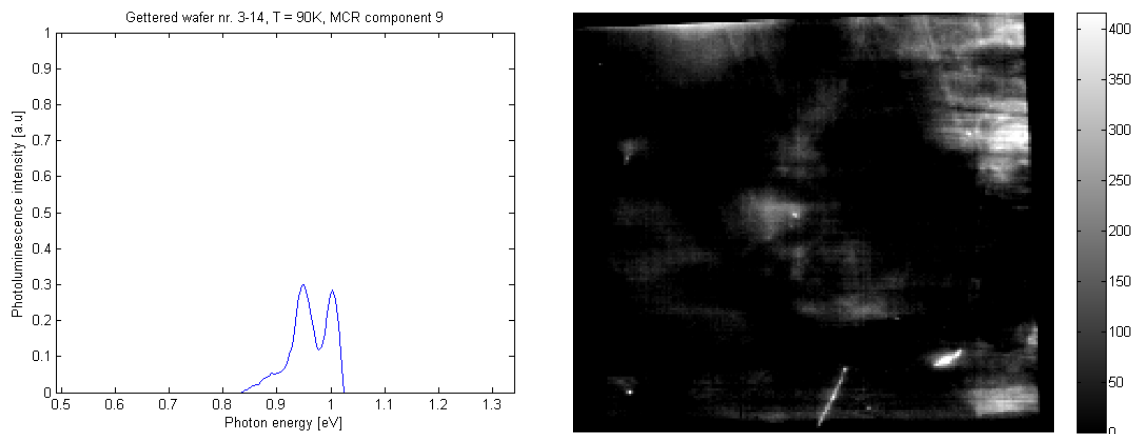
Figur 42 viser hvordan D3-signalet framstår i forhold til BB-signalet for nedkjølt wafersett 14. Et lite område i den ugettrede waferen er utringet i blått, og dette D3-signalet i dette punktet er ikke like tydelig i den gettrede waferen. Dette punktet er veldig lite, og det observeres veldig få slike punkt med sterk intensitet for hele wafersettet med hensyn på D3. Opphavet til punktet kan antas å være en fysisk skade i overflaten på den ugettrede waferen. I den gettrede waferen er det tre områder som skiller seg ut fra den ugettrede waferen. Området nede til venstre i den gettrede waferen har likhetstrekk med området som er utringet i den ugettrede waferen. At dette også er en fysisk defekt er nærliggende å tro. Ellers er det to områder som er utringet på nedre, høyre del av den gettrede waferen. D3-signalet er sterkere i disse to områdene i den gettrede waferen enn i den ugettrede, og det utringede området lengst til høyre ligger innenfor område IV fra QSSPC-målingen. Data fra QSSPC-målingen for område IV tilsier at levetiden er noe bedre i den gettrede waferen. Om det endrede D3-signalet i område IV har innvirkning på levetiden til minoritetsladningsbærerne er vanskelig å si med så lave måleverdier, men getteringprosessen kan ikke sies å ha redusert DRL fra D3 ut

fra disse dataene. Ellers er det et signal fra D3 som er formet som en skrå strek i bunn av wafersett 14, som er sterkere i den gettrede waferen. Formen på dette signalet antyder at opphavet er en strukturell feil, sannsynligvis en sprekk, i waferen. I så fall kan det tyde på at getteringprosessen har økt DRL fra D3 i denne antatte sprekken. Ved observasjon av de større områdene i wafersett 14 kan det virke som at D3-signalet er litt svakere jevnt over. Dette kan være en positiv effekt av getteringprosessen.



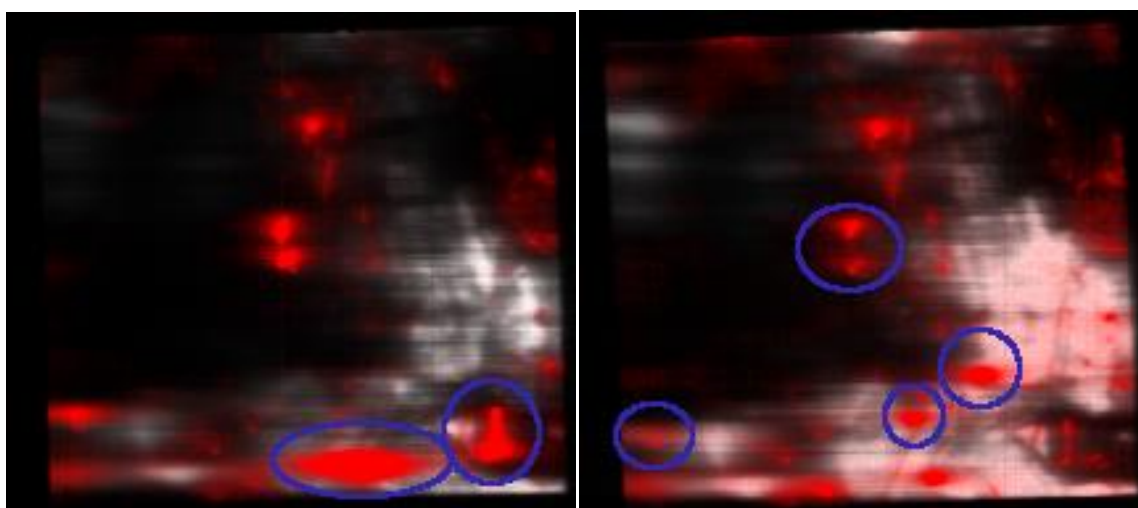
Figur 43: Figuren viser DRL fra D4 (rødt) lagt over BB-signalet for wafersett 14. Venstre side viser ugettret wafer, og høyre side viser gettret wafer.

I figur 43 vises forskjellene mellom D4-signalet for ugettret og gettret, nedkjølt wafersett 14. Et større område utringet til høyre i den gettrede waferen viser sterkere DRL fra D4 enn i den ugettrede waferen. I tillegg er det utringet et mindre område over dette som viser et noe sterkere D4-signal i den gettrede waferen enn i den ugettrede waferen. Det øvre, utringede området ligger i grenseland til område II fra QSSPC-målingen. Generelt for hele wafersettet virker det som D4-signalet er noe sterkere i den gettrede waferen. QSSPC-målingen for område II viser som sagt at levetiden er noe bedre i den ugettrede waferen. Fra figur 43 kan det observeres at getteringprosessen tilsynelatende ikke har fungert for å redusere DRL fra D4. Likheten mellom DRL fra D3 i figur 42 og DRL fra D4 i figur 43 er påfallende. Teori som kobler disse to sammen, hvor D3 er forklart som en fononreplika av D4, avkreftes ikke av disse likhetene.



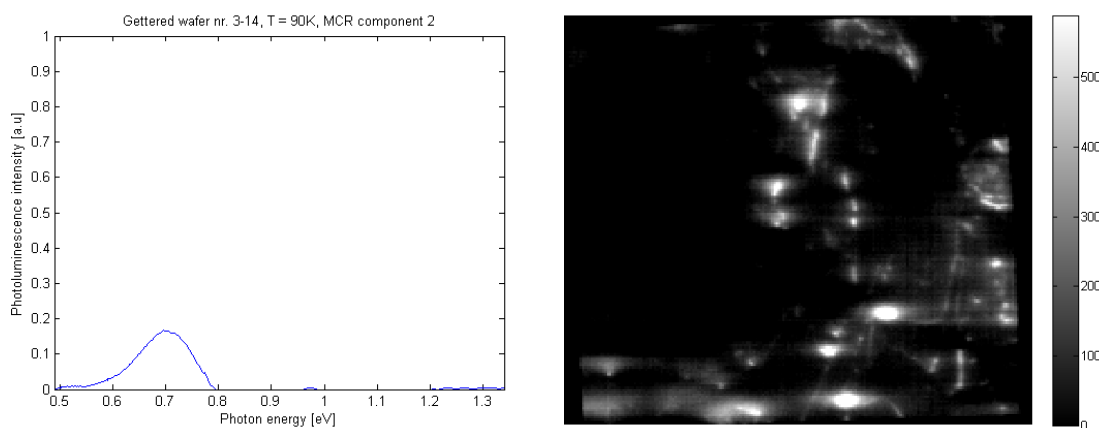
Figur 44: *Plot fra MCR-analysen med tilhørende bildekomponent for nedkjølt wafer 3-14.*

Venstre side av figur 44 viser et plot med topper på ca. 0,89 eV, 0,94 eV og 1,0 eV. Disse kurvene dekker både D2 (0,871 eV - 0,891 eV), D3 (0,942 eV - 0,960 eV) og D4 (0,994 eV - 1,009 eV). MRC-analysen har ikke klart å skille disse i tre forskjellige komponenter, og særlig for D3 og D4 vises de ofte sammen i MCR-analysen. Den tilhørende bildekomponenten viser at opphavet til signalet er spredt over store deler av waferen. Den karakteristiske sprekken som er observert i DRL fra D2, D3 og D4 i de hyperspektrale bildene kan også observeres i bildekomponenten fra MCR-analysen.



Figur 45: *Figuren viser DRL fra D075 (rødt) lagt over BB-signalet for wafersett 14. Venstre side viser ugettret wafer, og høyre side viser gettret wafer.*

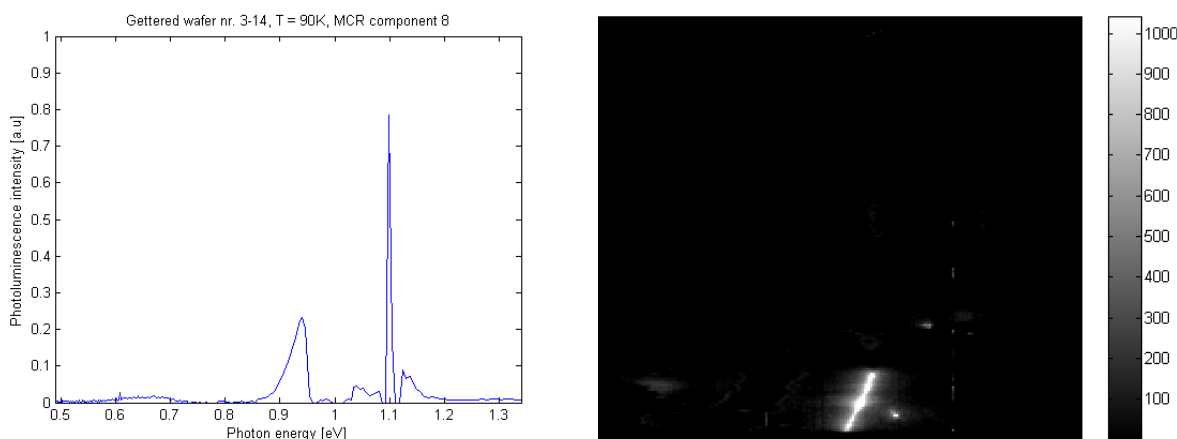
Figur 45 har flere områder hvor det er en klar forskjell mellom DRL fra D075 for nedkjølt wafersett 14. I den ugettrede waferen til venstre i figuren er det to områder som er utringet, og som er svært mye svakere i den gettrede waferen. Det avlange området nedenfor sentrum av den ugettrede waferen er synlig i den gettrede waferen, men har adskillig mindre utstrekning. Det utringede området til høyre for det avlange D075-signalet i den ugettrede waferen kan også skimtes i den gettrede waferen, men størrelsen har avtatt betraktelig. Dette signalet ligger midt i område IV fra QSSPC-målingen, hvor levetiden til minoritetsladningsbærerne er noe høyere i den gettrede waferen. Om det er korrelasjon mellom reduksjonen av D075 etter getteringprosessen og levetiden til minoritetsladningsbærerne i dette punktet er usikkert, men det kan ikke utelukkes. I det nedre, høyre hjørnet av den gettrede waferen vises enda et utringet område hvor signalet fra D075 er betydelig svakere i den gettrede waferen. Det samme kan sies om det utringede området midt i den gettrede waferen. QSSPC-dataene for område III og V for wafersett 14 viser ingen klare forskjeller mellom de gettrede og de ugettrede waferne, men fra de hyperspektrale bildene kan det se ut som at sterk DRL fra D075 blir kraftig redusert gjennom getteringprosessen, og at områder med svake signaler fra D075 blir noe sterkere. Det siste kan observeres i øvre del av wafersettet. Alternativt så kommer signalet fra flere kilder, da noen områder viser tegn til bedring mellom gettret og ugettret wafer i forhold til reduksjon av DRL, mens andre områder viser det motsatte.



Figur 46: Antatt DRL fra D075 i et av plottene fra MCR-analysen sammen med tilhørende bildekomponent for nedkjølt wafer 3-14.



Venstre del av figur 46 viser et av plottene fra MCR-analysen for nedkjølt wafer 3-14, og høyre del viser tilhørende bildekomponent. Fra plottet vises det at signalet har en verdi som samsvarer med D075 (0,714 eV - 0,760 eV), selv om toppen av signalet ligger på ca. 0,7 eV. Dette kan tyde på at plottet består av flere signaler, og ved nærmere observasjon av usymmetrien i kurven og bredden av kurven, er det tenkelig at dette er tilfellet. Bildekomponenten viser hvor i waferen signalet kommer fra, og som det er mulig å observere, så kommer signalet både fra større områder, og mindre, mer intense områder. Ved nærmere studering av plottet kan det observeres noe støy, hovedsakelig i området fra 1,2 eV og oppover. Hvilke deler av bildekomponenten støyen kommer fra er vanskelig å si, men da signalet er såpass svakt kan det tenkes at det i hovedsak kommer fra de minst lyssterke områdene i bildet.

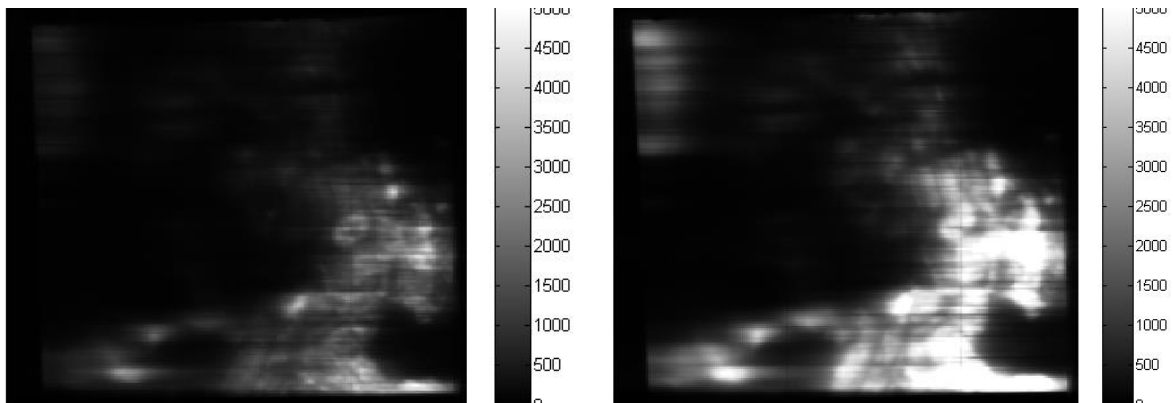


Figur 47: Plot fra MCR-analysen med tilhørende bildekomponent for nedkjølt wafer 3-14.

Figur 47 viser et plot med tilhørende bildekomponent for wafer 3-14, hvor bildekomponenten er interessant i den grad at signalet stort sett begrenser seg til et lite område. Ut fra plottet, er det i hovedsak BB-signalet og et signal på ca. 0,92 eV som er opphavet til dette bildet. Formen på denne kurven samsvarer bra med resultater fra (Flo et al. 2013), som tilskriver dette signalet VID3. To toppe til venstre for BB-signalet, og en til to toppe til høyre for BB-signalet kan også observeres. Disse områdene tilsvarer energi i området 1,04 eV - 1,09 eV og 1,11 eV - 1,13 eV, henholdsvis. De to små toppene til venstre for BB-signalet kan tenkes å være fononreplika av BB-signalet. Fra bildet minner signalet litt om en sprekk eller et brudd i overflaten av waferen. BB-signalet er vesentlig sterkere enn DRL-signalet, men siden MCR-

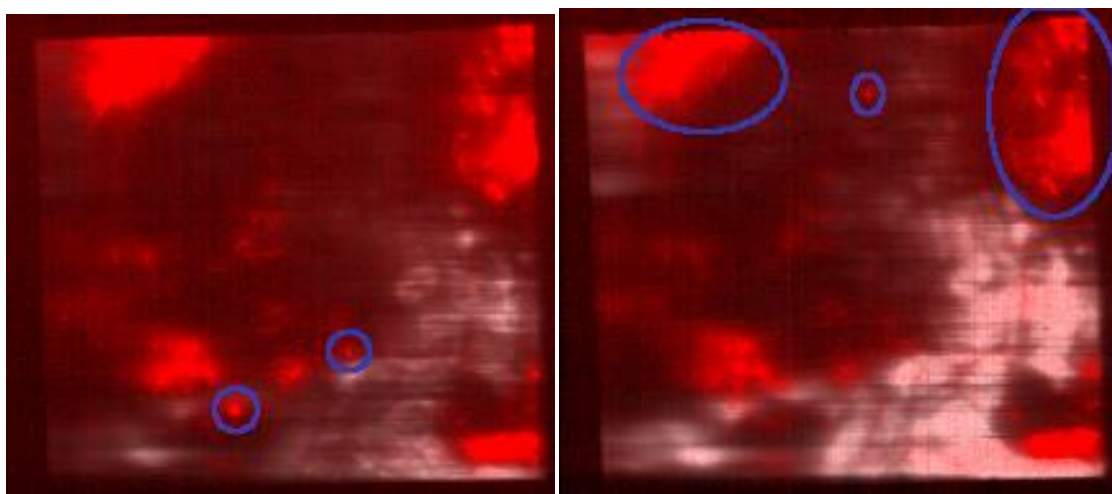
analysen ikke klarer å skille komponentene, blir det vanskelig å si noe sikkert om hvilket signal som kommer fra hvilken del av bildet.

#### 4.4.3 Nedkjølt wafer 1-16 og 3-16



Figur 48: Skalert BB-signal fra ugettret wafer 1-16 (venstre) og gettret wafer 3-16 (høyre).

Figur 48 viser BB-signalet fra wafersett 16. I likhet med BB-signalet for wafersett 14, er det er sterkere signal fra den gettrede waferen. Det er også en klar likhet mellom hvilke områder av waferne som gir opphav til BB-signalet.



Figur 49: DRL fra D1 lagt over BB-signalet for ugettret (venstre) og gettret (høyre) wafersett 16.

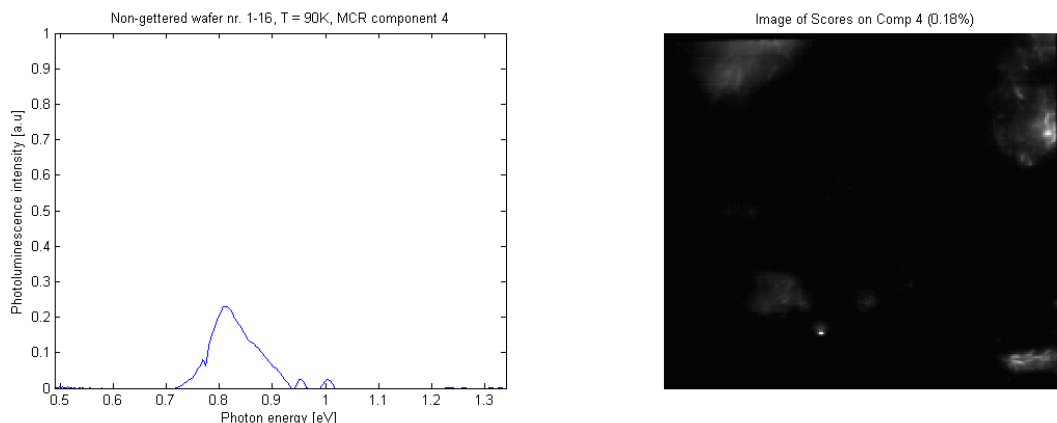
Figur 49 viser D1-signalet for ugettret og gettret wafersett 16. Begge de utringede områdene i den ugettrede waferen er enten svakere eller ikke observerbare i den gettrede waferen. Det midterste utringede området i den gettrede waferen har en viss størrelsesmessig likhet med det høyre utringede området i den ugettrede waferen, og de har ytterligere likhetstrekk ved at de kun er å observere i den ene av waferne. Dette kan bety at opphavet er en punktskade i waferen. Oppe i venstre hjørne av den gettrede waferen er det utringet et område med sterk DRL fra D1 som virker å være noe redusert fra den ugettrede waferen. Det samme gjelder for det høyre utringede området i den gettrede waferen. Dette kan tyde på at gettingen har hatt positiv effekt på de områdene med sterkest DRL-signal fra D1.

Wafer	I	II	III	IV	V	Gjennomsnittlig levetid	Gjennomsnitt wafer
"3-16"	59,5	86,5	37,4	42,6	83,2	61,8 $\mu$ s	
"3-16"	61	81,2	35,3	39,4	83,9	60.2 $\mu$ s	59.9 $\mu$ s
"3-16"	56,3	80,7	35,5	39	76,4	57.6 $\mu$ s	
"1-16"	40	85,3	40,9	29,7	66,5	52.5 $\mu$ s	
"1-16"	41,6	75,5	31,2	28,1	57,7	46.8 $\mu$ s	47.9 $\mu$ s
"1-16"	37,6	71,3	30,3	25,8	56,8	44.4 $\mu$ s	

Tabell 5: Data for levetiden til minoritetsladningsbærerne fra QSSPC-målingen for wafersett 16 i gettret (3-16) og ugettret (1-16) wafer.

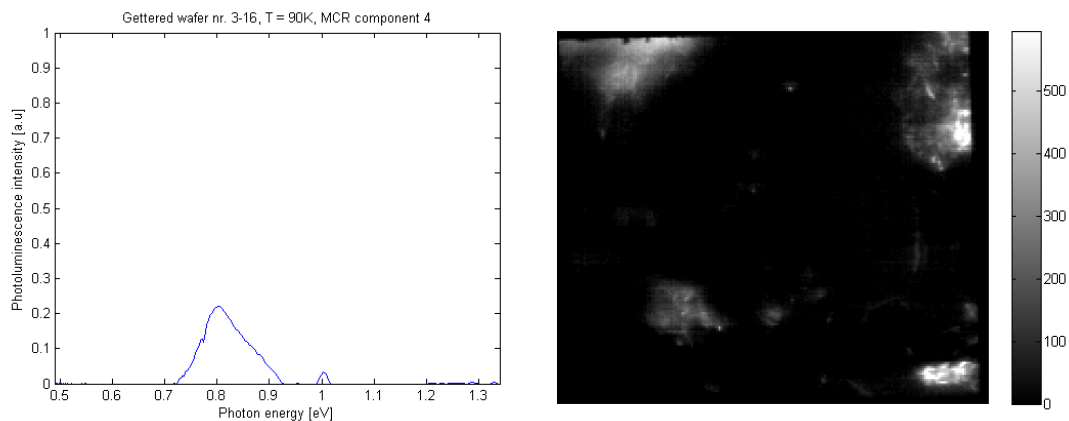
Tabell 5 viser levetiden til minoritetsladningsbærerne fra QSSPC-målingen for wafersett 16. Det er tydelig at levetiden i den gettrede waferen i wafersett 16 er noe bedre i områdene I, IV og V, og at levetiden er relativt lik i områdene II og III. Fra figur 49 er det utringede området oppe til venstre i den gettrede waferen innenfor område I fra QSSPC-målingen, hvor DRL-signalet tilsynelatende er noe svakere i den gettrede waferen i forhold til samme område i den ugettrede waferen. Fra QSSPC-målingen ser vi at område I jevnt over har bedre levetid i den gettrede waferen, noe som kan ha en sammenheng med redusert DRL fra D1 i den gettrede waferen i dette området. Oppe i høyre hjørne av den gettrede waferen observeres det også et noe svakere DRL-signal i den gettrede waferen i forhold til den ugettrede waferen, men fra QSSPC-målingen av område II er forskjellen i levetid noe mindre. Det er dog en forskjell som

går i favør av den gettrede waferen, og det skal ikke utelukkes at getteringprosessen har hatt en positiv effekt i forhold til reduksjon av DRL fra D1.



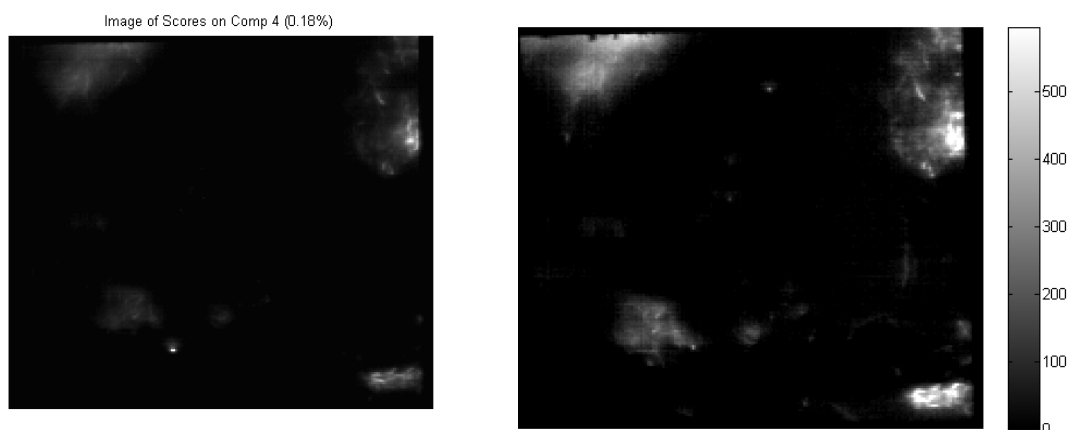
Figur 50: Plot og bildekomponent fra MCR-analysen for ugettret, nedkjølt wafer 1-16.

Figur 50 viser plot og bildekomponent fra nedkjølt, ugettret wafer 1-16. I plottet er det tydelig at hovedkurven består av minst to signaler, hvor det ene er DRL fra D1 (0,8 eV - 0,817 eV) med en topp på ca. 0,8 eV. Ved nærmere observasjon av hovedkurven, kan det på høyre side se ut som det er ytterligere to signaler med toppe på ca. 0,87 eV og ca. 0,9 eV. Dette kan være DRL fra D2 (0,871 eV - 0,891 eV). Det antatte signalet med en topp på ca. 0,9 eV er det vanskelig å si mer om. Ytterligere to små toppe på 0,95 eV og 1,0 eV kan observeres til høyre for hovedkurven.



Figur 51: Plot og bildekomponent fra MCR-analysen for gettret, nedkjølt wafer 3-16.

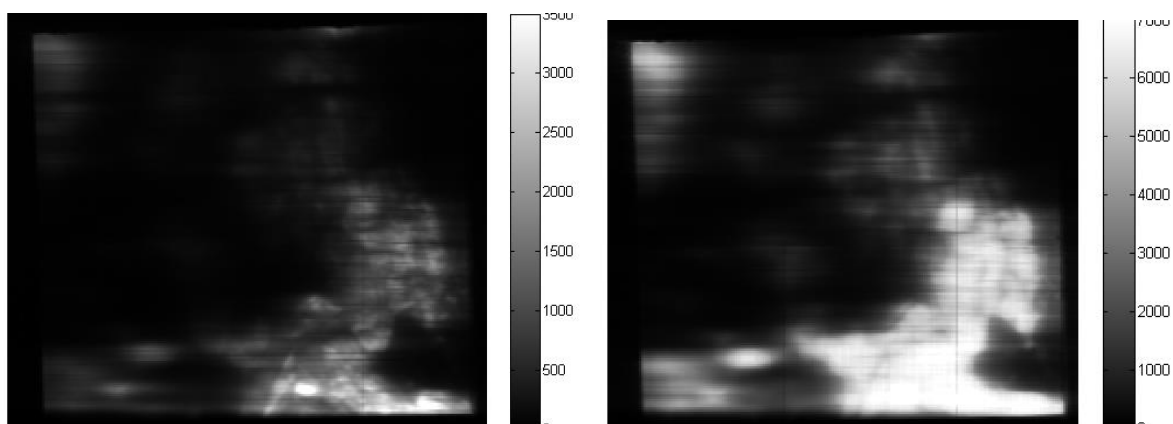
Plot og bildekomponent fra MCR-analysen for nedkjølt, gettret wafer 3-16 vises i figur 51. Likheter med figur 50 er påfallende, og med en topp i hovedkurven på ca. 0,8 eV, antas D1 å være observert. I tillegg kan det skimtes en forhøyning i høyre del av hovedkurven i energiområdet til D2. En liten topp på 1.0 eV er også synlig, samt noe støy fra 1.2 eV og oppover.



Figur 52: *Bildekomponentene til figur 50 og figur 51 fra MCR-analysen for nedkjølt wafersett 16.*

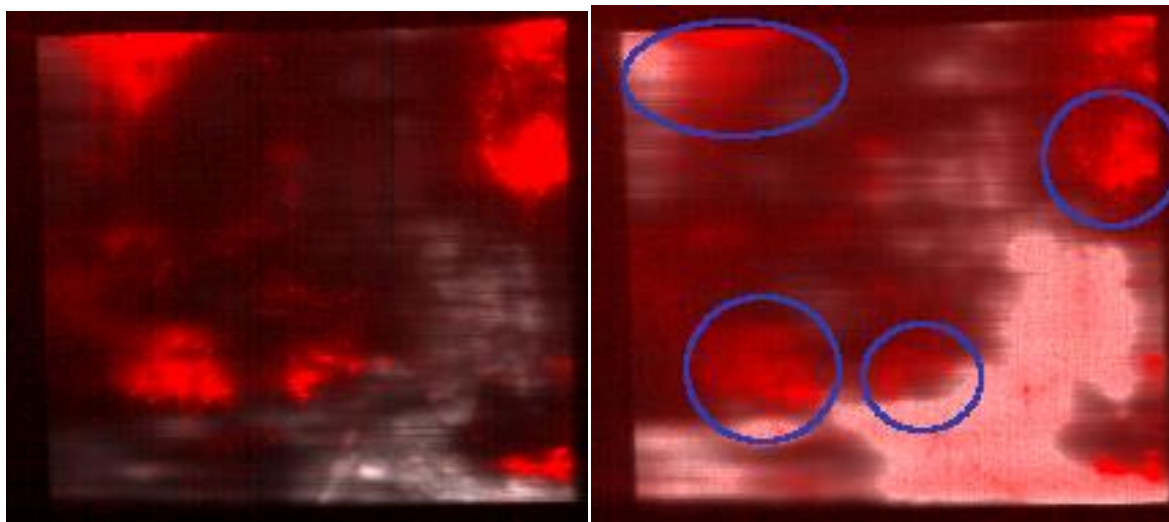
Figur 52 viser bildekomponentene til MCR-analysen for nedkjølt wafersett 16. Det er tydelig at signalet som er plukket ut som en komponent i begge MCR-analysene i hovedsak dekker de samme områdene.

#### 4.4.4 Nedkjølt wafer 1-18 og 3-18



Figur 53: *Skalert BB-signal fra ugettret wafer 1-18 (venstre) og gettret wafer 3-18 (høyre).*

Figur 53 viser BB-signalet for nedkjølt wafersett 18. Signalets styrkeforhold mellom de to waferne er sammenlignbart med figur 35 og figur 48.



Figur 54: DRL fra D1 over BB-signalet i nedkjølt wafersett 18.

Figur 54 viser med rødt hvor DRL-signalet fra D1 stammer fra i nedkjølt wafersett 18. De fire utringede områdene i den gettrede waferen viser et svakere D1-signal i det gettrede waferen sammenlignet med den ugettrede. Det er tilsynelatende en økning av DRL fra D1 mellom den ugettrede waferen og den gettrede waferen i de områdene hvor signalet ikke er så sterkt, men dette kan også være fordi D1-signalet kommer bedre frem i den gettrede waferen på grunn av det sterkere BB-signalet.

Wafer	I	II	III	IV	V	Gjennomsnittlig levetid	Gjennomsnitt wafer
"3-18"	45,3	83,7	35,4	29,9	70,3	52,9 $\mu$ s	
"3-18"	44,4	85,9	35,6	31	74,7	54,3 $\mu$ s	53,0 $\mu$ s
"3-18"	44,6	77,7	34,2	28,9	72,9	51,7 $\mu$ s	
"1-18"	30,2	111	28,4	24,1	38,3	46,4 $\mu$ s	
"1-18"	29,2	84,3	24,1	22,3	35,4	39,1 $\mu$ s	40,7 $\mu$ s
"1-18"	28,9	76,7	23,6	21,4	33,1	36,7 $\mu$ s	

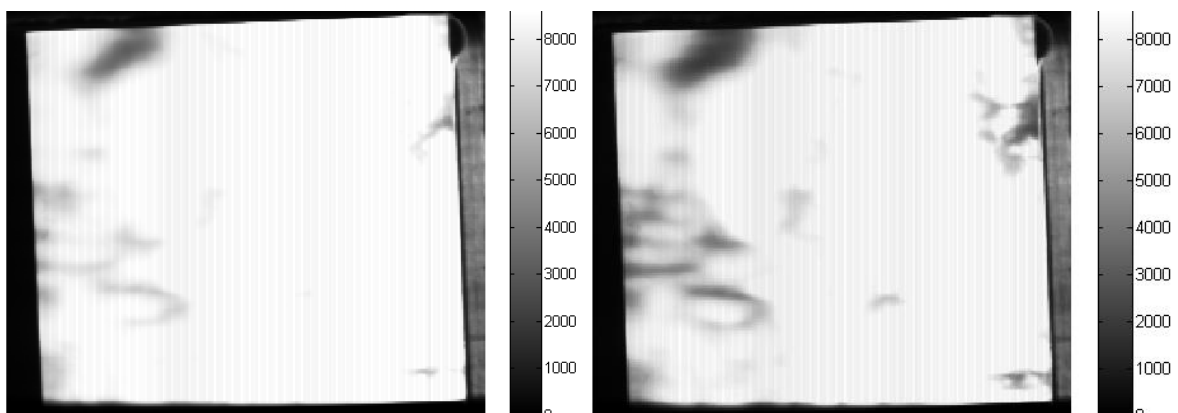
Tabell 6: Data for levetiden til minoritetsladningsbærerne fra QSSPC-målingen forgettret (3-18) og ugettret (1-18) wafer.

Tabell 6 viser de målte verdiene fra QSSPC-målingen for nedkjølt wafersett 18. Område I og V er verdt å merke seg, da levetiden i de gettrede waferne er markant høyere her i forhold til de samme områdene i de ugettrede waferne. For område II, III og IV skiller det forholdsvis lite mellom waferne. Fra figur 54 er det kun utringningen oppe til venstre i den gettrede waferen som er innenfor et av QSSPC-måleområdene. Levetiden for dette området er noe bedre i den gettrede waferen, så det er mulig at getteringprosessen har hatt en positiv effekt i forhold til levetiden i dette området. Noe som er verdt å merke seg er den relativt høye levetiden i område II for begge waferne. Dette området har både svakt BB-signal og tidvis sterkt D1-signal, noe som svekker korrelasjonen mellom levetid og BB-signal/DRL fra D1. Usikkerheten ligger delvis i nøyaktigheten av måleområdet for QSSPC-målingen, og hvorvidt levetiden er såpass lav i disse waferne at det blir vanskelig å trekke sammenhenger mellom de forskjellige dataene.

## 4.5 Romtempererte wafere

De romtempererte, hyperspektrale bildene ble tatt for å se om det gikk å sammenligne BB-signalet med andre, kalibrerte bilder. Dette ble ikke gjort på grunn av en prioritering av resultatene for de avkjølte bildene.

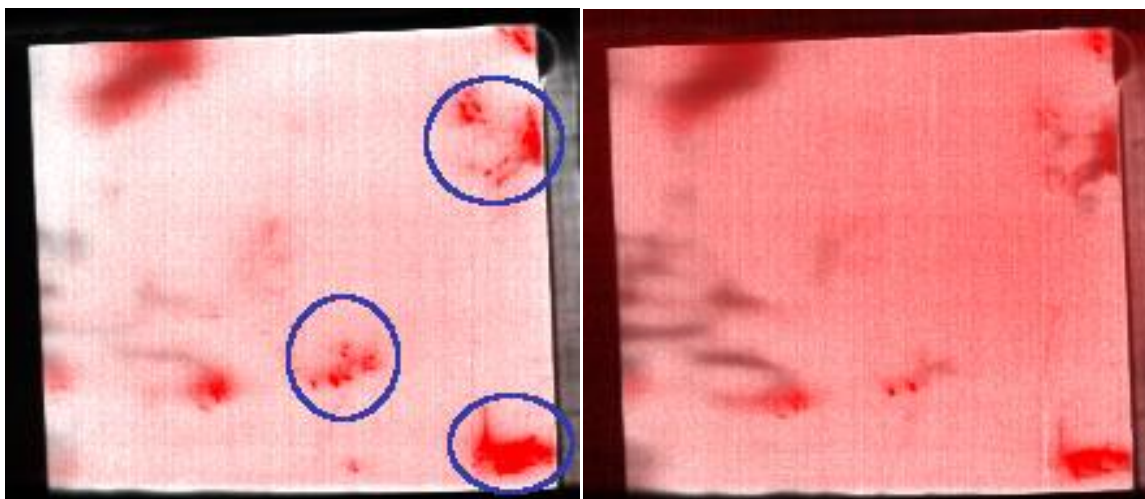
### 4.5.1 Romtemperert wafer 1-14 og 3-14



Figur 55: *Figuren viser BB-signalet ved romtemperatur for ugettret (venstre) og gettret (høyre) wafersett 14.*

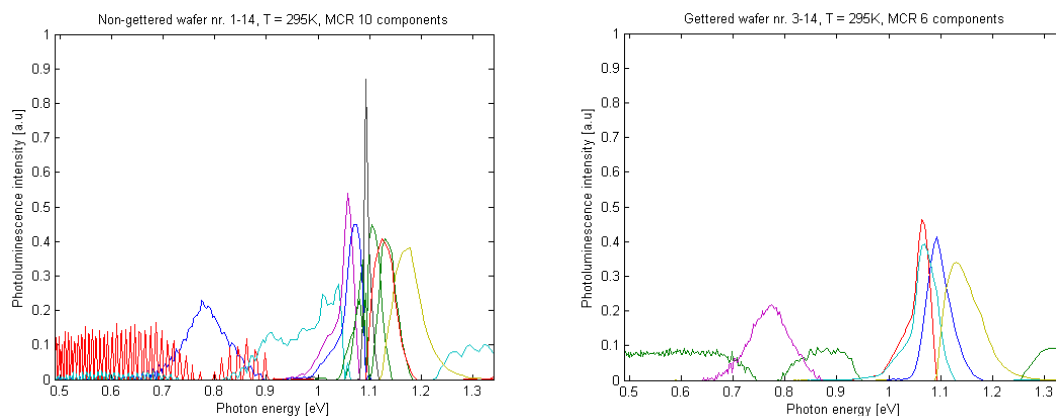
Som vist i figur 55 er BB-signalet ved romtemperatur veldig dominerende, men de mørke områdene er forholdsvis like ved sammenligning av waferne. Den gettrede waferen har tilsynelatende et noe svakere BB-signal i enkelte områder.





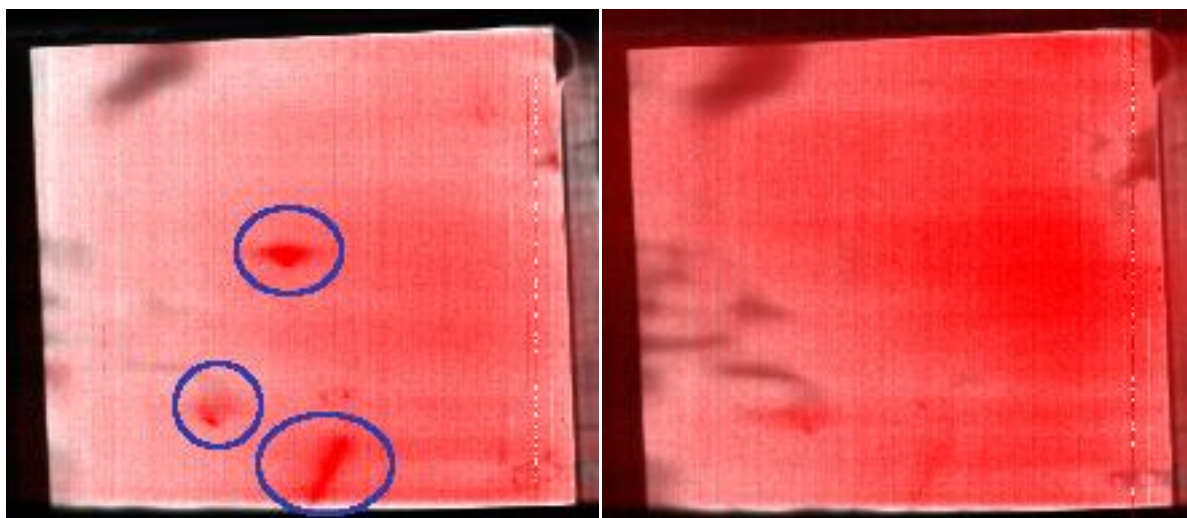
Figur 56: DRL fra D1 (rødt) lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14.

Ved inspeksjon av DRL fra D1 lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14, observeres det kun ett område hvor noe av signalet har forsvunnet helt i den gettrede waferen. Dette gjelder for høyre del av den midterste utringingen. Men et fellestrekk som de tre utringede områdene viser, er at D1-signalet virker noe sterkere jevnt over i den ugettrede waferen. Det kan samtidig se ut som at det svakere DRL-signalet som ligger jevnt over de ugettrede waferen er blitt noe sterkere i den gettrede waferen. Ved sammenligning med DRL fra D1 for nedkjølt wafersett 14 i figur 36, bekreftes en likhet mellom hvilke områder i waferne signalet observeres fra.



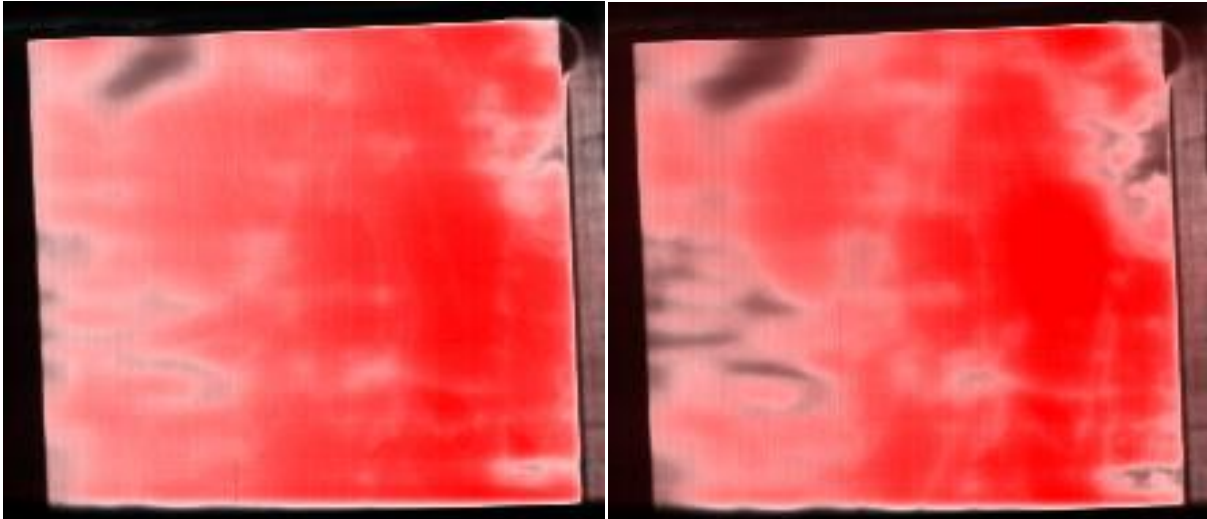
Figur 57: Hovedplot fra MCR-analysen for romtemperert wafersett 14. Ugettret wafer (venstre) og gettret wafer (høyre).

Hovedplottet fra MCR-analysen av de romtempererte wafersett 14 foreligger i figur 57. Ved sammenligning av hovedplottene fra MCR-analysen av nedkjølt wafersett 14, er det tydelig at den ugettrede waferen gir et dårligere resultat med endel støy og inndeling av BB-signalet i mange komponenter. Hovedplottet for den gettrede, romtempererte waferen er imidlertid noe bedre, og et par av de omtalte D-linjene kan muligens gjenkjennes i noen av plottene. Kapittel 4.6 går nærmere inn på dette.



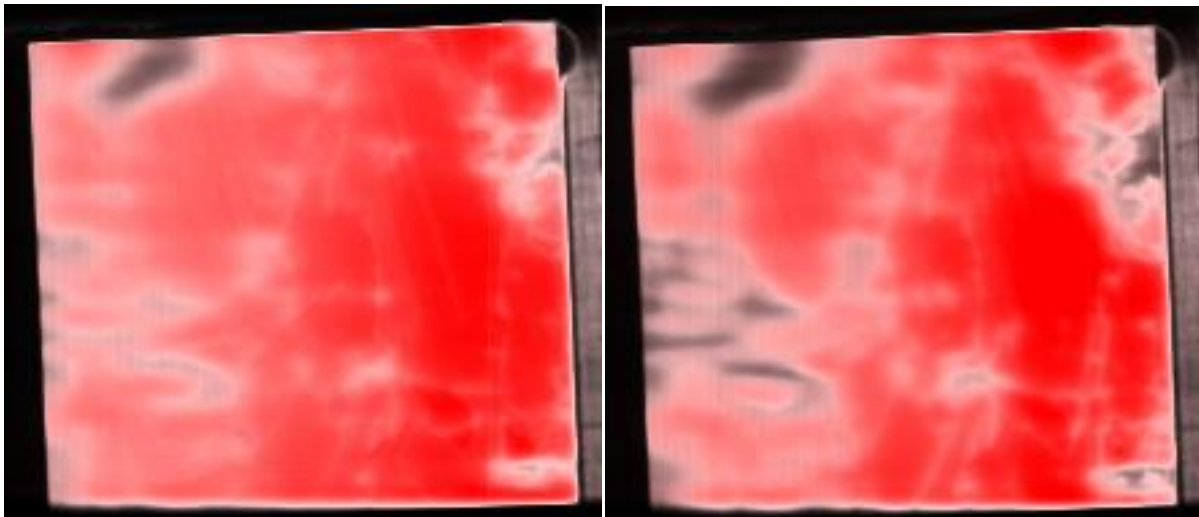
Figur 58: DRL fra D2 (rødt) lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14.

Figur 58 viser DRL fra D2 lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14. Tre områder i den ugettrede waferen er utringet i blått, og signalet for de samme områdene i den gettrede waferen kan så vidt skimtes for de to nederste utringingene. I sammenligningen av DRL fra D2 for de nedkjølte waferne, er kun mindre områder som skiller seg ut mellom de to waferne. Og ingen av de utringede områdene i figur 58 skiller seg ut på samme måte for tilsvarende områder i de nedkjølte waferne. Dette skyldes svake signaler fra DRL ved romtemperatur.



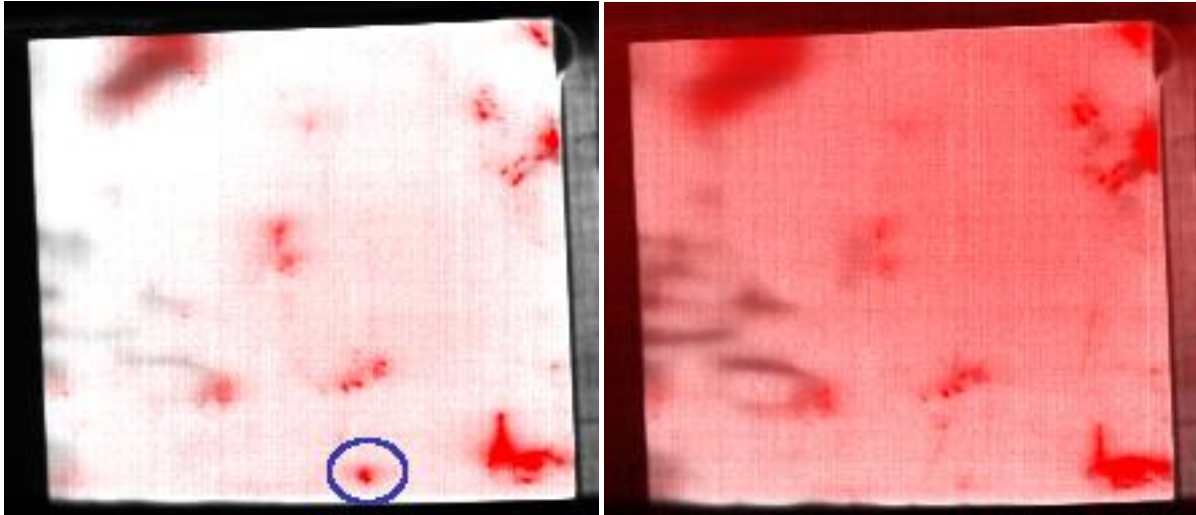
Figur 59: DRL fra D3 (rødt) lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14.

Figur 59 viser DRL fra D3 lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14. DRL-signalet dekker store deler av både den ugettrede og den gettrede waferen, men det kan observeres en liten forskjell i signalstyrke for høyresiden av wafersettet. Den gettrede waferen har tilsynelatende et noe sterkere DRL-signal fra D3.



Figur 60: DRL fra D4 (rødt) lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14.

Figur 60 viser DRL fra D4 lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14. Signalet dekker store deler av begge waferne, og likheten mellom DRL fra D3 i figur 59 og DRL fra D4 i figur 60 er påfallende.



Figur 61: DRL fra D075 (rødt) lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14.

Figur 61 viser DRL fra D075 lagt over BB-signalet for romtemperert wafersett 14. Det utringede området viser DRL fra D075 som er klart sterkere i den ugettrede waferen enn i den gettrede waferen. For øvrige områder med DRL fra D075 virker det som signalet er noe sterkere i den gettrede waferen.

## 4.6 Oppsummering av resultater

Nedenfor følger en grundig oppsummering av forskjeller mellom DRL i ugettret og gettret waferpar, QSSPC-resultater og relevante signalkomponenter observert i MCR-plottene.

### 4.6.1 DRL fra de hyperspektrale bildene

En sammenligning av DRL fra ugettret og gettret wafer for nedkjølte og romtempererte wafersett presenteres i dette delkapittelet.

#### **Nedkjølt wafersett 4:**

DRL fra D1 viser tre større områder med sterkt signal som blir merkbart bedre i den gettrede waferen, men også et område hvor det motsatte er tilfellet. I tillegg oppstår det tre nye signaler med moderat styrke i nærheten av et DRL signal som ikke endrer seg nevneverdig. Sammenligning av D2 viser en lignende nedgang i noen områder med sterke signaler, men også her oppstår det tre nye signal i samme område som for D1. Signalstyrken fra D3 virker uendret i den gettrede waferen, og det observeres en svak økning i signalstyrke i noen områder. Signalet fra D4 viser en liten økning generelt i hele den gettrede waferen, samtidig som områder med sterk DRL fra D4 øker noe i styrke. Signalet fra D075 viser noen områder med forbedring, og noen områder hvor signalet har økt i styrke.

#### **Nedkjølt wafersett 14:**

DRL fra D1 i nedkjølt wafersett 14 viser tegn til redusert signal i et område av den gettrede waferen, og en økning i signalstyrke i et annet område. I likhet med nedkjølt wafersett 4 er det blandede resultater. Sammenligning av D2-signalet viser at for noen områder har signalstyrken i den gettrede waferen økt, og i noen områder har signalet blitt redusert. DRL fra D3 viser ingen store endringer i den gettrede waferen, med unntak av den tidligere nevnte sprekken, hvor signalet er ganske mye sterkere i den gettrede waferen. DRL fra D4 viser en svak økning i signalstyrke for noen områder den gettrede waferen. Signalet fra D075 viser at noen områder i den gettrede waferen får økt DRL-signal fra D075, mens andre sterke signal i

den ugettrede waferen tilsynelatende er delt opp i mindre, men like sterke områder i den gettrede waferen.

### **Nedkjølt wafersett 15:**

Ved studering av DRL fra D1 i nedkjølt wafersett 15 observeres det en nedgang i signalstyrke for områdene med sterk DRL i den gettrede waferen. Også mindre sterke signaler ser ut til å ha avtatt i styrke, med unntak av et lite område hvor det er en økning i signalstyrke. D2 viser også en klar forbedring i form av redusert signalstyrke i den gettrede waferen. Det observeres en økning i DRL fra D2 i det samme området som det ble observert en økning i DRL fra D1. For DRL fra D3 i den gettrede waferen observeres en generell reduksjon av signalstyrke i de fleste signalsterke områder, men også en økning i signalstyrke i andre områder. I likhet med DRL fra D3 i wafersett 14 er det et sterkere signal i området med den antatte sprekken for den gettrede waferen. DRL fra D4 er forholdsvis likt i begge waferne, men det observeres at for noen områder øker signalstyrken i den gettrede waferen, og for andre områder så minker den. DRL fra D075 viser også noen områder hvor signalet er blitt sterkere, og andre hvor det er blitt svakere. Områdene med sterkest DRL fra D075 i den ugettrede waferen er mindre signalsterke i den gettrede waferen.

### **Nedkjølt wafersett 16:**

DRL fra D1 er nesten identisk i den ugettrede og den gettrede waferen. Noen små og et stort område har et litt svakere signal i den gettrede waferen. DRL fra D2 er noe svakere i den gettrede waferen, men i hovedsak kun for de områdene med sterkt signal i den ugettrede waferen. DRL fra D3 i den gettrede waferen viser et svakere signal i områdene med sterkt D3-signal i den ugettrede waferen. Både sprekken og et annet svakt signal i den ugettrede waferen er blitt sterkere i den gettrede waferen. Signalet fra D4 øker i den gettrede waferen, hovedsakelig for områder med sterkt D4-signal i den ugettrede waferen. DRL fra D075 viser mange områder med økt signalstyrke i den gettrede waferen, og noen få områder med redusert signalstyrke.

### **Nedkjølt wafersett 17:**

DRL fra D1 for wafersett 17 viser at områdene med sterkt signal i den ugettrede waferen har avtatt i styrke i den gettrede waferen. Områder med svak DRL fra D1 har derimot økt i noen områder i den gettrede waferen. DRL fra D2 er svakere i den gettrede waferen for alle signalsterke områder i den ugettrede waferen, med unntak av i området hvor den antatte sprekken befinner seg. Her er det en økning i signalstyrke i den gettrede waferen. DRL fra D3 er i likhet med DRL fra D2 svakere i alle områder av den gettrede waferen i forhold til den ugettrede waferen, og sterkere i området hvor den antatte sprekken befinner seg. I tillegg er det et område i toppen av sprekken med ekstra sterkt D3-signal i forhold til dette områdets DRL-utvikling i de foregående wafersettene. Signalstyrken fra D4 observeres å ha økt i den gettrede waferen, men ikke for områdene som har et sterkere D4-signal i den ugettrede waferen. Dette skiller seg fra den observerte utviklingen i de andre waferne, hvor sterke DRL-signaler i de ugettrede waferne enten blir sterkere eller svakere. DRL fra D075 observeres sterkere i den gettrede waferen enn i den ugettrede waferen for de mest signalsterke områdene. En utbredelse av D075-signalet er også observert i den gettrede waferen.

### **Nedkjølt wafersett 18:**

I wafersett 18 observeres en reduksjon av DRL fra D1 i den gettrede waferen, men det er adskillig mer støy i bildet enn i den ugettrede waferen. Som med de fleste wafersettene, er det områdene med sterkt DRL-signal i den ugettrede waferen som er blitt mindre sterke i den gettrede waferen. DRL fra D2 er redusert i den gettrede waferen for områder med et sterkt signal i den ugettrede waferen, men det observeres en økning i signalstyrke i den gettrede waferen for området med den antatte sprekken. DRL fra D3 virker jevnt over svakere i den gettrede waferen i forhold til de samme områdene med svakt D3-signal i den ugettrede waferen. Unntaket er området rundt den antatte sprekken, hvor D3-signalet er sterkere og dekker et større område i den gettrede waferen. I likhet med DRL fra D4 for wafersett 17, er det en klar økning i signalstyrke for den gettrede waferen i et område hvor det er svak signalstyrke for tilsvarende område i den ugettrede waferen. For øvrige områder med moderat signalstyrke i den ugettrede waferen, observeres det en svak reduksjon i den gettrede waferen. DRL fra D075 har tilsynelatende kun økt i den gettrede waferen. Områder med sterke D075-signaler i den ugettrede waferen er blitt større og sterkere i den gettrede waferen.

### Romtempererte wafersett:

De hyperspektrale bildene med DRL for de romtempererte prøvene er både svakere og inneholder mer støy enn de nedkjølte prøvene, men en kort oversikt over utviklingen til de forskjellige D-linjene gjøres for å få et bedre sammenligningsgrunnlag.

DRL fra D1 reduseres tilsynelatende noe for wafersett 14, 15 16 og 18. Wafersett 4 og 17 viser både reduksjon av D1 i noen områder, og en økning av D1 i andre områder. Wafersett 18 viser den største reduksjonen i signalstyrke for alle signalsterke områder i den ugettrede waferen. Til sammenligning viser D1 for nedkjølt wafersett 18 kun en mindre reduksjon i de samme områdene. DRL fra D2 reduseres noe i alle de romtempererte waferne, men området hvor et signal viser en klar reduksjon i DRL for flere av D-linjene, er ikke synlig som DRL fra D2 i noen av de nedkjølte prøvene. Dette kan tyde på at det er et veldig svakt signal i forhold til hva som observeres i de nedkjølte waferne. DRL fra D3 og D4 for de romtempererte waferne er det vanskelig å si noe konkret om, da signalet er preget av mye støy og små forskjeller mellom waferne. DRL fra D075 viser små tegn til forbedring for noen av de romtempererte wafersettene, men signalene er mye svakere enn i de nedkjølte waferne.

#### 4.6.2 QSSPC-resultater

Tabell 7 viser beregnede levetidsverdier til minoritetsladningsbærerne i gettret og ugettret wafersett for fem forskjellige punkter.

QSSPC-resultater for romtempererte wafere ( $\mu\text{s}$ )						
Wafer	I	II	III	IV	V	Gjennomsnitt
"1-4"	113	34,2	66,2	52,1	68	66,6
"1-14"	49	123,6	28,8	34	57,6	58,6
"1-15"	32,9	64,7	21,3	32,9	54,1	41,2
"1-16"	39,7	77,4	34,1	27,9	60,3	47,9
"1-17"	34,8	81,1	34	22,4	44,2	43,3
"1-18"	29,4	90,7	25,4	22,6	35,6	40,7
"3-4"	42	33,4	34,9	-	27,2	34,4
"3-14"	47,5	80,4	32,6	45,1	64	53,9
"3-15"	51,7	86,4	35,8	52,1	74,5	60,1
"3-16"	58,9	82,8	36,1	40,3	81,2	59,9
"3-17"	53,8	89,4	42	31,7	77,2	58,8
"3-18"	44,8	82,4	35,1	29,9	72,6	53

Tabell 7: Data fra QSSPC-målingen for ugettrede og gettrede, romtempererte wafere.



Tabell 7 viser gjennomsnittet av tre målinger for levetiden i hvert av de fem forhåndsbestemte punktene, og gjennomsnittet for hver enkelt wafer. Høye verdier som skiller seg ut er område I for wafer 1-4 og område II for wafer 1-14. Sammenhenger mellom disse målingene DRL for noen av de hyperspektrale bildene ble kommentert i kapittel 4.4. Ved nærmere studie av tabellen, er det noen punkter hvor forskjellen i levetid er større mellom waferne enn andre. Levetiden i område I i wafer 1-4 er over dobbelt så lang som for område I i wafer 3-4. Ved inspeksjon av DRL og BB-signalet fra de hyperspektrale bildene for dette området, observeres ingen klare forskjeller i signalstyrke. I tillegg er BB-signalet for wafer 3-4 veldig svakt, noe som øker mistanken om at det er gjort en feil enten ved den hyperspektrale bildetakingen av wafer 1-4 eller ved QSSPC-målingen. Område II i wafer 1-14 har en merkbart høyere verdi enn område II for wafer 3-14. Ved inspeksjon av DRL-signalet fra dette området for nedkjølt wafersett 14, er det imidlertid klart at defekt-signalet øker i dette området for flere av D-linjene. I tillegg er det ingen forskjell å se ut fra BB-signalet for wafersettet. Område V i wafer 3-18 har en dobbelt så høy verdi som område V i wafer 1-18. Ved inspeksjon av DRL i dette området for wafersettet, er det en svak reduksjon av DRL-signalet fra flere av D-linjene i den gettrede waferen. Forskjellene er imidlertid veldig små, og gjelder kun for allerede svake DRL-signaler.

#### 4.6.3 MCR-komponenter

Signalene som går igjen fra plottene i MCR-analysen av nedkjølte og romtempererte waferne er trukket ut og presentert i tabell 8. Alle observerte signaler kan ses i vedlegg B.

Gjengående signaler fra MCR					
Nedkjølte, ugettrede waferne			Nedkjølte, gettrede waferne		
0,70 eV	0,80 eV	0,87 eV	0,70 eV	0,80 eV	0,87 eV
0,90 eV	0,92 eV	0,95 eV	0,90 eV	0,92 eV	0,95 eV
1,0 eV	1,10-1,12 eV		10 eV	1,10-1,12 eV	
Romtempererte ugettrede waferne			Romtempererte gettrede waferne		
0,78 eV	0,90 eV	-	0,78 eV	-	-
106-1,08 eV		-	1,06-1,08 eV		-
1,10-1,11 eV		1,16 eV	1,10-1,11 eV		1,16 eV

Tabell 8: Avleste verdier fra plot i MCR-analysen for både nedkjølt og romtempererte wafersett.

Tabell 8 viser signalene fra plottene i MCR-analysen som ble hyppigst observert for romtempererte og nedkjølte wafere. For å trekke paralleller til de hyperspektrale bildene og uttrukkede spektrale områdene med hensyn på D-linjene, er det sannsynlig å anta at verdien på 0,70 eV representerer signalet fra D075 (0,714 eV - 0,760 eV). Kurvene hvor denne verdien ble avlest var forholdsvis like, og noe bredere enn kurvene for de fleste andre signaler, noe som kan forklare hvorfor det er et avvik mellom avlest toppverdi for kurven og energiområdet til D075. De hyperspektrale bildene gav gode, sterke resultater for D075 i det oppgitte energiområdet, men resultatene fra MCR-analysen tilsier at enda bedre signaler muligens kan uthentes ved en endring i energiområde for D075. Tilhørende bildekomponent for plottet til 0,70 eV-signalet har klare likheter med de hyperspektrale bildene av D075, men er noe svakere.

Verdiene 0,8 eV, 0,87 eV, 0,92 eV, 0,95 eV og 1,0 eV opptrer ofte i samme kurve i MCR-analysen, og ved nærmere analyse samsvarer disse signalene med henholdsvis D1, D2, D3, VID3 og D4. Det varierer noe hvor godt MCR-analysen er i stand til å dele opp disse signalene, men oftest kan D1 og D2 observeres i samme kurve, og de øvrige signalene D3, VID3 og D4 observeres sammen i en annen kurve. Dette samsvarer med tidligere observasjoner av disse defekt-linjene og deres tilknytning til hverandre. Men da dette er resultater uthentet fra dårlige prøver, bør det utvises forsiktighet i forhold til bastante konklusjoner. Data fra MCR-analysen for de gettrede waferne var i større grad fokusert på BB-signalet på 1,06 eV – 1,08 eV for romtempererte wafere og BB-signalet på 1,10 eV – 1,12 eV for nedkjølte wafere. Resultatet av BB-signalet for de romtempererte waferne samsvarer godt med teori om temperaturavhengigheten til båndgapet. Det observeres at MCR-analysen gav flere komponenter med DRL-signaler for de ugettrede, nedkjølte waferne enn for de gettrede, nedkjølte waferne, men flere komponenter med BB-signal.

Som forventet var resultatene fra MCR-analysen for romtempererte wafere mindre interessant i forhold til DRL fra D-linjene. To signaler på 0,78 eV og 0,90 eV ble observert, og signalet på 0,78 eV gikk igjen i de fleste plottene. Dette signalet samsvarer med D1 dersom en spektral forskyvning pga. økt temperatur tas med i betraktningen. Signalet har riktignok en verdi som tilsier at det også kan være en andreordens brytning fra laseren. Verdien har opphav i to forskjellige typer plot, hvor den ene som antageligvis er et signal fra laseren er veldig smal og sterk. Den andre kurven er bredere og ligner mer på det som observeres for samme energiområde i MCR-analysen for de nedkjølte waferne. Fra figur 19 bekreftes det at DRL fra D1 kan forventes observert ved romtemperatur. Signalet på 0,90 eV er trukket fram fordi det

er en del av en kurve som dekker et energiområde på 0,85 eV – 1,05 eV. Denne kurven har en klar likhet med tilsvarende kurver fra MCR-analysen for de nedkjølte waferne, som viser både D1, D2, D3 og D4. Men den er bare observert i et av plottene, og den har en hakket form som minner om støysignalene. Dette gjør det vanskeligere å si noe sikkert om det er DRL fra andre D-linjer. Ved nærmere studering av signalet på 1,16 eV, er det trolig at dette er en del av BB-signalet for de romtempererte waferne.

## 5 Konklusjon

Sammenligningen av Defekt-Relatert Luminesens (DRL) for de nedkjølte, hyperspektrale bildene viser et varierende resultat i forhold til effekten av getteringprosessen. Det observeres en generell reduksjon av DRL for D1, D2 og D3 i de gettrede waferne, men også enkelte områder med økt DRL fra disse defektlinjene. For DRL fra D4 og D075 observeres en økning i signalstyrke for de gettrede waferne.

Bånd-til-Bånd-signalet (BB) fra de hyperspektrale bildene for de nedkjølte waferne er mye sterkere i samtlige gettrede wafere, men det er ingen klar sammenheng mellom dette resultatet og levetiden fra QSSPC-målingene. Det er heller ingen klar sammenheng mellom DRL og levetid for enkeltområder i waferne. Det observeres en generell forbedring av levetiden til de gettrede waferne, og en generell reduksjon av levetiden til de ugettrede waferne, i forhold til wafer 4.

MCR-analysen for nedkjølte wafere har avdekket signaler for D1, D2, D3, VID3, D4 og BB, og det ble observert færre komponenter som tilsvarte DRL i MCR-analysen av de gettrede waferne. DRL fra D1 antas å være funnet i MCR-analysen av de ugettrede, romtempererte waferne. MCR-analyse for karakterisering av DRL og BB-signal i wafere kan være et nyttig verktøy, men resultatene må kontrolleres for fysisk relevans.

Denne studien har vist at gettering har hatt en positiv effekt på de aktuelle waferne i forhold til økt BB-signal og levetid til minoritetsladningsbærerne, men en varierende effekt i forhold til DRL med både forbedring og forverring av signalet i forskjellige områder av waferne.

### 5.1 Videre forskning

En QSSPC-måling hvor inndelingen av hvilke områder som måles i waferne bestemmes av observerte BB-signal og DRL-signal fra hyperspektrale bilder eller MCR-analyse, vil være interessant for å få bedre forutsetninger til å finne potensielle sammenhenger mellom DRL/BB-signal og levetid. Det vil også være interessant å endre bredden på de spektrale områdene som ble trukket ut i analysen av de hyperspektrale bildene i denne studien, for å se hvordan signalet endrer seg, og om det er mulig å finne to forskjellige DRL-signaler i de spektrale områdene hvor det i denne studien ble funnet både økning og reduksjon av DRL for

enkelte D-linjer. Dette gjelder særlig for endring av den uttrukne spektrale bredden til D075 som antas å ha blitt funnet med en topp på ca. 0,70 eV i denne studien.

Generelt vil det være interessant å bruke disse metodene for sammenligning av wafere med adskillig bedre kvalitet enn de som ble brukt i denne studien.

## Referanser

- Arguirov. (2007). *Electro-optical properties of dislocations in silicon and their possible application for light emitters*. Cottbus, Techn Univ , Diss , 2007. 154 Bl. pp.
- Chen, C. J. (2011). *Physics Of Solar Energy*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Drozdo, N. A., Patrin, A. A. & Tkachev, V. D. (1976). Recombination Radiation on Dislocations in Silicon. *Jetp Letters*, 23 (11): 597-599.
- Flo, A., Burud, I., Kvaal, K., Sondena, R. & Olsen, E. (2013). *Distribution of radiative crystal imperfections through a silicon ingot*. *Aip Advances*, 3 (11).
- Green, M. A. (1982). *Solar cells : operating principles, technology, and system applications*. Prentice-Hall series in solid state physical electronics. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. xiv, 274 p. pp.
- Higgs, V., Goulding, M., Brinklow, A. & Kightley, P. (1992). *Characterization of Epitaxial and Oxidation-Induced Stacking-Faults in Silicon - the Influence of Transition-Metal Contamination*. *Applied Physics Letters*, 60 (11): 1369-1371.
- Mehl, T. (2014). *Karakterisering av multikrystallinske solceller ved bruk av hyperspektral avbildning*.
- Ostapenko, S., Tarasov, I., Kalejs, J. P., Haessler, C. & Reisner, E. U. (2000). Defect monitoring using scanning photoluminescence spectroscopy in multicrystalline silicon wafers. *Semiconductor Science and Technology*, 15 (8): 840-848.
- Pizzini, S., Guzzi, M., Grilli, E. & Borionetti, G. (2000). *The photoluminescence emission in the 0.7-0.9 eV range from oxygen precipitates, thermal donors and dislocations in silicon*. *Journal of Physics-Condensed Matter*, 12 (49): 10131-10143.
- Pizzini, S. (2012). *Advanced silicon materials for photovoltaic applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. xvi, 405 p. pp.
- Rein, S. (2005). *Lifetime spectroscopy a method of defect characterization in silicon for photovoltaic applications*. Springer series in materials science,. Berlin ; New York: Springer,. Available at:  
<http://www.knovel.com.ezp.lib.unimelb.edu.au/knovel2/Toc.jsp?BookID=3065>  
Connect to electronic book (University of Melbourne Only).

- Sauer, R., Weber, J., Stolz, J., Weber, E. R., Kusters, K. H. & Alexander, H. (1985). *Dislocation-Related Photoluminescence in Silicon. Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 36 (1): 1-13.
- Tajima, M., Iwata, Y., Okayama, F., Toyota, H., Onodera, H. & Sekiguchi, T. (2012). Deep-level photoluminescence due to dislocations and oxygen precipitates in multicrystalline Si. *Journal of Applied Physics*, 111 (11).
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2008). *Physics for scientists and engineers : with modern physics*. 6th, extended . ed. New York: W.H. Freeman. xxxii, 1412, 7, 30, 51, 26 p. pp.
- Internet site: <http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/semiconductor-structure>  
Last accessed: 21.10.2014
- Internet site: <http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/doping>  
Last accessed: 21.10.2014
- Tenma. (2012). *Datablad Digital Thermometer 29/05/12 V1.1, 29/05/12 V1.1*. 2 s.

## Vedlegg

### VEDLEGG A:

Wafer	I	II	III	IV	V	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt wafer	Standardavvik
"3-4"	39,6	33	34,9	-	27,3	33,7		5,1
"3-4"	42	33	34,3	-	26,5	33,95	34,4	6,4
"3-4"	44,4	34,2	35,3	-	27,7	35,4		6,9
"3-14"	49,2	79,8	32,8	46,7	61	53,9		17,6
"3-14"	47,5	79,4	31,8	43,8	69,5	54,4	53,9	19,5
"3-14"	45,8	81,9	33,3	44,7	61,6	53,5		18,8
"3-15"	52,3	84,5	37,6	54,1	73,8	60,5		18,6
"3-15"	51,1	87,1	34,9	52,3	73	59,68	60,1	20,4
"3-15"	51,6	87,7	34,8	49,9	76,7	60,1		21,5
"3-16"	59,5	86,5	37,4	42,6	83,2	61,8		22,6
"3-16"	61	81,2	35,3	39,4	83,9	60,16	59,9	22,7
"3-16"	56,3	80,7	35,5	39	76,4	57,6		20,8
"3-17"	53,9	92,4	42,8	32,3	75,3	59,3		24,4
"3-17"	54,3	88,4	42,5	32	75,9	58,62	58,8	23,3
"3-17"	53,1	87,3	40,8	30,9	80,5	58,5		24,6
"3-18"	45,3	83,7	35,4	29,9	70,3	52,9		23,2
"3-18"	44,4	85,9	35,6	31	74,7	54,32	53,0	24,5
"3-18"	44,6	77,7	34,2	28,9	72,9	51,66		22,4

Wafer	I	II	III	IV	V	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt wafer	Standardavvik
"1-4"	116	34,9	69,7	57,8	74,5	70,58		29,6
"1-4"	113	34,5	62,1	52,9	66,4	65,8	66,7	29,1
"1-4"	110	33,1	66,8	45,7	63	63,7		29,2
"1-14"	49,8	132	30,3	35,9	62	62,0		41,0
"1-14"	50,4	123	27,5	34	56,9	58,4	58,6	38,0
"1-14"	46,9	116	28,6	32	53,9	55,5		35,4
"1-15"	36,6	77,7	23	35,8	63,1	47,2		22,4
"1-15"	31,5	62,1	20,3	32,6	51,8	39,7	41,2	16,9
"1-15"	30,5	54,3	20,7	30,3	47,4	36,6		13,8
"1-16"	40	85,3	40,9	29,7	66,5	52,5		22,8
"1-16"	41,6	75,5	31,2	28,1	57,7	46,8	47,9	19,8
"1-16"	37,6	71,3	30,3	25,8	56,8	44,4		19,2
"1-17"	36,8	86,6	38,2	23,1	52,4	47,4		23,0



Analyse av getteringeffekt i multikrystallinske silisiumwafere

"1-17"	35,3	80,7	32,8	22	40,5	42,3	43,3	22,5
"1-17"	32,3	76	30,9	22	39,8	40,2		21,0
"1-18"	30,2	111	28,4	24,1	38,3	46,4		36,5
"1-18"	29,2	84,3	24,1	22,3	35,4	39,1	40,7	25,8
"1-18"	28,9	76,7	23,6	21,4	33,1	36,74		22,8

Vedlegg B:

MCR Nedkjølte wafere	
Wafer nr.	Signaler (eV)
"1-4"	0,72, 0,8, 0,85, 0, 90, 0,92, 0,95, 1,0, 1,10-1,12
"1-14"	0,70, 0,75, 0,80, 0,88, 0,92, 1,0, 1,10-1,12
"1-15"	0,70, 0,80, 0,90, 0,92, 0,95, 1,0, 1,10-1,12
"1-16"	0,70, 0,80, 0,87, 0,90, 0,92, 0,95, 1,0, 1,10-1,12
"1-17"	0,70, 0,78, 0,80, 0,87, 0,90, 0,92, 0,95, 1,0, 1,10-1,12
"1-18"	0,68, 0,70, 0,78, 0,80, 0,88, 0,90, 0,92, 0,95, 1,0, 1,10-1,12
"3-4"	0,69, 0,78, 0,80, 0,85, 0,90, 0,92, 1,0, 1,10-1,12
"3-14"	0,70, 0,80, 0,87, 0,92, 1,0, 1,10-1,12
"3-15"	0,70, 0,80, 0,92, 1,0, 1,10-1,12
"3-16"	0,70, 0,80, 0,87, 0,92, 1,0, 1,10-1,12
"3-17"	0,70, 0,80, 0,87, 0,92, 1,10-1,12
"3-18"	0,70, 0,92, 1,10-1,12
MCR Romtempererte wafere	
Wafer nr.	Signaler (eV)
"1-4"	0,78, 1,06-1,08, 1,13
"1-14"	0,78, 1,06-1,08, 1,10, 1,18
"1-15"	0,78, 1,06-1,07, 1,13, 1,18
"1-16"	0,78, 1,06-1,07, 1,10, 1,11, 1,16
"1-17"	0,78, 0,90, 1,07, 1,11, 1,16
"1-18"	0,78, 0,90, 1,07, 1,11, 1,16
"3-4"	1,07, 1,09-1,11, 1,16
"3-14"	0,78, 1,07, 1,10, 1,12
"3-15"	0,78, 1,07, 1,10
"3-16"	0,78, 87-92, 1,07, 1,10, 1,12
"3-17"	0,78, 1,07, 1,11, 1,16
"3-18"	0,78, 0,90, 1,07, 1,10, 1,16



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
67 23 00 00  
[www.nmbu.no](http://www.nmbu.no)