



Doctoral Thesis

## Magnetic exchange-coupling across amorphous semiconductors

**Author(s):**

Briner, Beat G.

**Publication Date:**

1994

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000941672> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 10465

# Magnetic exchange-coupling across amorphous semiconductors

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

Beat G. Briner  
dipl. phys. ETH  
born on February 16th, 1964  
citizen of Zurich (Switzerland)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H.C. Siegmann, examiner  
Prof. Dr. J.W. Blatter, co-examiner  
Prof. Dr. M. Landolt, co-examiner

February 1994

# Abstract

This study widens the well established research field of oscillatory exchange coupling in metallic multilayers to heterostructures with amorphous semiconductors. It shows that exchange coupling persists beyond the constraints of a crystalline and metallic spacer structure and it opens a door towards the development of ‘artificial’ magnets with externally controllable properties.

We present measurements of magnetic exchange-coupling carried out on trilayers with amorphous silicon, germanium, silicon-monoxide and bismuth spacer-layers. As experimental tool we have built a magnetometer based on Spin Polarized Secondary Electron Emission. This instrument allows growth and characterization of samples under UHV conditions and at temperatures down to 40 K. The high surface sensitivity of SPSEE enables us to probe only the topmost magnetic layer of a heterostructure.

We observe that two ferromagnetic Fe- or Ni-layers separated by a barrier of a-Si evaporated at  $T = 50$  K exhibit exchange coupling for  $d_{Si}$  up to 60 Å. Antiferromagnetic coupling occurs for  $14 \text{ Å} < d_{Si} < 22 \text{ Å}$  and again for  $d_{Si} = 45 \text{ Å}$ . The coupling strength of about  $5 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^2$  is very low compared with metallic multilayers and exhibits a strongly positive temperature coefficient which is a clear fingerprint of semiconducting spacer behaviour.

In order to investigate the dependence of the coupling on the mobility gap of the spacer material we extend the experiments to a-Ge and a-SiO. At  $T = 50$  K these materials both mediate exchange coupling which in the case of a-Ge persists up to a spacer thickness of at least 60 Å whereas in the case of a-SiO it disappears at  $d_{SiO} > 25 \text{ Å}$ . Again we observe a strong and reversible increase of the coupling strength when samples are heated to  $T = 300$  K. However in striking contrast to a-Si we do not find evidence for antiferromagnetic coupling neither in a-Ge nor in a-SiO.

The combination of a-Ge and a-Si layers in one junction allows us to gain insight into the physical mechanism behind the antiferromagnetic coupling through a-Si. We find that necessary conditions for the occurrence of AFM coupling are a *total* spacer thickness around 20 Å and the presence of some a-Si in the spacer.

Finally we present preliminary observations of exchange coupling across thin bismuth layers evaporated at  $T = 50$  K. Again we find a positive temperature coefficient of the coupling strength. A speculative explanation is given along the line that Bi exhibits a metal-insulator transition driven by the structural disorder due to low temperature evaporation on an amorphous substrate. Alternatively the positive temperature coefficient could also be attributed to a quantum size effect which is a consequence of the extremely large deBroglie wavelength of the conduction electrons in Bi.

The discussion of the experimental results mainly concentrates on direct and resonant tunneling through the spacer material. We show that  $k$ -vector dependent direct tunneling cannot consistently explain the sign and temperature dependence of the coupling as found with SPSEE. The discrepancy in the temperature dependence is removed if we assume that resonant tunneling through defect centers mediates the magnetic exchange. We interpret the observations on combined Ge/Si-barriers with a model for the random distribution of defects, and we conclude that the density of defects  $n_d$  in the amorphous spacer material is the decisive factor to determine the sign of the coupling. For sufficiently large  $n_d$  the increased overlap between defect wavefunctions leads to the formation of spin-singlet states. We postulate that just these interacting defect-pairs are responsible for the antiferromagnetic coupling across a-Si.

# Zusammenfassung

Diese Arbeit erweitert das aktuelle Forschungsgebiet der oszillatorischen Austauschkopplung in metallischen Schichtsystemen. Wir zeigen, dass dieses Phänomen auch für Ferromagneten, die durch eine amorphe Halbleiterschicht getrennt sind, existiert und somit nicht auf Zwischenschichten mit metallischer und kristalliner Struktur beschränkt ist.

Die untersuchten Zwischenschichtmaterialien umfassen amorphes Silizium, Germanium, Siliziummonoxyd und Wismut. Zur Messung der Austauschkopplung verwenden wir ein neu aufgebautes Sekundärelektronen-Magnetometer. Dieses Instrument erlaubt die Herstellung und Charakterisierung der Proben unter UHV-Bedingungen und bei Temperaturen bis zu 40 K. Die hohe Oberflächenempfindlichkeit der spinpolarisierten Sekundärelektronenemission ermöglicht es, die oberste magnetische Lage eines Mehrschichtsystems separat zu untersuchen.

Wir zeigen, dass Ferromagneten (Fe oder Ni), die durch eine bei  $T = 50$  K aufgedampfte Schicht aus amorphem Silizium getrennt sind, für  $d_{Si}$  bis  $60 \text{ \AA}$  magnetische Kopplung aufweisen. Für  $14 \text{ \AA} < d_{Si} < 22 \text{ \AA}$  und für  $d_{Si} = 45 \text{ \AA}$  tritt antiferromagnetische (AFM) Kopplung auf. Die Kopplungsstärke beträgt etwa  $5 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^2$  und ist damit sehr gering im Vergleich zu metallischen Mehrschichtsystemen. Speziell interessant ist die Tatsache, dass die Kopplungsstärke einen starken positiven Temperaturkoeffizienten aufweist, denn dies ist ein klarer Hinweis für das halbleitende Verhalten der Zwischenschicht.

Untersuchungen mit a-Ge und a-SiO ergeben, dass auch für diese beiden Materialien Kopplung zwischen den ferromagnetischen Schichten auftritt. Bei  $T = 50$  K finden wir Austauschkopplung für a-Ge bis zu  $d_{Ge} = 60 \text{ \AA}$ , für a-SiO bis zu  $d_{SiO} = 25 \text{ \AA}$ . In beiden Fällen weist die Kopplungsstärke einen starken positiven Temperaturkoeffizienten auf. Im Gegensatz zu a-Si finden wir hingegen *keine* AFM Kopplung durch a-Ge oder a-SiO.

Die Kombination von Ge und Si in der Zwischenschicht erlaubt uns, die Ursache der AFM Kopplung in Si zu ergründen. Wir finden, dass AFM Kopplung nur dann auftritt, wenn *ein Teil* der Halbleiterbarriere aus Si besteht und die *gesamte* Zwischenschichtdicke etwa  $20 \text{ \AA}$  beträgt.

Schliesslich zeigen wir, dass auch für bei  $T = 50$  K aufgedampfte Bi-Schichten die Austauschkopplung einen positiven Temperaturkoeffizienten aufweist. Eine spekulative Erklärung führt diesen Effekt auf einen wachstumsbedingten Metall-Halbleiterübergang in Bi zurück. Andererseits könnte das beobachtete Temperaturverhalten auch aus der extrem grossen deBroglie-Wellenlänge in polykristallinem Bi folgen.

Die Diskussion der Resultate konzentriert sich vor allem auf direktes und resonantes Tunneln durch die Zwischenschicht. Wir zeigen, dass wellenvektorabhängiges direktes Tunneln weder das Vorzeichen noch die Temperaturabhängigkeit der Austauschkopplung erklären kann. Wenn wir hingegen annehmen, dass die Kopplung über resonantes Tunneln durch Defektzentren vermittelt wird, so können wir die experimentell beobachtete Temperaturabhängigkeit der Kopplungsstärke qualitativ erklären. Wir verbinden die Messungen an kombinierten Ge/Si-Schichten mit einem Modell für die geometrische Verteilung der Defekte und kommen zum Schluss, dass die Defektdichte  $n_d$  im amorphen Halbleiter das Vorzeichen der Austauschkopplung bestimmt. Ein grosses  $n_d$  führt wegen des zunehmenden Überlapps zur Paarung von lokalisierten Wellenfunktionen und zur Bildung von Spin-Singlettzuständen, die unserer Ansicht nach für die AFM Kopplung in a-Si verantwortlich sind.