

# Pengaruh Energi dan Sudut Datang Elektron pada Transmittansi dan Polarisasi Spin Elektron dalam Heterostruktur Semikonduktor Berpenghalang Tunggal

Hantika Mardianti<sup>a)</sup>, Tisa A. Istiqomah<sup>b)</sup>, Fatimah A. Noor<sup>c)</sup>, Khairurrijal<sup>d)</sup>

Kelompok Keilmuan Fisika Material Elektronik, Program Studi Fisika,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>a)</sup> [hantikamardianti@gmail.com](mailto:hantikamardianti@gmail.com)

<sup>b)</sup> [tisa\\_ia@students.itb.ac.id](mailto:tisa_ia@students.itb.ac.id)

<sup>c)</sup> [fatimah@fi.itb.ac.id](mailto:fatimah@fi.itb.ac.id) (corresponding author)

<sup>d)</sup> [krijal@fi.itb.ac.id](mailto:krijal@fi.itb.ac.id)

## Abstrak

*Pada paper ini akan dianalisis pengaruh energi elektron dan sudut datang elektron terhadap transmittansi dan polarisasi spin elektron pada heterostruktur semikonduktor berpenghalang trapezoid. Polarisasi spin elektron terjadi karena efek bulk inversion asymmetry (BIA) pada penghalang potensial yang memiliki struktur zinc-blende. Pembahasan dimulai dengan menghitung transmittansi elektron dan kemudian menghitung polarisasi untuk masing-masing keadaan spin. Perhitungan transmittansi elektron dilakukan dengan perhitungan berbasis fungsi airy. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa transmittansi elektron terhadap energi datang untuk masing-masing keadaan spin berbeda. Untuk energi yang lebih kecil dari tinggi penghalang, nilai transmittansi meningkat sedangkan untuk nilai transmittansi lebih besar dari tinggi penghalang nilai transmittansi berosilasi. Hasil perhitungan transmittansi terhadap sudut datang menunjukkan bahwa transmittansi tidak simetrik terhadap sudut datang, namun bersifat kuasi simetris. Di sisi lain, hasil perhitungan polarisasi menunjukkan bahwa dominasi keadaan spin berada pada selang energi tertentu dan bergantung antara spin up dan down. Didapat pula bahwa polarisasi bernilai negatif pada sudut datang negatif, begitu pula sebaliknya.*

*Kata-kata kunci: Bulk inversion asymmetry, Dresselhaus, Polarisasi, Spin, Transmittansi*

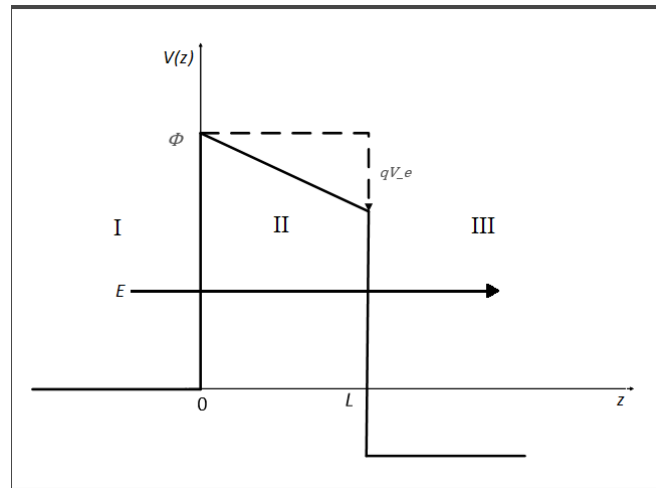
## PENDAHULUAN

Dewasa ini perkembangan divais elektronik semakin pesat dengan kinerja yang semakin canggih. Kinerja ini didukung dari peranan transistor. Divais elektronik akan memiliki kinerja yang semakin baik jika kerapatan transistor dalam suatu chip semakin besar. Hal ini didapat dengan cara mereduksi ukuran transistor tersebut. Namun dengan kerapatan transistor yang semakin besar juga akan membawa dampak yang buruk bagi divais elektronik. Selain itu akan ada saatnya ukuran transistor sudah tidak dapat direduksi lagi. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif lain untuk meningkatkan kinerja divais elektronik. Salah satunya adalah dengan memanfaatkan spin yang diyakini dapat mengatasi permasalahan pada ukuran transistor yang semakin kecil.

Dalam mekanika kuantum, spin adalah suatu sifat penting dari inti atom dan partikel elementer lain dan dapat memberikan satu derajat kebebasan tambahan untuk elektron<sup>[1]</sup>. Spin elektron dapat berupa up atau down. Divais yang dalam pengontrolan elektron menggunakan spin disebut divais spintronik. Beberapa contoh divais spintronik diantaranya spin led, spin transistor, dan lain-lain. Tujuan utama dari divais spintronik adalah untuk mendapatkan aliran elektron dengan spin yang dapat dikontrol. Aliran elektron ini

menghasilkan arus yang disebut arus terpolarisasi. Keuntungan arus terpolarisasi dibanding arus konvensional adalah energi yang diperlukan untuk mengalirkan arus lebih kecil, pengintegrasian divais lebih tinggi, serta manipulasi arus lebih cepat<sup>[2]</sup>.

Agar pemanfaatan spin dapat diaplikasikan pada divais elektronik, perkembangan divais elektronik selanjutnya difokuskan pada usaha untuk mendapatkan polarisasi spin dalam bahan. Awalnya, usaha polarisasi spin dalam bahan menggunakan DMS (*Diluted Magnetic Semiconductor*). DMS adalah material semikonduktor yang memiliki sifat feromagnetik ketika didoping suatu impuritas sehingga mengakibatkan polarisasi spin pada semikonduktor sehingga transport elektron dapat dikontrol bergantung spin. Selain itu usulan lain datang dari Voskoboynikov, yaitu dengan menggunakan bahan semikonduktor non-magnetik. Polarisasi spin dalam semikonduktor non-magnetik didapat dari efek *Inversion Asymmetry*. Efek *Inversion Asymmetry* sendiri terdapat tiga jenis yaitu BIA (*Bulk Inversion Asymmetry*), SIA (*Structural Inversion Asymmetry*), dan NIA (*Native Inversion Asymmetry*).



Gambar 1. Profil potensial dengan tegangan eksternal

Untuk dapat menghitung arus terpolarisasi spin, harus terlebih dahulu dihitung transmitansi elektron bergantung spin. Pada makalah ini, kami melakukan perhitungan pengaruh energi dan sudut datang elektron pada transmitansi dan polarisasi spin elektron dalam heterostruktur berpenghalang tunggal. Dengan model heterostruktur yang digunakan adalah trapezoid. Struktur trapezoid didapat ketika heterostruktur diberi tegangan eksternal. Efek pembengkokan pita energi pada profil potensial diabaikan untuk mempermudah perhitungan. Secara matematis profil potensial dapat dituliskan sebagai :

$$V(z) = \begin{cases} 0, & \text{Daerah I} \\ \phi - \frac{qV_e}{L} z, & \text{Daerah II} \\ -qV_e, & \text{Daerah III} \end{cases} \quad (1)$$

Struktur yang kami gunakan metal-AlSb-metal (Daerah I-Daerah II-Daerah III). AlSb memiliki struktur kristal *zinc-blende*, oleh sebab itu polarisasi spin dalam bahan difokuskan akibat adanya efek BIA (*Bulk Inversion Asymmetry*). Untuk menghitung efek BIA, dalam hamiltonian sistem ditambahkan satu suku yang disebut suku Dresselhaus yang dinyatakan dalam persamaan berikut<sup>[2][7][8]</sup> :

$$H_D = \gamma \{ \sigma_x k_x (k_y^2 - k_z^2) + \sigma_y k_y (k_z^2 - k_x^2) + \sigma_z k_z (k_x^2 - k_y^2) \} \quad (2)$$

## PERHITUNGAN TRANSMITANSI DAN POLARISASI ELEKTRON DENGAN FUNGSI AIRY

Fungsi Airy adalah solusi dari persamaan differensial dengan bentuk<sup>[2][3]</sup> :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - xy = 0 \tag{3}$$

Solusi dari persamaan tersebut adalah

$$y = aAi(x) + bBi(x) \tag{4}$$

Dengan a dan b adalah konstanta serta  $Ai(x)$  adalah fungsi Airy jenis pertama dan  $Bi(x)$  adalah fungsi Airy jenis kedua. Jika dijabarkan fungsi Airy menjadi bentuk polinom :

$$Ai(x) = c_1 f(x) - c_2 g(x) \tag{5}$$

$$Bi(x) = \sqrt{3}(c_1 f(x) + c_2 g(x)) \tag{6}$$

Hamiltonian sistem setelah ditambahkan suku Dresselhaus :

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_{\pm}^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V(z) + \frac{\hbar^2 k_p^2}{2m^*} \tag{7}$$

Dengan

$$m_{\pm}^* = m^* \left( 1 \pm 2 \frac{\gamma m^* k_p}{\hbar^2} \right) \tag{8}$$

Dengan  $m^*$  adalah massa efektif elektron,  $\gamma$  adalah konstanta Dresselhaus, serta subskrip ‘+’ dan ‘-’ melambangkan spin up dan spin down. Didapat persamaan Schroedinger untuk daerah I dan III :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi_{\pm} + \frac{2m_{1\pm}^*}{\hbar^2} E_{z\pm} \varphi_{\pm} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi_{\pm} + \frac{2m_{3\pm}^*}{\hbar^2} (E_{z\pm} + qV_e) \varphi_{\pm} = 0 \tag{10}$$

Sedangkan untuk daerah II digunakan fungsi Airy sehingga :

$$\frac{d^2 \varphi_{\pm}}{du_{\pm}^2} - u_{\pm} \varphi_{\pm} = 0 \tag{11}$$

Dengan

$$u_{\pm} = \left( \frac{2m_{2\pm}^* qV_e}{\hbar^2 L} \right)^{1/3} \left( (\Phi - E_{z\pm}) \frac{L}{qV_e} - z \right) \tag{12}$$

Solusi dari ketiga persamaan diatas adalah :

$$\varphi(z) = \begin{cases} \exp(ik_{1\pm}z) + r_{\pm} \exp(-ik_{1\pm}z) & \text{Daerah I} \\ a_{\pm} Ai(u_{\pm}(z)) + b_{\pm} Bi(u_{\pm}(z)) & \text{Daerah II} \\ t_{\pm} \exp(ik_{3\pm}z) & \text{Daerah III} \end{cases} \tag{13}$$

Koefisien transmisi untuk kasus ini adalah :

$$t_{\pm} = \frac{2c_{1\pm} \exp(-ik_{3\pm}L)f_{1\pm}}{\frac{1}{m_{2\pm}^*} \left( \frac{2m_{2\pm}^*}{\hbar^2} \frac{qV_e}{L} \right)^{1/3} f_{2\pm} + c_{1\pm} f_{3\pm} + c_{3\pm} f_{4\pm} + c_{1\pm} c_{3\pm} f_{5\pm} \frac{1}{m_{2\pm}^*} \left( \frac{2m_{2\pm}^*}{\hbar^2} \frac{qV_e}{L} \right)^{-1/3}} \quad (14)$$

Dengan

$$k_{1\pm} = \sqrt{\frac{2m_{1\pm}^* E_{z\pm}}{\hbar^2}} \quad (15)$$

$$k_{3\pm} = \sqrt{\frac{2m_{3\pm}^* (E_{z\pm} + qV_e)}{\hbar^2}} \quad (16)$$

$$c_{1\pm} = \frac{ik_{1\pm}}{m_{1\pm}^*} \quad (17)$$

$$c_{3\pm} = \frac{ik_{3\pm}}{m_{3\pm}^*} \quad (18)$$

$$f_{1\pm} = Ai(u_{\pm}(L))Bi'(u_{\pm}(L)) - Bi(u_{\pm}(L))Ai'(u_{\pm}(L)) \quad (19)$$

$$f_{2\pm} = Ai'(u_{\pm}(0))Bi'(u_{\pm}(L)) - Bi'(u_{\pm}(0))Ai'(u_{\pm}(L)) \quad (20)$$

$$f_{3\pm} = Ai(u_{\pm}(0))Bi'(u_{\pm}(L)) - Bi(u_{\pm}(0))Ai'(u_{\pm}(L)) \quad (21)$$

$$f_{4\pm} = Ai(u_{\pm}(L))Bi'(u_{\pm}(0)) - Bi(u_{\pm}(L))Ai'(u_{\pm}(0)) \quad (22)$$

$$f_{5\pm} = Ai(u_{\pm}(L))Bi(u_{\pm}(0)) - Bi(u_{\pm}(L))Ai(u_{\pm}(0)) \quad (23)$$

Transmitansi dihitung dengan<sup>[6]</sup> :

$$T_{\pm} = \frac{k_{3\pm}}{k_{1\pm}} t_{\pm}^* t_{\pm} \quad (24)$$

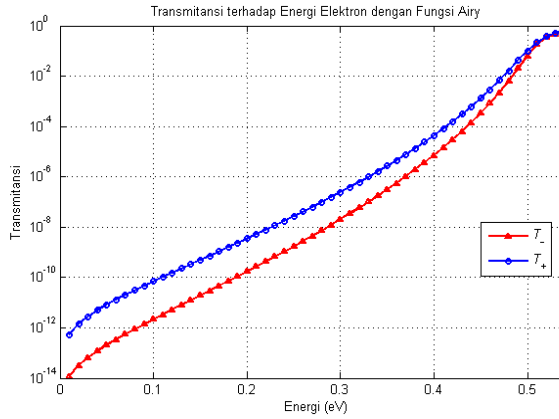
Dengan  $t_{\pm}^*$  adalah kompleks konjugat dari  $t_{\pm}$ . Selanjutnya, polarisasi elektron didefinisikan sebagai<sup>[2]</sup> :

$$P = \frac{T_+ - T_-}{T_+ + T_-} \times 100\% \quad (25)$$

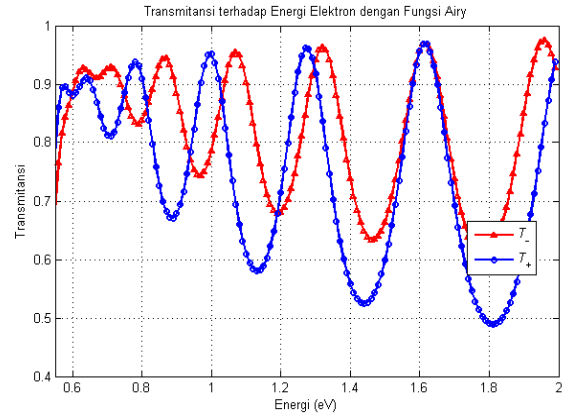
Jika polarisasi bernilai positif maka spin up lebih dominan dan begitu pula sebaliknya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada makalah ini digunakan struktur metal-AlSb- metal dengan profil potensial seperti pada Gambar 1. Elektron diasumsikan datang dari Daerah I menuju Daerah III dalam arah tegak lurus penghalang ( $\theta = 0$ ). Dalam struktur ini, AlSb membentuk penghalang potensial dengan tinggi 0.55 eV<sup>[5]</sup>, massa efektif elektron dalam AlSb adalah  $0.14 m_0$ <sup>[4]</sup>. Konstanta Dresselhaus AlSb adalah  $41.5 \text{ meV \AA}^3$ <sup>[4]</sup>. Serta tegangan eksternal yang diberikan adalah 0.1 eV. Nilai  $k_p$  yang digunakan adalah  $10^9 \text{ m}^{-1}$ . Lebar penghalang digunakan 10 nm.

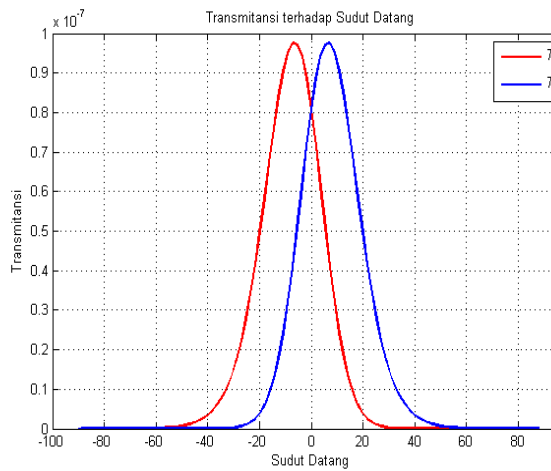


Gambar 2. Grafik transmisi terhadap energi untuk energi kurang dari tinggi penghalang

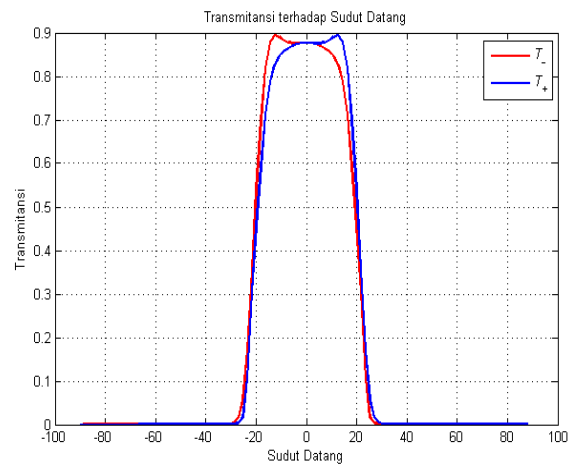


Gambar 3. Grafik transmisi terhadap energi untuk energi lebih dari tinggi penghalang

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa untuk energi elektron kurang dari tinggi penghalang, transmisi meningkat secara eksponensial dengan transmisi untuk keadaan spin up lebih besar dari spin down. Hal ini sesuai dengan teori bahwa massa efektif elektron bergantung spin untuk keadaan spin down lebih besar sehingga lebih sulit untuk menembus penghalang. Sedangkan dari Gambar 3 didapat bahwa transmisi untuk kedua keadaan spin beresilasi dan terdapat beberapa energi resonansi untuk setiap keadaan spin.



Gambar 4. Grafik transmisi terhadap sudut datang dengan energi 0.3 eV

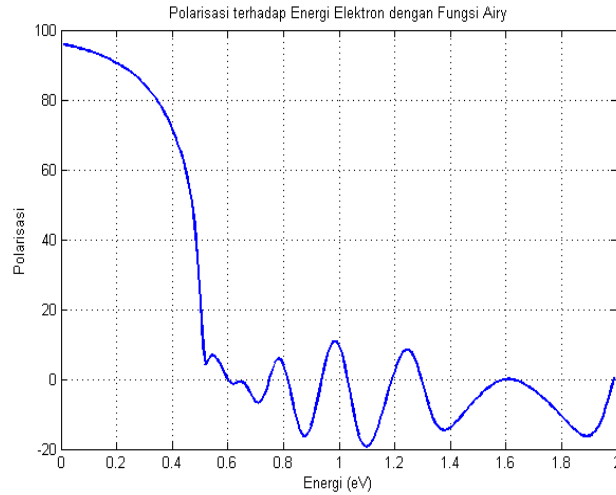


Gambar 5. Grafik transmisi terhadap sudut datang dengan energi 0.6 eV

Dari Gambar 4 dan 5 didapat bahwa transmisi tidak bersifat simetris terhadap sudut datang, namun bersifat kuasi simetris yang secara matematis dituliskan sebagai :

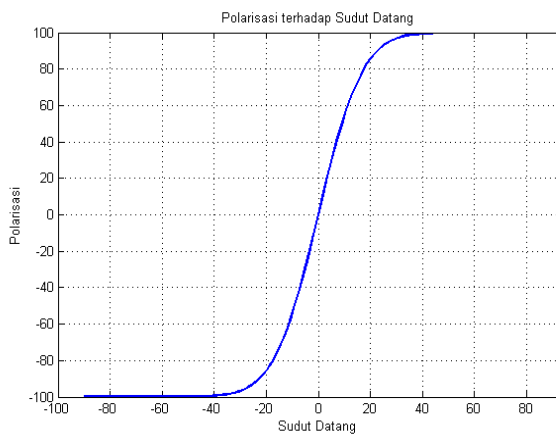
$$T_+(\theta) = T_-(\theta) \tag{26}$$

Hal ini terjadi karena bahan yang ditinjau memiliki struktur *zinc blende*. Selain itu didapat bahwa saat energi elektron semakin tinggi, transmisi yang dihasilkan semakin besar.

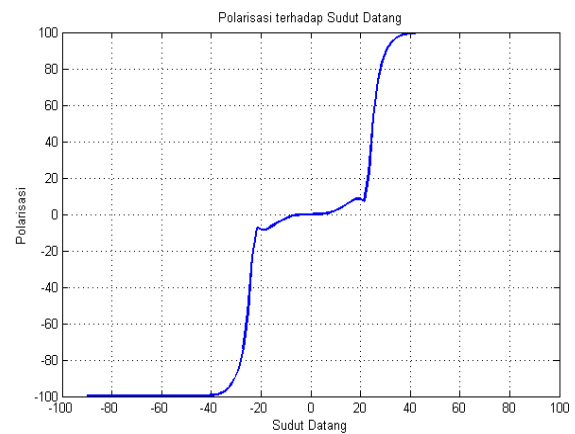


Gambar 6. Grafik polarisasi terhadap energi elektron

Dari Gambar 6 didapat bahwa saat energi elektron kurang dari tinggi penghalang, polarisasi bernilai positif. Maka saat energi elektron kurang dari tinggi penghalang, elektron dengan keadaan spin up lebih dominan. Selain itu untuk energi elektron lebih dari tinggi penghalang, polarisasi berosilasi dan elektron dengan keadaan spin up dan spin down bergantian menjadi dominan pada rentang energi tertentu.



Gambar 7. Grafik polarisasi terhadap sudut datang dengan energi 0.3 eV



Gambar 8. Grafik polarisasi terhadap sudut datang dengan energi 0.3 eV

Dari Gambar 7 dan 8 didapat bahwa pada sudut datang negatif, elektron dengan keadaan spin down lebih dominan sedangkan saat sudut datang positif, elektron dengan keadaan spin up lebih dominan. Polarisasi yang dihasilkan semakin besar seiring dengan penambahan sudut datang. Selain itu karena transmitansi bersifat kuasi simetris maka pada polarisasi didapat pula sifat :

$$P(\theta) = -P(-\theta) \tag{27}$$

### KESIMPULAN

Untuk energi elektron kurang dari tinggi penghalang, transmitansi meningkat secara eksponensial dengan keadaan spin up lebih dominan, sedangkan untuk energi elektron lebih dari tinggi penghalang, transmitansi berosilasi dan terdapat beberapa titik resonansi untuk setiap keadaan spin. Transmitansi bersifat kuasi simetris terhadap sudut datang. Saat energi elektron kurang dari tinggi penghalang, polarisasi bernilai positif, maka spin up lebih dominan. Selain itu untuk energi lebih dari tinggi penghalang, polarisasi berosilasi. Didapat pula hasil bahwa polarisasi tidak simetris terhadap sudut datang.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Riset Teknologi dan pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian Tahun 2017.

## REFERENSI

- [1] L. Gao. *Spin Polarized Current Phenomena in Magnetic Tunnel Junctions*. Stanford University. 2009.
- [2] A. B. Suryamas. *Polarisasi Spin Elektron pada Heterostruktur Semikonduktor Berpenghalang Tunggal dan Ganda*. Tesis S2, Sekolah Pasca Sarjana ITB, Indonesia. 2007.
- [3] M. J. Gilbert. *Lecture 5 : Foundations of Quantum Mechanics IV*. 2011.
- [4] C. Daday. *Coulomb and Spin-Orbit Interaction Effects in a Mesoscopic Ring*. University of Iceland. 2011.
- [5] J. Pingeot, M. E. Flatte. *Spin Injection Enhancement Through Schottky Barrier Superlattice Design*. arXiv:0909.4594v1. 2009.
- [6] L. Hasanah, M. Abdullah, Sukirno, T. Winata, and Khairuurijal. *Model of a Tunneling Current in an Anisotropic Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si Heterostructure with a Nanometer-Thick Barrier Including the Effect of Parallel/Perpendicular Kinetic Energy Coupling*. Semiconductor Science and Technology. 2008.
- [7] M. P. Nowak and B. Szafran. *Coupling of Bonding and Antibonding Electron Orbitals in Double Quantum Dots by Spin-Orbit Interaction*. arXiv:1004.1250v1. 2010.
- [8] V. I. Perel, S. A. Taasenko, and I. N. Yassievich. *Spin-Dependent Tunneling through a Symmetric Semiconductor Barrier*. Physical Review B. 2003.