

Spintronika – fotonika: analogie

Janusz Adamowski

Paweł Wójcik, Maciej Wołoszyn, Bartłomiej Spisak

*W oparciu o wykład wygłoszony podczas konferencji
"2nd World Congress of Smart Materials",
Singapur, March 2-6, 2016*

Wprowadzenie dla niespecjalistów

Spintronika (elektronika spinowa) zajmuje się zjawiskami wynikającymi z istnienia **spinu elektronu** zachodzącymi w przyrządach półprzewodnikowych i metalicznych (ciałach stałych).

Przyrządy spintroniczne służą do:

- generacji,
- modyfikacji,
- detekcji,

prądów spinowych, czyli prądów elektronów o uporządkowanych spinach.

Spintronika (elektronika spinowa) zajmuje się zjawiskami wynikającymi z istnienia **spinu elektronu** zachodzącymi w przyrządach półprzewodnikowych i metalicznych (ciałach stałych).

Przyrządy spintroniczne służą do:

- generacji,
- modyfikacji,
- detekcji,

prądów spinowych, czyli prądów elektronów o uporządkowanych spinach.

Spintronika (elektronika spinowa) zajmuje się zjawiskami wynikającymi z istnienia **spinu elektronu** zachodzącymi w przyrządach półprzewodnikowych i metalicznych (ciałach stałych).

Przyrządy spintroniczne służą do:

- **generacji,**
- **modyfikacji,**
- **detekcji,**

prądów spinowych, czyli prądów elektronów o uporządkowanych spinach.

Spintronika (elektronika spinowa) zajmuje się zjawiskami wynikającymi z istnienia **spinu elektronu** zachodzącymi w przyrządach półprzewodnikowych i metalicznych (ciałach stałych).

Przyrządy spintroniczne służą do:

- **generacji,**
- **modyfikacji,**
- **detekcji,**

prądów spinowych, czyli prądów elektronów o uporządkowanych spinach.

Spintronika (elektronika spinowa) zajmuje się zjawiskami wynikającymi z istnienia **spinu elektronu** zachodzącymi w przyrządach półprzewodnikowych i metalicznych (ciałach stałych).

Przyrządy spintroniczne służą do:

- **generacji,**
- **modyfikacji,**
- **detekcji,**

prądów spinowych, czyli prądów elektronów o uporządkowanych spinach.

Spintronika (elektronika spinowa) zajmuje się zjawiskami wynikającymi z istnienia **spinu elektronu** zachodzącymi w przyrządach półprzewodnikowych i metalicznych (ciałach stałych).

Przyrządy spintroniczne służą do:

- **generacji,**
- **modyfikacji,**
- **detekcji,**

prądów spinowych, czyli prądów elektronów o uporządkowanych spinach.

W zakres spintroniki wchodzi także badania **kubitów spinowych**.

Fotonika zajmuje się

- **generacją,**
- **modyfikacją,**
- **detekcją,**

fotonów o energiach z zakresu od podczerwieni do nadfioletu.

Fotonika zajmuje się również badaniami **kubitów fotonowych**.

Optyka może być traktowana jako część fotoniki.

Fotonika zajmuje się

- **generacją,**
- **modyfikacją,**
- **detekcją,**

fotonów o energiach z zakresu od podczerwieni do nadfioletu.

Fotonika zajmuje się również badaniami **kubitów fotonowych**.

Optyka może być traktowana jako część fotoniki.

Fotonika zajmuje się

- **generacją,**
- **modyfikacją,**
- **detekcją,**

fotonów o energiach z zakresu od podczerwieni do nadfioletu.

Fotonika zajmuje się również badaniami **kubitów fotonowych**.

Optyka może być traktowana jako część fotoniki.

Fotonika zajmuje się

- **generacją,**
- **modyfikacją,**
- **detekcją,**

fotonów o energiach z zakresu od podczerwieni do nadfioletu.

Fotonika zajmuje się również badaniami **kubitów fotonowych**.

Optyka może być traktowana jako część fotoniki.

Fotonika zajmuje się

- **generacją,**
- **modyfikacją,**
- **detekcją,**

fotonów o energiach z zakresu od podczerwieni do nadfioletu.

Fotonika zajmuje się również badaniami **kubitów fotonowych**.

Optyka może być traktowana jako część fotoniki.

Fotonika zajmuje się

- **generacją,**
- **modyfikacją,**
- **detekcją,**

fotonów o energiach z zakresu od podczerwieni do nadfioletu.

Fotonika zajmuje się również badaniami **kubitów fotonowych**.

Optyka może być traktowana jako część fotoniki.

Stany spinowe elektronu i stany polaryzacji fotonu

(1) Stany spinowe elektronu (spinory)

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = +\hbar/2$

$$|\uparrow\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = -\hbar/2$

$$|\downarrow\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Stany spinowe elektronu i stany polaryzacji fotonu

(1) Stany spinowe elektronu (spinory)

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = +\hbar/2$

$$|\uparrow\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = -\hbar/2$

$$|\downarrow\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Stany spinowe elektronu i stany polaryzacji fotonu

(1) Stany spinowe elektronu (spinory)

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = +\hbar/2$

$$|\uparrow\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = -\hbar/2$

$$|\downarrow\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Stany spinowe elektronu i stany polaryzacji fotonu

(1) Stany spinowe elektronu (spinory)

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = +\hbar/2$

$$|\uparrow\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

stan elektronu o składowej z-owej spinu $s_z = -\hbar/2$

$$|\downarrow\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

(2) Stany polaryzacji liniowej fotonu

Jeżeli foton porusza się w kierunku z , to stany fotonu spolaryzowanego liniowo również możemy zapisać w postaci spinorowej.

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku x

$$|x\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku y

$$|y\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(2) Stany polaryzacji liniowej fotonu

Jeżeli foton porusza się w kierunku z , to stany fotonu spolaryzowanego liniowo również możemy zapisać w postaci spinorowej.

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku x

$$|x\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku y

$$|y\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(2) Stany polaryzacji liniowej fotonu

Jeżeli foton porusza się w kierunku z , to stany fotonu spolaryzowanego liniowo również możemy zapisać w postaci spinorowej.

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku x

$$|x\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku y

$$|y\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(2) Stany polaryzacji liniowej fotonu

Jeżeli foton porusza się w kierunku z , to stany fotonu spolaryzowanego liniowo również możemy zapisać w postaci spinorowej.

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku x

$$|x\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku y

$$|y\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(2) Stany polaryzacji liniowej fotonu

Jeżeli foton porusza się w kierunku z , to stany fotonu spolaryzowanego liniowo również możemy zapisać w postaci spinorowej.

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku x

$$|x\rangle \equiv |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

stan fotonu spolaryzowanego liniowo w kierunku y

$$|y\rangle \equiv |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Kubit (bit kwantowy)

$$|\Psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle \quad (5)$$

$$|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1 \quad (6)$$

Realizacja fizyczna kubitów: kubity spinowe i kubity fotonowe

Kubit (bit kwantowy)

$$|\Psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle \quad (5)$$

$$|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1 \quad (6)$$

Realizacja fizyczna kubitów: kubity spinowe i kubity fotonowe

Kubit (bit kwantowy)

$$|\Psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle \quad (5)$$

$$|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1 \quad (6)$$

Realizacja fizyczna kubitów: kubity spinowe i kubity fotonowe

Kubit (bit kwantowy)

$$|\Psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle \quad (5)$$

$$|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1 \quad (6)$$

Realizacja fizyczna kubitów: kubity spinowe i kubity fotonowe

Z podobieństwa stanów spinowych [(1), (2)] i fotonowych [(3), (4)] wynika

podobieństwo działania przyrządów spintronicznych i optycznych.

- I. Filtr spinowy – polaryzator/analizator światła
- II. Separator spinów – kryształ dwójłomny
- III. Tranzystor spinowy – modulator elektro-optyczny

Z podobieństwa stanów spinowych [(1), (2)] i fotonowych [(3), (4)] wynika

podobieństwo działania przyrządów spintronicznych i optycznych.

- **I. Filtr spinowy – polaryzator/analizator światła**
- **II. Separator spinów – kryształ dwójłomny**
- **III. Tranzystor spinowy – modulator elektro-optyczny**

Z podobieństwa stanów spinowych [(1), (2)] i fotonowych [(3), (4)] wynika

podobieństwo działania przyrządów spintronicznych i optycznych.

- **I. Filtr spinowy – polaryzator/analizator światła**
- II. Separator spinów – kryształ dwójłomny
- III. Tranzystor spinowy – modulator elektro-optyczny

Z podobieństwa stanów spinowych [(1), (2)] i fotonowych [(3), (4)] wynika

podobieństwo działania przyrządów spintronicznych i optycznych.

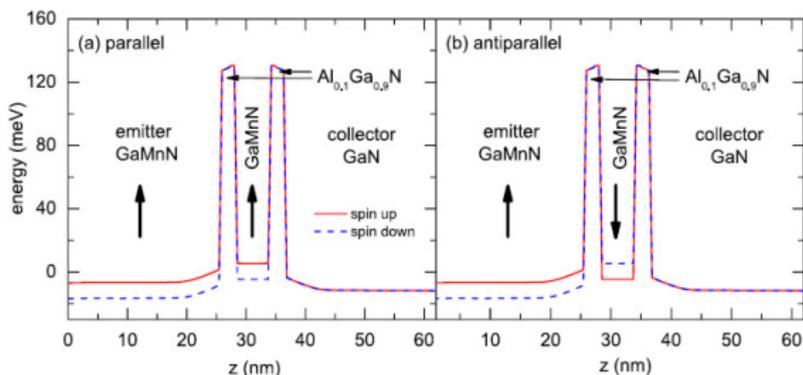
- **I. Filtr spinowy – polaryzator/analizator światła**
- **II. Separator spinów – kryształ dwójłomny**
- **III. Tranzystor spinowy – modulator elektro-optyczny**

Z podobieństwa stanów spinowych [(1), (2)] i fotonowych [(3), (4)] wynika

podobieństwo działania przyrządów spintronicznych i optycznych.

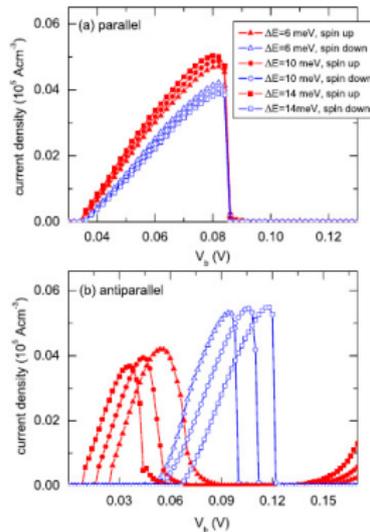
- **I. Filtr spinowy – polaryzator/analizator światła**
- **II. Separator spinów – kryształ dwójłomny**
- **III. Tranzystor spinowy – modulator elektro-optyczny**

I. Filtr spinowy

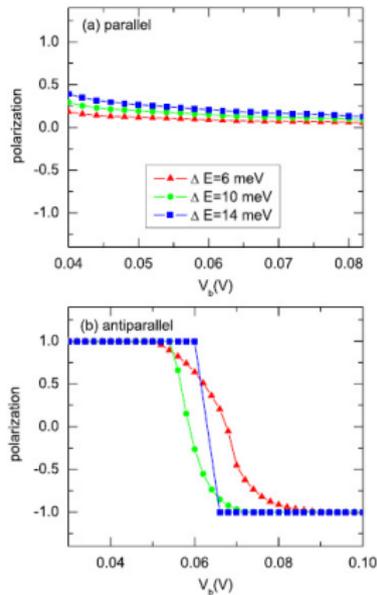


Profil energii potencjalnej elektronów o spinie \uparrow i \downarrow w rezonansowej diodzie tunelowej (RTD).
(a) Równoległe i (b) antyrównoległe wektory magnetyzacji warstw emitera i studni kwantowej.

P. Wójcik, J. Adamowski, M. Wołoszyn, B. J. Spisak, Appl. Phys. Lett. 102, 242411 (2013).

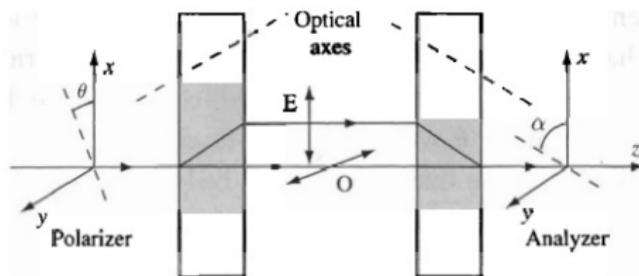


Charakterystyki prądowo-napięciowe RTD w temperaturze 4.2 K. V_b = napięcie kolektor-emiter, ΔE = rozszczepienie spinowe pasma przewodnictwa GaMnN. (a) Równoległa (b) antyrównoległa magnetyzacja warstw emitera i studni kwantowej. [P. Wójcik et al., Appl. Phys. Lett. 102, 242411 (2013).]

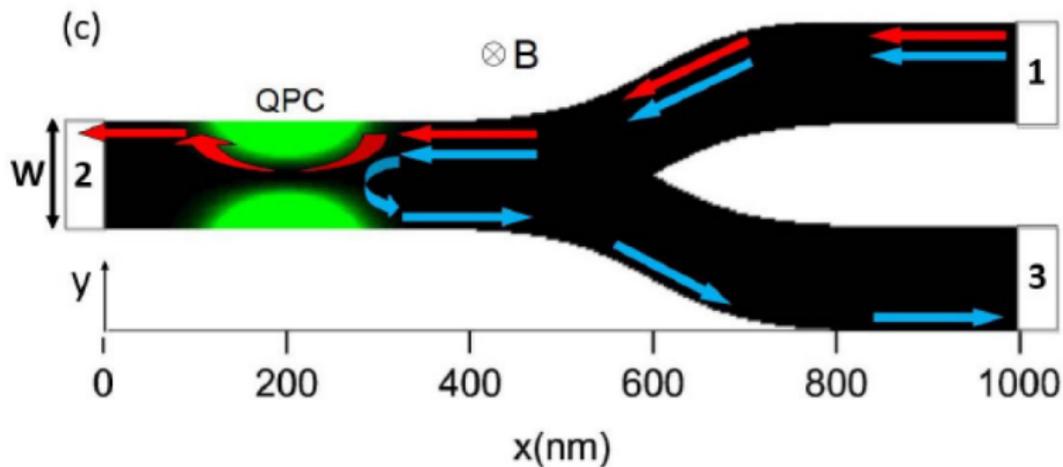


Polaryzacja spinowa prądu płynącego przez RTD w temperaturze 4.2 K. (a) Równoległa (b) antyrównoległa magnetyzacja warstw emitera i studni kwantowej. [P. Wójcik et al., Appl. Phys. Lett. 102, 242411 (2013).]

Analogia: filtr spinowy – polaryzator/analizator światła

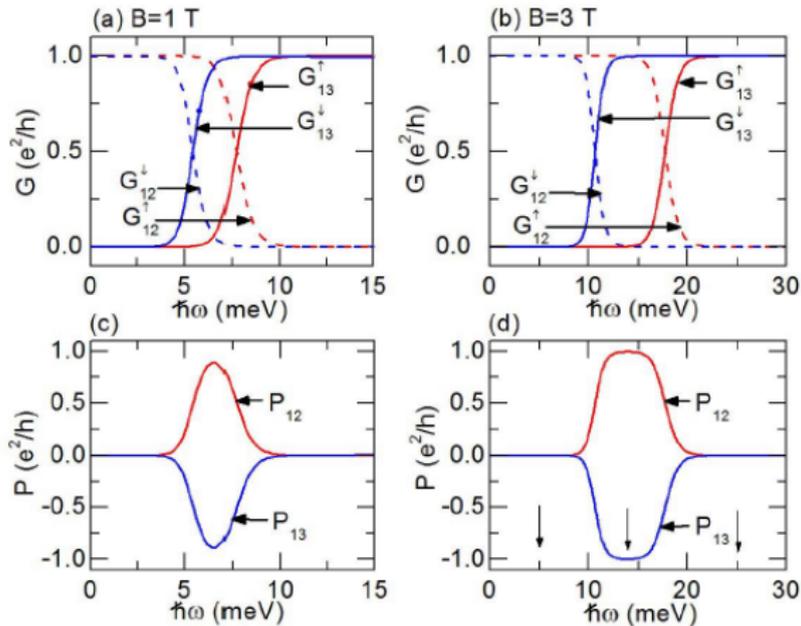


II. Separator spinów

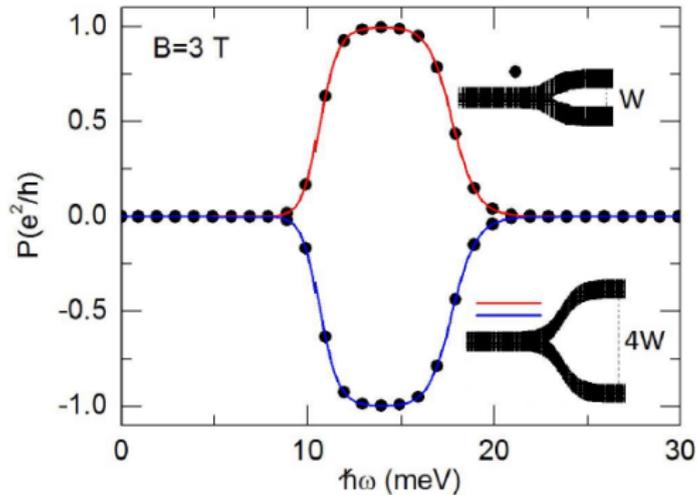


Schemat nanostruktury o kształcie Y. Elektroda 1 = wejście, elektrody 2 i 3 = wyjścia, QPC = kwantowy kontakt punktowy. Strzałki czerwone (niebieskie) pokazują prądy spinowe o spinie \uparrow (\downarrow) transportowane przez stany krawędziowe. Pole magnetyczne $\mathbf{B} = (0, 0, B)$.

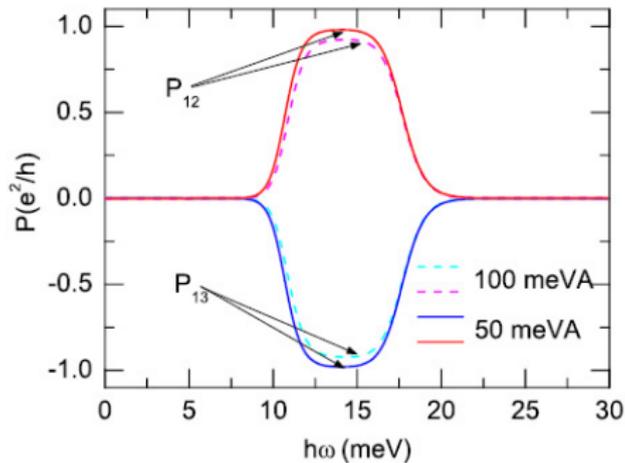
P. Wójcik, J. Adamowski, M. Wołoszyn, B. J. Spisak, J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).



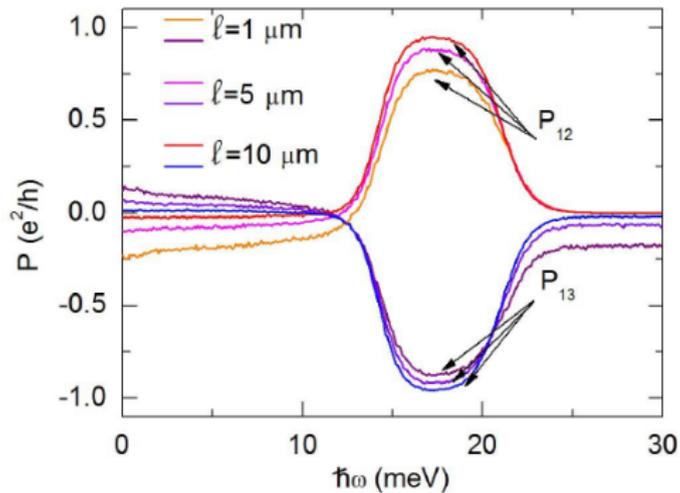
Przewodnictwo spinowe G i polaryzacja spinowa prądu $P = G_\uparrow - G_\downarrow$ dla $B = 1$ T i $B = 3$ T jako funkcja energii uwięzienia $\hbar\omega$ elektronu w QPC. [P. Wójcik et al., J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).]



Polaryzacja spinowa P prądu dla różnych kątów rozwarcia ramion Y jako funkcja energii uwięzienia $\hbar\omega$ elektronu w QPC. [P. Wójcik et al., J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).]



Wpływ oddziaływania spin-orbita o stałą sprzężenia Rashby $\alpha = 50$ meV/Å i 100 meV/Å na polaryzację spinową prądu P . [P. Wójcik et al., J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).]



Wpływ rozpraszania niezależnego od spinu na polaryzację spinową P prądu. ℓ = długość rozpraszania. [P. Wójcik et al., J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).]

Podsumowanie wyników dla separatora spinów

Separacja prądów spinowych w badanej nanostrukturze Y wynika z:

- spinowego rozszczepienia Zeemana dodatkowo powiększonego w obszarze QPC,
- transportu elektronów przez stany krawędziowe.

Podsumowanie wyników dla separatora spinów

Separacja prądów spinowych w badanej nanostrukturze Y wynika z:

- spinowego rozszczepienia Zeemana dodatkowo powiększonego w obszarze QPC,
- transportu elektronów przez stany krawędziowe.

Podsumowanie wyników dla separatora spinów

Separacja prądów spinowych w badanej nanostrukturze Y wynika z:

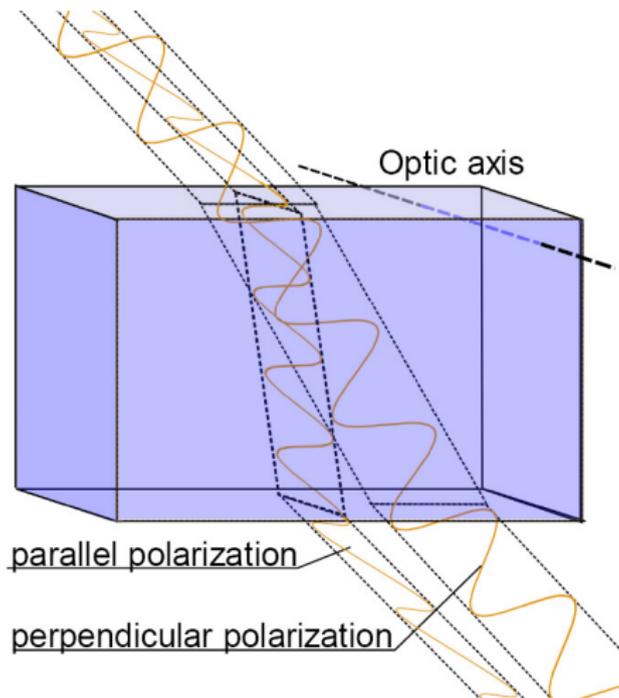
- spinowego rozszczepienia Zeemana dodatkowo powiększonego w obszarze QPC,
- transportu elektronów przez stany krawędziowe.

Podsumowanie wyników dla separatora spinów

Separacja prądów spinowych w badanej nanostrukturze Y wynika z:

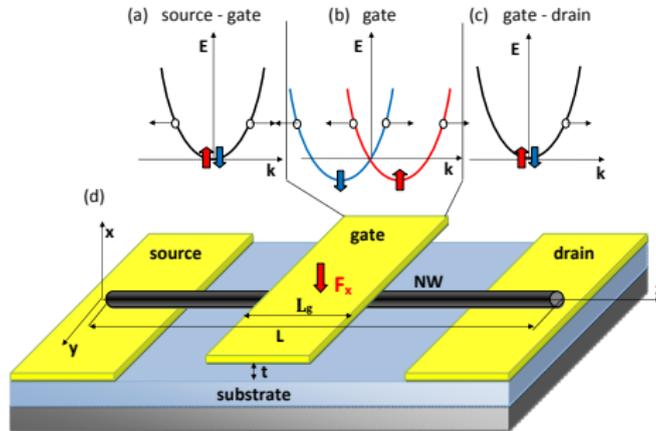
- spinowego rozszczepienia Zeemana dodatkowo powiększonego w obszarze QPC,
- transportu elektronów przez stany krawędziowe.

Analogia: separator spinów – kryształ dwójłomny



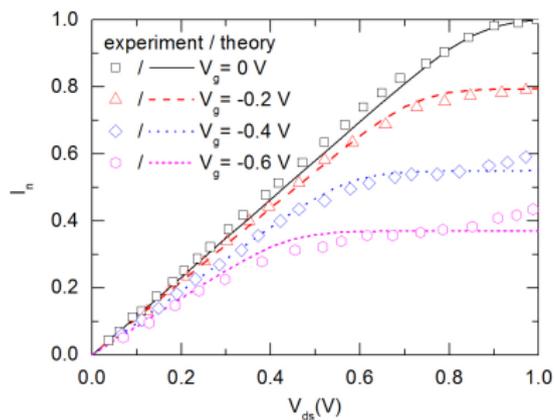
III. Tranzystor spinowy

III. A. Efekt tranzystorowy indukowany przez sprzężenie spin-orbita

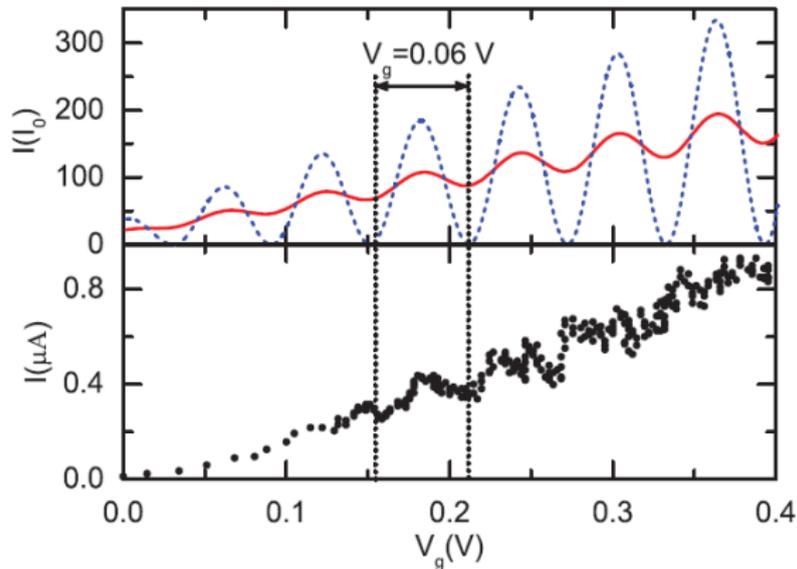


(a) Relacje dyspersji dla elektronów o spinach \uparrow i \downarrow w różnych obszarach nanodrutu. (b) Schemat tranzystora spinowego: nanodrut z boczną bramką oraz elektrodami źródła i drenu.

P. Wójcik, J. Adamowski, M. Wołoszyn, B. J. Spisak, J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).

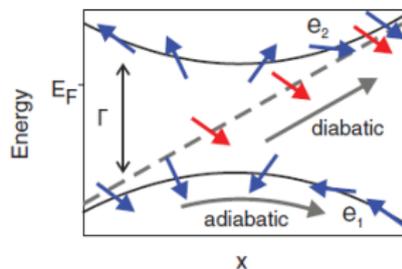


Prąd I w funkcji napięcia dren-źródło V_{ds} i napięcia bramki V_g dla $T = 300 \text{ K}$. Symbole odpowiadają danym eksperymentalnym (Yoh et al., 2014), krzywe pokazują wyniki obliczeń. [P. Wójcik et al., J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).]



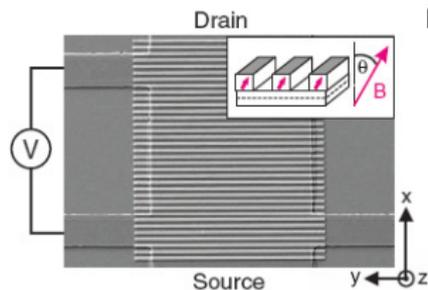
Prąd I w funkcji napięcia bramki V_g dla $T = 300$ K. Rysunek górny: wyniki obliczeń dla $P = 1$ (krzywe przerywane niebieskie) i $P = 0.4$ (krzywe ciągłe czerwone), rysunek dolny: dane eksperymentalne [P. Wójcik et al., J. Appl. Phys. 118, 014302 (2015).]

III. B. Przejścia Landaua-Zenera w helikalnym polu magnetycznym

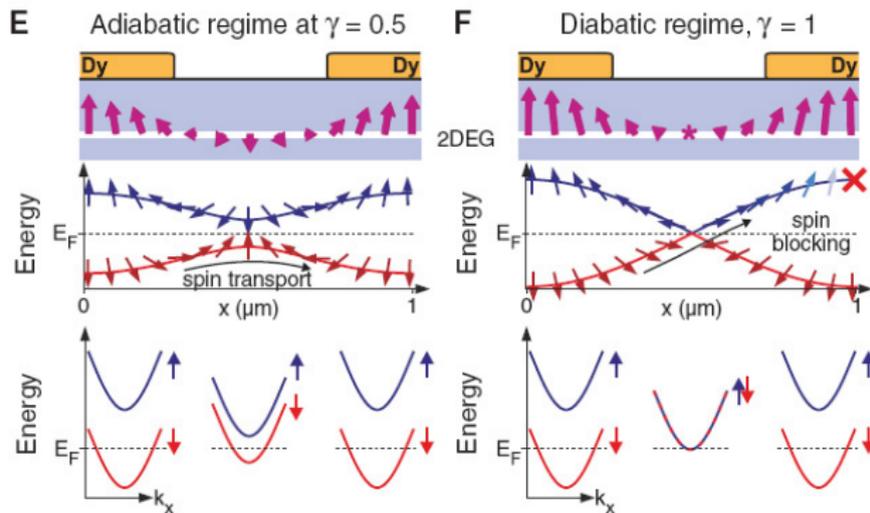


Przejścia adiabaticzne (wolne) i diabaticzne (szybkie) pomiędzy pasmami e_1 i e_2 .

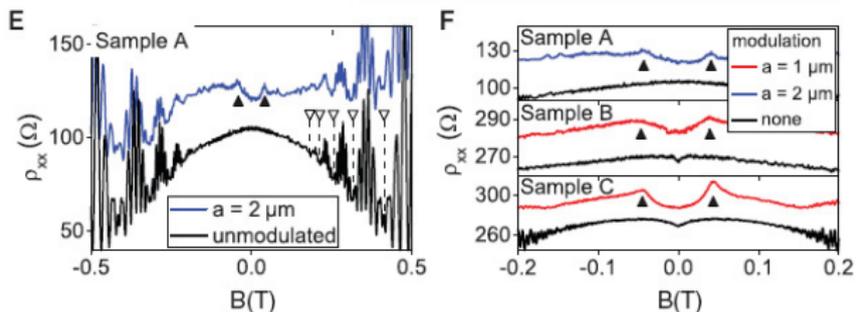
C. Betthausen, T. Dollinger, H. Saarikoski, V. Kolkovsky, G. Karczewski, T. Wojtowicz, K. Richter, D. Weiss, Science 337, 324 (2012).



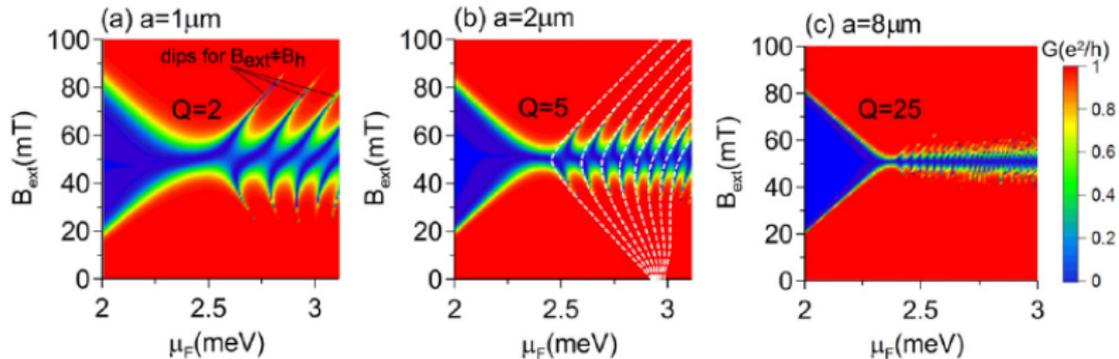
Obraz z mikroskopu elektronowego struktury warstwowej CdMnTe pokrytej paskami Dy.
Wstawka: Kierunki zewnętrznego pola magnetycznego \mathbf{B} i magnetyzacji pasków Dy. [C. Betthausen et al., Science 337, 324 (2012)].



(E) Transport spinu wskutek przejść adiabatycznych, (F) blokada transportu spinu wskutek przejść diabaticznych. $\gamma = B/B_s$, $B_s =$ amplituda helikalnego pola magnetycznego. [C. Betthausen et al., Science 337, 324 (2012)].



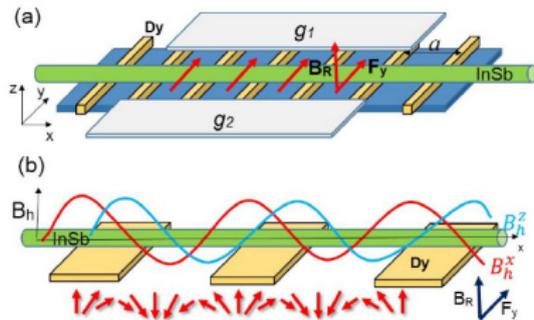
Magnetorezystancja ρ_{xx} układu modulowana przez pole magnetyczne (krzywe czerwone i niebieskie) i niemodulowana (krzywe czarne). Piki rezystancji (czarne trójkąty) odpowiadają selektywnej blokadzie transportu spinu. [C. Betthausen et al., Science 337, 324 (2012)].



Magnetoprzewodnictwo G w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego B_{ext} i energii Fermiego μ_F dla okresu modulacji pola helikalnego (a) $a = 1 \mu\text{m}$, (b) $a = 2 \mu\text{m}$, (c) $a = 8 \mu\text{m}$.

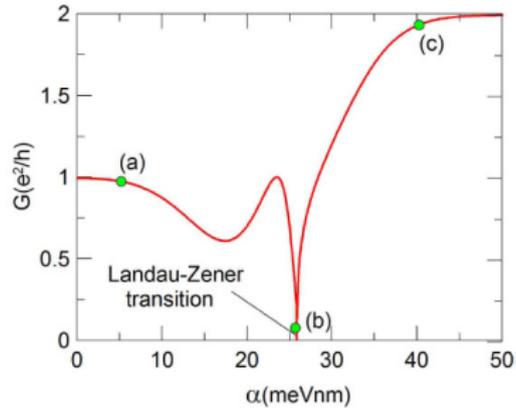
$Q = \omega_L / \omega_{mod}$. Wyniki obliczeń wykonanych dla struktury C. Betthausen et al., Science 337, 324 (2012).

P. Wójcik, J. Adamowski, M. Wołoszyn, B. J. Spisak, Semicond. Sci. Technol. 30 (2015) 065007.

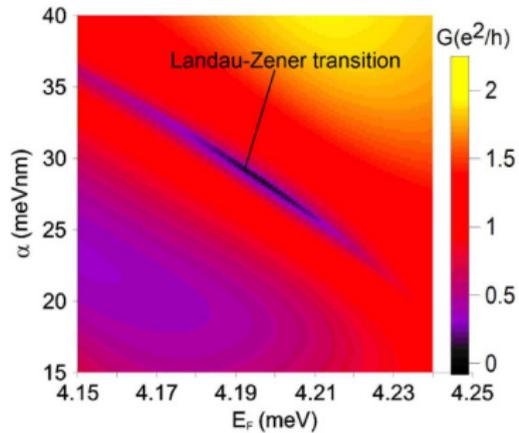


(a) Schemat tranzystora spinowego wykorzystującego przejścia Landaua-Zenera w nanodrucie InSb. g_1, g_2 – bramki. (b) Helikalne pole magnetyczne $\mathbf{B}_h = (B_h^x, 0, B_h^z)$ generowane przez paski Dy.

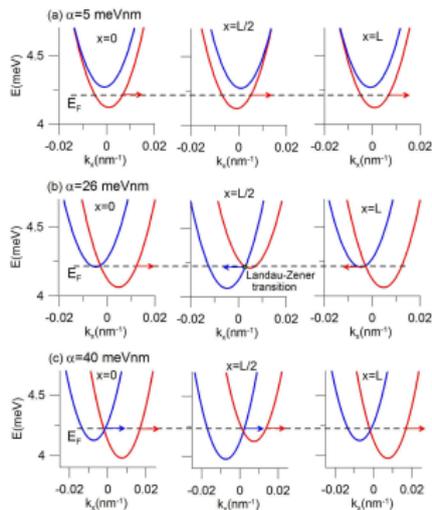
P. Wójcik, J. Adamowski, Semicond. Sci. Technol. 31 (2016) 035021.



Przewodnictwo G w funkcji efektywnej stałej sprzężenia Rashby α . [P. Wójcik, J. Adamowski, Semicond. Sci. Technol. 31 (2016) 035021.]

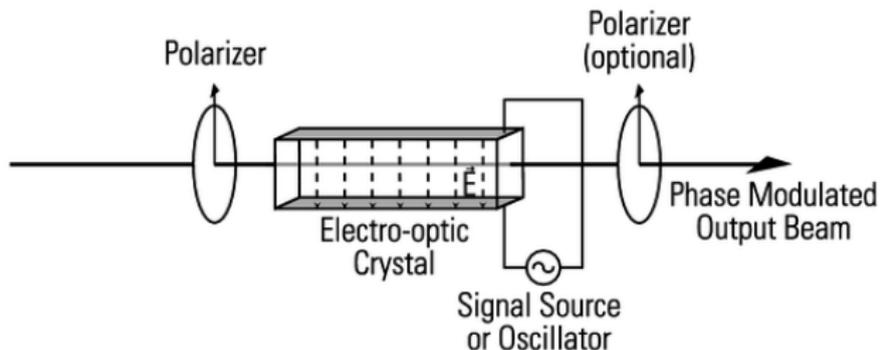


Przejścia Landaua-Zenera w funkcji energii Fermiego E_F i efektywnej stałej sprzężenia Rashby α . [P. Wójcik, J. Adamowski, Semicond. Sci. Technol. 31 (2016) 035021.]



(a), (c) Przepływ prądów spinowych przez nanodrut. (b) Rozpraszanie wsteczne elektronów odpowiadające stanowi wyłączenia tranzystora. [P. Wójcik, J. Adamowski, Semicond. Sci. Technol. 31 (2016) 035021.]

Analogia: tranzystor spinowy – modulator elektrooptyczny



Perspektywy spintroniki

Polaryzacja spinów w strukturach 2D

Nowe materiały 2D

- silicen, Si (2010)
- germanen, Ge (2014)
- stanen, Sn – izolator topologiczny (2015)
- 2D-Pb ?

Nowe materiały 2D

- silicen, Si (2010)
- germanen, Ge (2014)
- stanen, Sn – izolator topologiczny (2015)
- 2D-Pb ?

Nowe materiały 2D

- silicen, Si (2010)
- germanen, Ge (2014)
- stanen, Sn – izolator topologiczny (2015)
- 2D-Pb ?

Nowe materiały 2D

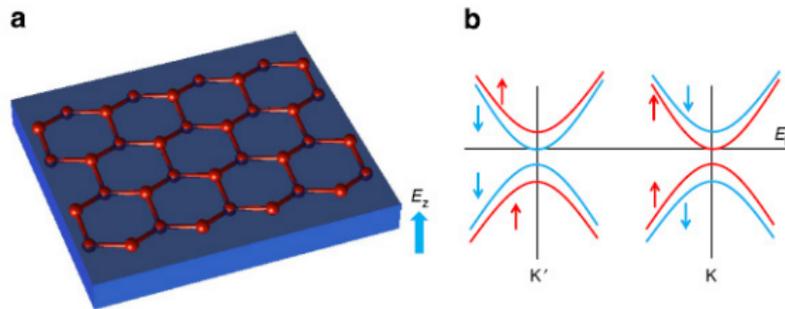
- silicen, Si (2010)
- germanen, Ge (2014)
- stanen, Sn – izolator topologiczny (2015)
- 2D-Pb ?

Nowe materiały 2D

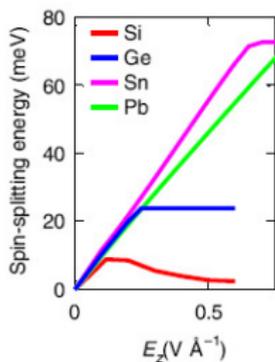
- silicen, Si (2010)
- germanen, Ge (2014)
- stanen, Sn – izolator topologiczny (2015)
- 2D-Pb ?

W.-F. Tsai, C.-Y. Huang, T.-R. Chang, H. Lin, H.-T. Jeng, A. Bansil, Nature Commun. 4:1500
doi: 10.1038/ncomms2525 (2013)

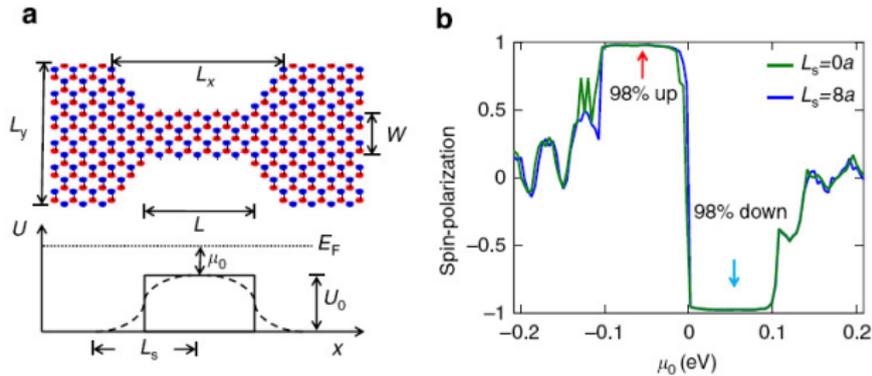
”Gated silicene as a tunable source of nearly 100% spin-polarized electrons”



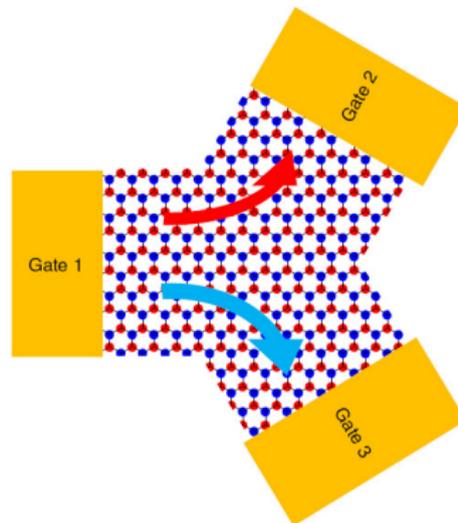
(a) Atomowa struktura heksagonalna silicenu. Pole elektryczne E_z oraz wpływ podłoża usuwają symetrię inwersji, co prowadzi do zniesienia degeneracji spinowej pasm. (b) Schemat struktury pasmowej silicenu wokół punktów K i K' w obecności pola E_z . Czerwone (niebieskie) strzałki odpowiadają spinom \uparrow (\downarrow). [W.-F. Tsai et al., Nature Commun. 4:1500, 2525 (2013).]



Energia rozszczepienia spinowego pasm silicenu, germanenu, stanenu i 2D-Pb. [W.-F. Tsai et al., Nature Commun. 4:1500, 2525 (2013).]



(a) Geometria filtra spinowego na bazie silicenu i profil bariery potencjału $U(x)$. Atomy oznaczone różnymi kolorami leżą w różnych płaszczyznach. (b) Polaryzacja spinowa konduktancji w funkcji efektywnego potencjału chemicznego $\mu_0 = E_F - U_0$. Krzywa zielona (niebieska) odpowiada prostokątnej (gładkiej) barierze potencjału. [W.-F. Tsai et al., Nature Commun. 4:1500, 2525 (2013).]



Separator spinów o kształcie Y. Strzałki czerwona i niebieska pokazują prądy spinowe o przeciwnych spinach. Pole elektryczne $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$, pole magnetyczne $\mathbf{B} = (0, 0, B_z)$.

[W.-F. Tsai et al., Nature Commun. 4:1500, 2525 (2013).]

T. Habe, M. Koshino, Phys. Rev. B 91, 201407(R) (2015)

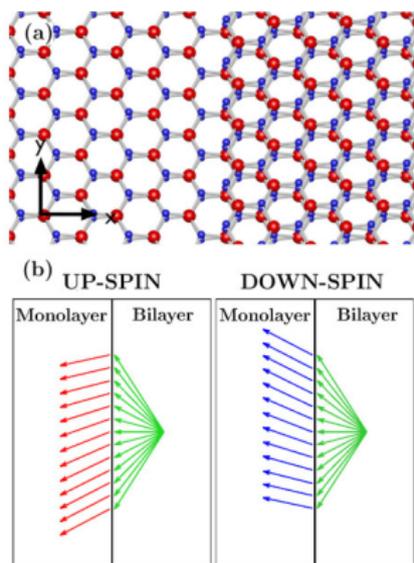
”Spin-dependent refraction at the atomic step of transition-metal dichalcogenides”



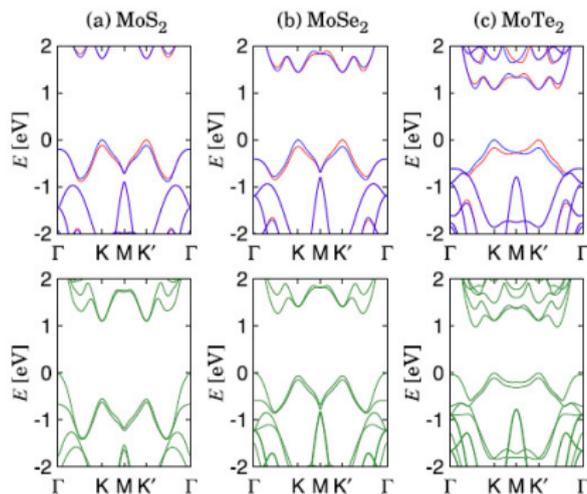
T. Habe, M. Koshino, Phys. Rev. B 91, 201407(R) (2015)

”Spin-dependent refraction at the atomic step of transition-metal dichalcogenides”

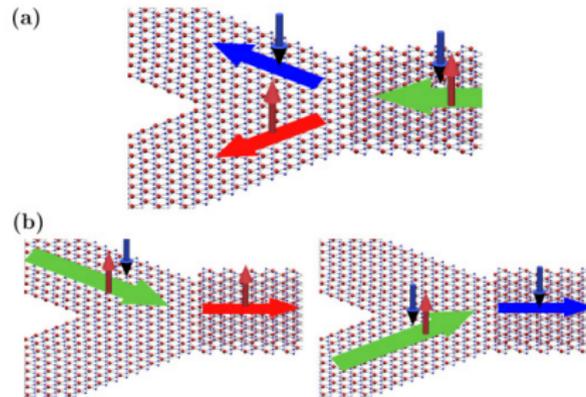




(a) Struktura atomowa jednowarstwowego i dwuwarstwowego MX_2 . (b) Zależne od spinu załamanie elektronów na schodku atomowym pomiędzy obszarami jednowarstwowym i dwuwarstwowym. [T. Habe, M. Koshino, Phys. Rev. B 91, 201407(R) (2015).]



(a) Struktura pasmowa jednowarstwowego (rysunki górne) i dwuwarstwowego (rysunki dolne) (a) MoS₂, (b) MoSe₂, (c) MoTe₂. W monowarstwach stanom spinowym \uparrow i \downarrow odpowiadają krzywe czerwona i niebieska. W biwarstwach oba stany spinowe są zdegenerowane. [T. Habe, M. Koshino, Phys. Rev. B 91, 201407(R) (2015)].



(a) Przepływ spinów przez złącze Y na granicy obszarów jedno- i dwu-warstwowego MX₂ dla elektronów wstrzykiwanych ze strony (a) obszaru dwuwarstwowego (**separator spinów**), (b) jednowarstwowego (**filtr spinowy**). [T. Habe, M. Koshino, Phys. Rev. B 91, 201407(R) (2015).]

Podsumowanie

- Nowe zjawiska związane ze spinem elektronów w ciałach stałych
- Nowe materiały: **nanodrut, struktury 2D**
- Nowe przyrządy: **separator spinów, tranzystor spinowy**
- Zastosowania spintroniki:
 - Zwiększone możliwości działania przyrządów elektronicznych (wykorzystanie ładunku i spinu)
 - Generacja kubitów spinowych i kwantowe operacje logiczne na nich

Podsumowanie

- Nowe zjawiska związane ze spinem elektronów w ciałach stałych
- Nowe materiały: **nanodrut, struktury 2D**
- Nowe przyrządy: **separator spinów, tranzystor spinowy**
- Zastosowania spintroniki:
 - Zwiększone możliwości działania przyrządów elektronicznych (wykorzystanie ładunku i spinu)
 - Generacja kubitów spinowych i kwantowe operacje logiczne na nich

Podsumowanie

- Nowe zjawiska związane ze spinem elektronów w ciałach stałych
- Nowe materiały: **nanodrut, struktury 2D**
- Nowe przyrządy: **separator spinów, tranzystor spinowy**
- Zastosowania spintroniki:
 - Zwiększone możliwości działania przyrządów elektronicznych (wykorzystanie ładunku i spinu)
 - Generacja kubitów spinowych i kwantowe operacje logiczne na nich

Podsumowanie

- Nowe zjawiska związane ze spinem elektronów w ciałach stałych
- Nowe materiały: **nanodrut, struktury 2D**
- Nowe przyrządy: **separator spinów, tranzystor spinowy**
- Zastosowania spintroniki:
 - Zwiększone możliwości działania przyrządów elektronicznych (wykorzystanie ładunku i spinu)
 - Generacja kubitów spinowych i kwantowe operacje logiczne na nich

Podsumowanie

- Nowe zjawiska związane ze spinem elektronów w ciałach stałych
- Nowe materiały: **nanodrut, struktury 2D**
- Nowe przyrządy: **separator spinów, tranzystor spinowy**
- Zastosowania spintroniki:
 - Zwiększone możliwości działania przyrządów elektronicznych (wykorzystanie ładunku i spinu)
 - Generacja kubitów spinowych i kwantowe operacje logiczne na nich

Podsumowanie

- Nowe zjawiska związane ze spinem elektronów w ciałach stałych
- Nowe materiały: **nanodrut, struktury 2D**
- Nowe przyrządy: **separator spinów, tranzystor spinowy**
- Zastosowania spintroniki:
 - Zwiększone możliwości działania przyrządów elektronicznych (wykorzystanie ładunku i spinu)
 - Generacja kubitów spinowych i kwantowe operacje logiczne na nich

Podsumowanie

- Nowe zjawiska związane ze spinem elektronów w ciałach stałych
- Nowe materiały: **nanodrut, struktury 2D**
- Nowe przyrządy: **separator spinów, tranzystor spinowy**
- Zastosowania spintroniki:
 - Zwiększone możliwości działania przyrządów elektronicznych (wykorzystanie ładunku i spinu)
 - Generacja kubitów spinowych i kwantowe operacje logiczne na nich

*Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki
w ramach grantu DEC-2011/03/B/ST3/00240.*

Dziękuję Państwu za uwagę.