

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Ett komponent-fysikaliskt perspektiv på blå mikrokavitets-lasrar och resonanta lysdiodrar i III-nitrid-material	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Blue microcavity lasers and resonant-cavity light-emitting diodes in III-nitride-based materials - the device physics approach	
Universitet/högskola/företag Chalmers University of Technology	Avdelning/institution Dept. of Microtechnology and Nanoscience
Adress Chalmers University of Technology, Dept. of Microtechnology and Nanoscience, Photonics Laboratory	
Namn på projektledare Åsa Haglund	
Namn på ev övriga projektdeltagare Michael Bergmann, Filip Hjort, Ehsan Hashemi, Johan Gustavsson, Jörgen Bengtsson	
Nyckelord: 5-7 st Blå, uteffekt, optisk, belysning, mikrokavitetslaser, lysdiod, VCSEL	

## Förord

Projektet ”Ett komponent-fysikaliskt perspektiv på blå mikrokavitets-lasrar och resonanta lysdiodrar i III-nitrid-material” (projektnummer: 39919-1) har finansierats av Energimyndigheten med 5 MSEK under åren 2015 till och med 2019. Projektet har finansierat medverkan av Prof. Åsa Haglunds gruppmedlemmar på Chalmers bestående av Åsa Haglund, Jörgen Bengtsson, Johan Gustavsson, Ehsan Hashemi, Filip Hjort samt Michael Bergmann. Under projektets gång har man samarbetat med flertalet kollegor på Chalmers Tekniska Högskola (se detaljer i publikationslista nedan) och med följande andra Universitet: Prof. Goano på Politecnico di Torino, Italien, Prof. Kneissl på det Tekniska Universitetet i Berlin, Tyskland, Prof. Lu på National Chiao Tung University, Taiwan, Prof. Marcinkevicius på Kungliga Tekniska Högskola och Prof. Samuelson på Lunds Tekniska Universitet.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	2
Summary .....	2
Inledning/Bakgrund .....	3
Genomförande och resultat .....	4
Diskussion.....	9
Publikationslista.....	10
Referenser, källor.....	12
Bilagor .....	14

## Sammanfattning

*Nästa generations ljuskällor kan komma att baseras på blå lasrar istället för lysdioder, men de blå lasrarna av vertikal-kavitetstyp har tidigare haft för låg prestanda för att tillåta denna implementering. I detta projekt har vi identifierat en stor optisk förlustmekanism i de blå lasrarna och föreslagit designer för att kringgå den. Detta har lett till rekord-prestanda för dessa lasrar med en 16 gånger högre optisk uteffekt och en 100 gånger högre effektverkningsgrad. Effektverkningsgraden är nu 10% istället för de tidigare 0.1%, men det finns fortfarande plats för förbättringar.*

Smarta ljuskällor med adaptivt belysningsmönster och inbyggda kommunikationsmöjligheter m.m. skulle vara betjänta av att baseras på blå lasrar istället för blå LED:ar som har en lågdivergent stråle och kan moduleras vid 10's Gbit/s istället för 100's Mbit/s. Detta skulle även bidra till en lägre resursförbrukning och erbjuda högre effektverkningsgrader vid höga optiska uteffekter då lasrar är designade för att vara effektiva vid 1000's A/cm<sup>2</sup> i kontrast till LED:ar som är energieffektiva vid låga 10's A/cm<sup>2</sup>.

Förutom designer för att undvika optisk anti-guidning har vi inom projektet även undersökt och utvecklat olika typer av speglar, så kallade distribuerade Bragg-reflektorer (DBRs), som är essentiella för vertikal-kavitetslasrar. Epitaxiellt växta AlN/GaN DBR:er med kombinerad hög reflektivitet och elektrisk ledningsförmåga har utvecklats. Dessutom har ett första steg mot ZnO/GaN DBR:er tagits som visar på en lovande elektrisk ledningsförmåga i dessa DBR:er. En metod för att kunna använda DBR:er av högsta optiska kvalitet, d.v.s. högreflektiva bredbandiga dielektriska DBR:er i t.ex. HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, på båda sidor av kaviteten har också utvecklats. Denna metod är baserad på elektrokemisk etsning av ett offerlager mellan laserstrukturen och det substrat lasern är växt på. Vilket av de olika spegelalternativen som kommer att vara det bästa för att förbättra effektverkningsgraden i vertikal-kavitetslasrar och samtidigt vara bra ur en tillveknings synpunkt återstår att se. Värt att nämna är att metoden för att separera laserstrukturen ifrån substratet kan även användas för att förbättra verkningsgraden i UV-lysdioder och skapa UV-emitterande vertikal-kavitetslasrar, så metoden kan komma att få en betydligt större genomslagskraft än enbart för blå vertikalkavitetslasrar för belysning.

## Summary

*Next generation light sources are likely to be based upon blue lasers instead of light-emitting diodes, but blue lasers of a vertical-cavity type have previously had too poor performance to allow this implementation. In this project we have identified a large optical loss mechanism in the blue lasers and proposed designs to circumvent this detrimental loss. This has resulted in record-performance characteristics with a 16 times higher optical output power and a 100 times higher power conversion efficiency. The power conversion efficiency is now 10% instead of the previous 0.1%, but there is still room for improvement.*

Smart light sources with adaptive illumination patterns and build in communication opportunities would benefit from being based upon blue lasers instead of LEDs. This since lasers have a low divergent output beam and can be directly modulated at 10's Gbit/s instead of 100's Mbit/s. This would also save resources in terms of the precious semiconductor material and offer higher power conversion efficiency at high optical output powers, since lasers are designed to be effective at 1000's A/cm<sup>2</sup> instead of low 10's A/cm<sup>2</sup> as the LED is.

Besides designs to circumvent optical anti-guiding with the associated high losses, we have also within the project investigated different types of mirrors, so called distributed Bragg reflectors (DBRs), which are an essential building block for vertical cavity lasers. Epitaxially grown DBRs of AlN/GaN with a combined high reflectivity and electrical conductivity have been developed. In addition, a first step towards a DBR of ZnO/GaN has been made. These heterostructures show a promising low electrical conductivity, in fact lower than was measurable. We confirm by simulations that this low electrical conductivity is due to the cancellation of the spontaneous and piezoelectric fields for ZnO strained to GaN. A method to enable the use DBRs of highest optical quality, i.e. highly reflective dielectric DBRs, on both side of the cavity has also been developed. This method is based upon electrochemical etching of a sacrificial layer between the laser structure and the substrate it has been grown upon. Which of the different mirror concepts that will be the best to further improve the power conversion efficiency and be good from a manufacturability point of view still remains to be seen. It is worth to mention that the method to separate the laser structure from the substrate can also be used to improve the power conversion efficiency of UV LEDs as well as to realize UV-emitting vertical-cavity lasers. Thus, it may become a key technology not only for blue vertical cavity lasers.

## Inledning/Bakgrund

Vita lysdioder (LED-lampor) håller på att ersätta glödlampor och lysrörslampor i allmänbelysning, för att spara elektrisk energi och för att undvika användning av kvicksilver. Energimyndigheten i Sverige räknar med att denna övergång i hemmen kommer spara 2 miljarder kWh/år i Sverige (motsvarande totala energianvändningen för ca 100 000 eluppvärmda villor i Sverige) och 39 miljarder kWh i EU [1]. Den totala elförbrukningen förväntas sjunka ytterligare då samma övergång även genomförs inom industri och offentlig sektor. Denna stora minskning i elanvändning för belysning möjliggörs av att LED-lampor drar ungefär 80% mindre el än glödlampor [2].

En vit lysdiod består idag av en blå LED täckt med ett lysämne (fluorofor) som omvandlar en del av det blå ljuset till gult och det totala ljuset från LED-lampan upplevs därmed som vitt. De bästa blå LED:arna idag har en elektrisk till optisk effektverkningsgrad på 84%, vilket är mycket bra. Dock uppnås denna max-effektverkningsgrad enbart vid mycket låga drivströmmar. För att få tillräckligt mycket ljus ut ifrån LED:arna behöver man driva dem vid mycket högre elektriska strömmar och effektverkningsgraden där är dessvärre betydligt sämre, typiskt 40% [3]. Detta är ett välkänt fenomen kallat "efficiency droop" och dess ursprung och

hur man kan minska detta effektverkningsgradsfall debatteras fortfarande hett i forskarvärlden. Ett enkelt sätt att bibehålla en hög effektverkningsgrad i LED:arna och samtidigt få en hög optisk uteffekt är att parallell-koppla ett antal LED:ar (som därigenom kan drivas vid låga strömmar). Dock blir kostnaden per LED-lampa då mycket hög eftersom optisk uteffekt per chiparea blir lägre, vilket är högst oönskat då effekt per chiparea är det som fundamentalt bestämmer hur billig en ljuskälla baserad på halvledarmaterial kan bli, ju högre desto bättre.

Nyligen har man börjat undersöka om halvledar-lasrar kan användas istället för LED:ar, eftersom dessa ljuskällor kan erbjuda hög effektivitet vid höga drivströmmar och har hög optisk uteffekt per chiparea. Detta innebär att en viss optisk effekt kan åstadkommas av ett mycket mindre chip än för en LED, och chip-tillverkarna skulle då få ut fler chip per skiva och på så sätt går kostnaden per ljuskälla ner. Företaget Nichia i Japan lanserade 2007 en fiberkopplad ljuskälla bestående av en blå halvledar-laser med ett lysämne på andra änden av fibern som konverterade en del av det blå ljuset till gult. Dock var lasrarnas effektverkningsgrad för låg och ljuskällan blev ingen storsäljare. Idag har effektverkningsgraden för dessa blå lasrar förbättrats betydligt (bästa effektverkningsgraden ligger idag på ca 30%), och under 2014 lanserar både BMW och Audi bilmodeller med laser-baserade strålkastare. Lasrarnas effektverkningsgrad behöver dock förbättras ytterligare innan de blir riktigt intressanta för allmänbelysningsändamål, vilket har adresserats i detta projekt.

Den nya halvledar-lasertypen (blå mikrokavitetslaser) som detta projekt handlar om har bra egenskaper som låg tillverkningskostnad, bra strålprofil (lågdivergent och cirkulärsymmetrisk), och kan enkelt tillverkas i två-dimensionella matriser vilket underlättar parallell-koppling. Vertikal-kavitets-lasrar som emitterar blått ljus finns dock inte kommersiellt tillgängliga ännu p.g.a. deras hittills mycket låga prestanda. Vid starten av detta projekt var t.ex. effektverkningsgraden 0.1%, dvs 99.9% av den elektriska in-effekten omvandlades till värme istället för ljus.

Detta 5-miljoners-projekt som sträckts sig över 5 år (2015-2019) har letts av projektledare Prof. Åsa Haglund vid Chalmers Tekniska högskola. Detta projekt har tagit en komponent-inriktad approach till att lösa den låga verkningsgraden i blå mikrokavitetslasrar och fokuserat på att utveckla högkvalitativa speglar och lösa de höga optiska förlusterna.

## Genomförande och resultat

### Reducera optiska förluster

*Projektgrupp: projektledare Åsa Haglund (Professor), seniora forskare Jörgen Bengtsson (Docent) och Johan Gustavsson (Docent) samt Ehsan Hashemi (doktorand) Samarbetspartners (men ej finansierade ifrån detta projekt): Michele Goano (Professor) och Marco Calciati (doktorand), Politecnico di Torino, Italien.*

Genom numeriska simuleringar (2D effektiv-index-metod och en 3D kopplad-kavitets strålpropageringsmetod) har vi studerat den design som de flesta grupper har använt för att innesluta strömmen till centrum av lasern i horisontal-led. Den

dielektriska apertur som använts leder till ett steg i strukturen som propagerar uppåt genom den dielektriska spegel som är deponerad ovanpå, se Fig. 1. Vi visar att detta leder till en så kallad anti-guidad vågledarstruktur som istället för att innesluta ljuset till centrum effektivt sprider det ut ur kaviteten. Detta leder till att mycket höga tröskelmaterial-förstärkningar behövs för att uppnå lasring, i vissa fall t.o.m. högre än vad som går att uppnå ifrån materialet, d.v.s. lasern kommer att ha väldigt höga tröskelströmmar eller t.o.m. aldrig kunna lasra.

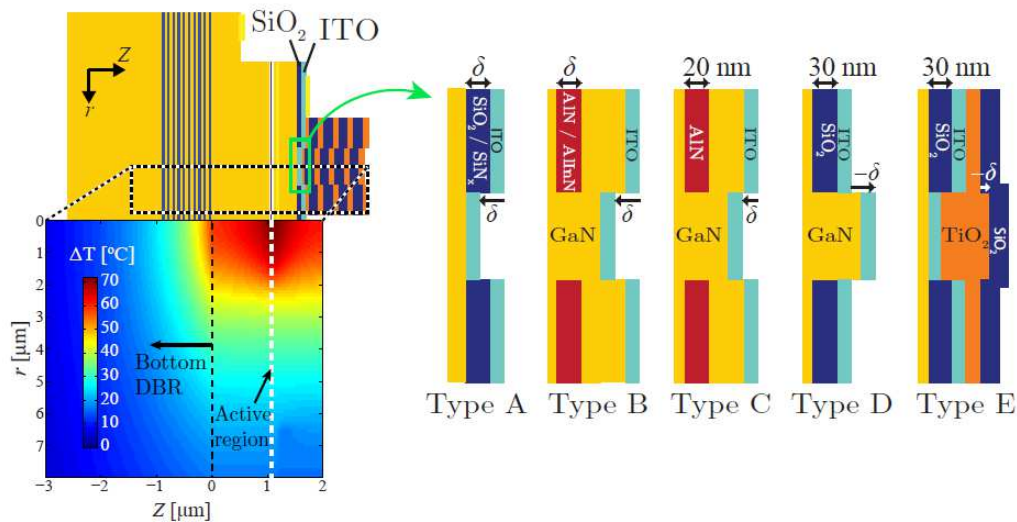


Fig. 1. Strukturella detaljer i lasrar med olika typer av strömaperturer. Definieringen av steget,  $\delta$ , är indikerat. Den lilla figuren visar den beräknade temperatur-fördelningen i den indikerade delen av kaviteten.

Vi har vidare föreslagit designer för att undvika denna optiska anti-guidning och istället skapa optiskt guidade lasrar, se Fig. 1. Dessa designer beräknas minska tröskelmaterial-förstärkningen till ca 30%, se Fig. 2. Vi har även tagit hänsyn till hur Joule-uppvärmning i lasern påverkar den optiska guidningen genom den termiska linseffekten. Lite förvånansvärt är att denna effekt inte gör antiguidade kaviteter lite mer positivt guidade så att de närmar sig den icke-guidade kaviteter med extremt höga laterala optiska läckage. Istället undertrycker den termiska linseffekten laterala läckage för både antiguidade och guidade kaviteter. Detta förklaras med en lägre injicering av optisk effekt ifrån den centrala delen av kaviteten och/eller en lägre total intern reflektion i det periferiella området; den första effekten gäller alla kaviteter, medan den andra enbart bidrar till det starkt reducerade läckaget i svagt antiguidade kaviteter. Termisk linseffekt kraftigt minskar det laterala läckaget både för den fundamentala och högre ordningens moder, men man kan fortfarande uppnå en stark mod-undertryckning. Detta innebär att starkt antiguidade kaviteter kan användas till att åstadkomma singelmod-lasring, men leder alltid till högre tröskelströmmar. Dessa resultat har sammanfattats i paper C i publikationslistan nedan. Våra föreslagna designer har implementerats av ett antal grupper världen över och har bidragit till lägre tröskelströmmar och rekordhöga optiska uteffekter i blå mikrokavitetslasrar, kort sagt världens bästa mikrokavitetslasrar. [4-6]

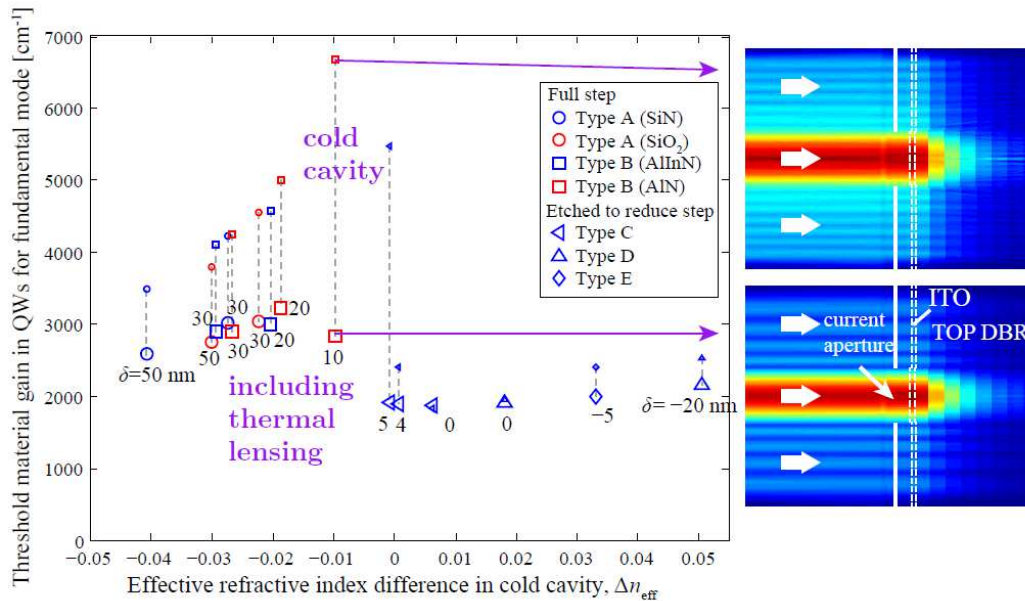


Fig. 2. Beräknat tröskelmaterialeffekt i tre kvantbrunnar för fundamentalmoden i de studerade kaviteterna. De större markörerna visar med termiska effekter och de mindre utan termiska effekter. Siffran bredvid varje markör indikerar det fysiska steget,  $\delta$ , för varje fall. De två figurerna till höger visar storleken på det högerpropagerande intrakavitetsfältet för fundamentalmoden med och utan termisk linseffekt inkluderad. Enbart kaviteten ovanför botten spegeln visas.

### Spektral och spatiell matching kombinerat med effektiv ströminjektion

**Projektgrupp:** projektledare Åsa Haglund (Professor), seniora forskare Jörgen Bengtsson (Docent) och Johan Gustavsson (Docent, Ehsan Hashemi (doktorand), Filip Hjort (doktorand), Michael Bergmann (doktorand). Samarbetspartners (men ej finansierade ifrån detta projekt):

D. Adolph, M. Stattin, T. Ive, O. Bäcke, A. Lotsari, M. Halvarsson, V. Desmaris, D. Meledin, B. Wickman, Chalmers Tekniska Högskola.

M. Goano och M. Calciati, Politecnico di Torino, Italien.

R. Yapparov och S. Marcinkevicius, Kungliga Tekniska Högskolan.

J. Enslin, T. Wernicke, M. Kneissl, Tekniska Universitetet i Berlin, Tyskland.

Den optimala botten spegeln är en som har en kombinerad hög optisk reflektivitet (broadbandig), hög termisk ledningsförmåga och hög vertikal elektrisk ledningsförmåga. I verkligheten innebär varje typ av spegel en kompromiss mellan dessa egenskaper, men de speglar som teoretiskt har störst möjlighet att erbjuda en bra kompromiss är epitaxiellt växta speglar. Därför har vi i projektet undersökt två typer av epitaxiellt växta speglar; av materialkombinationen AlN/GaN och ZnO/GaN.

Speglar av n-dopad AlN/GaN med olika materialkompositionella interlager för stress-kompensering har undersökts för att uppnå högkvalitativa optiska speglar utan sprickbildning. En översikt på dessa strukturer visas i Fig. 3. Dessa interlayers påverkan på den elektriska ledningsförmågan har undersökts. Speglarna växtes med molekylär-stålepitaxi på SiC substrat. Speglarna utan interlager hade en state-of-

the-art specifik resistans på  $0.044 \Omega\text{cm}^2$ , medan speglar med interlager visade på en högre resistans mellan  $0.16$  och  $0.34 \Omega\text{cm}^2$ . Trots denna rekord-låga resistivitet för en AlN/GaN-spegel så är det inte tillräckligt lågt för implementering i en mikrokavitetslaser där man önskar en resistivitet på  $10^{-4} \Omega\text{cm}^2$  till  $10^{-5} \Omega\text{cm}^2$  för att inte få ett för stort resistansbidrag ifrån botten spegeln. Dessa resultat är publicerade i papper D.

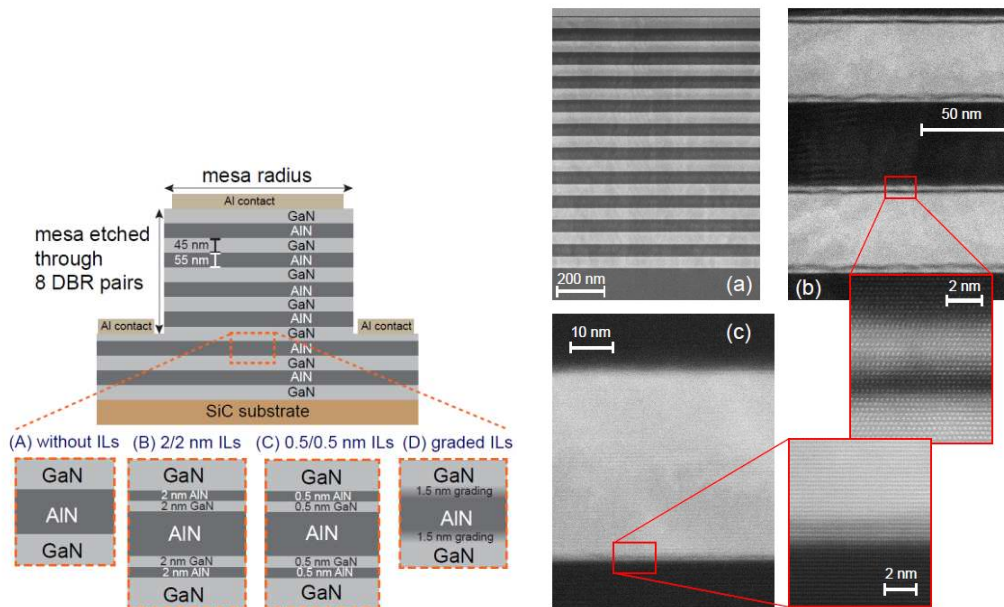


Fig. 3. Vänster: Si-dopade AlN/GaN DBR:er med olika kompositionella interlager (IL), inklusive en schematisk bild över den cirkulära topp-mesan med Al-kontakter. Till höger visas högupplösta transmissions-elektron-mikroskopsbilder över prov A, B och C.

Ett första steg mot att skapa speglar av ZnO/GaN har gjorts där den vertikala resistansen i strukturen har uppmätts och jämförts med simuleringar. Strukturen visas i en schematisk bild i Fig. 5 tillsammans med högupplösta elektronstrålemikroskopsbilder. Den totala uppmätta resistansen genom 3 speglar dominerades av lateral och kontaktresistans vilket satte en över gräns på  $10^{-4} \Omega\text{cm}^2$  för den vertikala specifika serieresistansen, se Fig. 5. En starkt bidragande faktor till den mycket låga resistansen är att de spontana och piezoelektriska fälten tar ut varandra varandra i Zn/GaN som är strainat i planet. Detta konfirmerades av elektriska simuleringar. Dessutom visar de elektriska simuleringarna att resistansen kan vara två storleksordningar lägre än uppmätt, vilket visar på en mycket lovande spegelteknologi för mikrokavitetslasrar. Dessa resultat är publicerade i papper B och en figur ur artikeln valdes ut av editorn som första-sida-figur till numret.

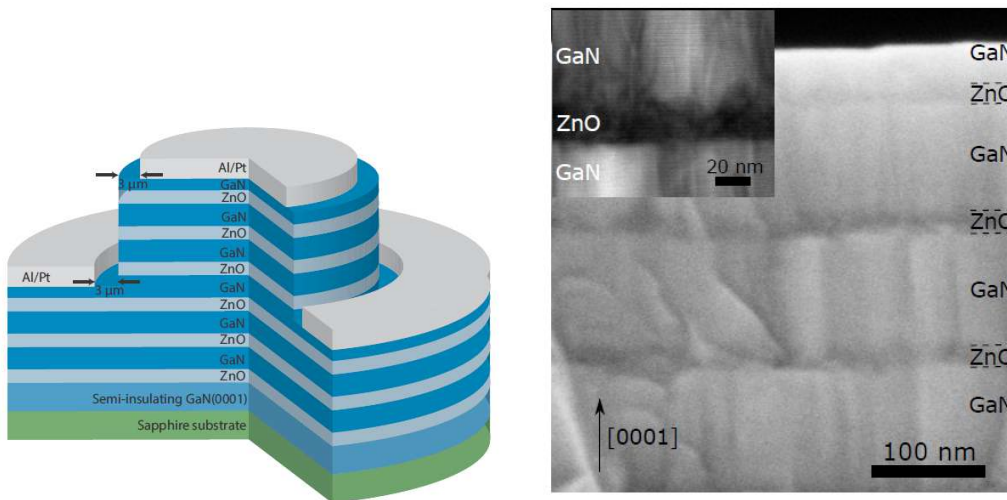


Fig. 4. Vänster: schematisk genomsnittsbild av en tre ZnO/GaN-par hög mesa med Al/Pt-kontakter. Höger: elektronstrålemikroskopbild på de översta tre ZnO/GaN-perioderna.

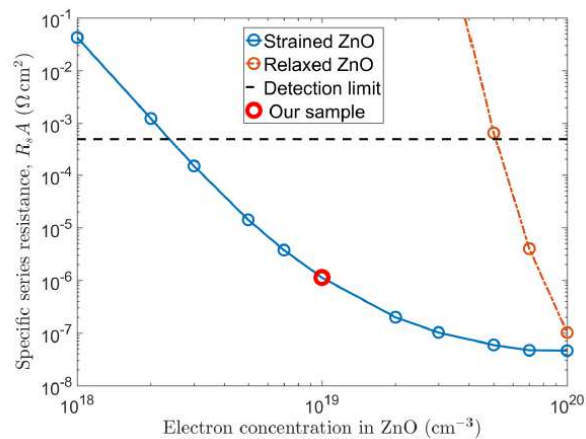


Fig. 5. Beräknad specifik serie-resistans för tre ZnO/GaN-par med olika dopkoncentrationer för relaxerad och strainad ZnO. Den röda ringen simuleringen av det realiserade provet och den sträckade horisontella linjen detektionsnivån som sätts av lateral och kontaktresistans på provet.

Det är mycket svårt att i verkligheten åstadkomma en spegel som har optimala optiska och elektiska egenskaper. Kompromissen resulterar ofta i en smalbandig spegel som gör det svårt att matcha resonansvåglängd till det smalbandiga hög-reflektiva spektrala området för spegeln. En alternativ approach som undersökts i projektet är att använda två dielektriska speglar. Dessa ger optimala optiska egenskaper, men de kan inte göras elektriskt ledande. För att möjliggöra användandet av två dielektriska speglar behöver man en metod för att ta bort substratet med nm-precision och efterlämna en spegelblank yta. Detta är mycket utmanande för så kallade III-nitrid-material som använts för blå lasrar då det är mycket svårt, om inte omöjligt att hitta någon våtkemi som selektivt kan ta bort ett offerlager i AlGaIn ifrån en GaN-laserstruktur. I paper A har vi tagit fram en sådan metod baserad på elektrokemisk etsning, där selektiviteten sätts av dopkoncentrationen. Vi har undersökt vilka morfologier som skapas i offerlagret



beroende på Al-koncentration i AlGaN-lagret samt pålagd spänning under den elektrokemiska etsningen. Vi kan selektivt etsa lager med upp till 50% Al-halt och åstadkomma i en yt-ojämnhet som är mycket lik den som det växta materialet har, d.v.s. etsningen skapar en nära perfekt yta. Resultaten sammanfattas i Fig. 6 nedan och är publicerade i papper A, som valdes ut av editorn och fick status "featured article".

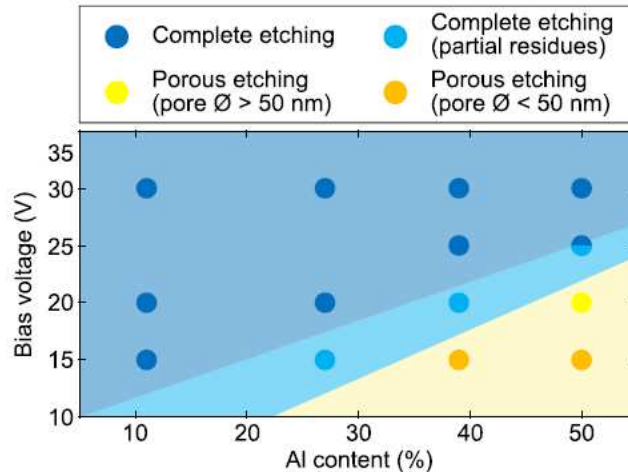


Fig. 6. Offerlagrets morfologi efter elektrokemisk etsning som funktion av pålagd spänning och aluminium-komposition av offerlagret.

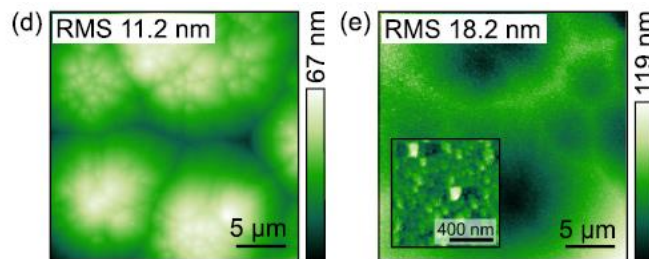


Fig. 7. a) Den oetsade topp-ytan (metall-polär) och b) den etsade ytan (N-polär).

## Diskussion

Våra designer för att undvika så kallad antiguidning i blå mikrokavitetslasrar har implementerats av flertalet grupper i världen och lett till världens bästa prestanda för dessa lasrar. Våra publikationer på området har citerats av ca 80% av forskarna inom området, vilket ytterligare visar på vikten av dessa resultat. De blå mikrokavitetslasrarna har under tidsramen för detta projekt fått en avsevärt förbättrad prestanda. Från början var energikonverteringsgraden 0.1%, men är nu ca 10%, d.v.s. en faktor 100 högre. Värt att nämna är att denna max-verkningsgrad på 10% uppnås vid höga strömtätheter på 10 000-tals A/cm<sup>2</sup>, medan lysdioder uppnår sin max-verkningsgrad vid enbart 10-tals A/cm<sup>2</sup>. En mikrokavitetslaser kan alltså erbjuda en högre optisk uteffekt ifrån samma chiparea och på så sätt spara värdefulla resurser i form av halvledarmaterial.

Flertalet företag talar nu om att använda dessa lasrar i adaptiva strålkastare till bilar, mikrolaserprojektorer i t.ex. mobiltelefoner etc. så även med dagens prestanda är

de av stort intresse. Ytterligare forskning och utveckling krävs dock för att vidare förbättra dessa lasrars prestanda, där vi tror att de bör kunna nå samma höga verkningsgrad runt 60% som visats för samma lasertyp som emitterar infrarött ljus. Först när de har nått en högre effektverkningsgrad än 10% så kommer de att kunna konkurrera med de effektiva blå lysdioderna och då erbjuda samma energibesparing, men med en mycket mindre resursförbrukning då en mindre chiparea behövs för att få samma optiska uteffekt.

## Publikationslista

För sammanfattning av de nedan publicerade artiklarna se Metod och resultatsektionen ovan.

### Referee-granskade artiklar i vetenskapliga tidskrifter

- A. M. Bergmann, J. Enslin, R. Yapparov, F. Hjort, B. Wickman, S. Marcinkevicius, T. Wernicke, M. Kneissl, and Å. Haglund, "Electrochemical etching of AlGa<sub>N</sub> for the realization of thin-film devices", *Applied Physics Letters*, vol.115, issue 18, (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5120397> DOI: 10.1063/1.5120397

Artikel A valdes ut av Editorn för *Applied Physics Letters* och fick utmärkelsen "Featured article". Den har också lyfts fram av *Semiconductor today*

[http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2019/nov/nims-211119.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2019/nov/nims-211119.shtml)

- B. F. Hjort, E. Hashemi, D. Adolph, T. Ive, O. Bäcke, M. Halvarsson, and Å. Haglund, "Vertical electrical conductivity of ZnO/GaN multilayers for application in distributed Bragg reflectors", *J. of Quantum Electronics*, vol. 54, no. 4, 2400406, 2018. (Figure selected for front cover.)
- C. E. Hashemi, J. Bengtsson, J. Gustavsson, M. Calciati, M. Goano, and Å. Haglund, "Thermal lensing effects on lateral leakage in GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser cavities", *Optics Express*, vol. 25, no. 9, pp. 9556-9568, 2017.
- D. E. Hashemi, F. Hjort, M. Stattin, T. Ive, O. Bäcke, A. Lotsari, M. Halvarsson, D. Adolph, V. Desmaris, D. Meledin, and Å. Haglund, "Effect of compositional interlayers on the vertical electrical conductivity of Si-doped AlN/GaN distributed Bragg reflectors grown on SiC", *Applied Physics Express*, vol. 10, no. 5, 2017.

### Referee-granskade konferens-presentationer

1. Åsa Haglund, Filip Hjort, Johannes Enslin, Munise Cobet, Michael A. Bergmann, Ehsan Hashemi, Tim Kolbe, Johan Gustavsson, Jörgen Bengtsson, Tim Wernicke, and Michael Kneissl, "Recent progress for blue VCSELs and

- challenges to move to UV”, SPIE Photonics West, OE107: Gallium nitride materials and devices XV, San Francisco, USA, Feb. 2020. (invited)
2. Åsa Haglund, Filip Hjort, Johannes Enslin, Munise Cobet, Michael A. Bergmann, Ehsan Hashemi, Tim Kolbe, Johan Gustavsson, Jörgen Bengtsson, Tim Wernicke, and Michael Kneissl, “Are blue and ultraviolet VCSELs a reality or just a dream?”, SPIE Photonics West, OE107: Gallium nitride materials and devices XV, San Francisco, USA, Feb. 2020. (invited)
  3. Tsu-Chi Chang, Ehsan Hashemi, Jörgen Bengtsson, Johan Gustavsson, Åsa Haglund and Tien-Chang Lu, “A GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with a high-contrast grating as the top mirror”, SPIE Photonics West, OE107: Gallium nitride materials and devices XV, San Francisco, USA, Feb. 2020.
  4. Åsa Haglund, Filip Hjort, Michael A. Bergmann, Jörgen Bengtsson, and Johan Gustavsson, “Pushing performance in blue and UV VCSELs by nanometer structuring”, International Symposium "Semiconductor Nanophotonics", Berlin, Germany, Nov. 2019 (invited).
- 
5. Filip Hjort, Maryam Khalilian, Filip Lenrick, Olof Hultin, Jovana Colvin, Marcus Bengths, Jörgen Bengtsson, Johan Gustavsson, Jonas Johansson, Rainer Timm, Reine Wallenberg, Jonas Ohlsson, Zhaoxia Bi, Åsa Haglund, Anders Gustafsson, and Lars Samuelson, “Quality factors of vertical cavities based on dislocation-free and atomically flat III-nitride hexagonal micro-prisms”, International Conference on Nitride Semiconductors, Bellevue, USA, July 2019.
- 
6. Maryam Khalilian, Filip Hjort, Filip Lenrick, Olof Hultin, Jovana Colvin, Marcus Bengths, Jörgen Bengtsson, Johan Gustavsson, Jonas Johansson, Rainer Timm, Reine Wallenberg, Jonas Ohlsson, Zhaoxia Bi, Åsa Haglund, Anders Gustafsson, and Lars Samuelson, “Growth of dislocation-free and atomically flat III-nitride micro-prisms”, International Vacuum Conference, Malmö, Sweden, 2019.
- 
7. Åsa Haglund, Michael Bergmann, Filip Hjort, Ehsan Hashemi, Jörgen Bengtsson, and Johan Gustavsson, “Blue and ultraviolet vertical-cavity surface-emitting lasers”, CLEO, San Jose, USA, May 2019. (invited)
- 
8. Åsa Haglund, Michael Bergmann, Filip Hjort, Ehsan Hashemi, Jörgen Bengtsson, and Johan Gustavsson, “Blue and ultraviolet thin-film light emitters”, UCSB-Chalmers workshop by AoA Materials, Gothenburg, Sweden, June, 2019. (invited)
- 
9. Michael A. Bergmann, Filip Hjort, Ehsan Hashemi, David Adolph, Martin Stattin, Tommy Ive, Jörgen Bengtsson, Johan Gustavsson and Åsa Haglund,

- “Towards ultraviolet and blue microcavity lasers”, Northern Optics and Photonics conference, Lund, Sweden, 2018.
- 
10. Åsa Haglund, E. Hashemi, F. Hjort, M. Bergmann, M. Stattin, D. Adolph, T. Ive, J. Bengtsson, J. Gustavsson, “Nanoscale structuring to improve laser performance”, Stanford Chalmers Workshop on Advancing Materials Innovatively, Chalmers University of Technology, Sweden, December 2017. (invited)
- 
11. Åsa Haglund, E. Hashemi, F. Hjort, M. Bergmann, M. Stattin, D. Adolph, T. Ive, J. Bengtsson, J. Gustavsson, ”Optical Feedback and Confinement in GaN-based Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers”, Energy Materials Nanotechnology, A22, Mauritius Nov. 2017. (invited)
- 
12. Michael A. Bergmann, Ehsan Hashemi, Björn Wickman, and Åsa Haglund, “Fabrication of smooth GaN nanomembranes for device integration by electrochemical etching”, Optics and Photonics in Sweden conference, Stockholm, Sweden, Oct. 2017.
- 
13. Filip Hjort, Ehsan Hashemi, David Adolph, Martin Stattin, Tommy Ive, Olof Bäcke, Mats Halvarsson, and Åsa Haglund, “Electrically conductive GaN-based distributed Bragg reflectors”, European Semiconductor Laser Workshop, P2, Copenhagen, Denmark, Sept. 2017.
- 
14. Michael A. Bergmann, Ehsan Hashemi, Björn Wickman, and Åsa Haglund, “Fabrication of smooth GaN nanomembranes for device integration by electrochemical etching”, International Conference on Nitride Semiconductors 12, B. 2.20, Strasbourg, France, July 2017.
- 
15. F. Hjort, E. Hashemi, D. Adolph, T. Ive, and Å. Haglund, “Electrically conductive ZnO/GaN distributed Bragg reflectors grown by hybrid plasma-assisted molecular beam epitaxy”, Gallium nitride materials and devices XII, Proc. of SPIE, 10104-37, Photonics West, San Francisco, USA, Jan/Feb. 2017.
- 
16. E. Hashemi, F. Hjort, M. Stattin, T. Ive, and Å. Haglund, “Effect of Interlayers on the Vertical Electrical Conductivity of Si-Doped AlN/GaN DBRs Grown by PA-MBE”, Optics and Photonics in Sweden, Linköping, Sweden, Nov. 2016.
- 
17. E. Hashemi, F. Hjort, M. Stattin, T. Ive, and Å. Haglund, “Effect of Interlayers on the Vertical Electrical Conductivity of Si-Doped AlN/GaN DBRs Grown by PA-MBE”, International Workshop Nitride Semiconductors, Orlando, USA, PS2.50, Oct. 2016.
- 
18. M. Gustavsson, J. Gustavsson, Y. Ma, Å. Haglund, S. Gustafson, ” Pulse transient Hot Strip technique– a unique method for measuring anisotropic

thermal transport properties in stacked nm-thick layers”, EMN meeting on photonics, A06, Barcelona, Spain, 2016. (invited)

---

19. Å. Haglund, E. Hashemi, J. Bengtsson, J. Gustavsson, S. Carlsson, M. Stattin, M. Calciati, M. Goano, “Progress and challenges in electrically pumped GaN-based VCSELs”, Proc. of SPIE, 9892-33, Conference 9892 Semiconductor Lasers and Laser Dynamics, SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium, April 2016. (invited)

---

  20. Å. Haglund, Ehsan Hashemi, Jörgen Bengtsson, Johan Gustavsson, Martin Stattin, Stefan Carlsson, Filip Hjort, M. Calciati, M. Goano, G. Cosendey, G. Rossbach, M. Glauser, and N. Grandjean, “Progress and challenges in electrically pumped GaN-based VCSELs”, Workshop on vertical-cavity lasers, Gothenburg, Sweden, 2016. (invited)

---

  21. Å. Haglund, E. Hashemi, J. Bengtsson, J. Gustavsson, S. Carlsson, M. Stattin, M. Calciati, M. Goano, G. Cosendey, M. Glauser, G. Rossbach, and N. Grandjean, “Electrically pumped GaN-based VCSELs”, VI Workshop on Physics and Technology of Semiconductor Lasers Krakow, Poland, October 2015. (invited)
- 

### **Kommande referee-granskade artiklar i vetenskapliga tidskrifter**

Intressant att notera är att på nästa stora vetenskapliga konferens inom vårt område, SPIE Photonics West i San Francisco i Feb. 2020, så har vår grupp bidragit till 50% av de resultat som har valts ut för att ge muntliga föredrag i sessionen om mikrokavitetslasrar. Vi har alltså uppnått många intressanta resultat på området inom det senaste året, varav följande kommer att publiceras i vetenskapliga tidskrifter under 2020:

- En blå elektriskt driven mikrokavitetslaser med ett hög-kontrast-gitters om ett alternativ till topp-spegeln. Detta är den första demonstrationen av en sådan laser i världen. Detta är ett samarbete med prof. Tien-chang Lu på NCTU in Taiwan.
- Prisma-baserade kaviteter för blå lasrar. En ny växt-metodik utvecklad i Prof. Lars Samuelsons grupp på Lunds Tekniska Högskola med vilken man kan framställa dislokationsfritt material. Vi har använt detta material för att tillverka laser-resonatorer och visar på uppmätta kvalitetsfaktorer (ett mått på de optiska förlusterna i resonatorerna) som är mycket lovande för blå mikrokavitetslasrar och som dessutom stämmer väl överens med våra simuleringar.

## Referenser, källor

- [1] Energimyndigheten, Hushåll – Belysning, hemelektronik och vitvaror - Belysning <http://www.energimyndigheten.se/Hushall/Din-ovriga-energianvandning-i-hemmet/Hembelysning/>
- [2] Energimyndigheten, Hushåll – Belysning, hemelektronik och vitvaror – Belysning – Lamptyper – LED-lampan <http://www.energimyndigheten.se/Hushall/Din-ovriga-energianvandning-i-hemmet/Hembelysning/Lamptyper/LED/>
- [3] J. J. Wierer, Jr. J. Tsao, and D. S. Sizov, *Physica Status Solidi C*, 1-4 (2014).
- [4] M. Kuramoto et al., *Appl. Phys. Lett.* **112**, 111104 (2018).
- [5] M. Kuramoto et al., *Appl. Phys. Expr.* **11**, 112101 (2018).
- [6] N. Hayashi et al., *Physica Status Solidi A*, 1700648 (2018).

## Bilagor

- *Administrativ bilaga*
- *Publicerade vetenskapliga artiklar*