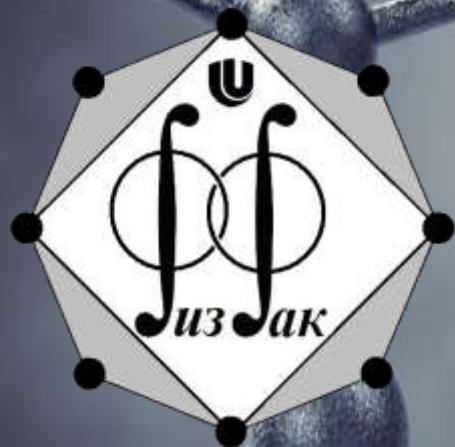


СДВИГ ГУСА-ХЕНХЕН В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СИЛИЦЕНА И ГРАФЕНА: ДОЛИННЫЕ И СПИНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

Е. С. Азарова, Г.М. Максимова

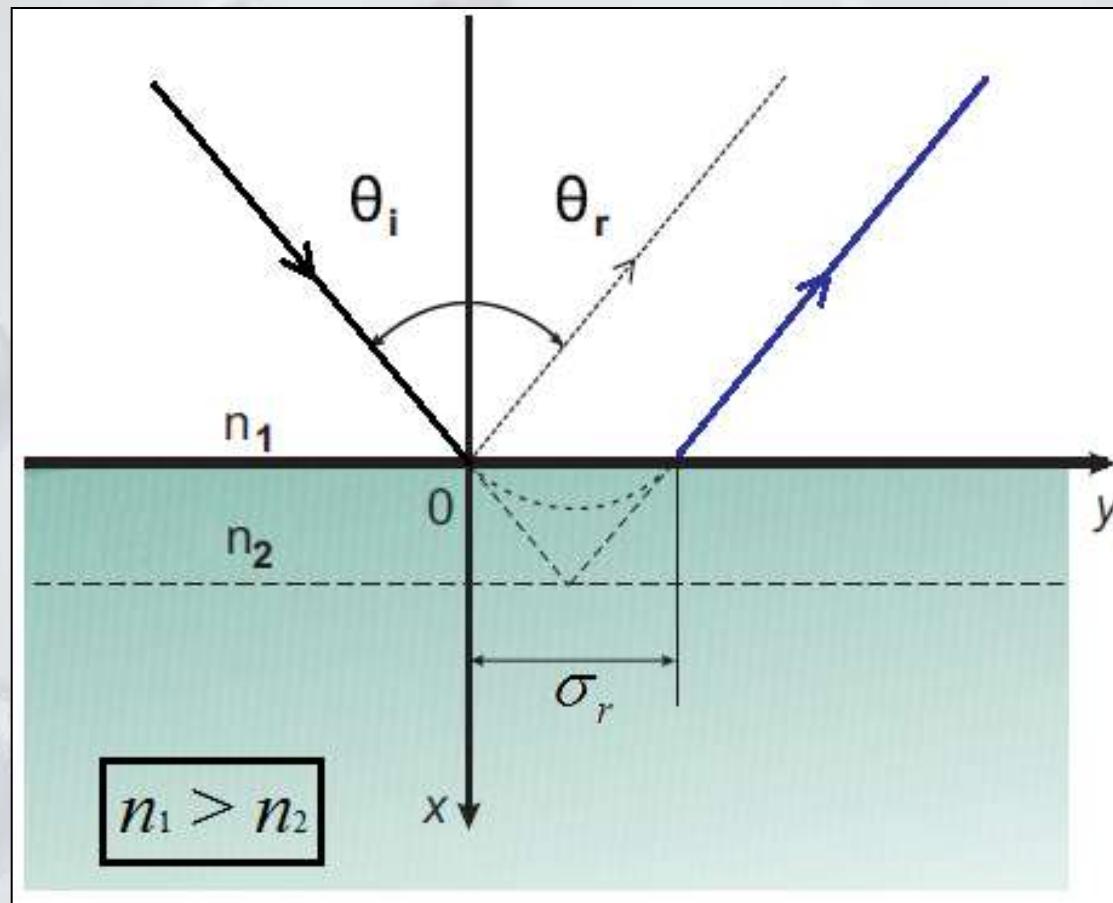
Кафедра теоретической физики ННГУ им. Н.И. Лобачевского



XV Конференция молодых ученых «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений».
Сочи 16 – 25 сентября 2016 г.

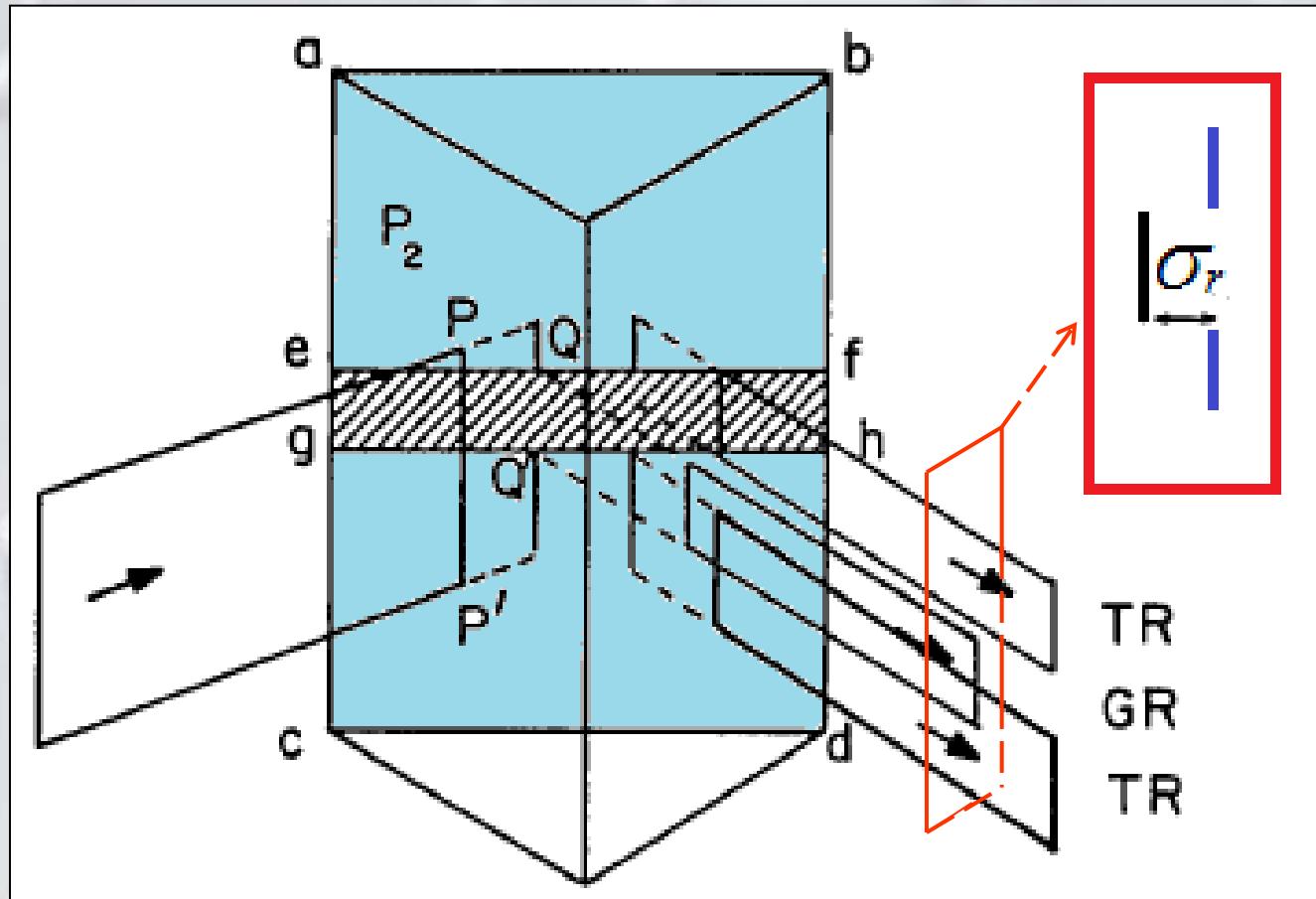
Определение

Эффект Гуса-Хенхен – явление продольного смещения луча линейно поляризованного света в условиях полного внутреннего отражения от границы раздела двух диэлектрических сред с разными показателями преломления.



Эксперимент Гуса и Хенхен

F. Goos and H. Hänchen, Ann. Phys. 6(1), 333 (1947);
Ann. Phys. 6(5), 251 (1949).



$$\sigma_r \sim 1 - 2 \lambda$$

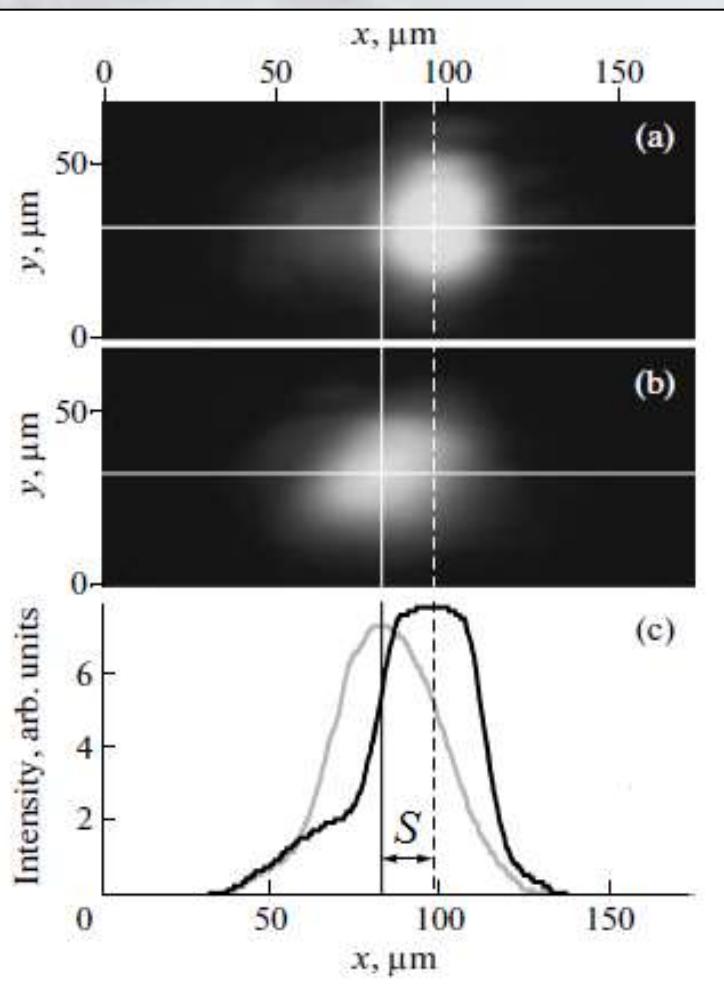
$$\lambda = 578 \text{ нм}$$

Теоретическое обоснование: K.V. Artmann, Ann. Phys. 2, 87 (1947).

Усиление эффекта

Дополнительный перенос энергии на границе раздела за счет распространения поверхностных электромагнитных волн

В.В. Москаленко, И.В. Соболева, А.А. Федягин, Письма в ЖЭТФ 91(8), 414 (2010).



Фотонный кристалл:

12 пар $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$

$$n_1 = 1.46$$

$$n_2 = 1.90$$

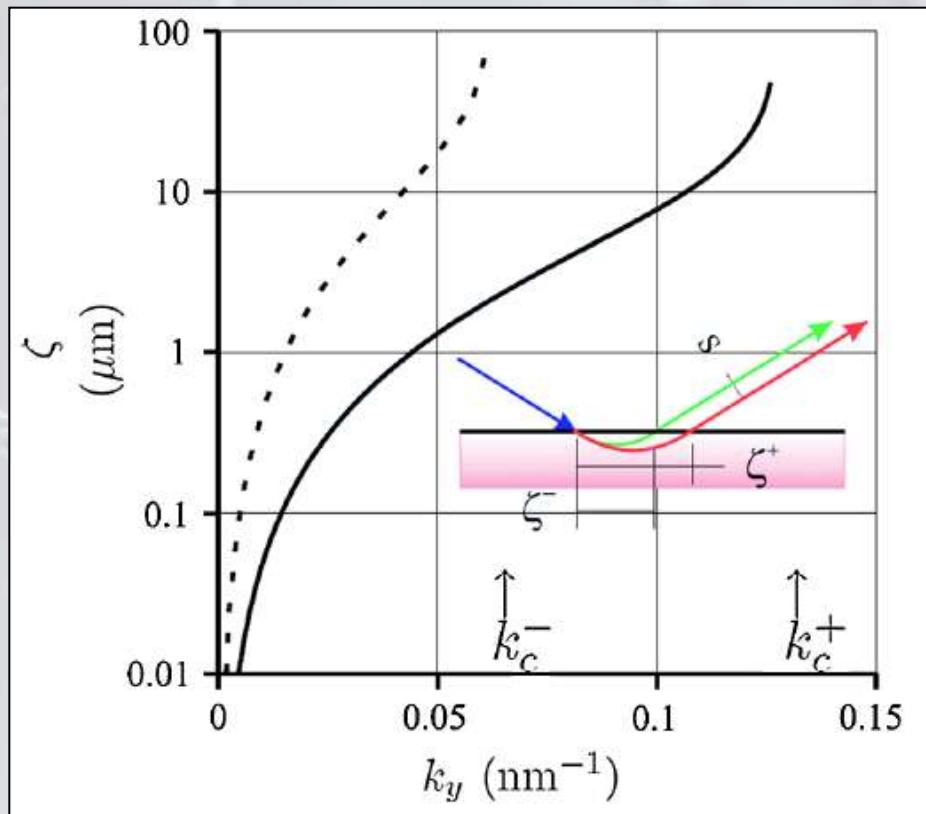
$$\sigma_r \sim 30\lambda \quad \lambda = 533 \text{ нм}$$

Рис.5. (а), (б) Микрофотографии флуоресценции сечения луча, отраженного от поверхности одномерного фотонного кристалла при возбуждении ПЭВ и при ее отсутствии в случае *s*- и *p*-поляризованного излучения накачки, соответственно. (с) Пространственное распределение интенсивности флуоресценции вдоль центров сечений, показывающих сдвиг Гуса-Хенхен *S*.

Сдвиг ГХ для нейтронов

V.K. Ignatovich, Phys. Lett. A 322, 36 (2004).

Эксперимент с нейтронами: V.O. de Haan et al., PRL 104, 010401 (2010).



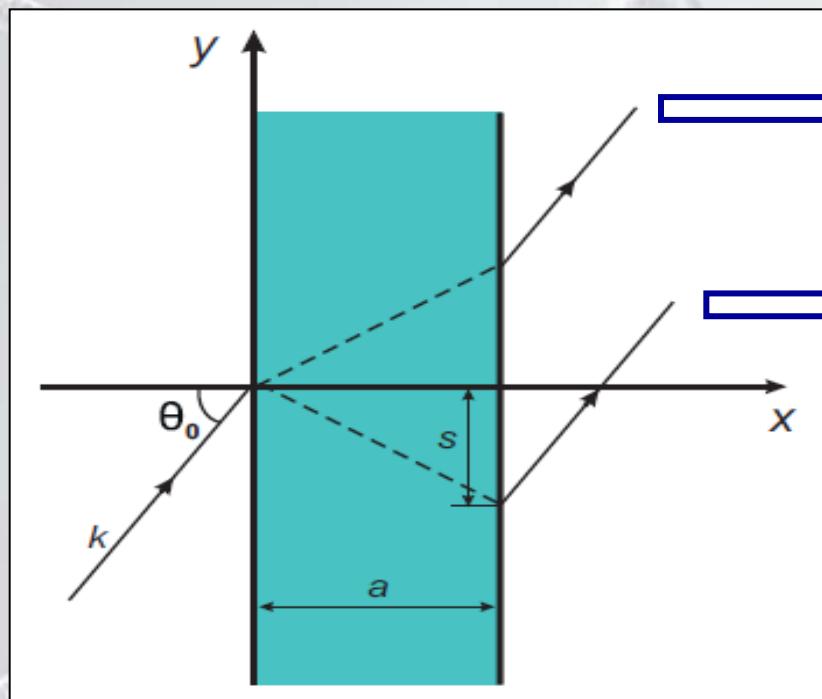
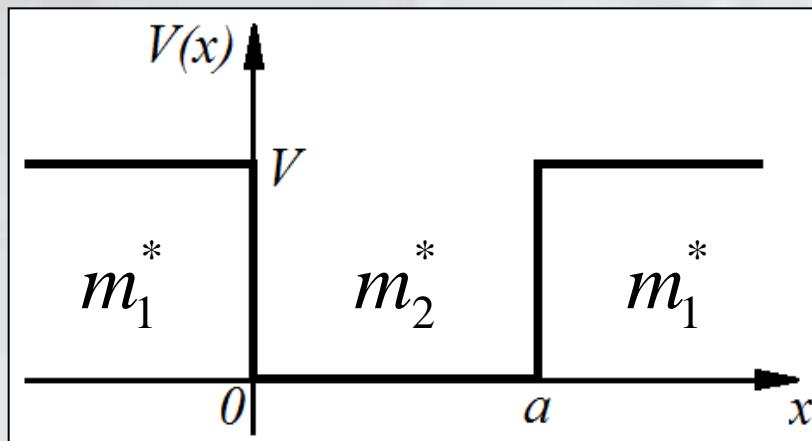
$\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$

$\theta_0 = 0.002 \text{ rad}$
 $S \text{ up to } 100 \text{ nm}$

FIG. 2 (color online). Goos-Hänchen shift, ζ along the interface for an incident angle of 2 mrad as function of the wave vector component perpendicular to the surface, k_y for up (full line) and down (dashed line) spin state for fully magnetized iron. Inset: Splitting, s of the neutron wave function at the interface.

Эффект ГХ в полупроводниковых структурах

X. Chen, Y. Ban, C.-F. Li, J. Appl. Phys. **105**, 093710 (2009).



$$E > E_c \equiv \frac{m_1^* V}{m_1^* - m_2^*} \Rightarrow s > 0$$

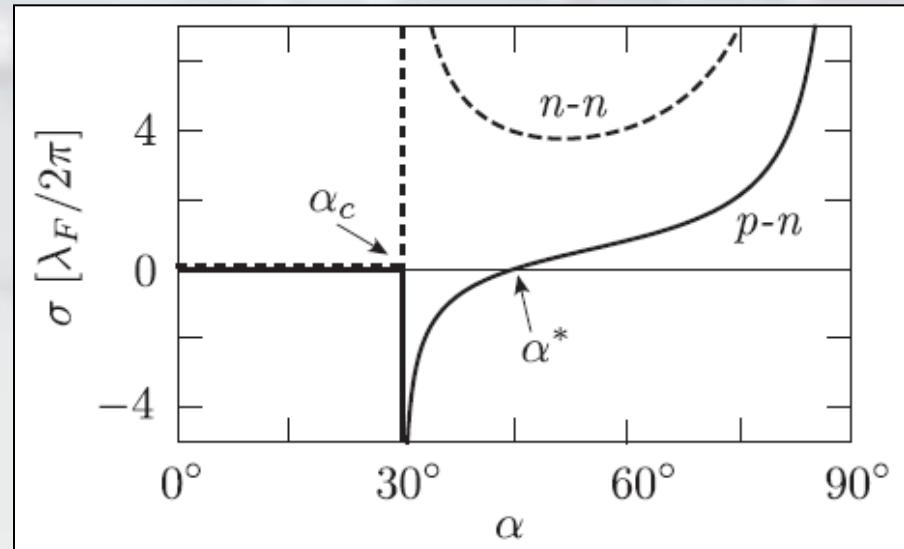
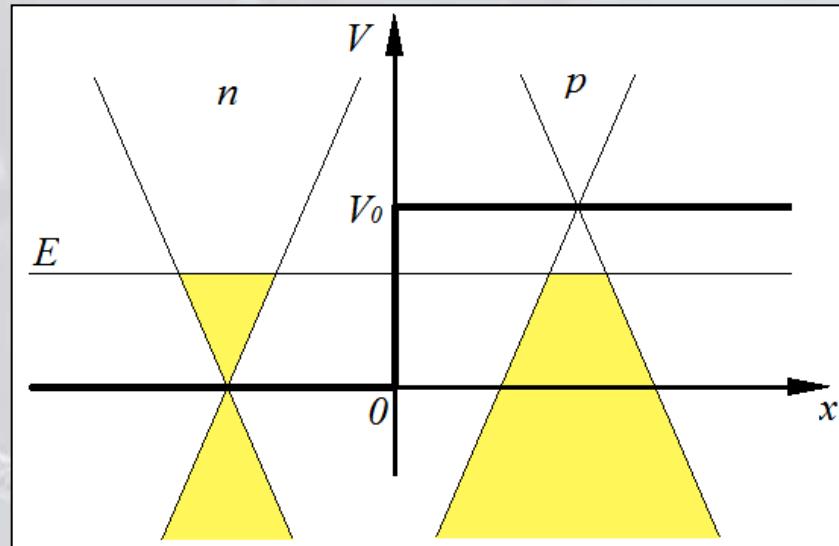
$$V < E < E_c \Rightarrow \begin{cases} s > 0 \\ s < 0 \end{cases}$$

Schematic diagram of positive and negative lateral shifts of ballistic electrons propagating obliquely through a quantum slab, corresponding to a 2D semiconductor potential well under external applied electric field.

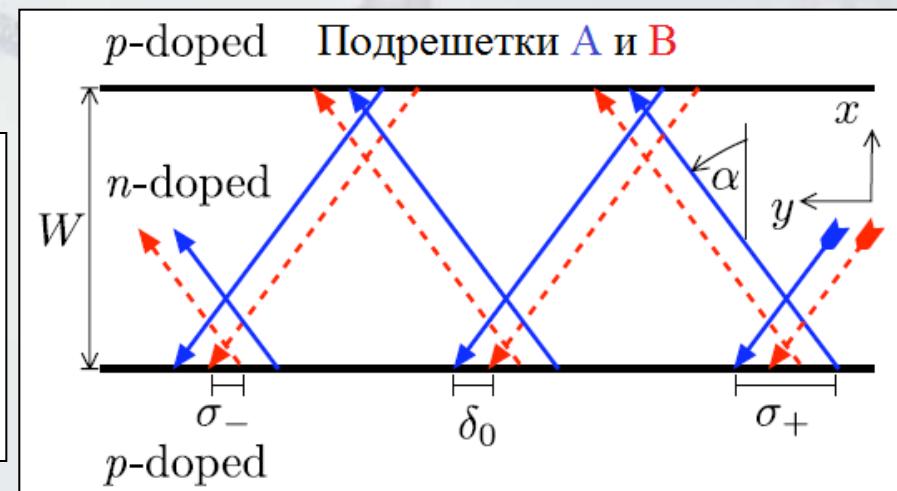
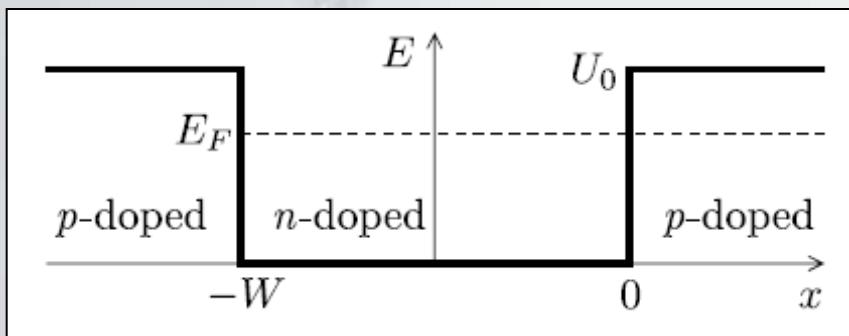
Эффект ГХ в графене

C.W.J. Beenakker et al., PRL 102, 146804 (2009).

Отражение от потенциального барьера:



Усиление:



Double-barrier structure: Y. Song, H.-C. Wu, Y. Guo, Appl. Phys. Lett. 100, 253116 (2012).

Материалы с дираковскими особенностями спектра

- Графен:

$$\hat{H} = \hbar v_F (k_x \tau_x - \eta k_y \tau_y)$$

- Силицен и германен:

$$\hat{H} = \hbar v_F (k_x \tau_x - \eta k_y \tau_y) + (elE_z(x) - \eta s \lambda_{so}) \tau_z$$

Смещение подрешеток:

$$2l \approx \begin{cases} 0.046 \text{ нм} & \text{для силицина} \\ 0.066 \text{ нм} & \text{для германена} \end{cases}$$

$$\eta = \begin{cases} 1, K \\ -1, K' \end{cases} \text{ — долинный индекс}$$

Константа СОВ:

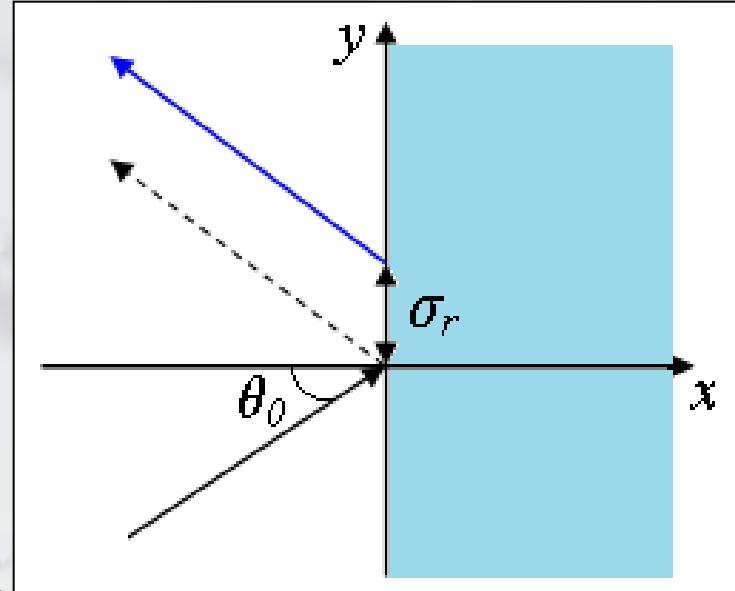
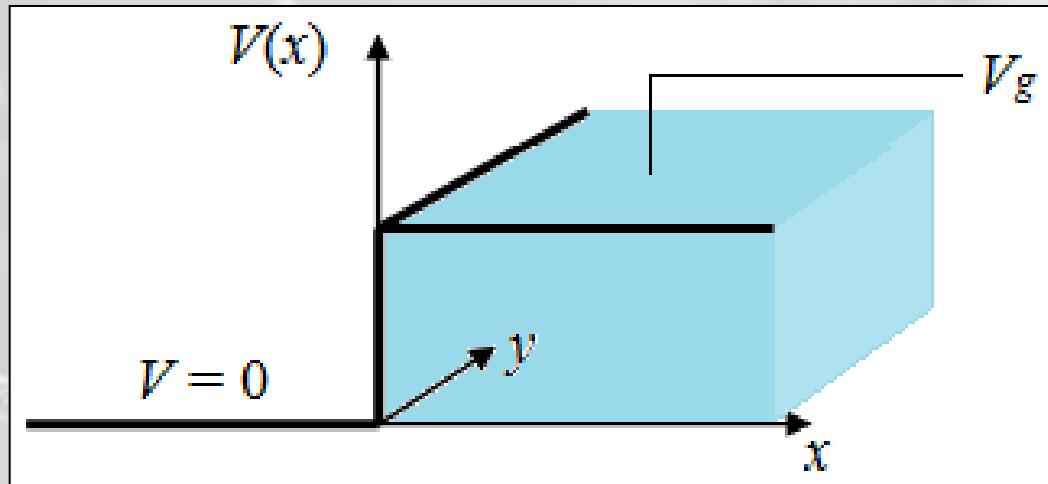
$$\lambda_{so} \approx \begin{cases} 3.9 \text{ мэВ} & \text{для силицина} \\ 43 \text{ мэВ} & \text{для германена} \end{cases}$$

$$s = \begin{cases} 1, \uparrow \\ -1, \downarrow \end{cases} \text{ — спиновый индекс}$$

- ТИ
- Дихалькогениды переходных металлов
- ...

Сдвиг ГХ в силицене при отражении от потенциального барьера

$$\hat{H} = \hbar v_F (k_x \tau_x - \eta k_y \tau_y) + (e l E_z(x) - \eta s \lambda_{so}) \tau_z + V(x) I$$



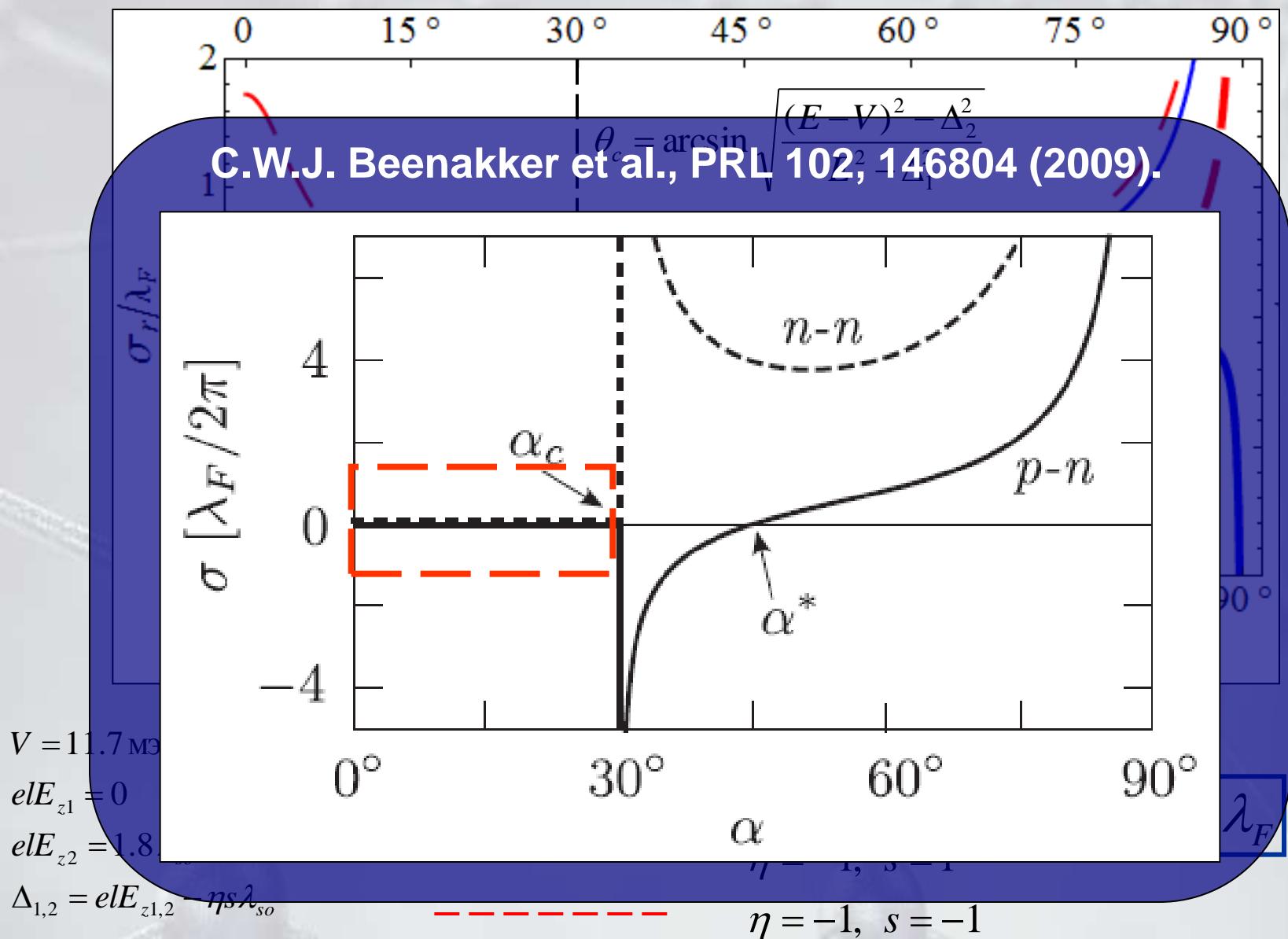
Метод стационарной фазы:

$$\Psi^{in}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k_y - k_{yo}) \exp[i k_x(k_y) x + i k_y y] \begin{pmatrix} 1 \\ C \exp[i \theta_{in}] \end{pmatrix}$$

$$\Psi^r(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k_y - k_{yo}) \exp[i k_x(k_y) x - i k_y y] r(k_y) \begin{pmatrix} 1 \\ C \exp[i \theta_r] \end{pmatrix} \quad r = \exp[-2i\psi]$$

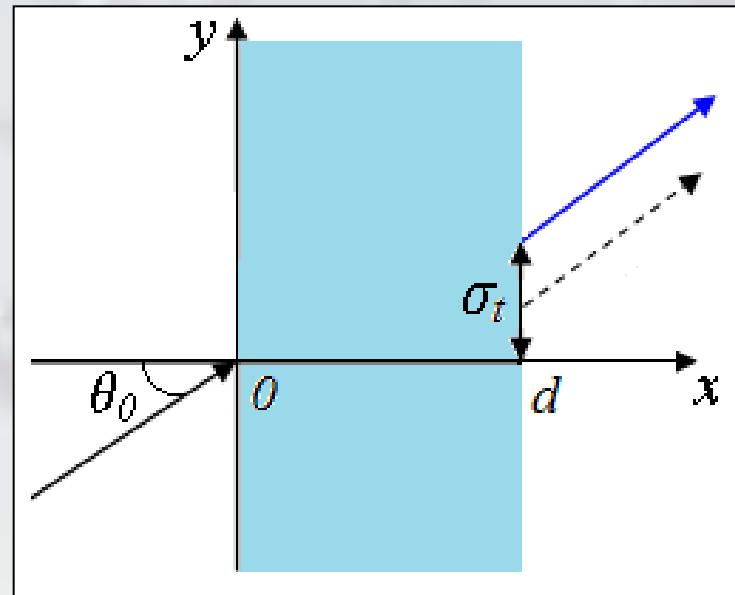
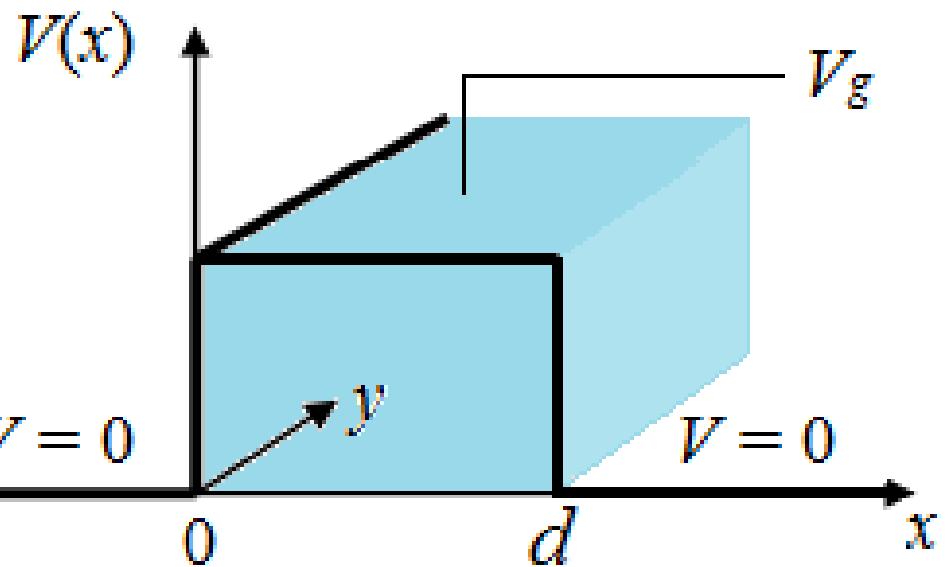
$$\sigma_r = 2\psi'(k_{y0}) + \frac{|C|^2}{1+|C|^2} \left(\theta_{in}'(k_{y0}) - \theta_r'(k_{y0}) \right) - \text{сдвиг ГХ}$$

Спин- и долинно зависимый сдвиг ГХ:



Смещение ГХ при **частичном** отражении: $\sigma_r(\theta_0 < \theta_c) \neq 0$

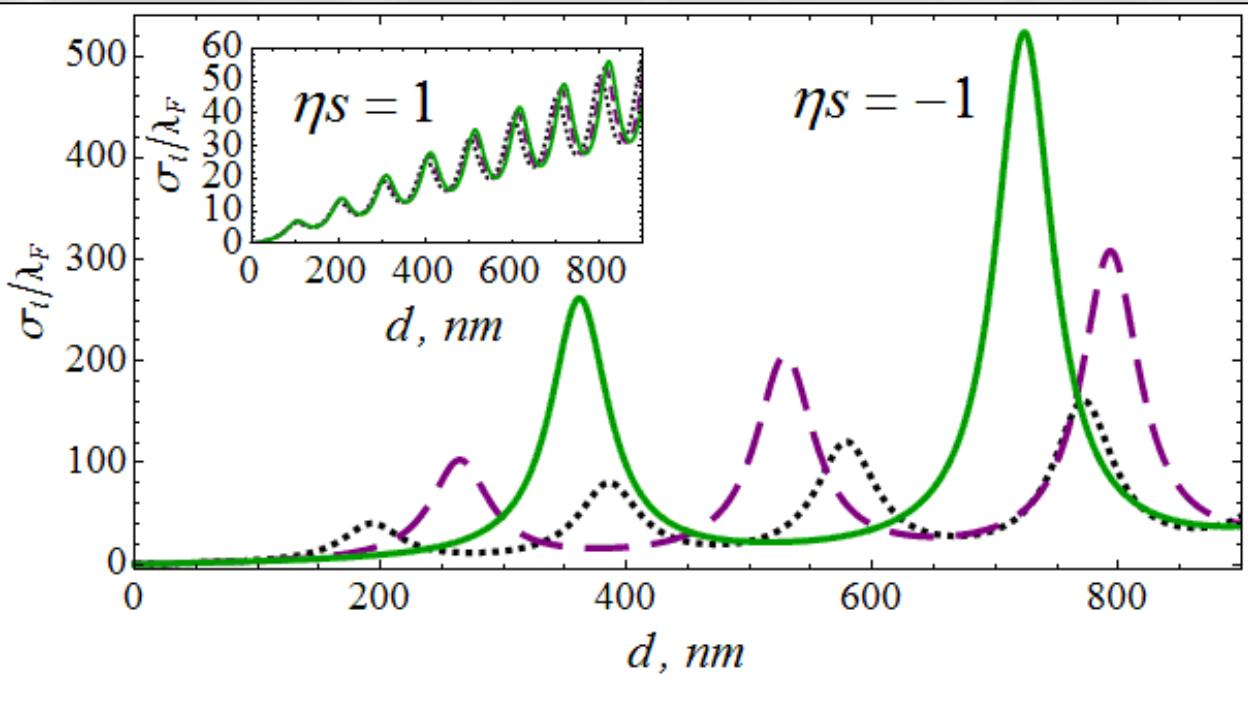
Сдвиг ГХ в силицене при прохождении через потенциальный барьер



$$\sigma_t = \frac{\partial \phi}{\partial k_{y0}} - \text{сдвиг ГХ}$$

$$\theta_0 < \theta_c$$

$t = |t| e^{-i\varphi}$ – комплексный коэффициент прохождения



$$E = 40 \text{ мэВ}$$

$$V = 7.46 \text{ мэВ}$$

$$elE_{z1} = 0$$

$$\theta_0 = 50^\circ$$

$$\Delta_{1,2} = elE_{z1,2} - \eta s \lambda_{so}$$

————— $elE_{z2} = 1.8 \lambda_{so}$
 - - - - - $elE_{z2} = 1.7 \lambda_{so}$
 $elE_{z2} = 1.5 \lambda_{so}$

$$\theta_0 < \theta_c$$

Усиление эффекта на резонансах прохождения:

при $q_x d = \pi n, n = 1, 2, \dots :$

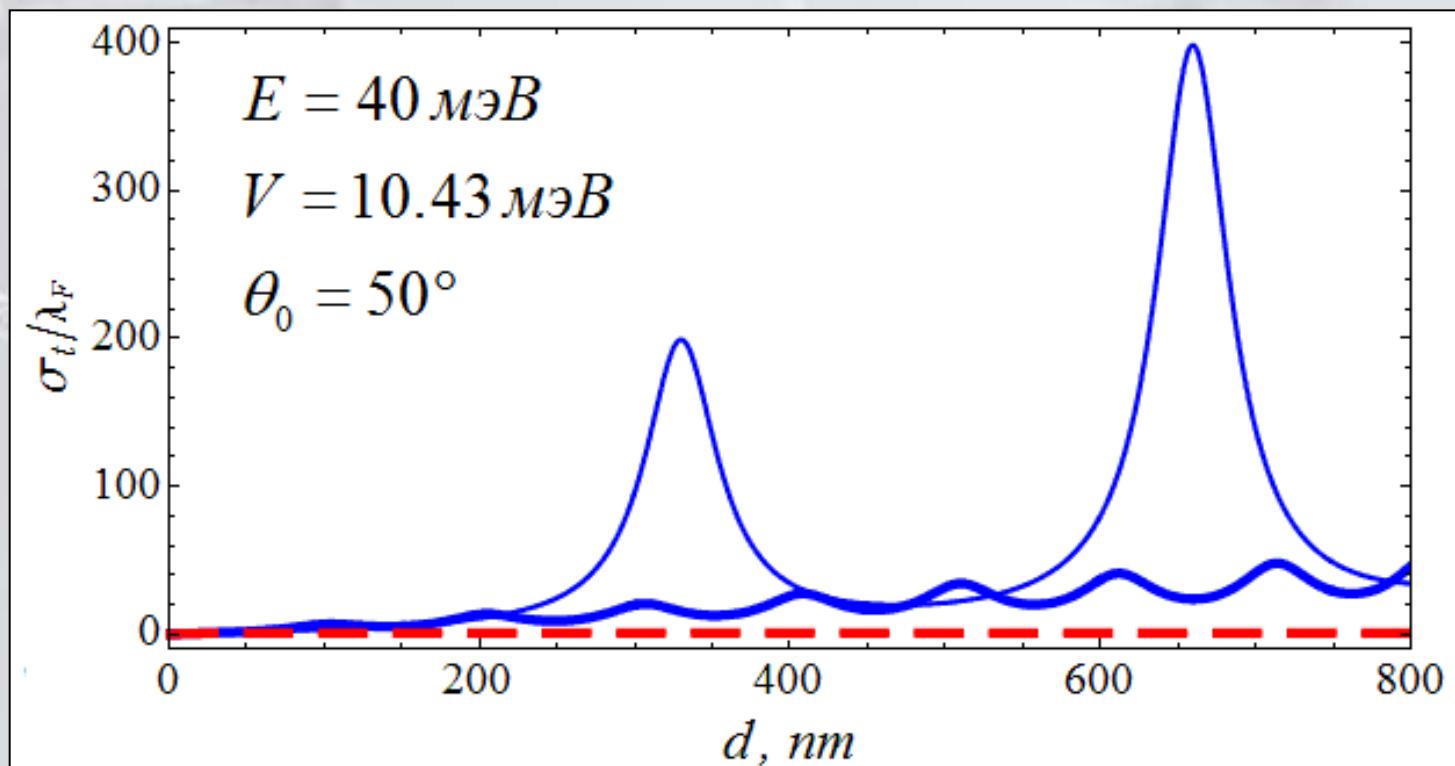
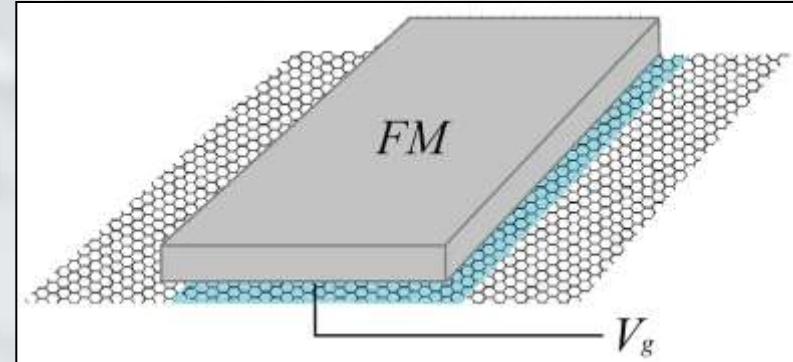
$$\sigma_t^{(n)} \lambda_{so} = -\pi n k_y f(E, k_y) q_x^{-2}$$

$$f(E, k_y) = \frac{E(V - hs - E) + \Delta_1 \Delta_2 + k_y^2}{k_x q_x}$$

$$k_x = \sqrt{E^2 - \Delta_1^2 - k_y^2} \quad q_x = \sqrt{(E - V + hs)^2 - \Delta_2^2 - k_y^2}$$

Магнитный барьер

$$\hat{H} = \hbar v_F (k_x \tau_x - \eta k_y \tau_y) + (eI E_z(x) - \eta s \lambda_{so}) \tau_z + V(x) I + h(x) s I$$



$$eI E_{z1} = 0$$

$$eI E_{z1} = 1.8 \lambda_{so}$$

$$h = 3 \text{ мэВ}$$

$$\text{———} \quad \eta = 1, \ s = 1$$

$$\text{———} \quad \eta = -1, \ s = 1$$

$$\text{———} \quad s = -1$$

$$\eta = 1, \ s = 1$$

$$\eta = -1, \ s = 1$$

$$s = -1$$

$$V_{\text{eff}} = V - hs$$

$$\theta_0 < \theta_c$$

Заключение

Исследован сдвиг Гуса-Хенхен для дираковских фермионов в силицине, отражающихся от потенциального барьера, а также при прохождении через барьерную область с ферромагнитным контактом.

Выводы:

Смещение Гуса-Хенхен при отражении от потенциального барьера различно для электронов с разными проекциями спина и принадлежащих разным долинам.

В щелевых структурах смещение пучка происходит в условиях как полного, так и частичного отражения.

Латеральный сдвиг при прохождении увеличивается (уменьшается) с ростом щели внутри (вне) барьера и зависит от спин-долинного индекса.

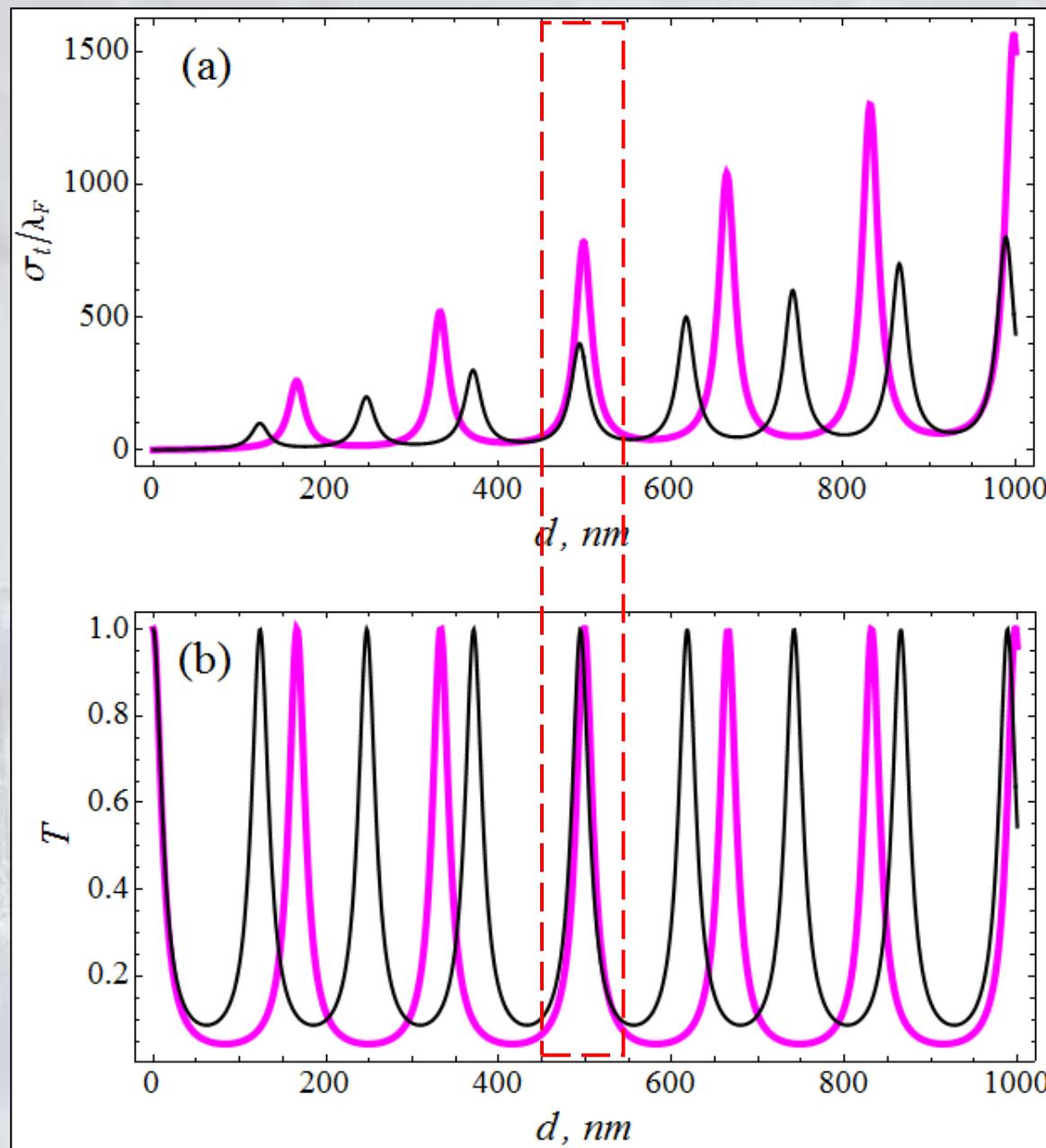
В присутствии ферромагнитного контакта спин-долинное вырождение продольного смещения снимается.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Приложения

Разделение по смещению ГХ



Смещение ГХ при неполном отражении от интерфейса

$$\sigma_r(E, \theta_0) = -\eta \frac{V(E^2 - \Delta_1^2)(E\Delta_2 + V\Delta_1 - E\Delta_1) + k_y^2 \Delta_1 ((\Delta_2 - \Delta_1)^2 - V^2)}{Ek_x \left[(E\Delta_2 + V\Delta_1 - E\Delta_1)^2 - k_y^2 ((\Delta_2 - \Delta_1)^2 - V^2) \right]} \quad (\theta_0 < \theta_c)$$

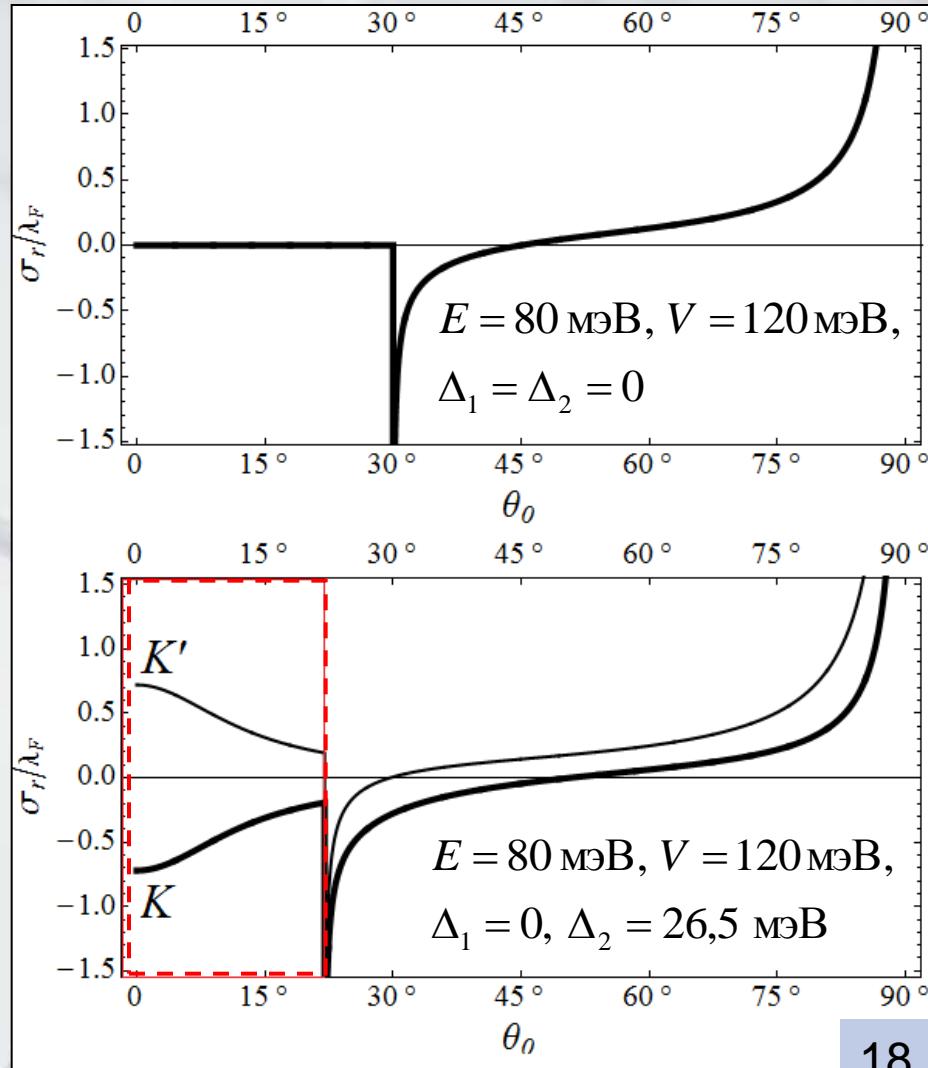
$$\sigma_r(\Delta_1 = \Delta_2 = 0) = 0$$

$$\sigma_r(\Delta_1 = 0, \Delta_2 \neq 0, V = 0) = 0$$

C.W.J. Beenakker et al., PRL **102**, 146804 (2009).



$$\sigma_r(\Delta_1 = 0, \Delta_2 \neq 0) = -\eta \frac{VE^2 \Delta_2}{k_x [E^2 \Delta_2^2 - k_y^2 (\Delta_2^2 - V^2)]} \neq 0$$



Снятие долинного вырождения в щелевом графене

Бесщелевой графен:

$$\hat{H} = \hbar v_F (k_x \tau_x - \eta_z k_y \tau_y) \quad \longrightarrow \quad \text{долинное вырождение}$$

Щелевая модификация графена:

$$\hat{H}_1 = \hbar v_F (k_x \tau_x - \eta_z k_y \tau_y) + \Delta \tau_z \quad \longrightarrow \quad \begin{matrix} \text{снятие} \\ \text{долинного вырождения} \end{matrix}$$



$$\hat{H}_2 = \hbar v_F (k_x \tau_x - k_y \tau_y) + \eta_z \Delta \tau_z$$

Унитарное преобразование:

$$\hat{H}_2 = U \hat{H}_1 U^{-1}, \quad U = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & \sigma_x \end{pmatrix}$$

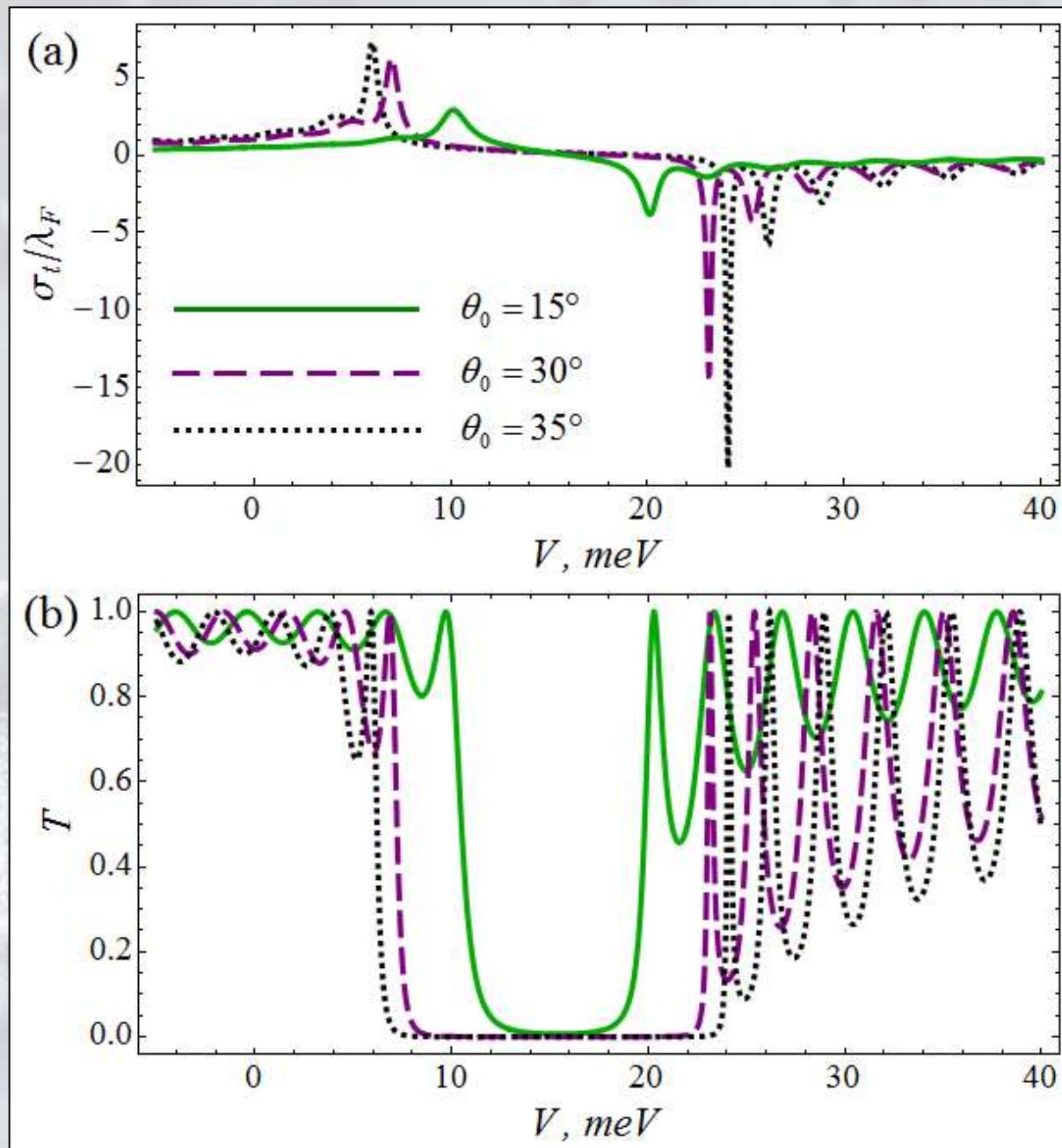
Положительное и отрицательное смещение ГХ

$E = 15$ мэВ

$d = 300$ нм

$elE_{z1} = 0$

$elE_{z2} = \lambda_{so}$



Комплексные коэффициент отражения от ступеньки и коэффициент прохождения через барьер

$$r(\varepsilon, k_y) = \frac{k_x(\varepsilon - \nu + \Delta_2) - i(\eta k_y(\varepsilon - \nu + \Delta_2) + (\kappa - \eta k_y)(\varepsilon + \Delta_1))}{k_x(\varepsilon - \nu + \Delta_2) + i(\eta k_y(\varepsilon - \nu + \Delta_2) + (\kappa - \eta k_y)(\varepsilon + \Delta_1))}$$

$$t(\varepsilon, k_y) = \frac{\cos \beta - i f(\varepsilon, k_y) \sin \beta}{\cos^2 \beta + f^2 \sin^2 \beta} \quad f(\varepsilon, k_y) = \frac{\varepsilon \nu + \Delta_1 \Delta_2 - \varepsilon^2 + k_y^2}{k_x q_x} \quad \beta = q_x d$$

$$\Delta_{1,2} = e l E_{z1,2} - \eta s \lambda_{so}$$