

University of Groningen

## 2D materials and interfaces in high-carrier density regime

Ali El Yumin, Abdurrahman

DOI:  
[10.33612/diss.94903687](https://doi.org/10.33612/diss.94903687)

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*  
2019

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Ali El Yumin, A. (2019). *2D materials and interfaces in high-carrier density regime: a study on optoelectronics and superconductivity*. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.94903687>

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

# SAMENVATTING

Halfgeleidertechnologie wordt een essentieel onderdeel van het moderne leven. Sinds de opkomst van de kwantummechanica en de uitvinding van de transistor, is bijna elk aspect van de moderne samenleving afhankelijk van halfgeleider-elementen. Het gebruik van halfgeleiders is zo universeel dat toepassingen variëren van energieopwekking tot in krachtige supercomputers. Vooral op gebied van opto-elektronica zijn verschillende ontdekkingen en ontwikkelingen van nieuwe materialen gedaan om efficiënte en schaalbare apparaten voor de volgende generatie technologieën te verkrijgen. Om die reden is het studieveld met betrekking tot halfgeleiders continu bezig om de aard van nieuwe materialen te begrijpen.

2D-materialen zijn belangrijke voorbeelden die uitgebreid zijn bestudeerd in het afgelopen decennium. De uitvinding van grafeen in 2004 was een belangrijke doorbraak in materiaalwetenschap. De uitzonderlijke elektronische mobiliteit en de atomaire dikte zijn de belangrijkste eigenschappen van dit materiaal. Echter, het ontbreken van een bandkloof is een cruciaal nadeel van grafeen om de huidige door silicium gedomineerde halfgeleidertechnologie te vervangen. Dit stimuleert de verkenning van nieuwe gelaagde materialen anders dan grafeen, om een diversiteit aan bouwstenen te bieden voor apparaat technologie op basis van 2D-materialen.

Transition metal dichalcogenides (TMD's) zijn de meest veelbelovende kandidaat om de huidige halfgeleidertechnologie te vervangen. De gelaagde aard, vergelijkbaar met grafeen, en het bestaan een elektronische bandkloof in bepaalde verbindingen zoals  $WS_2$ ,  $WSe_2$ ,  $MoS_2$  en  $MoSe_2$  zijn van groot belang van deze 2D-materiaalgroep. Om nog maar te zwijgen over de supergeleidende (SC) TMD's die zijn ontdekt;  $NbSe_2$  en  $TaS_2$ , die meer variatie geven in bouwstenen voor 2D-materialen. Met de ontwikkeling van de 2D heterostructuur productiemethode, wordt de brede toepassing van 2D-materiaal apparaten onderzocht.

Dit proefschrift is gericht op het onderzoeken van opto-elektronische eigenschappen en elektrisch ladingsvervoer aan het grensvlak van twee verschillende elektronentoestanden in 2D TMDs. In dit proefschrift worden twee algemene ideeën uitgevoerd: p- en n-type halfgeleider interfaces, namelijk pn-overgang en supergeleidende metaalgrensvlakken. De realisatie van de ideeën is

gerelateerd aan de verwerking van de elektrische dubbel-laags transistor (EDLTs) configuratie waarin de hoge ladingsdichtheid ( $N_{2D} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) gemakkelijk toegankelijk is. In hoofdstuk 2 en 3 wordt de ontwikkeling van laterale 2D pn-junctie op basis van TMD-BN kunstmatige heterostructuur besproken waarin de laterale pn-interface wordt afgestemd door EDLT en conventionele halfgeleider gating te combineren. In hoofdstuk 4 wordt elektrisch transport in supergeleidend-normaal-metaal verbindingen van veld geïnduceerde paar gelaagd  $\text{MoS}_2$  supergeleider besproken. Hoofdstuk 5 toont de ontwikkeling van een nieuwe techniek in 2D heterostructuur fabricage technologie om hoogwaardige 2D heterostructuur apparaten te maken.

In **hoofdstuk 2** demonstreren we de ontwikkeling van een laterale 2D pn junction op basis van TMDs-BN kunstmatige heterostructuur. We ontwikkelden laterale 2D pn-diode en onderzochten de elektrische prestaties van de apparaten door de elektrostatische gate te moduleren. We maken gebruik van EDLT-configuratie voor toegang tot een hoge ladingsdrager dichtheid en veranderde de intrinsieke n-type TMD's in p-type. Uit onze waarnemingen bleek dat de elektrische prestatie laagdikte-afhankelijk is en een stabiele pn-overgangsgedrag vertoont in de dunnere lagen met als hoogste rectificatieverhouding 33000. In dikkere lagen werden de prestaties van het apparaat sterk beïnvloed door een onbedoelde geleidende onderlaag, waardoor extra kanalen voor een stroom met reverse-bias mogelijk werden. Verder werd een sterke en goed gedefinieerde elektroluminescentie (EL) waargenomen in de monolaaginrichting.

Het gebruik van dunnere laag TMD's is nodig om beter 2D diode elektrische prestaties te verkrijgen. In **hoofdstuk 3** hebben we monolaag TMDs gebruikt om tot een ultieme apparaat rendement te komen, sinds het elektronentransport verwacht was opgesloten te zijn in een tweedimensionaal systeem. Wij beschrijven de fabricage van een 2D zijdelingse pn-junctie op basis van een CVD gekweekte monolaag  $\text{WS}_2$  en hebben de apparaat architectuur zoals in het voorgaande hoofdstuk beschreven geïmplementeerd om een scherpe en goed gedefinieerde pn-interface te verkrijgen. De confocale microscopie foto van de elektroluminescentie (EL) bevestigd dat de zijdelingse 2D pn interface scherp en stabiel is. Bovendien hebben we de elektronische werking van de inrichting onderzocht, die efficiënte gate varieerbaarheid toont door een combinatie van ionische vloeistoffen en een high-k diëlektricum. Verder werden opto-elektronische prestaties en de correlatie met geïnduceerde ladingsdichtheid onderzocht. Wij observeerden dat de exciton soorten vanaf de EL-spectra sterk

afhankelijk zijn van de geïnduceerde ladingsdichtheid ratio tussen de p- en n-type kant van de p-n overgang.

De elektronische transportmeting van supergeleidend-normaal metaalgrensvlak in veld geïnduceerde supergeleidende MoS<sub>2</sub> is een focusdiscussie van **hoofdstuk 4**. Met behulp van de EDLT-methode kan de supergeleidende toestand van MoS<sub>2</sub> worden benaderd door het induceren van een hoge ladingsdichtheid ( $n_{2D} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ). Om de SC-kloof in de beperkte SC-toestand te karakteriseren, hebben we het tunneling-spectrum in de normaal-isolerende-SC (NIS) verbinding gemeten en de quasi-deeltjes pieken als een Andreev-reflectie waargenomen. Onze experimentele resultaten kunnen goed worden beschreven door middel van de theorie van Blonder-Tinkham-Klapwijk (BTK), die de grootte van de SC-kloof opleverde. Onze studie toont de modulatie van de SC-kloof in het bereik van  $\Delta = 0,8$  tot  $1,12$  meV als een functie van de ladingsdrager-dichtheid door de back-gate te moduleren. Daarnaast bestudeerden we de elektron-fonon-koppelingssinteractie in verschillende dragers dichtheden, wat de koppelingstoename in het mediumkoppelingbereik ( $\lambda_{e-ph} = 0.6 - 0.9$ ) aangeeft naarmate  $n_{2D}$  toeneemt.

Tot slot, in **hoofdstuk 5**, demonstreren we de ontwikkeling van de nieuwe 2D heterostructuur fabricagetechnologie, die wordt uitgevoerd in een hoog-vacuümomgeving ( $\sim 10^{-6}$  mbar) om hoogwaardige heterostructuur apparaten te realiseren. We beschrijven gedetailleerd het technische proces om 2D heterostructuren in vacuüm te maken, gevolgd door een evaluatie van monster kwaliteit door middel van AFM en spectroscopie. Het gefabriceerde monster vertoonde een schone en vlakke oppervlaktekwaliteit aangezien de gemiddelde waarde van de oppervlakteruwheid  $\sim 135$  pm is. Verder observeerden we scherpe bi-exciton-emissie met een lijnbreedte van  $4,9$  meV bij lage temperatuur ( $T = 5$  K) fotoluminescentie (PL) spectroscopie, welke de hoge kwaliteit van het monster bevestigen. Met de hoge vraag en snelle ontwikkeling van 2D-materiaaltechnologie zijn wij van mening dat onze poging om nieuwe fabricagetechnologie te ontwikkelen een belangrijke bijdrage zal zijn in 2D opto-elektronische toepassingen.

