

Bachelorarbeit Spintronics

Gleichweit Christoph

14. September 2009

Überblick

- 1 Spin Injektion
 - Drift-Diffusions Modell
 - Teilchen u. Spinströme
 - F/N Übergang
 - Spin-Relaxation
- 2 Riesen(Giant) - und Tunnelmagnetowiderstandseffekt
 - giant magneto resistance (GMR)
 - tunnel magneto resistance (TMR)
- 3 Literatur

Spin Injektion - Bedeutung

- Injektion von Spin von einem magnet. polarisierten Material (Ferromagnet) in einen nicht polarisiertes (z.B. Leiter).
- Transfer von Spin-Polarisation durch einen elektrischen Strom

Drift-Diffusions Modell

Merkmale

- Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung von Teilchen in Materialien
- Klassisches Modell

Ziel dieses Abschnitts

Gewinnung eines Modells zur Beschreibung der Teilchen- $n(x, t)$ u. Spindichte $s(x, t)$ in einer Dimension beim Kontakt zweier Materialien

Herleitung d. Drift-Diffusions-Gleichung - random walk in 1d

Teilchen und Spindichte

$$n = n_{\uparrow} + n_{\downarrow}$$

$$s = n_{\uparrow} - n_{\downarrow}$$

Random Walk - Größen

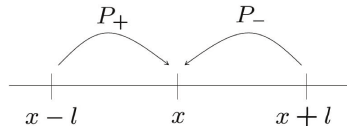
x ... Position

v ... Geschwindigkeit d. Teilchens

l ... Mittlere freie Weglänge

$\tau = v/l$... Zeit benötigt für einen Schritt

P_+, P_- ... Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen nach links/rechts hüpft ($P_+ + P_- = 1$)



Teilchen u. Spindichte

Teilchendichte

$$n(x, t) = n(x - l, t - \tau)P_+ + n(x + l, t - \tau)P_-$$

Spindichte

$$n_{\uparrow}(x, t) = n_{\uparrow}(x - l, t - \tau)(1 - w)P_+ + n_{\uparrow}(x + l, t - \tau)(1 - w)P_- \\ + n_{\downarrow}(x - l, t - \tau)wP_+ + n_{\downarrow}(x + l, t - \tau)wP_-$$

w ... Wahrscheinlichkeit, dass der Spin des Teilchens in der Zeit von τ flippt (Fliprate: w/τ)

$$w \ll 1$$

Reihenentwicklung

Entwicklung in eine Taylorreihe um x und t :

$$n_{\uparrow}(x, t) \approx n_{\uparrow}(1 - w) - l\Delta p \frac{\partial n_{\uparrow}}{\partial x} - \tau \frac{\partial n_{\uparrow}}{\partial t} + \frac{1}{2} l^2 \frac{\partial^2 n_{\uparrow}}{\partial x^2} + n_{\downarrow} w$$

Daraus folgt:

$$\frac{\partial n_{\uparrow}}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{2} \frac{l^2}{\tau}}_D \frac{\partial^2 n_{\uparrow}}{\partial x^2} - \underbrace{\frac{l}{\tau}}_v \Delta p \frac{\partial n_{\uparrow}}{\partial x} - \frac{w}{\tau} (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})$$

v_d

D ... Diffusionskoeffizient

v_d ... Driftgeschwindigkeit

Drift-Diffusionsgleichungen

DRIFT-DIFFUSIONSGLEICHUNGEN FÜR $n_{\uparrow}(x, t)$ UND
 $n_{\downarrow}(x, t)$

$$\frac{\partial n_{\uparrow}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n_{\uparrow}}{\partial x^2} - v_d \frac{\partial n_{\uparrow}}{\partial x} - \frac{w}{\tau} (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})$$
$$\frac{\partial n_{\downarrow}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n_{\downarrow}}{\partial x^2} - v_d \frac{\partial n_{\downarrow}}{\partial x} - \frac{w}{\tau} (n_{\downarrow} - n_{\uparrow})$$

Drift-Diffusionsgleichungen

Addition bzw. Subtraktion führt zu

DRIFT-DIFFUSIONSGLEICHUNGEN FÜR $n(x, t)$ UND
 $s(x, t)$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - v_d \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - v_d \frac{\partial s}{\partial x} - s \underbrace{\frac{1}{\tau_s}}_{= \frac{2w}{\tau}}$$

τ_s ... Spin-Relaxationszeit

Lösung d. Diffusionsgleichungen (kein \mathbf{E} -Feld)

Typ: Wärmeleitungsgleichung, Lösung analytisch möglich

Anfangswerte

Bestimmte Menge v. Teilchen an einem Punkt konzentriert bei $t = 0$:

$$n(x, 0) = N_0 \delta(x)$$

$$s(x, 0) = S_0 \delta(x)$$

Lösungen der Diffusionsgleichungen für $n(x, t)$ und $s(x, t)$

$$n(x, t) = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

$$s(x, t) = \frac{S_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} e^{-\frac{t}{\tau_s}}$$

Vergleich Teilchendichte - Spindichte

Entwicklung der Teilchendichte

Teilchen(Ladung) bleibt erhalten.

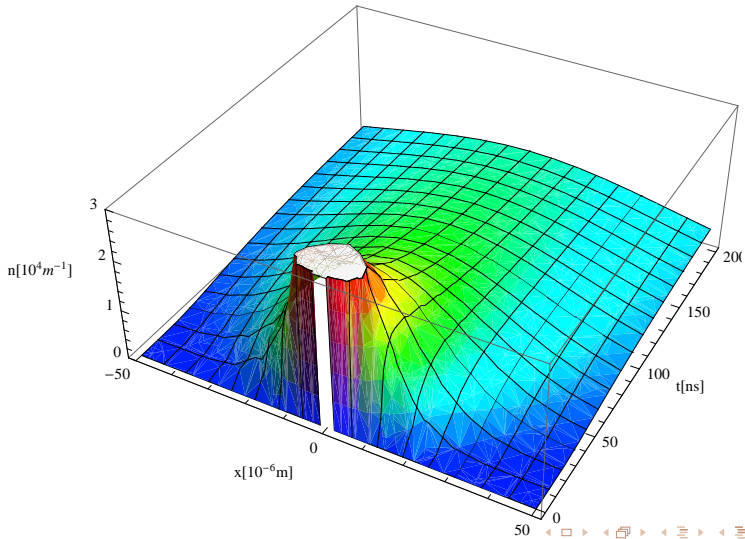
$$N_0 = \int_{-\infty}^{\infty} xn(x, t)dx$$

Entwicklung der Spindichte

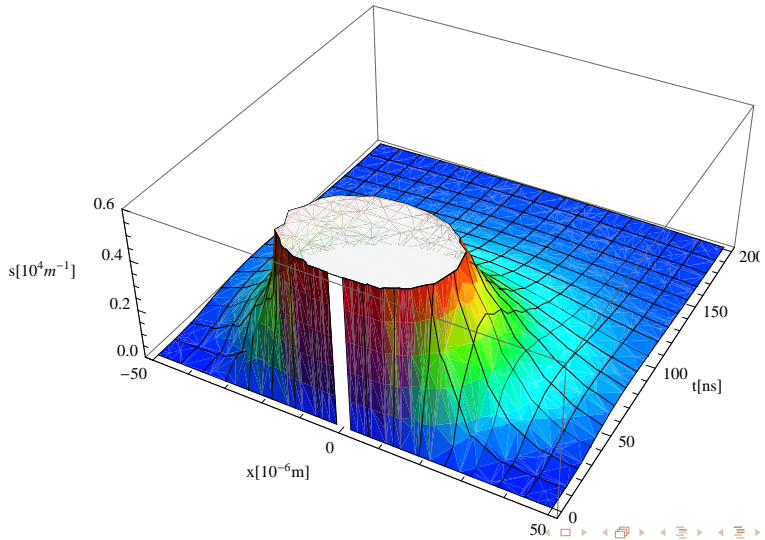
Spin bleibt nicht erhalten, er nimmt exponentiell ab:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} xs(x, t)dx = S_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$

Plot: Teilchendichte



Plot: Spindichte



Spin Drift-Diffusionsgleichung: Numerische Simulation

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - v_d \frac{\partial s}{\partial x} - s \frac{1}{\tau_s}$$

- Für $E \neq 0$, Lösung analytisch schwierig
- Numerische Simulation mittels Mathematica: Funktion **ndsolve**.
- Physikalisch realistische Werte von Silizium bei $T = 300\text{K}$ und $E = 10^5 \text{V m}^{-1}$: $D = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\tau_s = 50 \text{ ns}$, $v_d = 10^4 \text{ m/s}$, $n_i = 10^{16} \text{ m}^{-3}$
- Leiter mit $A \approx 10^{-12} \text{ m}^2$, $s_0 = An_i = 10^4/\text{m}$

Fall 1: Kein Drift, kein Spinstrom

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{s}{\tau_s}; t \in [0, 500ns], x \in [0, 100\mu m]$$

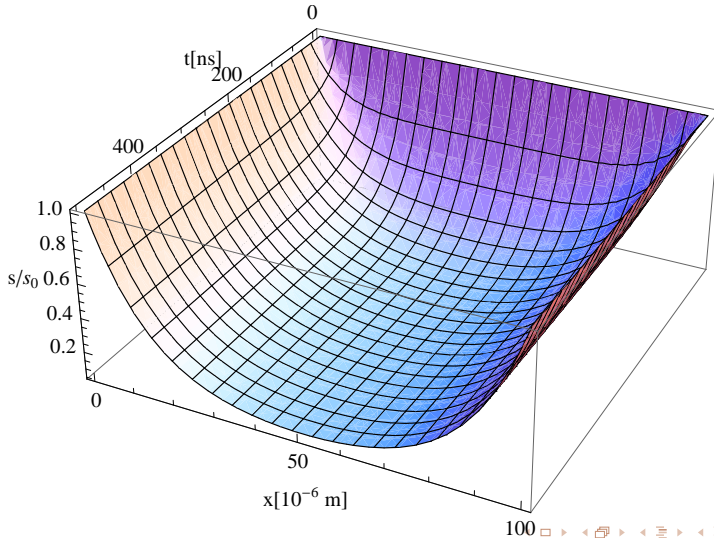
Randbedingungen

$$s(0, t) = s(d, t) = s_0$$

Anfangsbedingung

$$s(x, 0) = s_0$$

Plot Fall 1: Kein E-Feld, kein Spinstrom



Fall 2: Oszillierender Driftanteil, kein Spinstrom

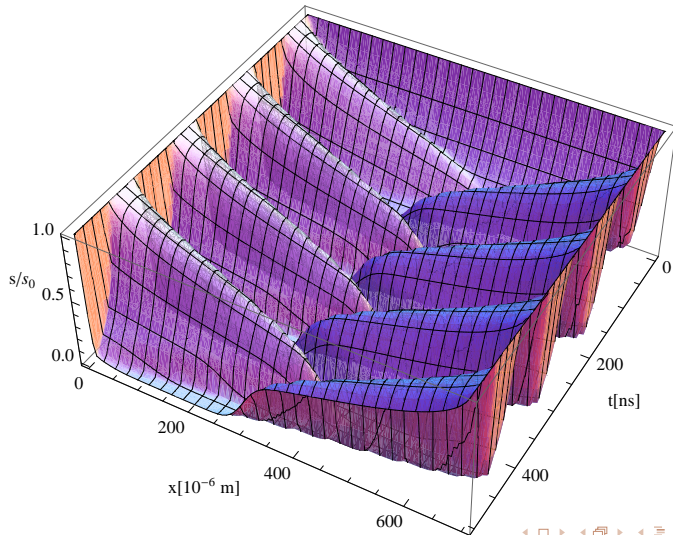
$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - v_d \sin(\omega t) \frac{\partial s}{\partial x} - \frac{s}{\tau_s}; t \in [0, 500 \text{ ns}], x \in [0, 700 \mu\text{m}]$$

Rand- und Anfangsbedingungen

$$s(0, t) = s(d, t) = s(x, 0) = s_0$$

$$\omega = 5 \cdot 10^7 / \text{sec}$$

Plot Fall 2: Oszillierender Driftanteil, kein Spinstrom



Fall 3: Oszillierender Spinstrom

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{s}{\tau_s}; t \in [0, 500ns], x \in [0, 100\mu m]$$

$$s(0, t) = s_0$$

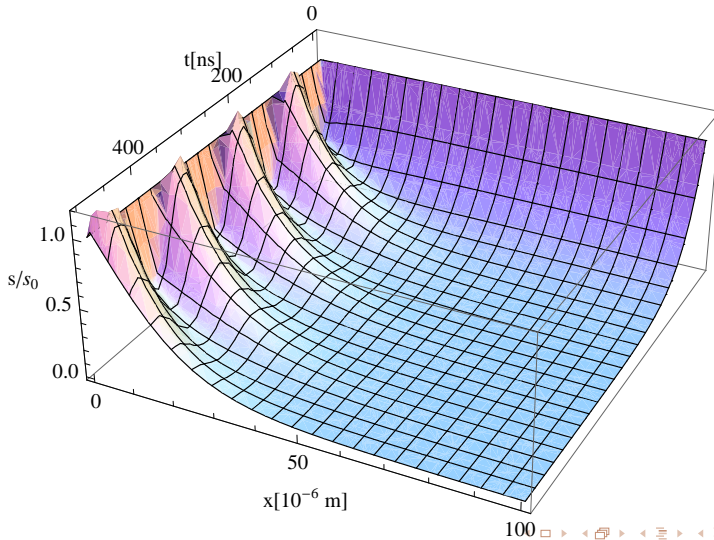
$$s(x, 0) = s_0$$

Unterschied:

$$\left. \frac{\partial s}{\partial x} \right|_{x=0} = j_0 \sin(\omega t), \quad \omega = 5 \cdot 10^7 / \text{sec}$$

wobei $j_0 = 2 \cdot 10^6 m^{-2}$.

Plot Fall 3: Oszillierender Spinstrom



Fall 4: Kombination aus oszillierendem Drift und Spinstrom

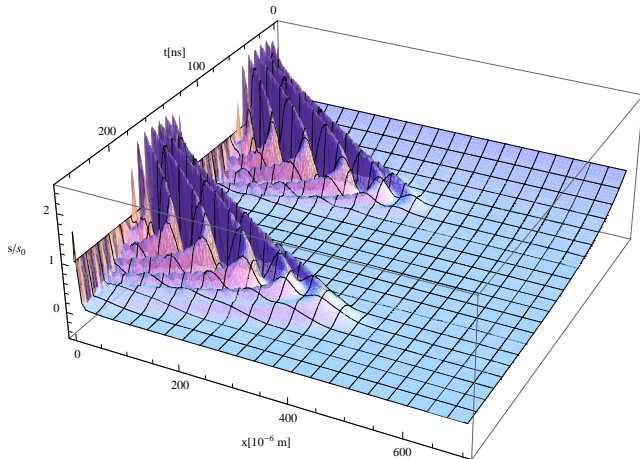
$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - v_d \sin(\omega t) \frac{\partial s}{\partial x} - \frac{s}{\tau_s}; t \in [0, 300 \text{ ns}], x \in [0, 700 \mu\text{m}]$$

Rand- und Anfangsbedingungen

$$s(0, t) = s(x, 0) = s_0, \left. \frac{\partial s}{\partial x} \right|_{x=0} = j_0 \sin(16 \cdot \omega t)$$

$$\omega = 5 \cdot 10^7 / \text{sec}$$

Plot Fall 4: Kombination aus oszillierendem Drift und Spinstrom



Teilchen u. Spinströme

Umformung d. Drift-Diffusionsgleichungen

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{e\tau}{m} E n - D \frac{\partial n}{\partial x} \right] = 0$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{e\tau}{m} E s - D \frac{\partial s}{\partial x} \right] = -\frac{s}{\tau_s}$$

Teilchen- und Spinstrom

$$j = -\sigma E - eD \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$j_s = -\sigma_s E - e \frac{\partial s}{\partial x}$$

Einfluss eines elektr. Feldes

Für $E = -\nabla\phi$:

$$j = -\sigma\nabla\phi + eD\nabla n$$

Im Gleichgewicht

$$n(\mathbf{r}) = n_0(\eta + e\phi)$$

$$j = \nabla\phi \left(-\sigma + e^2 D \frac{\partial n_0}{\partial \eta} \right)$$

da $j = 0$ im Gleichgewicht folgt:

$$\sigma = e^2 D \frac{\partial n_0}{\partial \eta}$$

Elektrochemisches Potential

Aufweichung des Gleichgewichtszustandes, Erweiterung d.
Abhängigkeit von n :

$$n(\mathbf{r}) = n_0(\eta + e\phi + e\mu)$$

mit μ ... elektrochemisches Potential

$$j = \nabla\phi \left(-\sigma + e^2 D \frac{\partial n_0}{\partial \eta} \right) + e^2 D \frac{\partial n_0}{\partial \eta} \nabla\mu$$

mit $\sigma = e^2 D \frac{\partial n_0}{\partial \eta}$ folgt:

Teilchenstrom in diffusivem System

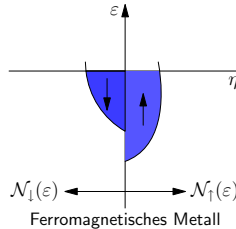
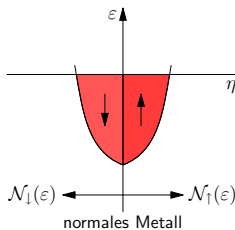
$$j = \sigma \nabla\mu$$

Ferromagnetische Materialien

$$j_{\uparrow(\downarrow)} = \sigma_{\uparrow(\downarrow)} \nabla \mu_{\uparrow(\downarrow)}$$

Spin-elektrochem. Potential

$$\mu_s = \frac{\mu_{\uparrow} - \mu_{\downarrow}}{2}$$



Wichtiges Ergebnis aus dem Drift-Diffusionsmodell

DIFFUSIONSGLEICHUNG FÜR DAS SPIN-ELECTROCHEM. POTENTIAL IM STEADY STATE

$$\nabla^2 \mu_s = \frac{\mu_s}{L_s^2}$$

$$L_s = \sqrt{\bar{D}\tau_s}$$

$$\bar{D} = \frac{\mathcal{N}}{N_{\uparrow}/D_{\downarrow} + N_{\downarrow}/D_{\uparrow}}$$

- ... Spin-Diffusionslänge
 ... veralgemeinerter Diffusionskoeffizient
 oder spin-gemittelter Diffusionskoeffizient

F/N Übergang

Elektronen bewegen sich durch einen Kontakt zwischen Ferromagnet und nicht-Ferromagnet.

Randbedingungen am Kontakt für Diffusionsgleichung $\nabla^2 \mu_s = \frac{\mu_s}{L_s^2}$

benötigt:

Polarisation d. Spinstromes

$$P_j = \frac{j_{\uparrow} - j_{\downarrow}}{j} = \frac{j_s}{j}$$

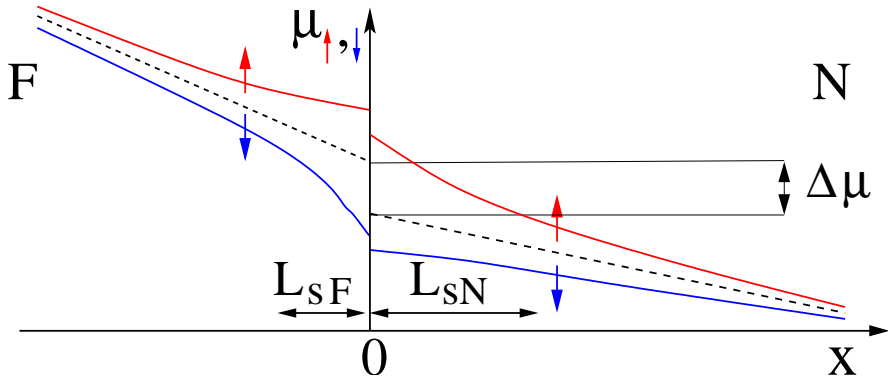
sei konstant:

$$P_{j,F}(0^-) = P_{j,N}(0^+) \equiv P_j \quad (1)$$

(keine Streuprozesse)

F/N Übergang

Vereinfachter Verlauf der elektrochemischen Potentiale



F/N Übergang

Randbedingungen im ∞

$$\mu_{s,F}(-\infty) = 0 \quad \mu_{s,N}(\infty) = 0$$

Diffusionsgleichungen

$$\nabla^2 \mu_{s,F} = \frac{1}{L_{s,F}^2} \mu_{s,F}$$

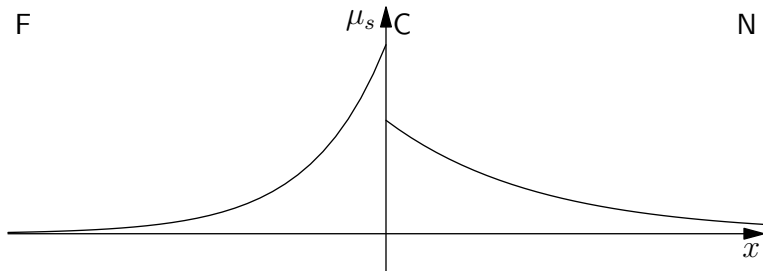
$$\nabla^2 \mu_{s,N} = \frac{1}{L_{s,N}^2} \mu_{s,N}$$

Lösungen

$$\mu_{s,F}(x) = \mu_{s,F}(0) e^{x/L_{s,F}} \quad (2)$$

$$\mu_{s,N}(x) = \mu_{s,N}(0) e^{-x/L_{s,N}} \quad (3)$$

Spin-Elektrochemisches Potential - F/N Übergang



Spin-Injektions-Effizienz

SPIN-INJEKTIONS-EFFIZIENZ

$$\langle P_\sigma \rangle_R = P_j = \frac{R_C P_\Sigma + R_F P_{\sigma,F}}{R_C + R_F + R_N} \quad (4)$$

$\langle P_\sigma \rangle_R$ bedeutet: P_σ über die 3 Regionen gemittelt, durch die effektiven Widerstände gewichtet.

Im Nenner: *effektiver Widerstand* im Gleichgewicht des Systems

Spin-Akkumulation (Anhäufung)

$$\mu_{s,N}(0) = -jP_j R_N \quad (5)$$

2 Fälle:

$j < 0$: Spin Injektion

Elektronen fließen von F nach N, die Spin Akkumulation ist positiv

$$\mu_{s,N}(0) > 0$$

$j > 0$: Spin-Extraktion

Elektronen fließen von N nach F, die Spin Akkumulation ist

$$\text{negativ } \mu_{s,N}(0) < 0$$

spin bottleneck effect (Engpass)

Erwarteter Widerstand des Kontakts:

$$R = \tilde{R}_F + \tilde{R}_c + \tilde{R}_N$$

wobei \tilde{R}_X ... effektive Widerstände der Regionen
Akkumulation bewirkt außer für $\mu_{s,F}(-\infty) = 0$ zusätzlichen
Widerstand, sodass

$$R = \tilde{R}_F + \tilde{R}_c + \tilde{R}_N + \delta R \quad (6)$$

⋮

Ungleichgewichts-Widerstand

$$\delta R = \frac{R_N(P_\Sigma^2 R_c + P_{\sigma,F}^2 R_F) + R_F R_c (P_{\sigma,F} - P_\Sigma)^2}{R_F + R_c + R_N} > 0$$

conductivity mismatch problem

Wenn $R_N \gg R_F$, zum Beispiel F ist metall. Ferromagnet und N ein nicht magnet. Halbleiter

2 Interessante Fälle:

1. Fall $R_c \ll R_N \gg R_F$: transparenter(durchlässiger) Kontakt

$$P_j \approx \frac{R_F}{R_N} P_{\sigma,F} \ll P_{\sigma,F}$$

$$\delta R \approx R_F P_{\sigma,F}^2 \approx R_F (\ll R_N)$$

- Effizienz ist stark reduziert
- Diskrepanz bei der Leitfähigkeit führt zu diesem Effekt

conductivity mismatch problem

2. Fall $R_c \gg R_N \gg R_F$ Tunnelkontakt

$$P_j = P_\Sigma$$

$$\delta R \approx R_N P_\Sigma^2$$

- Hier besteht solch ein Problem nicht
- Injektions-Effizienz ist durch Leitfähigkeit des Kontaktes geprägt
- Widerstand durch Akkumulation in etwa so groß wie Widerstand der N-Region

Bloch-Gleichungen

Geg: Ensemble von Teilchen mit Spindichte s , einem Magnetfeld $\mathbf{B} = B_0 \hat{e}_z + \mathbf{B}_1(t)$ ausgesetzt. Dann gilt $s_{0,z} > 0$ im Gleichgewicht und s erfüllt die Gleichungen:

Bloch-Gleichungen

$$\frac{\partial s_x}{\partial t} = \gamma(\mathbf{s} \times \mathbf{B})_x - \frac{s_x}{T_2}$$

$$\frac{\partial s_y}{\partial t} = \gamma(\mathbf{s} \times \mathbf{B})_y - \frac{s_y}{T_2}$$

$$\frac{\partial s_z}{\partial t} = \gamma(\mathbf{s} \times \mathbf{B})_z - \frac{s_z - s_{0,z}}{T_1}$$

mit $\gamma = \frac{g\mu_B}{\hbar}$... gyromagnetisches Verhältnis d. Elektronen

Relaxationszeiten

- T_1 longitudinale Relaxationszeit, Zeit für Relaxation entlang d. statischen Feldes, Energieaustausch mit umgebenden Teilchen nötig, falls z -Komponente > 0
- T_2 transversale Relaxationszeit, Präzession erfolgt zunächst in Phase um die longitudinale Achse, nach einer Zeit kommt es zur Fluktuationen d. Frequenz und weiters zur Relaxation

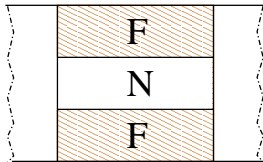
GMR, TMR...

- verschiedenste MR-Effekte bekannt
- technisch interessant
- keine Einheitlichen-Theorien
- hier kurze Vorstellung von GMR und TMR

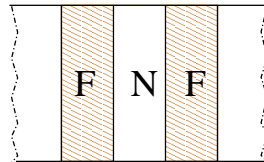
GMR

Prinzipielles Layout von current-in-plane und
current-perpendicular-to-plane GMR Anordnungen

(a) current flow

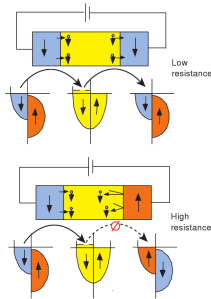


(b) current flow



CPP-GMR

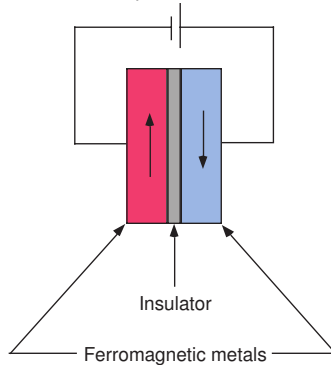
Konzept eines Spin-Ventils: spin-polarisierter Transport in F-N-F
CPP Anordnung (\Rightarrow nichtmagnetische Region relativ groß).



Ø... verbotener Übergang

TMR

Magnet. Tunnelübergang (MTJ, magnetic tunnel junction)



TMR - Jullière

Modell von Jullière

TMR Verhältnis

$$TMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{G_P - G_{AP}}{G_{AP}} \quad (7)$$

mit

R ... Widerstand

G ... Leitfähigkeit

P ... parallele Messung

AP ... anti-parallele Messung

Literatur

Hauptwerke für diese Arbeit



J. Fabian, A. Matos-Abiague, C. Ertler, P. Stano, and I. Zutic.
Semiconductor spintronics.

ACTA PHYSICA SLOVACA, 57:565, 2007.



Igor Zutic, Jaroslav Fabian, and S. Das Sarma.
Spintronics: Fundamentals and applications.

Reviews of Modern Physics, 76:323, 2004.