

University of Groningen

## Electromagnetically induced transparency with localized impurity electron spins in a semiconductor

Chaubal, Alok

**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:*

2018

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

*Citation for published version (APA):*

Chaubal, A. (2018). *Electromagnetically induced transparency with localized impurity electron spins in a semiconductor*. University of Groningen.

### 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).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### 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.*

# Wetenschappelijke samenvatting

## Elektromagnetisch geïnduceerde transparantie met gelocaliseerde elektronspin van onzuiverheden in een halfgeleider

Dit proefschrift geeft een bijdrage aan een onderzoeksveld dat zich tot doel stelt te begrijpen hoe goed we de kwantumtoestanden van materie en elektromagnetische velden kunnen prepareren, controleren en detecteren. Dit onderzoeksveld wordt aan de ene kant gedreven door fundamentele vragen die nog niet volledig zijn beantwoord: kunnen we de overgang van kwantumfysica naar klassieke fysica die we waarnemen met verschillende materiaalsystemen beter begrijpen, en wat zijn de grenzen die bestaan voor het krijgen van puur kwantummechanisch gedrag bij systemen die specifiek hiervoor zijn ontworpen? Aan de andere kant wordt dit veld voortdurend geïnspireerd door toepassingsvoorstellen vanuit de kwantuminformatie wetenschap. Deze veronderstellen dat de toestand van een informatie-*bit* (die klassiek alleen in de toestand 0 of 1 kan zijn) zich kwantummechanisch kan gedragen (zodat de bit in een kwantumtoestand kan zijn die tegelijk 0 en 1 is). De prestaties van kwantuminformatie-verwerking kunnen ontzettend ver uitstijgen boven de prestaties van klassieke informatieverwerking. Echter, het is op dit moment nog een wetenschappelijke uitdaging om kwantuminformatie-systemen te realiseren die groot en stabiel genoeg zijn voor daadwerkelijke toepassing in de maatschappij. Net als voor de fundamentele vragen, is voor vooruitgang hier behoefte aan beter inzicht in hoe een materiaalsysteem zuiver kwantummechanisch gedrag kan hebben dat slechts zwak en langzaam wordt verstoord door ruis vanuit zijn omgeving.

Het onderzoek dat dit proefschrift presenteert richtte zich op vragen met relevantie voor dit onderzoeksveld, door met lasers de kwantumtoestand van de spin van elektronen in een halfgeleider te controleren. Hiermee richtte het onderzoek zich op het realiseren van kwantuminformatie-systemen met halfgeleidertechnologie, waarvoor geldt dat het opschalen van een kleine basiseenheid naar een groot systeem waarschijnlijk makkelijker is dan voor andere materiaalsystemen. De

focus lag op de spin van donor-elektronen, die als gelokaliseerde enkel-elektron-systemen voorkomen bij donor-atomen (bewust toegevoegde onzuiverheden) in de halfgeleider galliumarsenide (GaAs). De keuze voor dit materiaalsysteem was gebaseerd op het feit dat GaAs zeer goede optische eigenschappen heeft, en het feit dat dit materiaal gegroeid kan worden als kristallen die extreem zuiver zijn en een bijna perfecte kristalstructuur hebben.

Een centrale thema in dit promotieonderzoek was de vraag of elektromagnetisch geïnduceerde transparantie (EIT) kan optreden met de spin van donor-elektronen in GaAs. Dit effect, EIT, was al gerealiseerd en uitgebreid bestudeerd met laser-controle van atoomdampen, maar was nog vrijwel niet onderzocht met kwantumsystemen in vaste stof. EIT is het verschijnsel dat het (bijna) resonant aandrijven met lasers van een elektronische overgang in een medium niet leidt tot een resonante absorptie, maar dat de laserbundel zich door het medium voortplant als bij een transparant materiaal. Dit treedt dan op omdat een tweede laser het medium ook beïnvloedt. Dit kan optreden wanneer twee lasers elk een overgang aandrijven vanuit één van twee spintoestanden naar dezelfde geëxciteerde toestand. Het elektronische systeem wordt dan in een controleerbare kwantum-superpositie toestand van de twee spintoestanden geduwd. De dynamica van het aangedreven systeem geeft dan geen overgangen naar de geëxciteerde toestand omdat de twee parallelle excitatie-routes destructief met elkaar interfereren. EIT vormt de basis van veel kwantum-optische controlemethodes die gebruik maken van langlevende spintoestanden die aan optische signaalvelden moeten worden gekoppeld.

Na een inleidend hoofdstuk, presenteert *Hoofdstuk 2* een benadering voor, en succesvolle demonstratie van EIT met een ensemble van donor-gebonden elektronspins in GaAs. De aanpak maakt gebruik van optische overgangen vanuit de Zeeman-opgesplitste elektron-spintoestanden van de donoren naar een geëxciteerde toestand waarbij er een extra elektron-gat paar gelokaliseerd is bij het donor-atoom (donor-gebonden exciton). De kwaliteit van de spectrale verschijning van EIT kon worden gebruikt om te bepalen dat de defaserings-tijd voor de elektronspin 2 ns was. Het gedrag van de EIT resonantie in het spectrum gaf ook aan dat de elektronspin-coherentie beperkt wordt door koppeling van de elektronspin met de spins van vele kernen in het GaAs rooster, in de directe omgeving van elk donor-atoom (hyperfijn-interactie).

In het volgende *Hoofdstuk 3* rapporteren we verder onderzoek naar de optische overgangen tussen de grondtoestand van de donor en de donor-gebonden-exciton toestanden. Onze benadering voor EIT geeft ook een methode om met

---

zeer hoge resolutie optische spectroscopie uit te voeren voor deze overgangen met een transmissie-experiment. De resultaten hiervan geven niet alleen een bijdrage aan lopend fundamenteel onderzoek naar de eigenschappen van donor-gebonden-exciton systemen, maar zijn ook relevant voor het optimaliseren van EIT-controle met dit materiaalsysteem. We vergelijken onze resultaten met bestaande theorie, en concluderen dat de bestaande modellen nog niet volledige onze waarnemingen kunnen beschrijven. Tegelijkertijd leggen onze resultaten wel vast welke optische overgangen geschikt zijn voor EIT, en hoe de overgangen naar andere dichtbij gelegen toestanden van het donor-gebonden-exciton systeem mogelijk invloed uitoefenen op het gedrag van EIT.

*Hoofdstuk 4* van dit proefschrift beschrijft onderzoek naar de vraag hoe EIT met donor-elektronen in GaAs zowel invloed kan uitoefenen op, als de effecten kan weergeven van de interacties tussen elke donor elektronspin en het ensemble van kernspins in zijn directe omgeving (hyperfijn-interactie). Onze waarnemingen laten zien dat EIT dynamische nucleaire polarisatie (DNP) zowel kan aansturen als meten. DNP kan optreden als men de elektronspin-polarisatie uit thermisch evenwicht brengt (hetgeen we kunnen doen met EIT-controle), terwijl relaxatie van de elektronspin-polarisatie naar zijn evenwichtswaarde nucleaire spinpolarisatie kan aandrijven (de hyperfijn-interactie geeft elektron-nucleaire spin flip-flop processen als relaxatieproces). Omdat nucleaire spinpolarisatie invloed heeft op de waarde van de energie-opsplitsing tussen de twee elektronspintoestanden, moet deze ook zichtbaar zijn in de spectrale weergave van het EIT effect. Onze waarnemingen laten inderdaad zien dat EIT kan worden gebruikt voor het beïnvloeden en volgen van de opbouw en relaxatie van DNP. Deze resultaten zijn van belang als een eerste stap voor de realisatie van lasercontrole die nucleaire spins in een toestand brengt die minder defasering geeft voor de elektronspin coherentie.

De *Hoofdstukken 5 en 6* rapporteren het ontwerp, ontwikkelen en testen van specifieke meetinstrumentatie die nodig was voor het onderzoek van de voorgaande hoofdstukken. Alle experimenten zijn uitgevoerd in een helium-bad-cryostaat, waarbij een magneetveld tot 9 Tesla kon worden aangelegd in het meetvolume. Voor het aanleggen van goed gedefinieerde laserbundels in de GaAs onderzoeksmaterialen hebben we een benadering ontwikkeld met polarisatie-behoudende optische fibers en een compacte confocale microscoop in de cryogene meetruimte, met piezo-motoren voor het scherp stellen van de optische focus. Onze eerste experimenten gebruikten voor het detecteren van optische signalen fotodiodes binnenin de cryogene meetruimte. In de tweede helft van dit pro-

motieonderzoek is aan dit systeem de mogelijkheid toegevoegd om optische signalen (van transmissie door GaAs, of emissie door GaAs) ook vanuit de cryostaat naar buiten te voeren. Dit is van belang voor betere detectie van de optische signalen, en betere signaalanalyse. Hiermee is het mogelijk de EIT spectra veel sneller te meten, wat verdergaand onderzoek naar kwantum-optische effecten en DNP met het donor-elektron materiaalsysteem in GaAs mogelijk maakt.