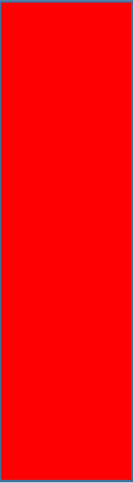


Materiały i przyrządy półprzewodnikowe



Wykład 12: Wstęp do spintroniki

Paweł Wójcik



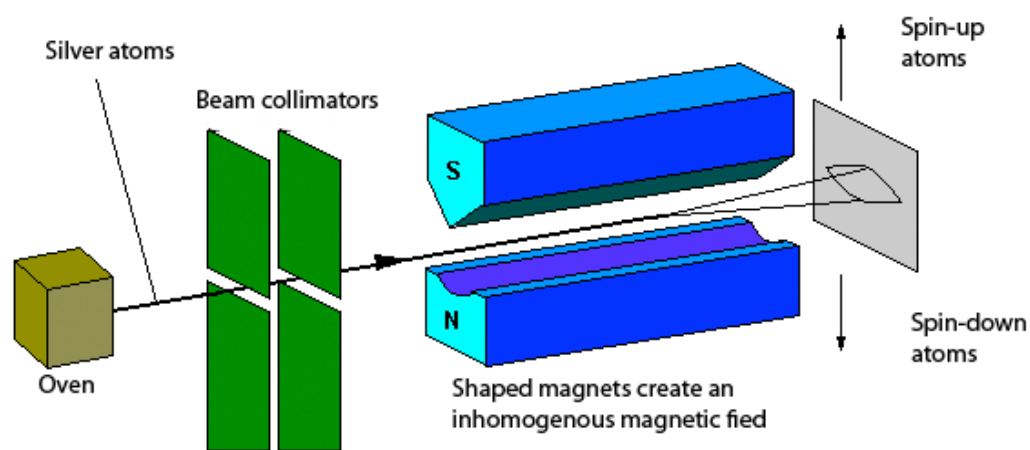
Plan wykładu:

1. Spin elektronu
2. Oddziaływanie spin-orbita
3. Filtr spinowy
4. Tranzystor spinowy

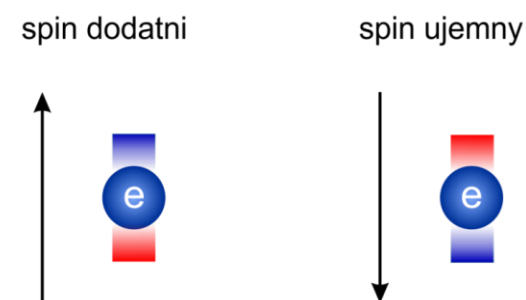
Spin elektronu

Spintronika - jest odmianą elektroniki, w której nośnikiem informacji jest spin elektronu.

Doświadczenie Sterna-Gerlacha



George Uhlenbeck i Samuel Goudsmit proponują istnienie **spinu elektronu**



Operatory spinu wyrażamy przez macierze Pauliego

$$s_x = \frac{\hbar}{2} \sigma_x = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad s_y = \frac{\hbar}{2} \sigma_y = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad s_z = \frac{\hbar}{2} \sigma_z = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Oddziaływanie spin-orbita

Rozwinięcie równania Diraca (metoda Löwdina)

$$H = \frac{p^2}{2m_0} + V + \boxed{\frac{e\hbar}{2m_0} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}} - \boxed{\frac{\hbar}{4m_0^2 c^2} \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p} \times \nabla V)} - \boxed{\frac{\hbar^2}{8m_0^2 c^2} \nabla \cdot \nabla V} + \dots$$

spinowe rozszczepienie Zeemana
oddziaływanie spin-orbita
wyraz Darwina

Oddziaływania spin-orbita w półprzewodnikach - przybliżenie k.p dla 2DEG

$$H_{SO} = -\frac{\hbar}{4m_0^2 c^2} \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p} \times \nabla V)$$

8-pasmowy model Kane

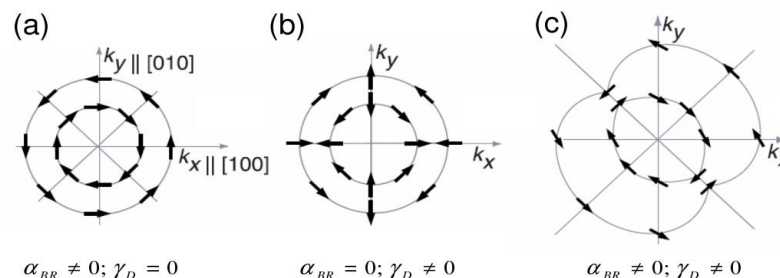
14-pasmowy model Kane

Oddziaływanie SO typu Rashby

$$H_R = \alpha_R (k_x \sigma_y - k_y \sigma_x)$$

Oddziaływanie SO typu Dresselhausa

$$H_D = \beta_D (k_x \sigma_x - k_y \sigma_y)$$



Hamiltonian

$$H_{8 \times 8} = \begin{pmatrix} H_c & H_{cv} \\ H_{cv}^\dagger & H_v \end{pmatrix}$$

Procedura redukcji

$$\mathcal{H}(E) = H_c + H_{cv}(H_v - E)^{-1}H_{cv}^\dagger.$$

Efektywny Hamiltonian dla elektronów przewodnictwa

$$\mathcal{H} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla_{2D}^2 + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*} + E_c + V(x, y) \right] \mathbf{1}_{2 \times 2} + (\alpha_x \sigma_x + \alpha_y \sigma_y) k_z, \quad \text{Rashba SO}$$

gdzie

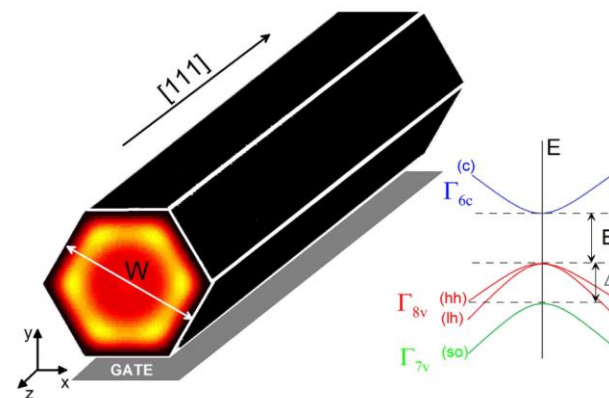
$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_0} + \frac{2P^2}{3\hbar^2} \left(\frac{2}{E_g} + \frac{1}{E_g + \Delta_g} \right)$$

$$\alpha_x(x, y) \approx \frac{1}{3} P^2 \left(\frac{1}{(E_0 + \Delta_0)^2} - \frac{1}{E_0^2} \right) \frac{\partial V(x, y)}{\partial y},$$

$$\alpha_y(x, y) \approx \frac{1}{3} P^2 \left(\frac{1}{(E_0 + \Delta_0)^2} - \frac{1}{E_0^2} \right) \frac{\partial V(x, y)}{\partial x}.$$

Wewnątrz oraz międzypasmowa stała oddziaływania SO

$$\alpha_{x(y)}^{nm} = \int \int \psi_n(x, y) \alpha_{x(y)}(x, y) \psi_m(x, y) dx dy.$$



Oddziaływanie elektronowe
uwzględnione w modelu pola
średniego

Oddziaływanie SO w NW

Eksperyment

PHYSICAL REVIEW B **91**, 201413(R) (2015)

Spin-orbit interaction in InSb nanowires

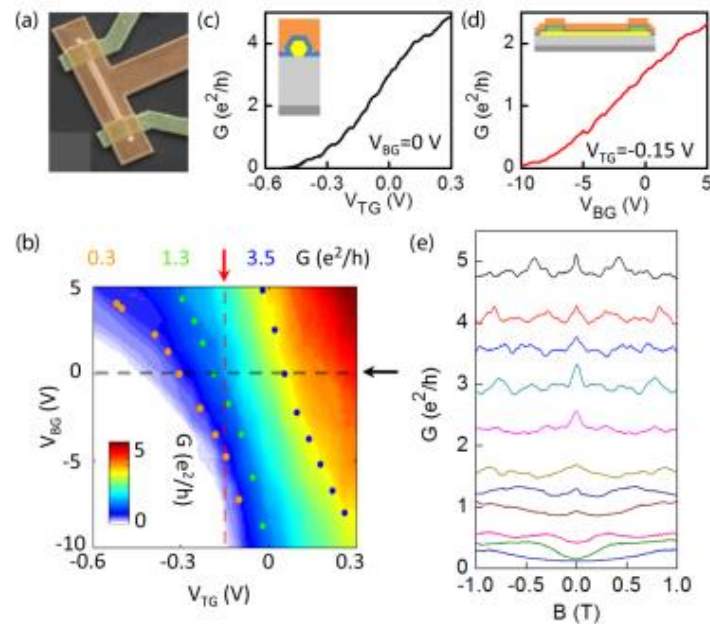
I. van Weperen,¹ B. Tarasinski,² D. Eeltink,¹ V. S. Pribyl,^{1,*} S. R. Plissard,^{1,3,†} E. P. A. M. Bakkers,^{1,3} L. P. Kouwenhoven,¹ and M. Wimmer^{1,‡}

¹QuTech and Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology, 2600 GA Delft, The Netherlands

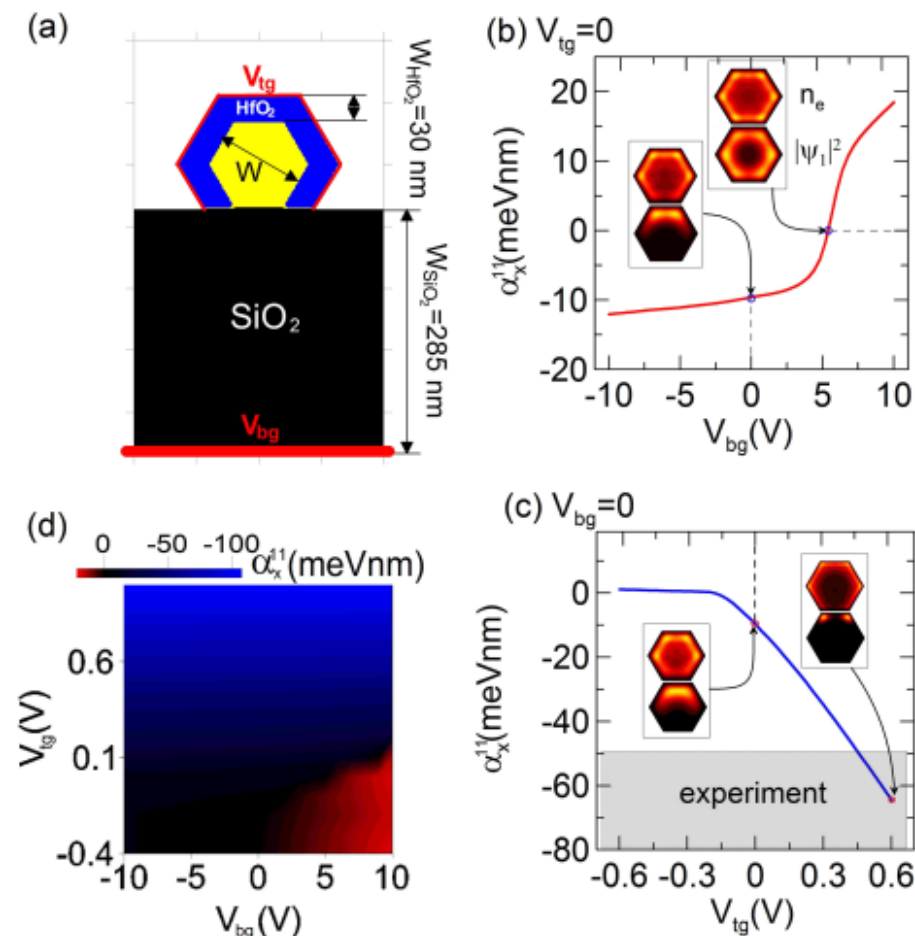
²Instituut-Lorentz, Universiteit Leiden, P.O. Box 9506, 2300 RA Leiden, The Netherlands

³Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands
(Received 26 November 2014; revised manuscript received 12 May 2015; published 29 May 2015)

We use magnetoconductance measurements in dual-gated InSb nanowire devices, together with a theoretical analysis of weak antilocalization, to accurately extract spin-orbit strength. In particular, we show that magnetoconductance in our three-dimensional wires is very different compared to wires in two-dimensional electron gases. We obtain a large Rashba spin-orbit strength of 0.5–1 eV Å corresponding to a spin-orbit energy of 0.25–1 meV. These values underline the potential of InSb nanowires in the study of Majorana fermions in hybrid semiconductor-superconductor devices.

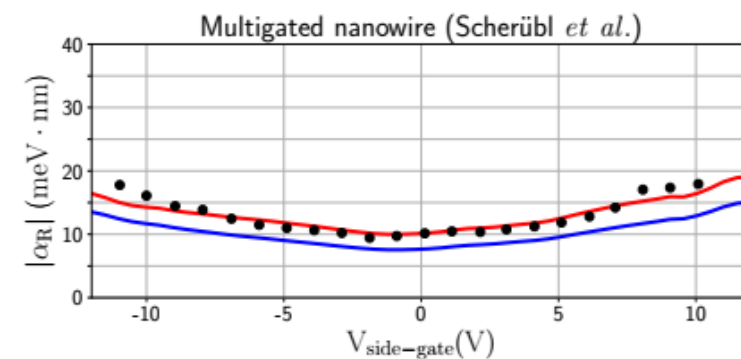
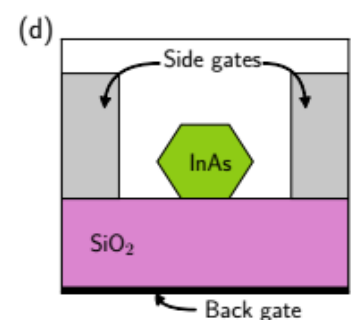
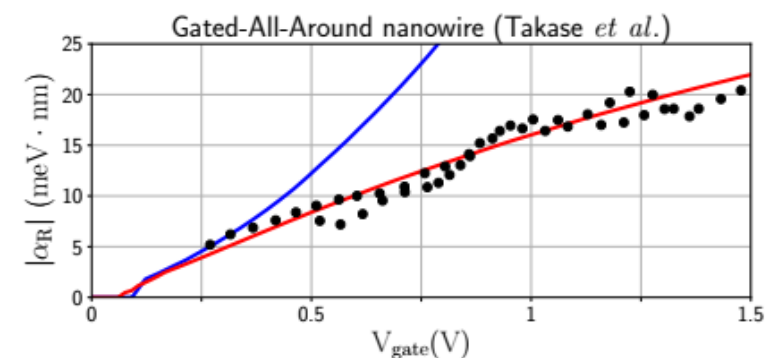
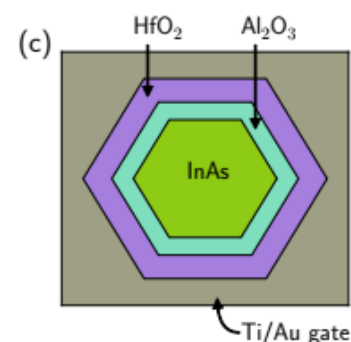
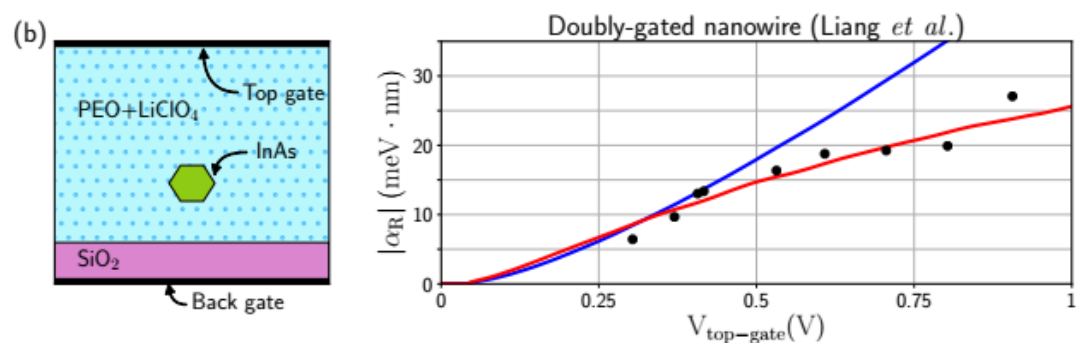
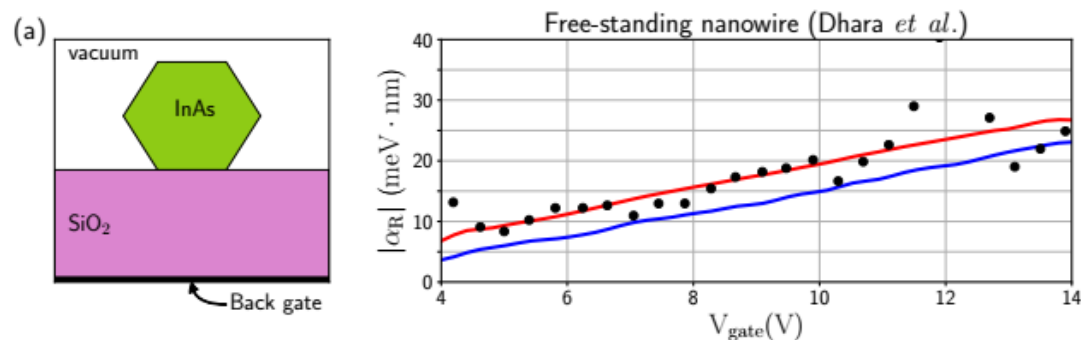


Obliczenia teoretyczne

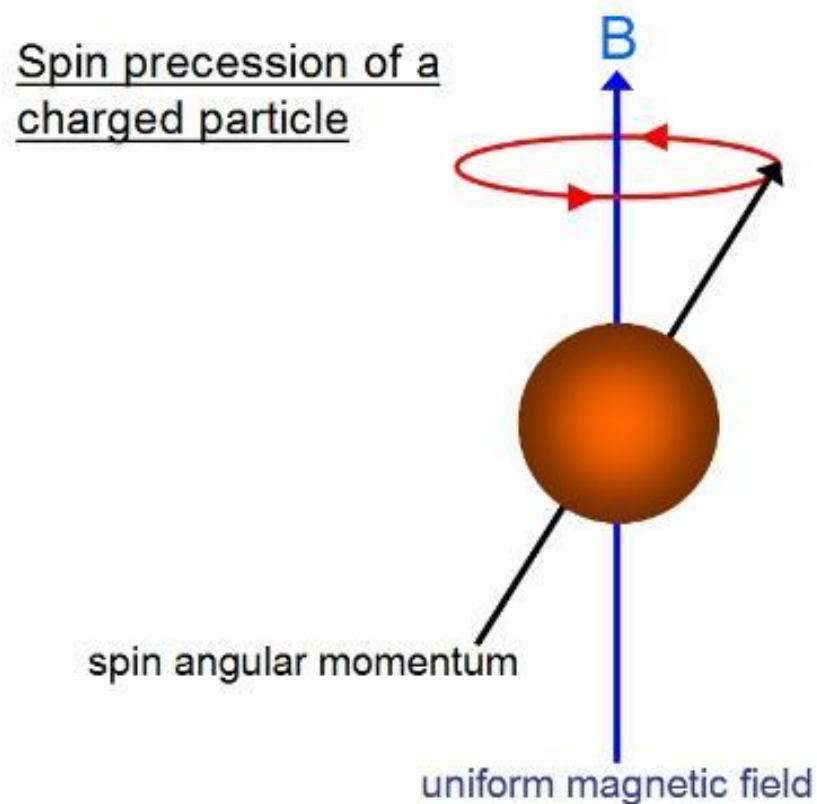


Oddziaływanie SO w NW

Porównanie obliczeń z eksperymentem



Precesja spinu



W zewnętrznym polu magnetycznym spin elektronu wykonuje precesje wokół wektora pola magnetycznego

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \gamma_s \vec{s} \times \vec{B}$$

spinowy czynnik żyromagnetyczny

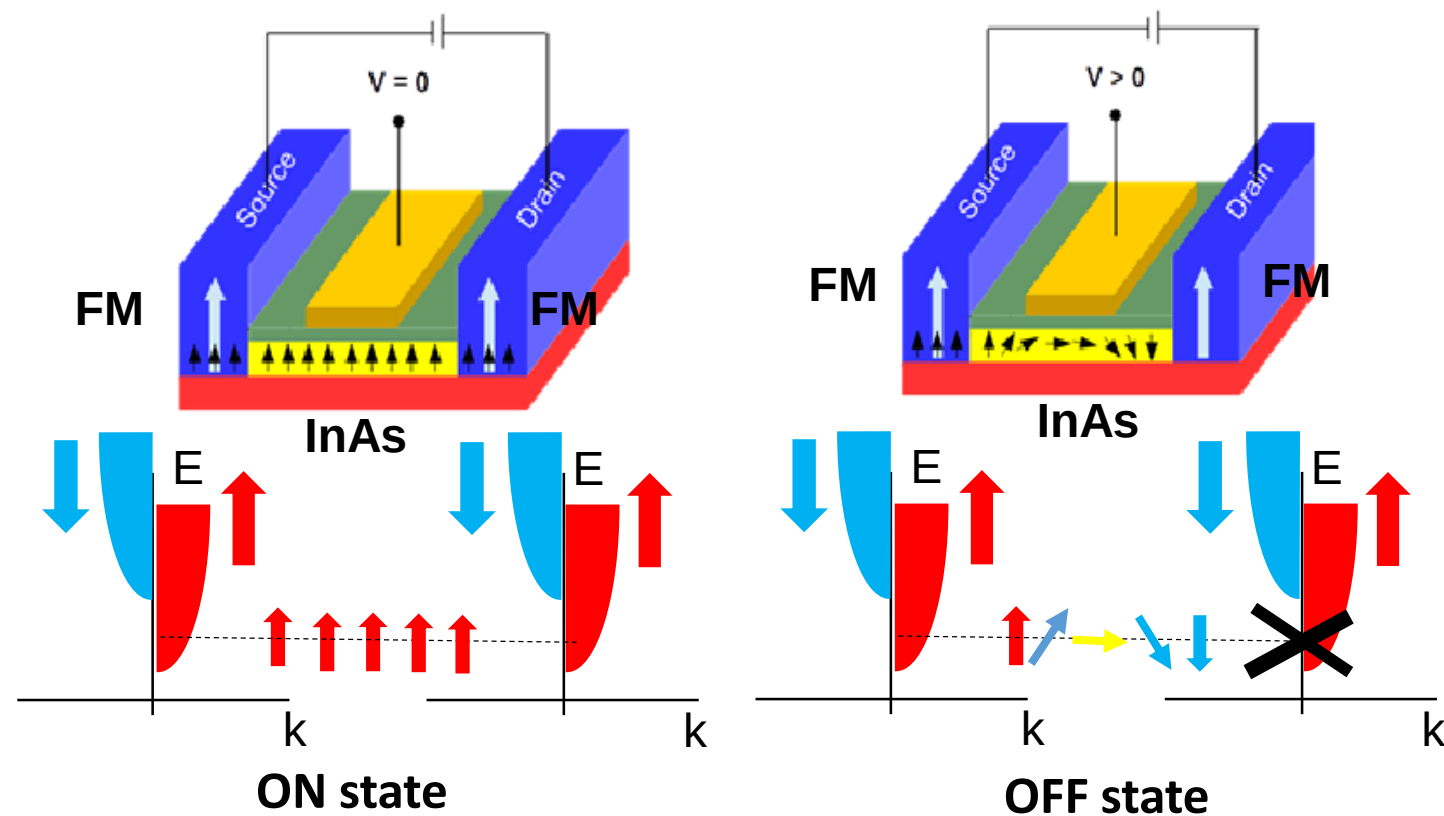
Zauważmy, że oddziaływanie spin-orbita jest analogiem zewnętrznego pola magnetycznego, którego kierunek jest prostopadły do pola elektrycznego oraz wektora k

$$H_{RSO} = \alpha_R (k_x \sigma_y - k_y \sigma_x) = (\alpha_R k_x, -\alpha_R k_y) \cdot (\sigma_y, \sigma_x)$$

Jeśli porównamy z wyrazem Zeemana $H_z = \frac{1}{2} g \mu_B \sigma \cdot B$ to widzimy, że efektywne pole SO

$$B_{RSO} = \frac{2\alpha_R}{g\mu_B} (k_x, -k_y)$$

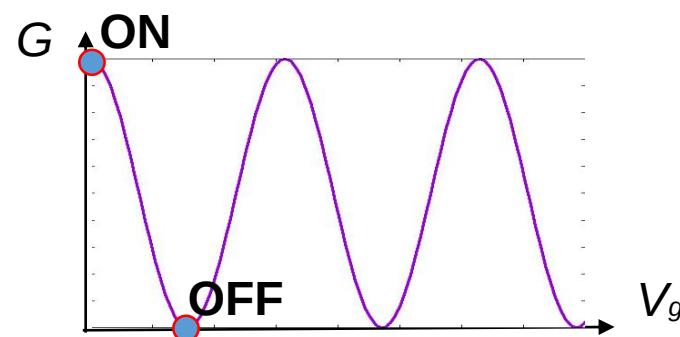
Tranzystor spinowy



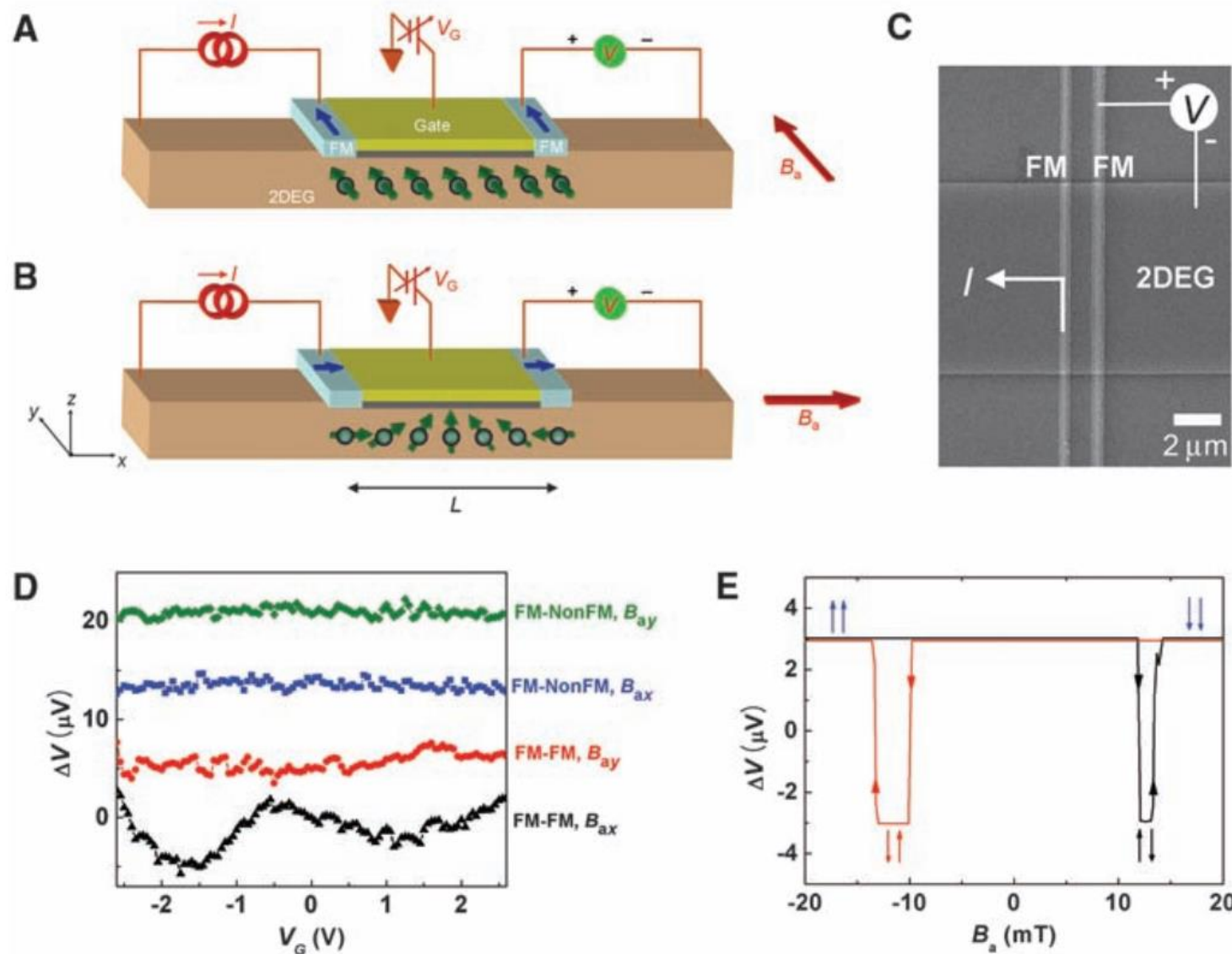
Opis działania:

- Układ trójterminalowy zbudowany z ferromagnetycznych kontaktów oraz półprzewodnikowego kanału z oddziaływaniem spin-orbita regulowanym potencjałem bramki.
- Jeśli spin elektronu w kanale opowiada polaryzacji drenu to prąd płynie, a tranzystor znajduje się w stanie ON.
- Jeśli spin elektronu w kanale nie opowiada polaryzacji drenu to prąd jest blokowany, a tranzystor jest w stanie OFF.
- Stan spinowy elektronu kontrolujemy oddziaływaniem spin-orbita poprzez potencjał bramki.

$$G = 2G_0 \cos^2 \left(\frac{m^* \alpha L_g}{\hbar^2} \right)$$



Tranzystor spinowy - eksperyment



H. C. Koo et al. Science 325, 1515 (2009)

Problem:

Niska wartość sygnału na wyjściu i mały współczynnik $\frac{G_{ON}}{G_{OFF}}$

Tranzystor spinowy – słabe punkty

1. Niewystarczająca efektywność wstrzykiwania spinu z ferromagnetycznych kontaktów do półprzewodnikowego kanału przewodzenia – problem niedopasowania rezystancji

- 70% w temperaturze pokojowej
- 90% w niskich temperaturach

$$\frac{G_{ON}}{G_{OFF}} = \frac{1 + P_S P_D}{1 - P_S P_D}$$

To co możemy uzyskać:

$$\frac{G_{ON}}{G_{OFF}} (P_{S(D)} = 0.7) = 3$$

Wymagana wartość !!!

$$\frac{G_{ON}}{G_{OFF}} = 10^5$$

A to oznacza:

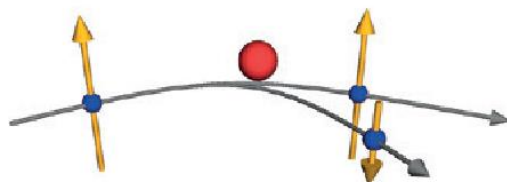
$$P_{S(D)} = 99.9995\%$$

2. Pola magnetyczne od kontaktów w obszarze kanału przewodzenia

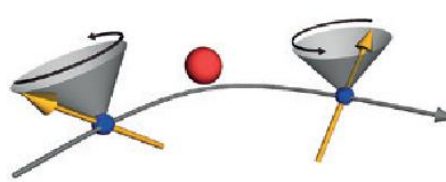
3. Relaksacja spinowa w kanale przewodzenia

- mechanizm Dyakonova-Perela
- mechanizm Elliota-Yafeta

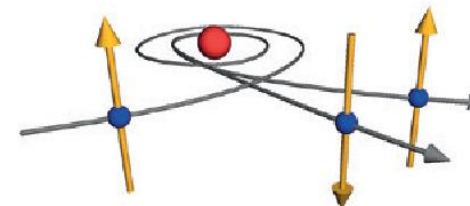
Elliott-Yafet



Dyakonov-Perel



Resonant scattering



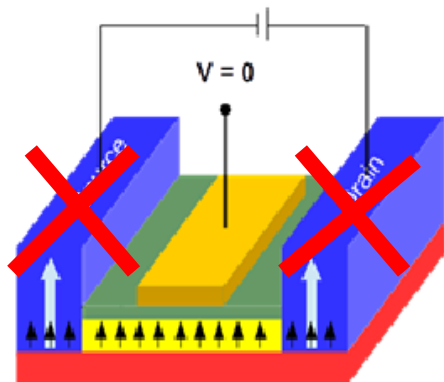
Tranzystor spinowy – co dalej ?

Tranzystor spinowy

Udoskonalenie pierwotnej koncepcji tranzystora

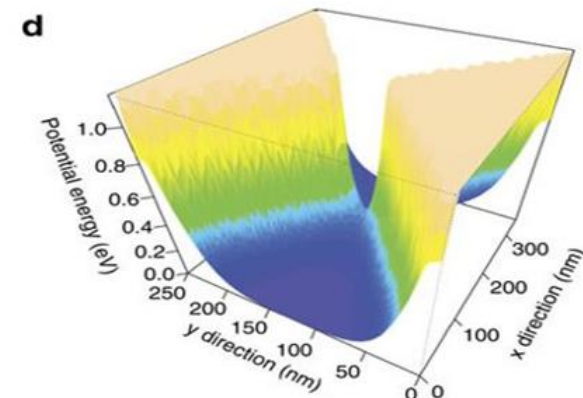
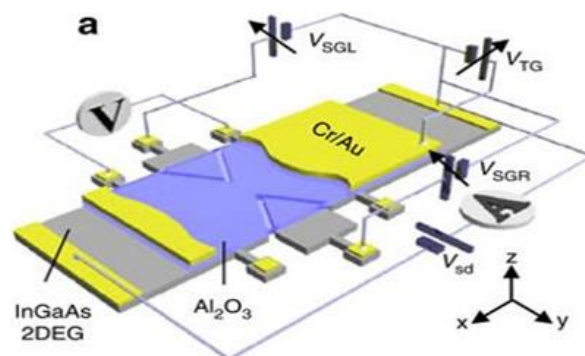
Zaproponowanie zupełnie nowej architektury

1. Problem z ferromagnetycznym kontaktem



Pomysł: Źródło spinowo spolaryzowanych elektronów oparte na materiałach półprzewodnikowych sterowane zewnętrznym polem elektrycznym

Filtry spinowe oparte na QPC

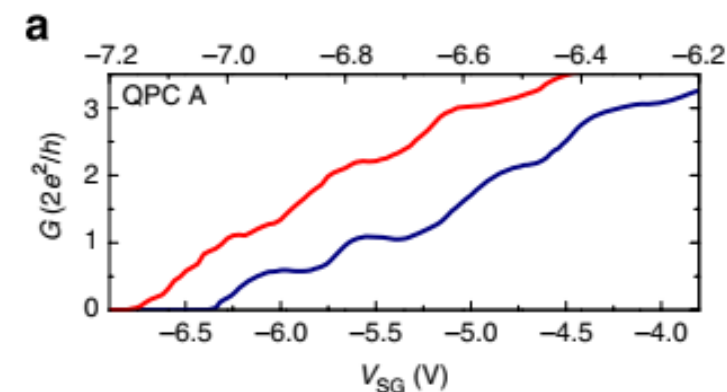
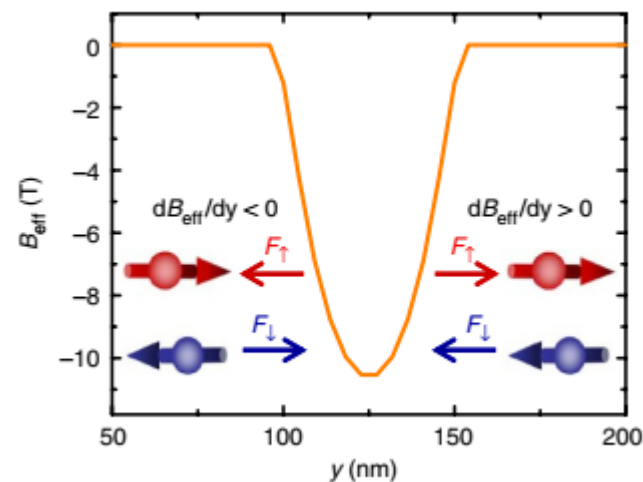
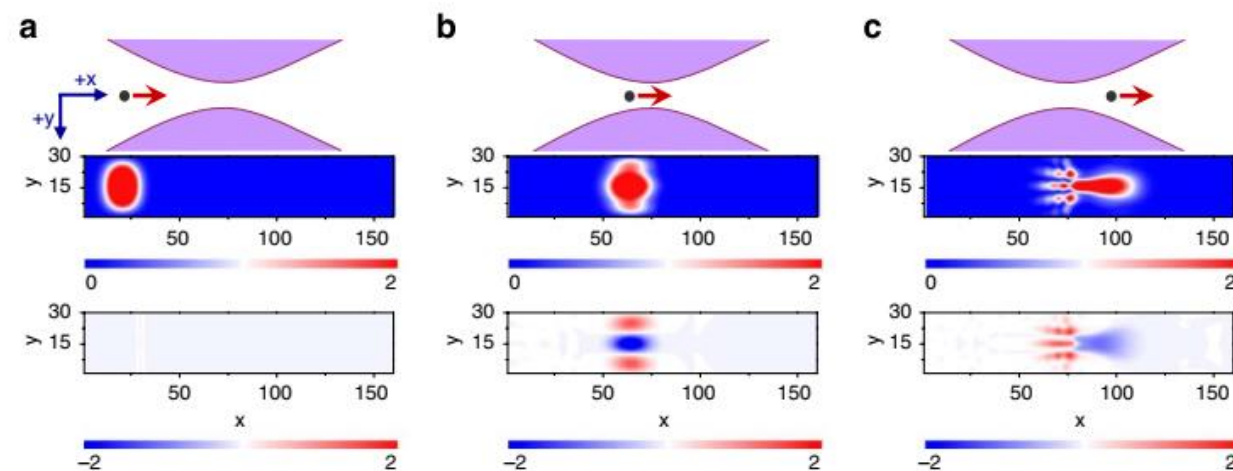
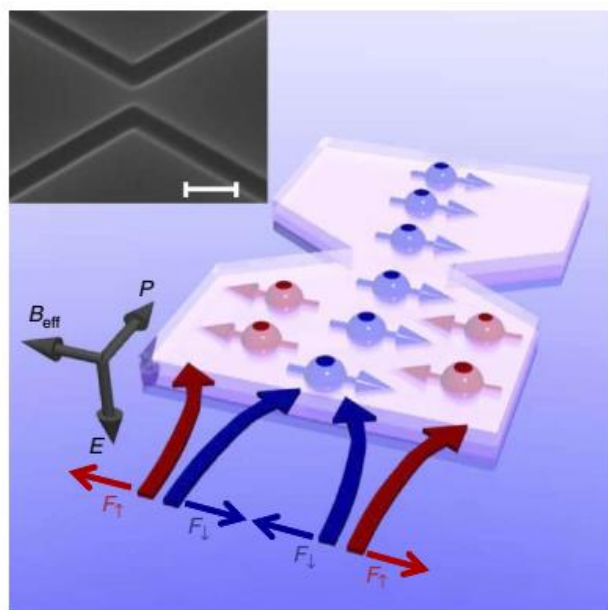


Tranzystor spinowy – co dalej ?

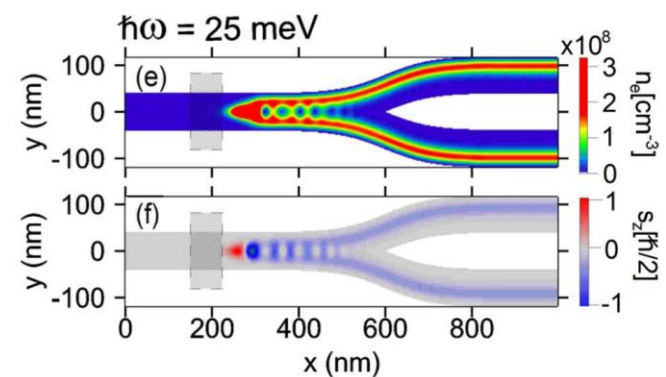
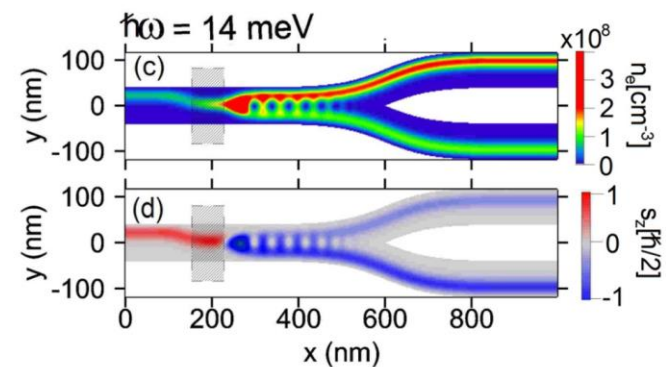
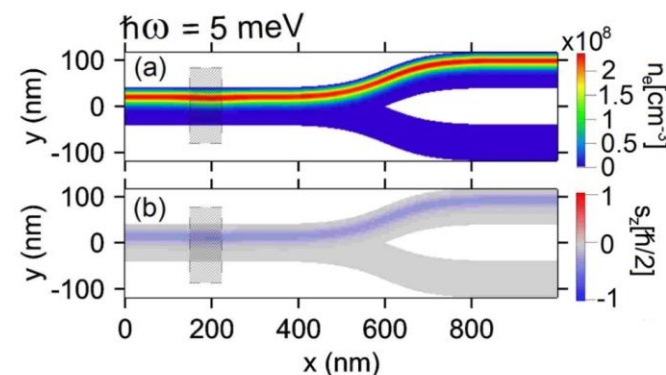
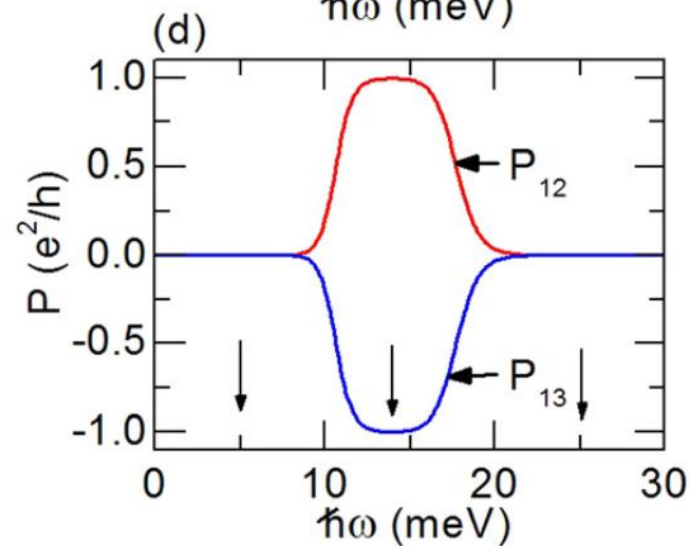
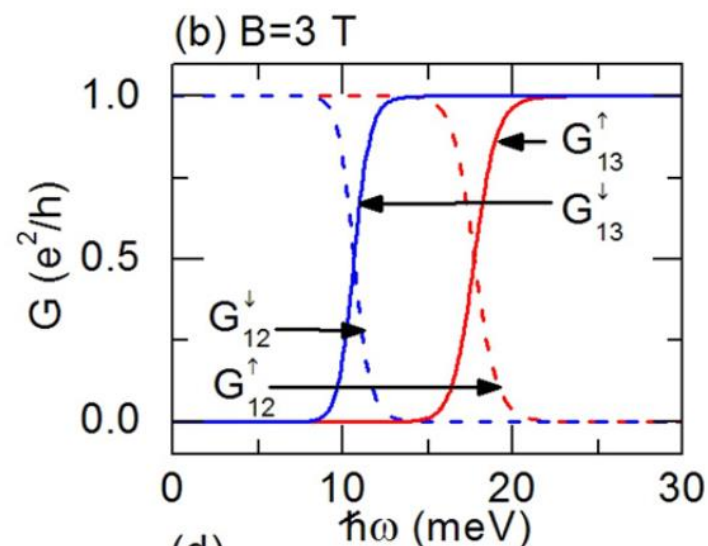
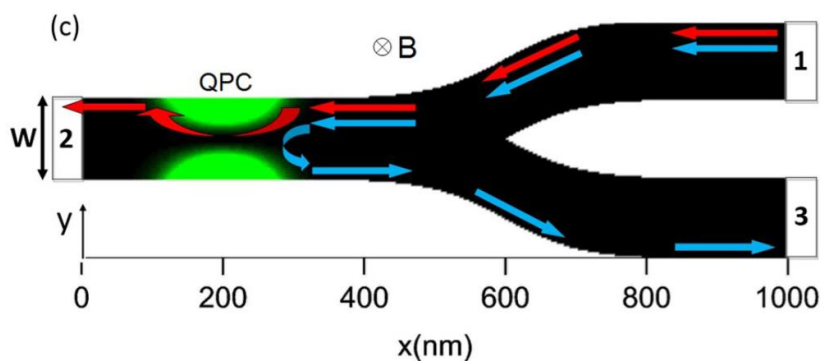
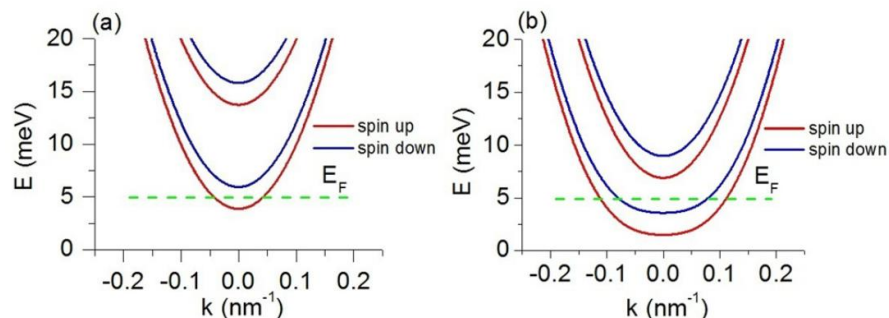
Spin-orbit induced electronic spin separation in semiconductor nanostructures

Makoto Kohda^{1,2}, Shuji Nakamura³, Yoshitaka Nishihara³, Kensuke Kobayashi^{3,4}, Teruo Ono³, Jun-ichiro Ohe⁵, Yasuhiro Tokura^{6,7}, Taiki Mineno¹ & Junsaku Nitta¹

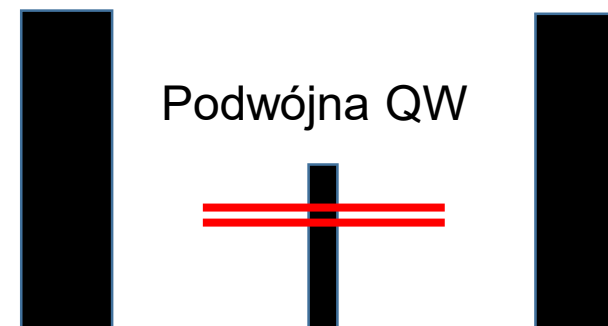
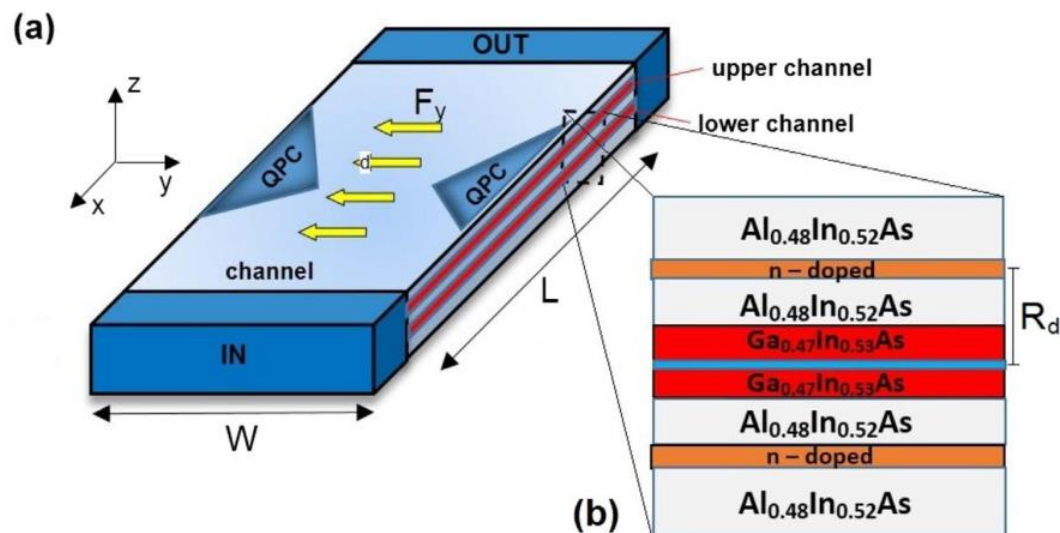
Nature Communications volume 3,
Article number: 1082 (2012)



Filtr spinowy z QPC w polu magnetycznym



Filtr spinowy w QPC

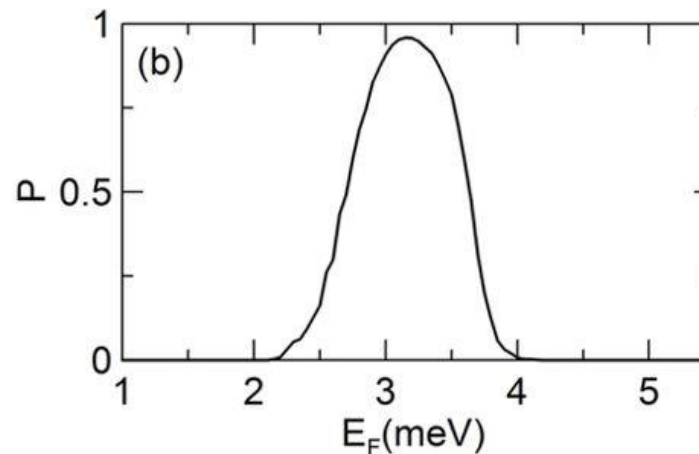
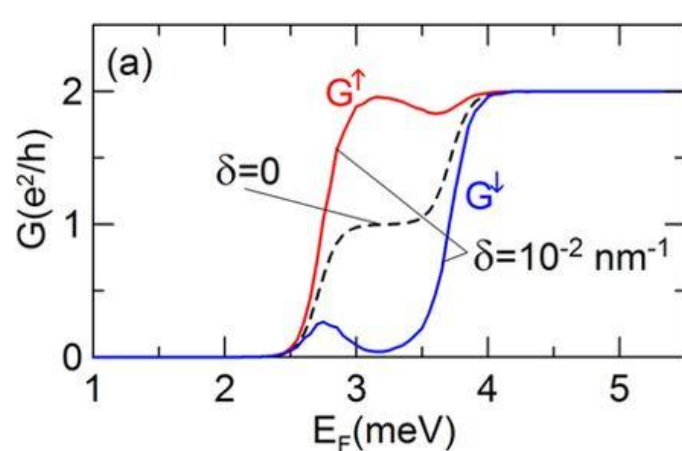


Prawie 100% polaryzacja prądu

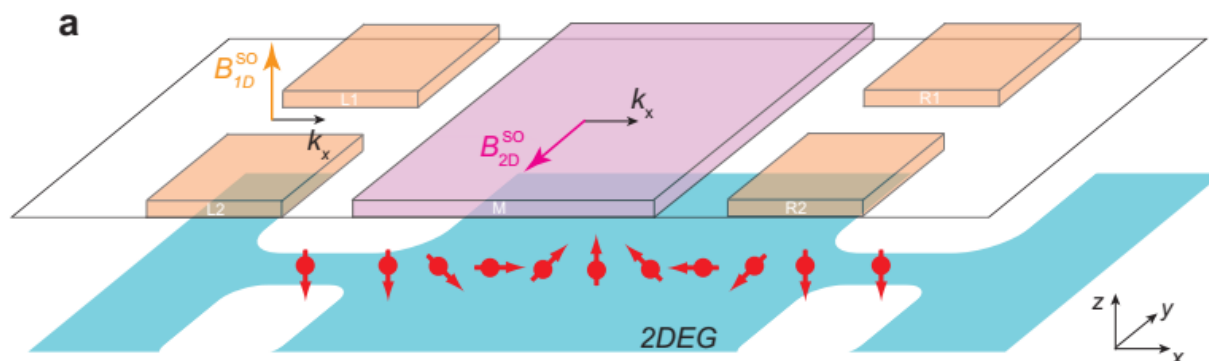
Zasada działania związana z hybrydyzacją stanów orbitalnych oraz przejściami międzypasmowymi.

Zalety:

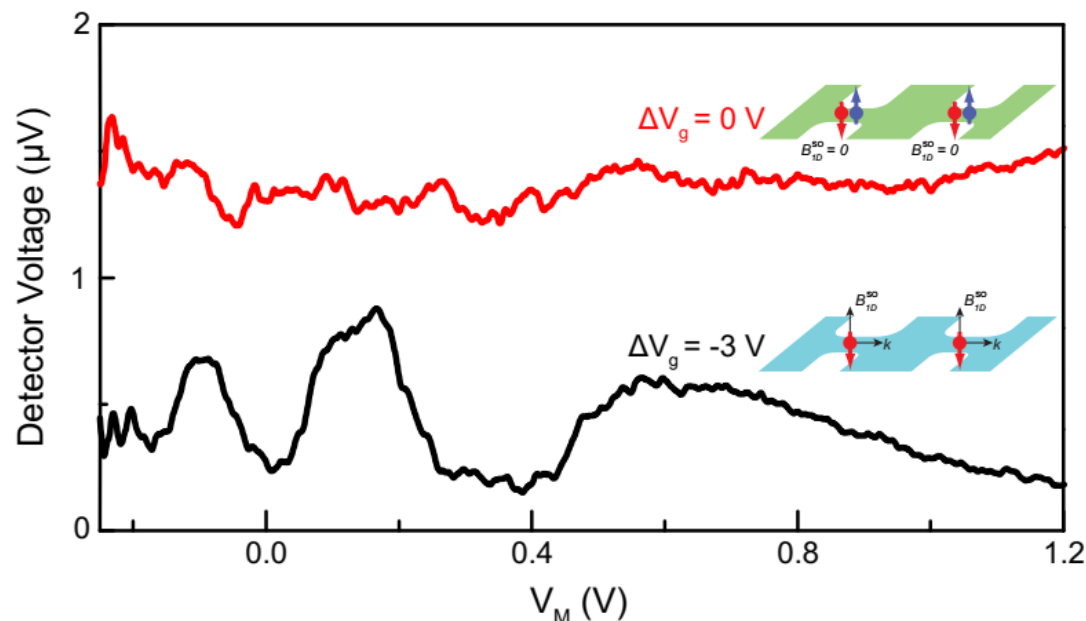
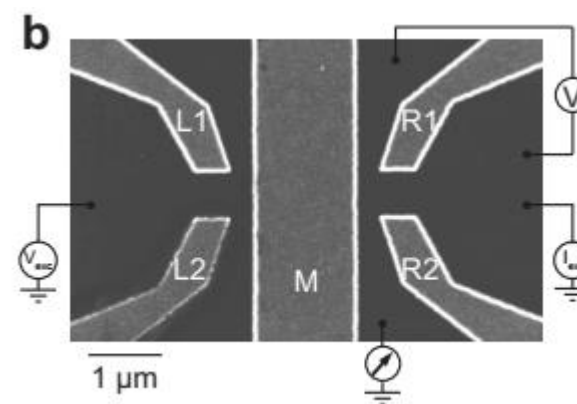
- ✓ Brak niedopasowania rezystancji
- ✓ Brak pola magnetycznego od kontaktów



Tranzystor spinowy z QPC - eksperyment



P. Chuang et al. Nature, 10, 35 (2015)



Zalety:

- Znacznie większy sygnał na wyjściu.
- Współczynnik G_{on}/G_{off} dwa rzędy wielkości większy dla QPC niż dla kontaktów w FM.

Tranzystor spinowy – co dalej ?

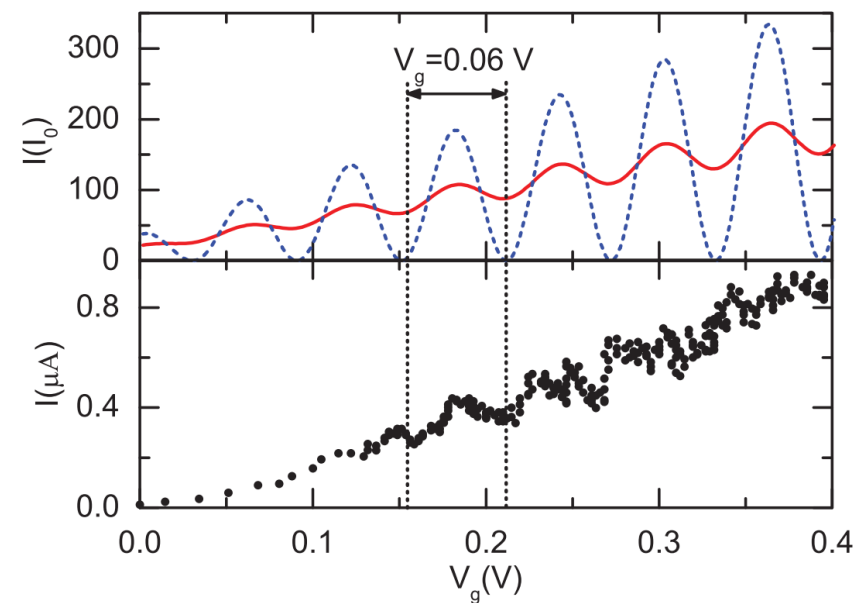
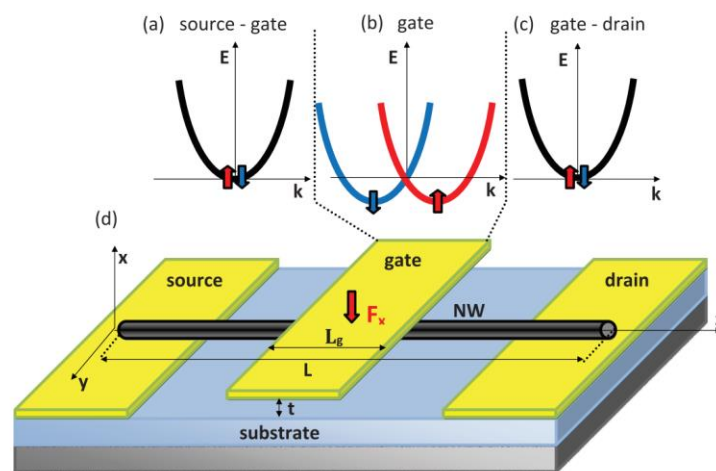
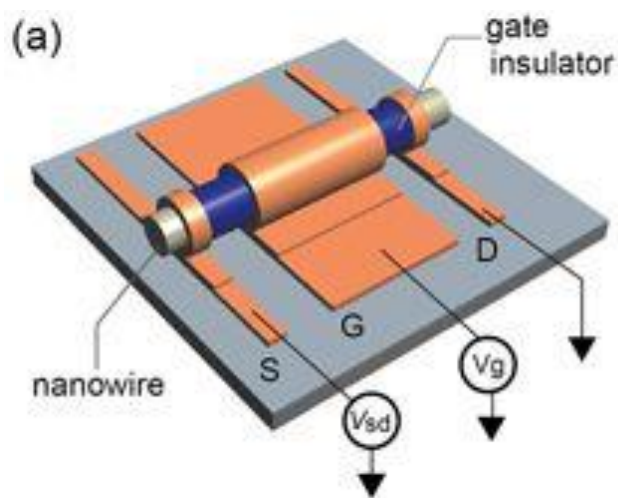
Tranzystor spinowy

Udoskonalenie pierwotnej koncepcji tranzystora

Zaproponowanie zupełnie nowej architektury

2. Problem relaksacji spinowej

Pomysł: ograniczenie relaksacji spinowej poprzez zastosowanie nanodrutów



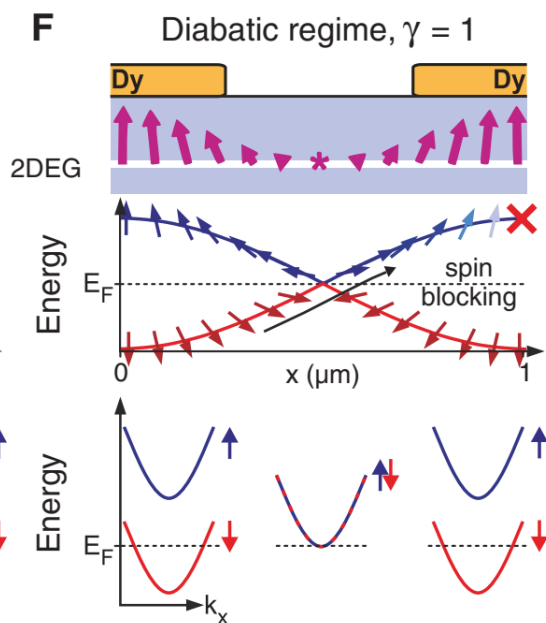
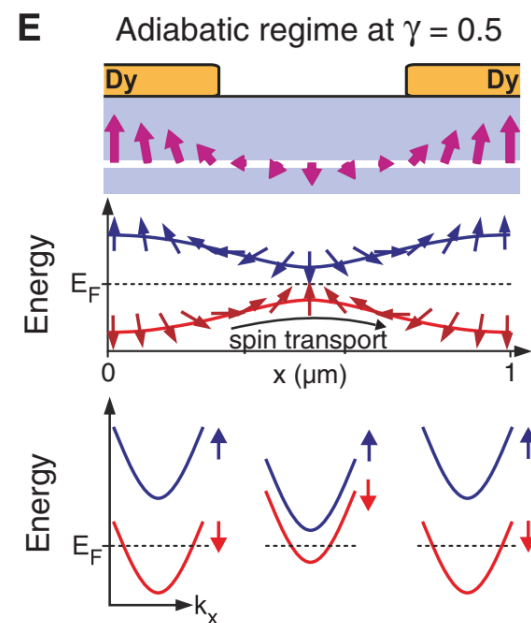
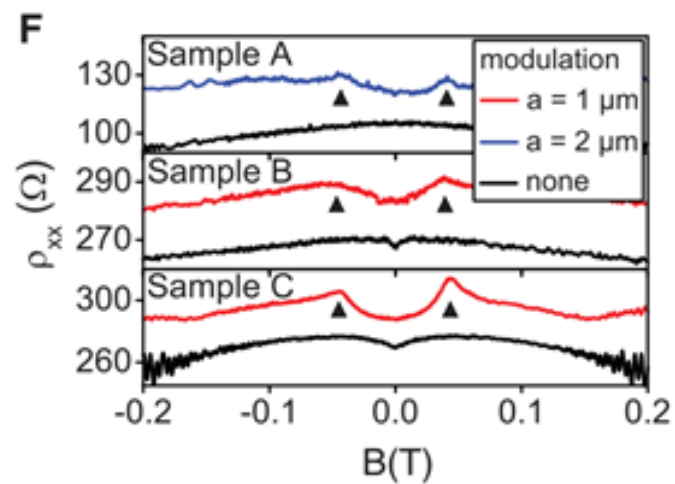
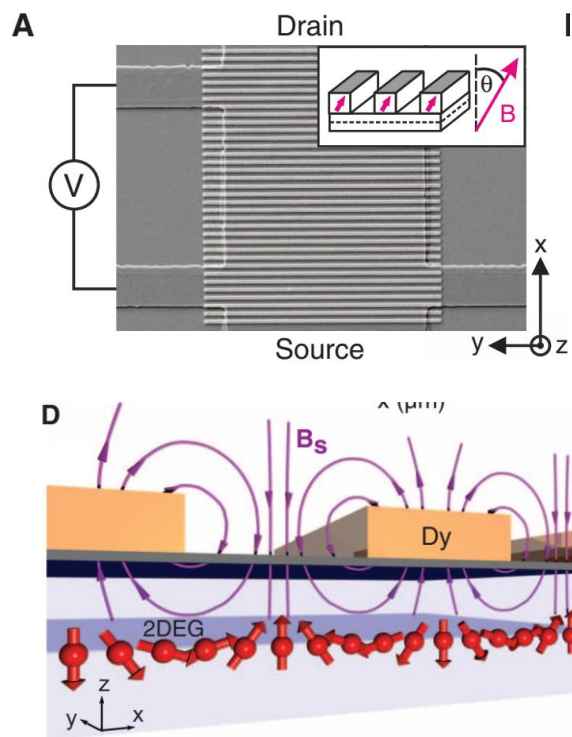
Tranzystor spinowy – co dalej ?

Tranzystor spinowy

Udoskonalenie pierwotnej koncepcji tranzystora

Zaproponowanie zupełnie nowej architektury

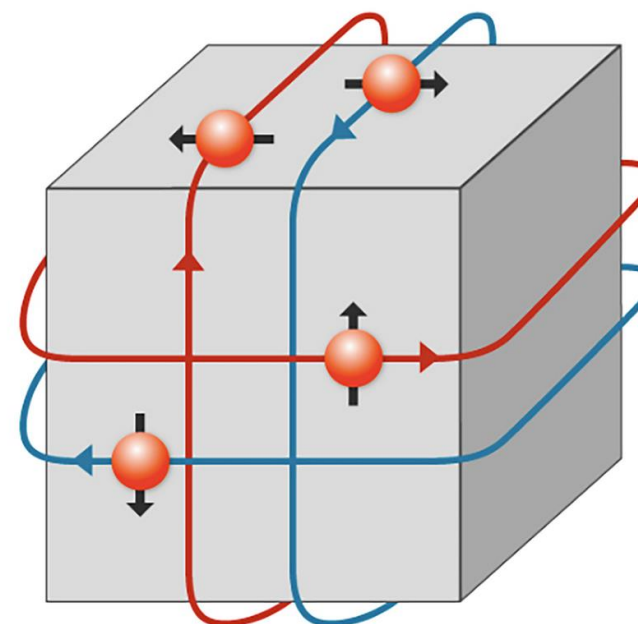
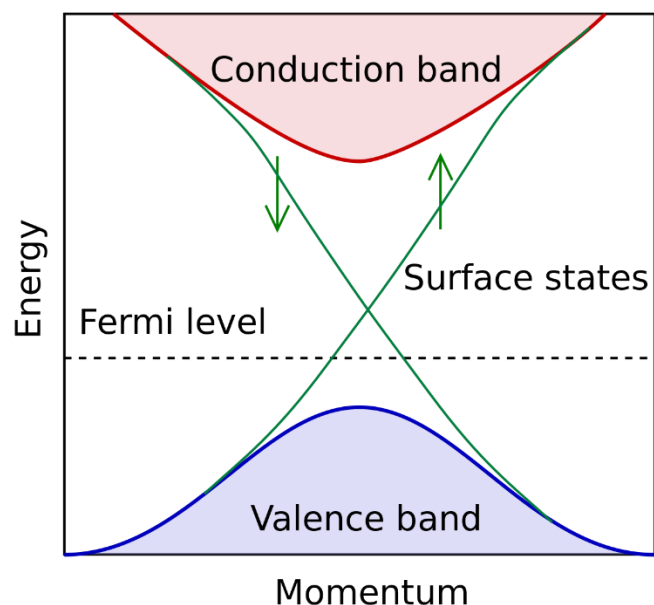
Nowa koncepcja tranzystora spinowego



Topologiczne stany materii

W roku 2016 nagroda Nobla w dziedzinie fizyki trafiła do trzech autorów teoretycznych odkryć dotyczących topologicznych przejść fazowych oraz topologicznych faz materii, a mianowicie David Thoulessa, Duncana Haldane'a i Michaela Kosterlitz'a

Izolator topologiczny – chemicznie jednorodny materiał (np. Bi_2Se_3), który jest izolatorem (posiada przerwę energetyczną), a mimo to na jego powierzchni tworzy się stan metaliczny. Powstanie stanu metalicznego **nie jest** związane z wystąpieniem obcej fazy (np. utlenianie się powierzchni), natomiast wynika z inwersji pasm energetycznych danego izolatora topologicznego wokół poziomu Fermiego.



Stany Majorany



W drugiej połowie lat 30. XX wieku włoski fizyk [Ettore Majorana](#) zaproponował, na podstawie teorii kwantowej, istnienie cząstek – fermionów, które są jednocześnie swoją własną antycząstką. Cząstki Majorany znajdowałyby się pośrodku między materią i antymaterią.

Stany Majorany w fizyce ciała stałego – nadprzewodniki

$$\begin{array}{ll} \text{kwazi-cząstka} & b = uc_{\uparrow}^{\dagger} + vc_{\downarrow} \\ \text{Stan Majorany} & \gamma = uc_{\sigma}^{\dagger} + u^{*}c_{\sigma} \end{array}$$

- fractional (anyon) statistics

$$\hat{\gamma}_{i,n}^{\dagger} \hat{\gamma}_{i,n} = 1/2$$

Model Kitaeva

$$\mathcal{H}_{\text{chain}} = -\mu \sum_{i=1}^N n_i - \sum_{i=1}^{N-1} (tc_i^\dagger c_{i+1} + \Delta c_i c_{i+1} + \text{h.c.})$$

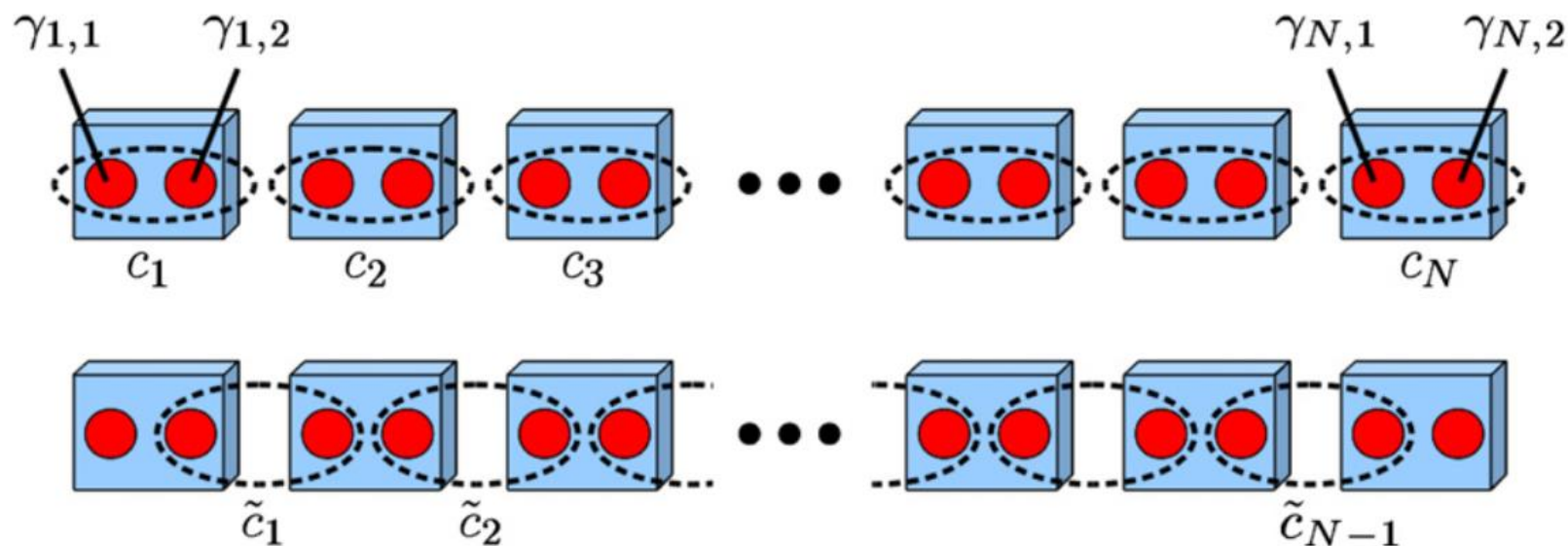
Operatory fermionowe

$$c_i = \frac{1}{2}(\gamma_{i,1} + i\gamma_{i,2}),$$

$$\gamma_{i,1} = c_i^\dagger + c_i,$$

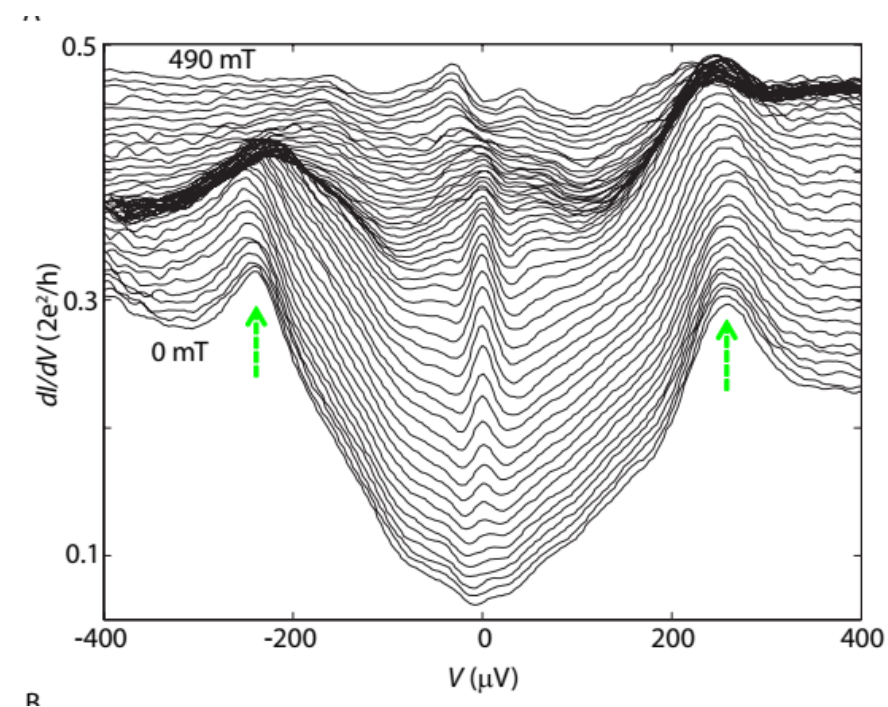
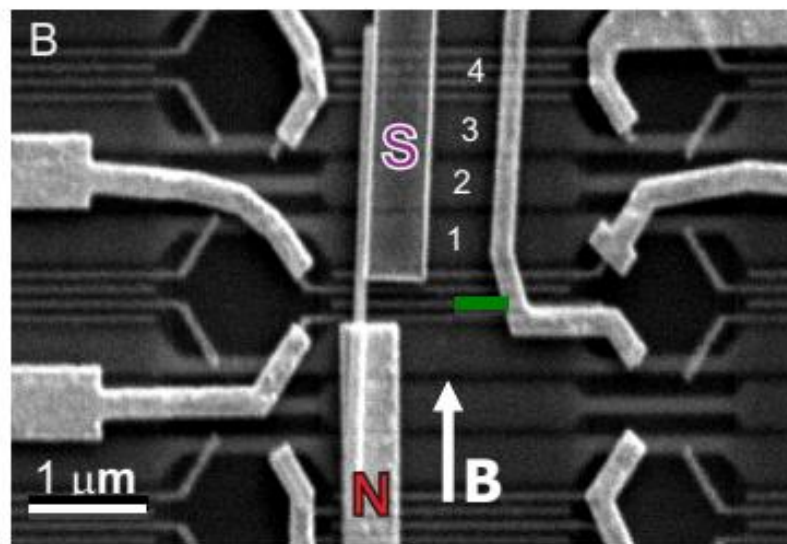
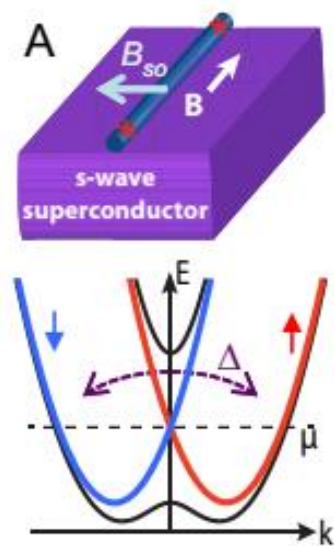
$$c_i^\dagger = \frac{1}{2}(\gamma_{i,1} - i\gamma_{i,2}),$$

$$\gamma_{i,2} = i(c_i^\dagger - c_i),$$



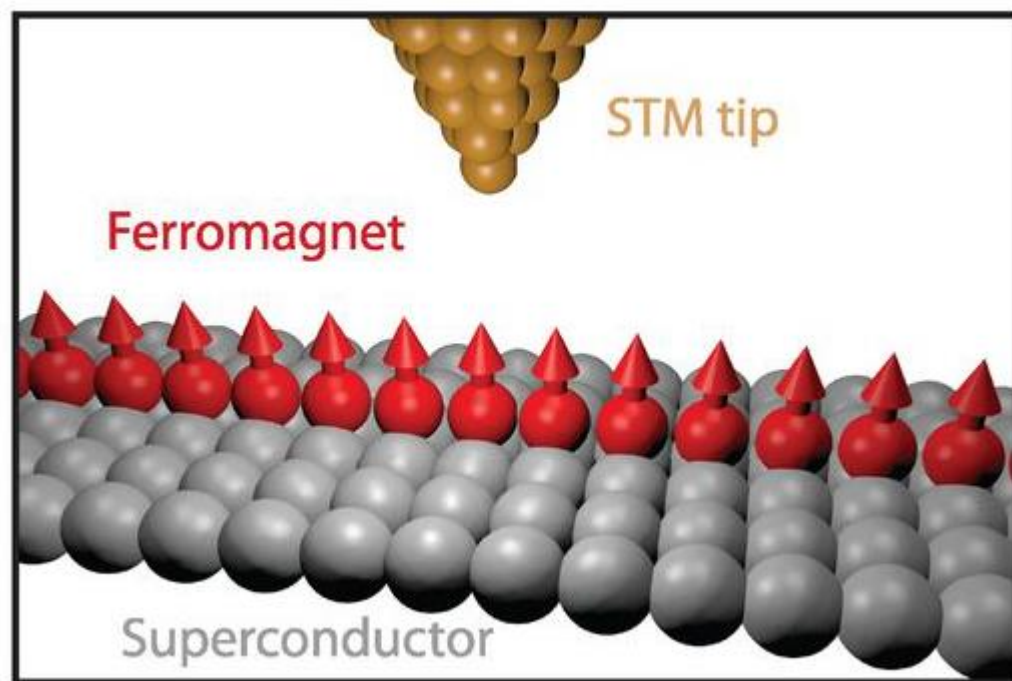
Stany Majorany - eksperyment

V. Mourik, et al. Science, 336, 1003 (2012)

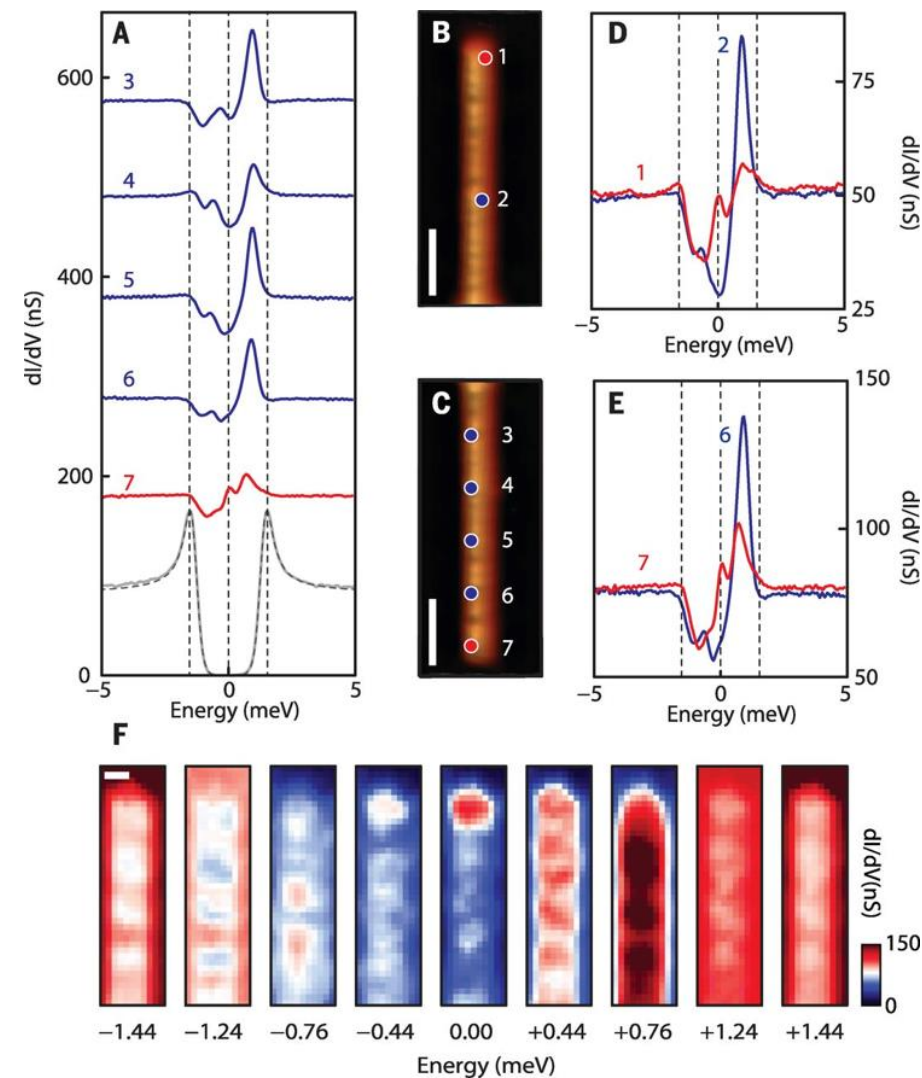


Stany Majorany - eksperyment

Observation of Majorana Fermions in Ferromagnetic Atomic Chains on a Superconductor



Science 346, 602-607 (2014)





Najważniejsze informacje z wykładu

- Spintronika jest alternatywną formą elektroniki, w której informacja zakodowana jest w spinie elektronu. Rozwój spintroniki w przyszłości pozwoli na budowanie mniejszych układów o niższym poborze mocy.
- Do podstawowych urządzeń spintroniki należy filtr spinowy, separator spinu, tranzystor spinowy. Ze spintroniką wiąże się również duże nadzieje w kontekście komputerów kwantowych. Istnieją idee kubitów opartych na spinie elektronów w kropkach kwantowych.
- Spintronika jest obecna w zastosowaniach komercyjnych np. GMR (giant magnetoresistance), pamięci. itd. (mieliśmy okazje wysłuchania bardzo dobrego seminarium na ten temat)