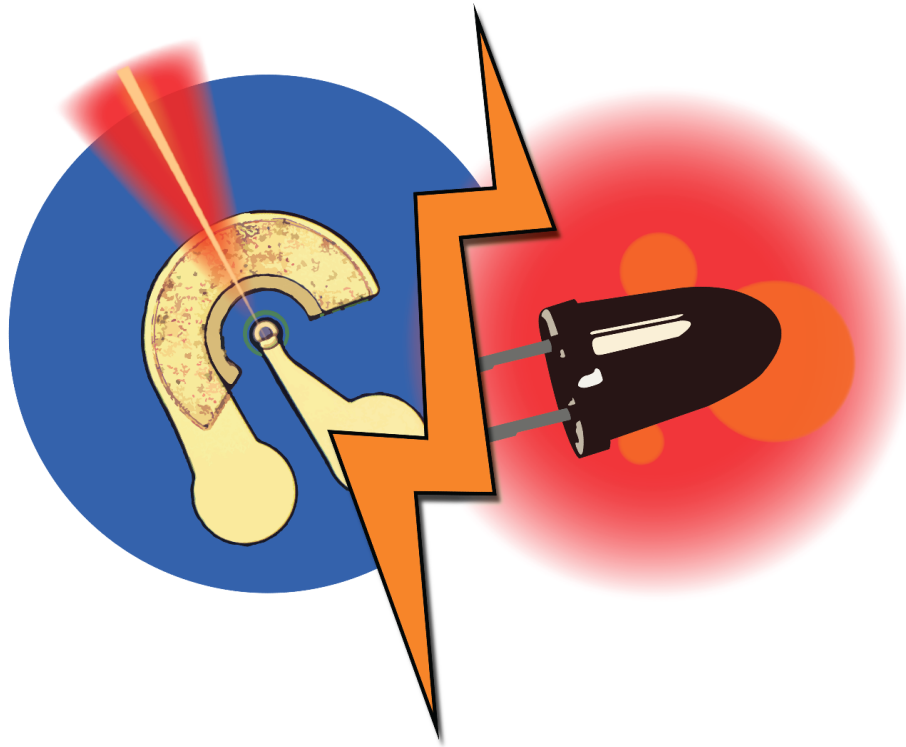




CHALMERS



Kriterier för att identifiera lasrar

En jämförande studie mellan LED och VCSEL

Kandidatarbete i Teknisk Fysik

Jacob Billvén
Sofia Danielson Damne
Theodor Hansson
Gustav Persson

Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2023
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2023

Kriterier för att identifiera lasrar

En jämförande studie mellan LED och VCSEL

Laser identification criteria

A comparison between LED and VCSEL

Jacob Billvén

Sofia Danielson Damne

Theodor Hansson

Gustav Persson



CHALMERS

Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2023

Kriterier för att identifiera lasrar
En jämförande studie mellan LED och VCSEL
Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

© Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap, 2023.

Handledare: Erik Strandberg och Åsa Haglund
Examinator: Per Lundgren, Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

Kandidatarbete 2023
Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Ett jämförande collage av en VCSEL (vänster) och LED (höger).

Skriven i L^AT_EX
Göteborg 2023

Laser identification criteria

A comparison between LED and VCSEL

Jacob Billvén, Sofia Danielson Damne, Theodor Hansson and Gustav Persson

Department of Microtechnology and Nanoscience

Chalmers University of Technology

Abstract

The classification of a light source sets the expectation of which qualities can be improved by further development, thus rendering it important to distinguish a laser from a LED. We have examined which optical properties that differ between 950 nm LEDs and 980 nm GaAs Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSEL:s) with the aim to present conditions that define the type of the light source.

The examination was done by measuring polarization, optical power, output spectrum and beam divergence. All parameters were studied as a function of the bias current flowing through the component. Clear differences were observed between the light sources, where the laser shows threshold current, polarized light, narrow linewidth and large narrowing of beam divergence when passing the threshold. The LED, on the other hand, does not have a threshold, does not show polarization, has a wide linewidth and has a constant beam divergence.

Keywords: VCSEL, LED, laser.

Kriterier för att identifiera lasrar

En jämförande studie mellan LED och VCSEL

Jacob Billvén, Sofia Danielson Damne, Theodor Hansson och Gustav Persson

Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

Chalmers Tekniska Högskola

Sammandrag

Klassificeringen av en ljuskälla sätter förväntningarna för vilka egenskaper som kan förväntas av fortsatt utveckling, vilket gör det viktigt att korrekt skilja en laser från en LED. Vi har undersökt vilka optiska egenskaper som skiljer 950 nm LED:ar från 980 nm GaAs Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasrar (VCSEL:ar), i syfte att presentera villkor för att identifiera en ljuskällas typ.

Detta utfördes genom att mäta polarisationsbeteende, optisk effekt, spektralfördelning samt stråldivergens. Parametrarna undersöktes som en funktion av ström genom komponenten. Tydliga skillnader uppvisades mellan ljuskällorna där lasern uppvisar tröskelström, polariserat ljus, smal linjebredd och kraftig minskning av stråldivergens då tröskeln passeras medan LED:en saknar tröskel, inte uppvisar bestämd polarisation, har en bred linjebredd och inte ändrar stråldivergens.

Nyckelord: VCSEL, LED, laser.

Förord

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare som har stöttat och gett oss bra tips. Åsa, som korrekturläst och hittat en hel massa stavfel, och Erik, som utan sinande taggnivå svarat på frågor, hämtat nätaggregat, tipsat om artiklar att läsa, gett ovärderlig feedback på vårt första utkast och allmänt sett till att vi har haft det bra. Ett extra stort tack till Erik och dina kunskaper inom atomslöjd och för att vi fått använda dina VCSEL:ar. Vi vill även tacka vår adopterade handledare Alexander som tipsat om GPIB-kommandon, sett till att labbet haft allt materiel vi behövt, från banankablar till skyddsglasögon, och lärt oss stå upp mot andra labbs stölder av vår labbutrusning. Slutligen vill vi rikta ett tack till övriga i optoelektronik-gänget som bidragit till ett väldigt trevligt arbetsklimat.

Författarna, Göteborg, maj 2023

Innehåll

1	Bakgrund	1
1.1	Syfte	2
1.2	Problemformulering	2
1.3	Avgränsningar	2
2	Teori	3
2.1	Spontan emission, stimulerad emission och absorption	3
2.2	LED:ens uppbyggnad	4
2.3	VCSEL:ns uppbyggnad	4
2.4	Moder i VCSEL:ar	6
2.5	LED:ens optiska uteffekt och polarisation	7
2.6	VCSEL:ns optiska uteffekt och polarisation	7
2.7	LED:ens våglängdsspektrum	8
2.8	VCSEL:ns våglängdsspektrum	9
2.9	Strålprofilers utseende och mått	10
3	Metod	11
3.1	Gemensamt för samtliga uppställningar	11
3.2	IPV-undersökning	12
3.3	Spektrumundersökning	13
3.4	Stråldivergensundersökning	14
3.5	Pythonprogram	14
4	Resultat och diskussion	15
4.1	Optisk uteffekt	15
4.2	Polarisation	16
4.3	Våglängdsspektrum	17
4.4	Stråldivergens	19
4.5	Sammanfattning av resultat	20
5	Slutsatser	21
5.1	Exempel på tvetydiga lasrar	21
5.2	Förslag på vidare forskning	21
	Litteratur	23

1

Bakgrund

Genom historiens gång har människan använt många olika källor av artificiellt ljus. Från första brasan 300.000 år sedan, till stearinljuset för 3000 år sedan och glödlampan för 150 år. Idag har forskning kring halvledarmaterial lett till ytterligare ett stort steg i denna utveckling genom Light Emitting Diode (LED) [1]. Själva ljuset bildas genom olika processer för de olika ljuskällorna. För brasan, stearinljuset och glödlampan genereras ljuset genom svartkroppstrålning. LED:ens ljus däremot uppstår genom en process som kallas spontan emission, som uppstår vid elektronövergångar mellan olika energinivåer [2].

Utöver detta kan man utnyttja stimulerad emission för att producera ljus. Mekanismen är lik den spontana emissionen, men sker när en foton interagerar med en exciterad elektron, som i sin tur ger upphov till att en identisk foton bildas. I naturen är spontan emission mycket mer sannolik än stimulerad emission, men 1960 lyckades T. Maiman [3] konstruera den första ljuskällan baserad på stimulerad emission, en laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

För att stimulerad emission ska förekomma i större omfattning än den spontana krävs två faktorer. Dels optisk återkoppling, som uppnås genom att speglar innesluter ljuset inuti lasern. Dels populationsinversion, som uppnås genom att elektriskt pumpa lasern med energi så att fler elektroner är i exciterat- än i grundtillstånd [4, s. 147]. Sedan 1960 har utvecklingen gått snabbt och idag kan lasrar tillverkas på flera olika sätt. En viktig typ av lasrar är de tillverkade i halvledarmaterial. Halvledare leder ström sämre än metaller, men bättre än isolatorer. De är även mycket känsliga för orenheter i materialet, som kan påverka ledningsförmågan drastiskt [4, s 29].

Redan 1962 påvisades att lasring kan uppnås i halvledarmaterialet galliumarsenid (GaAs) [5]. De första halvledarlasrarna var kantemitterande, men ett stort steg i utvecklingen togs år 1979 då den första Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL), vilken emitterar ljus från chippets yta, konstruerades [6]. VCSEL:ar har flera fördelar över kantemitterande lasrar. Bland annat kan de testas innan montering, vilket sänkt tillverkningskostnaden [4, s. 179]. Idag har VCSEL:n flera viktiga tillämpningar, till exempel för snabb dataöverföring inom optisk kommunikation [7], som positions- och hastighetssensor i bland annat datormöss [8], och i energieffektiva laserskrivare [9]. År 2020 uppskattades värdet på VCSEL-marknaden till nio miljarder dollar och den har vuxit exponentiellt på senare år i och med den stora marknaden av lasrar för ansiktigenkänning [10].

Att optiskt karakterisera ljuskällor som LED:ar respektive lasrar är viktigt för att kunna förbättra deras prestanda men även för att kunna välja den optimala ljuskällan för en specifik tillämpning. Dessutom skiljer sig förväntningarna på hur de olika ljuskällorna kan vidareutvecklas och vilka egenskaper som kan erhållas. En LED som klassats som laser ger alltså falska indikationer på vilka egenskaper som kan erhållas vid fortsatt utveckling. Inom forskarvärlden har nyligen frågan kring vilken optisk karakterisering som görs aktualiserats då tvetydigheter uppstått kring nya publikationer, som hävdar att de konstruerat en ny sorts laser men endast lagt fram svaga bevis [11]. Med bakgrund i detta har den vetenskapliga tidskriften Nature Photonics tagit fram en checklista [12], som beskriver olika optiska egenskaper som en laser behöver uppvisa för att Nature Photonics skall publicera artikeln.

1.1 Syfte

Syftet med kandidatarbetet var att studera skillnaden i optiska egenskaper för LED och laser. För att studera skillnaderna utvecklades ett Pythonprogram, som styrde de instrument som behövdes för att mäta på de olika ljuskällorna.

1.2 Problemformulering

Undersökningen ska identifiera de optiska skillnaderna mellan VCSEL och LED. Arbetet utgick primärt från checklistan för att identifiera lasrar utgiven av Nature Photonics [12] med målet att utvärdera respektive punkts relevans och föreslå förändringar som förtydligar vilka egenskaper som ska ses hos respektive ljuskälla. Nedan följer ett utdrag ur checklistan, översatt till svenska av författarna.

- **Tröskel** Plottar av komponentens uteffekt i förhållande till pumpeffekt över ett brett intervall av värden, som indikerar en tydlig tröskel.
- **Linjebreddsavsvalning** Plottar av spektral effekttäthet för emissionen vid pumpeffekter under, runtom och ovanför tröskeln, som indikerar en tydlig linjebreddsavsvalning vid tröskeln. Upplösningen hos den använda spektrometern bör redovisas.
- **Koherent emission** Mätningar av koherens och/eller polarisation av emissionen
- **Strålsprofil** Bild och/eller mätningar av rumslig form och profil av emissionen, som visar en väldefinierad stråle ovanför tröskeln.

Utöver dessa punkter finns krav på en teoretisk analys och varför andra förklaringar kan förkastas. Dessutom bör statistik redovisas för hur många komponenter som har testats.

1.3 Avgränsningar

De egenskaper som skulle undersökas begränsades till de i listan i Avsnitt 1.2. Undersökningen gjordes endast på LED och VCSEL:ar tillverkade av GaAs och med infraröd emission eftersom vi endast hade tillgång till GaAs VCSEL:ar. Samtliga VCSEL:ar var bottenemitterande och tillverkade av doktorand Erik Strandberg på Avdelningen för fotonik på Chalmers, medan samtliga LED:ar var så kallade högeffekt-LED:ar från tillverkaren ams OSRAM. Studien var kvalitativ snarare än kvantitativ. Endast ett litet antal komponenter, för vissa mätningar bara en komponent av varje typ, undersöktes. Detta för att reducera tidsåtgången för mätningarna.

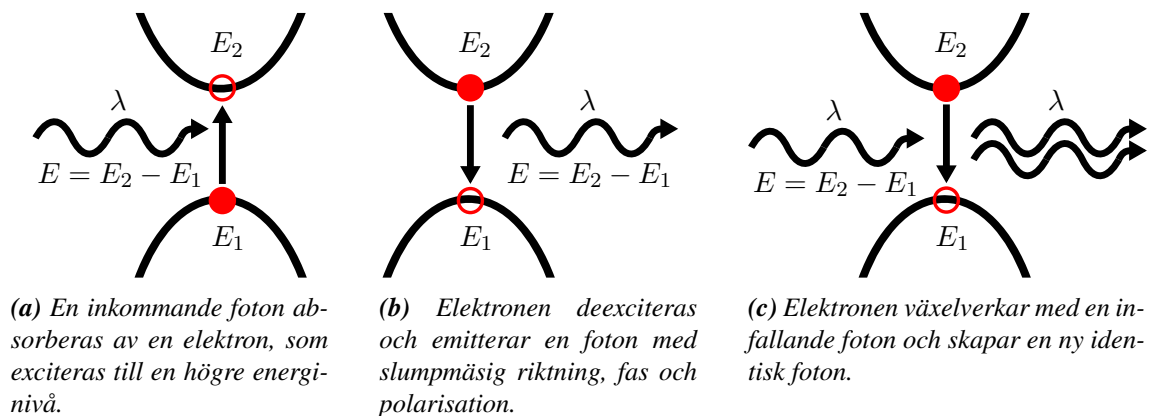
2

Teori

I detta avsnitt presenteras den teori som behövs för att förstå rapportens experimentella undersökningar samt resultat. Först, i Avsnitt 2.1, presenteras de centrala begreppen absorption, spontan emission samt stimulerad emission. Därefter beskriver Avsnitt 2.2 hur en LED är uppbyggd för att stråla genom spontan emission och Avsnitt 2.3 förklarar hur en VCSEL konstrueras för att främst avge stimulerad emission. Därefter analyseras aspekterna listade i problemformuleringen (Avsnitt 1.2) och deras teoretiskt förväntade karakteristik genom att Avsnitt 2.5 och 2.6 beskriver optisk uteffekt och polarisation i LED samt VCSEL, Avsnitt 2.7 och 2.8 beskriver våglängdsspektrumens utseende, och Avsnitt 2.9 beskriver strålprofilers utseende och mått.

2.1 Spontan emission, stimulerad emission och absorption

Att ljus kan emitteras till följd av energiovergångar i halvledarmaterial är en fundamental princip för både LED och laser [4, kap. 3, 5]. Halvledarmaterial karakteriseras av bandstrukturen för elektronernas energinivåer. Valensbanden, där elektronerna befinner sig i sina grundtillstånd, och ledningsbanden, dit elektronerna kan exciteras, överlappar inte som i en metall men är inte heller så långt åtskilda som i en isolator. Istället separeras de av ett relativt litet bandgap (cirka 0,5 eV till 2 eV). Detta går att utnyttja för att skapa ljus genom att elektroner exciteras, oftast genom en elektrisk ström, till ledningsbandet. Därefter deexciteras de till valensbandet under emission av en foton. Detta uppnås effektivast med halvledarmaterial med direkta bandgap, såsom GaAs, och kräver att halvledaren dopas till en diod.



Figur 2.1: De mest sannolika processerna för växelverkan mellan en elektron och en foton, i en halvledare. Dessa är absorption (a), spontan emission (b) och stimulerad emission (c). E_1 motsvarar valensbandets högsta energinivå och E_2 motsvarar ledningsbandets lägsta energinivå.

Som illustreras i Figur 2.1 uppstår ljus i en halvledare genom att en elektron deexciteras från ledningsband till valensband under emission av en foton med energi motsvarande elektronens

energiskillnad. Detta kan ske genom två olika processer: spontan och stimulerad emission. Motsatsen till emission är absorption, vilket sker när en elektron i valensbandet absorberar en foton och exciteras upp till ledningsbandet.

Spontan emission, som visas i Figur 2.1b, sker utan yttre påverkan. Fotonen som emitteras har en slumpmässig fas, frekvens och polarisation. Övergångshastigheten $R_{\text{spontan}}(\hbar\omega)$, alltså antal emitterade fotoner med energi $\hbar\omega$ per tidsenhet, för spontan emission är

$$R_{\text{spontan}}(\hbar\omega) = A_{21} \cdot (f_n(E_2) \cdot (1 - f_p(E_1))), \quad (2.1)$$

där A_{21} är Einsteins A-koefficient, $f_n(E_2)$ är ockupationssannolikheten för en elektron med energi E_2 i valensbandet och $1 - f_p(E_1)$ är ockupationssannolikheten för ett hål med energi E_1 i ledningsbandet. E_1 samt E_2 uppfyller $E_2 - E_1 = \hbar\omega$, vilket motsvarar den emitterade fotonens energi [4, s. 81]. Spontan emission är alltså proportionell mot både antal elektroner i ledningsbandet och antal hål i valensbandet.

Figur 2.1c visar den stimulerade emissionen, som initieras av elektronens deexcitering av en inkommande foton med energi som matchar skillnaden mellan energinivåerna. Fotonen som sänds ut är en exakt kopia av den första och har alltså samma energi, fas, polarisation och riktning [4, s. 59]. Då stimulerad emission och absorption är varandras motsatser är det relevant att studera nettoövergångshastigheten $R_{\text{stimulerad}} - R_{\text{absorption}}$. Denna kan härledas till

$$R_{\text{stimulerad}}(\hbar\omega) - R_{\text{absorption}}(\hbar\omega) = B \cdot (f_n(E_2) - f_p(E_1)) \cdot \rho(\hbar\omega), \quad (2.2)$$

där B är Einsteins B-koefficient och $\rho(\hbar\omega)$ är fotondensiteten. Ur ekvationen framgår att $R_{\text{stimulerad}} > R_{\text{absorption}}$ endast om $f_n(E_2) > f_p(E_1)$, vilket kallas populationsinversion och innebär att det är större sannolikhet att en elektron är i ledningsbandet än valensbandet.

2.2 LED:ens uppbyggnad

En LED är en halvledarkomponent som består av en PIN-övergång. I det P-dopade området finns ett överskott av hål, medan det N-dopade området har ett överskott av elektroner jämfört med det odopade materialet. Dopningen gör att när en spänning läggs över övergången kommer elektroner flöda från N-området till P-området. I det odopade I-området i mitten deexciteras elektronerna över halvledarmaterialets bandgap. Genom deexcitationen minskar deras energi och överskottsenergin avges i form av ljus. Spontan emission dominerar alltså i en LED [4, s. 102].

För att förstå LED-spektrumens form kan intensitetsfördelningen $I(\hbar\omega)$ härledas från rekombinationshastigheten $R(\hbar\omega)$. Det görs genom att anta att detaljerad jämvikt gäller, alltså att lika många fotoner emitteras (spontan eller stimulerat) som absorberas, samt att överskottet av laddningsbärare är relativt lågt, så att deras fördelning kan beskrivas som Boltzmannfördelningar. Slutsatsen blir då att

$$I(\hbar\omega) \propto \sqrt{\hbar\omega - E_g} \cdot e^{-\frac{\hbar\omega}{k_B T}}, \quad (2.3)$$

för laddningsbärarens grundtillståndsenergi E_g , temperaturen T och Boltzmanns konstant k_B och ger formen för LED-spektrumet [4, s. 128].

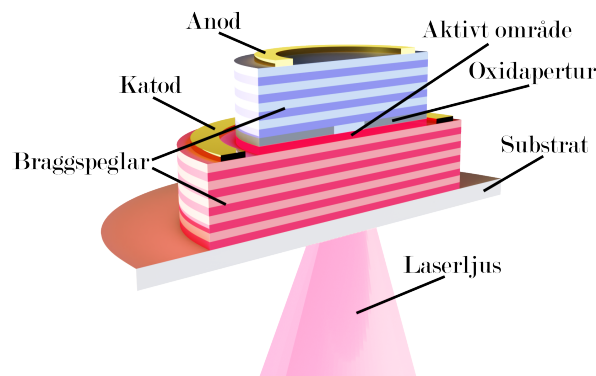
2.3 VCSEL:ns uppbyggnad

Precis som LED:en består VCSEL:n av en PIN-övergång. Till skillnad från LED:en har dock VCSEL-konstruktionen optimerats så att stimulerad emission dominerar över spontan.

I Figur 2.2 visas en skiss över en typisk VCSEL. Komponenten tillverkas genom att växa lager av halvledarmaterial med olika dopning på ett substrat och sedan etsa bort överflödigt material [13, kap. 6]. Notera att den redovisade VCSEL:n, precis som de komponenter som undersökts i denna studie, är bottenemitterande och alltså sänder ut ljus genom substratet. Via anoden och katoden leds en elektrisk ström som tillför den energi som krävs för att uppnå populationsinversion i det aktiva området. Detta sker dock bara under den del som inte blockeras av oxidaperturen på grund av att aperturen är elektriskt isolerande. För att dessutom uppnå den höga fotondensitet som möjliggör att stimulerad emission kan dominera skapas optisk återkoppling genom Braggspeglar på båda sidor av det aktiva området. Hela resonatorn, alltså det aktiva området samt speglarna, kallas kaviteten. Spegelarna ger upphov till stående vågor för de våglängder som interfererar konstruktivt och alltså återgår till samma fas efter att ha propagerat fram och tillbaka genom spegeln, vilket motsvarar att

$$\lambda = \frac{2Ln_{\text{eff}}}{m}, \quad (2.4)$$

där L är det aktiva områdets längd, n_{eff} det effektiva brytningsindexet vågen upplever och m ett heltal. Detta innebär att den optiska längden Ln_{eff} ska vara en multipel av $\lambda/2$, alltså ett heltal antal halva våglängder.



Figur 2.2: Schematisk ritning över ett VCSEL-tvårsnitt, totalt $21\ \mu\text{m}$ brett och $8\ \mu\text{m}$ högt. VCSEL:n är uppbyggd på ett substrat och består av ett aktivt område, cirka $15\ \text{nm}$ högt, mellan två braggspeglar. Ström tillförs VCSEL:n genom två guldkontakter, anod och katod. Oxidaperturen avgör hur de transversella moderna guidas genom att ha ett lägre brytningsindex i centrum jämfört med en omgivande annulus. Ljuset emitteras genom substratet, då den undre braggspegeln har mindre reflektion än den övre.

Hur den optiska förstärkningen beror på ljusets frekvens kan beskrivas med förstärkningskoefficienten, $g(\hbar\omega)$. Utifrån Fermis gyllene regel kan den härledas till

$$g(\hbar\omega) \propto \frac{1}{\hbar\omega} N_{\text{red}}(\hbar\omega) (f_n(E_2) - f_p(E_1)), \quad (2.5)$$

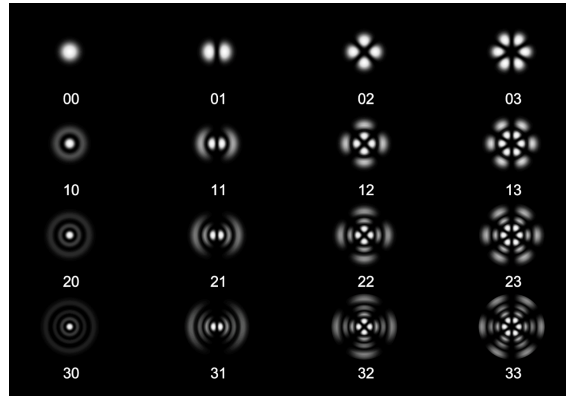
där $N_{\text{red}}(\hbar\omega)$ är tillståndstätheten [4, s. 78]. Notera i detta uttryck att tecknet på g bestäms av faktorn $(f_n(E_2) - f_p(E_1))$. Optisk förstärkning erhålls alltså bara i frekvensområdet där populationsinversion uppnås, medan absorption dominerar för övriga frekvenser. I VCSEL:ar är ljusets utbredning generellt större än det aktiva området i kaviteten, alltså den region i komponenten där optisk förstärkning erhålls. Istället för g blir då den modala optiska förstärkningen, g_m , relevant. Den definieras, nedan för polarisationen i y -led, som

$$g_m = \frac{\iint_{\text{aktiva området}} I_y^2(x,y) dx dy}{\iint_{\text{överallt}} I_y^2(x,y) dx dy} \cdot g \quad (2.6)$$

och är alltså g skalad med en faktor som beskriver hur stor del av det optiska fältet som överlappar med det aktiva området.

2.4 Moder i VCSEL:ar

I denna kontext är en mod en optisk intensitetsfördelning i rummet, som är en egenlösning till vågekvationen för elektromagnetiska vågor med laserkavitets olika brytningsindex som randvillkor [13, s. 15]. Longitudinella moder, längs ljusets propagationsriktning, bestäms av avståndet L mellan speglarna och motsvarar lösningar till Ekvation 2.4 för olika heltal m . För en viss longitudinell mod finns generellt flera olika transversella moder med olika utbredning i planet normalt mot propagationsriktningen, se Figur 2.3. Varje mod är också degenererad på grund av att samma fördelning förekommer i två ortogonala riktningar i planet. Notera i figuren särskilt moden 00 som har en gaussisk form och den minsta spatiala utbredningen. Den kallas därför den fundamentala moden. De olika transversella moderna upplever olika effektivt brytningsindex n_{eff} beroende på hur stor del av dem som överlappar med aperturen. Detta leder till att de har olika våglängd, i enlighet med Ekvation 2.4.



Figur 2.3: Olika transversella moder (Laguerre-Gauss-moder) som är möjliga i en VCSEL. 00 motsvarar den fundamentala moden. Från [14], BY-SA 4.0.

För att en mod ska lasra är en grundförutsättning att moden emitterar inom det våglängdsområde där $g(\hbar\omega) > 0$. I VCSEL:ar uppnås detta vanligtvis endast för en longitudinell mod, då komponentens korta kavitet leder till stort avstånd för olika moder (motsvarande olika heltal m i Ekvation 2.4). Enbart $g(\hbar\omega) > 0$ är dock inte ett tillräckligt krav för lasring, utan modens förstärkning måste dessutom övervinna förluster från absorption i materialet samt från speglarna i kavitets ändar. Detta brukar kallas amplitudkravet och innebär tröskelvärde $g_{m,t}$ för den modala förstärkningen g_m enligt

$$g_{m,t} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (2.7)$$

där α_i är halvledarmaterialets förlustkoefficient och R_1 samt R_2 är reflektiviteten hos speglarna. Notera särskilt att kravet gäller den modala förstärkningen och alltså skiljer sig för de olika transversella moderna som hör till samma longitudinella mod. Särskilt gäller att moder med större transversell utbredning överlappar mindre med det aktiva området och alltså har lägre modal

förstärkning (se Ekvation 2.6). Därför kommer de börja lasra först vid högre strömmar, om ens alls.

I VCSEL:ar är det möjligt att bestämma hur många moder som kan lasra genom att välja storlek på den oxidapertur som placeras i ett av lagerna i den övre Braggspegeln, som illustreras i Figur 2.2. Dels är aperturen elektriskt isolerande, vilket begränsar storleken på laserns aktiva område, dels har den lägre brytningsindex, vilket begränsar ljusets spatiala utbredning då det guidas till området med det högsta brytningsindexet [13, s. 12-13]. Med en tillräckligt liten apertur uppnås singelmod-karakteristik, vilket innebär att enbart LP_{00} moden i Figur 2.3 lasrar. Detta leder till en mycket koherent stråle samt minskar bredden på våglängdsspektrumet men begränsar också den maximala uteffekten [15]. Detta då VCSEL:ars optiska uteffekt begränsas av mindre aperaturstorlekar (se Avsnitt 2.3). Detta beror på att dessa har en högre resistans, vilket resulterar i inducerad självuppvärmning på grund av den höga strömmen [15].

2.5 LED:ens optiska uteffekt och polarisation

När elektrisk ström skickas genom en LED utvecklas effekt av två olika mekanismer. En del emitteras som optisk uteffekt och en annan avges som värmeeffekt. Vid ökande ström växer värmeeffekten vilket leder till en högre temperatur i PIN-övergången och den optiska effekten avtar som följd av temperaturökningen. För högeffekts-LED:ar ökar den optiska uteffekten först linjärt med ökande ström, men till följd av temperaturökningen börjar den optiska uteffekten avta exponentiellt [16]. Detta beteende, som också leder till att den optiska uteffekten har ett maximum, kallas ”rollover” eftersom effekten ”rullar över” ett krön.

Ytterligare bör LED:ens strålning vara opolariserat, det vill säga stråla lika mycket i samtliga polarisationsriktningar. Detta kommer från att spontan emission inte har någon föredragen polarisation.

2.6 VCSEL:ns optiska uteffekt och polarisation

I en halvledarlaser dominerar spontan emission vid låga strömmar under tröskeln, vilket ger en spektralt bred, inkoherent emission med stor divergens. Om en högre ström förs genom lasern kommer uteffekten från spontan emission att öka. Så länge strömmen inte är stor nog att övervinna förluster orsakade av flyende fotoner och interna optiska förluster, är dock den optiska uteffekten fortsatt låg.

Vid tröskelströmmen balanseras förlusterna av resulterande optisk förstärkning och tröskelförstärkning (se Ekvation 2.7) uppnås. Överskottet av exciterade elektroner leder till tillräckligt mycket stimulerad emission för att den koherenta fotondensiteten ska börja öka. Detta resulterar i en snabbt ökande optisk uteffekt, där emissionen är koherent med ett smalt emissionspektrum. En självreglerande process håller koncentrationen av laddningsbärare och optisk förstärkning vid sina tröskelvärden. Den koherenta optiska uteffekten ökar därmed snabbt med ökande ström ovanför tröskeln [4].

Vid tillräckligt hög ström ovanför tröskeln eller vid ökande omgivningstemperatur kommer en rollover att inträffa, vilket innebär att den optiska effekten inte längre är proportionell mot strömmen utan istället avtar. Denna avvikelse från den linjära ökningen av optisk uteffekt brukar främst tillskrivas självuppvärmning på grund av den höga strömmen (se Avsnitt 2.4).

En VCSEL:s polarisationsorientering är, på grund av rotationssymmetrin av kaviteten, instabil. Orienteringen av polarisationen skiljer sig dels mellan olika VCSEL:ar men kan även ändras under drift [17]. Denna förändring av polarisationens orientering, kan förklaras av en process som kallas polarisationsväxling. För olika strömmar genom lasern är olika linjärt polariserade moder

stabila [18]. Detta innebär att när strömmen genom lasern ökas kommer den byta polarisation allt eftersom nya moder blir stabila.

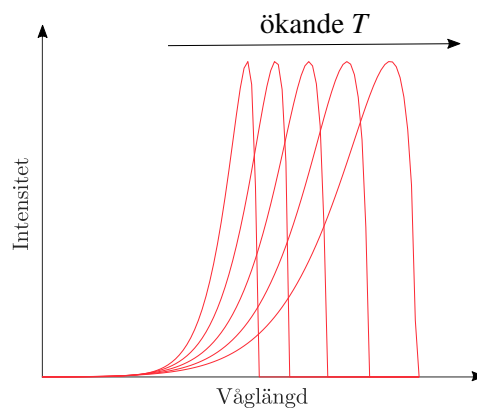
Vid den första polarisationsväxlingen sker i princip ett komplett utbyte av optisk uteffekt mellan de två polarisationerna. Den första högre ordningens mod är generellt ortogonalt polariserad mot den fundamentala. Detta innebär att då strömmen blir hög nog, genomgår både den fundamentala moden och den första ordningens transversella mod polarisationsväxling samtidigt. Följdaktigen börjar den första ordningens transversella mod att lasra [17]. Om strömmen fortsätter att öka blir fler högre ordningens transversella moder tillgängliga. Detta kan resultera i nya övergångar till dessa moder eller till kombinationer av dem. Då även dessa moder kan uppvisa polarisationsväxling, fortsätter polarisationens orientering att variera [18].

2.7 LED:ens våglängdsspektrum

Som tidigare nämnts kan den spontana emissionen från en LED modelleras med intensitetsfördelningen $I(\hbar\omega)$ i Ekvation 2.3, vars utseende vid olika temperaturer visas i Figur 2.4. Bredden på $I(\hbar\omega)$ då intensiteten minskat till hälften av maxvärdet blir då

$$\Delta(\hbar\omega) = 1,8k_B T \quad (2.8)$$

från vilken det framgår att med ökande temperatur kommer spektrumets bredd öka [4, s. 129]. Temperaturökningen beror bland annat på att effekten genom LED:en fördelas mellan optisk uteffekt samt värme. Fysikaliskt kan breddningen förstås genom att ökande temperatur eller ström leder till att fler elektroner exciteras, vilket leder till att bredare områden i valens- och ledningsbanden ockuperas av hål respektive elektroner. Det leder till att ljus emitteras över ett bredare våglängdsintervall, då dess våglängd motsvarar energiskillnaden mellan hålet och elektronen som rekombineras.

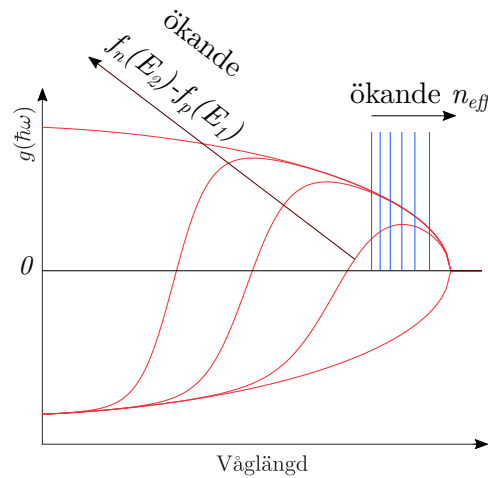


Figur 2.4: Figuren visar den teoretiska normaliserade intensitetsfördelningen vid olika temperaturer. Fördelningen kommer från Ekvation 2.3 och bandgapets temperaturberoende är modellerat enligt [19]. Spektrumet breddas och våglängden ökar vid högre temperatur.

Förutom att spektrumet breddas, noteras det i Figur 2.4 att spektrumet skiftas mot längre våglängder. Detta beror på att bandgapet E_g minskar med ökande temperatur, till följd av att elektronernas interaktion med gittret förändras [19]. Notera i Ekvation 2.3 att bandgapet uppträder i $I(\hbar\omega)$ i faktorn $\sqrt{\hbar\omega - E_g}$ och alltså motsvarar en undre gräns för ω eller en ekvivalent övre gräns för λ .

2.8 VCSEL:ns våglängdsspektrum

VCSEL:ars våglängdsspektrum ser olika ut beroende på hur mycket ström som flyter genom dem. Vid låg ström, innan tröskelförstärkning uppnås, kommer den optiska uteffekten framförallt från spontan emission. Dock är det möjligt att, till skillnad från i LED-spektrumet, observera intensitetstoppar till följd av interferens mellan kaviteten:s speglar. Vid högre ström bestäms istället våglängdsspektrumet av vilka moder som lasrar. Mer ström ökar populationsinversionen, vilket leder till att förstärkningskoefficienten, $g(\hbar\omega)$, i Ekvation 2.5 ökar. Detta illustreras med rött i i Figur 2.5. I en multimod-VCSEL leder det till att fler moder upplever tillräckligt hög modal förstärkning, g_m , i Ekvation 2.6 för att uppnå kravet på tröskelförstärkning i Ekvation 2.7. Dessutom flyttas modernas resonansvåglängd, se Ekvation 2.4, med ökande ström, på det sätt som illustreras med blått i Figur 2.5. Den ökande strömmen, som leder till ökande temperatur, leder i sin tur till minskande bandgap och ökande effektivt brytningsindex, n_{eff} [20].



Figur 2.5: I rött visas den teoretiska förstärkningskoefficienten $g(\hbar\omega)$ från Ekvation 2.5 vid olika grad av populationsinversion $f_n(E_2) - f_p(E_1)$. I blått visas hur den fundamentala modens resonansvåglängd ($m = 1$ i Ekvation 2.4) rödschiftas med ökande temperatur, på grund av ökande brytningsindex.

Ett emissionsspektrums bredd, ofta kallat linjebredd, kan definieras på olika sätt beroende på sammanhang. För VCSEL:ar, som kan ha intensitetstoppar vid flera olika våglängder används istället RMS-spektralbredden [13], då den bäst fångar faktumet att olika transversella moder lasrar vid olika våglängder. RMS-spektralbredden erhålls genom att räkna ut den viktade medelvåglängden

$$\lambda_{\text{mean}} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_{\text{tot}}} \lambda_i, \quad (2.9)$$

där summan går över samtliga våglängder λ_i vid vilka den spektrala optiska effekten P_i uppmätts och $P_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n P_i$ är den totala effekten. Från λ_{mean} beräknas därefter RMS-spektralbredden som

$$\Delta\lambda_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_{\text{tot}}} (\lambda - \lambda_{\text{mean}})^2}. \quad (2.10)$$

2.9 Strålprofilers utseende och mått

Strålprofilen för en ljusstråle är den spatiala intensitetsfördelning som kan observeras i ett tvärsnitt av strålen. Strålen karaktäriseras även av sin divergensvinkel eftersom intensitetsfördelningen i ett tvärsnitt inte beskriver hur fördelningen förändras vid propagation. För en laser bör divergensvinkeln vara mycket liten, på grund av att den stimulerade emissionen producerar likadana fotoner med samma vågvektor. Stråldivergensen ökar dock för mindre utgångsapertur vilket påverkar VCSEL:arna kraftigt på grund av deras lilla storlek [21].

För en lysdiod erhålls ingen nämnvärd kollimering av ljuset på grund av den spontana emissionen. Däremot krävs extra utkopplingsstrukturer för att öka ljusutsläppet, som annars är litet på grund av förluster i gränsytan mellan GaAs och luft i form av total intern reflektion [4, s. 132]. Dessa strukturer, ofta i form av en kapsel av epoxy, fokuserar också ljuset till olika grad beroende på utformning. Detta gör att divergensvinkeln varierar stort mellan olika lysdioder.

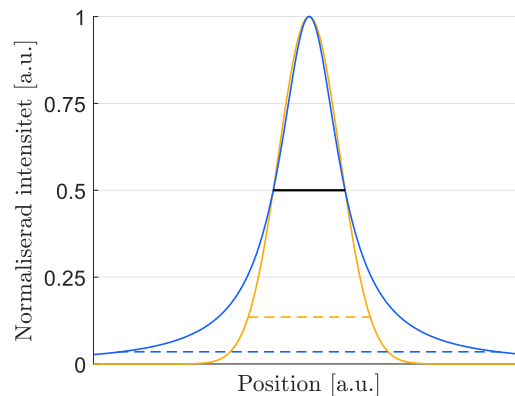
För att beräkna stråldivergensen krävs ett mått på strålens bredd, vilken inte alltid är väldefinierad. I denna rapport används $D4\sigma$ -metoden i enlighet med ISO 11146¹. Denna definition utgår från andra ordningens moment av intensitetsfördelningen $I(x,y)$ och ger den bredd som är fyra standardavvikelser stor. För bredden i x-led skrivs det som

$$D4\sigma = 4\sigma = 4\sqrt{\frac{\iint_{\mathbb{R}^2} I(x,y)(x - \bar{x})^2 dx dy}{\iint_{\mathbb{R}^2} I(x,y) dx dy}} \quad (2.11)$$

där

$$\bar{x} = \frac{\iint_{\mathbb{R}^2} I(x,y)x dx dy}{\iint_{\mathbb{R}^2} I(x,y) dx dy}. \quad (2.12)$$

Även FWHM, Full Width at Half Maximum, förekommer som strålbreddsmått och beskriver hela strålens bredd där intensiteten avtagit till hälften av den maximala. Fördelen med $D4\sigma$ jämfört med FWHM illustreras i Figur 2.6, där de två strålprofilerna har samma FWHM men olika beteende i kanterna vilket $D4\sigma$, markerad med en streckad linje, tar hänsyn till.



Figur 2.6: Exempel på intensitetsfördelningar med samma FWHM men olika beteende i kanterna. FWHM illustreras med heldragen horisontell svart linje och $D4\sigma$ med streckade linjer.

¹Även som svensk standard SS-EN ISO 11146-1:2021, *Lasrar och lasertillbehör - Provningsmetoder för laserstråls lens bredd, divergensvinklar och strålpropagationsfaktorer*

3

Metod

För att uppfylla problemformuleringen i Avsnitt 1.2 och identifiera skillnaderna mellan LED- och VCSEL-emission, var det nödvändigt att på båda ljusstyperna mäta följande optiska egenskaper: optisk uteffekt med och utan polarisator, våglängdsspektrum samt strålprofil. I detta avsnitt presenteras hur dessa mätningar utfördes. I Avsnitt 3.1 beskrivs den del av den experimentella metoden som var gemensam för samtliga mätningar. Därefter, i Avsnitt 3.2-3.4, presenteras de specifika uppställningar och metoder som användes vid mätning av olika storheter. Slutligen, i Avsnitt 3.5, presenteras Python-projektet CHAMPS som utvecklades inom detta kandidatarbete för att samla in data från mätinstrumenten på ett användarvänligt och modulärt sätt.

3.1 Gemensamt för samtliga uppställningar

I syfte att de undersökta LED:arna och VCSEL:arna skulle vara jämförbara, var samtliga undersökta komponenter tillverkade av galliumarsenid och strålade i det infraröda våglängdsområdet. I Figur 3.1 visas representativa fotografier över de två typerna av ljuskällor. Samtliga undersökta VCSEL:ar var tillverkade av Erik Strandberg, doktorand på Fotonik-avdelningen av MC2 på Chalmers tekniska högskola. Till detta projekt fanns två chip med VCSEL:ar att tillgå. Båda bestod av bottenemitterande VCSEL:ar med nominell våglängd 980 nm. På det ena var lasrarna av multimod-typ (MM) och på det andra av singelmod-typ (SM). Båda typerna undersöktes för att kunna skilja på egenskaper som var speciella för en viss sorts VCSEL:ar från sådana som var mer generella för olika sorter. Sammanställningen av använda VCSEL:ar visas i Tabell 3.1. Multimod-VCSEL:arnas redovisade aperturstorlek D i μm uppskattades utifrån tröskelströmmen I_t i mA genom den empiriska formeln $D = 1,25 + \sqrt{1,25^2 - \frac{0,46 - I_t}{0,008}}$. Singelmod-VCSEL:arnas aperturer uppskattades till $2\mu\text{m}$ under produktionen. Den undersökta LED:en var en så kallad högeffekt-LED från tillverkaren ams Osram med våglängd 950 nm (SFH 4545). LED:en valdes eftersom den emitterade vid ungefär samma våglängd som VCSEL:arna.

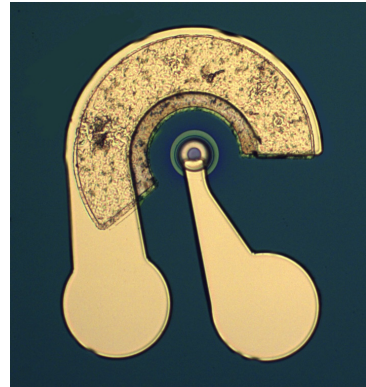
Tabell 3.1: Sammanställning över vilka VCSEL:ar som undersöktes vid olika mätningar.

Typ av mätning	Typ(er) av VCSEL
IPV - maximalt strömintervall	två MM ($D = 5\mu\text{m}$ & $D = 10\mu\text{m}$) samt en SM
IPV - tröskelström	två MM ($D = 5\mu\text{m}$ & $D = 11\mu\text{m}$) samt en SM
Polarisation	en MM ($D = 5\mu\text{m}$)
Spektrum	en MM ($D = 5\mu\text{m}$) samt en SM
Stråldivergens	en MM ($D = 5\mu\text{m}$) samt en SM

Vid samtliga mätningar tillfördes komponenten ström och spänning från en source meter unit (SMU) av modell Keithley 2400. SMU:n levererade konstant ström vid mätningarna och kunde samtidigt mäta levererad spänning. Under LED-mätningar placerades komponenten på en kopplingsplatta, från vilken banankablar gick till SMU:n. Kopplingsplattan fästes på en mikrometermanipulator för att kunna positionsjusteras i samtliga tre dimensioner. Under VCSEL-mätningar



(a) LED (modell SFH 4545). Kapseln är 5,0 mm i diameter mätt i ett plan normalt mot benen.



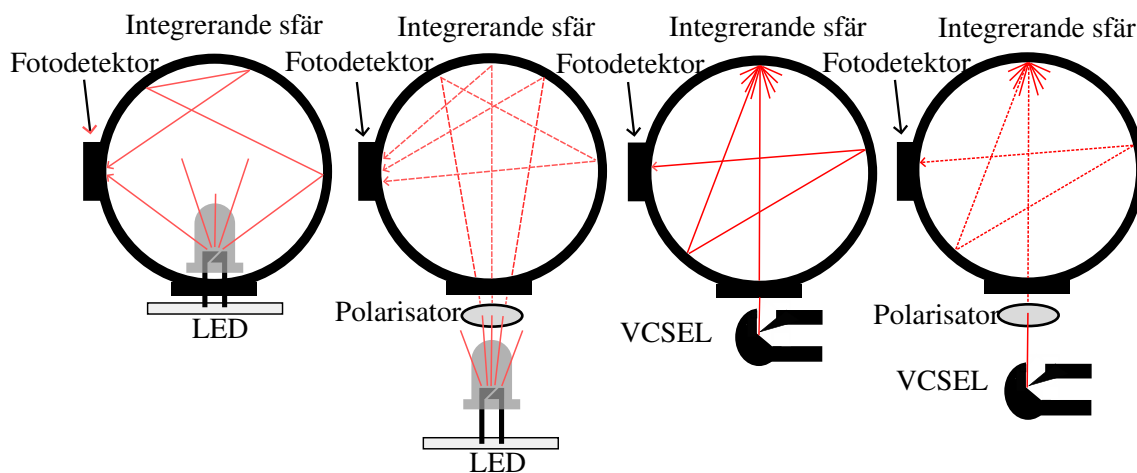
(b) Bottenemitterande GaAs-VCSEL, fotad genom mikroskop. Hela komponenten, inklusive kontakterna, är $250 \times 300 \mu\text{m}$ stor.

Figur 3.1: Fotografier över en LED (a) och en VCSEL (b).

byttes kopplingsplattan ut mot en aluminiumhållare på vilken ett chip med VCSEL:ar lades och sedan probades med hjälp av en picoprob från GGB Industries. Denna monterades på en separat mikrometermanipulator och anslöts till SMU:n.

3.2 IPV-undersökning

IPV står för ström (I), optisk uteffekt (P) samt spänning (V) och är en vanlig typ av mätningar vid analys av diodlika ljuskällor, då det är viktigt att förstå hur de tre storheterna är relaterade. De experimentella uppställningarna redovisas i Figur 3.2. Under mätningarna styrde SMU:n strömmen, samt mätte både ström och spänning. Den optiska uteffekten mättes med en integrerande sfär (Ophir IS6-D-UV-v1). I den integrerande sfären reflekteras allt ljus som kommer in genom dess öppningshål mot innerväggarna tills dess att det träffar en fotodiod och genererar en ström proportionell mot antal infallande fotoner. Fördelarna med en integrerande sfär, över till exempel enbart en fotodiod, är att den kan samla upp ljuset från divergerande ljuskällor samt att den är smidig att hantera då minimal linjering krävs.



Figur 3.2: Uppställning för IPV-mätningar, med och utan polarisator, för LED respektive VCSEL. Streckade strållinjer har passerat genom polarisator.

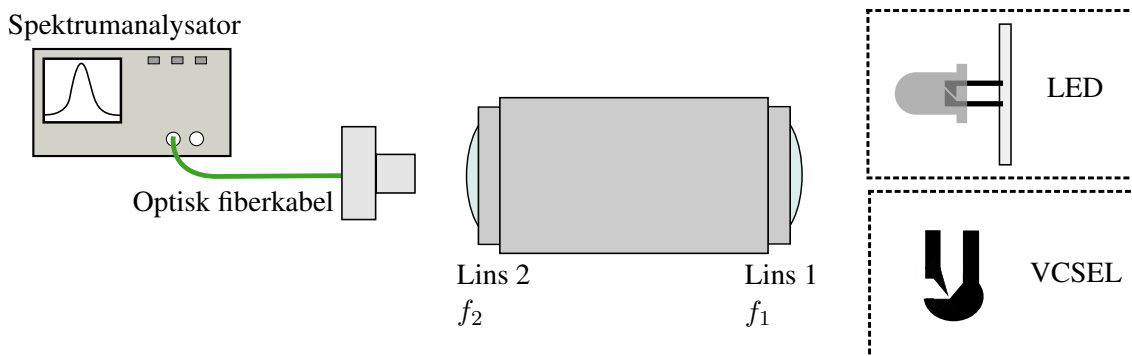
Vid LED-mätningarna placerades LED:en helt inuti sfären för att allt emitterat ljus skulle uppmätas. Mätningar gjordes för tre stycken LED:ar med nominell våglängd 950 nm. Vid VCSEL-mätningarna placerades sfären ett par centimeter från chippet och det kontrollerades med hjälp av ett IR-detektionskort att hela strålen träffade sfärens ingångshål. Mätningar gjordes för fyra olika singelmod-VCSEL:ar samt fyra olika multimod-VCSEL:ar med olika aperturstorlek. Under mätningarna på samtliga ljuskällor stegades strömmen upp med jämna intervall ända tills den optiska uteffekten avtagit till 80 % av sitt maxvärde, vilket var det maximala intervall som inte riskerade att förstöra komponenten. Dessutom gjordes mätningar med kortare strömintervall för små strömmar i syfte att undersöka komponenternas tröskelbeteende.

Dessutom genomfördes polariserade IPV-mätningar. Ett polarisationsfilter (Thorlabs PRM1/M) placerades mellan ljuskällan och sfären, i syfte att undersöka den optiska uteffekten för olika polarisationsriktningar. För LED-mätningarna gjordes detta endast för LED:en på 950 nm, vid tre polarisationsriktningar (0° , 45° och 90°) för att kunna utesluta att ljuset var linjärpolariserat. VCSEL-mätningarna genomfördes för en multimod-VCSEL samt en singelmod-VCSEL, vid 0° , och 90° .

3.3 Spektrumundersökning

Spektrummätningarna genomfördes i syfte att mäta vid vilka våglängder respektive komponent sände ut ljus och för att kunna jämföras deras olika spektrala bredd. Samtliga mätningar gjordes med Anritsu MS9710A, en spektrumanalysator baserad på diffraktionsgitter.

Vid samtliga mätningar leddes ljuset in i spektrumanalysatorn via ett tvålinssystem och en optisk fiberkabel (se Figur 3.3). Linserna användes för att fokusera ljuset på fiberkabelns spets, så att tillräcklig intensitet leddes in i spektrumanalysatorn. Ett tvålinssystem, där den första linsen kollimerade strålen och den andra fokuserade den, användes då det gav bättre resultat än endast en lins. Samtliga linser kom från ett IR-linskit från New Focus.



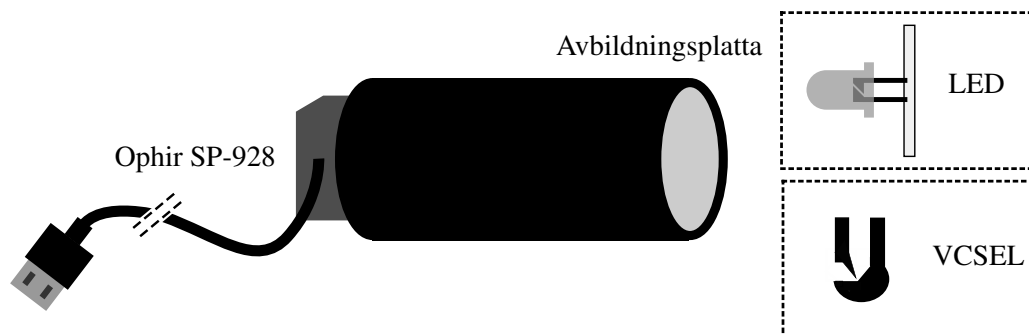
Figur 3.3: Uppställning för att leda ljus från en LED eller VCSEL in i spektrumanalysator. Ett tvålinssystem fokuserar ljuset på toppen av en optisk fiberkabel kopplad till spektrumanalysatorn.

Uppställningen linjerades genom att linssystemet och fiberkabeln fästes på varsin mikrometermanipulator. Först placerades den första linsen så att ljuset från komponenten gick till synes rakt igenom den och det kontrollerades med ett IR-detektionskort att strålen efter linsen var kollimerad. Därefter monterades den andra linsen. Slutligen placerades fiberkabelns topp nära fokuspunkten. Fiberkabeln kopplades till en effektmätare och toppen förflyttades tills dess att den uppmätta effekten maximerades. Sedan byttes effektmätaren ut mot spektrumanalysatorn och mätningen påbörjades. Linsernas fokallängder valdes baserat på testning av vilka som gav störst uppmätt effekt. För LED-mätningarna var det $f_1 = f_2 = 4,5$ mm och för VCSEL-mätningarna var det $f_1 = 8,0$ mm samt $f_2 = 15,4$ mm.

Spektrumanalysatorn ställdes in med spektral maximal upplösning, 0,07 nm, vid VCSEL-mätningarna i syfte att upplösa resonanstopparna. Våglängdsspannet valdes till 30 nm för multimod-VCSEL:n och 20 nm för singelmod-VCSEL:n då det var tillräckligt för att fånga allt utsänt ljus. Vid LED-mätningarna krävdes ett betydligt större våglängdsintervall, 350 nm, och upplösningen valdes till 1 nm för att öka mängden ljus per datapunkt.

3.4 Stråldivergensundersökning

Stråldivergensen, alltså den vinkel med vilken strålen breddas vid propagation, är det sista av de utvalda kriterierna att undersökas. Ljuskällornas stråldivergens mättes genom att belysa avbildningsplattan Ophir UV-VIS-NIR med ljuskällan. Plattan fotograferades med en Ophir SP-928 och bildströmmen analyserades av den tillhörande mjukvaran BeamGage Professional. I BeamGage beräknades stråldivergensen därefter med hjälp av avståndet mellan avbildningsplatta och ljuskälla, ett antagande om att ljuskällan är en punktkälla, samt ett valt mått på strålbredd.



Figur 3.4: Uppställning för stråldivergensmätningar. En VCSEL eller en LED monterades framför avbildningsplattan. Datan insamlades med kameran Ophir SP-928.

Avståndet mellan avbildningsplattan och ljuskällan mättes med skjutmått och matades in i BeamGage. Avståndet varierades för att fånga upp hela strålen utan att varken över- eller underexponera bilden. På grund av speckle från lasern faltades bilden med ett lågpasfilter med kvadratisk fönster på fem pixlar för att jämna ut intensiteten.

3.5 Pythonprogram

För att genomföra mätningarna utvecklades ett pythonprogram vid namn CHAMPS¹, som utvecklades för att kontrollera och styra mätinstrument [22]. Det primärt använda programmeringsspråket var Python 3.11, vilket behövde kompletteras med C#. Programmet utvecklades sekvensiellt. Först färdigställdes mjukvara för IPV-mätningarna, därefter spektrummätningen och slutligen spektrum-mätningen. Detta möjliggjorde parallellt experimentellt arbete samtidigt som fortsatt mjukvaruutveckling. Skriptet kontrollerades med hjälp av en konfigurationsfil, där diverse inställningar specificerades. Efter en genomförd mätning sparades mätdata tillsammans med den använda konfigurationen. Det var även möjligt att skriva mätdata och annan information till konsolen. För vidare läsning finns programmets dokumentation på GitHub [22].

¹CHAMPS är en förkortning för "Chalmers Automated Measurement Photonics System".

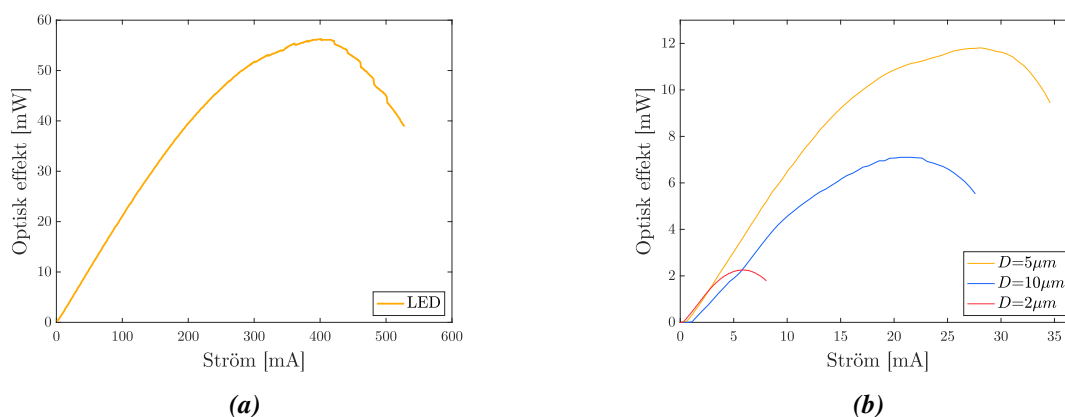
4

Resultat och diskussion

I detta avsnitt presenteras samtliga resultat över mätningar gjorda för att jämföra LED:ar och VCSEL:ar. Avsnitt 4.1 handlar om resultat gällande optisk uteffekt, Avsnitt 4.2 om polarisation, Avsnitt 4.3 om linjebredd och 4.4 om stråldivergens. Diskussion kring respektive resultat, med fokus på skillnaden mellan ljuskällorna, presenteras i anslutning till varje resultat. I slutet, i Avsnitt 4.5, sammanfattas resultaten. Läsaren bör notera att dessa undersökningar endast har genomförts på ett fåtal LED:ar och VCSEL:ar. Variationer mellan olika exemplar kan vara stor och resultaten bör inte betraktas som generella. Speciellt har endast en multimod-VCSEL undersökts.

4.1 Optisk uteffekt

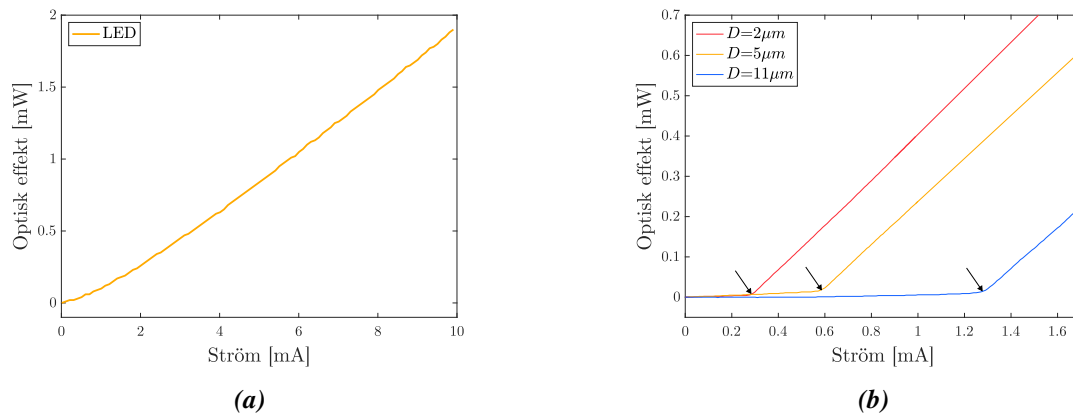
Figur 4.1 visar optisk uteffekt vid varierande ström för en LED och VCSEL:ar. I samtliga mätningar sveptes strömmen från 0 upp till att den optiska effekten minskat till 80 % av maxvärdet, vilket var maximalt intervall som inte riskerade att förstöra komponenten. Både LED och VCSEL uppvisar liknande beteenden, då effekten ökar linjärt i början för att sedan plana ut och börja avta, vilket förklaras av att värmeeffekten ökar. I Figur 4.1b noteras dessutom att det inte verkar finnas något samband mellan maximal uteffekt och aperturstorlek, vilket går emot teorin presenterad i 2.6. Anledningen till detta kan inte fastställas med säkerhet, men skulle möjligtvis kunna vara att VCSEL:n med aperturstorlek $D = 10\text{ }\mu\text{m}$ fått större resistans än förväntat till följd av brister i produktionen.



Figur 4.1: Uppmätt optisk uteffekt som funktion av ström för en LED (a), och VCSEL:ar med olika apertur-storlekar (b). Samtliga mätningar utfördes tills effekten minskat till 80 % av maxvärdet.

I Figur 4.2a och 4.2b presenteras mätningar av optisk uteffekt vid låga strömmar för en LED respektive en VCSEL. Här noteras en tydlig skillnad mellan ljuskällorna. VCSEL:en uppvisar här, till skillnad från LED:en, en tydlig tröskel under vilken den optiska uteffekten är mycket låg. Tröskeln i Figur 4.2b kan förklaras med hjälp av villkoren för att en halvledarlaser ska kunna

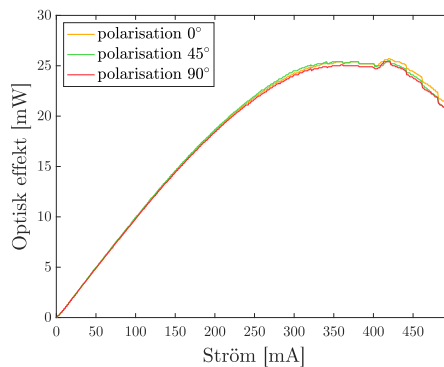
lasra (se avsnitt 2.6). Dessa villkor uppfylls vid tröskelströmmen. Den optiska uteffekten ökar följaktligen därefter snabbt med ökande ström.



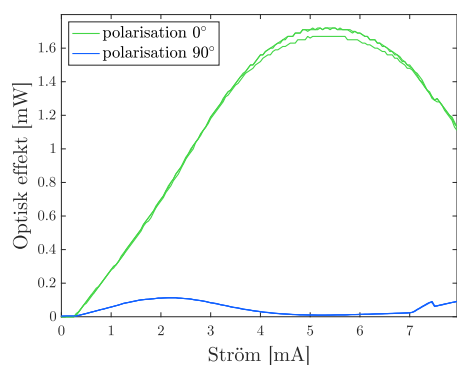
Figur 4.2: Uppmätt optisk uteffekt vid låg ström för en LED (a) och VCSEL:ar med olika aperturstorlekar (b). Observerade trösklar är markerade med pilar i (b).

4.2 Polarisation

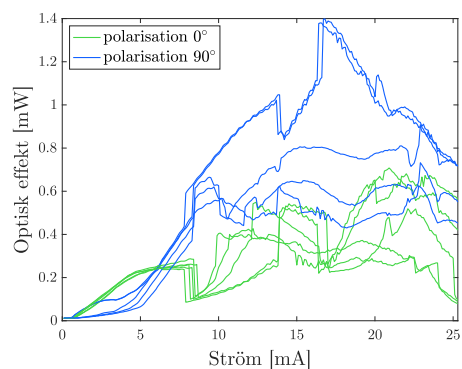
Figur 4.3 och 4.4 visar polarisationsupplöst uteffekt som funktion av ström för en LED respektive VCSEL:ar. Signifikanta skillnader kan noteras mellan komponenterna. LED:ens ljus har samma optiska effekt i de tre linjärt beroende polarisationsriktningarna 0° , 45° och 90° . VCSEL:arna däremot har olika effekt för polarisationsriktningarna 0° och 90° . Detta styrker, tillsammans med teorin om emission, att LED:ens ljus är opolariserat och VCSEL:ns ljus är polariserat.



Figur 4.3: LED med $\lambda = 950\text{ nm}$, för polarisation 0° , 45° samt 90° . Notera att samtliga polarisationer har ungefär samma optiska effekt.



(a) Polarisationen följer samma mönster mellan de olika mätningarna.



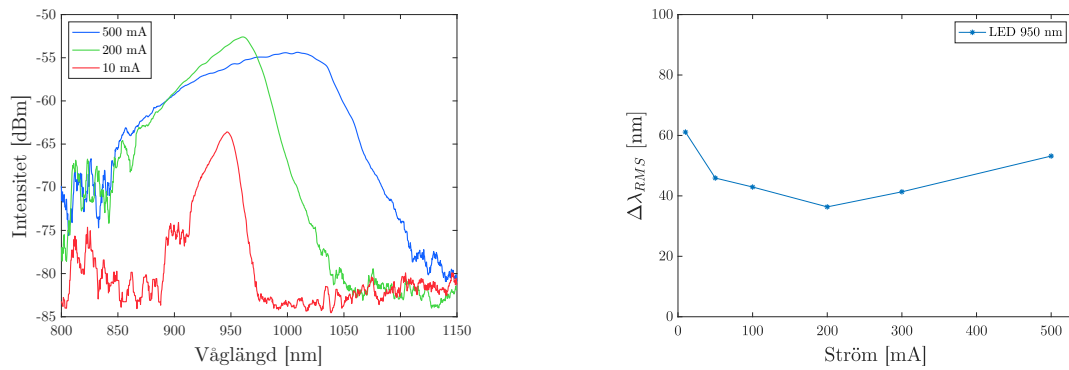
(b) Samtliga mätningar uppvisar liknande beteende upp till och med cirka 7,9 mA. Därefter skiljer sig polarisationen mellan mätningarna.

Figur 4.4: Polarisationsmätningar för en singelmod-VCSEL (a) och en multimod-VCSEL (b). Mätningarna gjordes med polarisationsriktningar 0° och 90° .

Resultat från polarisationsmätningarna för singelmod-VCSEL visas i Figur 4.4a och motsvarande för multimod-VCSEL i 4.4b. I båda figurerna framgår det att effekten skiljer sig mellan polarisationerna, vilket visar att ljuset är polariserat. Dock noteras tydliga skillnader mellan singelmod och multimod, då singelmod-VCSEL:n beter sig på samma sätt vid tre efterföljande mätningar, medan multimod-VCSEL:ns beteende skiljer sig kraftigt mellan mätningar och dessutom uppvisar regelbundna kraftiga ökningar eller minskningar. Detta beteende beror på polarisationsväxlingar till följd av att olika moder lasrar vid olika strömmar (se Avsnitt 2.6).

4.3 Våglängdsspektrum

I Figur 4.5 visas uppmätta våglängdsspektrum och $\Delta\lambda_{\text{RMS}}$ för LED:en, medan Figur 4.7 och 4.6 visar motsvarande för singelmod- och multimod-VCSEL:ar. Resultaten är i enlighet med Nature Photonics checklista [12] då lasrarna uppvisar tydlig linjebreddsavsmalning vid tröskeln medan LED:en inte gör det. Dessutom noteras att LED:ens spektralbredd är avsevärt större än VCSEL:arnas, över 40 nm, medan VCSEL:arnas är mindre än 1 nm över tröskeln. Detta förklaras med att LED:en strålar med spontan emission, medan VCSEL:arna för strömmar över tröskeln uppnått tillräcklig förstärkning g_m för vissa moder som då börjar lasra.

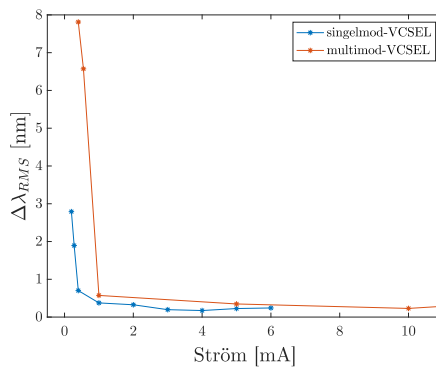


(a) Våglängdsspektrum, uppmätt med spektral upplösning 1 nm.

(b) Spektralbredden $\Delta\lambda_{RMS}$ som funktion av ström.

Figur 4.5: Spektrummätningar för LED:en. I (a) redovisas det uppmätta våglängdsspektrumet för olika strömmar och i (b) visas hur spektralbredden $\Delta\lambda_{RMS}$ beror på strömstyrkan.

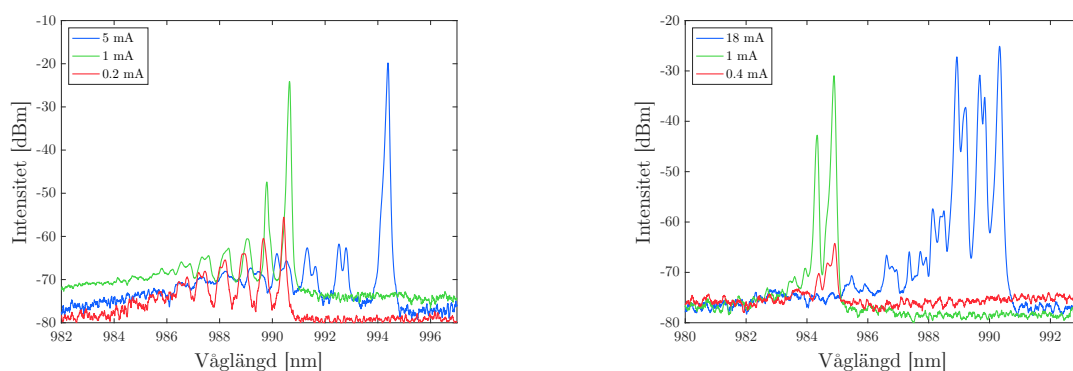
Vid närmare studie av resultaten för LED:en noteras att våglängdsspektrumet (Figur 4.5a) liknar den teoretiska intensitetsfördelningen $I(\hbar\omega)$ från Figur 2.4¹, vilket talar för att de antaganden som gjordes vid härledning av $I(\hbar\omega)$ (Ekvation 2.3) kan stämma. Observera särskilt att spektrumet skiftas mot längre våglängder vid ökande ström, vilket teoretiskt relateras till att GaAs:s bandgap minskar med ökande temperatur. Detta skiftar tillståndstätheterna för elektroner och hål, vilket i sin tur påverkar $I(\hbar\omega)$. Dock visar Figur 4.5b att spektralbredden $\Delta\lambda_{RMS}$ avtar för strömmar upp till 200 mA och sedan öka, medan Ekvation 2.8, som beskriver spektrumets teoretiska halvbredd, förutspår en monoton ökning. En möjlig förklaring till skillnaden är att vid beräkningen av $\Delta\lambda_{RMS}$ genomfördes summeringen i Ekvation 2.10 över hela det uppmätta intervallet. För låga strömmar var intervallet över vilken LED:en strålade kort, vilket ledde till att brus på andra våglängder fick en större påverkan än vid högre strömmar.



Figur 4.6: Linjebredder, definierade som $\Delta\lambda_{RMS}$ för en singelmod-VCSEL med en tröskelström på 0,28 mA och en multimod-VCSEL med en tröskelström på 0,55 mA.

Även VCSEL-spektrumens form, i Figur 4.7, överensstämmer med det förväntade. Som beskrivits i Avsnitt 2.8 är intensiteten mycket låg under tröskelströmmen då emissionen främst är spontan, men har till skillnad från LED-spektrumet distinkta toppar till följd av interferens mellan kavitetens speglar. För ström över tröskeln ökar en eller flera toppar kraftigt i intensitet då den eller de korresponderande moderna uppnår den modala tröskelförstärkningen definierad i Ekvation

¹Notera att det teoretiska spektrumet i Figur 2.4 är i linjära enheter medan det uppmätta spektrumet i Figur 4.5a är i dBm.



(a) Singelmod-VCSEL med tröskel på 0,28 mA.

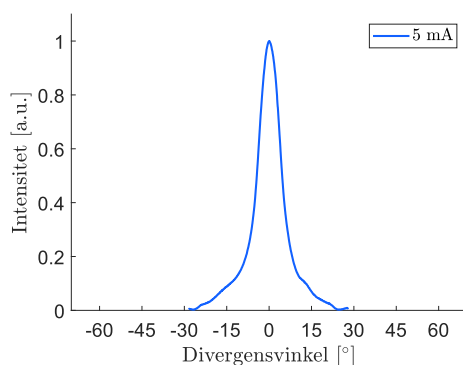
(b) Multimod-VCSEL med tröskel på 0,55 mA.

Figur 4.7: Uppmätta våglängdsspektrum för en singelmod-VCSEL (a) och en multimod-VCSEL (b). Samtliga mätningar gjordes med spektral upplösning 0,07 nm.

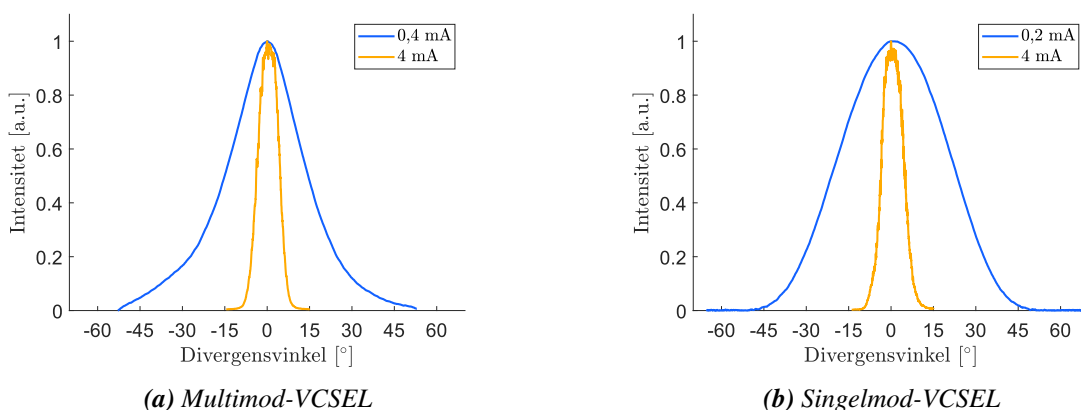
2.6 och alltså börjar lasra. Detta leder även till att linjebredd, som visas i Figur 4.6, minskar kraftigt vid tröskelströmmen. Skillnaden mellan VCSEL:arna är att singelmod-VCSEL:n har en enda intensitetstopp för ström över tröskeln, medan multimod-VCSEL:n har flera, då multimod-VCSEL:n:s olika moder är vid olika våglängder. I dess spektrum (Figur 4.7b) framgår dessutom att antalet intensitetstoppar ökar med ökande ström, då allt fler moder uppnår tröskelförstärkning. Dessutom kan det noteras att VCSEL:arnas våglängdsspektrum skiftar mot längre våglängder då strömmen ökar. Precis som i LED:en beror detta i grunden på att bandgapet minskar då temperaturen ökar i komponenten, men till skillnad från i LED:en har detta inte enbart en påverkan genom att tillståndstätheterna för elektroner i de olika banden skiftas, utan framför allt genom att brytningsindexet, och därmed kavitets optiska längd, förändras så att längre våglängder uppnår faskravet i Ekvation 2.4.

4.4 Stråldivergens

De undersökta ljuskällorna, LED, multimod-VCSEL och singelmod-VCSEL, hade en stråldivergens över tröskeln på 36° , 26° respektive 26° mätt med $D4\sigma$ strålbredder. Detta vid 5 mA, 20 mA och 50 mA ström för LED och 4 mA för VCSEL:arna, alltså över tröskeln. Under tröskeln hade multimod-VCSEL:n stråldivergen 115° mätt vid 0,4 mA och singelmod-VCSEL:n 107° mätt vid 0,2 mA. VCSEL:arnas avsmalnande beteenden illustreras i Figur 4.9 och kan jämföras med LED:en i Figur 4.8. Noggrannheten för divergensen för LED samt VCSEL över tröskeln uppskattas till $\pm 3^\circ$ och VCSEL under tröskeln till $\pm 10^\circ$. Den största felkällan antas vara det brus som registrerades på kameran utanför strålarna. För mätningar under tröskeln var det infallande ljuset mycket svagt och bruset påverkade därför mätningarna i större omfattning än över tröskeln där bruset inte fick lika stort genomslag.



Figur 4.8: Uppmätt intensitetsfördelning för en LED. Figuren visar den vågräta rad av pixlar som innehöll bildens maxvärde. Datan är normaliserad.



Figur 4.9: Uppmätt intensitetsfördelning för en multi-, (a), och en singelmod-VCSEL (b) under och över tröskelström. Figuren visar den vågräta rad av pixlar som innehöll bildens maxvärde. Datan är normaliserad.

Likheten mellan divergensvinklarna för VCSEL:arna över tröskeln och LED:en indikerar att divergensvinkeln är ett trubbigt mått för att skilja VCSEL:s från LED:ar. Däremot är skillnaden mellan VCSEL:ar under tröskeln och LED mycket stor och specifikt avsmalningen som VCSEL:arna uppvisar verkar vara ett gott mått på ljuskällans typ. Detta kräver även kännedom om VCSEL:ns tröskel för att kunna genomföra mätningarna i rätt strömintervall. Dessutom är resultatet starkt kopplat till att epoxypåsen på LED:en formar den utgående strålen. För andra geometrier behöver nya undersökningar göras för att erhålla ett robust mått på ljuskällans typ.

4.5 Sammanfattning av resultat

Resultaten ovan visar att VCSEL:s har en tydlig strömtröskel för optisk effekt, någon slags polarisation, smal linjebredd och tydlig avsmalning av stråldivergensen när tröskeln passeras. Lysdioderna å sin sida uppvisar ingen strömtröskel, ingen polarisation, breda spektrum och en konstant stråldivergens. Läsaren bör notera att dessa kriterier endast har studerats på ett fåtal LED:ar och VCSEL:ar. Variationer mellan olika produkter kan vara stora och resultaten bör inte betraktas som fullständigt generella. De stämmer dock överens med tidigare verk, exempelvis [11] och [23].

Vidare läsning finns för den intresserade om polarisation [24], spektrum [25] och strålprofil [26]. Många aspekter behandlas också i [23] och [27].

5

Slutsatser

De av författarna undersökta punkterna ur Nature Photonics checklista [12] visar att:

- en tydlig tröskel ska finnas hos VCSEL:ar men saknas hos LED:ar.
- linjebredden ska smalna av kraftigt för VCSEL:ar då tröskeln passeras medan LED:ars linjebredd istället ökar med ökande ström.
- ljuset från en VCSEL ska vara polariserat, till skillnad från ljuset från en LED. Polarisationen behöver inte vara konstant eller konsekvent.
- stråldivergensen ska minska kraftigt för VCSEL:ar då de passerar tröskeln, till skillnad från konstant divergens för LED:ar.

Alla punkter ovan är i enlighet med den befintliga checklistan från Nature Photonics.

5.1 Exempel på tvetydiga lasrar

I resultaten ovan är skillnaderna mellan LED och laser tydliga och identifikation med hjälp av Nature Photonics checklista sker utan besvär. Ett exempel som inte är lika tydligt är en GaN LED som emitterar polariserat ljus vid våglängden 465 nm [28] och alltså liknar en laser. Dock förväntas denna komponent ha ett spektrum som inte kraftigt minskas i bredd vid viss drivström och har även en uteffekt som ökar linjärt med drivström som en LED. Ljuskällan saknar dock kavitet och polarisationen uppstår på grund av fotoniska kristaller inbyggda i LED:en. Ett annat exempel är en GaN VCSEL som emitterar ljus vid två distinkta våglängder: 430 nm och 545 nm [29]. De två olika våglängderna börjar att lasra vid två olika tröskelströmmar. Anledningen till lasring vid två distinkta våglängdsområden är kvantprickar inbyggda i lasern, som tillåter fler övergångar till grundtillståndet. Slutligen går det inte alltid att uppmäta tröskel för alla lasertyper, specifikt för lasrar med hög β -faktor [30]. I dessa lasrar kopplas en stor andel av den spontana emissionen in i kaviteten och därmed kan en stor del av de spontant emitterade fotonerna bidra till laserljuset [31].

Stimulerad emission har även observerats i mitten av galaxer [32]. Källan till strålningen är exciterade vattenmolekyler, som har exciterats genom röntgenstrålning eller uppvärmning av ackretionsskivan, som vattnet befinner sig i. På grund av det emitterade ljusets långa våglängd, 1,3 cm, benämns fenomenet maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) istället för laser.

Att klassificera huruvida en ljuskälla är en laser eller inte är komplicerat. Exempelen ovan beskriver ljuskällor som delvis uppfyller Nature Photonics checklista, men inte fullständigt för att beskrivas som en laser. Dock har exemplen ovan en stark teoretisk förklaring till varför stimulerad emission trots allt sker eller varför spontant emitterat ljus är polariserat.

5.2 Förslag på vidare forskning

För att komplettera denna rapport bör divergensvinkeln för en LED utan epoxykapsel analyseras. Dessutom ter det sig intressant att undersöka vad som förorsakar polarisationsbeteendet för multimod-VCSEL:n i Figur 4.4b. Speciellt varför samma beteende uppvisas upp till en tröskel.

Även förhållandet mellan aperturstorlek och optisk maxeffekt, som visats i Figur 4.1b, bör undersökas vidare. Detta för att förstå varför större apertur inte garanterar högre effekt. Slutligen bör hela denna studie genomföras på en större samling exemplar för att kunna generalisera slutsatserna ytterligare.

Litteratur

- [1] J. Rose, "Blå lysdioder – en uppfinning som sprider nytt ljus över världen," *Kungliga Vetenskapsakademien*, s. 5, 2014. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popular-physicsprize2014-sv.pdf> (hämtad 2023-05-02).
- [2] E. Tretkoff, "Einstein predicts stimulated emission," *American Physical Society, This Month in Physics History*, årg. 14, nr 8, 2005. URL: <http://www.aps.org/publications/apsnews/200508/history.cfm> (hämtad 2023-04-14).
- [3] T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in Ruby," *Nature*, årg. 187, nr 4736, s. 493–494, 1960. DOI: [10.1038/187493a0](https://doi.org/10.1038/187493a0).
- [4] A. Larsson, *Semiconductor Optoelectronics - Device Physics and Technologies*. Göteborg, aug. 2015.
- [5] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys och R. O. Carlson, "Coherent Light Emission From GaAs Junctions," *Phys. Rev. Lett.*, årg. 9, s. 366–368, 9 nov. 1962. DOI: [10.1103/PhysRevLett.9.366](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.9.366).
- [6] H. Soda, K.-i. Iga, C. Kitahara och Y. Suematsu, "GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers," *Japanese Journal of Applied Physics*, årg. 18, nr 12, s. 2329, dec. 1979. DOI: [10.1143/JJAP.18.2329](https://doi.org/10.1143/JJAP.18.2329).
- [7] K. P. Jackson och C. L. Schow, "VCSELs - Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," i Springer, 2013, kap. 14 - VCSEL-Based Transceivers for Data Communications. DOI: [10.1007/978-3-642-24986-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24986-0).
- [8] H. M. Martin Grabherr och A. Pruijmboom, "VCSELs - Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," i Springer, 2013, kap. 17 VCSELs for Optical Mice and Sensing. DOI: [10.1007/978-3-642-24986-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24986-0).
- [9] N. Ueki och N. Mukoyama, "VCSELs - Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," i Springer, 2013, kap. 18 VCSEL-Based Laser Printing System. DOI: [10.1007/978-3-642-24986-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24986-0).
- [10] B. D. Padullaparthi, J. Tatum och K. Iga, *VCSEL Industry: Communication and Sensing*. Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, dec. 2021, ISBN: 978-1-119-78221-6.
- [11] I. D. W. Samuel, E. B. Namdas och G. A. Turnbull, "How to recognize lasing," *Nature Photonics*, årg. 3, s. 546–549, 2009. DOI: [10.1038/nphoton.2009.173](https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.173).
- [12] Nature Photonics, *Lasing Reporting Summary*, mars 2018. URL: <https://www.nature.com/documents/nr-lasing-reporting-flat.pdf>.
- [13] A. Grabowski, "VCSEL Equivalent Circuits and Silicon Photonics Integration," diss., Chalmers Tekniska Högskola, 2022. URL: <https://research.chalmers.se/publication/532188>.
- [14] Wikimedia Commons, *Intensity distribution of sixteen Laguerre-Gauss modes*. Febr. 2021. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laguerre-Gaussian_modes.png (hämtad 2023-04-25).

- [15] A. Larsson och J. S. Gustavsson, "VCSELs - Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," i Springer, 2013, kap. 4 - Single mode VCSELs. DOI: [10.1007/978-3-642-24986-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24986-0).
- [16] X. Tao, "Performance Characterization and Theoretical Modeling of Emitted Optical Power for High-Power White-LED Devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, årg. 62, nr 5, s. 1511–1515, 2015. DOI: [10.1109/TED.2015.2410032](https://doi.org/10.1109/TED.2015.2410032).
- [17] J. M. Ostermann och R. Michalzik, "VCSELs - Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," i Springer, 2013, kap. 5 - Polarization Control of VCSELs. DOI: [10.1007/978-3-642-24986-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24986-0).
- [18] J. Martin-Regalado, F. Prati, M. San Miguel och N. Abraham, "Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, årg. 33, nr 5, s. 765–783, 1997. DOI: [10.1109/3.572151](https://doi.org/10.1109/3.572151).
- [19] Y. P. Varshni, "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors," *Physica*, årg. 34, nr 1, s. 149–154, 1967, ISSN: 0031-8914. DOI: [10.1016/0031-8914\(67\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0031-8914(67)90062-6).
- [20] H. M. Gomaa, I. Yahia och H. Zahran, "Correlation between the static refractive index and the optical bandgap: review and new empirical approach," *Physica B: Condensed Matter*, årg. 620, s. 413–426, 2021. DOI: [10.1016/j.physb.2021.413246](https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413246).
- [21] N. N. Bojarski, "The far field in terms of the spatial Fourier transform of the sources and its implications on the inverse problem," *Journal of Applied Physics*, årg. 58, s. 1–4, 1985. DOI: [10.1063/1.335709](https://doi.org/10.1063/1.335709).
- [22] J. Billvén, T. Hansson, S. Danielson Damne och G. Persson, *CHAMPS*, version v2.0.0, Göteborg, 2023. URL: <https://github.com/theodorhansson/CHAMPS/>.
- [23] O. Svelto, i *Principles of Lasers*, Boston, MA: Springer US, 2010. DOI: [10.1007/978-1-4419-1302-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1302-9).
- [24] P. Qiu, B. Wu, P. Fu, M. Li, Y. Xie och Q. Kan, "Control of VCSEL polarization via built-in gratings," *2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, s. 1–2, 2021. DOI: [10.1364/CLEO_AT.2021.JTu3A.161](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2021.JTu3A.161).
- [25] A. P. Bogatov, A. E. Drakin, M. Vaskovskaya m. fl., "Control of the VCSEL spectrum by dual microwave frequency modulation," *Optics letters*, årg. 47 24, s. 6425–6427, 2022. DOI: [10.1364/OL.476838](https://doi.org/10.1364/OL.476838).
- [26] A. Persson, "Beam characterization of VCSELs," masteruppsats, Chalmers Tekniska Högskola, 2018.
- [27] R. Michalzik, utg., *VCSELs* (Springer Series in Optical Sciences), en, 2013. utg. Berlin, Germany: Springer, dec. 2011. DOI: [10.1007/978-3-642-24986-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24986-0).
- [28] E. Matioli, S. Brinkley, K. M. Kelchner m. fl., "High-brightness polarized light-emitting diodes," *Light: Science & Applications*, årg. 1, nr 8, e22–e22, aug. 2012, ISSN: 2047-7538. DOI: [10.1038/lsa.2012.22](https://doi.org/10.1038/lsa.2012.22).
- [29] R. B. Xu, Y. Mei, B. P. Zhang m. fl., "Simultaneous blue and green lasing of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers," *Semiconductor Science and Technology*, årg. 32, nr 10, s. 105–112, sept. 2017, ISSN: 0268-1242. DOI: [10.1088/1361-6641/aa87aa](https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa87aa).
- [30] S. Kreinberg, W. W. Chow, J. Wolters m. fl., "Emission from quantum-dot high- β microcavities: transition from spontaneous emission to lasing and the effects of superradiant emitter coupling," *Light: Science & Applications*, årg. 6, nr 8, e17030–e17030, aug. 2017, ISSN: 2047-7538. DOI: [10.1038/lsa.2017.30](https://doi.org/10.1038/lsa.2017.30).
- [31] H. Deng, G. L. Lippi, J. Mørk, J. Wiersig och S. Reitzenstein, "Physics and Applications of High- β Micro- and Nanolasers," *Advanced Optical Materials*, årg. 9, nr 19, s. 2100–2115, 2021, ISSN: 2195-1071. DOI: [10.1002/adom.202100415](https://doi.org/10.1002/adom.202100415).

- [32] P. T. Kondratko, L. J. Greenhill och J. M. Moran, "Discovery of Water Maser Emission in Five AGNs and a Possible Correlation Between Water Maser and Nuclear 2-10 keV Luminosities," *The Astrophysical Journal*, årg. 652, nr 1, s. 136, nov. 2006, ISSN: 0004-637X. DOI: [10.1086/507885](https://doi.org/10.1086/507885).



CHALMERS