

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

Е. С. Азарова, Г.М. Максимова

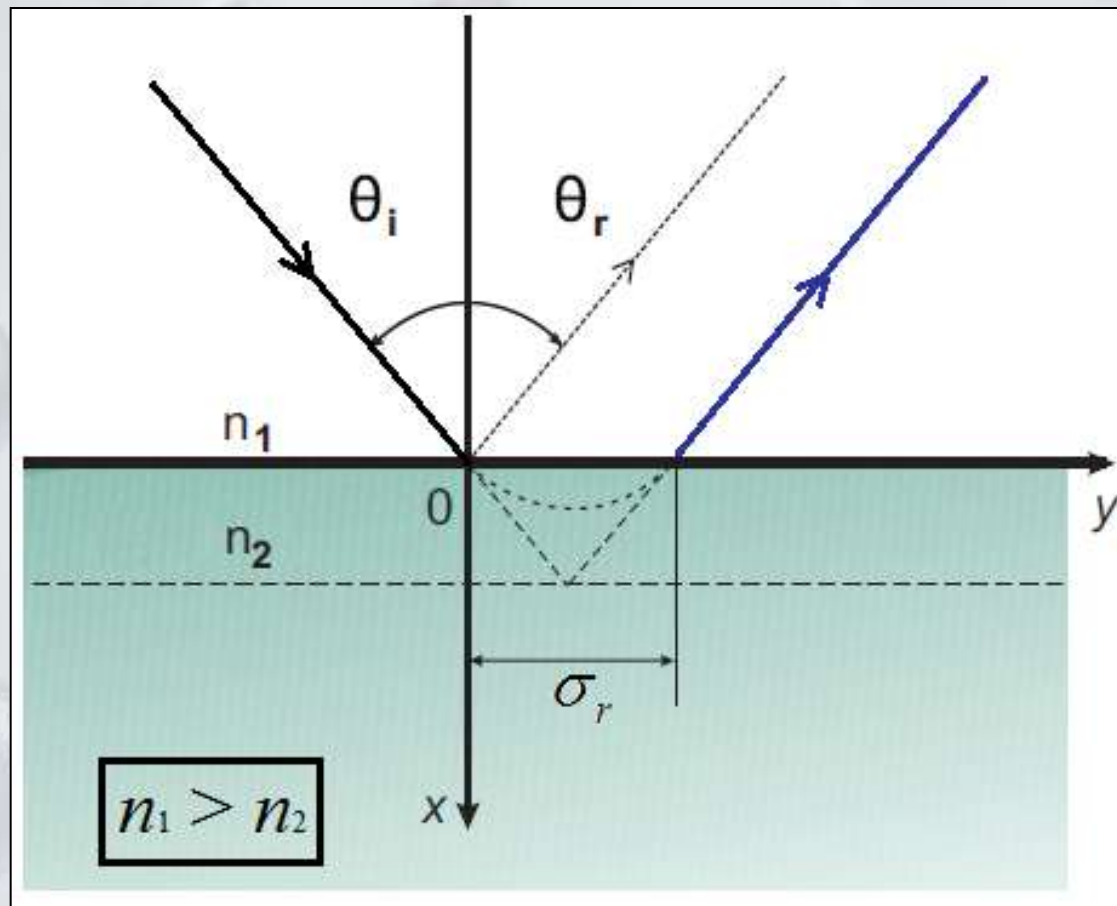
Кафедра теоретической физики ННГУ им. Н.И. Лобачевского



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

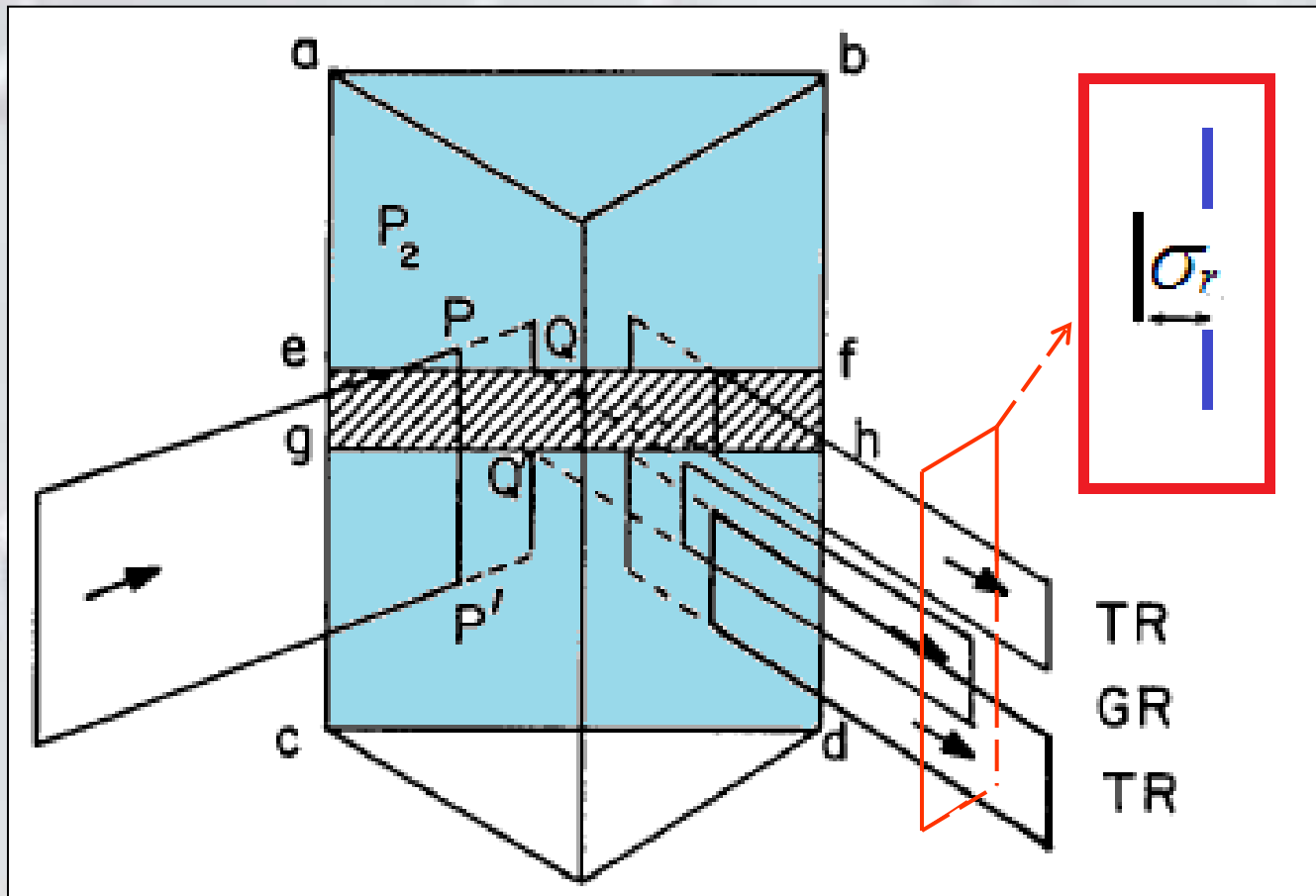
Определение

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).



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

$$\lambda = 578 \text{ nm}$$

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. Федянин, Письма в ЖЭТФ **91**(8), 414 (2010).

Фотонный кристалл:

12 пар $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$

$$n_1 = 1.46$$

$$n_2 = 1.90$$

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

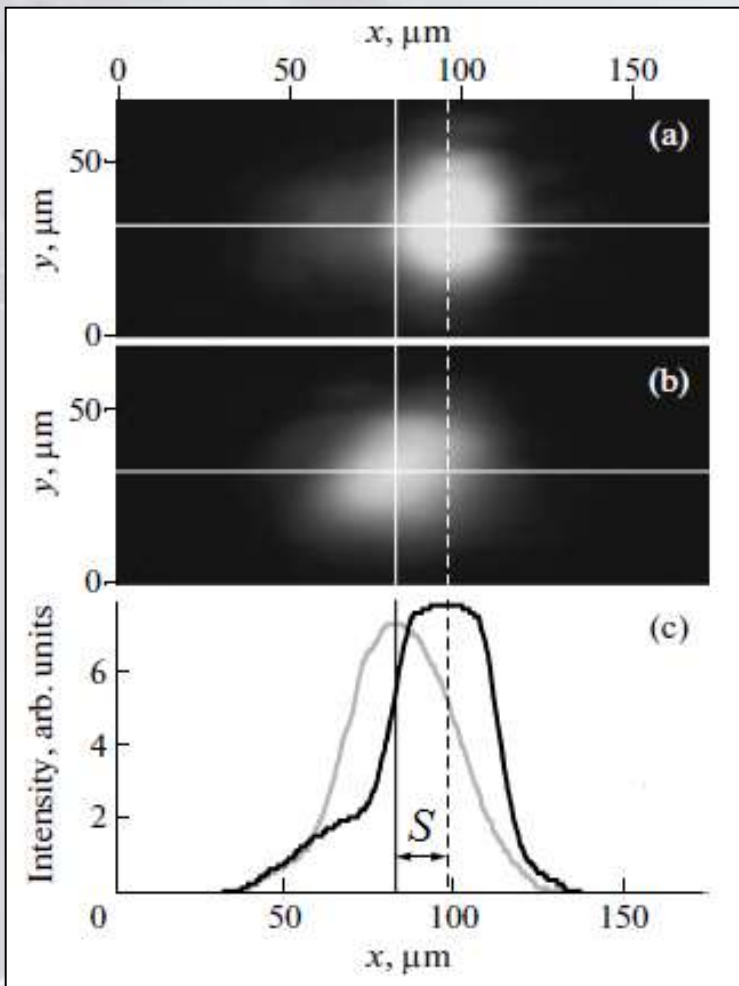
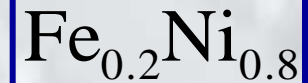
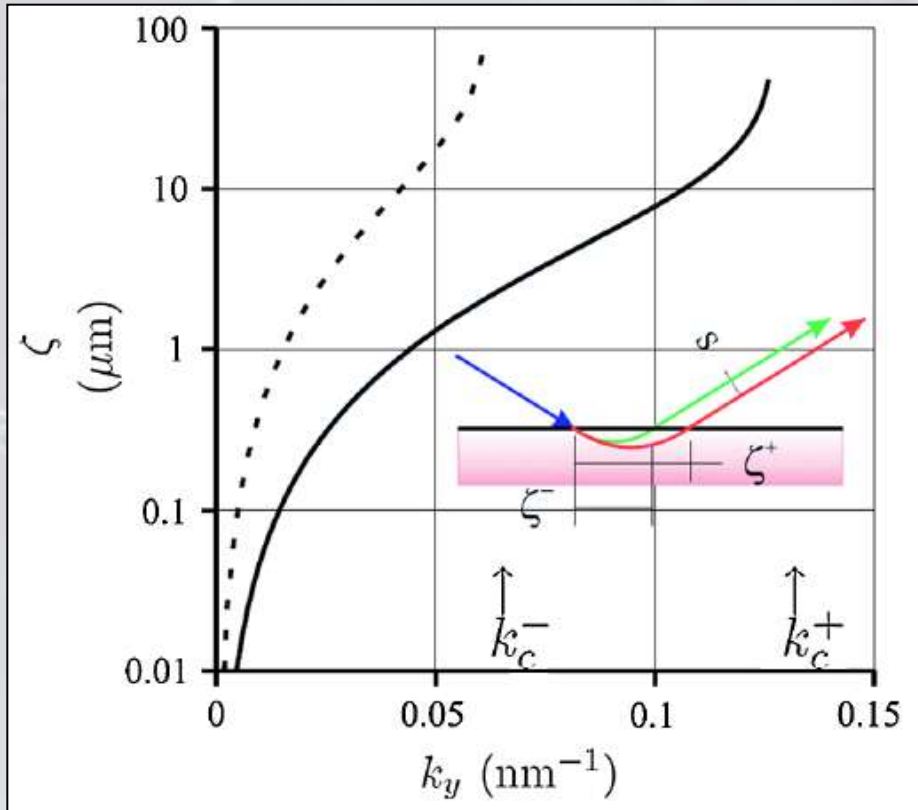


Рис.5. (a), (b) Микрофотографии флуоресценции сечения луча, отраженного от поверхности одномерного фотонного кристалла при возбуждении ПЭВ и при ее отсутствии в случае s - и p -поляризованного излучения накачки, соответственно. (c) Пространственное распределение интенсивности флуоресценции вдоль центров 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).



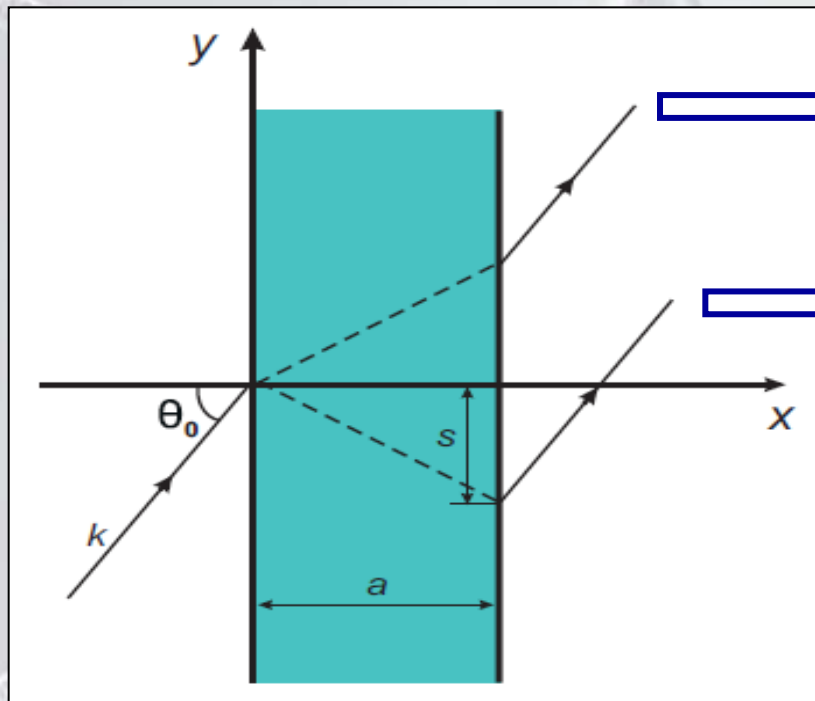
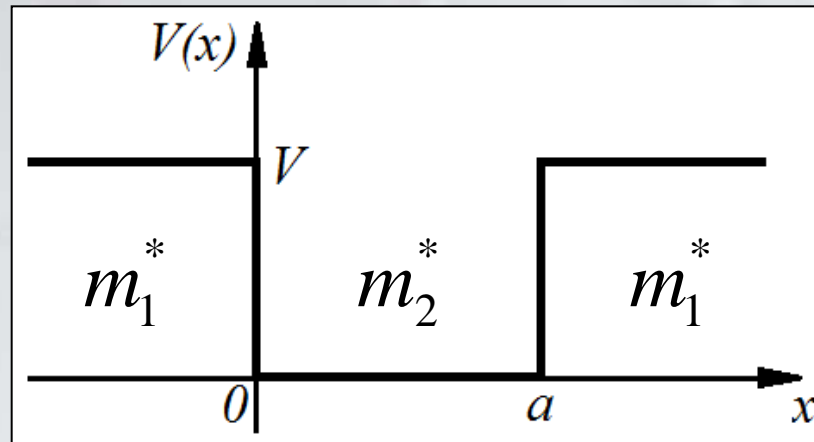
$$\theta_0 = 0.002 \text{ rad}$$

S up to 100 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).



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

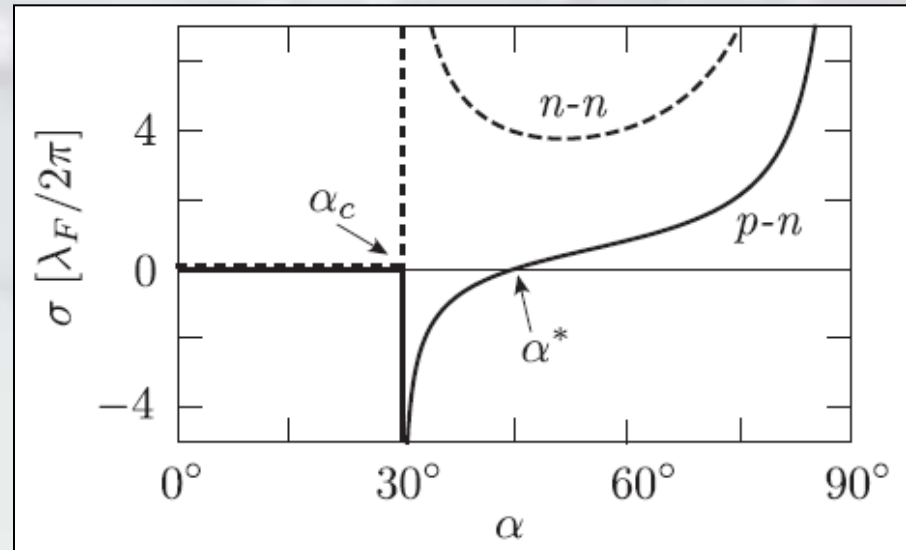
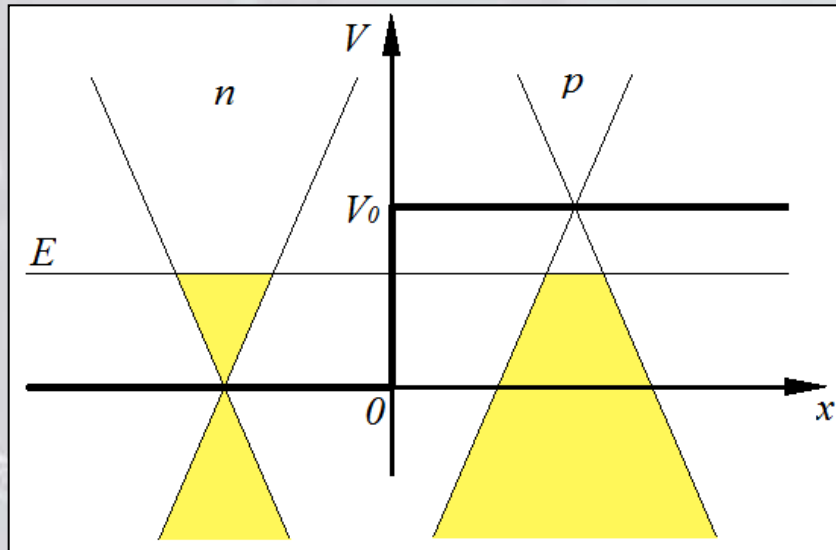
$$V < E < E_c \Rightarrow \begin{cases} s > 0 \\ s < 0 \end{cases}$$

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.

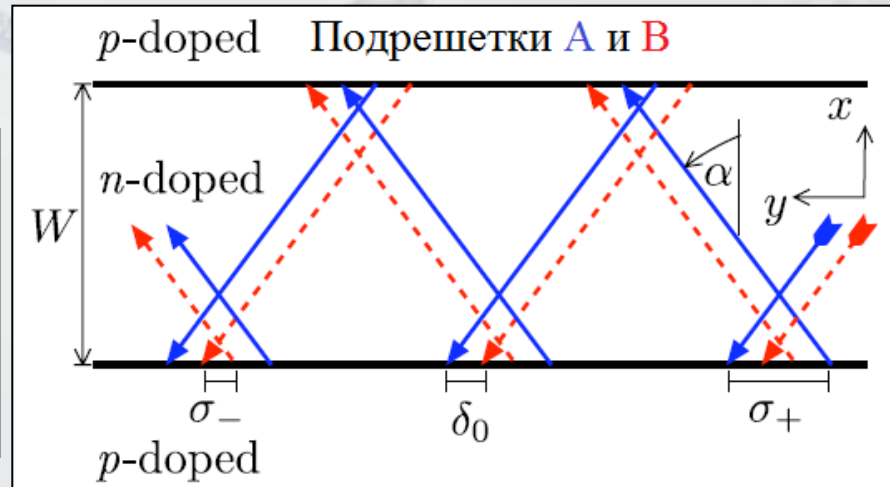
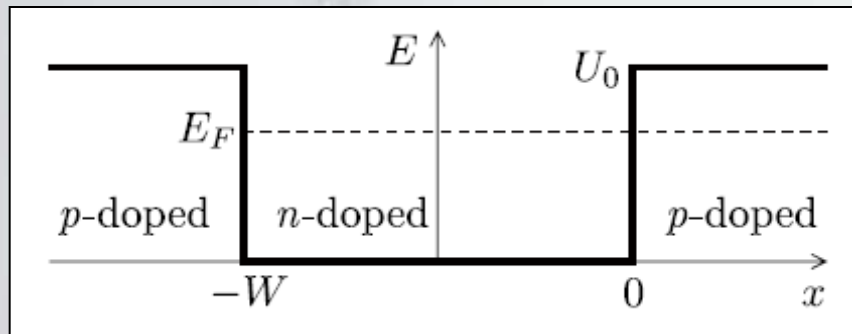
Эффект ГХ в графене

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 :

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

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

Константа СОВ:

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

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

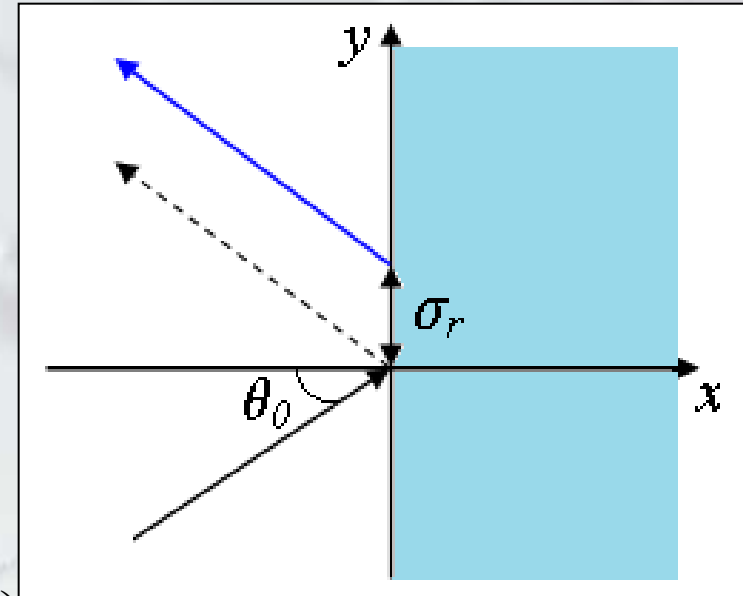
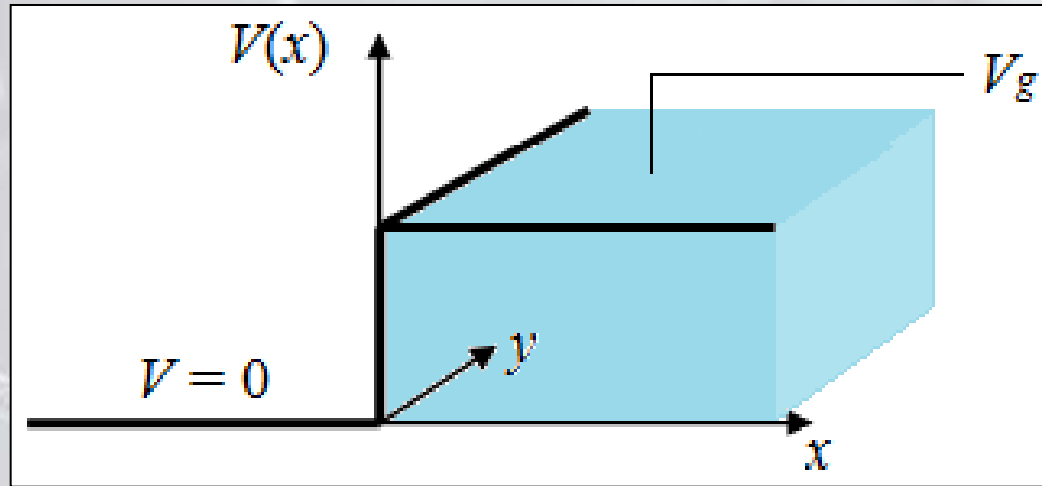
- **ТИ**

- **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:

$$\Psi^{in}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k_y - k_{y0}) \exp[ik_x(k_y)x + ik_y y] \begin{pmatrix} 1 \\ C \exp[i\theta_{in}] \end{pmatrix}$$

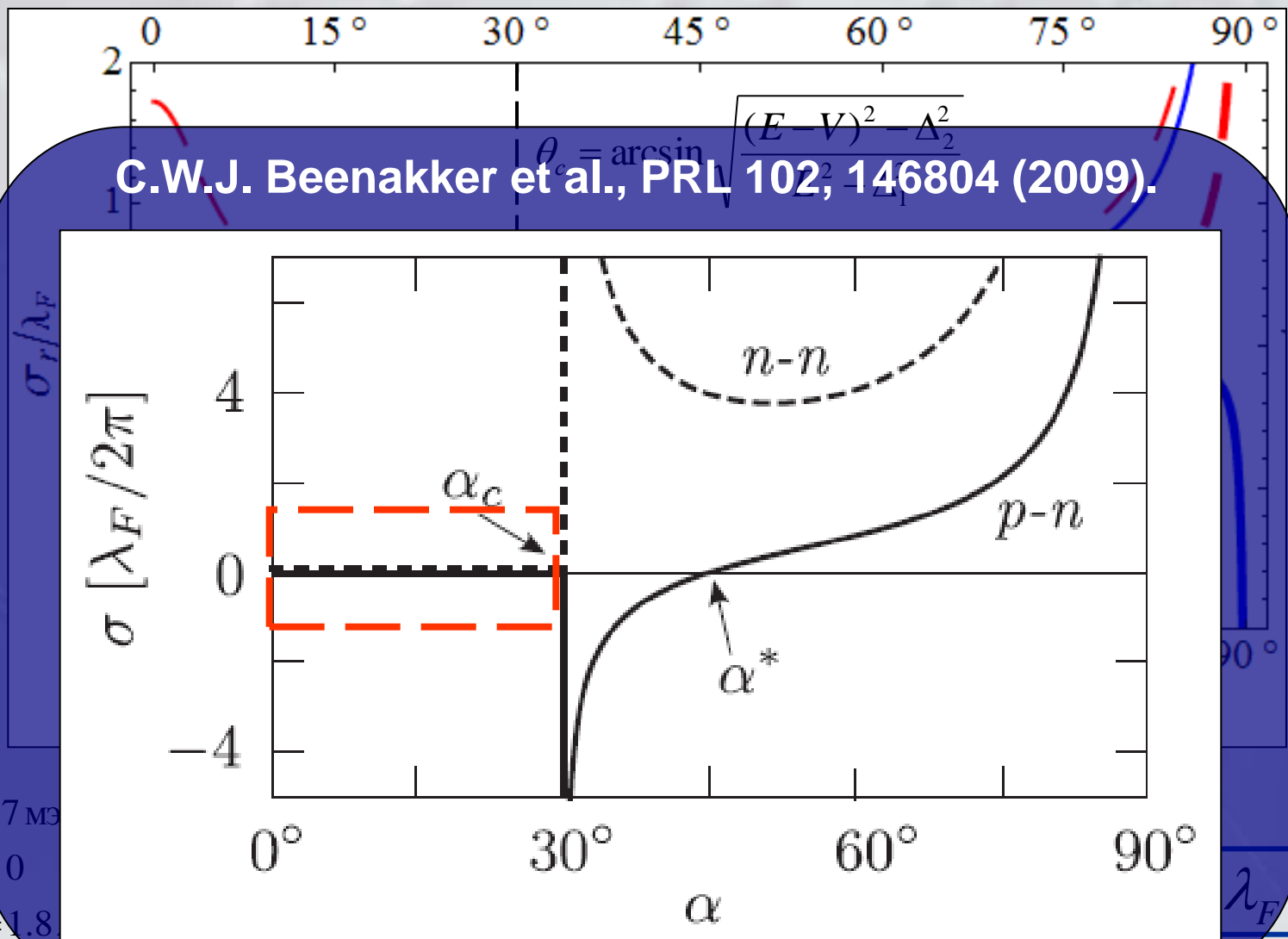
$$\Psi^r(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k_y - k_{y0}) \exp[ik_x(k_y)x - ik_y y] r(k_y) \begin{pmatrix} 1 \\ C \exp[i\theta_r] \end{pmatrix}$$

$$r = \exp[-2i\psi]$$

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

Спин- и долинно зависимый сдвиг ГХ:

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



$$V = 11.7 \text{ мэВ}$$

$$elE_{z1} = 0$$

$$elE_{z2} = 1.8 \text{ мэВ}$$

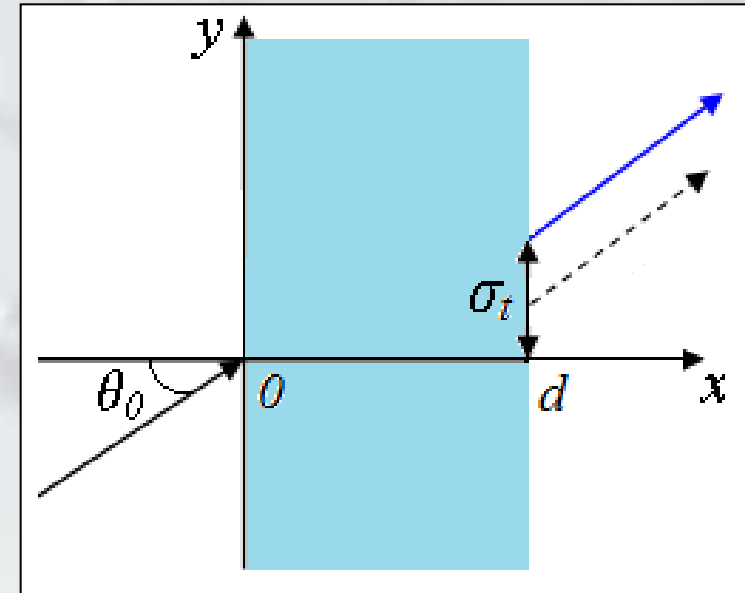
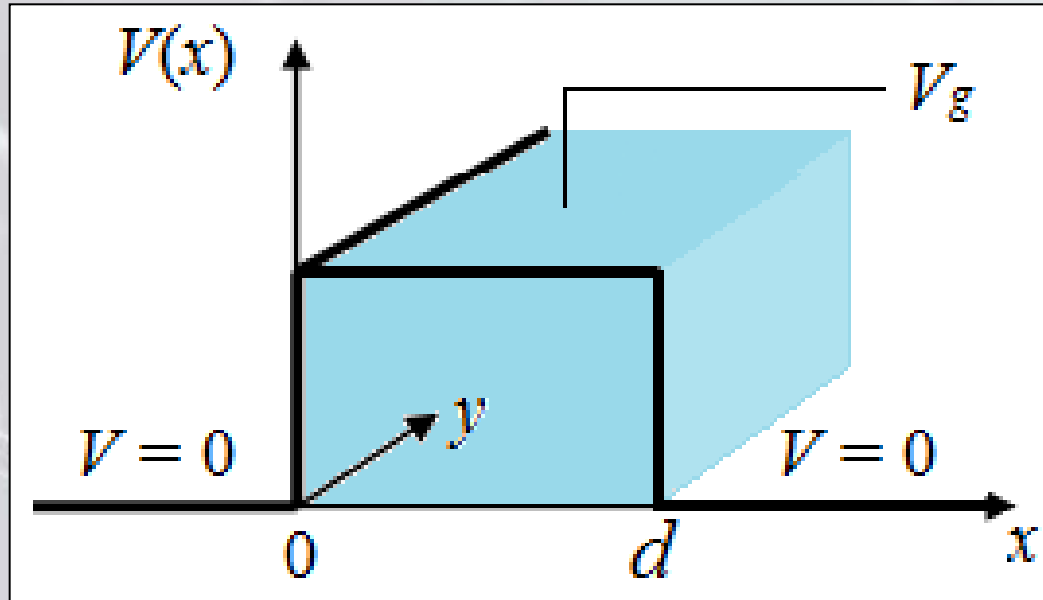
$$\Delta_{1,2} = elE_{z1,2} - \eta s \lambda_{so}$$

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

Смещение ГХ при **частичном** отражении:

$$\sigma_r(\theta_0 < \theta_c) \neq 0$$

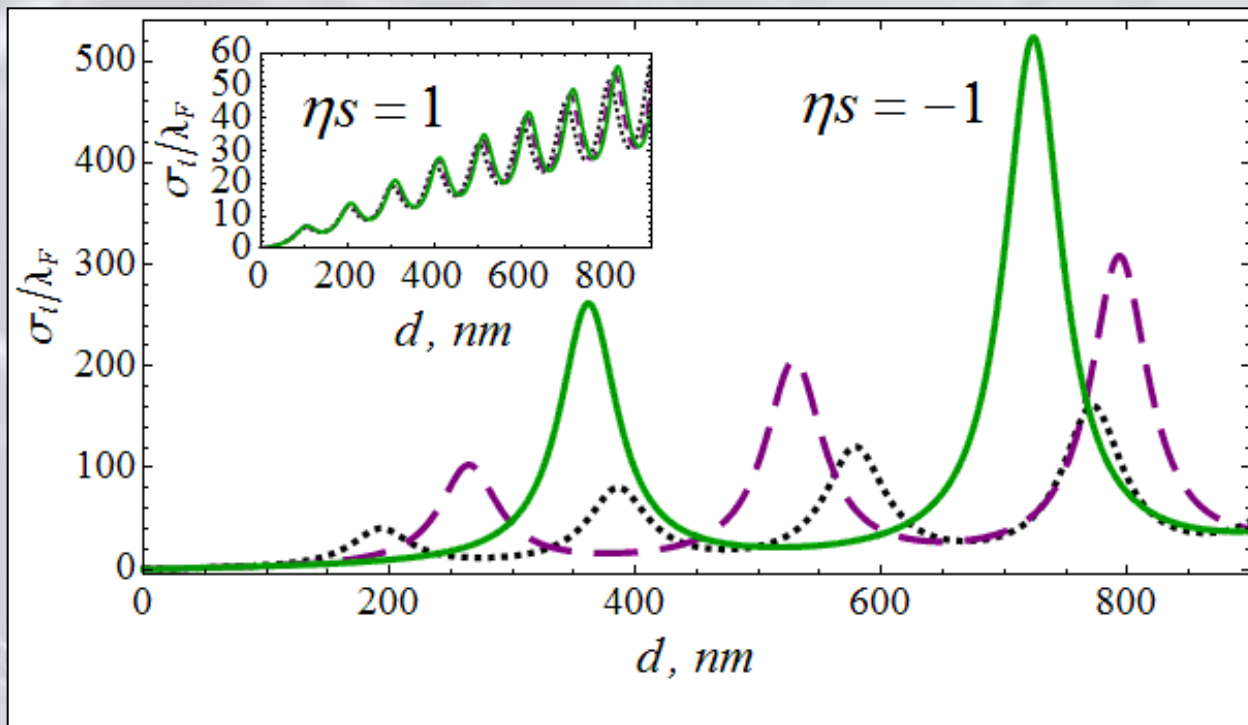
Сдвиг ГХ в силицене при прохождении через потенциальный барьер



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

$$\theta_0 < \theta_c$$

$t = |t| e^{-i\varphi}$ — 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 $q_x d = \pi n, n = 1, 2, \dots$:

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

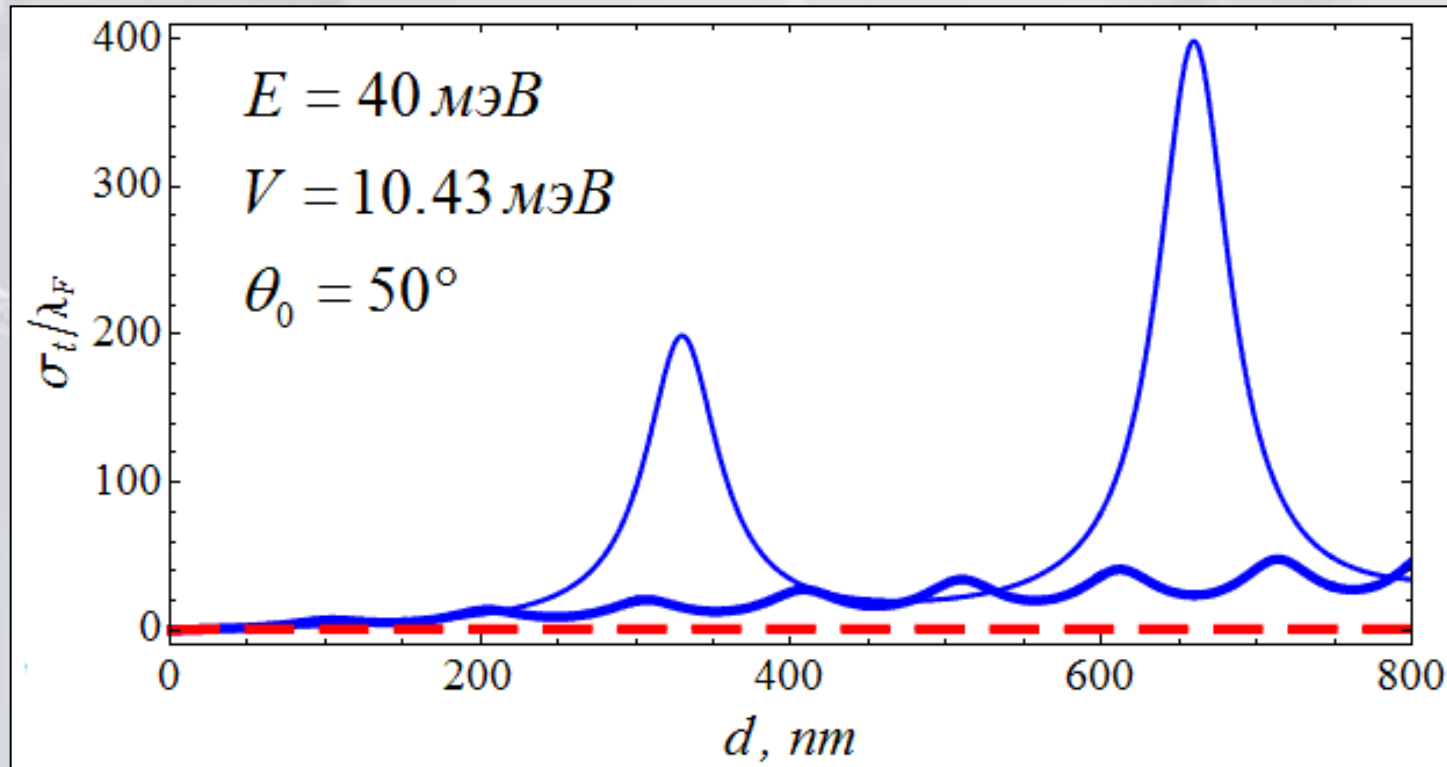
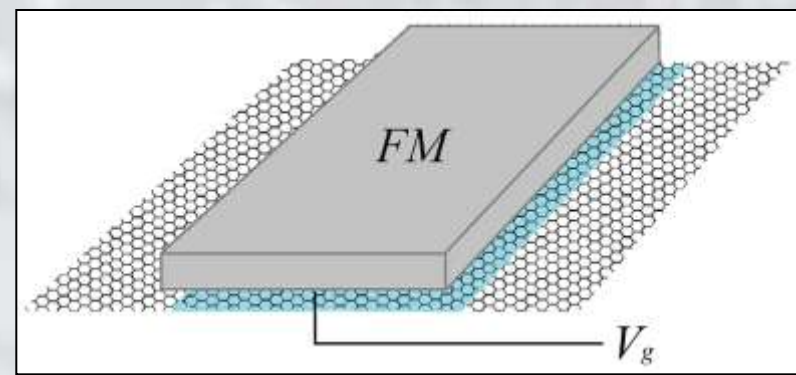
$$f(E, k_y) = \frac{E(V - \hbar s - E) + \Delta_1 \Delta_2 + k_y^2}{k_x q_x}$$

$$k_x = \sqrt{E^2 - \Delta_1^2 - k_y^2}$$

$$q_x = \sqrt{(E - V + \hbar s)^2 - \Delta_2^2 - k_y^2}$$

Магнитный барьер

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



$$elE_{z1} = 0$$

$$elE_{z1} = 1.8 \lambda_{so}$$

$$h = 3 \text{ mB}$$

————— $\eta = 1, s = 1$

————— $\eta = -1, s = 1$

- - - - - $s = -1$

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

$$\theta_0 < \theta_c$$

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.

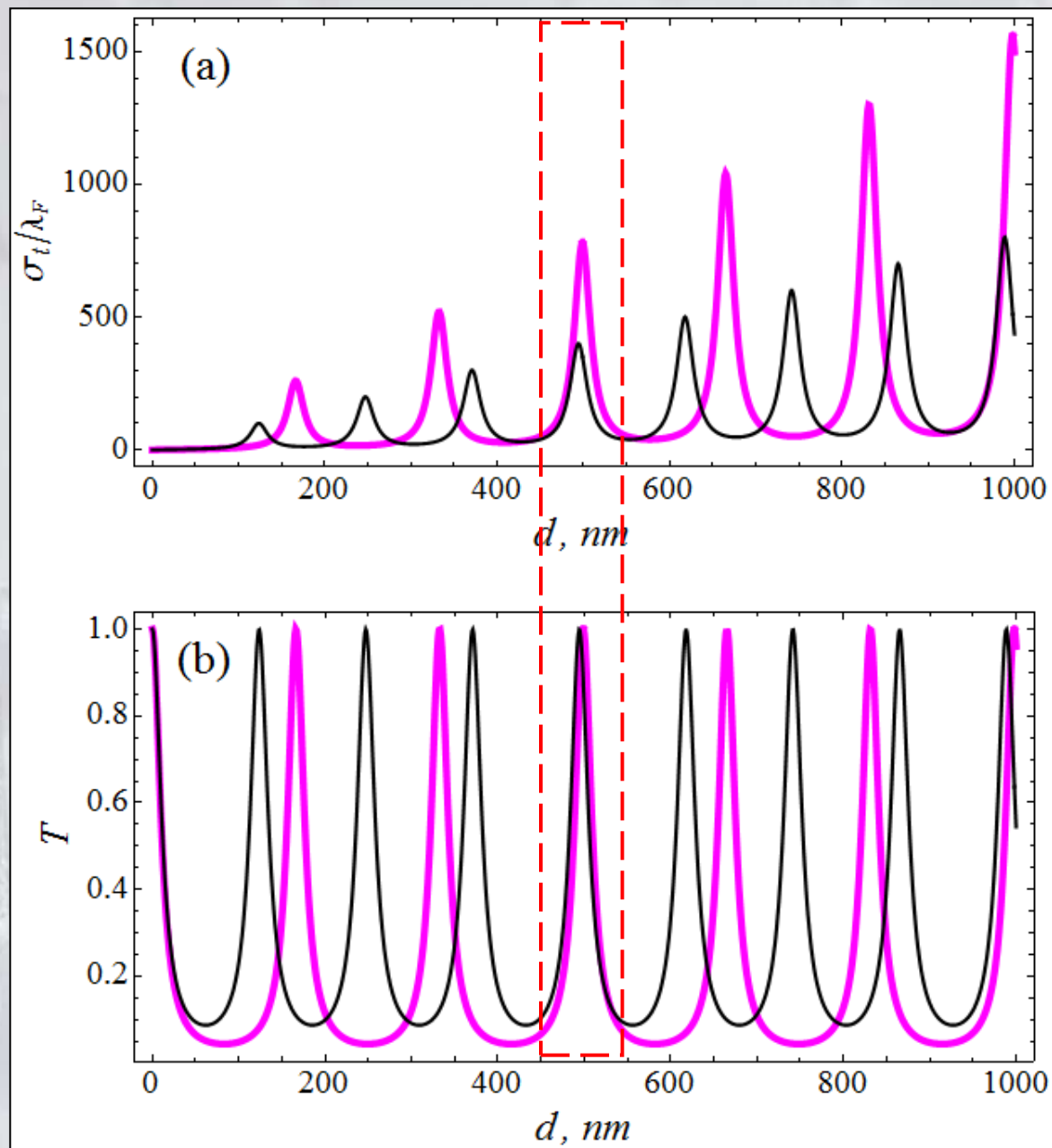


СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Приложения

Разделение по смещению ГХ



Смещение ГХ при неполном отражении от интерфейса

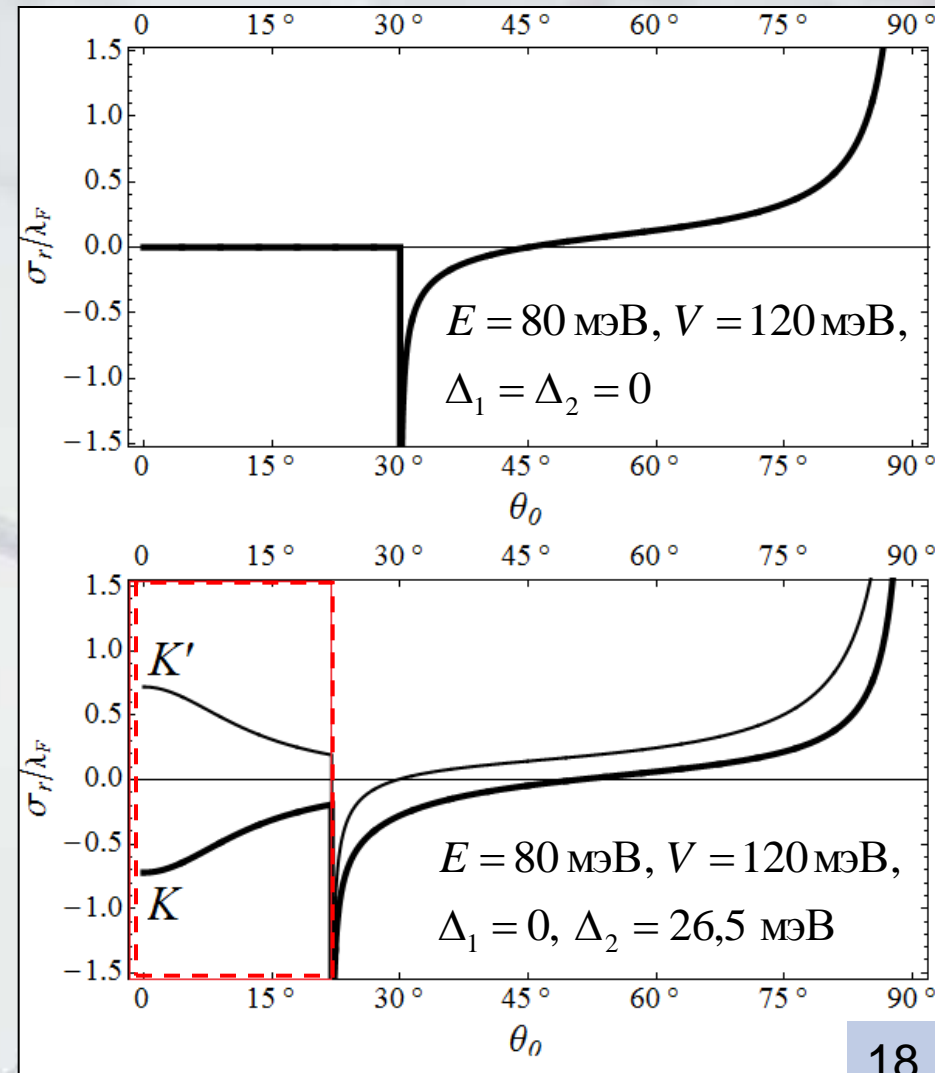
$$\sigma_r(E, \theta_0) = -\eta \frac{V(E^2 - \Delta_1^2)(E\Delta_2 + V\Delta_1 - E\Delta_1) + k_y^2 \Delta_1((\Delta_2 - \Delta_1)^2 - V^2)}{Ek_x[(E\Delta_2 + V\Delta_1 - E\Delta_1)^2 - k_y^2((\Delta_2 - \Delta_1)^2 - V^2)]} \quad (\theta_0 < \theta_c)$$

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

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

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:

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

Щелевая модификация графена:

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

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

Унитарное преобразование:

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

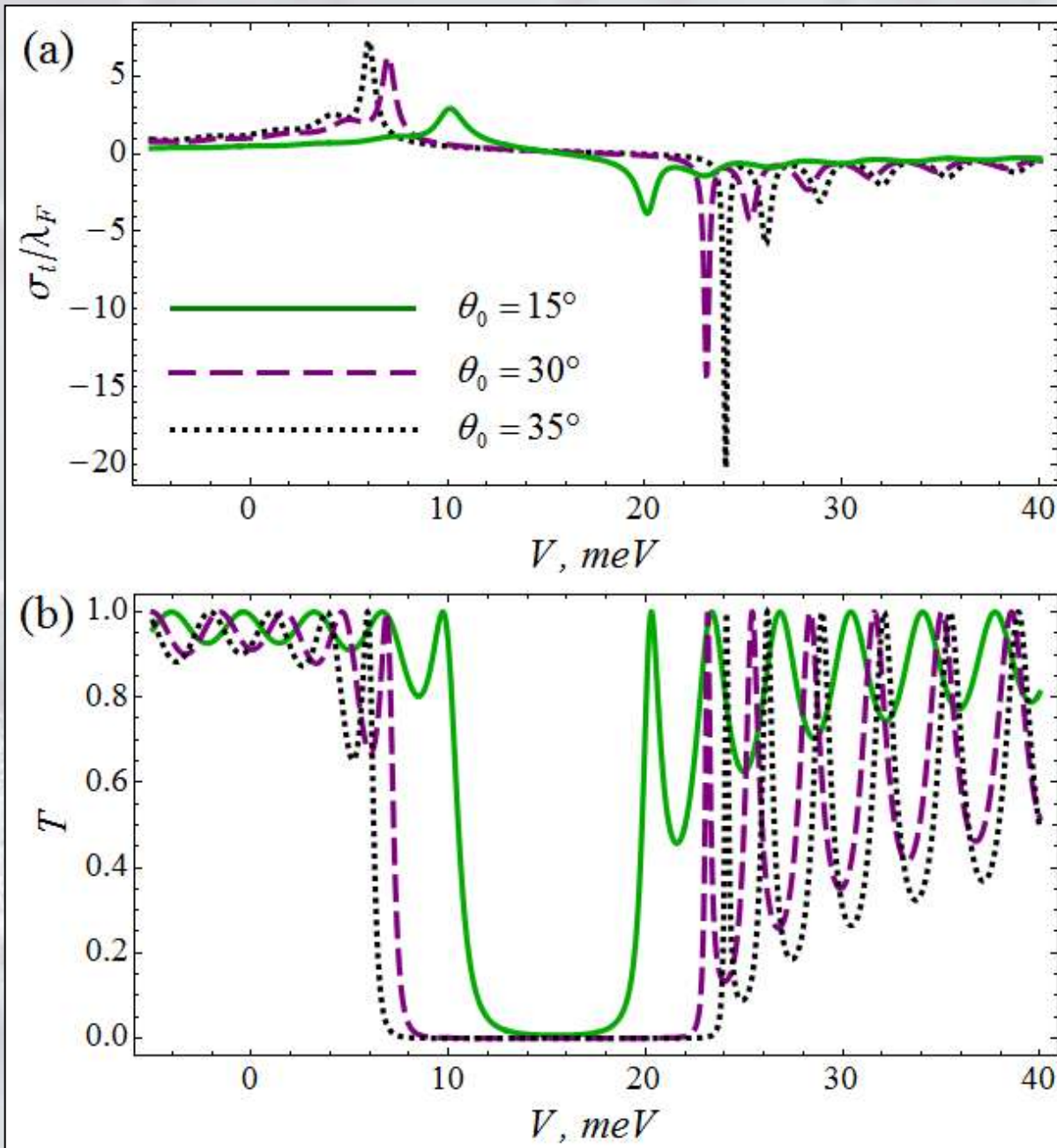
Положительное и отрицательное смещение ГХ

$$E = 15 \text{ мЭВ}$$

$$d = 300 \text{ нм}$$

$$elE_{z1} = 0$$

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



Комплексные коэффициент отражения от ступеньки и коэффициент прохождения через барьер

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

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

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