

University of Groningen

## Quantum Optical Control of Donor-bound Electron Spins in GaAs

Sladkov, Maksym

**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:*

2011

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

*Citation for published version (APA):*

Sladkov, M. (2011). *Quantum Optical Control of Donor-bound Electron Spins in GaAs*. s.n.

### 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.

# Samenvatting

Donor-gebonden elektron-spins in GaAs is een interessant systeem voor het experimenteel bestuderen hoe quantum informatie kan worden opgeslagen in een quantum toestand bestaande uit de collectieve excitatie van een verzameling spins. Dergelijke verzamelingen elektron-spins combineren een redelijk lange coherentie tijd met goed gedefinieerde optische transitities, en kunnen daardoor worden gebruikt als een medium voor het bestuderen van optische transitities in quantum systemen en het onderzoeken van optisch quantum-geheugen.

In deze dissertatie laten we zien dat dit idee haalbaar is door middel van experimenteel werk dat de donor-gebonden elektron-spins aanslaat met behulp van quantum-optische technieken. Deze resultaten leveren een basis voor toekomstige experimenten welke gericht zijn op de preparatie en het bestuderen van niet-lokale quantum-entanglement tussen collectieve spin-excitaties van twee verschillende verzamelingen, wat gerealiseerd kan worden met quantum-optische technieken.

In de beschreven experimenten hebben we gebruikt dat elektron-spin verzamelingen optische geadresseerd kunnen worden met loodrecht-op-het-vlak propagerende optische controle en signaalvelden. De gebruikte materialen zijn gemaakt met behulp van standaard epitaxiale groeitechnieken (MBE) voor GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructuren. We analyseerden dat een optimaal systeem bestaat uit *n*-GaAs waarin de dichtheid van Si-donoren ongeveer  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  is. Dit resulteert in een medium met een optische dichtheid van  $OD = 1$ . Enerzijds is dit een belangrijke benchmark aangezien de implementatie van verscheidene quantum-geheugen applicaties  $OD$  waarden vereisen groter dan 1. Anderzijds zorgt dit er ook voor dat elk donor-gebonden electron zich gedraagt als een gesoleerd systeem, zonder significante interactie met zijn naastliggende donors.

We kunnen elektron-spin toestanden aanslaan binnen verzamelingen bestaande uit drie quantum-toestanden met optische transitities die corresponderen tot het

exciteren van donor-gebonden excitons ( $D^0 X$  systemen). Deze transitie ontspringt uit twee Zeeman-gespleten spin toestanden van donor-gebonden elektronen ( $D0$  systemen). Selectieve controle over deze twee transitie is mogelijk door middel van de polarisatie selectie-regels welke van nature aanwezig zijn in dit systeem. Deze transitie zijn ook zeer nauw wat ons de noodzakelijk spectrale gevoeligheid verschaft.

Om onze optische experimenten uit te voeren hebben we een confocale microscoop met fibers ontworpen en gerealiseerd welke gebruikt kan worden in cryostatens waarin sterke magneetvelden aanwezig zijn. We hebben een modulair ontwerp gemaakt dat gebruikt kan worden in zowel een Helium-bad cryostaat (4.2 K) als een zgn. dilution-refrigerator (met een basistemperatuur kleiner dan 20 mK). Faraday rotaties in optische materialen zijn voorkomen door het gebruiken van een polarisatie-behoudende fiber en door het licht orthogonaal aan het magneetveld door het sample volume te sturen. Hierdoor kunnen wij ook experimenten in de Voigt-geometrie uitvoeren, wat verscheidene voordelen heeft. Door experimenten te doen op een verzameling donor-gebonden elektronen in GaAs hebben we laten zien dat het mogelijk is een kleine spot op elk gewenst punt van het sample kunnen richten door het focussen van een optisch controle-veld. We hebben ook vastgesteld dat we licht met een pure lineaire polarisatie kunnen schijnen op een sample, en dat ons instrument optische experimenten kan uitvoeren op milliKelvin temperatuur zonder al te veel opwarming.

We hebben spectroscopische metingen uitgevoerd om de optische-selectie aan te tonen en hebben Electromagnetische genduceerde transparantie (EIT) gedemonstreerd. Dit laat zien dat dit medium geschikt is voor quantum-optische technieken welke nodig zijn voor quantum-geheugen functies en het prepareren van een niet-lokale entanglement met verzamelingen elektron-spins. We zagen dat de kwaliteit van de Electromagnetische genduceerde transparantie gelimiteerd is door de electron-spin dephasing-tijd. De electron-spin dephasing-tijd is  $T_2^* \approx 2$  ns welke gelimiteerd is door hyperfijn-koppeling aan fluctuerende kern-spins. Tegelijkertijd levert deze hyperfijn-koppeling een manier om de kern-spin omgeving te controleren door middel van Dynamische Kern polarisatie (DNP). De EIT spectra zijn een gevoelige probe om te zien hoe DNP de fluctuaties in en het gemiddelde van de kern-spin polarisatie. Niettemin levert het optisch aanslaan van de  $D0$  transitie veel zwakkere DNP effecten op dan in elektron-spin resonantie experimenten bestaande uit  $D0$  systemen en gerelateerde optische experimenten aan quantum dots, en een volledig fysisch plaatje van de DNP effecten in ons systeem.

Het laatste hoofdstuk uit deze dissertatie beschrijft een experiment welke de optische preparatie met ultrakorte pulsen van een arbitraire coherente donkere-toestand van donor-gebonden elektronen onderzoekt, op een tijdschaal welke veel korter is dan de radiatieve levensduur van het systeem. We hebben een theo-

retisch model ontwikkelt welke de  $D0$  systeem beschrijft als een 4-toestand systeem (twee  $D0$  toestanden en twee  $D0X$  toestanden). In dit model tonen we het mechanisme achter de preparatie van coherente donkere toestanden aan, welke bestaat uit een twee-foton resonant Raman proces. Ondanks dat dit model de resultaten verklaart, hebben we een ultrakorte relaxatietijd moeten introduceren voor intra-toestand relaxatie in het  $D^0X$  complex om het verschil in gevoeligheid van het systeem voor de gepolariseerde probe en pomp te verklaren. Het bestaande model en de experimenten adresseren niet de vraag hoe de coherente donkere-toestanden zich evolueren wanneer het systeem al een bepaalde hoeveelheid coherentie bezat. Meer experimentele en theoretisch onderzoek is nodig om deze vraag te beantwoorden.

Met behulp van deze mogelijkheid tot het creëren van donkere-toestanden konden we een initiale systematische studie doen naar de spin dynamica aan een verzameling elektron-spins gebonden aan neutrale donoren in GaAs door het gebruiken van een tijdsopgeloste pomp-probe Kerr experiment. Door het resonant exciteren van de  $D0 - D^0X$  transities met een enkele optische puls was het mogelijk een gedefinieerde elektron-spin coherentie te genereren en de dynamica hiervan in de tijd te volgen. We zagen dat de spin coherentie tijd sterk afhankelijk is van de hoeveelheid fotonen in de excitatie puls en over het algemeen afneemt bij sterkere pulsen.

Het werk beschreven in deze dissertatie is een eerste stap naar verscheidene quantum-optische experimenten aan elektron-spin verzamelingen. De observatie van EIT stelt mensen in de gelegenheid om verdere experimenten uit te voeren welke zich richten op behalen van entanglement tussen de quantumtoestand van een optische puls en de toestand van het elektron-spin verzameling. Een hoogst interessante andere richting bestaat uit het vergroten van de spin-dephasing tijd door middel van optische controle van de kern-omgeving van de elektronen-spins. De resultaten in deze dissertatie leveren de experimentele technieken welke benodigd zijn voor deze studies. Het groter maken van spin-dephasing tijd dan de kern-spin gelimiteerde  $T_2^* = 2$  ns waarde is van groot belang, aangezien het direct toegang geeft tot veel groter scala aan experimenten dat de quantum-optische toepassingen onderzoekt van laaggedoteerde  $n$ -GaAs.

