
Summary

This thesis is devoted to silicon-based spintronic devices, and describes the investigation of the issues for the development of such devices, and provides solutions towards realization thereof. By combining ferromagnetic properties and semiconductor characteristics and using the spin of the electron, semiconductor-based spintronics opens up the possibility to realize novel electronic devices. One example is the silicon spin-MOSFET, a gate-controlled magneto-resistive device with a silicon channel and a ferromagnetic source and drain, in which the channel conductance can be modulated by the relative alignment of the source and drain magnetization. Silicon is most attractive as the material for the semiconductor channel not only because of its use in mainstream semiconductor technology, but also because Si is expected to have a long spin lifetime.

For the realization of this device and the observation of magnetoresistance (MR) between source and drain, the electrical injection, transport, and detection of spin-polarized carriers in Si are required. This, in turn, requires proper design of the contacts between the ferromagnetic source/drain and the semiconductor, as these determine the communication of the spin information between the channel and the ferromagnetic electrodes. This thesis starts by outlining what the requirements are for the ferromagnetic metal/ tunnel barrier/ Si (FM/I/Si) contacts in order to allow the observation of MR in such devices. These are a suitable resistance-area (RA) product, high tunnel spin-polarization (TSP), and controlled magnetic switching.

To examine these requirements, FM/ Al_2O_3 / Si structures are studied. It is found that the observation of MR in a Si spin-MOSFET is not possible with such FM contacts if common ferromagnetic metals such as Co and NiFe al-

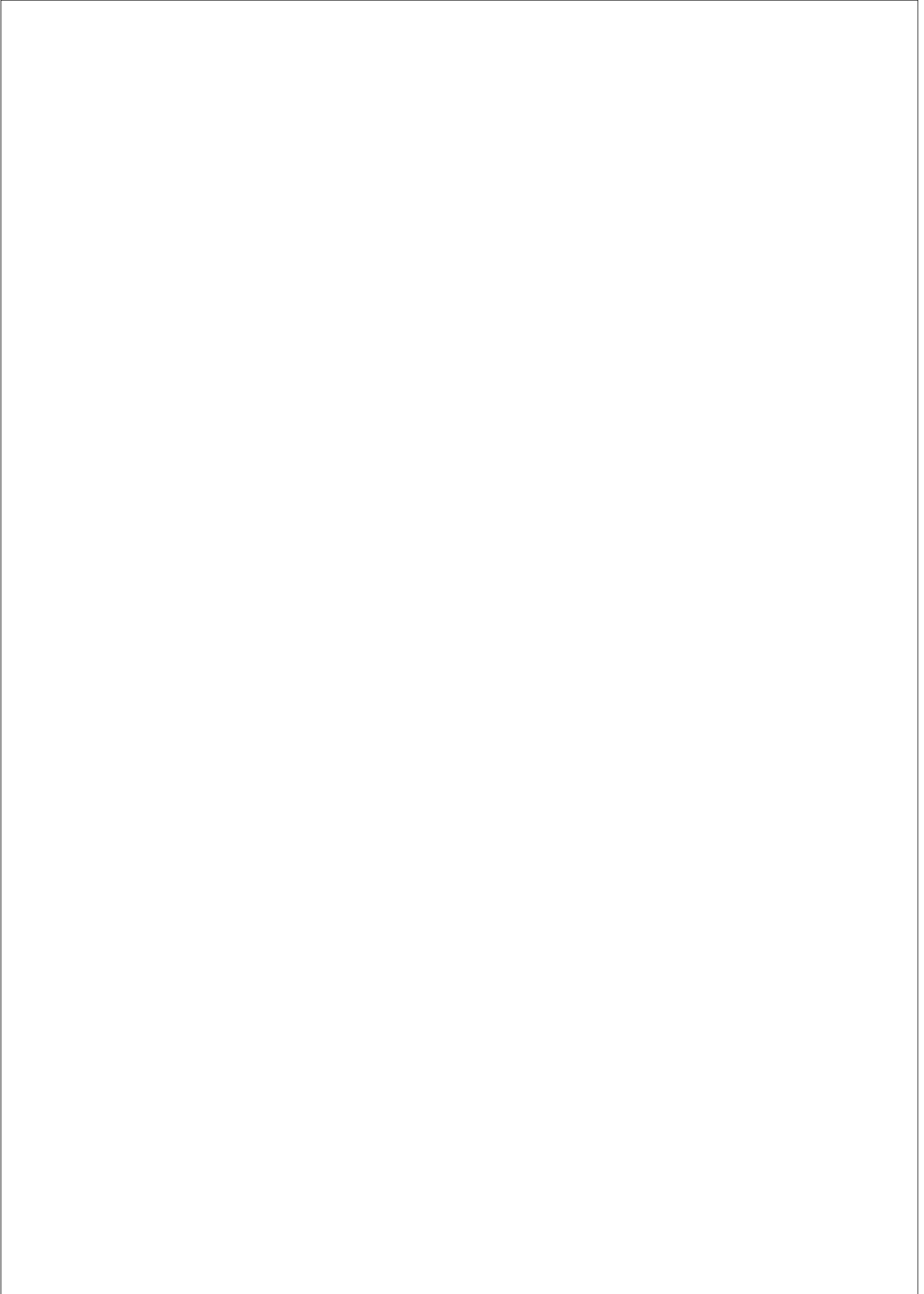
loys are used. Also, the conventional method of adjusting the tunnel barrier thickness to control the tunnel conductance is found to be ineffective. The resistance of FM/I/Si contacts with Co and NiFe alloys is 4 to 8 orders of magnitude too large. Schottky barrier formation in the FM/I/Si contacts is identified as the main reason.

This thesis presents a solution to this problem by interface engineering of spin tunnel contacts using a sub-nm interfacial nanolayer, bridging the ferromagnetic metal and the Si channel. Two approaches are introduced and demonstrated. The first approach involves a nanolayer of a ferromagnetic material with a low work function, inserted at the magnetic electrode side of the contact. It is demonstrated that FM/I/Si contacts with Gd-based low-work-function ferromagnetic electrodes have greatly reduced RA products, because the Schottky barrier is effectively removed. Moreover, by adjusting the thickness of the nanolayer, tuning of Schottky barrier height and thereby the RA product can be achieved over 8 orders of magnitude. Simultaneously, it is demonstrated that a reasonable tunnel spin-polarization is still preserved, although some improvement in the room temperature values would be desirable. A few material modifications are therefore also studied, although many more options are still to be explored.

The second approach to control the RA product of the FM/I/Si contacts uses alkali-metal (Cs) coverage of the Si surface prior to tunnel barrier preparation. This is also found to suppress the Schottky barrier height efficiently, due to the modified pinning position of the Fermi level at the oxide/Si interface. By combining the second "interface chemistry" method with the low work-function approach, one has complete control of the RA product as well as potential energy profile of spin tunnel contacts to Si. Especially, an inverted band bending can be obtained in FM/ Gd/ Al_2O_3 / Cs/ Si contacts, which indicates the possibility of the formation of two-dimensional electron gas at the n -type Si surface.

Following this, the thesis discusses device-related issues such as proper geometry for the MR observation, where the interface-engineered tunnel contacts are integrated into a full device. Because the spin-MOSFET is based on the two-terminal MR response, stray field effects in the Si channel should be carefully minimized. Also the magnetic properties of nano-scale magnetic elements are investigated, which is needed to design the ferromagnetic source and drain electrodes. It is concluded that with the interface-engineered spin-tunnel contacts developed here, the MR in a full device with a Si channel and

two FM contacts is expected to be observable even if the spin lifetime in the Si is in the sub-nanosecond range. Hence, the spin-tunnel contacts described in this thesis raise prospects for the realization of the Si spin-MOSFET. Moreover, the approaches presented here can be extended to other elements, alloys and compounds, opening up a whole new class of materials for spin-tunnel junctions. The methods developed here to engineer spin-tunnel contacts to Si can be generally applied to semiconductor-based spintronic devices, low RA product applications of magnetic tunnel junctions, but also to metal gates in MOSFETs, and, in fact, to many devices where the work function is important.



Samenvatting

Dit proefschrift gaat over spin-elektronica componenten gebaseerd op silicium en beschrijft onderzoek naar de belangrijkste aspecten en knelpunten voor de ontwikkeling van silicium spintronica componenten, en de oplossingen daarvoor. Door eigenschappen van magnetische materialen en halfgeleiders te combineren en gebruik te maken van de spin van het elektron, geeft halfgeleider spintronica nieuwe mogelijkheden voor de ontwikkeling van elektronische componenten. Een voorbeeld is de Si spin-MOSFET, een spin-transistor met een Si kanaal en twee ferromagnetische contacten, waarbij de geleiding door het kanaal tussen de contacten kan worden beïnvloed via de relatieve oriëntatie van de magnetisatie van beide contacten. Silicium is het aangewezen materiaal voor een spin-transistor, daar het de bestaande halfgeleider technologie domineert, en bovendien kan worden verwacht dat de levensduur van de spin van elektronen in Si zeer lang is.

Voor de ontwikkeling van dergelijke silicium componenten met een magnetoweerstand effect zijn de elektrische injectie, transport en detectie van spin-gepolariseerde ladingsdragers in Si vereist. Dit stelt specifieke eisen aan het ontwerp van de ferromagnetische contacten met het Si, want de contactgrenzen spelen een bepalende rol in de communicatie van de spin informatie tussen ferromagneet (FM) en halfgeleider. Dit proefschrift begint met de specificatie van de eisen die worden gesteld aan de ferromagneet / tunnel isolator / Si contacten zodat een magnetoweerstand kan worden verkregen. Deze eisen zijn een geschikte waarde van het product van weerstand en oppervlak, een hoge waarde voor de tunnel spin-polarisatie, en het gecontroleerd schakelen van de magnetisatie van de contacten.

Ten einde deze eisen te bestuderen zijn FM/Al₂O₃/Si gemaakt. Er is

gevonden dat met zulke contacten, indien daarvoor conventionele magnetische materialen zoals Co en NiFe legeringen worden gebruikt, het niet mogelijk is een significant magnetoweerstand effect te bereiken in een Si spin-MOSFET. Verder blijkt dat de traditionele methode om de tunnel weerstand in te stellen op de gewenste waarde, via de dikte van de tunnel isolator, niet werkt voor zulke contacten. De weerstand van FM/ Al_2O_3 /Si contacten met Co of NiFe legeringen is 4 tot 8 ordes van grootte te hoog, waarvoor de vorming van een Schottky barrière als de oorzaak is gevonden.

Dit proefschrift beschrijft de ontwikkelde oplossing voor dit fundamentele probleem, waarbij de specifieke eigenschappen van de spin-tunnel contacten gecontroleerd worden aangepast door introductie van een zeer dunne nanolaag van een speciaal materiaal in het contact gebied. Hiermee wordt een brug geslagen tussen het ferromagnetische materiaal en het silicium. Twee verschillende manieren zijn bedacht en verwezenlijkt. In de eerste methode wordt een nanolaag van een ferromagnetische materiaal met een lage werkfunctie aangebracht tussen de ferromagnetische elektrode en de Al_2O_3 tunnel isolator. Door gebruik te maken van een laagje van minder dan 1 nm gemaakt van Gd, een magnetisch materiaal met een zeer lage werkfunctie, is laten zien dat FM/ Al_2O_3 /Si contacten met een veel lagere weerstand kunnen worden verkregen, omdat de Schottky barrière wordt verwijderd. Verder is laten zien dat door de dikte van de Gd nanolaag te variëren, de hoogte van de Schottky barrière en daarmee de weerstand van de contacten kan worden ingesteld over een bereik van 8 ordes van grootte. En, daarbij is het tevens mogelijk gebleken een redelijk grote waarde voor de tunnel spin-polarisatie te behouden, alhoewel het wenselijk is de verkregen waarde bij kamertemperatuur nog wat te verbeteren. Hiervoor is een begin gemaakt door een beperkt aantal materiaal aanpassingen te bestuderen, maar vele andere materialen zijn nog mogelijk.

De tweede methode om de contact eigenschappen in te stellen, maakt gebruik van een dunne laag van het alkali metaal cesium, aangebracht op het silicium oppervlak voordat de Al_2O_3 isolator wordt gedeponereerd. Gevonden werd dat ook dit leidt tot een sterke reductie van de Schottky barrière hoogte. In dit geval wordt dat bewerkstelligd door de verandering van de energetische positie van de toestanden aan het oxide/Si grensvlak, waardoor de positie van het Fermi niveau verschuift. Door deze "grensvlak chemie" methode te combineren met de eerste methode gebaseerd op magnetische materialen met lage werk functie, wordt complete controle verkregen over de weerstand en het energie profiel van spin-tunnel contacten op Si. In het bijzonder kan een

geïnverteerde band buiging worden verkregen in FM/ Gd/ Al₂O₃/ Cs/ Si contacten, waarbij de mogelijkheid tot de vorming van een twee dimensionaal elektronen gas ontstaat aan het grensvlak van Si en het tunnel oxide.

Vervolgens is gekeken naar andere aspecten die van belang zijn voor het functioneren van een Si spin-MOSFET met daarin geïntegreerd de ontwikkelde spin-tunnel contacten. De optimale geometrie van de transistor voor de observatie van magnetoweerstand is bekeken, waarbij het minimaliseren van magnetische strooivelden van de contacten een belangrijk aspect is. Ook zijn de magnetische eigenschappen van magnetische elementen met afmetingen op nanoschaal bestudeerd, waarmee de ferromagnetische contacten van de spin-MOSFET kunnen worden ontworpen. De conclusie is dat door gebruik te maken van de in dit proefschrift ontwikkelde spin-tunnel contacten, het mogelijk wordt om een meetbaar magnetoweerstand effect te verkrijgen in een silicium spin-MOSFET zelfs als de spin levensduur van de ladingsdragers in het Si minder dan een nanoseconde is. Dus, de hier ontwikkelde magnetische tunnel contacten met instelbare eigenschappen maken de weg vrij naar een magnetische transistor gebaseerd op spin-transport in silicium. Voor deze nieuwe methoden kan worden geput uit een breed scala van elementen, legeringen en stoffen, waarmee een geheel nieuwe klasse van materialen voor magnetische tunnel contacten is geïntroduceerd. De in dit proefschrift ontwikkelde methoden om de eigenschappen van magnetische contacten op silicium gecontroleerd in te stellen, kunnen in zijn algemeenheid worden toegepast in halfgeleider spintronica componenten en magnetische tunnel juncties, maar ook in toekomstige generaties van niet-magnetische halfgeleider structuren en in diverse andere componenten waarin de werkfunctie een rol speelt.