

Metode for registrering av fotoluminescens i silisiumwafere

Method for registration of photoluminescence in silicon wafers

ODD-MAGNUS ENG

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITTENSKAP
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2010



Forord

Denne masteroppgaven avslutter mitt masterstudie i Miljøfysikk og fornybar energi ved Universitetet for miljø- og biovitenskap i Ås. Arbeidet med oppgaven har vært spennende, utfordrende og lærerikt.

En spesiell takk rettes til mine to veiledere Espen Olsen og Andreas Flø. Takk for alle konstruktive innspill, motivasjon og engasjement som er vist. Takk også til Norsk Elektro Optikk for lån av laser og til Tom Ringstad for hjelp til å produsere LED-brettene.

Vil også benytte anledningen til å takke familie, venner og bekjente for støtte, oppmuntring og nødvendig avkobling.

Ås, 14. desember 2010

Odd-Magnus Eng

Sammendrag

Hensikten med denne masteroppgaven er å finne ut om det hyperspektrale kamera Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB) har i dag kan brukes til fotoluminescensopptak fra silisumwafere. To wafere, en med relativt kort levetid, og en med relativt lang levetid, blir belyst og studert. Waferen med kort levetid blir kun belyst med 2 W 808 nm laser. Waferen med lang levetid derimot blir belyst med både laser og to egenproduserte LED-Brett, med bølgelengder på henholdsvis 830 nm og 875 nm. Konklusjon er at utstyret gir et bra resultat som viser korngrenser og andre forskjeller i waferene godt.

Abstract

The purpose of this thesis is to determine if the hyperspectral camera belonging to the Department of Mathematical Sciences and Technology (IMT) at the Norwegian university of Life Sciences (UMB) can be used to capture photoluminescence from silicon wafers. Two wafers, one with relatively short life and one with a relatively long life, are illuminated and studied. Wafers with short life will only be illuminated with a 2W 808 nm laser. Wafers with a long life on the other hand, are illuminated with both a laser and two self-produced LED-boards, with respective wavelengths of 830 nm and 875 nm. The conclusion is that the equipment gives a good result showing the grain boundaries and other differences in wafers well.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Figurer	vi
Tabeller	viii
Symbolliste	ix
1 Innledning	1
2 Teoretisk bakgrunn	2
2.1 Halvledere	2
2.1.1 Energinivåer og energibånd	2
2.1.2 Elektroner og hull	5
2.1.3 Direkte og indirekte halvledere	6
2.1.4 Lysabsorpsjon	8
2.1.5 Doping	12
2.1.6 Rekombinasjon	14
2.1.7 Levetidsmålinger, QSS-PC	18
2.1.8 Fotoluminescens	18
2.2 Statistikk og signal-støyforhold	19
2.2.1 Enkel statistikk	19
2.2.2 Signal-støy forhold	20
3 Eksperimentell metode	21
3.1 Bakgrunn	21
3.2 Utstyr	22
3.2.1 Wafere	22

3.2.2	Kamera og programvare	22
3.2.3	Skannebord	25
3.2.4	Lyskilder	25
3.2.5	Filter	26
3.2.6	QSS-PC apparatur	26
3.3	Oppsett og datainnhenting	26
3.4	Databehandling	29
4	Resultater og diskusjon	32
4.1	QSS-PC levetidsmålinger	32
4.2	Fargekart	34
4.3	Filter	36
4.4	Luminescensintegrasjon	39
4.5	Bakgrunnstøy	42
4.6	Sterkeste bølgelengde	44
4.7	HSNR	46
4.8	Lukkertider	47
4.9	Lyskilder	50
5	Konklusjon	53
5.1	Videre arbeid	54
A	Koblingsskjema LED-brett	55
B	Fargekarttest	57
C	HSNR	61
D	Luminescensbilder	63
	Referanseliste	72

Figurer

2.1	Hydrogens energinivåer i eV	3
2.2	Forskjellige krystallstrukturer	4
2.3	Energinivåsplitting	4
2.4	Energibånd til ledere, isolatorer og halvledere	5
2.5	Elektron-hullparanologi	5
2.6	Prinsipp for direkte båndgaphalvleder	7
2.7	Prinsipp for indirekte båndgapshalvleder	8
2.8	Inntrengningsdybder for lys i silisium	10
2.9	Krystallinsk silisium	12
2.10	Krystallinsk dopet silisium	13
2.11	Energinivåinnføring i det forbudte båndgap som følge av doping	13
2.12	Rekombinasjon	15
3.1	Trupke med flere sine resultat	21
3.2	Prinsippskisse for kameraets virkemåte	22
3.3	Skjermdump av programvaren brukt til opptak.	23
3.4	Området brukt for beregning av arealeffekt til lyskilde L2 og L3	25
3.5	Bilde av oppsettet	27
3.6	Oppsettskisser	28
4.1	QSS-PC måleområder	33
4.2	Fargekarttest wafer 1, belyst med L1	34
4.3	Fargekarttest, wafer1 og wafer2	35
4.4	Gjennomsnittlig spekter for wafer 1 belyst med laser	36
4.5	Wafer 1 belyst med L1 og L3 med og uten filter	37
4.6	Gjennomsnittlig spekter for wafer 1 belyst med L3	38
4.7	Typisk luminescensspekter	39
4.8	Luminescensen fra nedre og øvre luminescensbølgelengde	40
4.9	Sammenligning av luminescens fra den mest luminescerende bølgelengden og integrert luminescens	41
4.10	Gjennomsnittspekter med og uten bakgrunnstøy	42

4.11 Luminescens med og uten bakgrunnstøy	43
4.12 Bølgelengden med spekterets maksimumsverdi	44
4.13 Luminescens fra wafer 1 belyst med L2	46
4.14 Luminescens ved forskjellige lukkertider ved bruk av L1 og wafer 1.	47
4.15 Sammenligning med og uten bakgrunnskorrigering, wafer 1, belyst med L1,	48
4.16 Luminescens ved forskjellige lukkertider ved bruk av L2 og wafer 1.	48
4.17 Luminescens ved lukkertidene 30 ms og 100 ms ved bruk av L3 på wafer 1.	49
4.18 Luminescens ved forskjellige lukkertider ved bruk av L1 og wafer 2.	49
4.19 Resultat av dårlig opplinjert laser	50
4.20 L2-oppsettsammenligning	51
4.21 Luminescens fra wafer 1 belyst med forskjellige lyskilder	52

Tabeller

2.1	Absorberingskoeffisienter og inntrengningsdybder i silisium	11
3.1	Lyskilder	25
3.2	Sammenheng mellom bånd, bølgelengde og energi.	31
4.1	Levetidsmålinger	33
4.2	Grenser for luminesceringsintegrasjon	41

Symbolliste

α	Absorpsjonskoeffisient
α^{-1}	Inntrengningsdybde
Δn	$n - n_0$
Δp	$p - p_0$
λ	Bølgelengde
σ	Standardavvik
σ^2	Varians
$\sigma_{\bar{x}}$	Variansen til gjennomsnittet
τ	Levetid, subscript angir type
a	Akselerasjon
B	Materialkonstant
c	Lysets hastighet i vakuum, $2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ [1]
c_n	Augerkoeffisient valensbånd
c_p	Augerkoeffisient ledningsbånd
E	Energi, elektron
$E(x)$	Forventningsverdi
E_{foton}	Energi, foton
E_C	Laveste energi i ledningsbåndet
E_f	Energi, slutttilstand
E_g	Energigap
E_i	Energi, starttilstand
E_P	Energi, fonon
E_t	Energinivå innført av urenhet
E_V	Høyeste energi i valensbåndet
F	Krefter
f	Frekvens
G	Genereringsrate
G_0	Genereringsrate ved termisk likevekt
h	Plancks konstant, $4,13566743 \times 10^{-15} \text{ eVs}$, [1]
$I(x)$	Lysintensitet i materiale ved dybde x

$I(x_0)$	Lysintensitet ved overflate
k	Boltzmanns konstant, $8,617343 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, [1]
m_e	Masse, elektron
m_e^*	Effektiv masse, elektron
m_h^*	Effektiv masse, hull
n	Antall elektroner
N	Antall målinger
n_0	Antall elektroner ved termisk likevekt
n_1	Parameter avhengig av N_C og E_t
N_A	Antall akseptorer
N_A^+	Antall ioniserte akseptorer
N_C	Tilstandstettheten i ledningsbåndet
N_D	Antall donorer
N_D^+	Antall ioniserte donorer
n_i	Ladningsbærertetthet i rent materiale
p	Bevegelsesmengde / Antall hull
p_{foton}	Bevegelsesmengde, foton
p_0	Antall hull ved termisk likevekt
p_1	Parameter avhengig av N_C og E_t
p_C	Bevegelsesmengde til nivå med lavest energi i ledningsbånd
p_V	Bevegelsesmengde til nivå med høyest energi i valensbåndet
R	Rekombinasjonsrate
R_0	Rekombinasjonsrate ved termisk likevekt
s_{e0}	Overflaterekombinasjonshastighet
s_{h0}	Overflaterekombinasjonshastighet
SNR	Signal-støy forhold
SNR_{dB}	Signal-støy forhold målt i desibel.
T	Temperatur, K
U	Netto rekombinasjonsrate: $R - R_0$. Subskript angir type
$Var(x_i)$	Varians
x	Dybde i halvledermateriale / Måling
\bar{x}	Gjennomsnitt

Kapittel 1

Innledning

Dagens samfunn er helt avhengig av fossil energi, både i transportsektoren og til strømproduksjon. Fossilt brensel vil snart ta slutt, alternative kilder må utnyttes. Solen skinner på jorden hele døgnet, og sollyset inneholder enorme mengder energi. Jorden mottar i snitt $1,2 \times 10^{17}$ W energi fra sola [2]. I følge [3] tilsvarer en times energi fra solen menneskehetens energibehov for ett år. I 1931 hadde Thomas Edison en samtale med Henry Ford hvor han sa følgende om solenergi [4]:

I'd put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don't have to wait until oil and coal run out before we tackle that.

Nesten 80 år etter (2010) er fossilt brensel fortsatt dominerende. Men vi har teknologi for å utnytte energien. En måte å utnytte denne energien på, er å konvertere den til elektrisk energi ved hjelp av fotovoltaiske solceller. Mesteparten av de fotovoltaiske solcellene lages i dag av silisium. Silisium gir ikke den potensielt beste solcellen, men brukes fordi det er et svært vanlig materiale på jorden, og dermed rimeligere. Det er ønskelig å bruke renest mulig silisium. Urenheter spiller en viktig rolle i begrenning av virkningsgrad.

Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB) har i dag en etablert bildeanalysegruppe og fysikkmiljø.

Førsteamanuensis Espen Olsen, hovedveileder for denne masteroppgaven, med erfaring fra forskning rundt solcelleteknologi, ønsket å finne ut om det hyperspektrale kameraet IMT har kan brukes til å studere fotoluminescens fra silisiumwafere. PhD-student Andreas Flø er med i bildeanalysegruppa og har brukt kamera mye i sitt doktorgradsarbeide og ble med som tilleggsveileder. Målet med denne masteroppgaven er å finne ut om kamera kan brukes til å studere fotoluminescens fra silisiumwafere. På sikt ønsker IMT å bruke kamera til å lokalisere urenheter, men det er utenfor denne oppgavens omfang.

Kapittel 2

Teoretisk bakgrunn

2.1 Halvledere

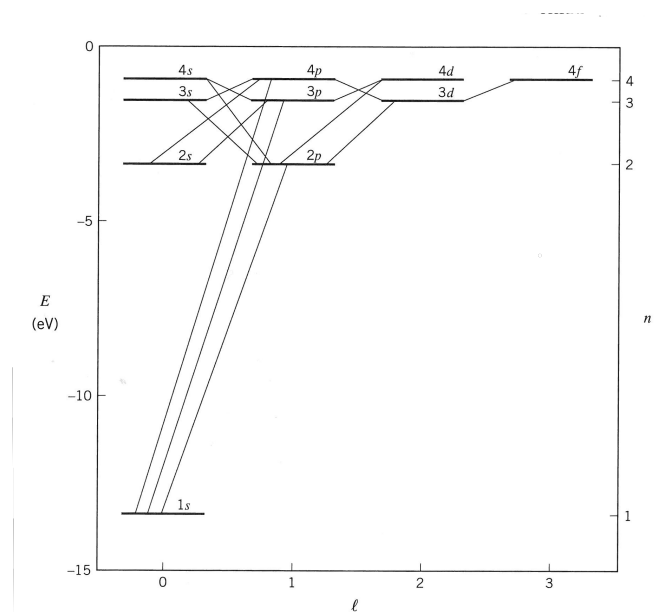
2.1.1 Energinivåer og energibånd

Atomer består av protoner, nøytroner og elektroner. Protonene og nøytronene er i kjernen av atomet, mens elektronene kretser rundt kjernen. Hvor elektronene vil befinne seg er ikke helt tilfeldig, men avhengig av energitilstanden. Energitilstanden til elektronet er kvantisert. Det vil si at den ikke er kontinuerlig. Tilstandene er avhengig av Plancks konstant, h , og kalles energinivåer [1, 5].

For å forstå hva energinivåer er, er det enklest å se på hydrogenatomet. Figur 2.1 viser energinivåene i hydrogenatomet. Strekene mellom nivåene indikerer hvilke energioverganger som er mulige. Vanligvis er disse overgangene knyttet til omløpskvantetallet l . Elektroner søker den tilstanden med lavest energinivå tilgjengelig. Befinner den seg i et høyt nivå, er eneste mulighet for å komme seg ned enten via de eksisterende nivåene eller direkte ned. Det kan ikke innta noen tilstander mellom nivåene. Energinivåene «samles» ofte sammen og omtales som skall [5].

Grunnstoffene som ikke er edelgasser, opptrer normalt ikke alene. Atomene binder seg sammen og danner molekyler. Bindingene er enten «ioniske» eller «kovalente». Ioniske bindinger vil si at det ene atomet gir fra seg et elektron, mens det andre atomet tar i mot. Dette avhenger av hvor mange atomer som er i det ytterste skallet til atomene [6].

Vanlig bordsalt, NaCl , er eksempel på et molekyl som har ioniske bindinger. Natrium er i gruppe I i det periodiske systemet, klor i gruppe VII. Natrium har et elektron i ytterste skall, mens klor mangler ett. Atomene ønsker seg fulle skall ytterst. For natrium er det enkleste å gi fra seg et elektron, mens for klor er det enkleste å ta til seg et elektron. Natrium blir positivt ladet og klor blir negativt ladet.



Figur 2.1: Hydrogens energinivåer i eV. Strekene mellom nivåene viser energiovergangene elektronene kan gjøre. l er omløpskvantetallet. Hentet fra [5, side 231].

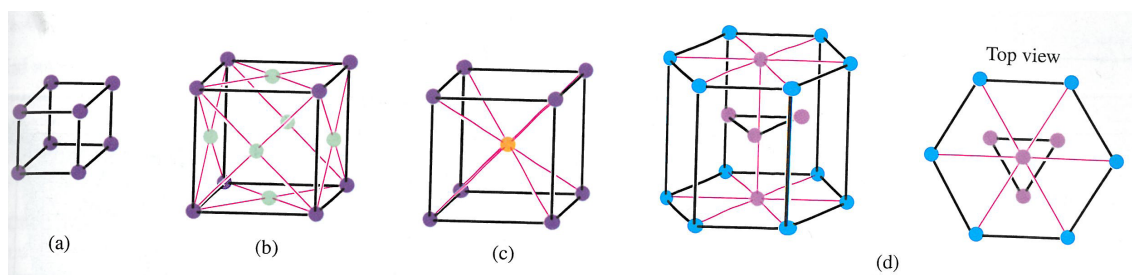
Andre atomer danner molekyler ved å dele elektroner. Hydrogen er igjen et godt eksempel. Hydrogen har et ledig elektron i ytterste skallet sitt. For at det skal bli fullt, trenger det ett til. Et annet hydrogenatom «tenker» det samme. Tilsammen har de to elektroner. De bestemmer seg for å dele elektronene, slik at de får fylt opp skallene sine. Denne formen for binding kalles kovalente bindinger [6].

Amorfe stoffer har en uordnet struktur, stoffer med en ordnet struktur kalles krystaller. Strukturen kalles også gitterstruktur. Det er flere kategorier krystaller, og de sorteres etter formen på krystallene. Vanlig bordsalt, NaCl, har en «simple cubic» struktur. Diamanter og krystallinsk silisium har en «face centered cubic» struktur. Felles for de tre nevnte, er at de ser like ut uansett hvilken vei du ser krystallet fra. Hexagonale krystallstrukturer, ser derimot forskjellig ut, avhengig av hvilken vei man ser krystallet fra. Krystallstrukturene er vist i figur 2.2. Der to krystaller møtes, dannes det en korngrænse [7].

Atomene i gitteret vil vibrere. Hvor mye det vibrerer er kvantisert. Gittervibrasjonen kan derfor ses på som en partikkel. Denne partikkelen kalles fonon [7].

Paulis eksklusjonsprinsipp sier at to elektroner ikke kan ha samme energitilstand på samme tid. Figur 2.3 viser at energinivåene splittes når flere atomer kommer nærme hverandre. Settes mange atomer ved siden av hverandre, vil nivåsplittingen føre til at det dannes omtrent kontinuerlige nivåer. Denne samlingen av energinivåer omtales også som energibånd. Dette eksempelet gjelder også silisiumatomer og er vist nærmere i figur 2.3 [1, 5–7].

Mellom energibåndene blir det et gap, det forbudte energigap. Der er det ingen energinivåer elektronene kan innta. For å «komme over» energigapet, må elektronene tilføres minst like



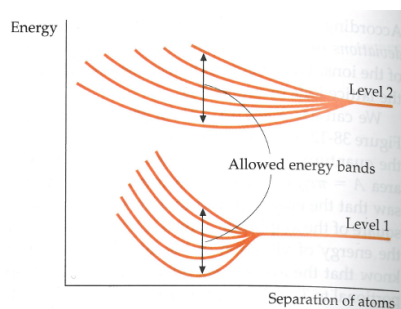
Figur 2.2: Forskjellige krystallstrukturer. Simple cubic(a), face-centered cubic(b), body-centered cubic (c) og hexagonal close packed (d). Krystallinsk silisium har samme strukturen som diamant, (c). Hentet fra [8, side 1357].

mye energi som energiforskjellen mellom båndene [7].

Siste båndet som blir fylt opp med elektroner ved null kelvin, kalles valensbåndet. Neste bånd er ledningsbåndet. Ved høyere temperaturer kan noen elektroner likevel eksiteres opp i ledningsbåndet [1, 7].

Ved å se på energibåndene og energigapet til et materiale, kan det klassifiseres som leder, halvleder eller isolator. Figur 2.4, hentet fra [1], viser hvordan.

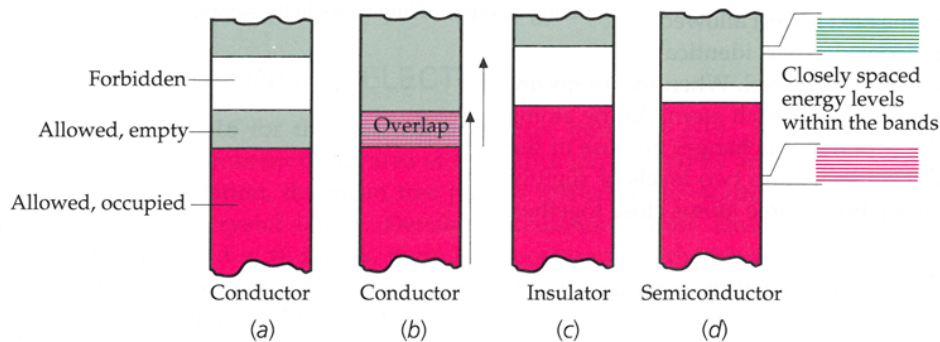
2.4a viser valensbåndet og ledningsbåndet til en leder. I valensbåndet er det ledige energinivåer, elektronene trenger ikke mye energi for å bryte løs, siden de kan bevege seg i valensbåndet. Elektronene «trenger» dermed ikke å eksiteres til ledningsbåndet. Kobber har denne båndstrukturen [1].



Figur 2.3: Energinivåene splittes opp når flere, i dette tilfelle seks, atomer settes sammen. Mange nok atomer fører til et tilnærmet kontinuerlig energibånd [1, side 1298].

Magnesium er et annet ledereksempel. I motsetning til hos kobber, er valensbåndet fylt helt opp. Men ledningsbåndet overlapper valensbåndet (figur 2.4b), elektronene trenger derfor ikke mye energi for å bevege seg [1].

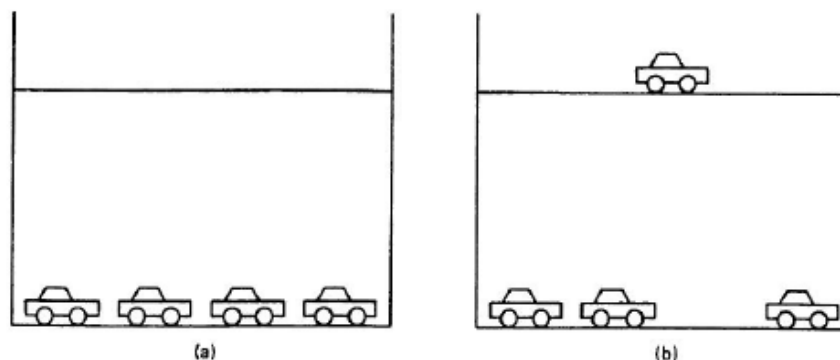
Når energigapet blir større enn 3 eV, er det snakk om en isolator (figur 2.4c). I tilfeller hvor forskjellen er mindre enn 3 eV, kalles det en halvleder (figur 2.4d) [1, 7].



Figur 2.4: Energibånd til ledere, isolatorer og halvledere. Ledningsbåndet regnes som tomt i alle tilfelle-
ne. Valensbåndet til en leder, (a), har ledige plasser til elektroner, det vil si at elektronene lett
kan bevege seg. En leder kan også ha fullt valensbånd med overlappende ledningsbånd (b). En
isolator, (c), har fullt valensbånd, elektronene trenger derfor mer energi for å bevege seg opp
i energibåndet. En halvleder, (d), er en isolator, med mindre avstand mellom valensbåndet og
ledningsbåndet. Avstanden mellom energibåndene kalles for energigap [1, side 1298].

2.1.2 Elektroner og hull

Elektron og hull er ladningsbærerne i halvledere. I [7] beskriver Green en god analogi for
elektron-hullpars bevegelse i halvledermateriale. Figur 2.5 illustrerer et ideelt parkeringshus
med to etasjer. I første etasje (figur 2.5a) er det fullt med biler, ingen biler kan bevege seg
innenfor den etasjen. Andre etasje er tomt. En av bilene flyttes direkte opp i andre etasje. Den
etterlater seg da en ledig plass, eller et «hull» i første etasje, slik som vist i figur 2.5b. Bilen
kan bevege seg fritt i andre etasje. Biler som flytter seg i første etasje vil nå etterlate seg et hull,
hullet «beveger» seg.



Figur 2.5: Elektron-hullparanalogi. Bilene forestiller elektroner, tomme parkeringsplasser forestiller hull
[7, side 20].

Første etasje er analogt med valensbåndet, mens andre etasje er analogt med ledningsbåndet i
halvlederen. Et elektron som «ønsker» å bevege seg i et fullt valensbånd får ikke gjort det.
Akkurat som med bilen er den eneste utveien å komme seg et nivå opp, hvor elektronet kan
bevege seg fritt. Når elektronet beveger seg et nivå opp, etterlater det seg et hull. Elektronet har
som kjent negativ ladning, mens hullet defineres som positivt ladet. Elektriske strømmer i

halvledermaterialet skyldes bevegelsene til elektroner. I valensbåndet er det ofte enklere å si at hullet beveger seg enn at elektronet beveger seg. Med den definisjonen skyldes elektriske strømmer bevegelsene til elektroner og hull.

Krystallets atomer påvirker elektroner og hull i halvledermaterialet. Elektroner og hull i halvledere responderer derfor til påtrykte krefter på en annen måte enn partikler i fritt rom. Newtons lover gjelder derfor generelt ikke for krefter på elektroner og hull i halvledermaterialer. I mange tilfeller, viser derimot kvantemekaniske beregninger at kreftene kan beregnes omtrent på samme måte som i fritt rom. For å få til dette, må det gjøres visse modifikasjoner. Ligning (2.1) viser hvordan kreftene, F , til elektroner i ledningsbåndet kan beskrives med newtons 2. lov [7, 9].

$$F = m_e^* a = \frac{dp}{dt} \quad (2.1)$$

Hvor a er akselerasjonen til elektronet, p er bevegelsesmoment i krystallet, t er tiden og m_e^* er effektiv masse. Effektiv masse korrigerer for hvordan krystallets periodiske krefter påvirker elektronet.

Energien, E , til et fritt elektron er

$$E = \frac{p^2}{2m_e} \quad (2.2)$$

Hvor p er bevegelsesmengden til elektronet og m_e er massen [7].

Når elektronet eksiteres opp i valensbåndet og etterlater seg et hull, dannes det et elektron-hullpar [7].

2.1.3 Direkte og indirekte halvledere

Forskjellen mellom høyeste energi i valensbåndet, E_V , og laveste energi i ledningsbåndet, E_C kalles energigapet, E_g :

$$E_g = E_C - E_V \quad (2.3)$$

Energi må tilføres for at elektroner skal kunne bevege seg fra valensbåndet til ledningsbåndet. Energimengden avhenger av om halvlederen er en direkte eller indirekte halvleder.

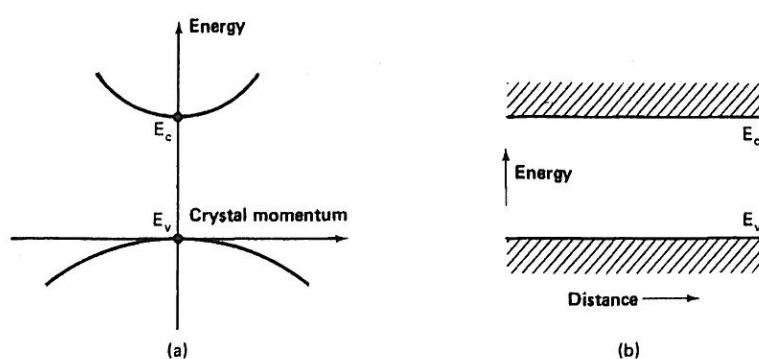
I ligning (2.2) ble energien til et fritt elektron definert. Tilsvarende kan energien til et elektron i ledningsbåndet skrives som

$$E - E_C = \frac{p^2}{2m_e^*} \quad (2.4)$$

Helt analogt blir det for energien til hull i valensbåndet:

$$E_V - E = \frac{p^2}{2m_h^*} \quad (2.5)$$

Dog er dette en sannhet med modifikasjoner. Kun direkte båndgapshalvledere følger disse to ligningene. Figur 2.6 viser bevegelsesmengden til elektronet i et krystall på den horisontale aksene og energiforskjellen på den vertikale aksene. Her har elektronet med lavest energi i ledningsbåndet, samme bevegelsesmengde som det med mest energi i valensbåndet. Det «eneste» som skal til for å eksitere elektroner er dermed et foton med nok energi [7].



Figur 2.6: Prinsipp for direkte båndgaphalvleder. På x-aksen har vi bevegelsesmengden til elektronene, på y-aksen har vi energinivåene. Figuren viser at det høyeste energinivået i valensbåndet, ligger rett under det laveste energinivået i ledningsbåndet. Hentet fra [7, side 22].

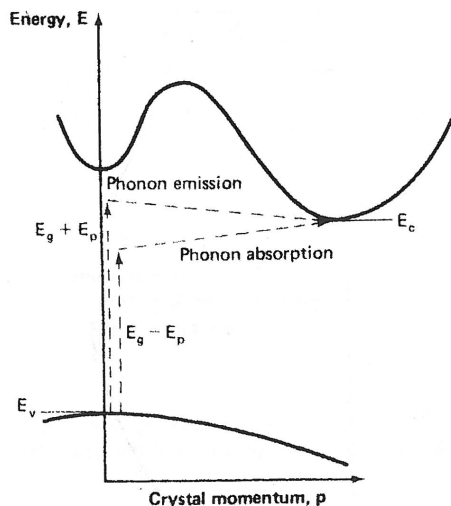
Ikke alle halvledere er direkte båndgapshalvledere. Krystallinsk silisium, som blir studert i dette dokumentet, er en indirekte båndgapshalvleder. Ligningene 2.4 og 2.5 må derfor modifiseres til å involvere et fonon. Energien til elektroner i ledningsbåndet og maksimumsenergien til hull i valensbåndet blir da [7]:

$$E - E_C = \frac{(p - p_C)^2}{2m_e^*} \quad (2.6)$$

Tilsvarende beskrives energien i valensbåndet slik:

$$E_V - E = \frac{(p - p_V)^2}{2m_h^*} \quad (2.7)$$

Hvor p_C er bevegelsesmengden til laveste nivå i ledningsbåndet, mens p_V er bevegelsesmengden til høyeste nivå i valensbåndet. Forskjellen fra direkte båndgapshalvledere er at energien til elektronet med lavest energi i ledningsbåndet, ikke har samme bevegelsesmengde som det med høyeste energi i valensbåndet. Bevegelsesmengden fra fononer må være tilstede for å eksistere elektroner, som illustrert i figur 2.7 [7].



Figur 2.7: Prinsipp for indirekte båndgaphalvledere. På x-aksen har vi bevegelsesmengden til elektronerne, på y-aksen har vi energinivåene. Figuren viser at det høyeste energinivået i valensbåndet, ligger litt til siden i forhold til det laveste energinivået i ledningsbåndet. Figuren er hentet fra [7, side 46].

2.1.4 Lysabsorpsjon

Tidligere er det påpekt at elektronene trenger energi for å eksiteres. I solceller utnyttes energien fra lyspartikler, fotoner.

Fotoner har både partikkelegenskaper og bølgeegenskaper. Einstein fant i sin tid ut at energien til et foton er gitt av bølgeegenskapene til strålingen, frekvensen, f , og bølgelengden, λ .

$$E_{foton} = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.8)$$

Hvor h er Plancks konstant og c er lysets hastighet i vakuum [1].

Synlig lys er den delen av spekteret som er synlig for det menneskelige øyet, typisk bølgelengder på 400 nm og opptil ca 800 nm. Lys med litt kortere bølgelengder kalles ultrafiolett lys, mens lys med litt lengre bølgelengder kalles infrarødt lys. Infrarødt og ultrafiolett lys kalles også for usynlig lys. Ved høy intensitet og bruk av kunstige lyskilder, opplyser [10] at øyet kan registrere lys i området 315 nm-1050 nm!

Fotoner har også bevegelsesmoment. Bevegelsesmomentet, p_{foton} , til et foton er gitt slik:

$$p_{foton} = \frac{h}{\lambda} \quad (2.9)$$

Bevegelsesmengden til et foton er liten i forhold til bevegelsesmengden til elektroner.

I forrige kapittel ble energiforskjellen mellom båndene vist.

Energien til fotoner som skal eksitere elektroner fra valensbåndet til ledningsbåndet, må være større enn energigapet definert tidligere i ligning (2.3). Generelt blir energien som må tilføres mellom to energinivåer da:

$$E_f - E_i = E_{foton} \quad (2.10)$$

Hvor E_f indikerer slutttilstanden og E_i indikerer starttilstanden [7].

Ser så på overgangen mellom båndene. Ligningene 2.4 og 2.5 viste energitilstander i valensbåndet og ledningsbåndet. Settes E_f og E_i inn blir resultatet for en direkte båndgapshalvleder:

$$E_f - E_C = \frac{p^2}{2m_e^*} \quad (2.11)$$

$$E_i - E_V = \frac{p^2}{2m_h^*} \quad (2.12)$$

Dette fører igjen til, sammen med definisjon på E_g :

$$E_{foton} - E_g = \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2.13)$$

For en indirekte halvleder tilføres også energi fra fononer, E_P .

Energien til fotonet må da være:

$$E_{foton} = E_g - E_P \quad (2.14)$$

Hvor godt lys absorberes i silisium er avhenging av bølgelengden til lyset. I [7] er intensiteten, $I(x)$ til lyset gjennom en halvleder definert slik:

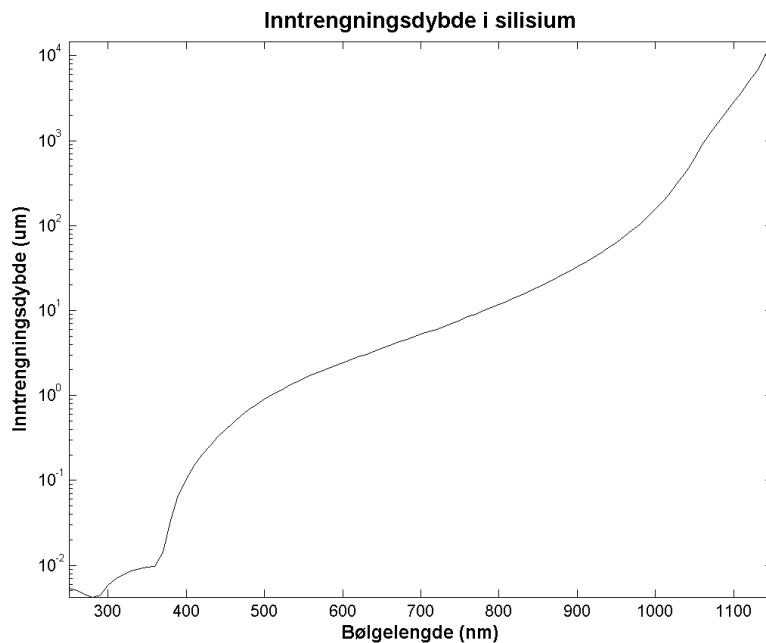
$$I(x) = I(x_0)e^{-\alpha(x-x_0)} \quad (2.15)$$

Hvor α er en absorpsjonskoeffisient, x er hvor langt inn i materialet lyset har inntrengt, og x_0 er overflaten. Hvis x_0 defineres som nullpunkt, og intensiteten ved overflaten defineres som 1, forenkles ligningen til:

$$I(x) = e^{-\alpha x} \quad (2.16)$$

I følge [11] er inntrengningsdybden til lyset definert som den avstanden hvor $I(x) = e^{-1}$. Settes det inn i ligning (2.16), blir inntrenging den inverse til absorpsjonskoeffisienten.

Absorpsjonskoeffisientene er avhengig av temperatur. Oversikt over koeffisienter for silisium ved 300 Kelvin for bølgelengder mellom 250 nm og 1450 nm finnes i [12], i den oversikten regnes det ikke om til inntrengningsdybde, som kan være enklere å forholde seg til. I tabell 2.1 er dette gjort for bølgelengdene mellom 250 nm og 1150 nm. Bølgelengder lenger enn det, har for liten energi til å eksitere elektroner i silisium og er derfor ikke tatt med i den oversikten. Figur 2.8 er en grafisk fremstilling av inntrengningsdybden og viser at ultrafiolett lys trenger kort inn, mens ved lengre bølgelengder trenger lyset lengre inn. Tykkelsen på halvlederen har derfor noe å si for hvor godt lyset absorberes. For tynne halvledere vil korte bølgelengder inntrengne grunt i materialet, og dermed lettere bli reflektert. Bølgelengder som er lengre enn tykkelsen til halvlederen, vil for det meste gå tvers igjennom og dermed ikke eksitere elektroner.



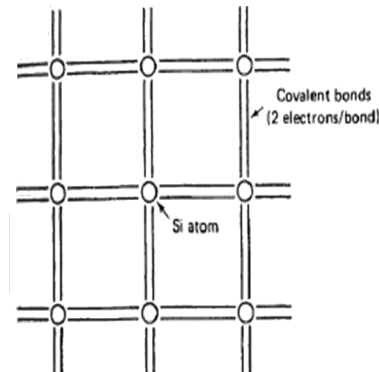
Figur 2.8: Inntrengningsdybder (μm) for lys i silisium som funksjon av bølgelengde(nm), ved 300 Kelvin. Basert på [11] og absorpsjonskoeffisienter hentet fra [12].

Tabell 2.1: Absorpsjonskoeffisienter α og inntrengningsdybder α^{-1} sett i forhold til bølgelengde, λ , i silisium ved 300 Kelvin. Absorpsjonskoeffisienter er hentet fra [12], inntrengningsdybden er den inverse til absorpsjonskoeffisienten [11].

$\lambda(nm)$	$\alpha(\mu m^{-1})$	$1/\alpha(\mu m)$	$\lambda(nm)$	$\alpha(\mu m^{-1})$	$1/\alpha(\mu m)$	$\lambda(nm)$	$\alpha(\mu m^{-1})$	$1/\alpha(\mu m)$	$\lambda(nm)$	$\alpha(\mu m^{-1})$	$1/\alpha(\mu m)$
250	184	0,005	500	1,11	0,901	750	0,13	7,692	1000	0,0064	156
260	197	0,005	510	0,97	1,031	760	0,119	8,403	1010	0,00511	196
270	218	0,005	520	0,88	1,136	770	0,11	9,091	1020	0,00399	251
280	236	0,004	530	0,785	1,274	780	0,101	9,901	1030	0,00302	331
290	224	0,004	540	0,705	1,418	790	0,0928	10,776	1040	0,00226	442
300	173	0,006	550	0,639	1,565	800	0,085	11,765	1050	0,00163	613
310	144	0,007	560	0,578	1,730	810	0,0775	12,903	1060	0,00111	901
320	128	0,008	570	0,532	1,880	820	0,0707	14,144	1070	0,0008	1250
330	117	0,009	580	0,488	2,049	830	0,0647	15,456	1080	0,00062	1613
340	109	0,009	590	0,449	2,227	840	0,0591	16,920	1090	0,00047	2128
350	104	0,010	600	0,414	2,415	850	0,0535	18,692	1100	0,00035	2857
360	102	0,010	610	0,381	2,625	860	0,048	20,833	1110	0,00027	3704
370	69,7	0,014	620	0,352	2,841	870	0,0432	23,148	1120	0,0002	5000
380	29,3	0,034	630	0,327	3,058	880	0,0383	26,110	1130	0,00015	6667
390	15	0,067	640	0,304	3,289	890	0,0343	29,155	1140	0,0001	10000
400	9,52	0,105	650	0,281	3,559	900	0,0306	32,680	1150	0,0001	14706
410	6,74	0,148	660	0,258	3,876	910	0,0272	36,765			
420	5	0,200	670	0,238	4,202	920	0,024	41,667			
430	3,92	0,255	680	0,221	4,525	930	0,021	47,619			
440	3,11	0,322	690	0,205	4,878	940	0,0183	54,645			
450	2,55	0,392	700	0,19	5,263	950	0,0157	63,694			
460	2,1	0,476	710	0,177	5,650	960	0,0134	74,627			
470	1,72	0,581	720	0,166	6,024	970	0,0114	87,719			
480	1,48	0,676	730	0,154	6,494	980	0,00959	104,275			
490	1,27	0,787	740	0,142	7,042	990	0,00792	126,263			

2.1.5 Doping

Urenheter i halvledermaterialet endrer egenskapene til materialene. Urenheter deles inn i to hovedgrupper: interstitielle og substitusjonelle urenheter. Interstitielle urenheter er atomer som tar plass i mellom atomene i krystallgitteret. Erstattes et atom i krystallgitteret med et annet atom, kalles det substitusjonelle urenheter. Sistnevnte brukes til å endre egenskapene til halvledere.



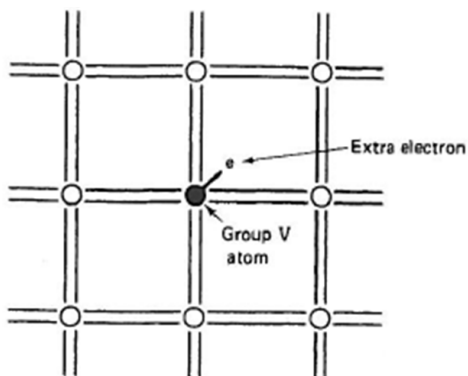
Figur 2.9: Strukturen til krystallinsk silisium. Hvert eneste elektron er bundet til to atomer, med kovalente bindinger. Hentet fra [7, side 27].

Udopet er halvlederen dårlig til å lede elektroner, altså strøm. Figur 2.9 viser gitterstrukturen til krystallinsk silisium. Hvert silisiumatom er bundet til fire andre silisium atomer med kovalente bindinger. Eller, sett fra elektronets synsvinkel er hvert elektron bundet til to atomer. For å bryte de kovalente bindingene må det tilføres relativt mye energi. Nærmere bestemt 13,6 eV [7].

I det periodiske system kategoriseres silisium i gruppe IV. Det vil si at det har fire elektroner i det ytterste skallet. Bor, B, og fosfor, P, hører henholdsvis til nabogruppene III og V. Et gruppe V atom har fem elektroner i det ytterste skallet. Erstattes et atom i silisiumkrytallet med et fosfor atom (eller et annet gruppe fem atom), blir et elektron løst bundet til fosforatomet (figur 2.10). Dette skyldes at silisium har fire elektroner å dele, mens fosfor har fem. Energien for å bryte løs ekstraelektronet er 0,02 eV. Tilsvarende vil doping med gruppe III atomer innføre et ekstra hull i valensbåndet [1, 7].

Figur 2.11a viser at det løst bundne elektronet innfører et energinivå i det forbudte båndgapet nærme ledningsbåndet. Tilsvarende vil gruppe III doping innføre et ekstra nivå nærme valensbåndet (figur 2.11b) [7].

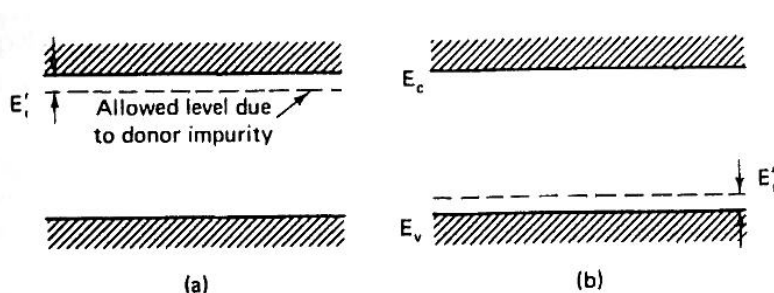
Elektronene som følger av doping med gruppe fem atomer, kalles «donorer». Grunnen til det, er at de er løst bundet og dermed lett kan eksitere til ledningsbåndet. Hvis halvlederen i seg selv skal være nøytralt ladet, må antall elektroner i ledningsbåndet, n , og hull i valensbåndet, p , etter doping være



Figur 2.10: Strukturen til krystallinsk silisium dopet med et gruppe V atom. Hvert eneste elektron er stort sett bundet til to atomer, med kovalente bindinger. Gruppe V atomet har et ekstra elektron som blir svakt bundet. Hentet fra [7, side 28].

$$p - n - N_D^+ = 0 \quad (2.17)$$

Hvor N_D^+ er antall ioniserte donorer.



Figur 2.11: Energienivåinnføring i det forbudte båndgap som følge av doping. (a) Gruppe V doping (b) gruppe III doping. Hentet fra [7, side 29].

For materialer dopet med gruppe III atomer, kalles hullene «akseptorer». Antall elektroner i ledningsbåndet og hull i valensbåndet blir da:

$$p - n - N_A^- = 0 \quad (2.18)$$

Hvor N_A^- er antall ioniserte akseptorer.

Eksiteringen av elektroner kan bare skje fra valensbåndet til ledningsbåndet i en udopet ideell halvleder. En konsekvens av dette er at det vil være like mange elektroner som hull:

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (2.19)$$

Hvor n_i er ladningsbærertettheten i det rene materialet¹. Subscript 0 indikerer at det er termisk

¹Engelsk: intrinsic carrier concentration

likevekt [13].

Majoriteten av donorene, N_D , er ionisert. En konsekvens av dette samt ligning (2.17) og (2.19) er at n blir mye større enn p og at:

$$\begin{aligned} N_D^+ &\approx N_D \\ n &\approx N_D \\ p &\approx \frac{n_i^2}{N_D} \ll n \end{aligned} \quad (2.20)$$

Tilsvarende, for akseptorer:

$$\begin{aligned} N_A^+ &\approx N_A \\ p &\approx N_A \\ n &\approx \frac{n_i^2}{N_A} \ll p \end{aligned} \quad (2.21)$$

Gruppe V doping kalles derfor ofte p-doping, mens gruppe III doping kalles n-doping [7, 9].

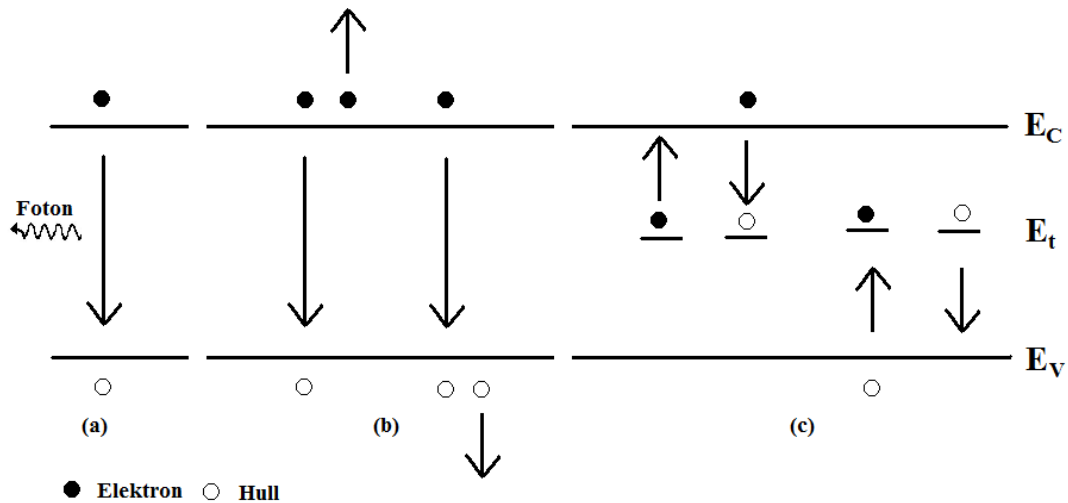
2.1.6 Rekombinasjon

Normalt ønsker elektronene å være i lavest mulig energitilstand, en likevektstilstand. I termisk likevekt vil $n_0 p_0 = n_i^2$

Når elektronet går fra valensbåndet til ledningsbåndet får det høyere energi. Elektronet vil derfor strebe etter å komme tilbake til lavest mulig energitilstand, likevektstilstanden. De første plassene som fylles opp, ligger i valensbåndet. På grunn av termisk energi vil noen av elektronene likevel befinne seg i ledningsbåndet, selv i likevekt [7, 9].

Prosessen der elektron-hullpar blir dannet kalles generering. Den motsatte prosessen kalles rekombinasjon. For en halvleder i termisk likevekt vil genereringsraten, G , være lik, rekombinasjonsraten, R . Ved termisk likevekt betegnet som G_0 og R_0 . Ved optisk generering vil naturligvis $G > G_0$ og $R > R_0$. Dette vil igjen føre til at det blir en økning av antall ladningsbærere i både valensbåndet og ledningsbåndet. Denne forskjellen omtales også som Δn for elektroner og Δp for hull [13]:

$$\Delta n = n - n_0, \quad \Delta p = p - p_0 \quad (2.22)$$



Figur 2.12: Rekombinasjon. Strålingsrekombinasjon, (a), Augerrekombinasjon, (b) og SRH-rekombinasjon, (c). Figuren viser energiovergangene som er mulig. Basert på tilsvarende figurer i [13, side 35 og 42].

Når kilden til ekstra generering blir borte, vil det ta litt tid før ladningsbærertetthetene for elektroner og hull vil nå termisk likevekt. Antas det at materialet er veldig rent, vil $\Delta n \approx \Delta p$. Overskuddet av ladningsbærere vil da avhenge av netto rekombinasjonsrate $U = R - R_0$ og vil være avhengig av tiden, t [13]:

$$\frac{\delta \Delta n(t)}{\delta(t)} = -U(\Delta n(t), n_0, p_0) \quad (2.23)$$

En følge av (2.23) er at Δn avtar eksponensielt. Tidskonstanten, τ , til den eksponensielle funksjonen er definert som ladningsbærerens levetid [13]:

$$\tau(\Delta n, n_0, p_0) = \frac{\Delta n}{U(\Delta n, n_0, p_0)} \quad (2.24)$$

Rekombinasjon skyldes flere mekanismer. De vanligste er strålingsrekombinasjon, Augerrekombinasjon, Shockley-Read-Hall-rekombinasjon (SRH) og overflaterkombinasjon. Prinsippet for de tre førstnevnte er vist i figur 2.12. Den effektive levetiden τ_{eff} blir da [13]:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{str}} + \frac{1}{\tau_{auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{overflate}} \quad (2.25)$$

Strålingsrekombinasjon

Strålingsrekombinasjon er den enkleste formen for rekombinasjon. I prinsippet er det optisk generering motsatt vei (figur 2.12a). Elektronet går fra ledningsbåndet til valensbåndet og gir fra seg et foton. Fotonets bølgelengde svarer til energien mellom båndene, jfr ligning (2.8) [7].

Strålingsrekombinasjonsraten, R_R er gitt ved:.

$$R_R = Bnp \quad (2.26)$$

Hvor B er en materialavhengig konstant. Det må også tas hensyn til termisk likevekt. Rekombinasjonsraten, U_{str} , blir da [7, 13]

$$U_{str} = B(np - n_i^2) \quad (2.27)$$

Hvis $\Delta n = \Delta p$, blir levetiden til elektroner og hull [9]

$$\tau_{str} = \frac{n_0 p_0}{B n_i^2 (n_0 + p_0)} \quad (2.28)$$

Augerrekombinasjon

Elektronet i ledningsbåndet kan overføre energien sin til et annet elektron i ledningsbåndet eller til et hull i valensbåndet, og dermed minske energien sin. Rekombinasjon som arter seg slik, kalles Augerrekombinasjon. Disse to mekanismene er illustrert i figur 2.12b [7, 13].

Rekombinasjonsraten, U_{auger} , er summen av Augerrekombinasjon i ledningsbåndet og i valensbåndet [13]:

$$U_{auger} = C_n(n^2 p - n_0^2 p_0) + C_p(np^2 - n_0 p_0^2) \quad (2.29)$$

Hvor første leddet på høyre side er for valensbåndet og andre leddet er for ledningsbåndet. C_n og C_p er Auger-koeffisientene for valensbåndet og ledningsbåndet.

Levetiden som følger av Augerrekombinasjon er avhengig av dopingnivået i materialet, og om materialet er p- eller n-dopet. Hvis materialet er litt n-dopet er levetiden $(C_n N_D^2)^{-1}$, mens hvis det er litt p-dopet er levetiden $(C_p N_A^2)^{-1}$. For materialer som er mer dopet gjelder [13]:

$$\tau_{auger} = \frac{1}{(C_n + C_p) \Delta n^2} \quad (2.30)$$

Shockley–Read–Hall–rekombinasjon

En variant av strålingsrekombinasjonen, er rekombinasjon via urenheter². Urenheter i halvledermaterialet innfører energinivåer i det forbudte båndgapet. Elektron-hullparene kan rekombinere via disse energinivåene. I og med at det vil være mindre differanse i energien mellom disse nivåene, vil fotonene sendt ut ha lavere energi, derav høyere bølgelengde. Denne formen for rekombinasjon kalles også «Single level trap» eller Shockley-Read-Hall-rekombinasjon. Mulige energioverganger er vist i figur 2.12c [7, 9].

Rekombinasjonsraten, U_{SRH} , er gitt som en funksjon av av levetiden til elektroner, τ_{e0} , og hull, τ_{h0} :

$$U_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{h0}(n + n_1) + \tau_{e0}(p + p_1)} \quad (2.31)$$

Hvor n_1 og p_1 er definert utifra den effektive tilstandstettheten i ledningsbåndet, N_C og energien til nivået innført av urenheten, E_t , samt temperaturen, T , og Boltzmanns konstant, k .

$$n_1 = N_C e^{(E_t - E_C)/kT} \quad (2.32)$$

$$n_1 p_1 = n_i^2 \quad (2.33)$$

Fjerning av urenheter fra halvledermaterialet kan gjøres ved hjelp av en metode kalt gettering. Ved å legge på et lag med fosfor skapes det en kjemisk gradient som tiltrekker seg urenheter. Dette gjøres på en måte som gjør at laget med urenheter blir liggende på toppen slik at det bare er å fjerne dette laget for å bli kvitt urenheterne [14].

Overflaterekombinasjon

Over overflaten vil det ikke være silisiumatomer å dele elektroner med. Elektronene ytterst er kun bundet til et atom. Disse elektronene vil være løst bundet, noe som vil innføre mange energinivåer i det forbudte båndgapet. Disse innførte energinivåene omtales ofte som «dangling bonds». Rekombinasjonsraten, $U_{overflate}$ måles per arealenheter og er gitt som [7, 13]:

$$U_{overflate} = \frac{S_{e0} S_{h0} (np - n_i^2)}{S_{e0} (n + n_1) + S_{h0} (p + p_1)} \quad (2.34)$$

Hvor S_{e0} og S_{h0} er overflaterekombinasjonshastigheter [7].

²Engelsk: Recombination through traps

Overflaterkombinasjon elimineres ved å passivere materialet. De vil si at overflaten behandles, slik at elektronene ikke lenger er løst bundet.

2.1.7 Levetidsmålinger, QSS-PC

«Quasi steady state photo conductance» (QSS-PC) eller på norsk: Kvasi-likevektstilstand fotokonduktans er en metode som brukes til å måle levetider på halvledere. Halvlederen kobles induktivt til måleapparatet og ledningsevnen måles mens prøven belyses med en blits. Ved hjelp av kalibreringsmetoder og empiriske sammenhenger, beregner apparatet en levetid i μs . Levetiden er dessuten avhengig av ladningsbærertettheten, så den oppgis også. Levetidsmålinger er ikke en viktig del av dette arbeidet, for mer informasjon om QSS-PC og andre levetidsmålingsmetoder anbefales derfor «Lifetime Spectroscopy» av Rein [13].

2.1.8 Fotoluminescens

Luminescens er i følge [15] «lysutvikling som ikke skyldes varme».

Fotoluminescens er lysutvikling som skyldes lys. Fotoluminescens i halvledere vil i hovedsak skyldes strålingsrekombinasjon (kapittel 2.1.6) og shockley-read-hall–rekombinasjon (kapittel 2.1.6). Teoretisk vil ren krystallinsk silisium luminescere ved ca 1,1 eV som tilsvarer 1130 nm. Doped materiale vil luminescere ved lavere energi.

I kapittel 2.1.5 ble det bestemt til 0,02 eV lavere som tilsvarer 1150 nm [7].

Luminescensen vil avhenge av ladningsbærertettheten. Områder hvor det er høye konsentrasjoner av elektroner i ledningsbåndet, vil det være flere elektroner som rekombinerer, og dermed mer lys. Shockley–read–hall effekten som skyldes urent materiale, gjøre at noen av fotonene som sendes ut, får lavere energi og derav lengre bølgelengde.

2.2 Statistikk og signal-støyforhold

2.2.1 Enkel statistikk

Grunnleggende begreper i statistikk er forventingsverdi, varians og standaravvik [16].

Tas N-målinger av en variabel, x , vil forventningsverdien, $E(x)$, være definert som snittet av målingene.

$$E(x) = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.35)$$

Standardavviket til en målt verdi, σ , er definert som

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.36)$$

Et annet nyttig begrep er varians (Var). Variansen til måling x_i er gitt som:

$$\text{Var}(x_i) = \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.37)$$

Dersom det tas N-målinger med samme varians, dvs under samme forhold, blir variansen til gjennomsnittet:

$$\text{Var}(\bar{x}) = \sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma^2}{N} \quad (2.38)$$

Standardavviket til gjennomsnittet blir da:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.39)$$

2.2.2 Signal-støy forhold

Med et signal, både analogt og digitalt, følger det med støy. Forholdet mellom signalet og støyen kalles signal-støyforhold (SNR³). I all enkelhet:

$$\text{SNR} = \frac{\text{Signal}}{\text{Støy}} \quad (2.40)$$

Det er også vanlig å uttrykke det i desibel slik [17]:

$$\text{SNR}_{dB} = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{Signal}}{\text{Støy}} \right] \quad (2.41)$$

Videre brukes den første definisjonen.

Støy i signaler er bare en form for usikkerhet. Ved å se på signalet som en måling x_i og støyen som et standardavvik, σ , kan ligningene fra kapittel 2.2.1 brukes til å beskrive signalstøyforholdet slik:

$$\frac{x_i}{\sigma} \quad (2.42)$$

Midles derimot N målinger under samme forhold, vil signal-støyforholdet bli:

$$\frac{\bar{x}}{\sigma_{\bar{x}}} = \frac{\sqrt{N}\bar{x}}{\sigma} \quad (2.43)$$

Ved å ta flere målinger under samme forhold vil derfor signal-støy forholdet bli bedre ved at usikkerheten, støyen, til gjennomsnittet er mindre enn usikkerheten til hver enkelt måling.

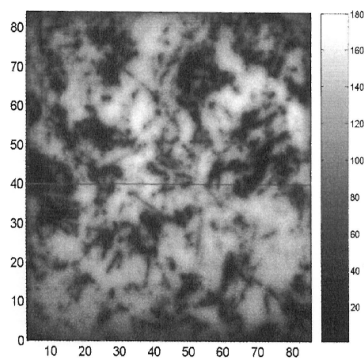
³fra engelsk: Signal Noise Ratio

Kapittel 3

Eksperimentell metode

3.1 Bakgrunn

Trupke med flere [18] detekterer fotoluminescens med et avkjølt «kommersielt tilgjengelig CCD-kamera». Lyskilden oppgis til å være 15 W laser med bølglengde 815 nm. Arealet til waferen de presenterte resultat fra var $8,5 \times 8,5 \text{ cm}^2$. Oversatt til effekt per areal vil det si $0,2 \text{ W cm}^{-2}$. Resultatet av fotoluminescensen angir de som et levetidskart, vist i figur 3.1.



Figur 3.1: Trupke med flere [18] sine resultat. Bildet viser fotoluminescens fra en silisiumwafer. Lyskilde er laser på 815 nm på 15W.

3.2 Utstyr

Videre følger en oversikt over utstyret brukt i dette arbeidet.

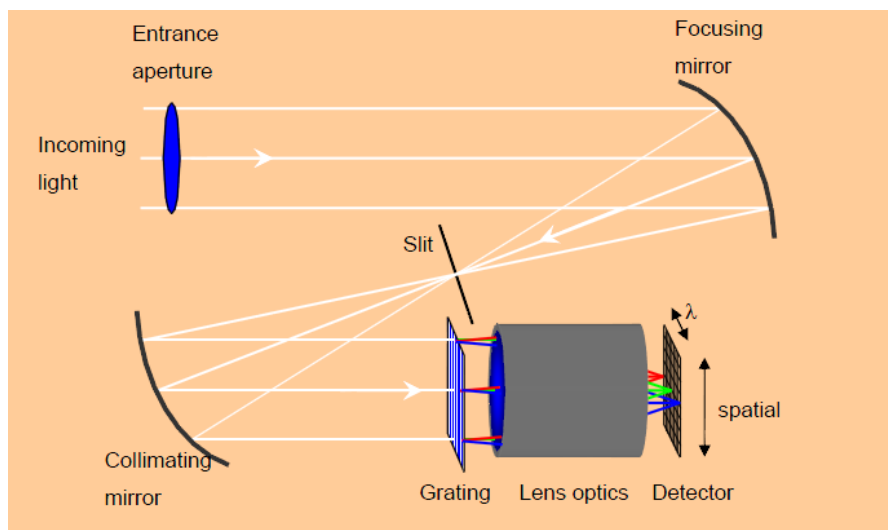
3.2.1 Wafere

Wafere er av multikrystallinsk silisium og er gettret og passivert, metoder beskrevet i kapittel 2.1.6. Wafere er tidligere studert i Kjersti Grande sitt masteroppgavearbeid [19]. Det brukes to wafere, wafer 1 har oppgitt lang levetid, $85 \mu\text{s}$ (wafer 122 i [19]), og wafer 2 med oppgitt kortere levetid (wafer 49 i [19]), $2 \mu\text{s}$. Levetiden kontrollmåles fem steder på begge wafere med metoden QSS-PC, beskrevet i kapittel 2.1.7. For å få en jevn bakgrunn legges wafere på en polert plate av rustfritt stål. Wafere er omtrent $240 \mu\text{m}$ tykke.

Wafer 1 ble ved et uhell delt i tre biter. Hvordan wafere er delt opp vises i resultatdelen under QSS-PC målingene (figur 4.1). Begge wafere er kvadratiske med sider på 5 cm.

3.2.2 Kamera og programvare

Kamera er hyperspektralt. Det vil si at det kan registrere fotoner i flere bølglengder samtidig. Kamera registrerer elektromagnetisk stråling med bølglengder mellom 935 nm og 1700 nm. Dette spekteret deles opp i 150 bånd, hver med en bredde på ca 5 nm. Når det nevnes bølglengden til et bånd, er det senterbølglengden det refereres til.



Figur 3.2: Prinsippskisse for kameraets virkemåte. Hentet fra [20, side 7]

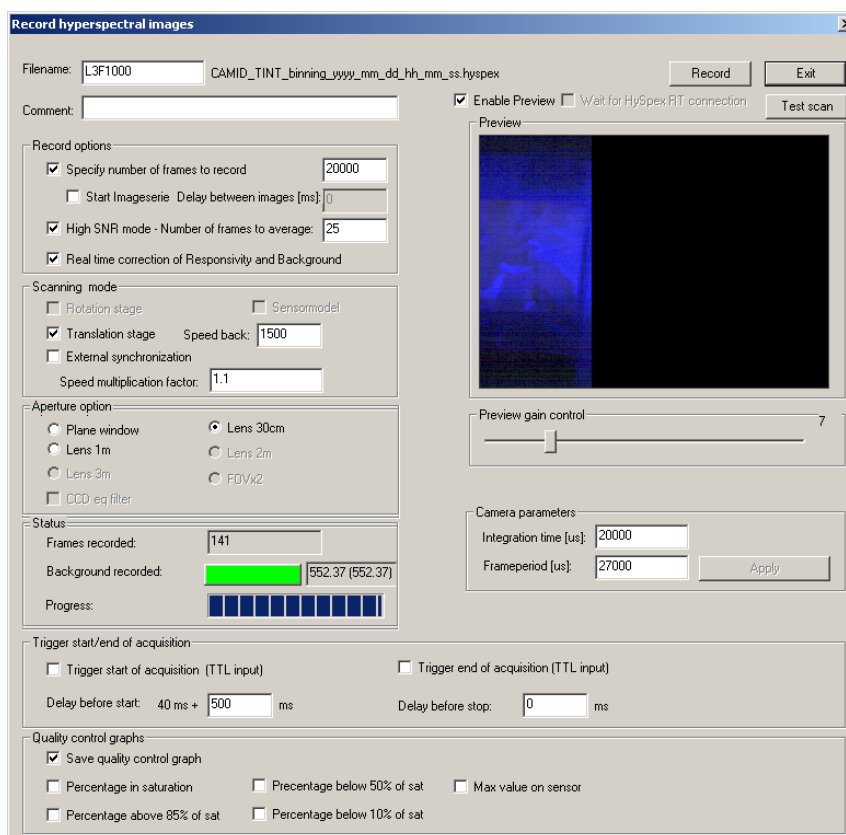
Prinsippet for hvordan kameraet detekterer fotoner er vist i figur 3.2. Innkommende lys treffer et speil som fokuserer strålene inn mot en spalte. Spalten sørger for at det bare er en tynn stråle som kommer gjennom. Et kollimerende speil sender deretter strålen videre gjennom et gitter.

Gitteret bryter fotonene i strålen med forskjellige vinkel avhengig av bølgelengden. Etter gitteret er det optiske linser som sender lyset videre til en detektor som detekterer både romlig¹ og spektralt. I romlig retning detekteres 320 punkter i en linje, spektralt detekteres båndene, altså 150. På denne måten registreres hele nevnte bølgespekteret til en linje i sanntid. For å detektere større objekter, må enten kamera eller objektet bevege seg. Kamera brukt i dette arbeidet, står i ro, mens et skannebord (kapittel 3.2.3) brukes til å bevege objektet [20].

Pikslene i kamera er i [20] oppgitt som kvadratiske. Oppløsningen finnes ved å dele bredden til waferen på antallet piksler bredden til waferen fyller. Det viser seg å være omtrent 140 piksler. Oppløsningen blir da 0,35 mm/pixel.

Kamera med betegnelse «HySpex SWIR-320i» og programvaren, «HYSPEX versjon 3.5» brukt til opptakene er levert av Norsk Elektro Optikk AS . Figur 3.3 viser grensesnittet for kommunikasjon med kamera. Under kommer en oversikt basert på manualen [20] og egne erfaringer.

Filnavn settes sammen av en egenvalgt streng og en automatisk generert del. Den automatisk genererte delen inneholder informasjon om opptaket. Lukkertid, eventuell HSNR innstilling (se neste avsnitt), dato og om bilde er korrigert for bakgrunnsstøy. Filen med det hyperspektrale bildet får filendelsen «hyspex».



Figur 3.3: Skjermdump av programvaren brukt til opptak.

¹Engelsk:spatial

Record options er innstillinger knyttet til opptaket. Her kan det settes hvor mange bilder² som skal tas opp («specify numbers of frames to record»), altså hvor bredt bilde skal bli. Det kan også settes hvor lang tid det skal være mellom to bildeserier («Start Imageserie - Delay between images [ms]»). For å redusere støy i bilde kan «High-SNR mode» settes. Kameraet vil da ta flere bilder på omtrent samme sted, midle bildene og lagre middelverdien. Det er verdt å merke seg at hver HSNR-måling teller med når antallet bilder telles opp. Nederst i opptakskategorien, kan det settes at bakgrunnen skal korrigeres når målingene lagres. Bakgrunnen vil si støyen som er i rommet før opptak. Bakgrunnen lagres sammen med de hyperspektrale bildene i headeren til filen og kan legges til senere om ønskelig.

Erfaringsmessig kan det bli tull hvis «specify number of frames to record» boksen krysses vekk. Det hender kamera stopper på den gamle verdien som lå inne før krysset blir fjernet. For å unngå dette, settes derfor verdien mye høyere enn den bør være, og målingen stoppes manuelt istedenfor.

Scanning mode Her settes parametrene til skannebordet. «Translation stage» indikerer om skannebordet skal være på eller av. «Speed back» er returhastigheten til skannebordet. Bordet kan synkroniseres eksternt, noe som ikke er utprøvd i dette arbeidet. «Speed multiplication factor» indikerer hvor fort skannebordet skal gå i forhold til lukkertiden.

Aperture kategorien forteller programvaren hvordan kamera er satt slik at riktig kalibrering blir valgt internt i programmet. I denne settingen er kamera 30 cm fra objektet. Denne opsjonen røres ikke, med mindre avstanden endres.

Camera parameters: Lukkertiden³ og bildeperioden⁴ settes her. Tidene er i mikrosekunder. bildeperioden må være større enn lukkertiden, minst 7000 mikrosekunder. Dette tillegget sikrer at dataene rekker å bli lagret.

Preview: Forhåndsvisning av bildet vises her. Hvilke bånd som skal vises bestemmes i «Camera parameters» et annet sted i programmet. Bildet settes sammen av de tre valgte båndene. «Preview gain control» viser hvor mye signalet skal forsterkes før det forhåndsvises. Denne opsjonen har ikke noe å si for resultatet som blir lagret. Nummerene på båndene som danner grunnlaget for forhåndsvisningen, lagres i headeren.

²Engelsk: frames

³Engelsk: integration time

⁴Engelsk: frameperiode

3.2.3 Skannebord

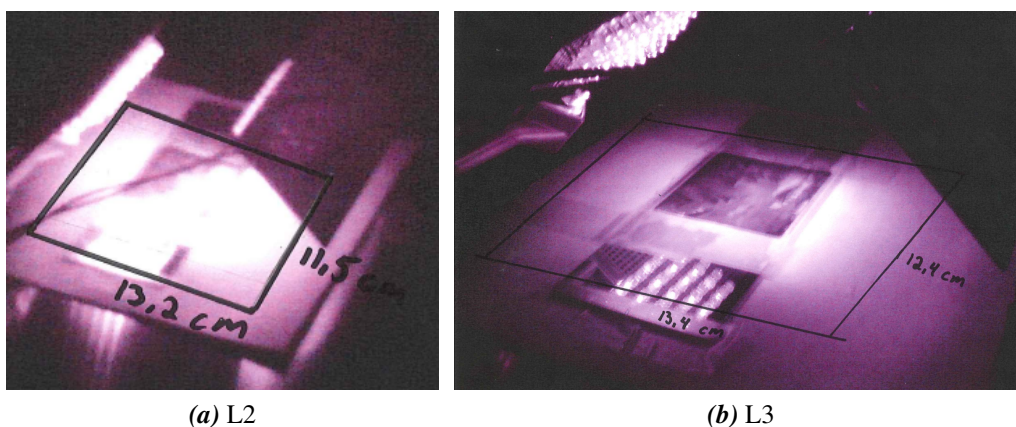
Fabrikatet til skannebordet er opprinnelig Standa, men tilpasset av Norsk Elektro Optikk. Skannebordet flyttes ved hjelp av en stepmotor. Et step flytter bordet $12,5 \mu\text{m}$. Informasjonen fra fabrikanten, [21], gir ikke noe særlig mer nyttig informasjon om skannebordet enn manualen til kamera [20]. Utifra sistnevnte manual er det ikke mulig å finne ut hvor mange step som blir brukt for å flytte bordet ved de forskjellige kamerainnstillingene. Oppløsningen i skannerretningen finnes ved å måle hvor mange piksler bredden til waferen fyller, og dele det på bredden til waferen.

3.2.4 Lyskilder

Tre lyskilder ble brukt i undersøkelsene. Tabell 3.1 gir en oversikt over lyskildene brukt, uteffekt, effekt per areal, bølgelengden til lyskilden og inntrengningsdybden i silisium. Arealet led Brettene lyser over er bestemt utifra bilder av belysningen tatt med et vanlig mobilkamera. Arealet er tegnet opp i figur 3.4. Linja laseren lyser over er 10 cm lang, og 2 mm bred, altså 2 cm^2 .

Tabell 3.1: Lyskilder. Uteffekt er strålingseffekt ut fra kilden. Arealeffekt er estimert utifra størrelsen på området lyset treffer. Inntrengningsdybden er for lys i silisium (tabell 2.1).

Type	Uteffekt (W)	Arealeffekt (mW cm^{-2})	Bølgelengde (nm)	Inntrengningsdybde (μm)
L1 Laser	2	1000	808	13
L2 LED-brett	19,2	126	830	15
L3 LED-brett	2,7	16	875	25



Figur 3.4: Området brukt for beregning av arealeffekt til lyskilde L2 (a) og L3 (b).

Lyskilde L1 er en faststoffs infrarød laser med en uteffekt på 2 W . Bølgelengden er 808 nm . Strålen er veldig konsentrert. Effekten til laseren per arealenhet er 1 W cm^{-1} . Omregnet til

Wm^{-1} , blir det $10 MWm^{-1}$, eller 10000 soler! Beskyttelsesbriller må derfor brukes sammen med laseren for å unngå direkte innstråling i øyet.

De to neste lyskildene er satt sammen av to sett dioder. Det første brettet, L2, er satt sammen av 240 stykk 830 nm lysdioder. Diodene er fordelt på serier på åtte som igjen er koblet i parallell. Strømmen er begrenset til ca 120 mA med en motstand på 33 ohm. Utifra databladet [22] har hver lysdiode utstrålt effekt på ca 80 mW ved dette strømnivået.

Det andre brettet, L3, er satt sammen av 90 stykk 875 nm lysdioder. Seriene er på ni dioder med en motstand på 18 ohm i serie. Til sammen blir det 10 serier som kobles i parallell. Motstandene begrenser strømmen til ca 120 mA- 130 mA. Utifra databladet [23] vil denne dioden levere strålingseffekt på ca 30 mW ved 120 mA. Vedlegg A inneholder koblingsskjema for begge brettene. Varmeutviklingen fra led-brettene kjøles med en bordvifte.

3.2.5 Filter

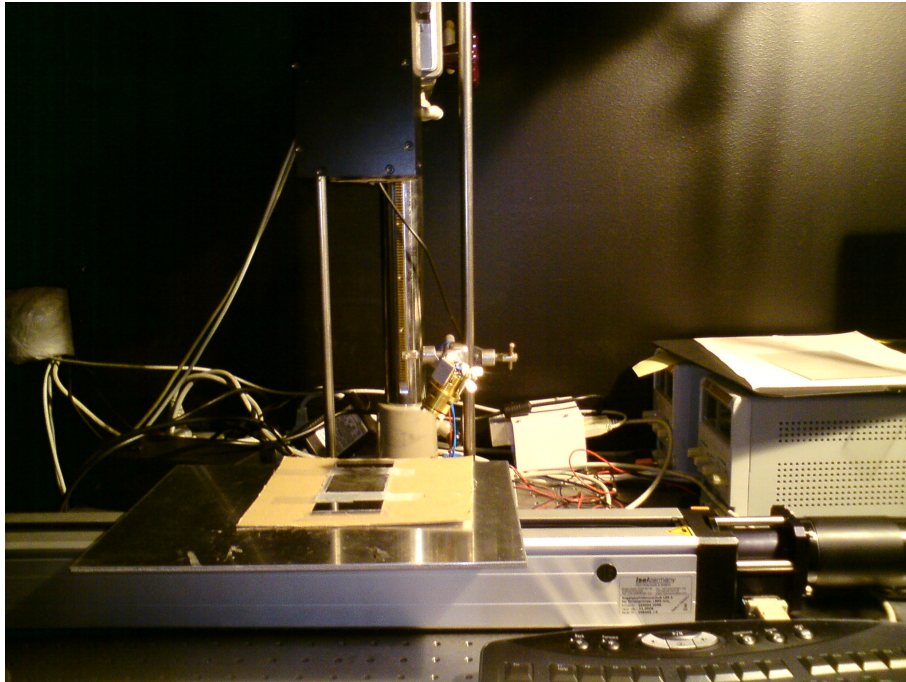
Andre ordens brytning fra lyskildene i gitteret inne i kamera kan gi uønskede effekter på opptaket. Til å filtrere vekk lyskildene, brukes lavpassfiltre med kuttbølgelengde på henholdsvis 850 nm og 1000 nm. Det på 850 nm brukes sammen med lyskildene L1 og L2. I og med at L3 har lengre bølgelengde, brukes 1000 nm filteret sammen med L3.

3.2.6 QSS-PC apparatur

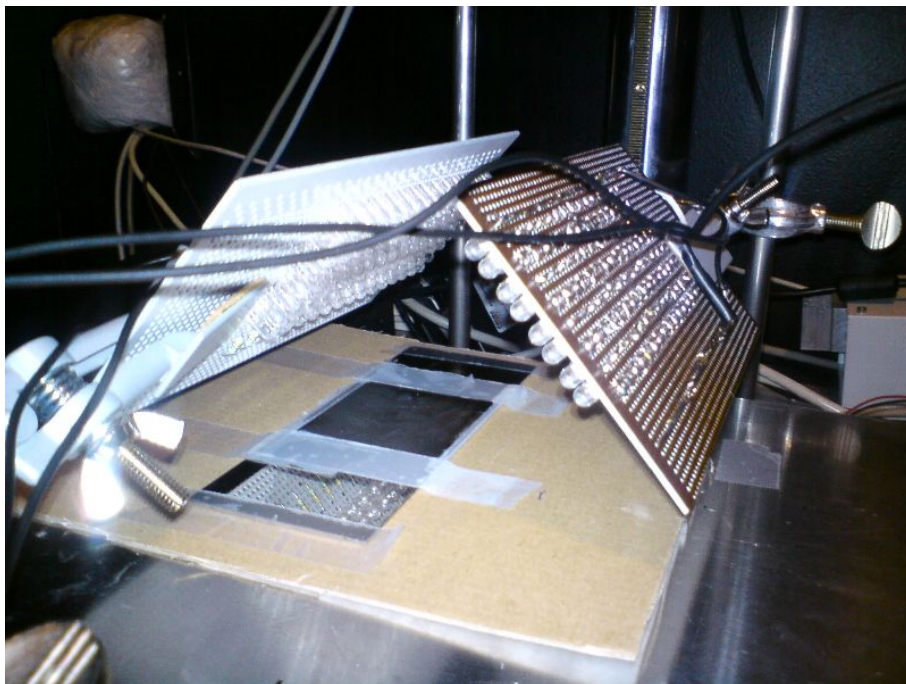
Apparaturen brukt til å måle levetidene er levert av Sinton Consulting Inc, og har betegnelsen «WCT-100 Photoconductance Tool». Denne apparaturen måler levetider ved hjelp av metoden QSS-PC beskrevet i kapittel 2.1.7. For mer informasjon, se manualen: [24].

3.3 Oppsett og datainnhenting

Som en følge av at kameraet kun ser en stripe må waferen som skal undersøkes legges på skannebordet under kameraet. Noe av strålingen kan transmitteres gjennom waferen uten å vekselvirke med elektronene. Fotoner som transmitteres bidrar naturligvis ikke til fotoluminescens. Med en speilblank stålplate under waferen, reflekteres fotonene tilbake slik at fotonene får ny mulighet til å vekselvirke med elektronene. Lyskildene stilles inn slik at området som skal tas opptak av blir belyst med høyest mulig intensitet innenfor området kamera kan registrere i. Figur 3.5a og 3.5b viser bilder av oppsettet med henholdsvis laser og LED-brett. Figur 3.6 viser en mer overordnet skisse for oppsettet.

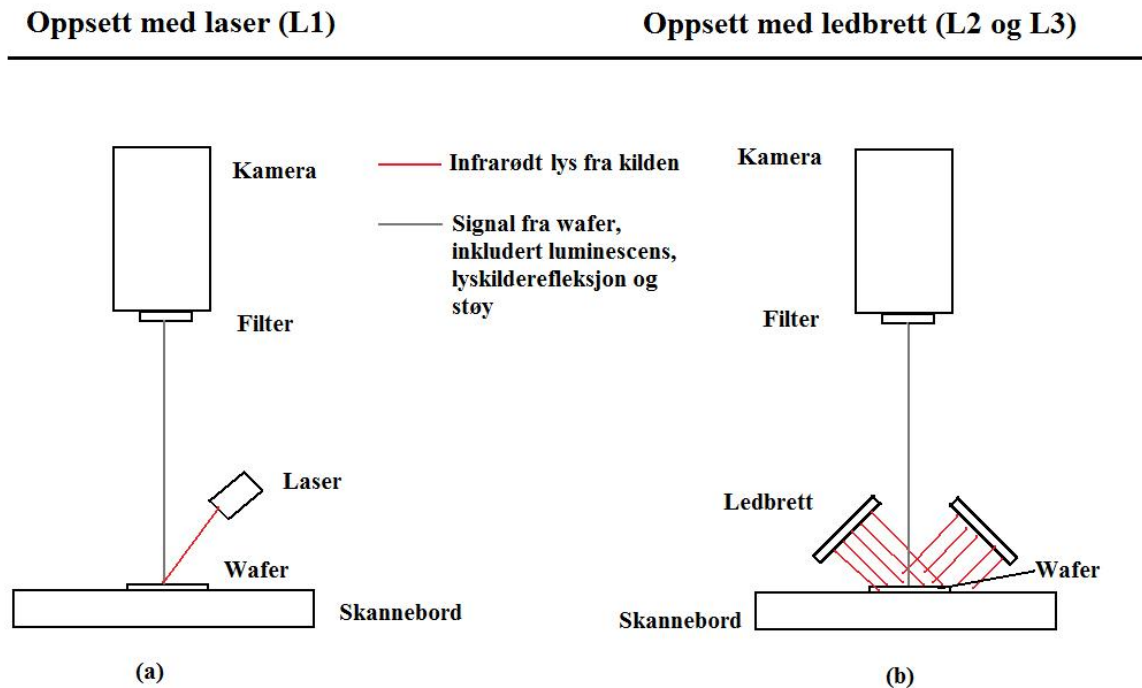


(a) Oppsett med laser (L1)



(b) Oppsett med led Brett(L2 og L3)

Figur 3.5: Bilde av oppsettet. (a) viser hvordan L1 settes i forhold til waferen. (b) viser hvordan L2 settes i forhold til waferen. L3 settes opp på tilsvarende måte. Bordvifta (ikke synlig i bildet) settes slik at den blåser på diodene.



Figur 3.6: Oppsettskisser som viser hvordan kamera, wafer, skannebord og lyskilder er plassert i forhold til hverandre. (a) viser med laser, L1, og (b) viser med ledbrettene, L2 og L3. Kamera står 30 cm i fra waferene.

Til datainnhenting brukes programvaren beskrevet i kapittel 3.2.2. Innstillingene som justeres er HSNR, lukkertid og bildeperiode.

Opptakene tas i et mørkt rom, og styres utenfra rommet. Waferen blir bestrålt og fotonene registrert.

Opptakene tas først med wafer 1, slik at waferen ligger mest mulig i ro på samme sted, hvilket vil gjøre det lettere å sammenligne bildene senere. Lyskilden stilles inn, slik at intensiteten blir høyest mulig på opptaksområdet. Deretter holdes lyskilden konstant, mens lukkertiden og HSNR nivåene endres.

Lukkertidene avhenger av lyskilden og settes utifra erfaringer med forundersøkelser. For lyskilde L1 brukes lukkertider på 10, 20, 30, 40 og 50 ms på wafer 1. For L2 og L3 sammen med wafer 1: 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125 og 150 ms. Wafer 2 er det ikke gjort særlig forarbeid på, og testes kun med laser. I og med at det mangler erfaringsgrunnlag for å fastsette lukkertider til bruk av opptak med wafer 2, tas det opptak fra 10-200 ms, med steg på 10 ms mellom hver gang. HSNR nivåene velges slik at signal-støyforholdet multiplikatoren, N , øker med en for hver gang, altså etter følgende formel (se kapittel, 2.2.2):

$$HSNR = N^2, \quad N \in 1, 2, 3, \dots, 10 \quad (3.1)$$

Altså vil HSNR på 9 teoretisk gi 3 ganger bedre støy-signalforhold.

Filtervalg avhenger som nevnt av lyskilden. Med lyskilde L1 og L2 brukes 850 nm filteret (F0850). Sammen med lyskilde L3 brukes 1000 nm filteret (F1000). Opptak uten filter (F0000) foretas også, men dog ikke så omfattende. For wafer 1 bestrålt med laser, tilsier forundersøkelser at målingene går i metning ved 40 ms. Undersøkelse av filtereffekter foregår derfor med bruk av laser og lukkertider på 10 ms og 40 ms.

Tittelen på de fleste opptakene i resultatdelen, har en overskrift som identifiserer opptakets innstillinger. Denne overskriftens forkortelser er forklart i vedlegg D, side 63.

3.4 Databehandling

De hyperspektrale bildene lagres binært i filer med endelsen hyspex. Matlab er valgt til å behandle hyspex-filene. Ved hjelp av Matlab kan behandlingen av bildene automatiseres. Norsk Elektro Optikk har laget en funksjon, `read_HYSPEX`, som leser hyspex-filen inn i matlab, mens Ole Mathis Kruse har laget funksjonen `vis_Hyspex_Bilder`, som presenterer båndene i hyspex-filen løpende. For behandling av bildene må det derfor lages flere funksjoner. Det tas mange opptak, og hvert opptak har sin hyspex-fil. Matlabfunksjonene må derfor behandle filene raskt og effektivt.

Hyspex-filene kan ikke åpnes ved hjelp av et enkelt museklikk. Derimot finnes det et eget filformat i matlab (.mat), for lagring av variabler. Variablene lagret i filen lastes inn når filen klikkes på eller lastes inn ved hjelp av «load»-funksjonen. Noe som gjør hyspex-bildene mer tilgjengelig etter opptak. For å utnyttet mat-filformatet, må hver eneste hyspex-fil av interesse leses inn i en matlabvariabel. Denne matlabvariabelens navn er tilnærmet identisk med hyspex-filens navn, bortsett fra at ulovlige tegn og filendelsen fjernes fra variabelnavnet. Deretter lagres variabelen i en matfil, med samme navn som variabelen, slik blir det lettere å identifisere originalfilen, og den lettere kan åpnes i matlab senere.

Foruten resultatene fra opptaket, inneholder hyspex-filene også metadata om opptaket. Bakgrunnstøyen er den eneste informasjonen fra headeren som er interessant i dette arbeidet. Ved å hente ut den kan bildene sammenlignes med og uten korrigerings for bakgrunnstøy slik at bakgrunnstøyen påvirkning kan dokumenteres. Matlabfunksjonene som er utarbeidet i dette arbeidet samt noen skript, ligger vedlagt på DVD.

Et hyperspektralt bilde inneholder mye informasjon om intensitet til hver båndbredde. Den enkleste måten å presentere dette på er hvert bånd som et eget bilde. Bildet kan også lages av integralet til intensiteten fra båndene i fotoluminescensområdet. Øvre og nedre integralgrense må derfor også finnes.

Intensitetenes verdier oversettes ved hjelp av et fargekart. Matlab har 17 innebygde fargekart [25]. Egne fargeskalaer kan også defineres. For å sjekke om valg av fargeskala kan gi forskjellig inntrykk av samme bilde, sjekkes et hyperspektralt bilde fra hver av wafer-lyskombinasjonene med alle de innebygde kartene. Egendefinerte skalaer kan defineres på tilnærmet uendelig mange måter, og undersøkes derfor ikke av tidshensyn.

I og med at kamera er hyperspektralt, vil vært punkt i bildet ha et bølgespekter. I området hvor waferen ligger bør spekteret ha maksimumsverdien sin i fotoluminescensområdet. For hvert punkt i bildet finnes hvilket bånd som luminescerer sterkest. Ved å telle opp hvor mange punkter som luminescerer mest i hvert bånd, finnes det typiske luminescensområdet for waferen bestrålt med forskjellige lyskilder. Dette resultatet indikerer om forskjellige bølgelengder på lyskilden har noe å si for luminescensens spektertopp. Andre ordens brytning fra lyskilden i kamera kan medføre to spektertopper. En fra luminescensen og en fra andre ordens brytning. Erfaringsmessig vil spekteret fra lyskilden være sterkere enn luminescensspekteret, refleksjon fra lyskilden må derfor filtreres vekk, slik at det aldri når fram til kamerasensoren.

Oversikten over sammenhengen mellom bånd og bølgelengde til kamera er ikke lett tilgjengelig. Kamera produserer en hdr fil sammen med opptaket. Denne inneholder en liste med bølgelengder til båndene. Utifra den er det lagd en oversikt over sammenhengen mellom bånd, bølgelengde (nm) og energi (eV) vist i tabell 3.2 .

Tabell 3.2: Bånd med respektive senterbølgelengder, λ og tilhørende energier, E. Enhet for senterbølgelengder er nm for energi, eV. Basert på en hdr fil produsert med hyspekkamera brukt i dette arbeidet

Bånd	λ	E	Bånd	λ	E	Bånd	λ	E	Bånd	λ	E
1	937	1,324	31	1090	1,138	61	1243	0,998	91	1395	0,889
2	943	1,316	32	1095	1,133	62	1248	0,994	92	1401	0,886
3	948	1,309	33	1100	1,128	63	1253	0,990	93	1406	0,882
4	953	1,302	34	1105	1,123	64	1258	0,986	94	1411	0,879
5	958	1,295	35	1110	1,118	65	1263	0,982	95	1416	0,876
6	963	1,288	36	1116	1,112	66	1268	0,978	96	1421	0,873
7	968	1,282	37	1121	1,107	67	1273	0,975	97	1426	0,870
8	973	1,275	38	1126	1,102	68	1278	0,971	98	1431	0,867
9	978	1,269	39	1131	1,097	69	1283	0,967	99	1436	0,864
10	983	1,262	40	1136	1,092	70	1289	0,963	100	1441	0,861
11	988	1,256	41	1141	1,087	71	1294	0,959	101	1446	0,858
12	993	1,249	42	1146	1,083	72	1299	0,955	102	1451	0,855
13	999	1,242	43	1151	1,078	73	1304	0,951	103	1456	0,852
14	1004	1,236	44	1156	1,073	74	1309	0,948	104	1462	0,849
15	1009	1,230	45	1161	1,069	75	1314	0,944	105	1467	0,846
16	1014	1,224	46	1166	1,064	76	1319	0,941	106	1472	0,843
17	1019	1,218	47	1172	1,059	77	1324	0,937	107	1477	0,840
18	1024	1,212	48	1177	1,054	78	1329	0,934	108	1482	0,837
19	1029	1,206	49	1182	1,050	79	1334	0,930	109	1487	0,834
20	1034	1,200	50	1187	1,045	80	1339	0,927	110	1492	0,832
21	1039	1,194	51	1192	1,041	81	1345	0,922	111	1497	0,829
22	1044	1,188	52	1197	1,037	82	1350	0,919	112	1502	0,826
23	1049	1,183	53	1202	1,032	83	1355	0,916	113	1507	0,823
24	1054	1,177	54	1207	1,028	84	1360	0,912	114	1512	0,821
25	1060	1,170	55	1212	1,024	85	1365	0,909	115	1518	0,817
26	1065	1,165	56	1217	1,019	86	1370	0,906	116	1523	0,815
27	1070	1,160	57	1222	1,015	87	1375	0,902	117	1528	0,812
28	1075	1,154	58	1227	1,011	88	1380	0,899	118	1533	0,809
29	1080	1,149	59	1233	1,006	89	1385	0,896	119	1538	0,807
30	1085	1,144	60	1238	1,002	90	1390	0,893	120	1543	0,804

Kapittel 4

Resultater og diskusjon

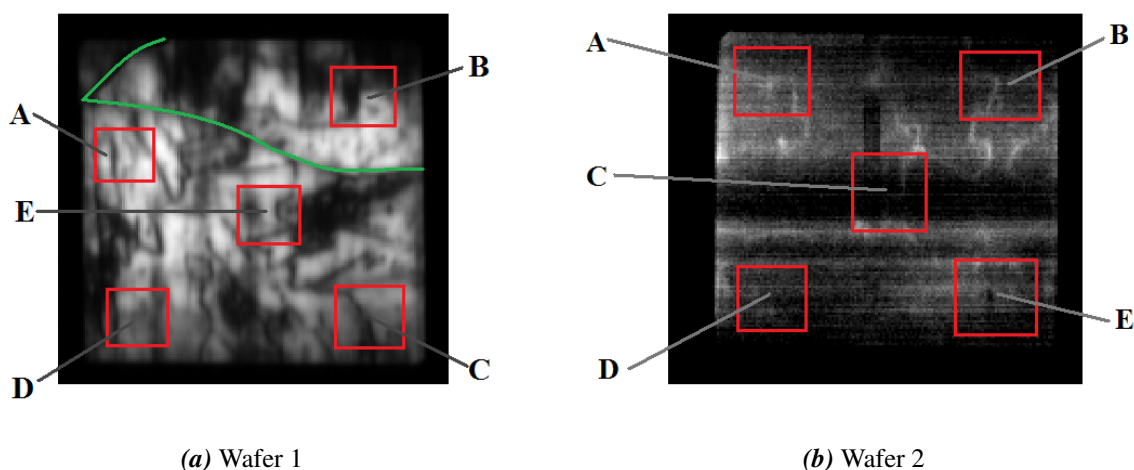
I hovedforsøkene, er det tatt over 200 hyperspektrale opptak, hvert med 150 bånd. Hvis bilder av alle båndene skulle bli vist og diskutert, ville det blitt over 30000 bilder! Selv med bare et bånd fra hvert hyperspektrale bilde, ville det bli veldig mange bilder å forholde seg til. Noen av opptakene er derimot ikke vellykket. Enten ved at kamera har stoppet underveis, eller ved at de har blitt overeksponert. Et utvalg av opptakene er presentert i vedlegg D.

4.1 QSS-PC levetidsmålinger

Levetiden til elektron-hullparene på waferene er målt med QSS-PC. Målingene er utført på områdene vist i figur 4.1. Instrumentet var innstilt på å måle levetiden ved ladningsbærertetthet på $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Filteret med kuttbølgelengde 1000 nm ble brukt til målingene.

Måleresultatene vist i tabell 4.1 viser at wafer 1 har ca 30 ganger høyere levetid enn wafer 2. Bokstavene i tabellen refererer til områdene i figuren. Måling i område A på wafer 1 ble såpass forskjellig fra de andre, at den ikke er tatt med. Forskjellen skyldes mest sannsynlig bruddet i waferen. Figuren viser med grønne streker hvordan wafer 1 er delt.

Levetidene til wafer 1 har blitt lavere siden de ble målt i [19]. Dette skyldes mest sannsynlig at passiveringen har blitt dårligere over tid. Wafer 2 sin levetid er derimot omtrent den samme som før.



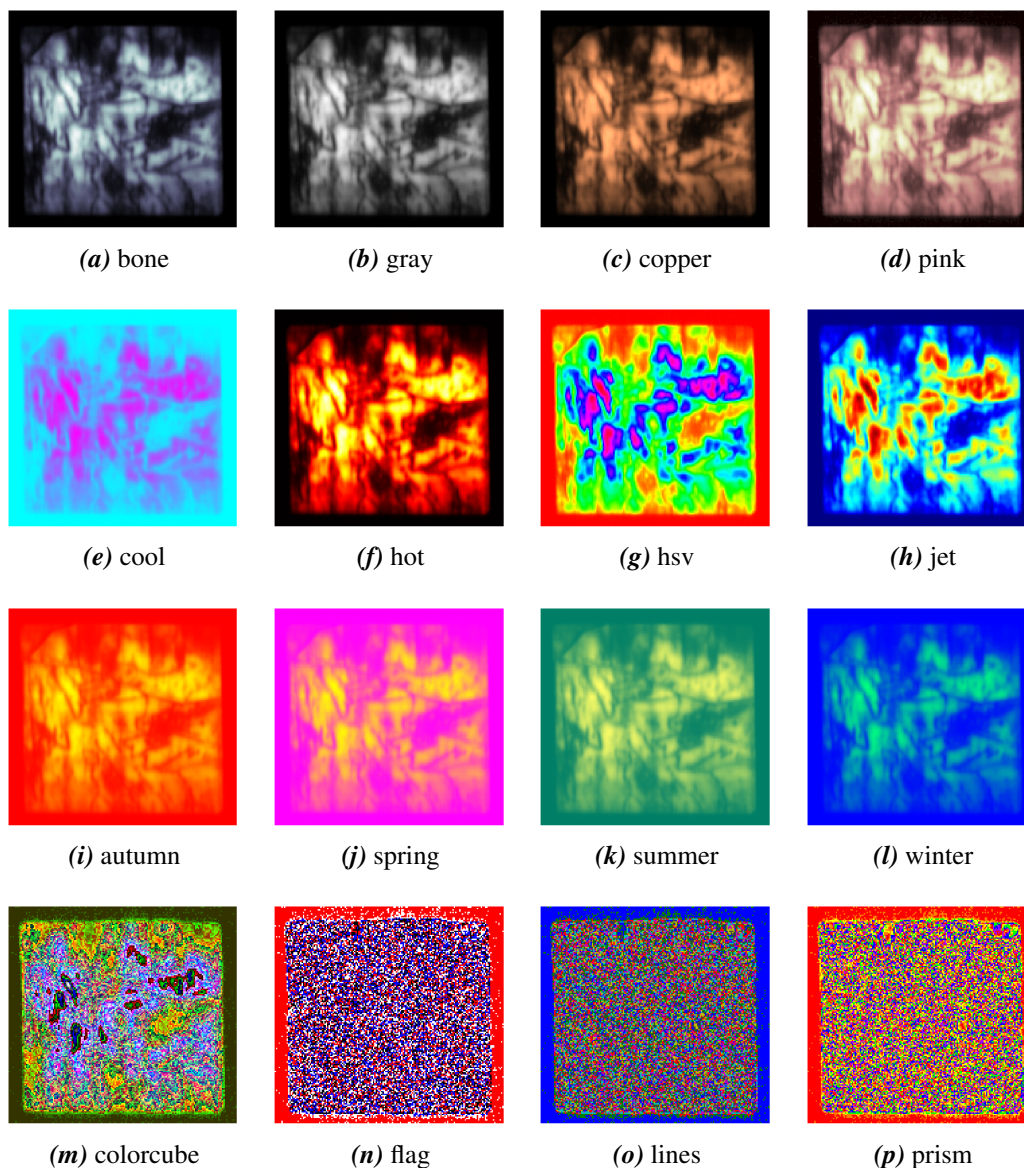
Figur 4.1: QSS-PC måleområder for begge waferene. Området med rødt rundt indikerer omtrent hvor målingene er tatt. Områdene er gitt navn fra A-E og refererer til resultatene vist i tabell 4.1. Målingen i område A på wafer 1, skilte seg såpass ut fra de andre målingene, at den ble forkastet, noe som kan skyldes bruddet i waferen. Grønne streker viser hvor wafer 1 er delt.

Tabell 4.1: Levetidsmålinger. Området referer til områder merket med rødt i figur 4.1. Måling i punkt A på wafer 1 skilte seg såpass ut, at den ble forkastet. Dette kan skyldes bruddet i waferen, merket med grønt i figur 4.1.

Wafer	Område	Levetid (μs)
Wafer 1	A	—
Wafer 1	B	58,4
Wafer 1	C	65,7
Wafer 1	D	45,5
Wafer 1	E	59,0
Wafer 2	A	1,9
Wafer 2	B	1,2
Wafer 2	C	1,6
Wafer 2	D	1,6
Wafer 2	E	2,2
Wafer 1	Gjennomsnitt	57,2
Wafer 2	Gjennomsnitt	1,7

4.2 Fargekart

Matlab har 17 forhåndsdefinerte fargekart (kapittel 3.4). I figur 4.2 er samme bilde av wafer 1 belyst med L1 vist med forskjellige fargekart. Bildet bør vise intensiteter og korngrenser på en god måte. Skalaene som viser resultatet best, er «bone», «gray», «pink» og «hot». Noen av de andre viser også resultatet godt. Hva som er best, kommer an på øynene som ser. Subjektivt sett, ser «hot» best ut. De fire nederste gir et absurd bilde, og er ikke å anbefale til denne typen bilder.

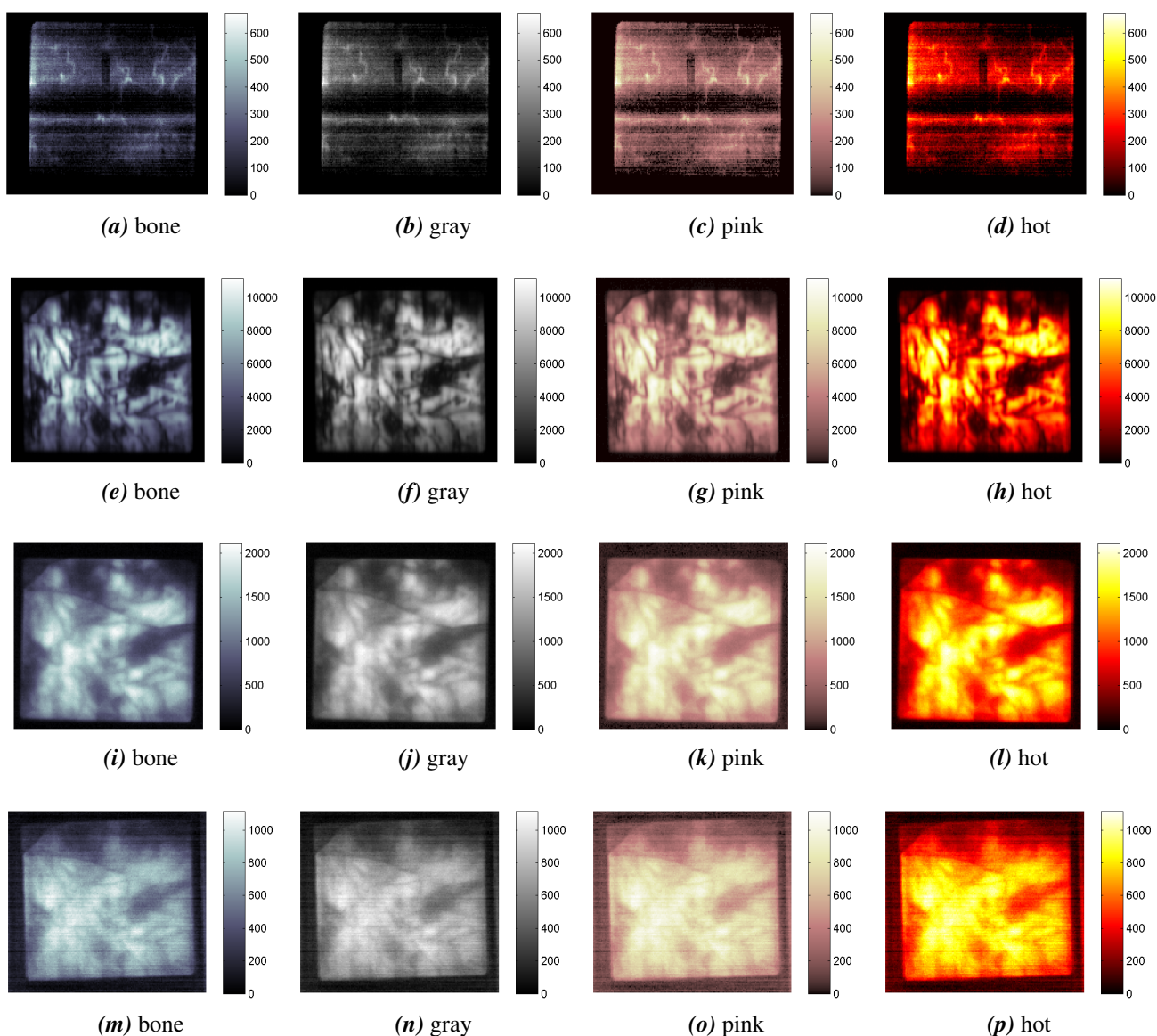


Figur 4.2: Fargekarttest wafer 1, belyst med L1. Samme bilde av wafer 1 vist med forskjellig matlab fargekart. Lyskilden er L1. Resultatet bør vise både korngrenser og intensiteter i de forskjellige båndene. De fire nederste viser ikke resultatet på en god måte. «bone», «gray», «pink» og «hot» viser resultatet best. Fargekartet «white» gir kun et hvitt bilde og er tatt ut av oversikten.

For å ikke trekke feil konklusjon om hvilken fargeskala som er best, er de andre wafer-lys

kombinasjonene også undersøkt. I og med at det ble vist at «bone», «gray», «pink» og «hot» var bra for wafer 1 belyst med L1, vises alle wafer-lyskombinasjonsresultatene kun i disse fire fargeskalaene. Dette er gjort i figur 4.3. Øverste raden viser bilde av wafer 2, med L1 som lyskilde. De tre neste radene er samme bilde av wafer 1, med henholdvis lyskilde L1, L2 og L3. En full oversikt over bildene vist i alle fargeskalaene er vist i vedlegg B.

Fotoluminescensen vises ikke like godt i fargeskalaen «hot» for de andre wafer-lyskombinasjonene. De tre andre fargekartene gir derimot alle et bra inntrykk. I og med at såpass mange av fargekartene gir et godt bilde og gråskala ofte brukes som skala, foretrekkes fargekartet «gray» når luminescens vises.

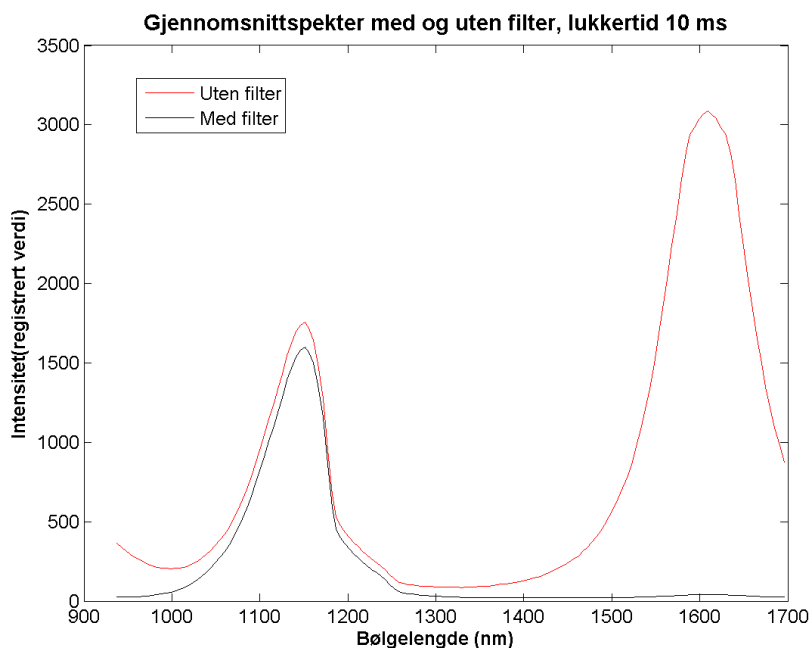


Figur 4.3: Wafer 1 og wafer 2 vist med fire av fargekarta. Hver rad er samme luminescensbilde vist med forskjellige fargekart. Øverste raden er wafer 2 belyst med lyskilde L1. De tre nederste er wafer 1 belyst med lyskildene L1, L2 og L3. Fargekartet «gray» gir best inntrykk. Høyest intensitet for hver rad er automatisk satt utifra maksverdien i bildet.

4.3 Filter

Det hyperspektrale bølgespekteret til hvert punkt i bildet består av tre komponenter: luminescensen fra waferen, bakgrunnsstøy og refleksjon fra lyskilden. I dette arbeidet ønskes det å se på luminescensen, det er derfor ønskelig å minske støyen og lyskilderefleksjonen fra opptakene. Bakgrunnstøyen minskes ved å korrigere bildet for bakgrunnstøy. Effekten av det er studert nærmere i kapittel 4.5. Ved å sette et lavpassfilter (kapittel 3.2.5) foran linsa på kamera, skal refleksjonen hindres i å nå fram til detektoren i kamera.

Figur 4.4 viser gjennomsnittsspekteret til et opptak med (svart linje) og uten (rød linje) filter ved 10 ms lukkertid av wafer 1 belyst med L1. Verdiene er høyere uten filter enn med filter for hele spekteret. Ved å sammenligne disse spekterene ser man tydelig hvilken innvirkning refleksjonen fra lyskilden har på resultatet ved bølgelengder over ca 1400 nm og bølgelengder under 1000 nm. Filteret fjerner mye av refleksjonen fra lyskilden. Luminescensen, som er ventet å ha bølgelengder rundt 1150 nm, ser også ut til å bli påvirket noe, men ikke mye av filterbruken. Kostnaden ved å fjerne refleksjonen er et noe svekket luminescenssignal. Dette kan kompenseres ved å bruke lengre lukkertider.

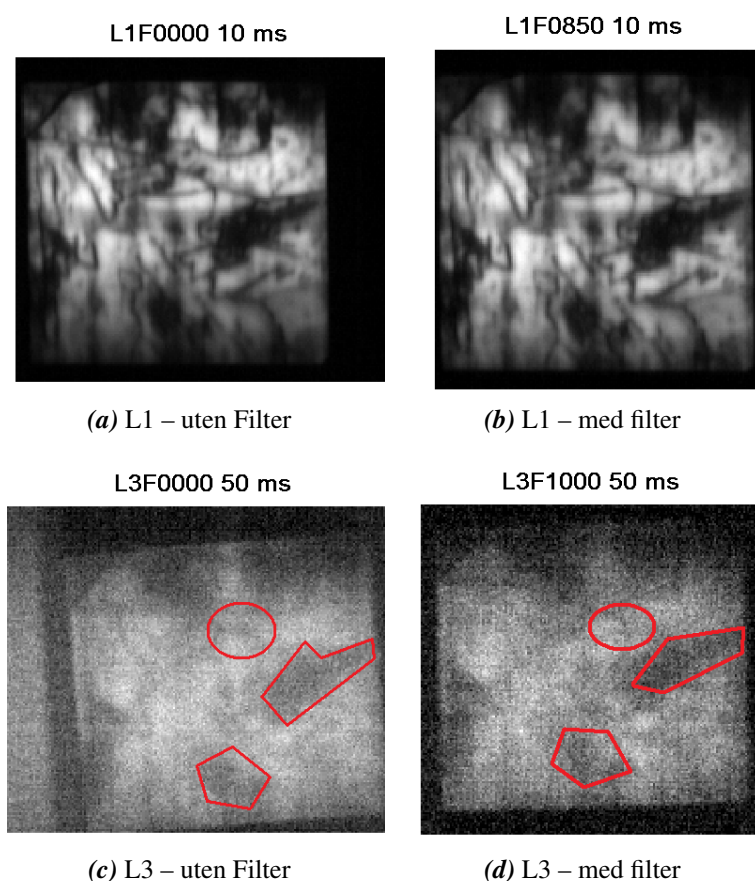


Figur 4.4: Gjennomsnittlig spekter for wafer 1 belyst med laser (L1) med og uten 850 nm lavpassfilter foran kameralinsen. Lukkertid er 10 ms.

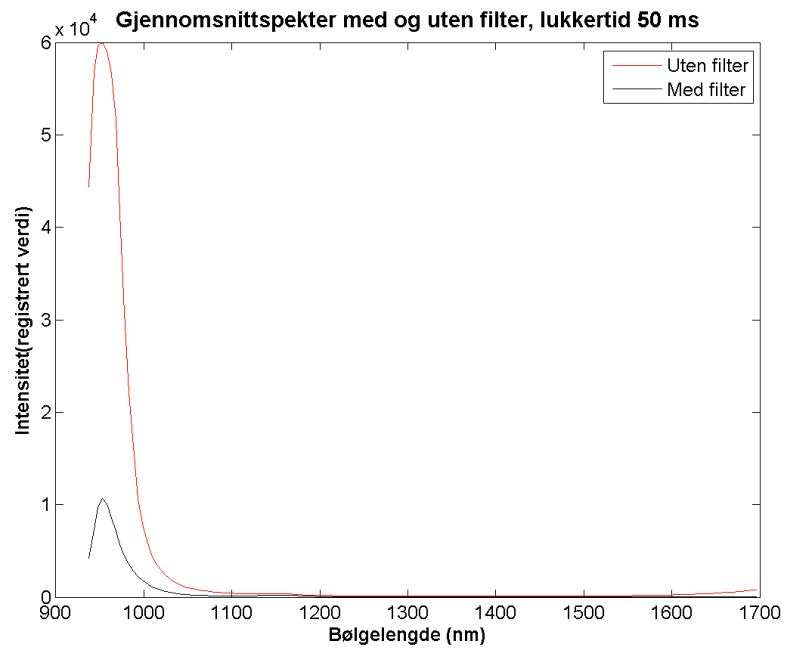
Ved å se på opptak av wafer 1 belyst med led Brettet L3, kommer det tydeligere fram, hvordan filteret kan fjerne støy fra lyskilden i luminescensområdet. L3 sender ut lys med lengre bølgelengde, lavpassfilteret kutter derfor ved 1000 nm istedenfor. Hele gjennomsnittsspekteret er vist i figur 4.6a, det viser at det blir en topp rundt 950 nm både med og uten filter. Denne toppen er vanskelig å forklare, i og med at L3 har en bølgelengde på 875 nm.

Kamerasensorene går i metning ved 950 nm, dette vises ved svært høye gjennomsnittsverdier. Skalaen blir derfor altfor stor til at luminescensen kommer fram på grafen. Figur 4.6b viser nærbilde av gjennomsnittsspekteret fra 1100 nm til 1200 nm. Uten filter er begynnelsen av det innzoomede spekteret nedadgående fram til ca 1140 nm, mens den er oppadgående med filter omtrent heleveien. Oppadgående spekter i dette området skyldes luminescens fram til ca 1150 nm. Dette indikerer at uten filter, vil lyskilderefleksjonen påvirke resultatet i de nedre luminescensområdene. Med filter derimot, blir luminescenssignalet svakere, men ikke skjult av lyskilderefleksjonen.

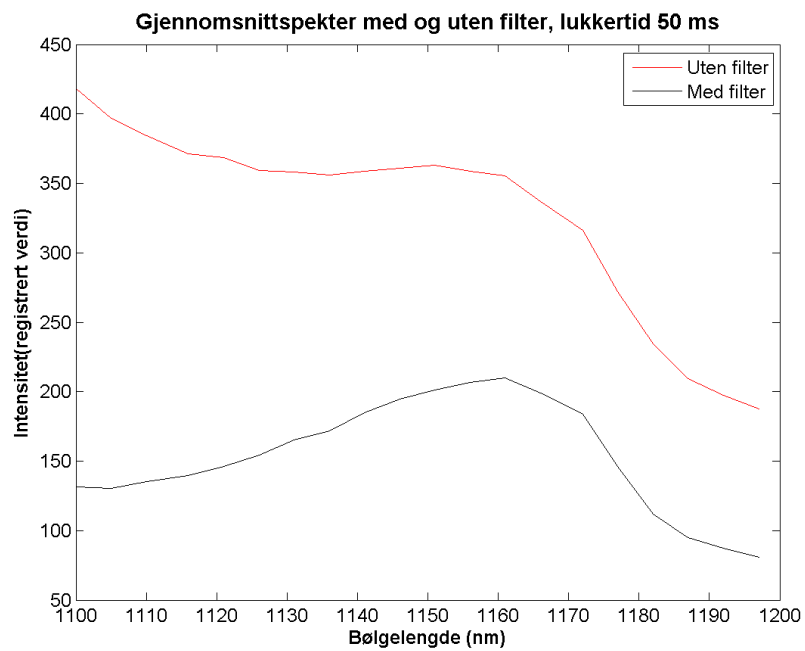
I og med at luminescenssignalet blir svakere, er det vanskelig å entydig konkludere hvorvidt filteret gir bedre resultat. Figur 4.5 visualiserer luminesceringen, og viser at for wafer 1 belyst med L1 har filteret tilsynelatende liten betydning. Belyst med L3, blir derimot bildet lysere uten filter, men detaljer kommer bedre fram. Vist med røde områder. En annen grunn til å bruke filter, er at når refleksjonen fjernes, er det sannsynligvis lettere å oppdage luminescens som skyldes SRH-rekombinasjon beskrevet i kapittel 2.1.6. Denne type luminescens er vanskeligere å oppdage direkte ved å se på bilder, og krever statistiske metoder.



Figur 4.5: Wafer 1 belyst med L1 (rad 1) med og uten filter, og belyst med L3 (rad 2). Kolonne 1 viser uten filter, kolonne 2 viser med filter. Områdene merket med rødt, viser hvordan enkelte detaljer kommer bedre fram med filter.



(a) 900-1700 nm



(b) 1100-1200 nm

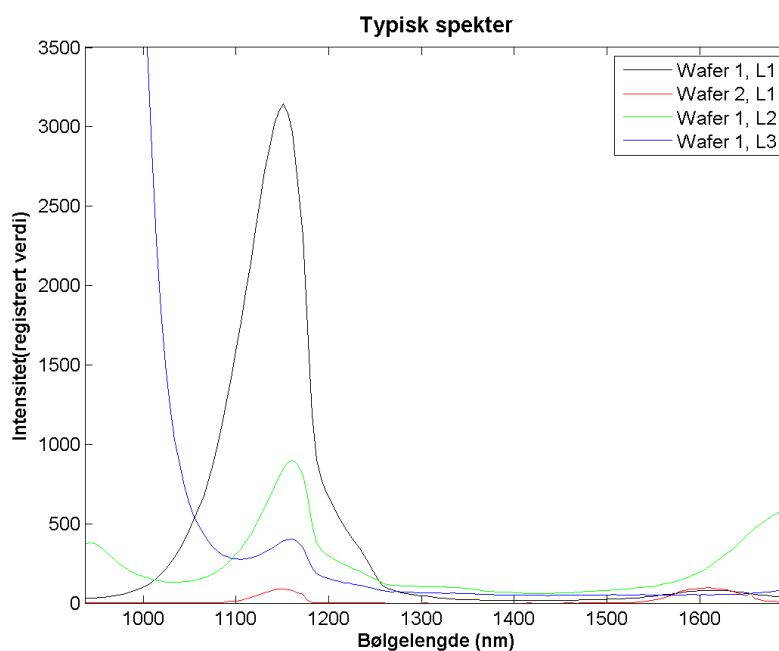
Figur 4.6: Gjennomsnittlig spekter for wafer 1 belyst med L3. Med og uten 1000 nm lavpassfilter foran kameranlinen. Lukkertid er 50 ms. Øverste bildet viser hele spekteret. Nederste viser strålingen i området 1100 nm til 1200 nm.

4.4 Luminescensintegrasjon

Det viser seg at spekteret fra luminescensen fra waferene vil være bredt med en topp rundt 1150 nm og 1161 nm. Bredden og toppen på spekteret avhenger både av lyskilde og wafer. Luminescensstoppene blir diskutert senere i kapittel 4.6. I og med at luminescensen er spredd på flere bølgelengder, er det hensiktsmessig å integrere luminescensen. I praksis vil det si å summere bildene fra hver bølgelengde innenfor spekteret. For å kunne gjøre dette må først grensene for luminescensen bestemmes.

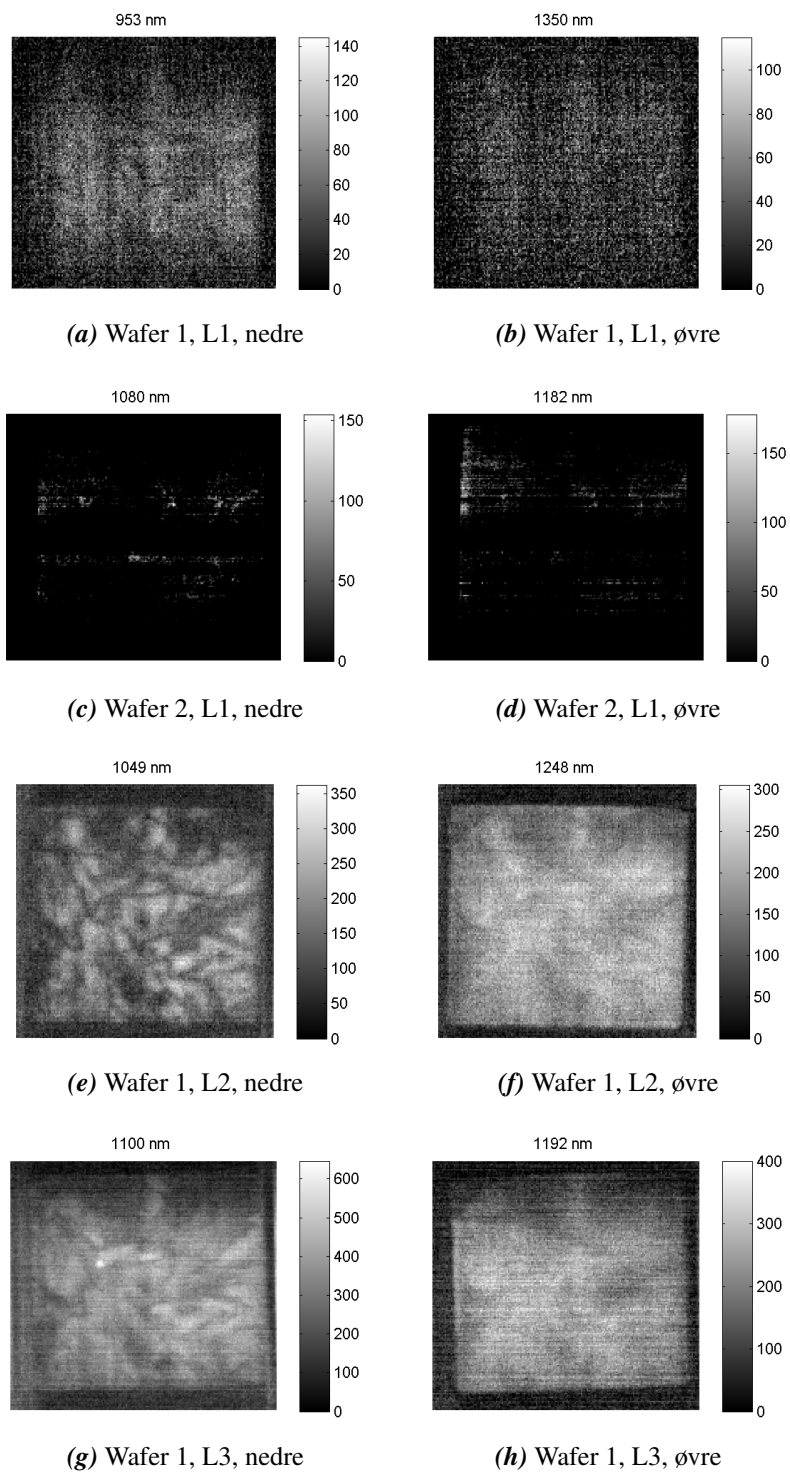
Figur 4.7 viser størrelseforholdet mellom de ulike wafer-lyskildene. Figuren viser også grensene for hvor luminescensen starter og slutter. For lyskilde L1, (laser 808 nm), er det bare å se når spekteret begynner å stige og er «ferdig» sunket. Det ser ut til å være rundt 950 nm og 1350 nm for wafer belyst med L1. Tilsvarende grenser for wafer 2 belyst med L1, ser ut til å være 1080 nm og 1180 nm.

For wafer 1 belyst med med ledbrettene (L2 og L3), vil første delen av spekteret være refleksjon fra lyskilden. Luminescensspekteret ser ut til å være mellom 1050 nm og 1250 nm for wafer 1 belyst med L2 og mellom 1100 nm og 1190 nm for wafer 1 belyst med L3.



Figur 4.7: Typisk luminescensspekter for de fire wafer-lys kombinasjonene. Intensiteten vil avhenge av lukkertid og lyskilde, men bredden på luminescensspekteret vil stort sett være konstant for de 4 kombinasjonene. Utifra grafene leses breddene til luminescensspekterene som 950 nm–1350 nm for w1-L1, 1080 nm–1180 nm for w2-L1, 1050 nm–1250 nm for w1-L2 og 1100 nm–1190 nm for w1-L3.

For å sjekke om disse grensene stemmer, er det lurt å se på luminescensen fra disse bølgelengdene. Dette er vist i figur 4.8.



Figur 4.8: Luminescensen fra nedre og øvre luminescensbølgelengde. Øvre og nedre grense er hentet fra grafen i figur 4.7. For wafer 1 og L1 ser det ut som det er litt for mye støy til at grensene er 953 nm og 1350 nm. For wafer 2 og L1; og wafer 1 og L2 ser det ut til at det er liten støy og at luminescensen dominerer. Wafer 1 og L3 er det refleksjon fra lyskilden på det nedre bildet. Nedre grense bør settes høyere.

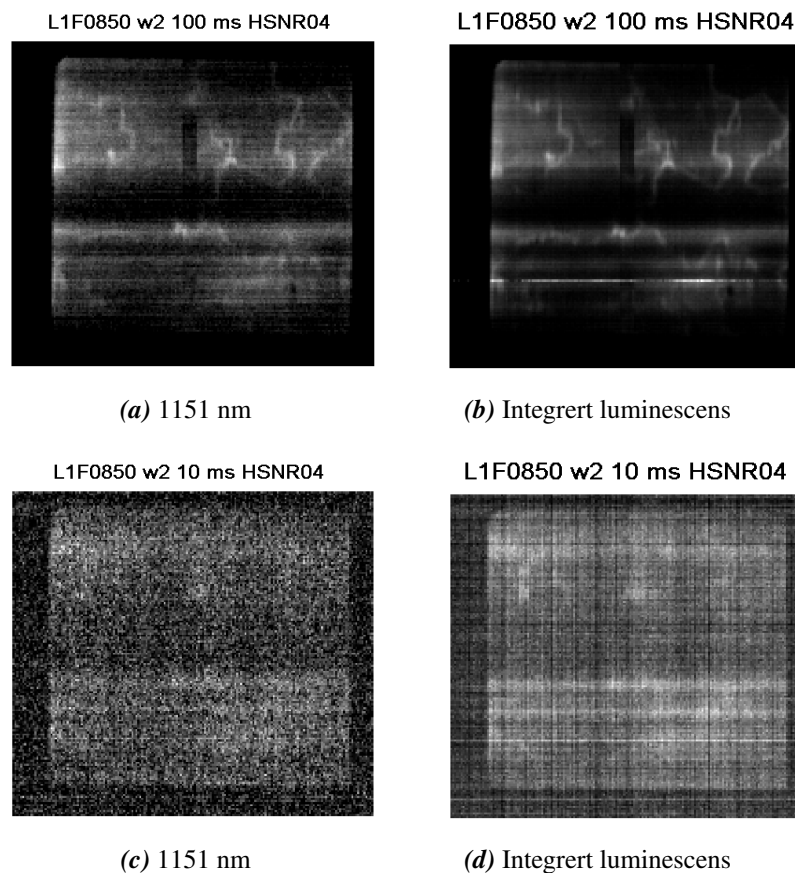
Ved å se nærmere på luminescensen fra hvert enkelt bånd, ser det ut som at grensene for wafer 1 og L2 samt wafer 2 og L1 lest av grafen stemmer. For wafer 1 og L1 samt wafer 1 og L3 må grensene justeres litt. Endelige grenser blir da som vist i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Grenser for luminesceringsintegrasjon avhengig av wafer og lyskilde.

Wafer	Lyskilde	Nedre (nm)	Øvre (nm)
1	L1	988	1299
1	L2	1049	1248
1	L3	1121	1202
2	L1	1080	1182

For at det skal være et poeng å integrere luminescensen, må resultatet bli bedre enn det beste båndet alene. Figur 4.9 sammenligner to bilder med dårlig signal i det beste spekteret med integrert luminescens fra samme opptak. Korn grenser kommer tydeligere fram ved å integrere, det er et klart tegn på at signalet blir vesentlig forbedret ved å integrere.

For luminesceringsbilder vist senere, er det luminescensspekter med grensene fra tabell 4.2 med mindre annet er oppgitt.

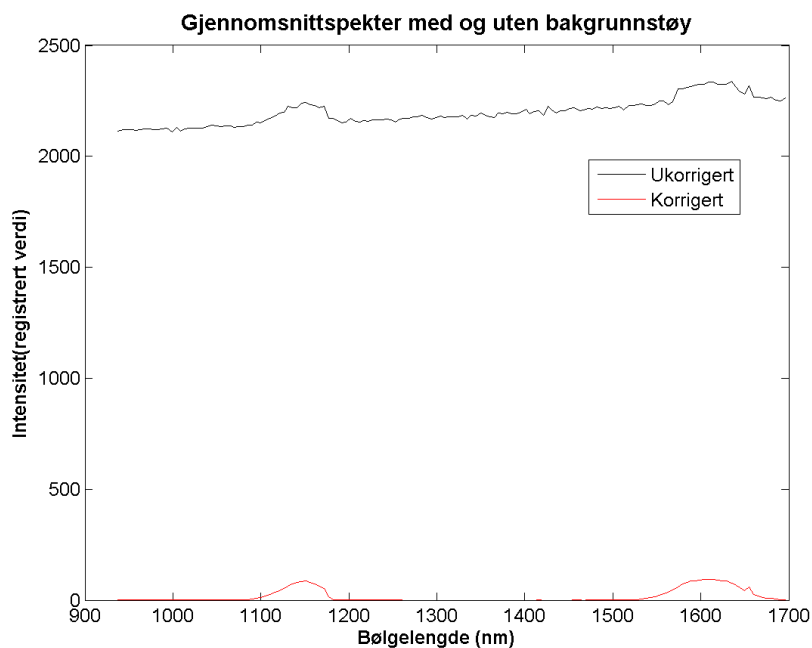


Figur 4.9: Sammenligning av luminescens fra den mest luminescerende bølgelengden (1151 nm) og integrert luminescens. Opptakene er av wafer 2 belyst med L1. Uten å integrere er signalet veldig svakt. Ved å integrere blir signalet vesentlig forbedret.

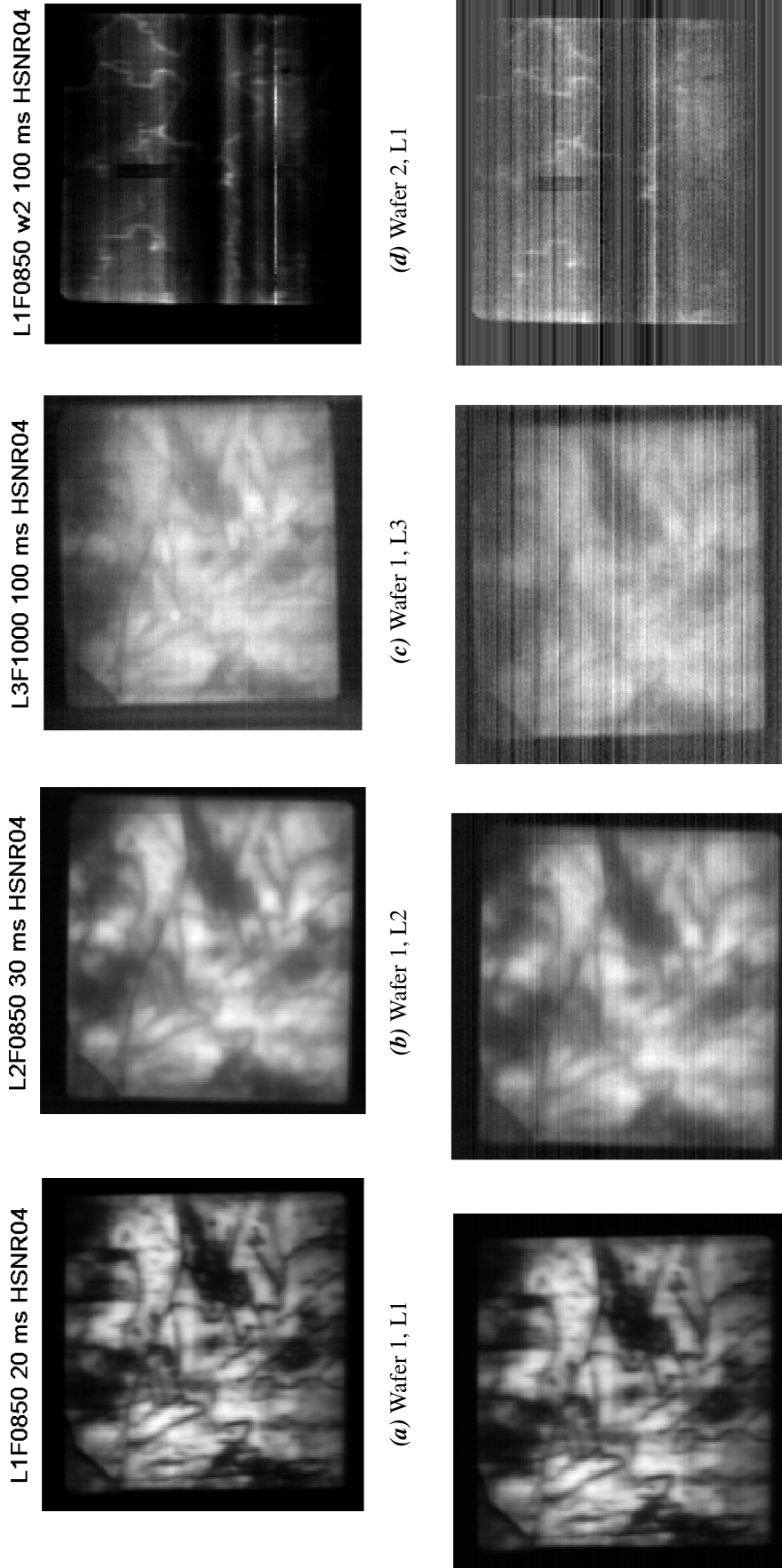
4.5 Bakgrunnstøy

Alle bildene i dette forsøket er tatt med korrigering for bakgrunn (kapittel 3.2.2). I figur 4.11 er luminescensen sammenlignet med og uten korrigering for bakgrunn. Øverste raden viser med korrigering, og nederste viser tilsvarende bilde uten korrigering for bakgrunn. Fra venstre er det kolonnevis wafer-lyskombinasjonene, wafer 1 – L1, wafer 1 – L2, wafer 1 – L3 og wafer 2 – L1. Wafer 1 belyst med L1 påvirkes lite av bakgrunnstøyen. Dette skyldes et godt signal-støyforhold, signalet dominerer over støyen. For wafer 1 belyst med L2 påvirker bakgrunnstøyen litt, dette vises som horisontale streker, men støyen dominerer ikke. For wafer 1 belyst med L3 og wafer 2 belyst med L1 blir fotoluminescensen omtrent borte i støyen, støyen dominerer og signal-støyforholdet er lavt. At signal-støyforholdet er lavt når wafer 2 belyses med laser bekreftes i figur 4.10. Toppunktet til luminescenssignalet registreres som verdier rundt 100-200. Bakgrunnstøyen har verdier på rundt 2000. Signal-støyforholdet er med andre ord mellom 1/20 og 1/10 uten korrigering for bakgrunnstøy. Tilsvarende signal-støyforhold for wafer 1 belyst med laser, er ca 3.

Av bildene i figur 4.11d kommer det også fram et mørkt område mitt på wafer 2. Dette kan tyde på at laserbelysningen er ujevn.



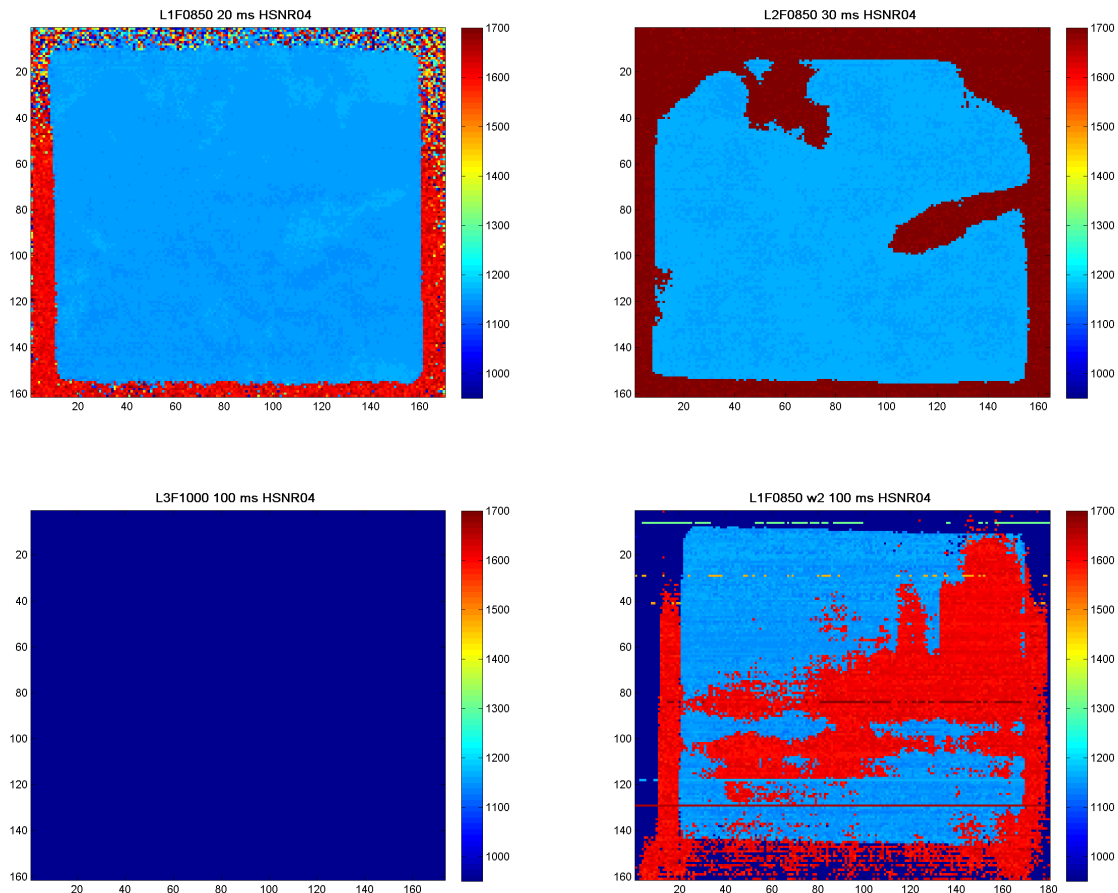
Figur 4.10: Gjennomsnittspekter med og uten bakgrunnstøy. Wafer 2 belyst med laser(L1). Sammenligning av gjennomsnittspekteret for samme bilde korrigert (rød linje) og ukorrigert (svart linje) for bakgrunnstøy. Spekteret viser at uten korrigering vil bakgrunnstøyen dominere.



Figur 4.11: Luminescens med og uten bakgrunnstøy. Hver kolonne inneholder samme bilde med og uten bakgrunnstøy. Kolonnene fra venstre viser et bilde tatt av wafer 1 belyst med L1. Kolonne to viser wafer 1 belyst med L2. Kolonne 3 viser wafer 1 belyst med L3 og siste kolonne viser wafer 2 belyst med L1. Øverste raden viser med korrigering, nederste uten korrigering for bakgrunn.

4.6 Sterkeste bølgelengde

I teoridelen (kapittel 2.1.8) ble det påpekt at energiforskjellen mellom ledningsbåndet og valensbåndet i dopet krystallinsk silisium tilsvarte bølgelengden 1150 nm. Hvis materialet da er dopet krystallinsk silisium, så bør spekteret til fotoluminescensen i silisium gjenspeile dette, og ha en topp rundt 1150 nm.



Figur 4.12: Bølgelengden med spekterets maksimumsverdi for kombinasjonene wafer 1 og L1 (a), wafer 1 og L2 (b), wafer 1 og L3 (c) og wafer 2 og L1 (d). Fargeskalaen ved siden av viser hvilken bølgelengde hver farge tilsvare.

At bildene er hyperspektrale fører til at hvert punkt i bildet har et bølgespekter fordelt på 150 bånd, hvert bånd med sin egen senterbølgelengde. Formen på dette spekteret vil avhenge av lyskilde og wafer og vil se ganske likt ut som spekterene vist i figur 4.7 dersom det er brukt filter, jfr kapittel 4.3. Med filter, bør luminescensen være dominerende, og dermed ha størst verdi i spekteret. Avhengig av hvor på waferen man er, vil følgelig registrerte verdier være forskjellige. Ved å finne hvilken bølgelengde spekteret til hvert enkelt punkt har maksverdien i, kan det lages oversikt over hvilken bølgelengde spekteret til hvert enkelt punkt har maksverdien i. Figur 4.12a viser oversikt over spekteretoppens maksverdier for wafer 1 belyst med laser (L1). Det viser at der waferen ligger er strålingen i bølgelengder mellom 1150 og 1250 nm, mens i området utenfor

er den sterkeste bølgelengden 1600 nm-1700 nm.

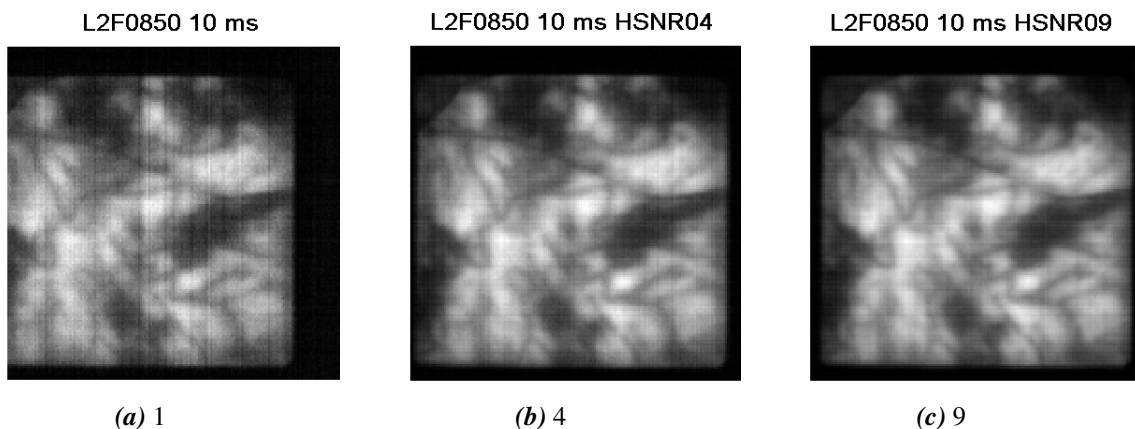
Ved å telle hvor mange punkter som har maksverdien sin i hver bølgelengde, kan typisk luminescensbølgelengde finnes. I tilfellet wafer 1 belyst med L1 er det 1151 nm, akkurat som forventet. Dette kommer også fram i gjennomsnittspekteret (figur 4.7).

I og med at luminescensen er sterkere enn refleksjonen fra lyskilden, kan det tyde på at signal-støyforholdet er godt. Figur 4.12b-d viser hvordan resultatet er for de andre wafer og lyskombinasjonene. For wafer 1 belyst med L2 vil det stor sett ligge mellom 1150 nm og 1200 nm, men noen steder slipper filteret gjennom mer refleksjon fra lyskilden (1600 nm-1700 nm) enn luminescens. Dette tyder på at signal-støyforholdet er lavere for wafer 1–L2 enn wafer1–L1. Typisk luminescens for waferen belyst med L2 er 1161 nm. For wafer 1 belyst med L3 befinner maksverdien seg rundt 950 nm. Dette er ikke så rart med tanke på erfaringene gjort i kapittelet som omhandler resultater av filterbruk (kapittel 4.3, figur 4.6a), der det viste seg at mye av refleksjonen fra ledbrettet kom gjennom filteret. Ses det derimot kun på 1100 nm-1300 nm, som er luminesceringsspekteret, luminescerer waferen mest ved 1161 nm. Ved å se på alle bildene i hovedforsøket, viser det seg at det er typisk at laser med bølgelengde 808 nm gir sterkest luminescens rundt 1151 nm, mens ledbrettene, L2 og L3, med bølgelengder på henholdsvis 830 nm og 875 nm, typisk gir maks luminescens rundt 1161 nm. Dette gir sterke indikasjoner på at bølgelengden og dermed inntrengningsdybden (kapittel 2.1.4) til lyset har noe å si for luminesceringen.

4.7 HSNR

I kapittel 3.2.2 ble begrepet HSNR introdusert. Det står for «High-SNR», på godt norsk: høyere signal-støyforhold. Høyere HSNR innstillinger tilsier at signal-støy-forholdet skal bli bedre, ved at flere målinger blir midlet, slik som forklart i kapittel 2.2.2.

For opptak av wafer 1 belyst med L1 er det vanskelig å komme med en entydig konklusjon. For at det skal bli lettere for leseren også å kunne gjøre seg opp en mening, er bildene det vises til i dette avsnittet oppstilt i vedlegg C. Det som imidlertid kommer klart fram, er at ved HSNR-innstillinger fra og med 25 «smøres» bildet mer utover. HSNR innstilling på 1 gir best resultat ved lukkertid på 30 ms. For lukkertider på 10 ms og 20 ms gir derimot HSNR-innstillinger på 1, 4 og 9 gode resultater, og det er vanskelig å skille ut hvilken innstilling som er best. Mens ved 40 ms er HSNR på 4 best. Luminescensopptakene fra 30 ms ser generelt ut til å skille seg ut fra de andre opptakene ved at pikslene i det midterste vertikale området generelt er mørkere enn resten av opptaket. Dette kan skyldes at laserlyset ikke har vært helt rett.



Figur 4.13: Luminescens fra wafer 1 belyst med L2. Gitt samme lukkertid blir resultatet bedre med høyere HSNR

Ser man derimot på wafer 1 belyst med L2 (figur 4.13) ser det ut til at HSNR på 9 er best ved lukkertid på 10 ms. Ved 30 ms derimot, ser det ut til at HSNR på 4 gir best resultat. For wafer 1 belyst med L3 ser det ut som HSNR på 9 i mange tilfeller gir best resultat. Det er ikke grunnlag for å diskutere resultatet for wafer 2 belyst med L1, da det kun er gjort opptak med HSNR på 4.

En årsak til at høyere HSNR ikke alltid gir bedre resultat er at flere bilder midles.

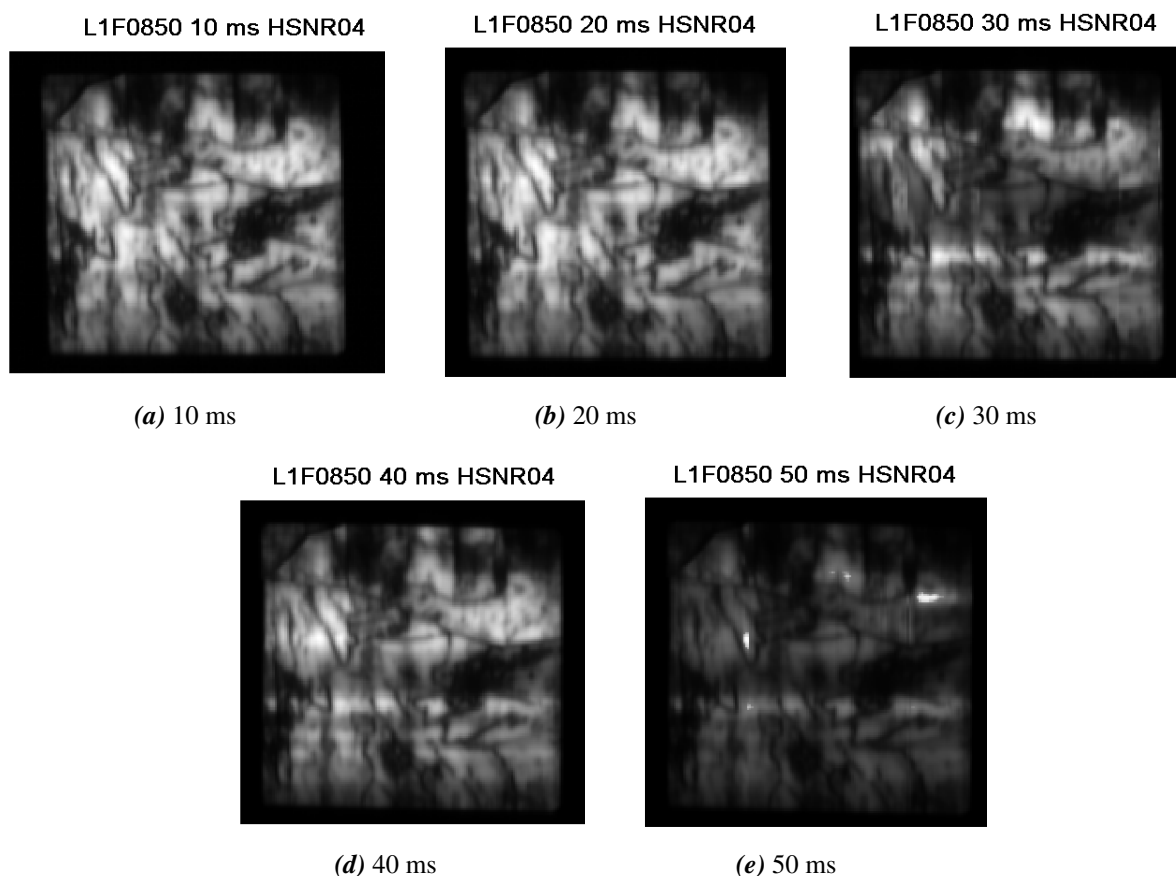
Forutsetningen for at midlingen skal gi bedre resultater, er at forholdene er like hver gang målingen tas. Det innebærer at waferen må ligge i ro, og lysintensiteten må være stabil.

Skannebordet beveger seg saktere når mange bilder midles, men stopper ikke. Med tanke på at waferen beveger seg, kan det konkluderes med at forholdene ikke er konstante nok hele tiden for høye HSNR-innstillinger.

Utifra disse resultatene kan det kun konkluderes med at HSNR større enn 25 i de fleste tilfeller gir dårligere opptak. For lavere HSNR-innstillinger er tendensen at høyere HSNR gir bedre bilde, men ikke i alle tilfeller. Opptak bør av den grunn gjøres flere ganger ved forskjellige HSNR-innstillinger.

4.8 Lukkertider

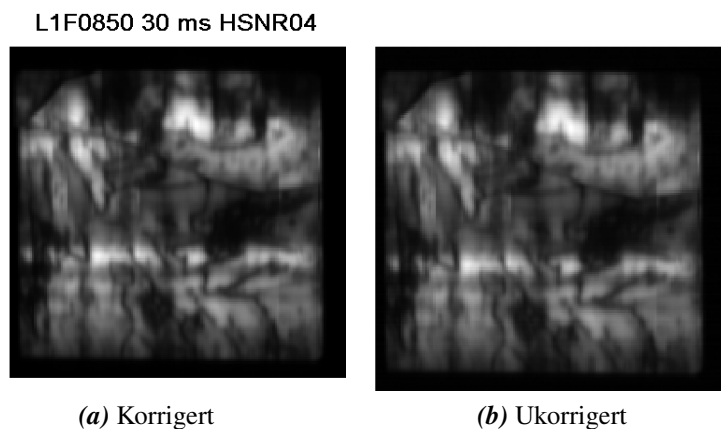
Hvilken lukkertid som bør brukes vil avhenge av lyskilden og waferen. Tidligere er det vist at høye HSNR-innstillinger ikke nødvendigvis gir noe bedre resultat, fordi forholdene ikke er konstante nok. I lys av det, dukker spørsmålet om forholdene er konstante nok for lengre lukkertider.



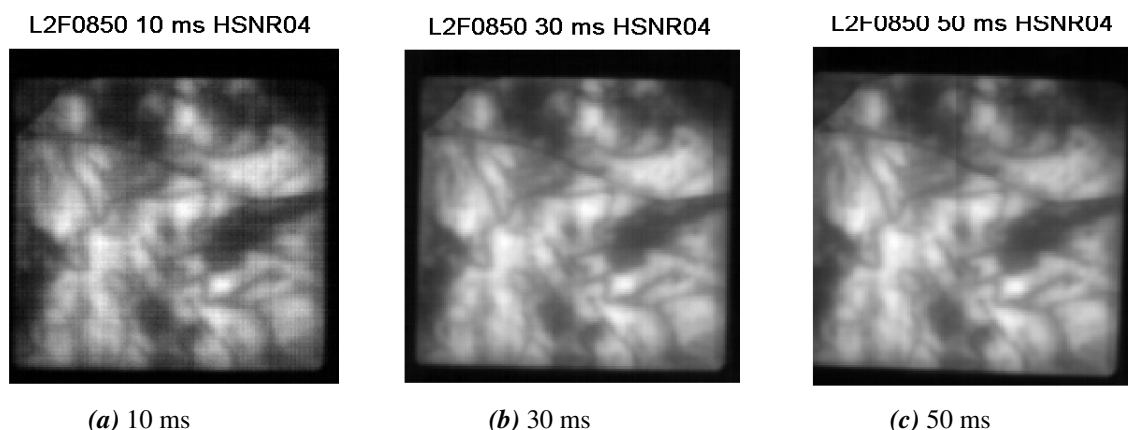
Figur 4.14: Luminescens ved forskjellige lukkertider ved bruk av L1 og wafer 1.

Figur 4.14 viser integrert fotoluminescens fra wafer 1 belyst med L1 ved forskjellige lukkertider. Ved høyere lukkertider enn 20 ms kan det se ut som det blir støyeffekter i bildet, spesielt i midten sett ovenfra ved 30 ms. Dette viser seg å gå igjen på flere av bildene tatt ved 30 ms. Alle opptakene wafer 1 belyst med L1 ved 30 ms, er korrigert for den samme bakgrunnstøyen. I figur 4.15 er bakgrunn vist med og uten korrigering for bakgrunn. Det er ingen nevneverdig forskjell i området i midten. Hypotesen om at bakgrunn påvirker området i

midten faller derfor. Det svakere området i midten kan skyldes at laserstrålen er ujevn. Ved 50 ms går enkelte punkter i metning. Alt dette gir en god indikasjon på at 20 ms er lang nok lukkertid for kombinasjonen wafer 1 og laser.



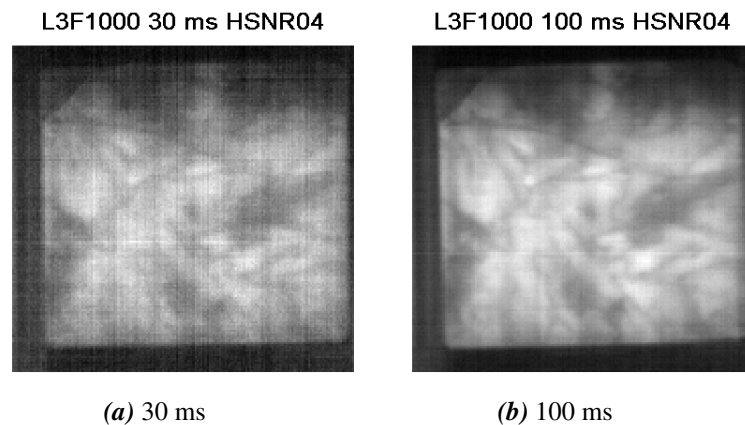
Figur 4.15: Sammenligning med (a) og uten (b) bakgrunnskorrigering. Figuren viser samme luminescensopptak av wafer 1 belyst med L1 ved lukkertid på 30 ms. Bildene viser at støyen midt i bildet ikke skyldes bakgrunn som er fjernet.



Figur 4.16: Luminescens ved forskjellige lukkertider ved bruk av L2 og wafer 1.

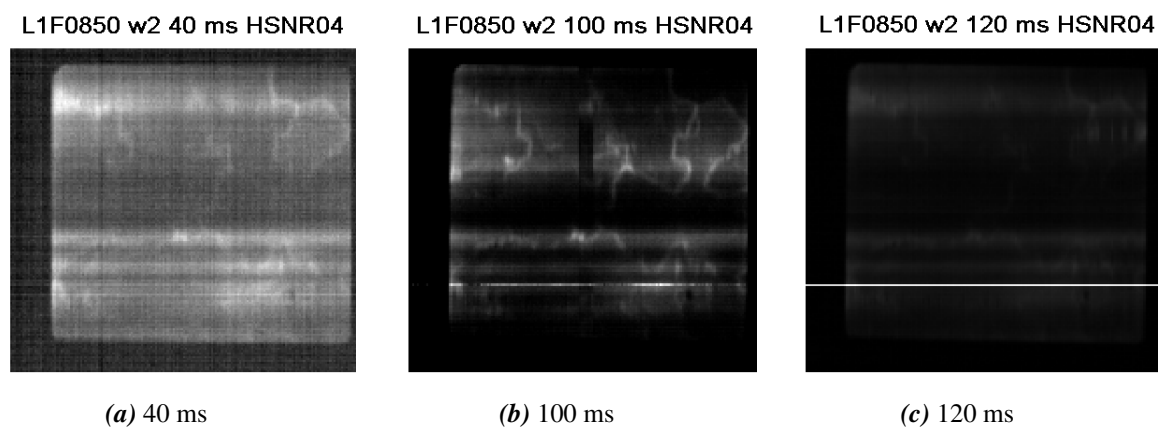
Belyses wafer 1 med L2, er det derimot vanskeligere å si hvilken lukkertid som er best. Resultatet av det er vist i figur 4.16. Ved 10 ms og 20 ms ser bilde litt uklart ut. Mellom 30 ms-75 ms syns korn grensene godt, og bildet virker klart. Fra 100 ms ser det ut som det blir mer støy. Utifra dette resultatet, tyder det på at 30 ms er en god lukkertid for denne waferen med denne lyskilden. Med tanke på at det optimale for L1 var 20 ms, er dette et litt uventet resultat, da intensiteten fra L2 er vesentlig lavere enn L1, nærmere bestemt 12,6 prosent av intensiteten til L1 (tabell 3.1).

Når det gjelder bruk av L3 på wafer 1, synes det lett å trekke en konklusjon. Opptil 50 ms er det temmelig uklart. Fortsatt litt uklart ved 75 ms, men ved 100 ms er det et godt resultat. Ved 125 ms, ser det ut som det blir en del elementer av støy. Figur 4.17 sammenligner luminescens



Figur 4.17: Luminescens ved lukkertidene 30 ms (a) og 100 ms (b) ved bruk av L3 på wafer 1.

ved 30 ms og 100 ms, og viser hvor mye bedre bilde blir ved lengre lukkertider for den wafer-lyskombinasjonen.

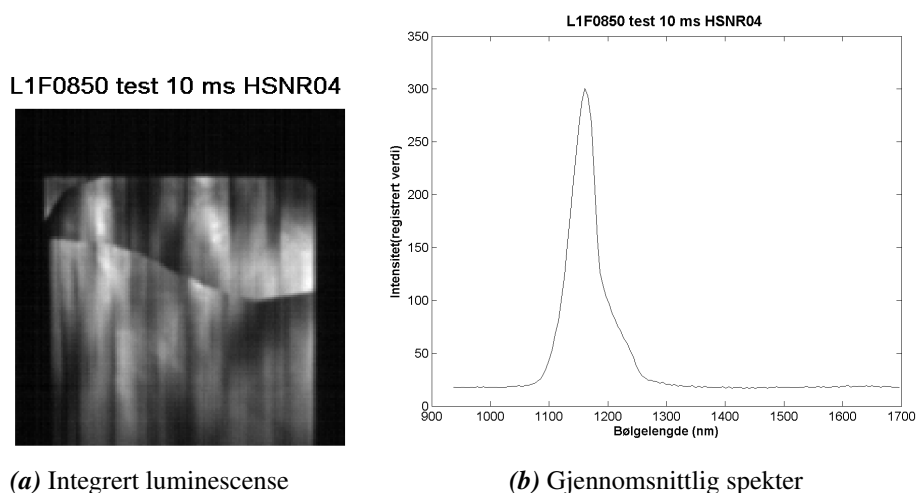


Figur 4.18: Luminescens ved forskjellige lukkertider ved bruk av L1 og wafer 2.

Resultatene for wafer 2, vist i figur 4.18 skiller seg ut fra wafer 1, med at det kun er en lukkertid på 100 ms som gir godt resultat. Om dette skyldes tilfeldigheter er vanskelig å konstantere utifra så lite materiale.

4.9 Lyskilder

Infrarødt lys er usynlig for det blotte øye. Av den grunn er det derfor vanskelig å vite om lyskildene man bruker er innstilt optimalt. Laser som ikke treffer godt nok i området kameraet registrerer, vil som vist i figur 4.19a gi et uklart bilde. Snittgrafene (figur 4.19b) viser også at registrerte verdier blir veldig lave i forhold til støyen og det blir et dårlig signal-støyforhold. Det understreker hvor viktig det er å stille inn laseren (L1). Laseren sin bølgelengde er som kjent utenfor området kamera registrerer i. I kapittel 4.3 ble det vist at uten filter vil andre ordens brytning i gitteret inni kamera føre til at det blir registrert. For å stille inn laseren, fjernes eventuelle filter fra kamera, ved å velge bånd med bølgelengde rundt 1616 nm til forhåndsvisningen kan laser lysets refleksjon ses direkte. For gode wafere, som wafer 1, kan laseren stilles inn ved å se på bølgeområdet til luminescensen mens filteret sitter på.



(a) Integret luminescense

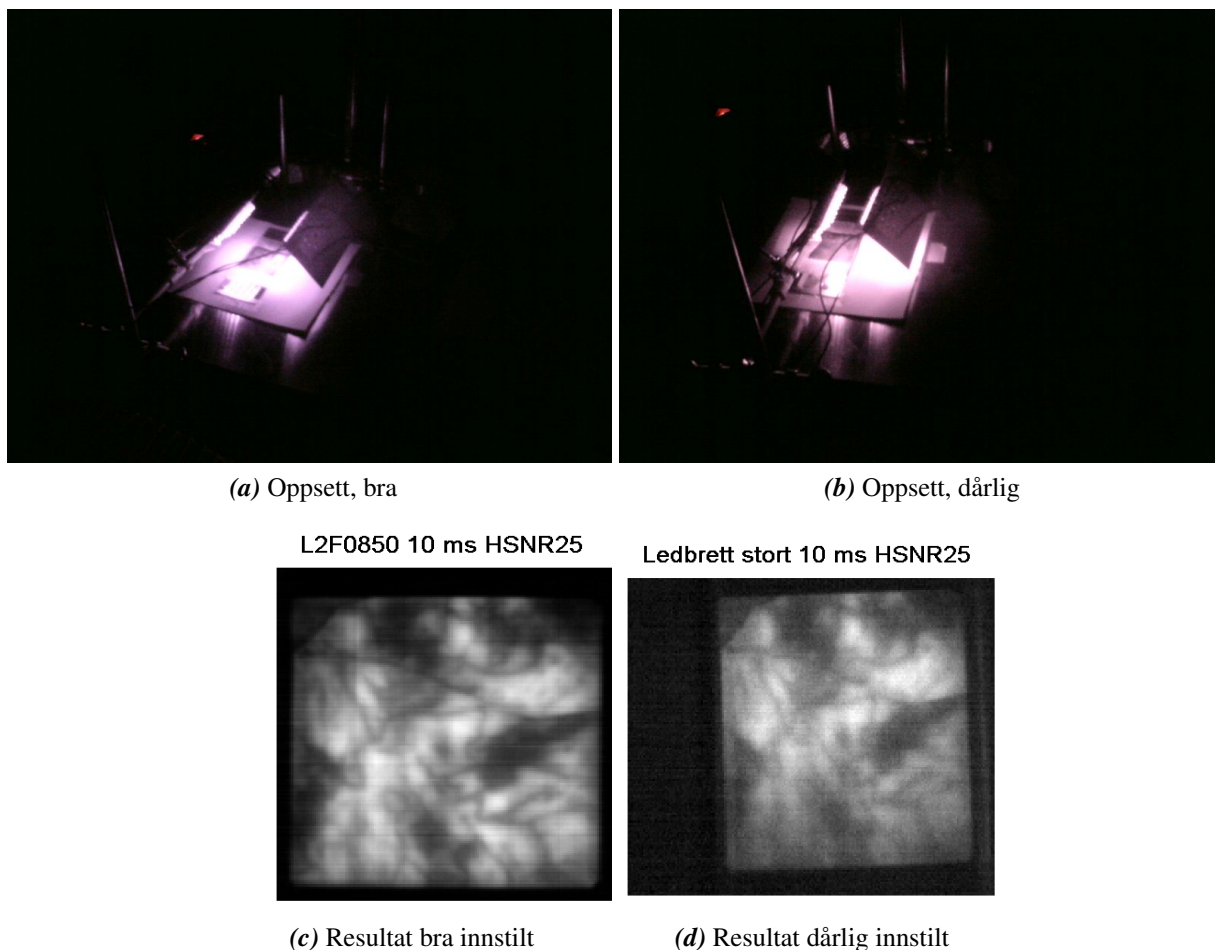
(b) Gjennomsnittlig spekter

Figur 4.19: Resultat av dårlig opplinjert laser. Bildet (a) blir svært utydelig, og smøres ut. Sammenlignes gjennomsnittspekteret med tilsvarende spekter i figur 4.7

Figur 4.20a og b er tatt med et vanlig mobiltelefonkamera, og viser hvordan ir-strålingen brer seg ut over brettet, i et tilsynelatende mørkt rom. Oppsettet i figur 4.20b ble brukt først. Med ir-sensor kort virket det som at strålingen var bra. Bildet viser derimot at veldig mye av lyset havner på utsiden av waferen. Etter å ha flyttet det venstre brettet litt til venstre, lyste det mer på waferen (figur 4.20a). I rad 2 vises de respektive resultatene ved den forskjellige lysinnstillingene. Det viser hvor viktig det er å stille inn lyskildene godt. Bildet i figur 4.20d er tatt under uttesting av kamera, og er egentlig ikke en del av hovedforsøket. Da filnavnet danner grunnlaget for overskriften, bryter det med mønsteret for overskrifter.

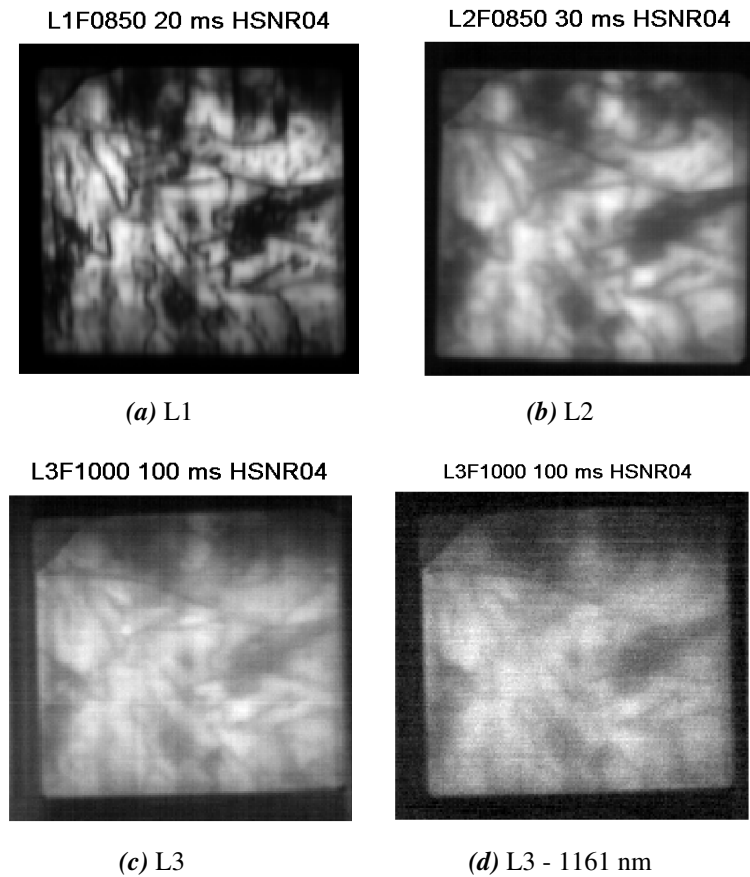
Wafer 1 er den eneste waferen som har blitt belyst av flere lyskilder. Vurdering av hvilken lyskilde som er best, gjøres ved å se på resultatet av wafer 1 belyst med laseren (L1) og led Brettene (L2 og L3). I kapittel 4.8 ble det sett på hvilke lukkertider som var best, ved bruk av de forskjellige lyskildene. Figur 4.21 viser integret luminescense fra opptakene med best

lukkertidsresultatet. For L3 er derimot et bilde fra bølgelengde med best luminescense (1161 nm) tatt med, da konklusjonen kan bli helt anderledes om man ser på enkeltbånd kontra integrert luminescens. Disse bildene danner grunnlaget for beslutning om hvilken lyskilde som er best. Lyskilden som gir helt klart best resultat er L1. Korngrensene kommer godt fram, og intensitene til luminescensen er god. Bildene blir veldig tydelige, noe som kan tyde på at det dannes mange elektron-hullpar.



Figur 4.20: L2-oppsettsammenligning. Øverste raden: L2 oppsett vist med vanlig kamera. Lyset er ikke synlig for det blotte øyet. (a) viser bra oppsett, (b) viser dårlig. Raden under vises integrert luminescense med innstillingene rett over.

Ledbrettet L2 gir også et akseptabelt resultat. Belyst med L3 blir mange korngrenser borte når bildet av enkeltbåndet studeres, og bildet er ikke så tydelige, men integrert luminescens gir et godt resultat også for L3. Et annet oppsiktsvekkende resultat er at enkelte områder på waferen blir tydeligere når L3 er kilden enn når L1 og L2 er kilden. Dette kan tyde på at lyskilden og dermed inntrengningsdybden har noe å si for luminescensen. Laseren (L1) er derfor å anbefale hvis man ønsker best mulig resultat. Laseren er derimot den lyskilden som er farligst for øynene. Hvis det bare er metoden som skal demonstreres, og resultatet er underordnet, er ledbrettene (L2 og L3) sikrere.



Figur 4.21: Luminescens fra wafer 1 belyst med forskjellige lyskilder(a-c). Når belyst med L3 forbedres resultatet av integrering, og det kan trekkes feil konklusjon om det bare ses på integrert luminescense.

Kapittel 5

Konklusjon

Resultatene i dette masterarbeidet stemmer godt overens med hva som er forventet utifra teorien. Bølgespekteret fra luminesceringen har som forventet sin topp rundt 1150 nm, litt overraskende er det dog at luminescering har sin topp i 1161 nm for fotoluminescense fra led Brettene, noe som kan tyde på at inntrengningsdybden har noe å si for resultatet. Luminesceringen øker, ikke uventet, med intensiteten til lyskilden. Laseren er lyskilden som gir klart best resultat, men led Brettene med betydelig lavere intensitet gir også bra resultater.

Å integrere luminescensspekteret gir klart mer kontraster i bildet enn å presentere luminescens fra bølgelengden med best luminescense. Bruk av filter har den fordel at refleksjon fra lyskilden reduserer vesentlig, men luminescenssignalet svekkes noe det også.

HSNR-funksjonaliteten til kamera er dessverre ikke optimalt slik det er implementert i kameraprogramvaren nå for høyere inntillinger, men for lavere HSNR-innstillinger er tendensen at høyere HSNR opp til 9 gir bedre resultat. En antydning er at hvis skannebordet stoppes under midlingene, vil trolig resultatet bli enda bedre. Kameras lukkertid kan holdes forholdsvis lav, 10 ms - 30 ms, hvis lyskilden er intens nok, og waferen er av god kvalitet. Er waferen av dårligere kvalitet, eller lyskilden er svak, må lengre lukkertider brukes.

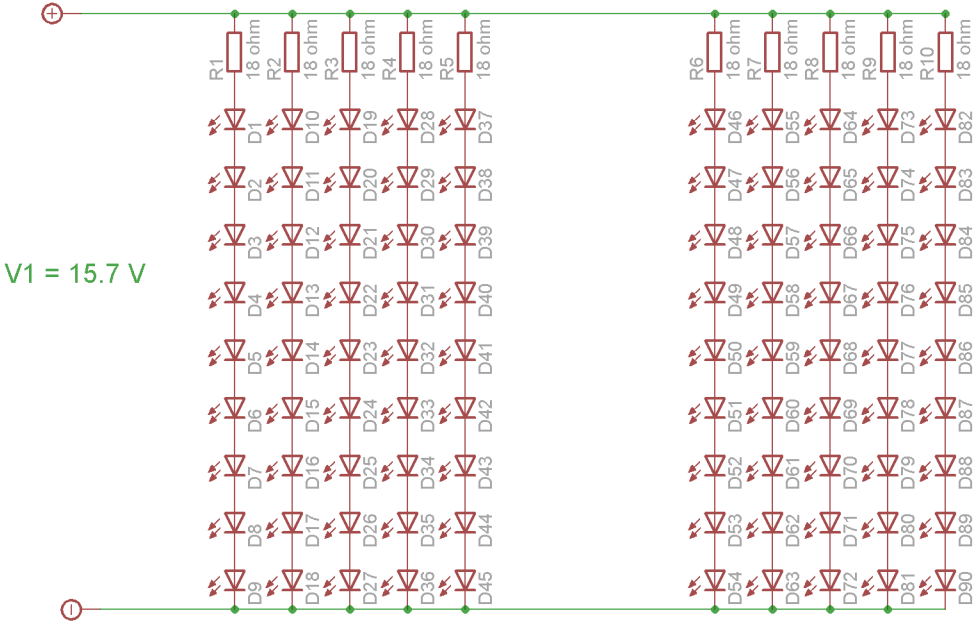
Opgaven med å finne ut om Institutt for matematiske realfag og teknologi ved Universitetet for miljø- og biovitenskap sitt hyperspektrale kamera kan ta opptak av fotoluminescens fra silisiumwafer er herved fullført, og jeg kan konkludere med at utstyret gir et bra resultat som viser korn grenser og andre forskjeller i waferene godt!

5.1 Videre arbeid

Potensialet for videre arbeid er stort. For det første kan flere wafere med forskjellige karakteristikk studeres. Bruk av andre typer lyskilder, for å se hvordan inntreningsdybden påvirker resultatet. For å finne urenheter, må det trolig brukes statistisk metode på bildene. Undersøkelsene i dette arbeidet er gjort i vanlig romtemperatur; elektronene har derfor termisk energi som gjør det lettere å eksitere dem. En måte å unngå dette på, er å kjøle ned waferene. Bildene viser hvor levetiden er høy og hvor den er lav, men levetidene er ikke tallfestet. Opptakene bør derfor gjøres om til levetider.

Vedlegg A

Koblingskjema LED-brett



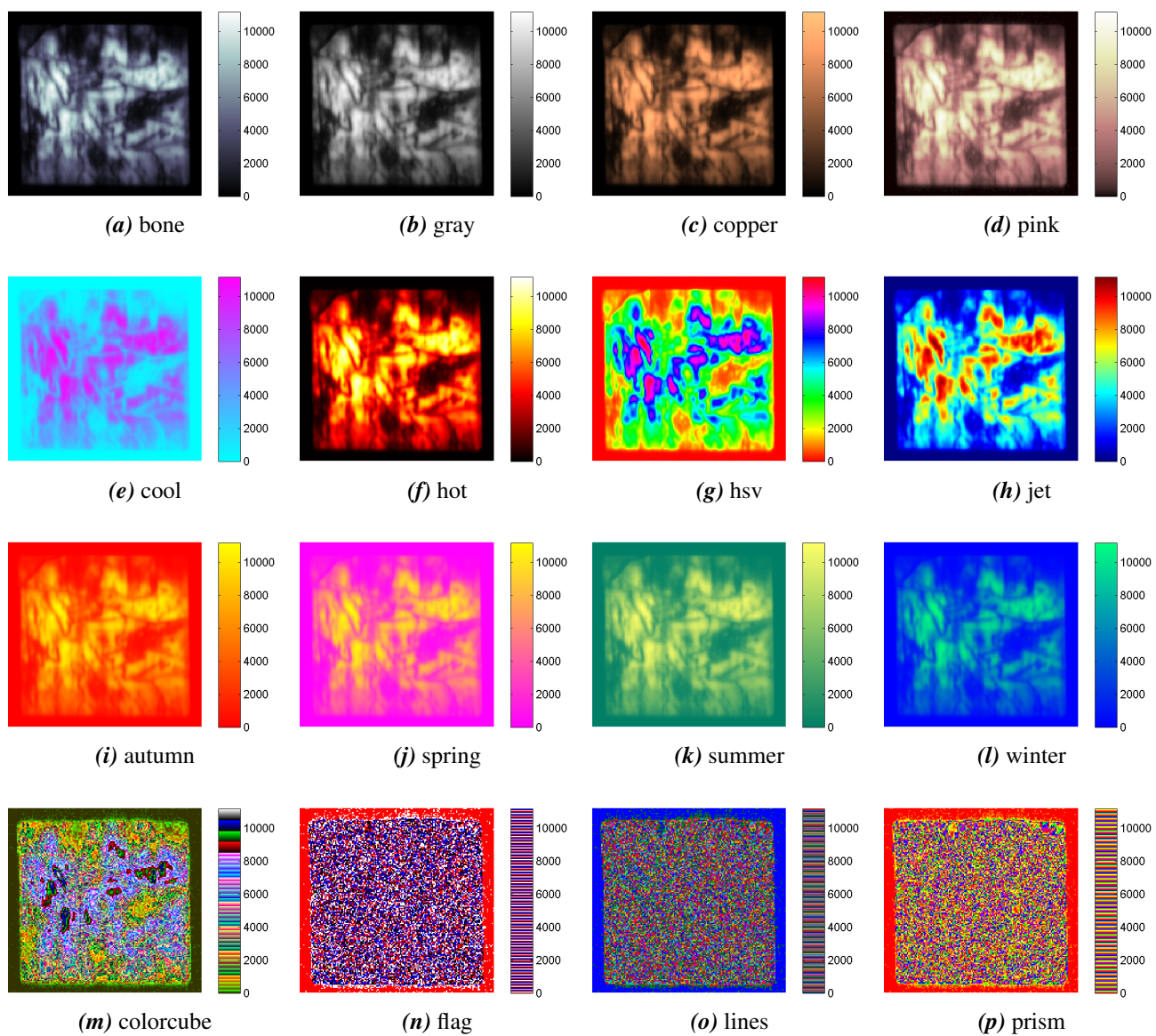
Figur A.1: Koblingskjema for L3



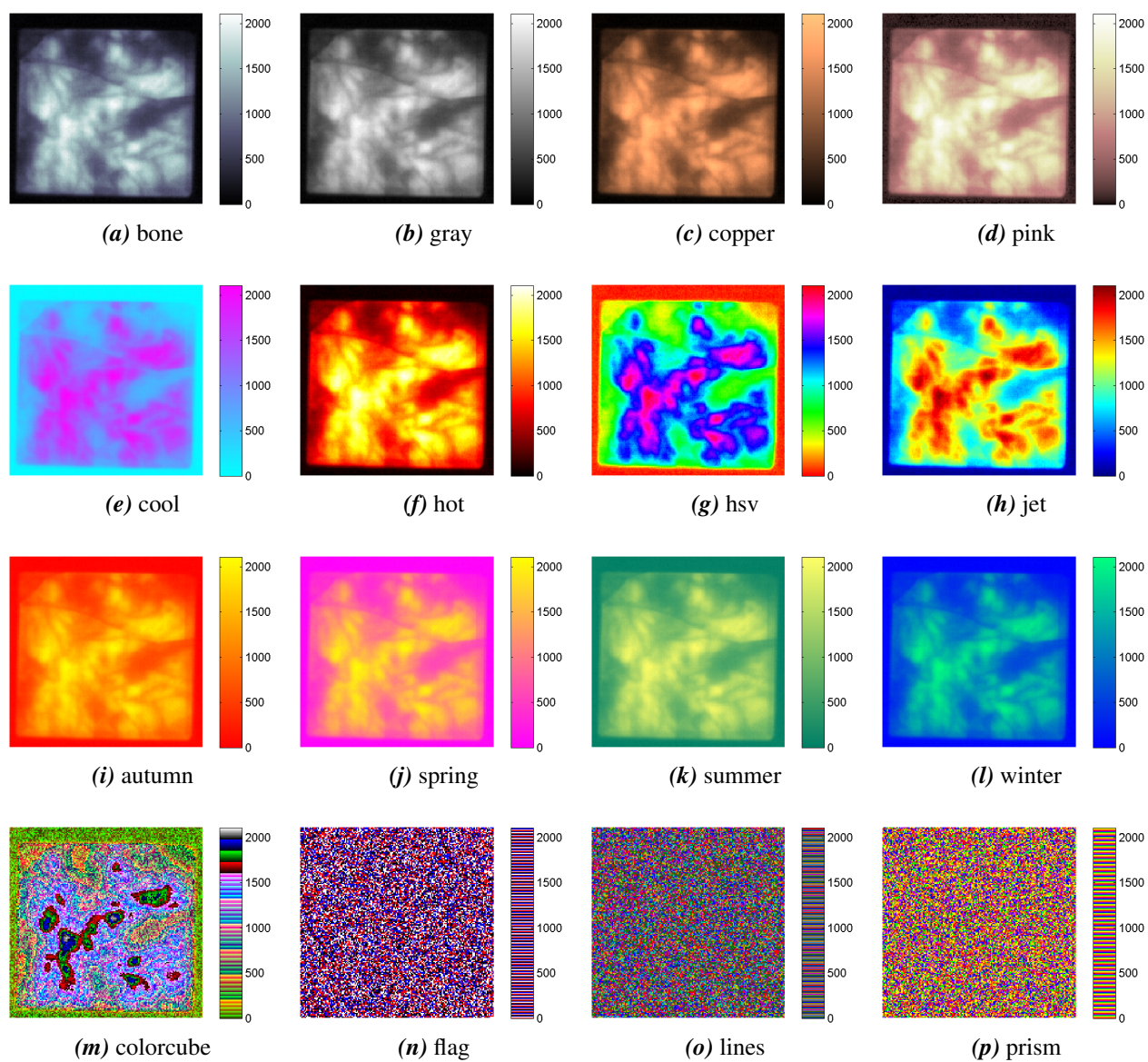
Figur A.2: Koblingskjema for L2

Vedlegg B

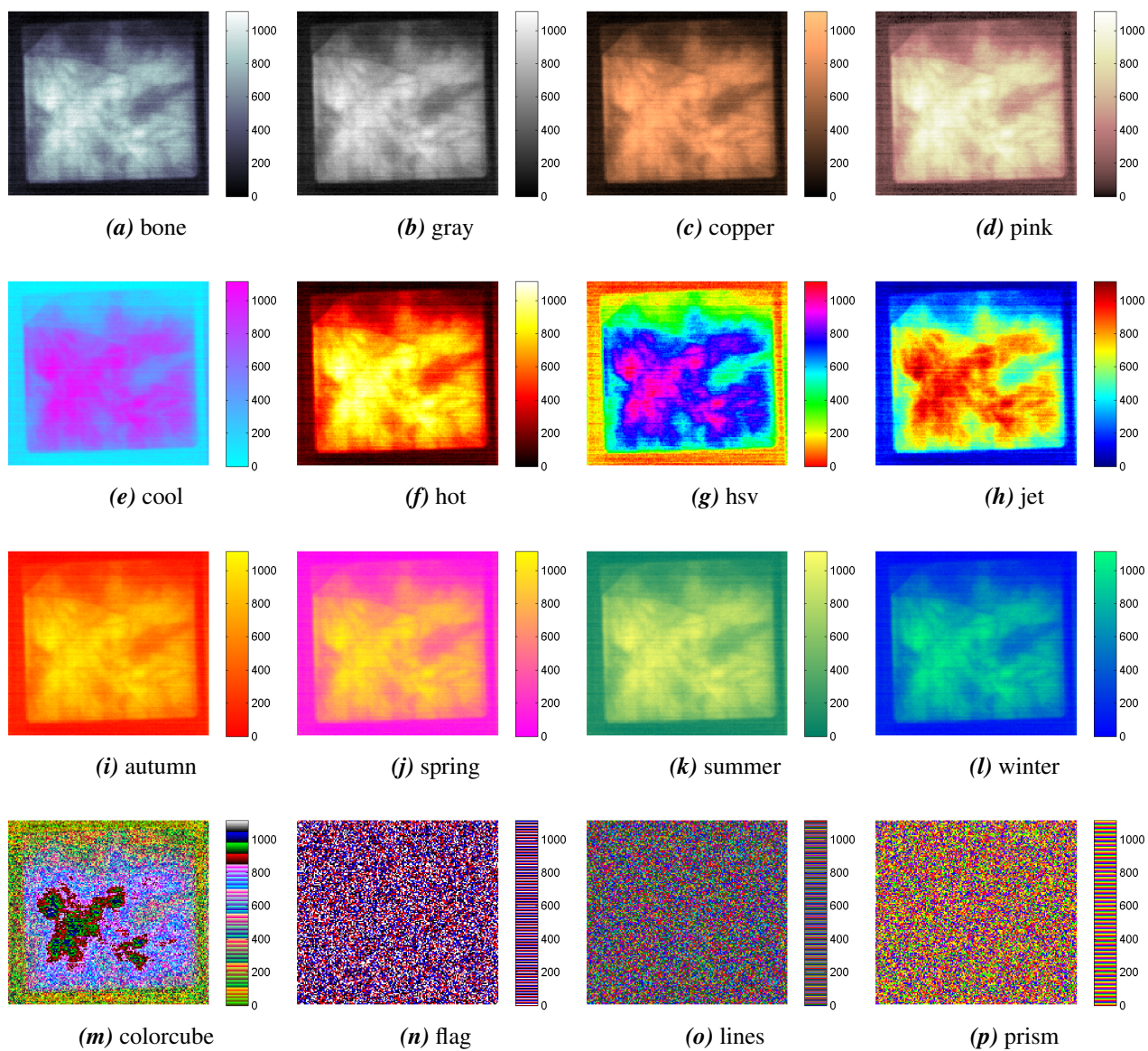
Fargekarttest



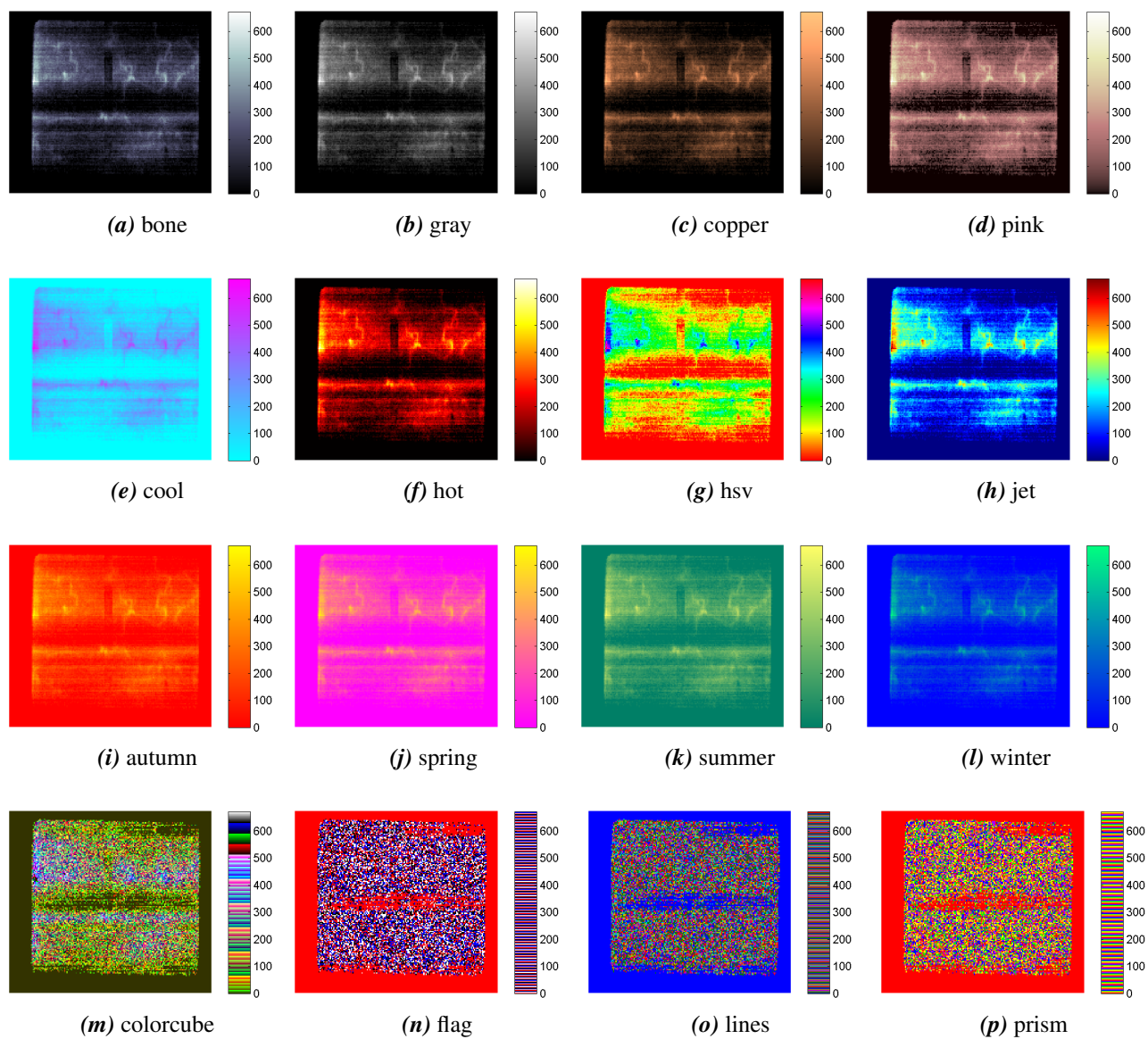
Figur B.1: Fargekarttest wafer 1, belyst med L1



Figur B.2: Fargekarttest wafer 1, belyst med L2.



Figur B.3: Fargekarttest wafer 1, belyst med L3



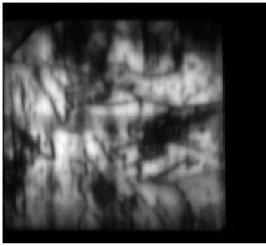
Figur B.4: Fargekarttest wafer 2, belyst med L1

Vedlegg C

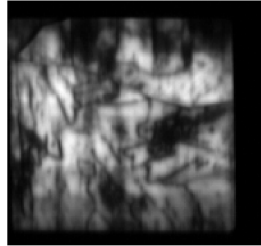
HSNR

På neste side vises luminescensopptak av wafer 1 belyst med 808 nm laser (L1) ved forskjellige HSNR-innstillinger og lukkertider.

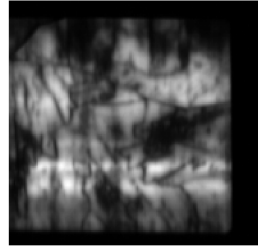
L1F0850 10 ms



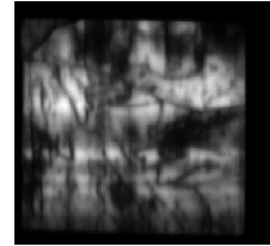
L1F0850 20 ms



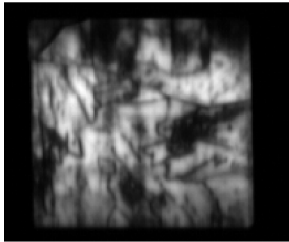
L1F0850 30 ms



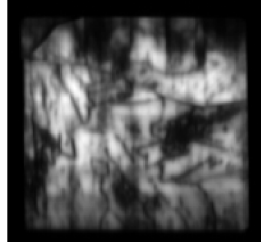
L1F0850 40 ms



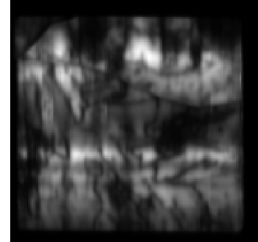
L1F0850 10 ms HSNR04



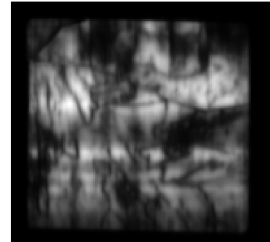
L1F0850 20 ms HSNR04



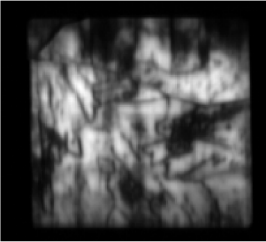
L1F0850 30 ms HSNR04



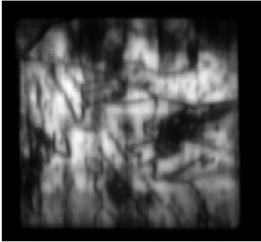
L1F0850 40 ms HSNR04



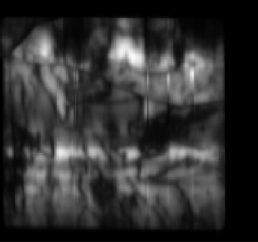
L1F0850 10 ms HSNR09



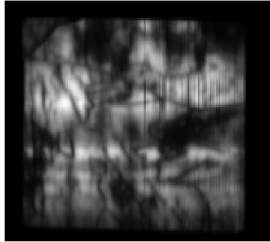
L1F0850 20 ms HSNR09



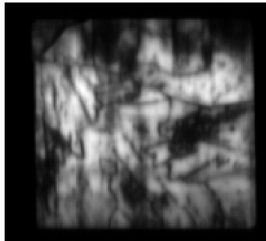
L1F0850 30 ms HSNR09



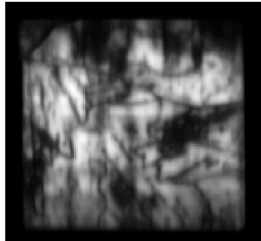
L1F0850 40 ms HSNR09



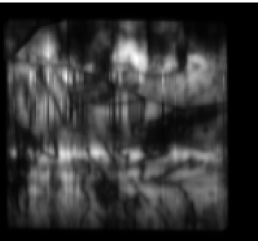
L1F0850 10 ms HSNR16



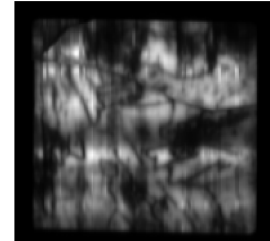
L1F0850 20 ms HSNR16



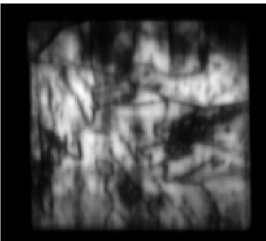
L1F0850 30 ms HSNR16



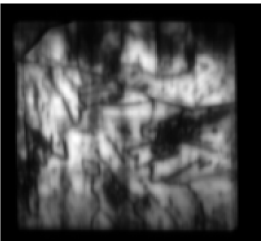
L1F0850 40 ms HSNR16



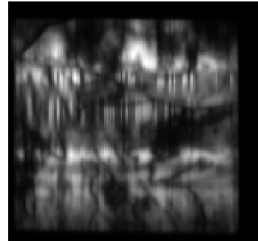
L1F0850 10 ms HSNR25



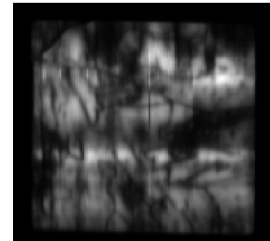
L1F0850 20 ms HSNR25



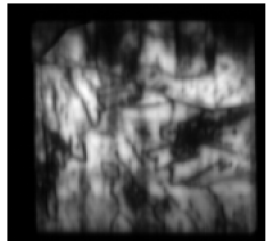
L1F0850 30 ms HSNR25



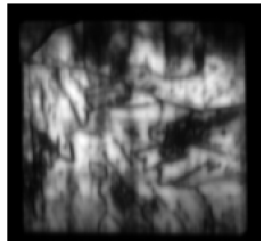
L1F0850 40 ms HSNR25



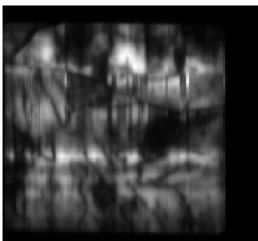
L1F0850 10 ms HSNR36



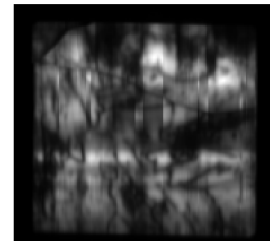
L1F0850 20 ms HSNR36



L1F0850 30 ms HSNR36



L1F0850 40 ms HSNR36



Vedlegg D

Luminescensbilder

I dette vedlegget vises integrert luminescens fra et utvalg av luminescense opptakene. Innstillingene for hvert opptak står over hvert bilde og tolkes slik:

L1 808 nm laser

L2 830 nm led Brett

L3 875 nm led Brett

w2 Indikerer at det er wafer 2 som er tatt bilde av. Hvis ikke er det av wafer 1.

F0000 Ingen filter brukt

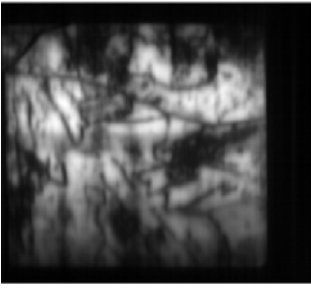
F0850 808 nm lavpassfilter brukt

F1000 1000 nm lavpassfilter brukt

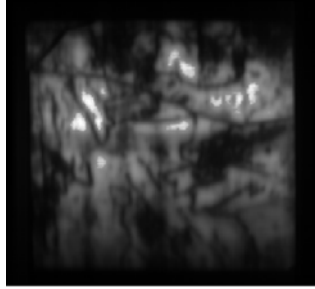
– **ms** Lukkertid i millisekunder. – indikerer tiden

HSNR– De neste sifrene indikerer HSNR innstillingene. Hvis HSNR ikke står, er HSNR lik 1.

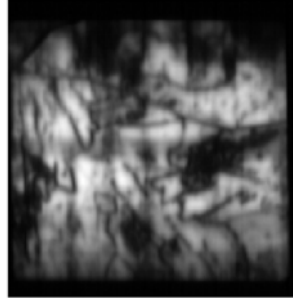
L1F0000 10 ms



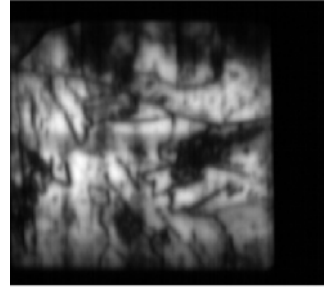
L1F0000 40 ms



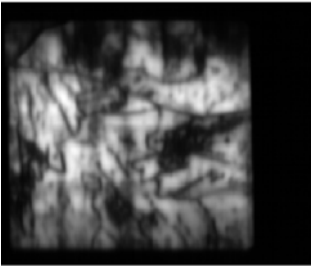
L1F0850 10 ms



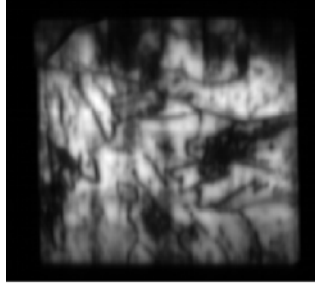
L1F0850 10 ms



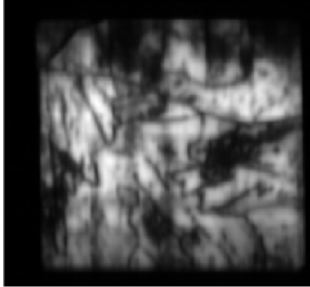
L1F0850 10 ms HSNR04



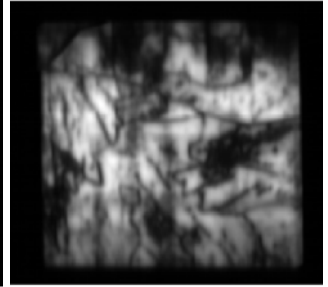
L1F0850 10 ms HSNR09



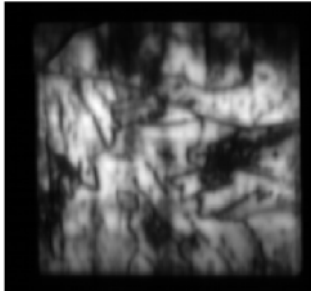
L1F0850 10 ms HSNR16



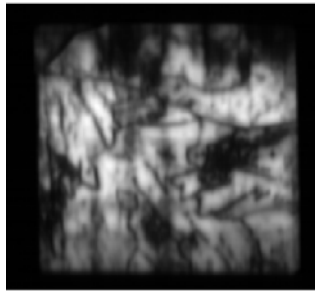
L1F0850 10 ms HSNR25



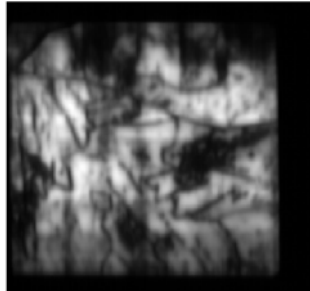
L1F0850 10 ms HSNR36



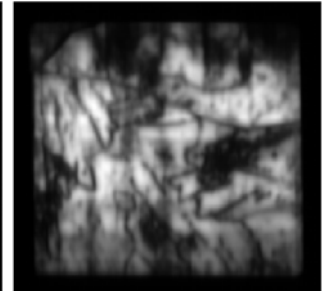
L1F0850 10 ms HSNR49



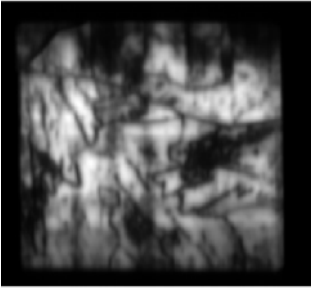
L1F0850 20 ms



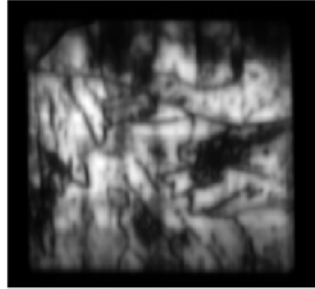
L1F0850 20 ms HSNR04



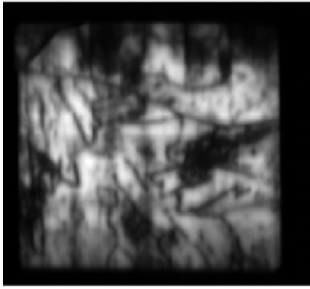
L1F0850 20 ms HSNR09



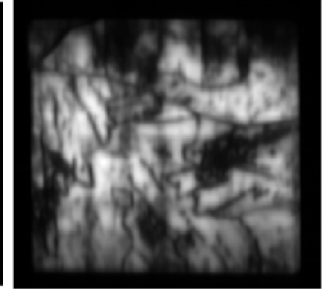
L1F0850 20 ms HSNR16



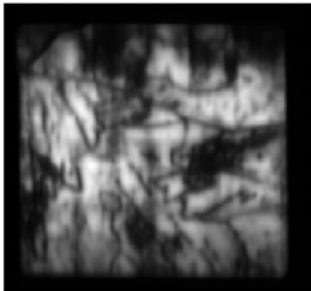
L1F0850 20 ms HSNR25



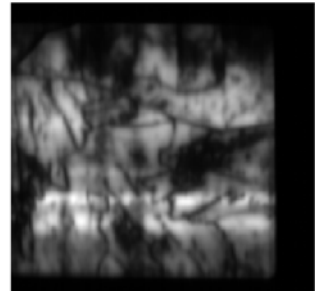
L1F0850 20 ms HSNR36



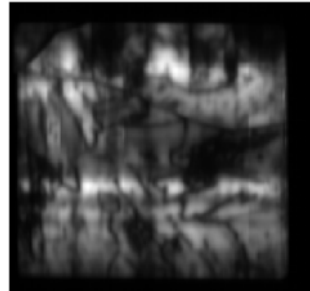
L1F0850 20 ms HSNR49



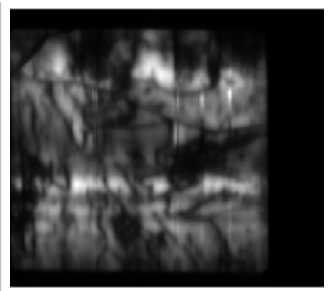
L1F0850 30 ms



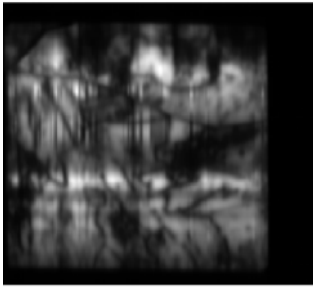
L1F0850 30 ms HSNR04



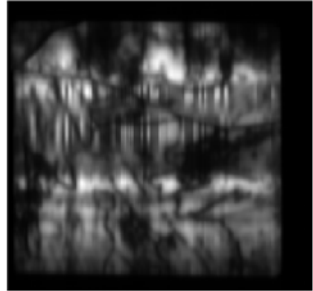
L1F0850 30 ms HSNR09



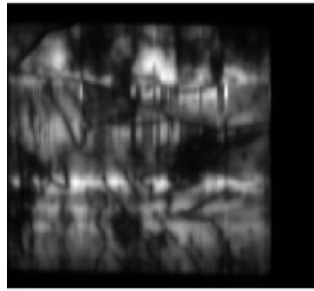
L1F0850 30 ms HSNR16



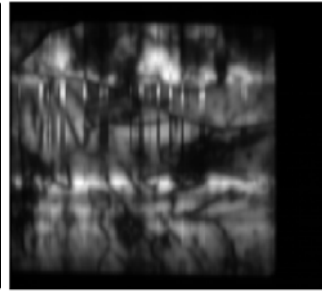
L1F0850 30 ms HSNR25



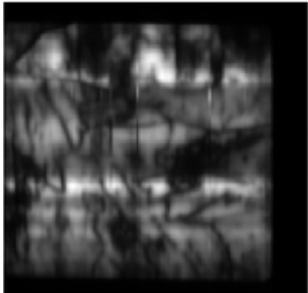
L1F0850 30 ms HSNR36



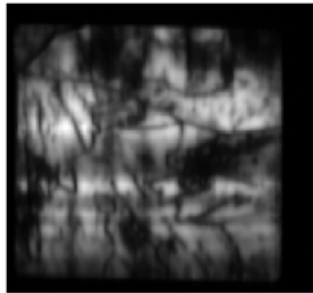
L1F0850 30 ms HSNR49



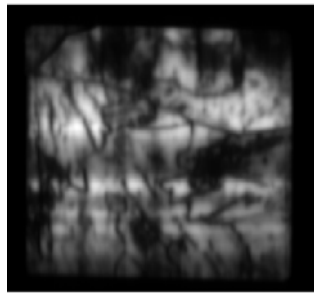
L1F0850 30 ms HSNR64



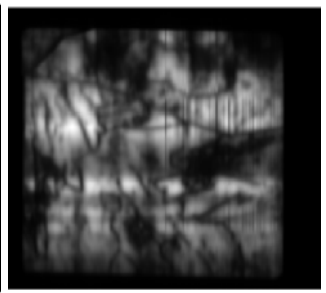
L1F0850 40 ms



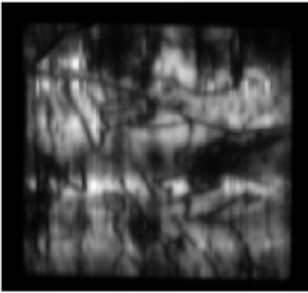
L1F0850 40 ms HSNR04



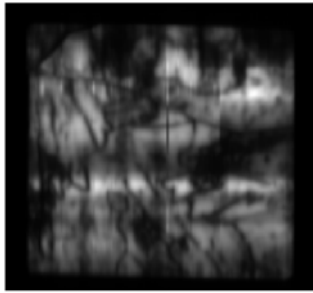
L1F0850 40 ms HSNR09



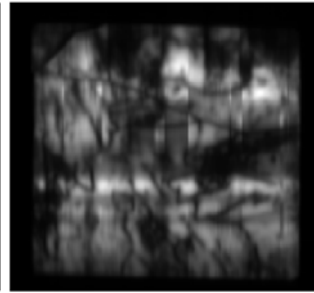
L1F0850 40 ms HSNR16



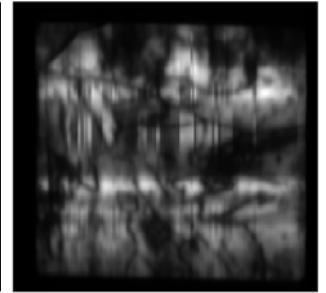
L1F0850 40 ms HSNR25



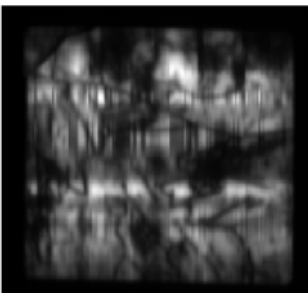
L1F0850 40 ms HSNR36



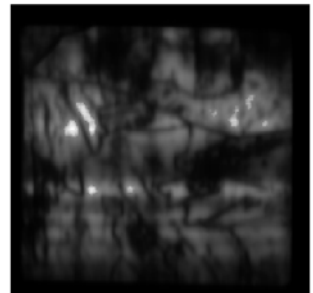
L1F0850 40 ms HSNR49



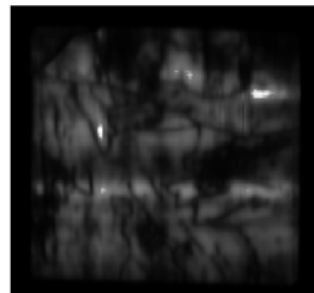
L1F0850 40 ms HSNR64



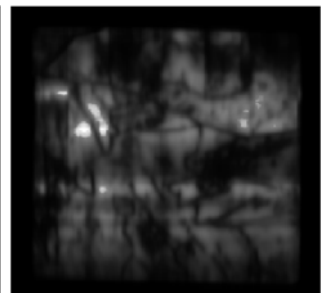
L1F0850 50 ms



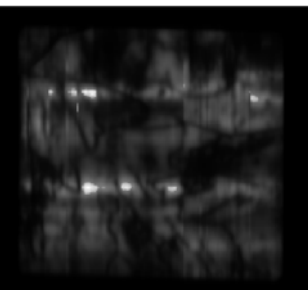
L1F0850 50 ms HSNR04



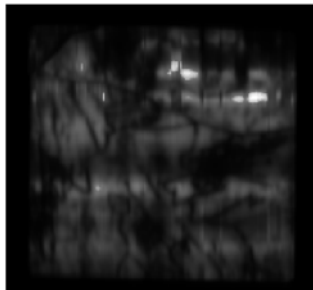
L1F0850 50 ms HSNR09



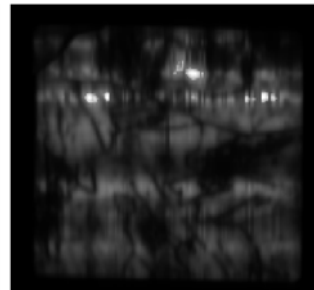
L1F0850 50 ms HSNR16



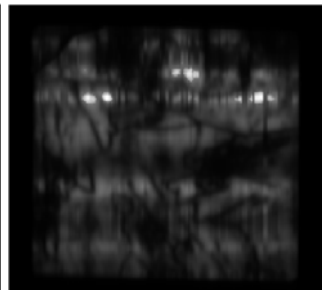
L1F0850 50 ms HSNR25



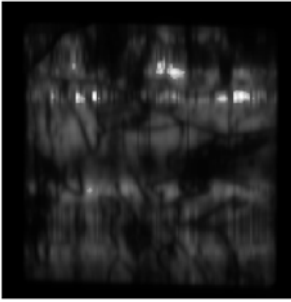
L1F0850 50 ms HSNR36



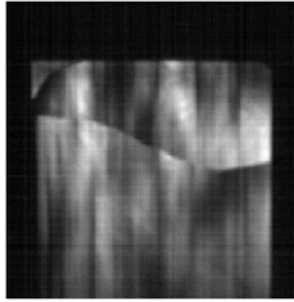
L1F0850 50 ms HSNR49



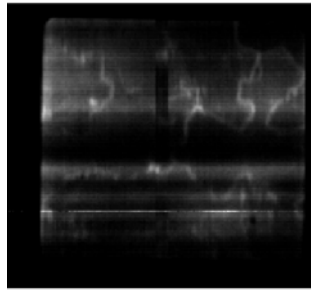
L1F0850 50 ms HSNR64



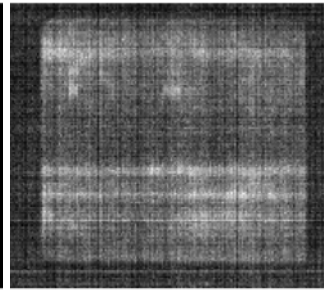
L1F0850 test 10 ms HSNR04



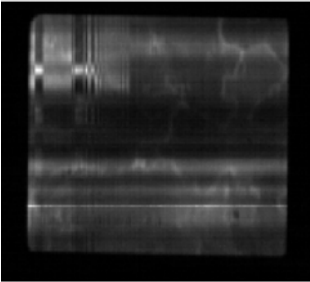
L1F0850 w2 100 ms HSNR04



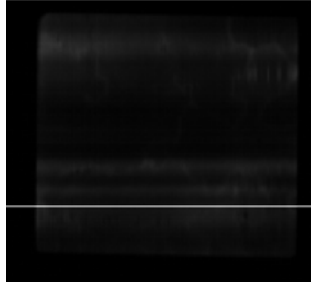
L1F0850 w2 10 ms HSNR04



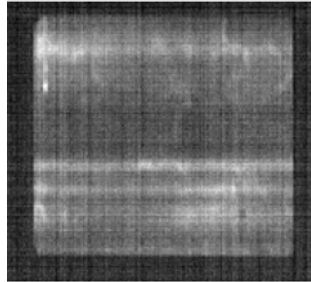
L1F0850 w2 110 ms HSNR04



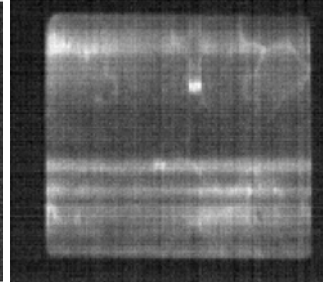
L1F0850 w2 120 ms HSNR04



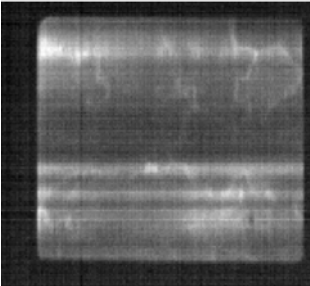
L1F0850 w2 20 ms HSNR04



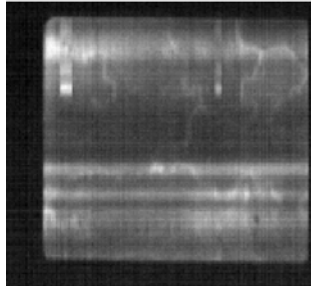
L1F0850 w2 30 ms HSNR04



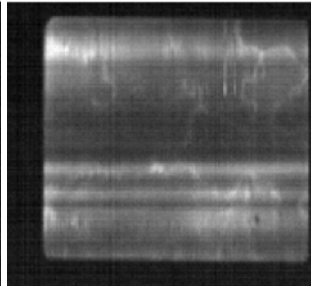
L1F0850 w2 40 ms HSNR04



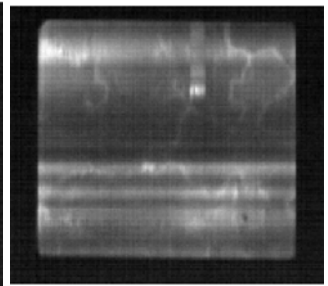
L1F0850 w2 50 ms HSNR04



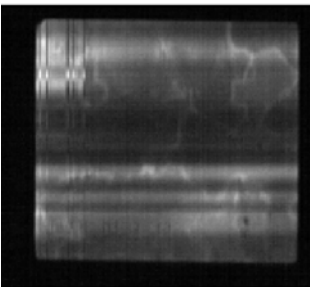
L1F0850 w2 60 ms HSNR04



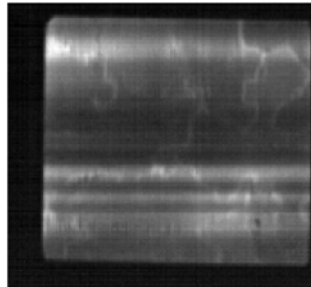
L1F0850 w2 70 ms HSNR04



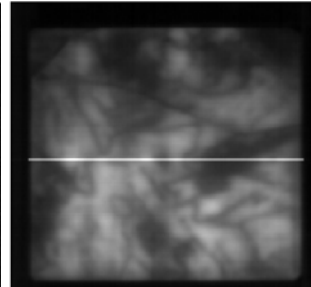
L1F0850 w2 80 ms HSNR04



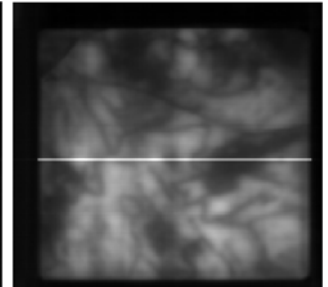
L1F0850 w2 90 ms HSNR04



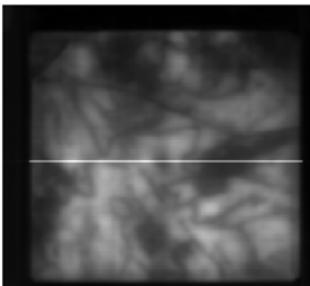
L2F0850 100 ms



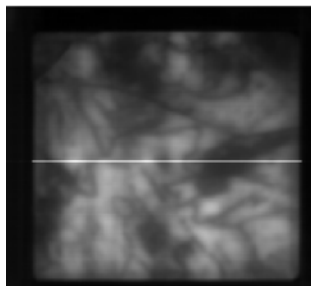
L2F0850 100 ms HSNR04



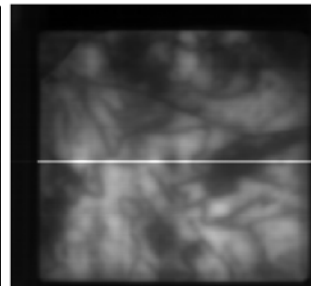
L2F0850 100 ms HSNR09



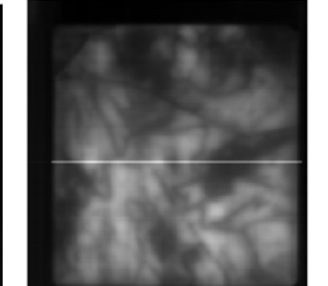
L2F0850 100 ms HSNR16



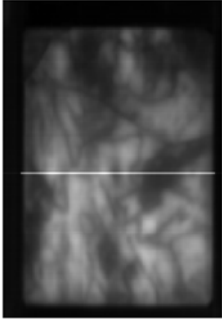
L2F0850 100 ms HSNR25



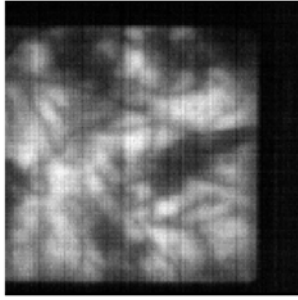
L2F0850 100 ms HSNR36



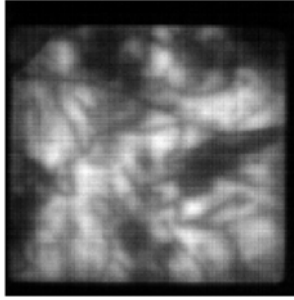
L2F0850 100 ms HSNR49



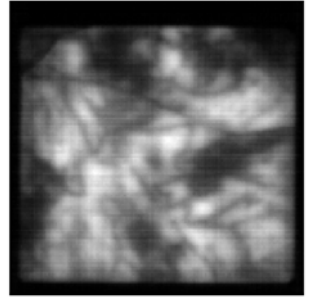
L2F0850 10 ms



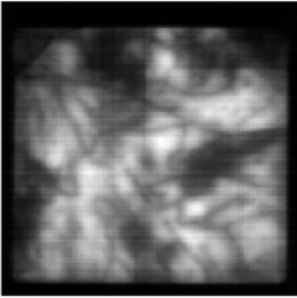
L2F0850 10 ms HSNR04



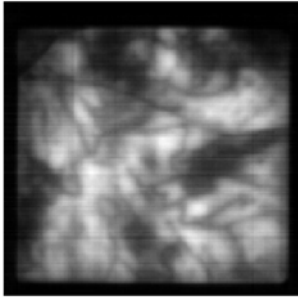
L2F0850 10 ms HSNR09



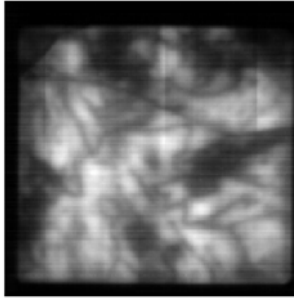
L2F0850 10 ms HSNR16



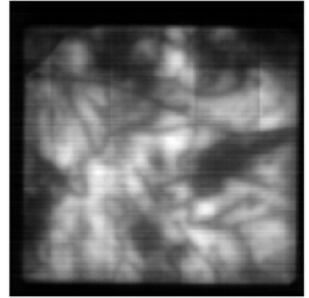
L2F0850 10 ms HSNR25



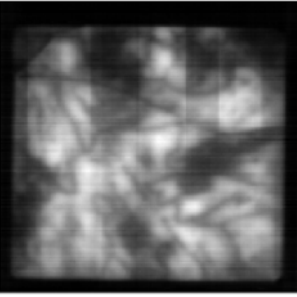
L2F0850 10 ms HSNR36



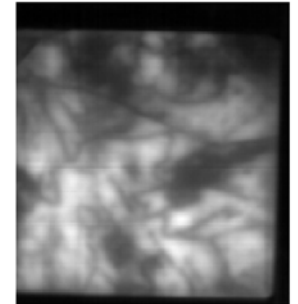
L2F0850 10 ms HSNR49



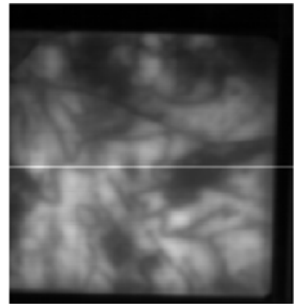
L2F0850 10 ms HSNR64



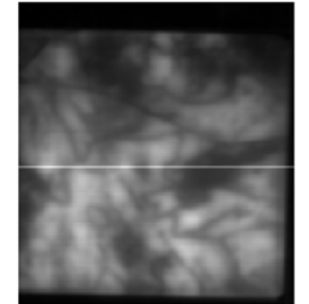
L2F0850 125 ms



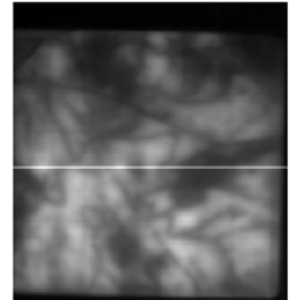
L2F0850 125 ms HSNR04



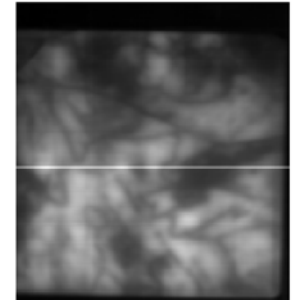
L2F0850 125 ms HSNR09



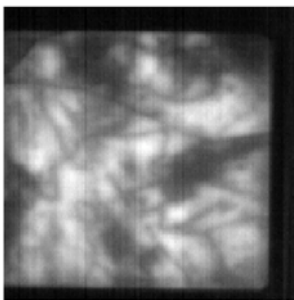
L2F0850 125 ms HSNR16



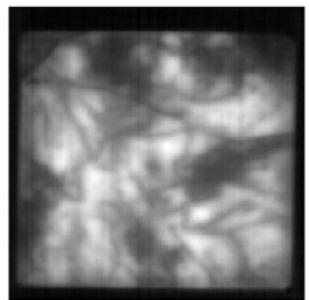
L2F0850 125 ms HSNR25



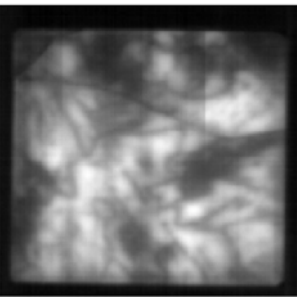
L2F0850 20 ms



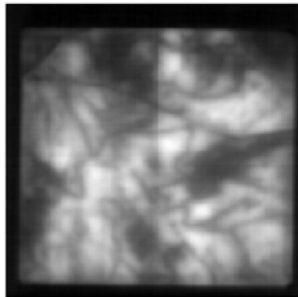
L2F0850 20 ms HSNR04



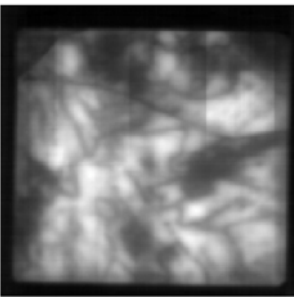
L2F0850 20 ms HSNR09



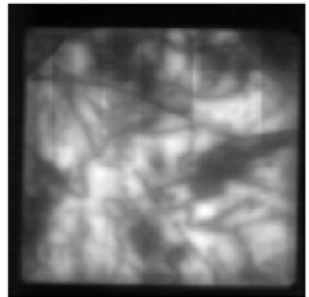
L2F0850 20 ms HSNR16

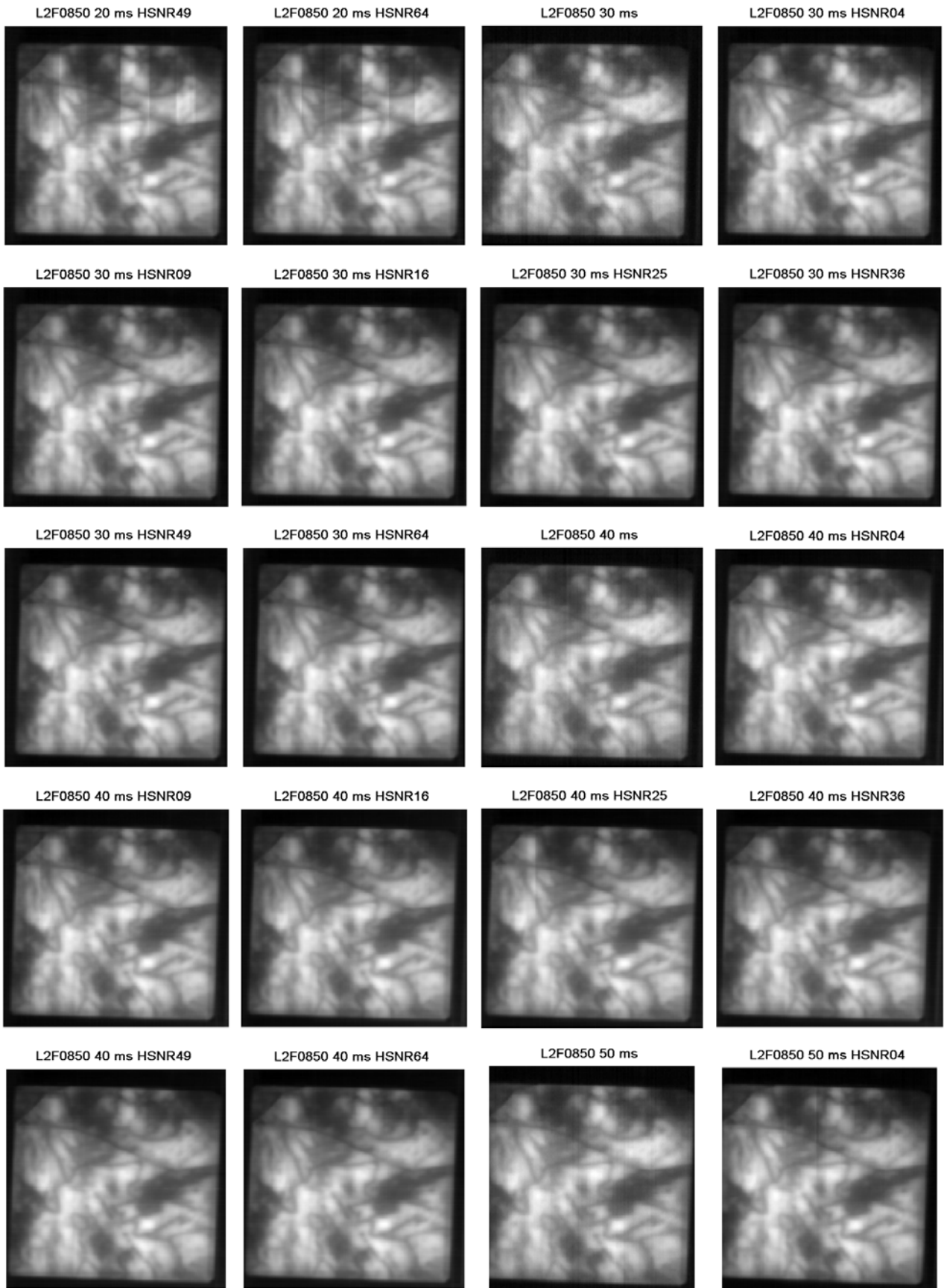


L2F0850 20 ms HSNR25

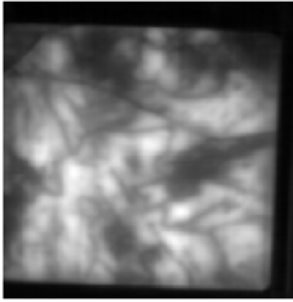


L2F0850 20 ms HSNR36

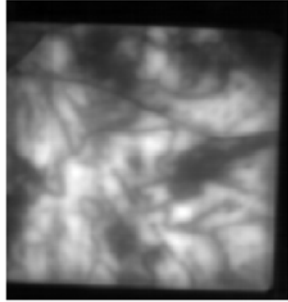




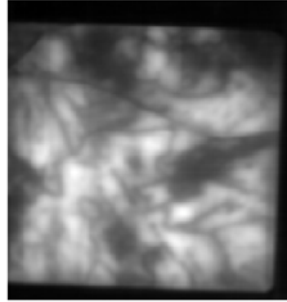
L2F0850 50 ms HSNR09



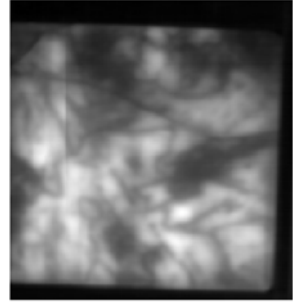
L2F0850 50 ms HSNR16



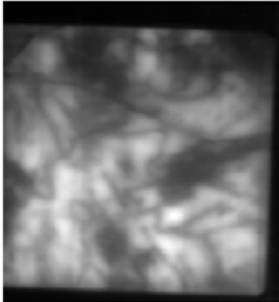
L2F0850 50 ms HSNR25



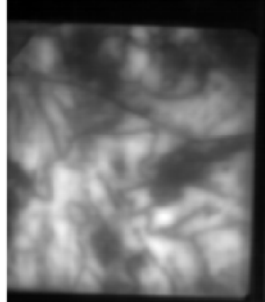
L2F0850 50 ms HSNR36



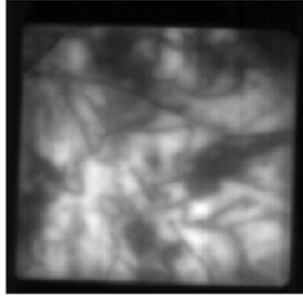
L2F0850 50 ms HSNR49



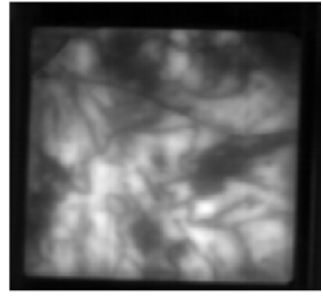
L2F0850 50 ms HSNR64



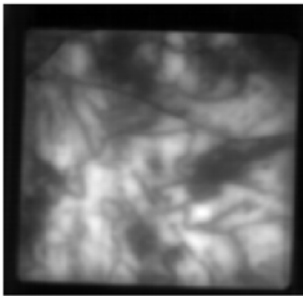
L2F0850 75 ms



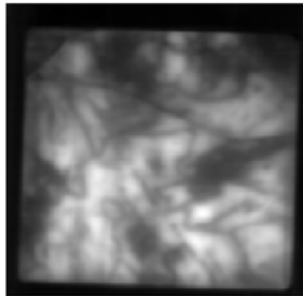
L2F0850 75 ms HSNR04



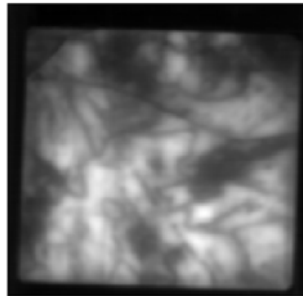
L2F0850 75 ms HSNR09



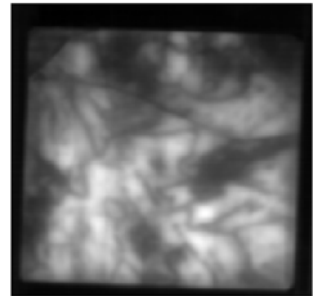
L2F0850 75 ms HSNR16



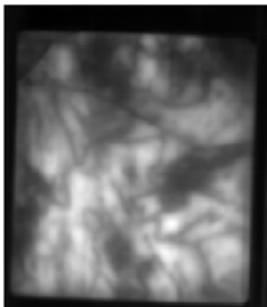
L2F0850 75 ms HSNR25



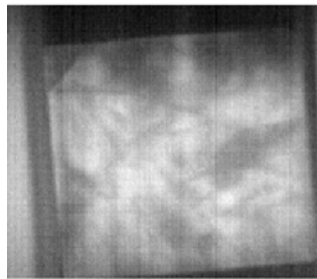
L2F0850 75 ms HSNR36



L2F0850 75 ms HSNR49



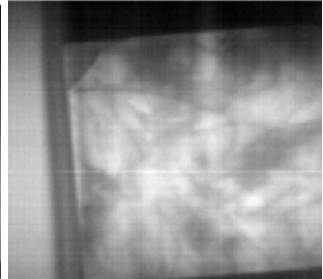
L3F0000 50 ms



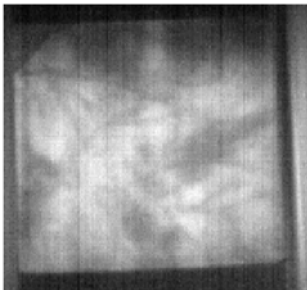
L3F0000 50 ms HSNR04



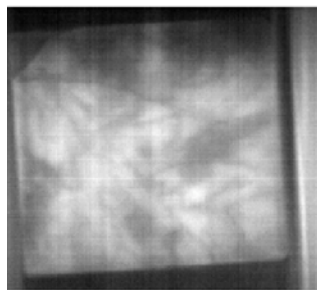
L3F0000 50 ms HSNR09



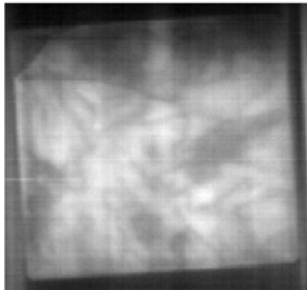
L3F0850 50 ms



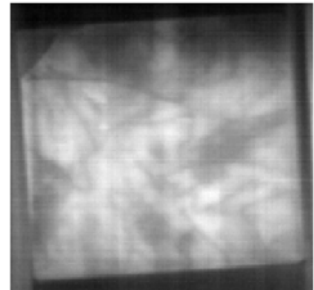
L3F0850 50 ms HSNR04



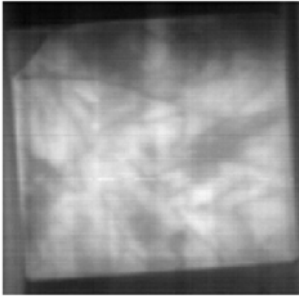
L3F0850 50 ms HSNR09



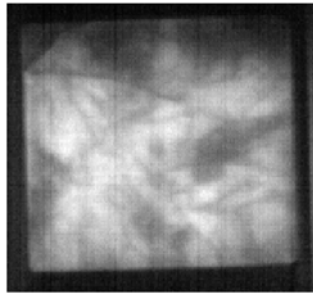
L3F0850 50 ms HSNR16



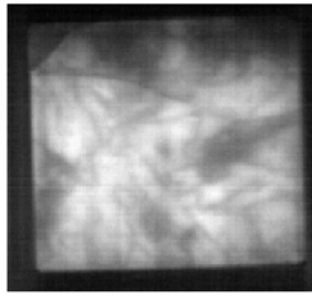
L3F0850 50 ms HSNR25



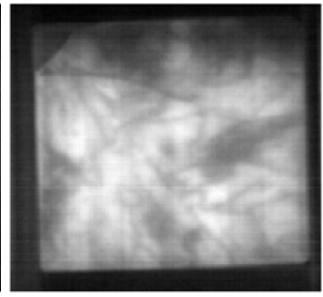
L3F1000 100 ms



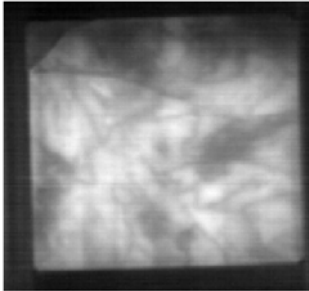
L3F1000 100 ms HSNR04



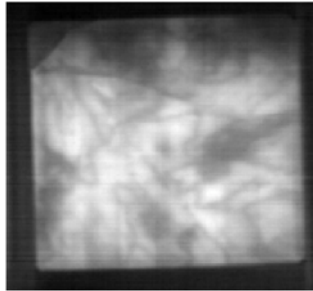
L3F1000 100 ms HSNR09



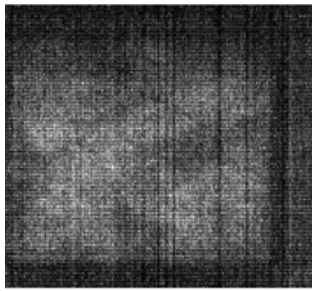
L3F1000 100 ms HSNR16



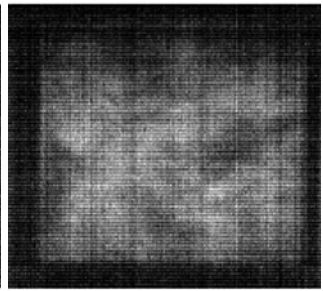
L3F1000 100 ms HSNR25



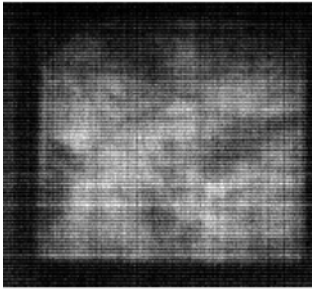
L3F1000 10 ms



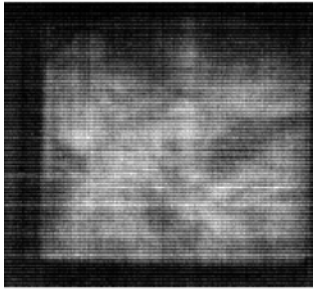
L3F1000 10 ms HSNR04



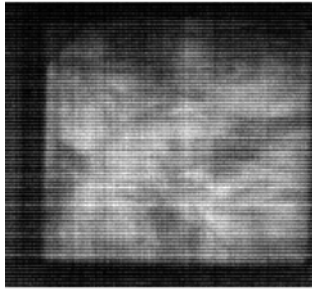
L3F1000 10 ms HSNR09



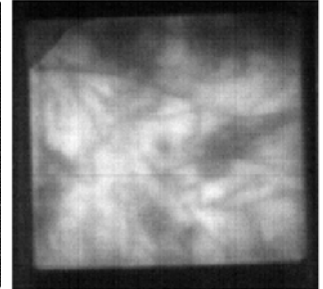
L3F1000 10 ms HSNR16



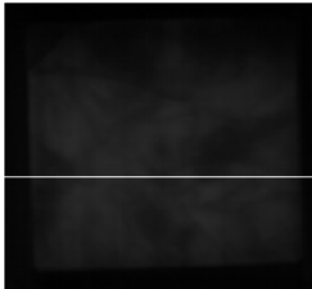
L3F1000 10 ms HSNR25



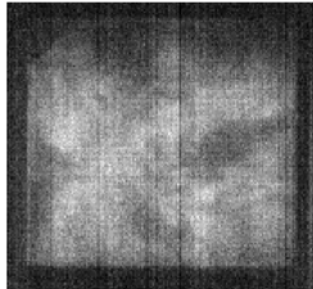
L3F1000 125 ms



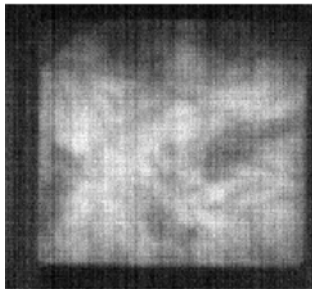
L3F1000 125 ms HSNR04



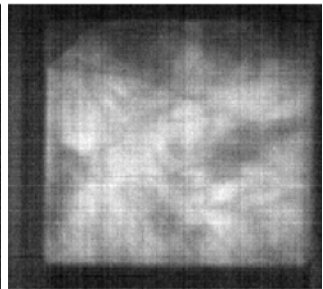
L3F1000 20 ms



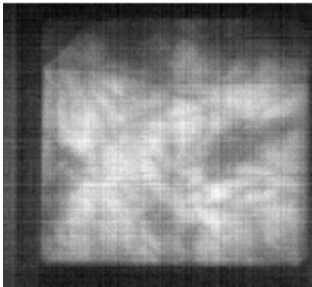
L3F1000 20 ms HSNR04



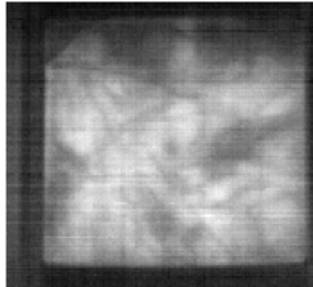
L3F1000 20 ms HSNR09



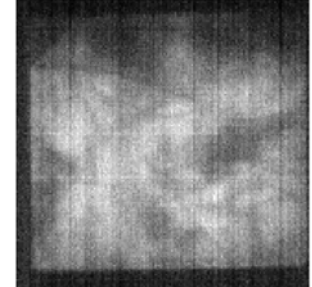
L3F1000 20 ms HSNR16



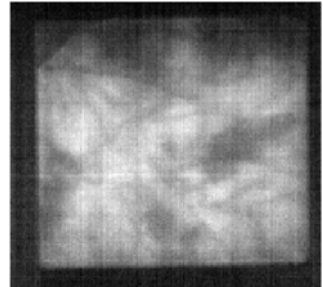
L3F1000 20 ms HSNR25



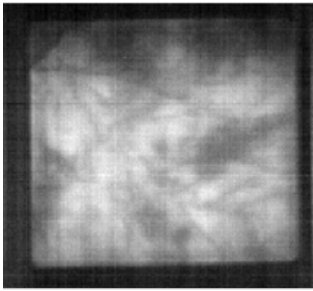
L3F1000 30 ms



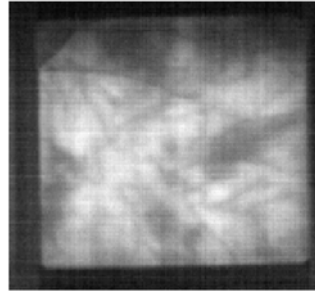
L3F1000 30 ms HSNR04



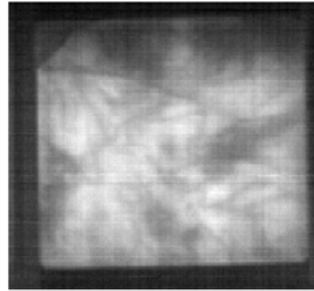
L3F1000 30 ms HSNR09



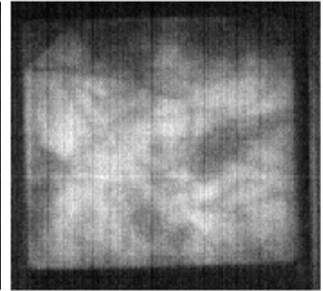
L3F1000 30 ms HSNR16



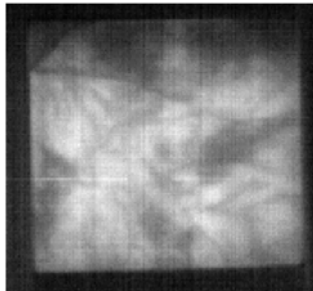
L3F1000 30 ms HSNR25



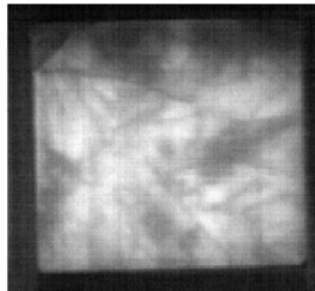
L3F1000 40 ms



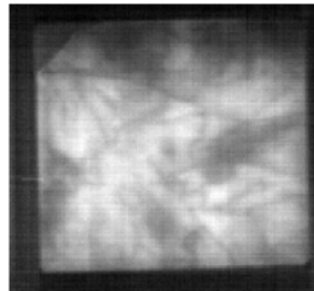
L3F1000 40 ms HSNR04



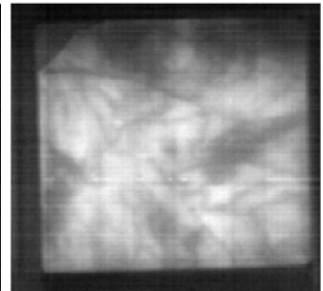
L3F1000 40 ms HSNR09



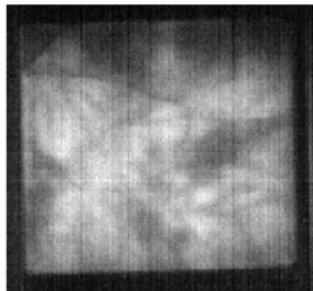
L3F1000 40 ms HSNR16



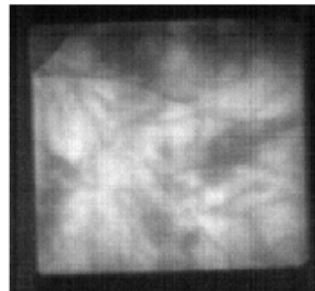
L3F1000 40 ms HSNR25



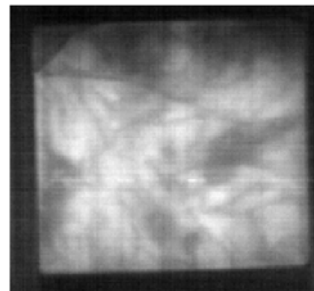
L3F1000 50 ms



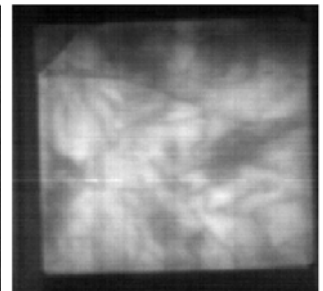
L3F1000 50 ms HSNR04



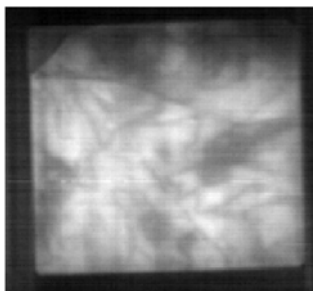
L3F1000 50 ms HSNR09



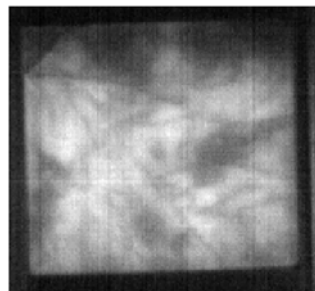
L3F1000 50 ms HSNR16



L3F1000 50 ms HSNR25



L3F1000 75 ms



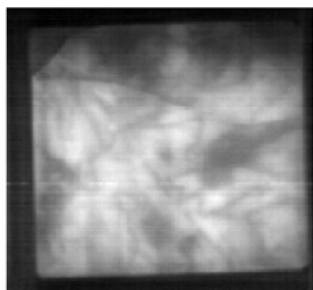
L3F1000 75 ms HSNR04



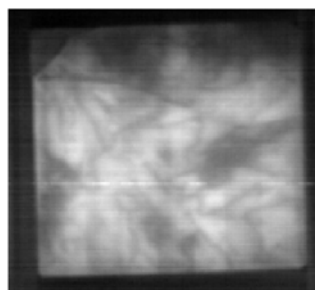
L3F1000 75 ms HSNR09



L3F1000 75 ms HSNR16



L3F1000 75 ms HSNR25



Referanseliste

- [1] Paul A. Tipler og Gene Mosca. *Physics for scientists and engineers with modern physics*. W.H Freeman and Company, åttende utgave, 2008. ISBN 0-7167-8964-7.
- [2] Godfrey Boyle. *Renewable Energy Power for sustainable future*. Oxford University Press, 2004. ISBN 0-19-926178-4.
- [3] Tomas Markvart. *Solar Electricity*. John Wiley and Sons, 2000. ISBN 0-471-98853-7.
- [4] James Newton. *Uncommon Friends: Life with Thomas Edison, Henry Ford, Harvey Firestone, Alexis Carrel, and Charles Lindbergh*. Mariner Books, 1987. ISBN 0-15-692620-2.
- [5] James William Rohlf. *Modern Physics from α to Z^0* . John Wiley & Sons, Inc, 1994. ISBN 0-471-57270-5.
- [6] Raymond A. Serway og John W. Jewett Jr. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Thomson Brooks / Cole, 6 utgave, 2004. ISBN 0-543-40949-0.
- [7] Martin A. Green. *Solar Cells Operating Principles Technology and System Applications*. The University of New South Wales, 1998. ISBN 0-85823-580-3.
- [8] Hugh D. Young og Roger A. Freedman. *Sears and Zemanskys University Physics With Modern Physics*. Addison–Wesley, tiende utgave, 2000. ISBN 0-201-70059-X.
- [9] Jeffrey L. Gray. The physics of the solar cell. I Antonio Luge og Steven Hegedus, redaktører, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, kapittel 3, side 61–112. John Wiley and Sons, Chichester, 2003. ISBN 0-471-49196-9.
- [10] Arnold Åbro. Øyet – zoologi, anatomi. http://www.snl.no/øyet/zoologi,_anatomi. Lest: 5. mars 2009.
- [11] V. L. Pisacane, Q. E. Dolecek, H. Malak og J. F. Dicello. End-to-end system test for solid-state microdosemeters. *Radiation protection dosimetry*, 140(4):309–318, Aug 2010. ISSN 0144-8420.
- [12] M A Green og M J Keevers. Optical-properties of intrinsic silicon at 300 K. *Progress in photovoltaics*, 3(3):189–192, May-Jun 1995. ISSN 1062-7995.

- [13] S. Rein. *Lifetime Spectroscopy — A method of defect characterization in silicon for photovoltaic applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. ISBN 3-540-25303-3.
- [14] Ignacio Tobías, Carlos del Cañizo og Jesús Alonso. Crystalline silicon solar cells and modules. I Antonio Lague og Steven Hegedus, redaktører, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, kapittel 7, side 255–306. John Wiley and Sons, Chichester, 2003. ISBN 0-471-49196-9.
- [15] Universitetet i Oslo. Bokmålsordboka. <http://www.dokpro.uio.no/ordboksoek.html>, 2010. Søkord: «luminescens» Lest: 17. mars 2010.
- [16] Gunnar G. Løvås. *Statistikk for universiteter og høyskoler*. Universitetsforlaget, andre utgave, 2004. ISBN 82-15-00224-2.
- [17] Sen M. Kuo og Woon-Seng Gan. *Digital signal processors Architectures, implementations and applications*. Pearsin Education International, 2005. ISBN 0-13-127766-9.
- [18] T. Trupke, R. A. Bardos, M. C Schubert og W. Warta. Photoluminescence imaging of silicon wafers. *Applied physics letters* 89, 2006.
- [19] Kjersti Grande. Characterization of silicon cast in a silicon nitride crucible. Masteroppgave, Universitetet for miljø- og biovitenskap, 2010.
- [20] Norsk Elektro Optikk. *HySpex Imaging Spectrometer User Manual 1.05*. 2008.
- [21] Standa. 8mt195 - long-travel motorized linear stage.
http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=259&prod=long-travel_motorized_linear_stage&print=1.
Lest: 24. juli 2010.
- [22] Vishay Semiconductors. High speed infrared emitting diode, 830 nm, GaAlAs.
<http://www.vishay.com/docs/84755/tshg8200.pdf>, 2008. Lest 17. februar 2010.
- [23] Vishay Semiconductors. Infrared emitting diode, 875 nm, GaAlAs.
<http://www.vishay.com/docs/81019/tsha520.pdf>, 2008. Lest 17. februar 2010.
- [24] Sinston Consulting, Inc. *User manual – WCT100 Photoconductance Tool*, 2003.
- [25] The Mathworks. *Matlabmanual*, 2010.