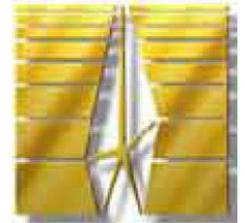
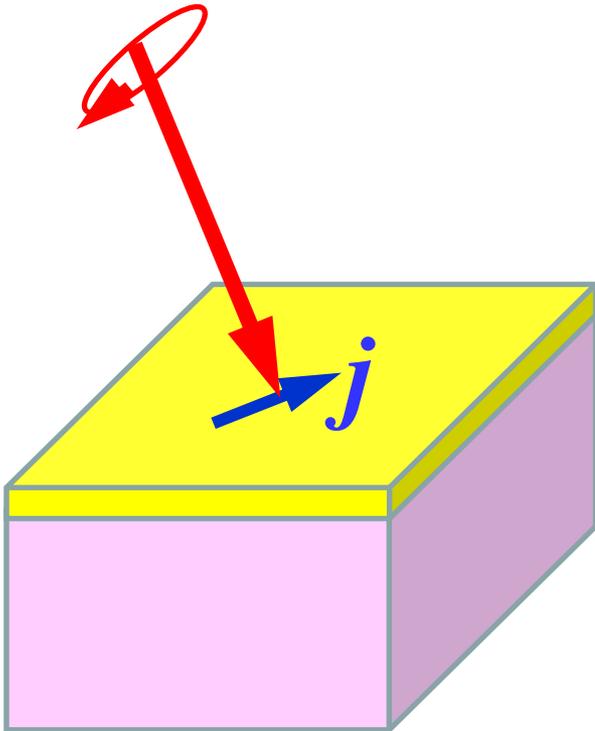


ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

Л.Е. Голуб

*Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург*



Нелинейная оптика

$$E(\omega, \mathbf{q})e^{i(\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}-\omega t)} \quad E(\omega, \mathbf{q}) = E^*(-\omega, -\mathbf{q})$$

Поляризация:

$$P_\alpha = \chi_{\alpha\beta}^{(1)}(\omega, \mathbf{q})E_\beta(\omega, \mathbf{q}) + \chi_{\alpha\beta\gamma}^{(2)}(\omega_1, \omega_2; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)E_\beta(\omega_1, \mathbf{q}_1)E_\gamma(\omega_2, \mathbf{q}_2) + \chi_{\alpha\beta\gamma\mu}^{(3)} \dots$$

Отклик 1 порядка: $\hat{\chi}^{(1)}(\omega, \mathbf{q}) = \hat{\chi}_{\text{reg}}^{(1)}(\omega, \mathbf{q}) + \frac{i\hat{\sigma}(\omega, \mathbf{q})}{\omega}$

Ток: $\mathbf{j}(\omega, \mathbf{q}) = -i\omega\mathbf{P} = \hat{\sigma}(\omega, \mathbf{q})\mathbf{E}(\omega, \mathbf{q}) \quad \mathbf{j} = e \sum_{\mathbf{p}, s} \mathbf{v}_p f_p \quad v_p = \frac{\partial \epsilon_p}{\partial p}$

Кинетическое уравнение: $\frac{\partial f_p}{\partial t} + \mathbf{v}_p \cdot \frac{\partial f_p}{\partial \mathbf{r}} + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial f_p}{\partial \mathbf{p}} = \sum_{p'} (W_{pp'} f_{p'} - W_{p'p} f_p)$

Отклик 2 порядка:

$$\mathbf{P}^{(2)} = \mathbf{P}_{\text{reg}}^{(2)} + \frac{i\mathbf{j}^{(2)}}{\omega_1 + \omega_2} \quad \omega_1 = -\omega_2 : \quad \mathbf{j}^{(2)} \propto I$$

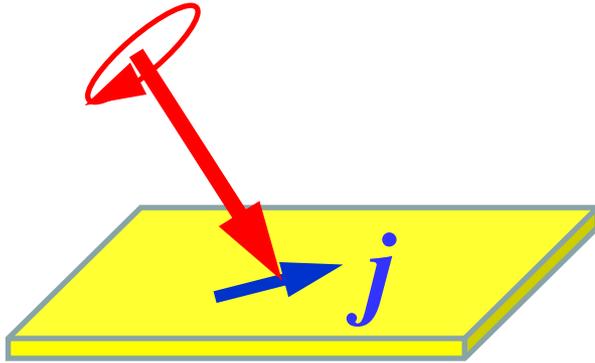
Оптическое
выпрямление

Фотогальванический
эффект

ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

- Фотогальванический эффект
- Полупроводники
- Графен
- Асимметрия рассеяния
- Топологические изоляторы

Фотогальванические эффекты



$$j_\alpha = \sigma_{\alpha\beta} E_\beta + \eta_{\alpha\beta\nu} E_\beta E_\nu^*$$

в любой системе

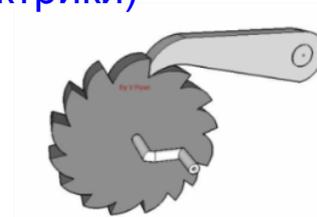
только в отсутствие
пространственной инверсии

Протекание постоянного тока при однородном освещении образца

$$j_\alpha = \underbrace{\chi_{\alpha\beta\nu} \frac{E_\beta E_\nu^* + E_\beta^* E_\nu}{2}}_{\text{линейный (пьезоэлектрики)}} + \underbrace{\gamma_{\alpha\beta} i (\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*)_\beta}_{\text{циркулярный (гиротропные среды)}}$$

Е.Л. Ивченко, Г.Е. Пикус (1978)
В.И. Белиничер (1978)

Эффект храповика (ratchet)



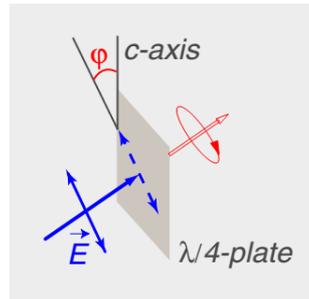
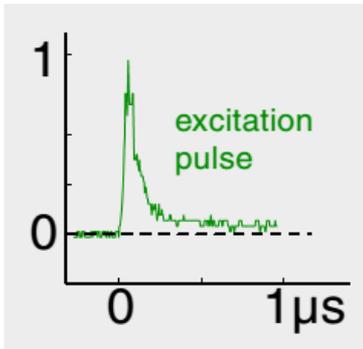
$$i (\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*) = P_{\text{circ}} \frac{q}{q} |\mathbf{E}|^2$$

Эксперименты

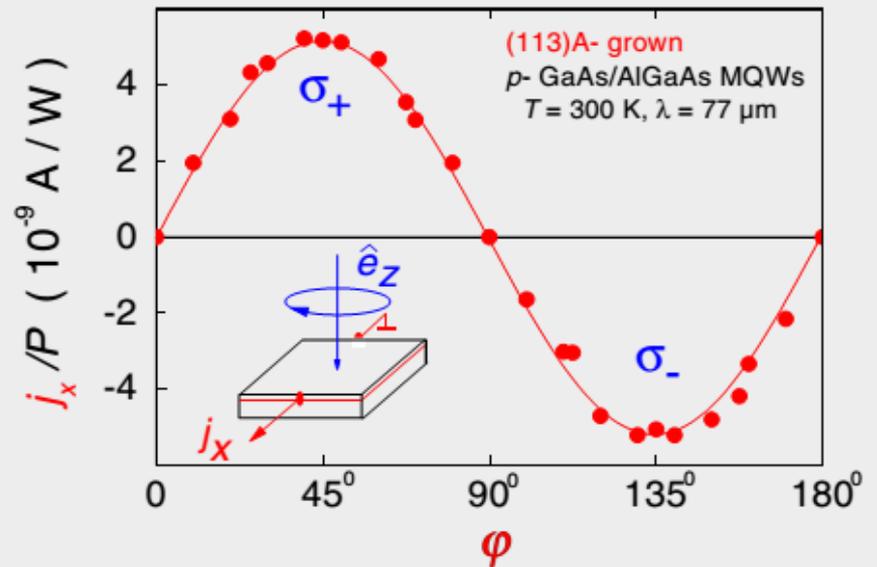
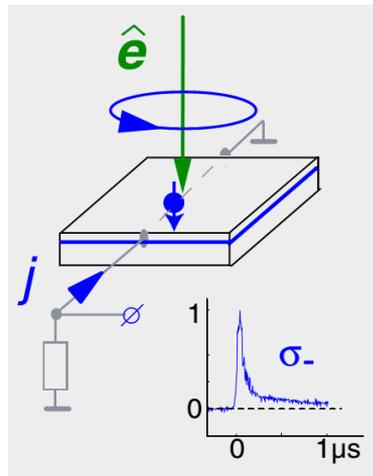
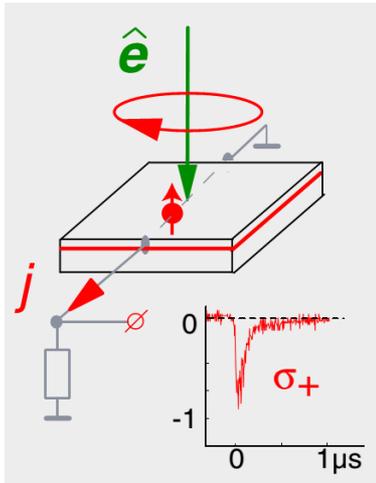


TeraHertz Centrum, Regensburg (Germany)

Prof. S.D. Ganichev



$$j_x \propto P_{circ} = \frac{I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}}{I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-}} = \sin 2\phi$$



Поглощение света в 2D полупроводниках



ИК диапазон

Q-switched CO₂ лазер

$$\lambda = 9.2 - 10.8 \mu\text{m}$$

$$\hbar\omega = 135 - 115 \text{ meV}$$

$$\omega \gg \bar{\epsilon}/\hbar \gg 1/\tau$$

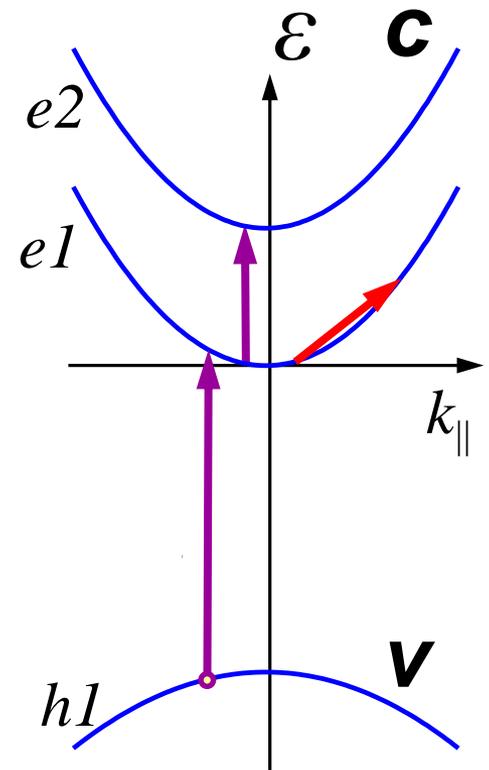
ТГц диапазон

Молекулярный лазер
с оптической накачкой

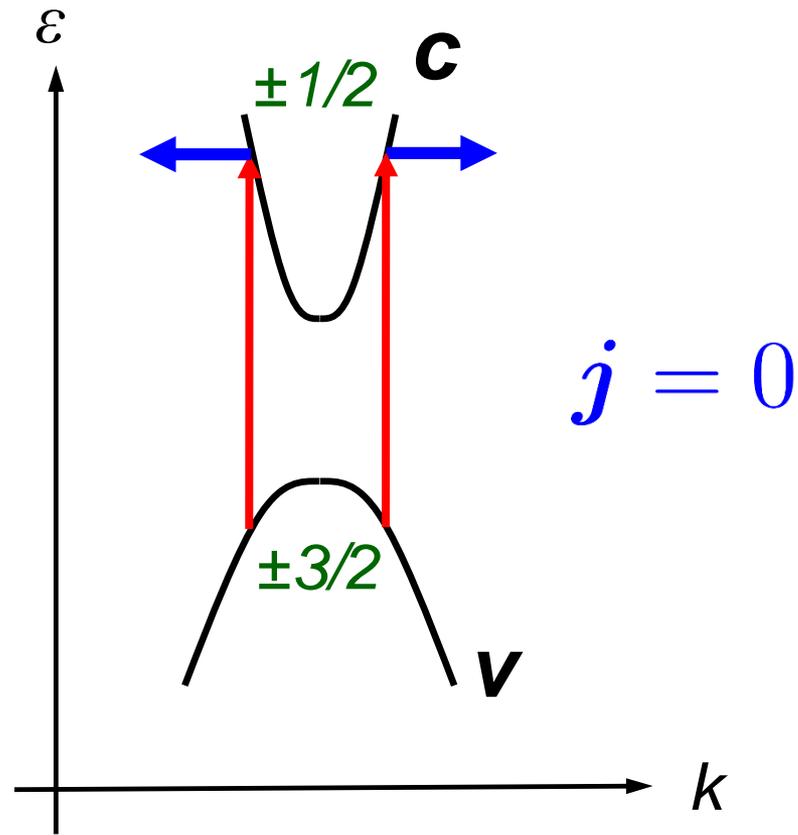
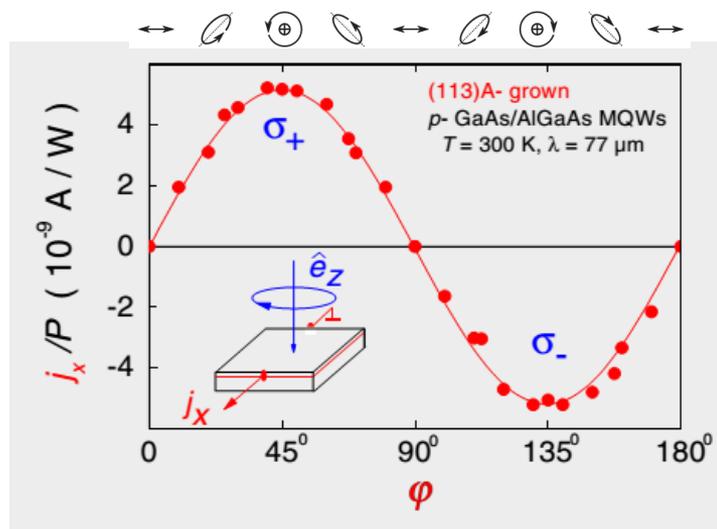
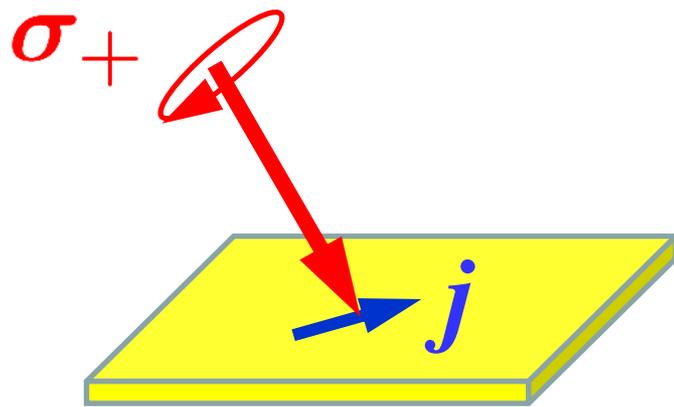
$$\lambda = 90 - 496 \mu\text{m}$$

$$\hbar\omega = 13 - 2 \text{ meV}$$

$$\bar{\epsilon}/\hbar \geq \omega \sim 1/\tau$$

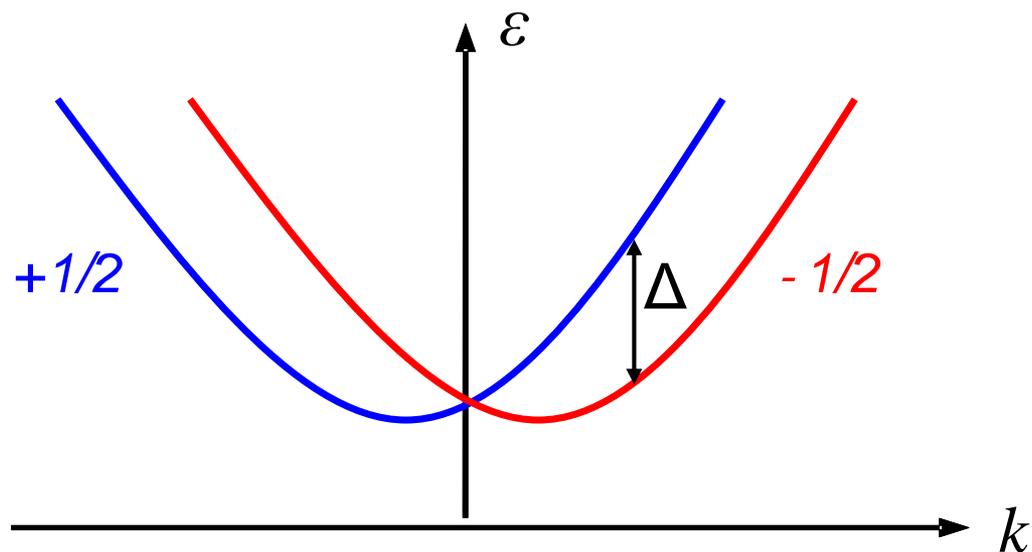


Циркулярный фотогальванический эффект



Спиновые расщепления в полупроводниках

В отсутствие центра инверсии

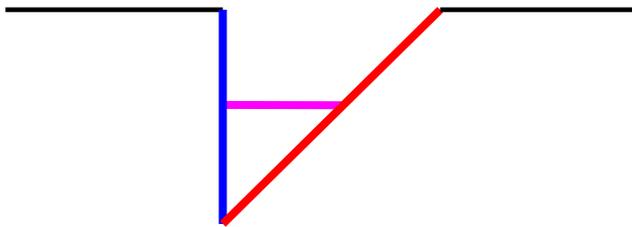


$$\hat{\mathcal{H}} \propto \hat{\sigma}_i k_j, \hat{\sigma}_i k_j^3$$

2D полупроводники

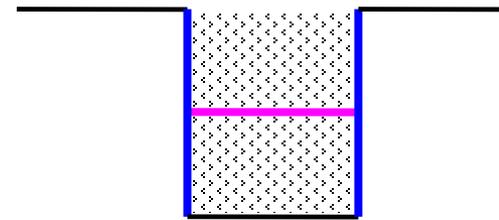
Несимметричная
квантовая яма:

SIA



Квантовая яма
из полупроводника
без центра инверсии:

BIA



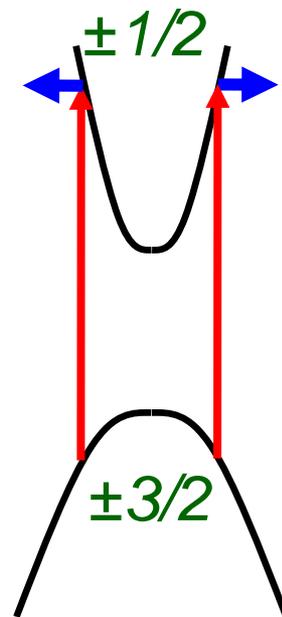
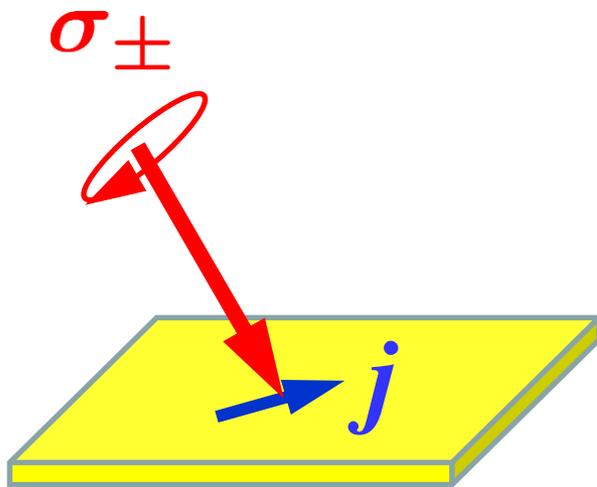
$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{SIA}} = \alpha(\hat{\sigma}_x k_y - \hat{\sigma}_y k_x)$$

$$\Delta = 2\alpha k$$

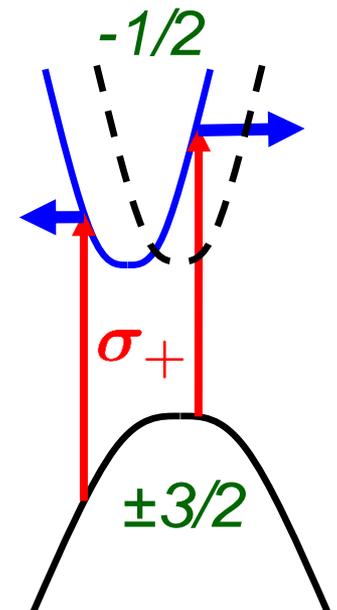
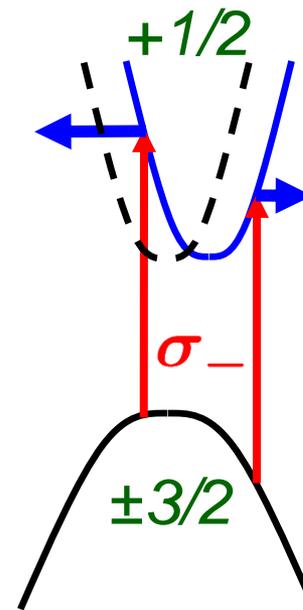
$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{BIA}} = \beta(\hat{\sigma}_x k_x - \hat{\sigma}_y k_y)$$

$$\Delta = 2\beta k$$

Циркулярный фотогальванический эффект

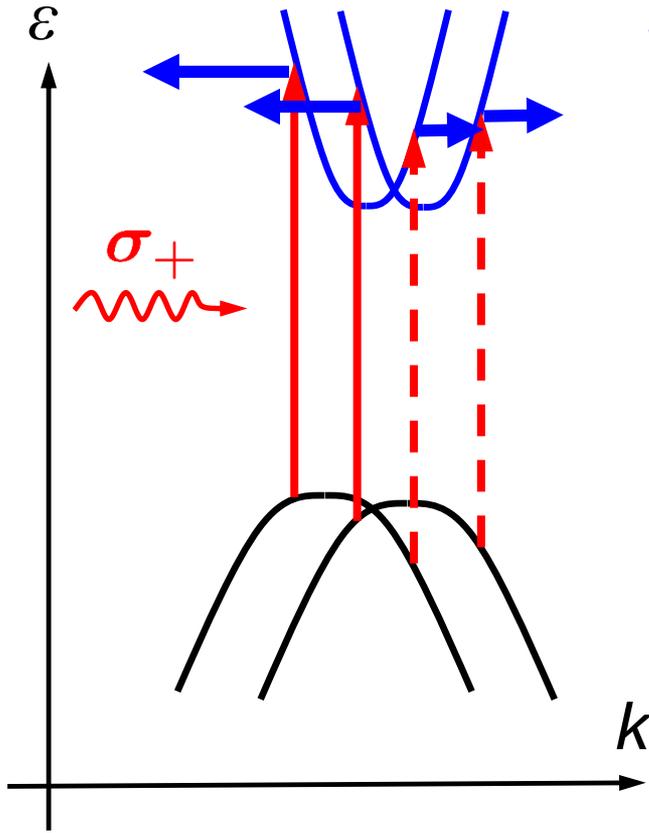


$$j = 0$$



$$j \neq 0$$

Межзонный циркулярный фототок



$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{SIA}} = \alpha(\hat{\sigma}_x k_y - \hat{\sigma}_y k_x)$$

$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{BIA}} = \beta(\hat{\sigma}_x k_x - \hat{\sigma}_y k_y)$$

$$\epsilon_{sk} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + s \alpha k$$

$$j = e \sum_{k,s} v_k^s f_k^s$$

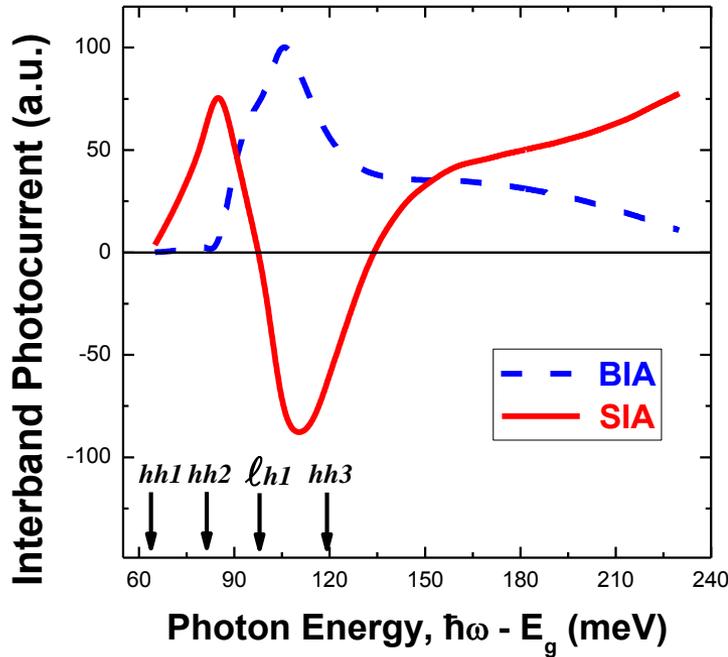
$$v_k^s = \frac{\hbar k}{m} + s \frac{\alpha}{\hbar}$$

$$-\frac{f_k^s}{\tau} + g_k^s = 0$$

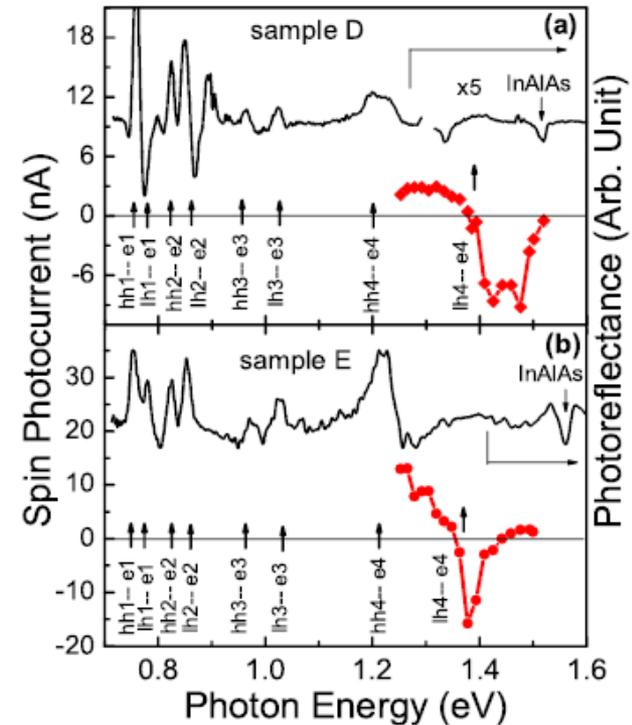
$$j_i = \gamma_{il} P_{\text{circ}} \hat{O}_l G(\omega)$$

$$\hat{\gamma} = \begin{pmatrix} \beta & -\alpha \\ \alpha & -\beta \end{pmatrix}$$

Спектр возбуждения циркулярного фототока



L.E.G.,
Phys. Rev. B
(2002)



Spectral Dependence of Spin Photocurrent and Current-Induced Spin Polarization in an InGaAs/InAlAs Two-Dimensional Electron Gas, C.L. Yang, H.T. He, Lu Ding, L.J. Cui, Y.P. Zeng, J.N. Wang, W.K. Ge, Phys. Rev. Lett. (2006)

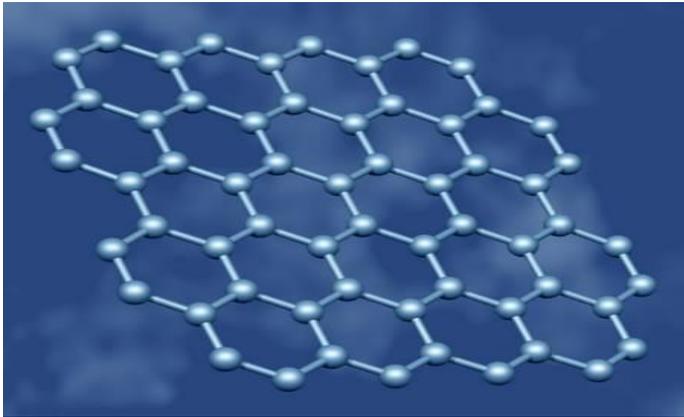
Наблюдение:

V.V. Bel'kov, S.D. Ganichev, P. Schneider, C. Back, M. Oestereich, J. Rudolph, D. Haegele, L.E.G., W. Wegscheider, W. Prettl, Solid State Commun. (2003)

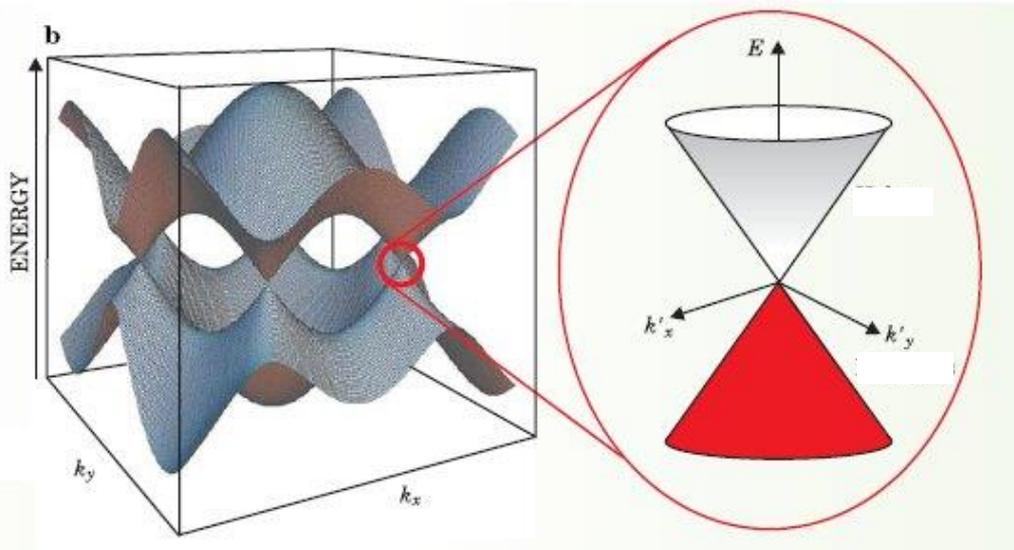
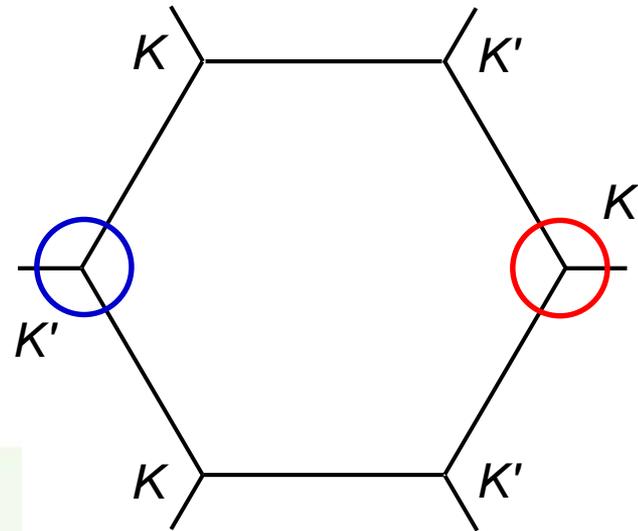
ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

- Фотогальванический эффект
- Полупроводники
- **Графен**
- Асимметрия рассеяния
- Топологические изоляторы

Графен



Зона Бриллюэна

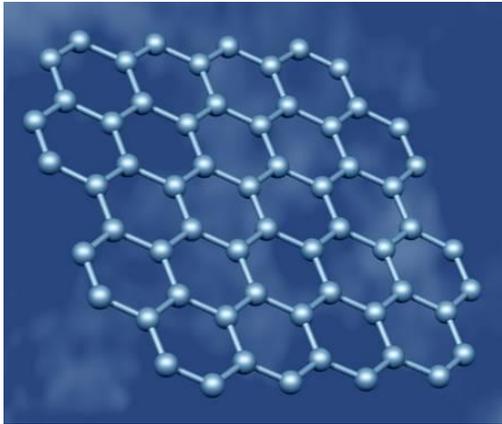


Эффективный гамильтониан

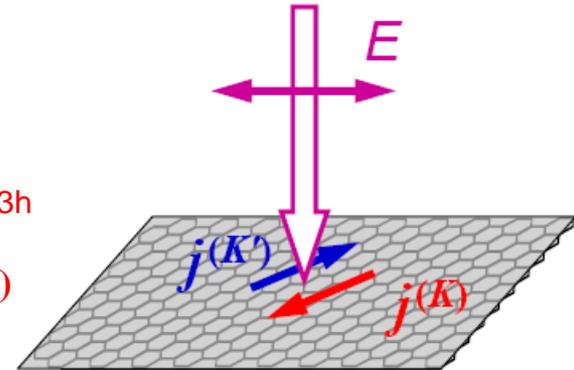
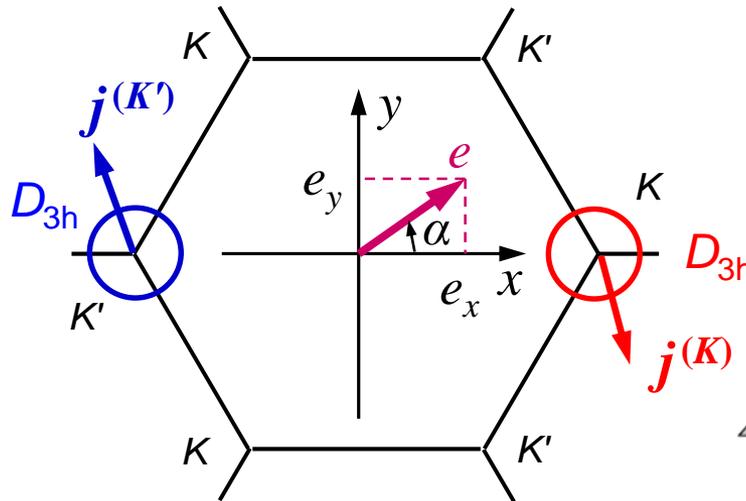
$$\hat{H}(p) = v_0 \hat{\sigma} \cdot p$$

$$\epsilon_p = \pm v_0 p$$

Долинные фототоки в графене



D_{6h}



Полный фототок

$$j^{(K)} + j^{(K')} = 0$$

D_{6h}

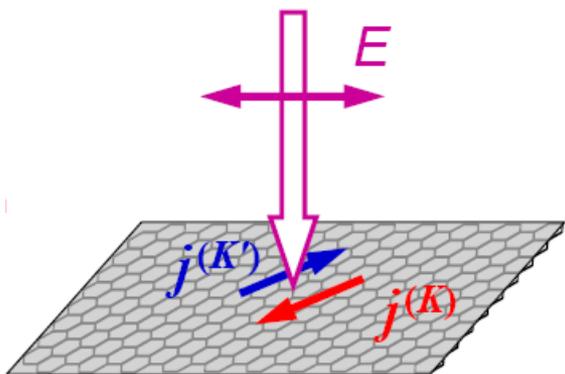
Фототок в долинах

$$j_x^{(K)} = \chi(e_x^2 - e_y^2)I \propto \cos 2\alpha$$

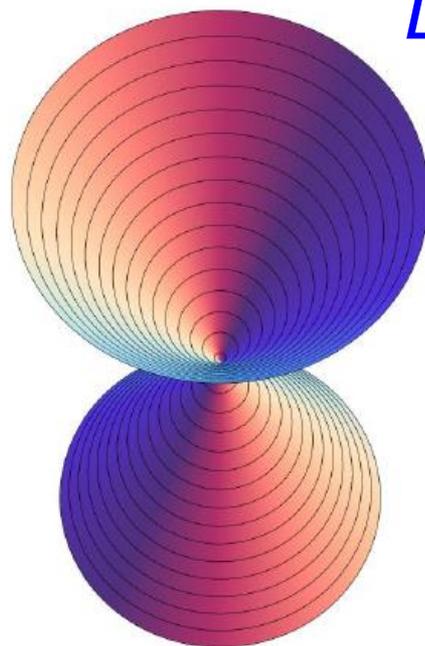
$$j_y^{(K)} = -2\chi e_x e_y I \propto \sin 2\alpha$$

D_{3h}

Гофрировка энергетического спектра

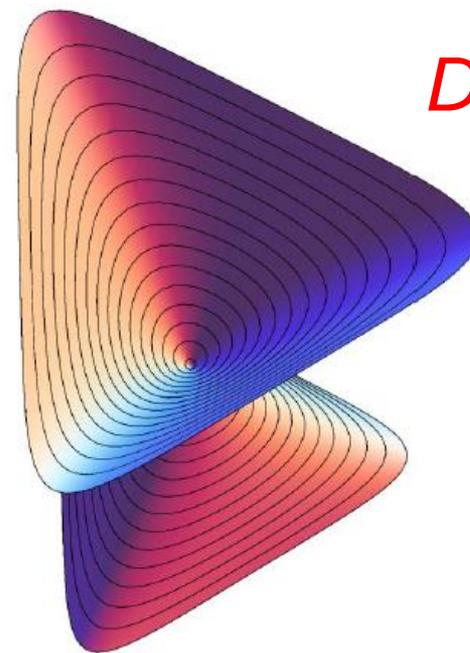


изотропная
модель



$D_{\infty h}$

$$\varepsilon_{cp} = v_0 p$$



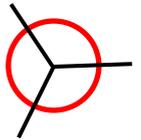
D_{3h}

$$\varepsilon_{cp} = v_0 p - \mu p^2 \cos 3\varphi_p$$

Долинный фототок

Изотропная модель

с учётом гофрировки

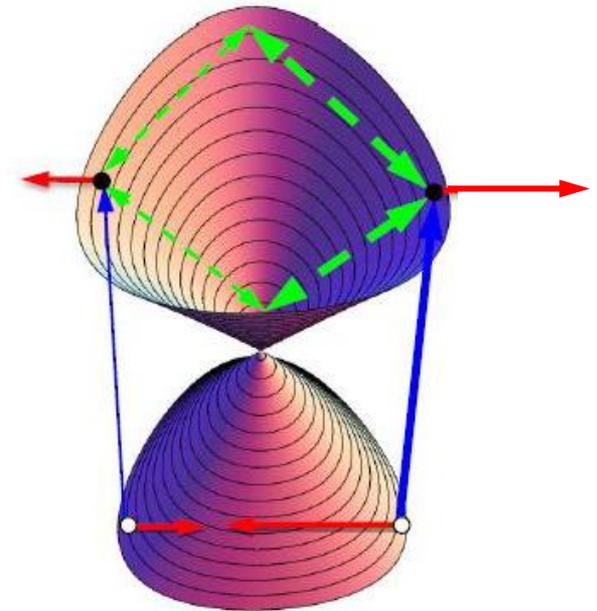
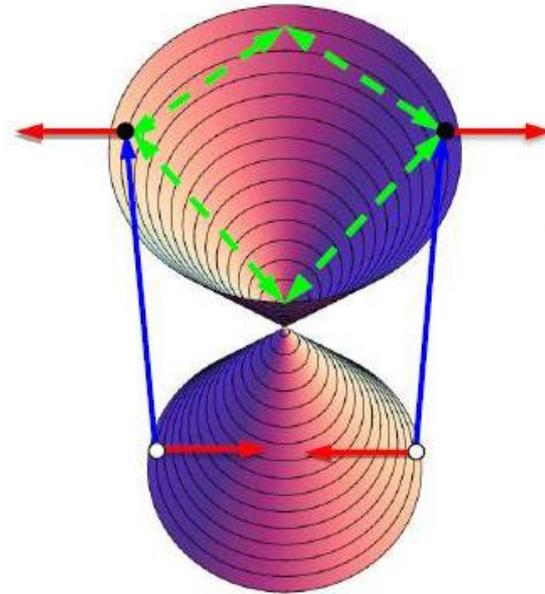


$$j^{(K)} = 4e \sum_p \frac{\partial \varepsilon_{cp}}{\partial p} f_p^c$$

$$\sum_{p'} W_{pp'} (f_p^c - f_{p'}^c) = g_{cp}$$

↑
вероятность
упругого рассеяния

↑
оптическая
генерация



$$\varepsilon_{cp} = v_0 p - \mu p^2 \cos 3\varphi_p$$

Анизотропия

скорости, темпа генерации, вероятности рассеяния

Вклады в долинный фототок

$$\chi = \chi^{(vel)} + \chi^{(gen)} + \chi^{(sc)}$$

Скорость

$$\chi^{(vel)} = \frac{5e\mu\eta\tau_2(\varepsilon_\omega)}{8v_0}$$

Темп
генерации

$$\chi^{(gen)} = -\frac{e\mu\eta}{8v_0} \left[9\tau_1(\varepsilon_\omega) + \varepsilon_\omega \frac{d\tau_1(\varepsilon_\omega)}{d\varepsilon_\omega} \right]$$

Вероятность рассеяния

$$\chi^{(sc)} = \frac{e\mu\eta\tau_2}{8v_0} \left\{ 20 - 6\frac{\tau_1}{\tau_2} - 4\frac{\tau_1}{\tau_3} + \frac{\varepsilon_\omega}{2} \left[\left(\frac{9}{\tau_1} - \frac{2}{\tau_2} \right) \frac{d\tau_1(\varepsilon_\omega)}{d\varepsilon_\omega} + \tau_1 \frac{d}{d\varepsilon_\omega} \left(\frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \right) \right] \right\}$$

$$\varepsilon_\omega = \hbar\omega/2$$

$$\frac{1}{\tau_n} = \sum_{p'} W_{p'p} (1 - \cos n\theta_{pp'}) \quad \eta = \pi \frac{e^2}{\hbar c}$$

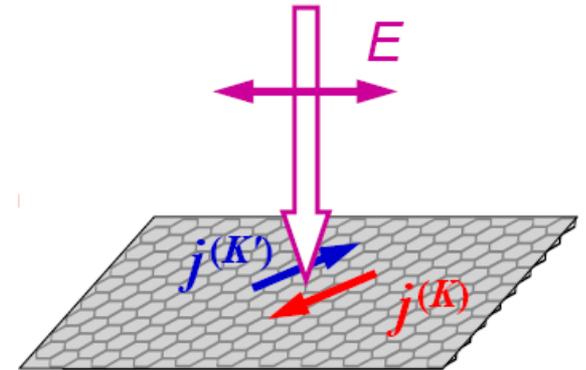
«Долинатроника»

Рассеяние
на кулоновских примесях

$$\chi \propto \omega$$

Рассеяние на точечных
статических дефектах

$$\chi \propto \frac{1}{\omega}$$



$$j^{(K)} \sim 100 \text{ nA/cm} @ I=1\text{kW/cm}^2, \tau=10^{-12} \text{ s}$$

Чисто долинный
ток

$$j_{v/o} = \frac{j^{(K)} - j^{(K')}}{2}$$

Долинная
поляризация

$$\mathcal{P} = \frac{n^{(K)} - n^{(K')}}{n^{(K)} + n^{(K')}}$$

Способ измерения: по флуктуациям тока

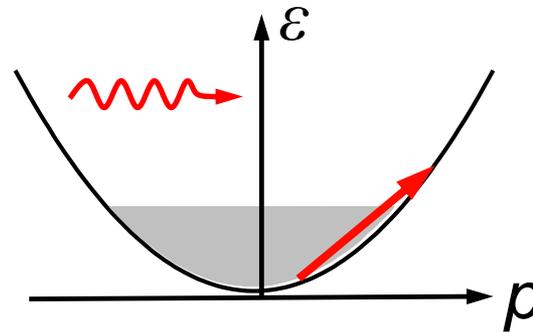
ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

- Фотогальванический эффект
- Полупроводники
- Графен
- **Асимметрия рассеяния**
- Топологические изоляторы

Поглощение света свободными носителями

$$\lambda = 148 \mu\text{m}$$

$$\hbar\omega \approx 10 \text{ meV}$$



Рассеяние импульса:

фононы, примеси, дефекты, интерфейсы...

Классическое описание

$$j_{\alpha} = \chi_{\alpha\beta\nu} E_{\beta} E_{\nu}^{*}$$

$$\hbar\omega \ll \bar{\epsilon}$$

Кинетическое уравнение

$$\frac{\partial f_{\mathbf{p}}}{\partial t} + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial f_{\mathbf{p}}}{\partial \mathbf{p}} = -\frac{f_{\mathbf{p}} - f_0(\epsilon_{\mathbf{p}})}{\tau}$$

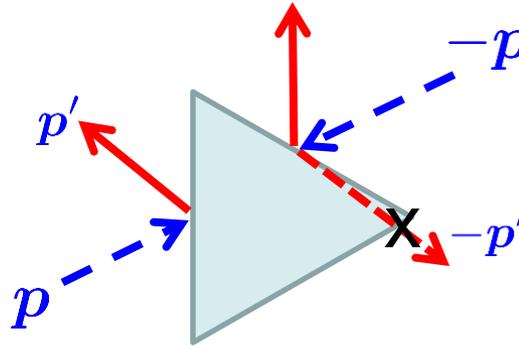
Плотность тока:
$$j = 2e \sum_{\mathbf{p}} \mathbf{v}_{\mathbf{p}} f_{\mathbf{p}}$$

отсутствие центра инверсии НЕ учтено

Квантовое кинетическое уравнение

$$C_{3v} \quad \frac{\partial f_p}{\partial t} + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial f_p}{\partial \mathbf{p}} = - \sum_{p'} (W_{p',p} f_p - W_{p,p'} f_{p'})$$

Несимметричные
рассеиватели



Инверсия
времени:

$$W_{p',p} = W_{-p,-p'}$$

Пространственная
инверсия:

$$W_{p',p} = W_{-p',-p}$$

В отсутствие центра
инверсии:

$$W_{p',p} \neq W_{p,p'}$$

В системах
без центра инверсии

НЕТ

детального
равновесия

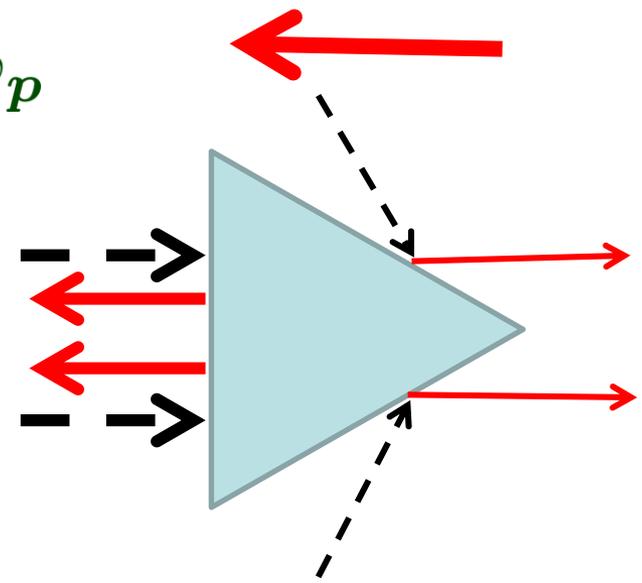
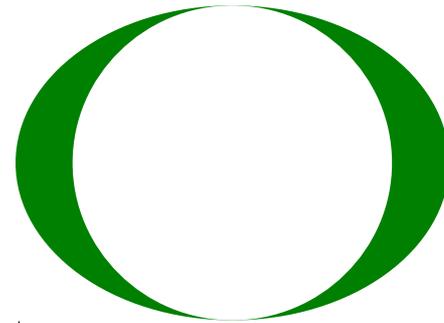
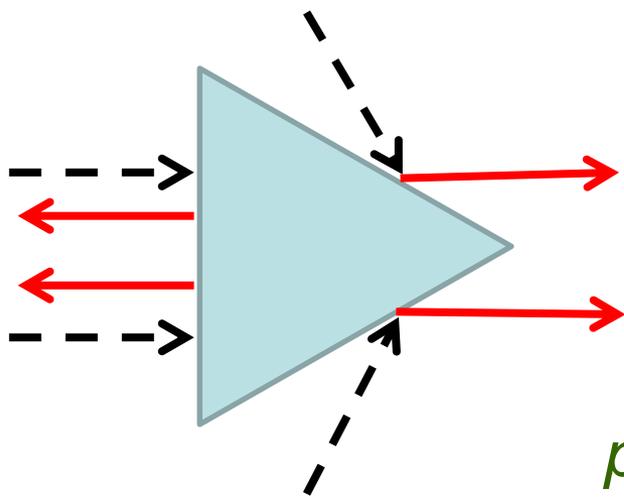
Модель

$$\mathbf{E} = 0$$
$$\dot{j}_x = 0$$

$$\mathbf{E} \parallel x$$

$$\dot{j}_x \neq 0$$

$$\delta f_p \propto E^2 \cos 2\varphi_p$$



В.И. Белиничер, Б.И. Стурман
УФН 1980

Асимметрия вероятности рассеяния

$$\frac{\partial f_{\mathbf{p}}}{\partial t} + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial f_{\mathbf{p}}}{\partial \mathbf{p}} = - \sum_{\mathbf{p}'} (W_{\mathbf{p}',\mathbf{p}} f_{\mathbf{p}} - W_{\mathbf{p},\mathbf{p}'} f_{\mathbf{p}'})$$

Асимметричная часть
вероятности рассеяния

$$W_{\mathbf{p}'\mathbf{p}}^{(a)} \equiv \frac{W_{\mathbf{p}'\mathbf{p}} - W_{-\mathbf{p}',-\mathbf{p}}}{2}$$

Борновское приближение:

$$W_{\mathbf{p},\mathbf{p}'}^{(s)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\mathbf{p}'} |V_{\mathbf{p},\mathbf{p}'}|^2 \delta(\varepsilon_{\mathbf{p}} - \varepsilon_{\mathbf{p}'})$$

$$W_{\mathbf{p},\mathbf{p}'}^{(s)} = W_{-\mathbf{p},-\mathbf{p}' }^{(s)}$$

Следующий порядок:

$$W_{\mathbf{p},\mathbf{p}'}^{(a)} = -W_{-\mathbf{p},-\mathbf{p}' }^{(a)}$$

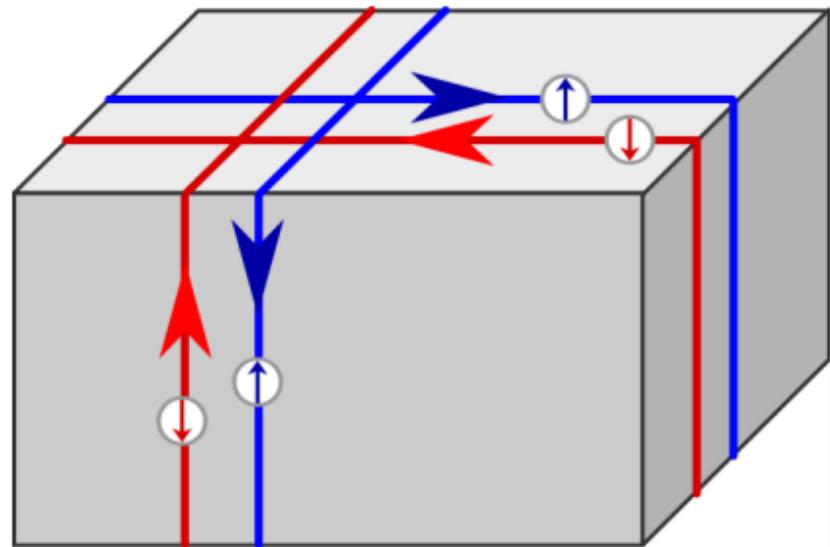
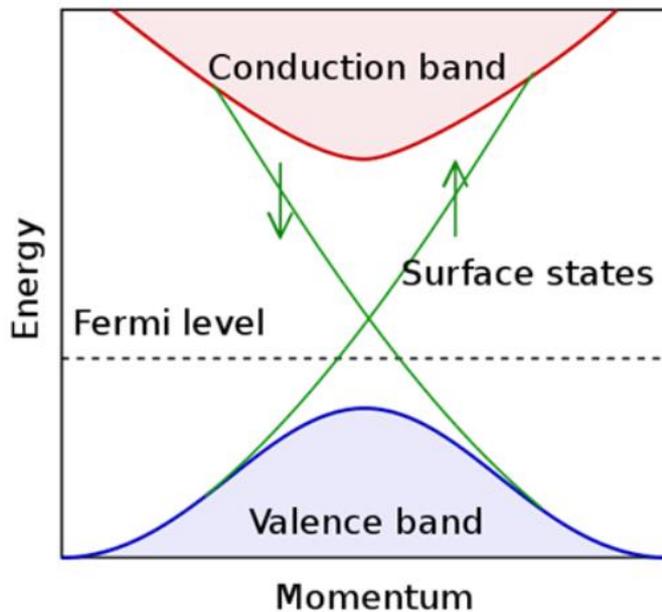
$$W_{\mathbf{p}\mathbf{p}'}^{(a)} = -\frac{(2\pi)^2}{\hbar} \text{Im} \sum_{\mathbf{p}''} V_{\mathbf{p}\mathbf{p}''} V_{\mathbf{p}''\mathbf{p}'} V_{\mathbf{p}'\mathbf{p}} \delta(\varepsilon_{\mathbf{p}} - \varepsilon_{\mathbf{p}'}) \delta(\varepsilon_{\mathbf{p}} - \varepsilon_{\mathbf{p}''})$$

ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

- Фотогальванический эффект
- Полупроводники
- Графен
- Асимметрия рассеяния
- **Топологические изоляторы**

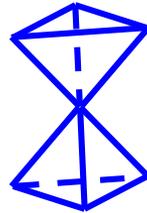
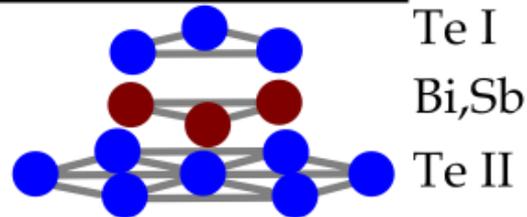
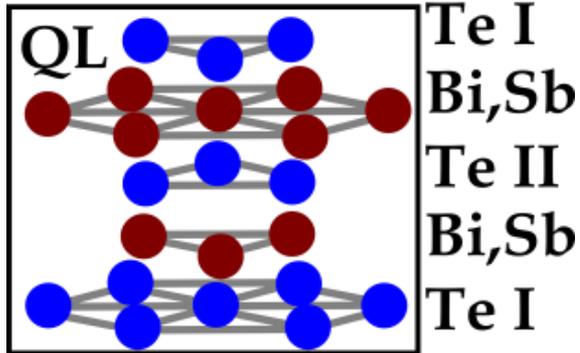
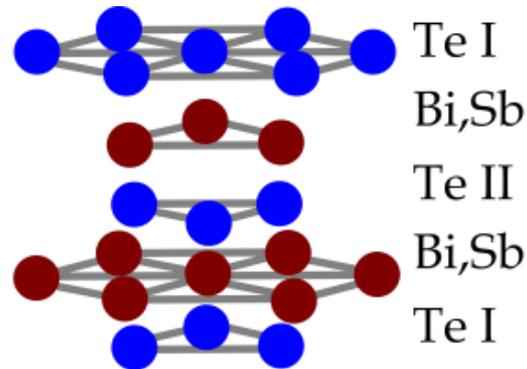
Топологические изоляторы

Всегда есть поверхностные состояния в объёмной щели



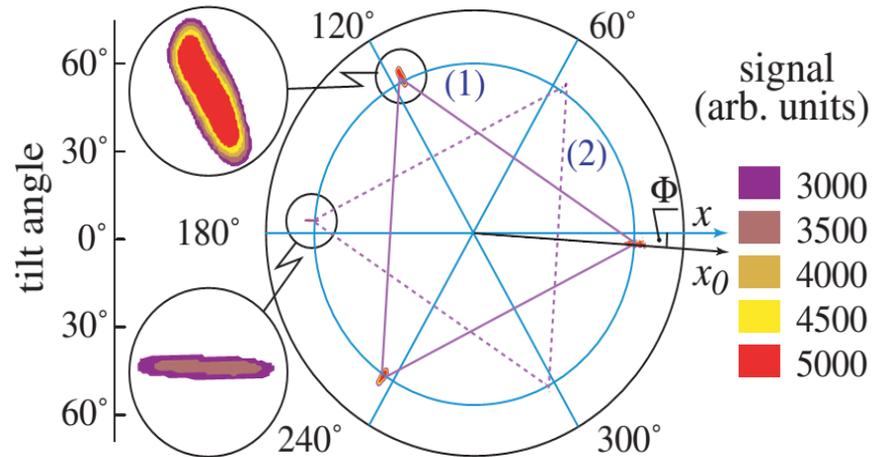
Симметрия объёма и поверхности

$\text{Bi}_2\text{Te}_3, \text{Sb}_2\text{Te}_3$



Объём: симметрия D_{3d}

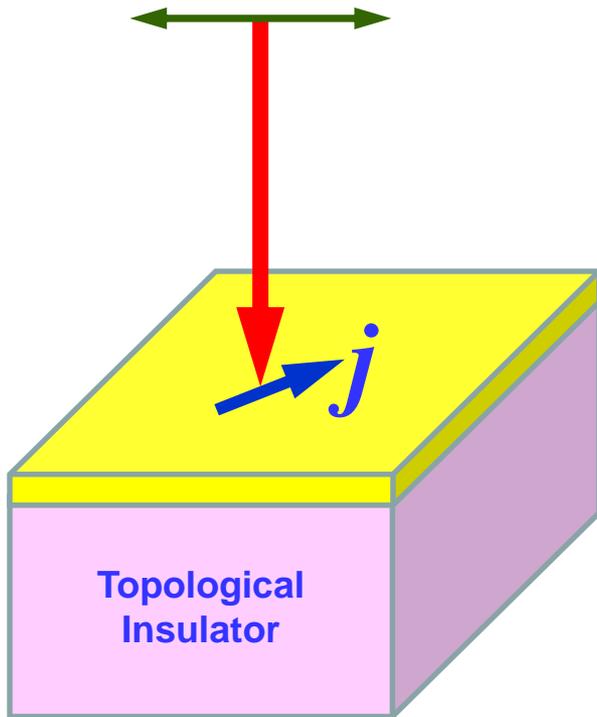
Фотогальваники **НЕТ**



Поверхность: симметрия C_{3v}

✓ Фотогальваника **ЕСТЬ**

Симметричный анализ



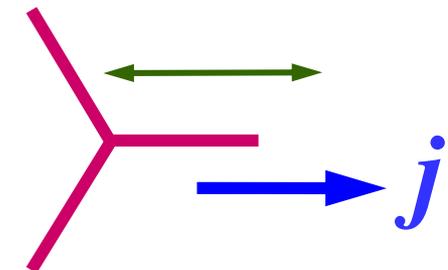
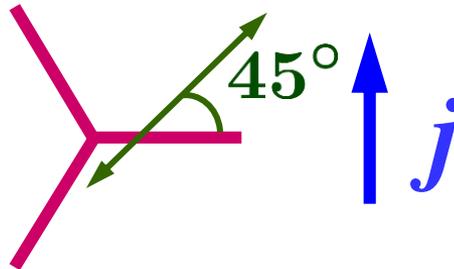
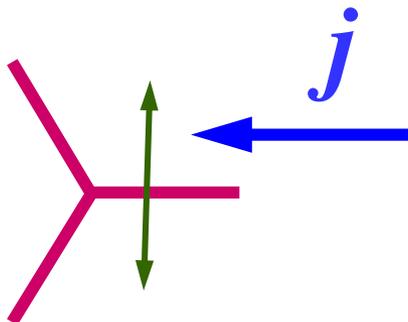
Симметрия C_{3v}



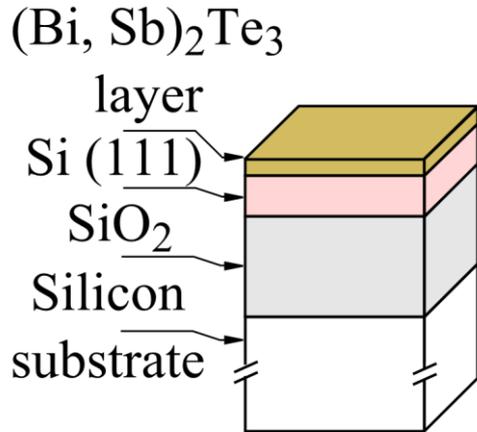
Фототок при нормальном падении:

$$j_x = \chi (|E_x|^2 - |E_y|^2)$$

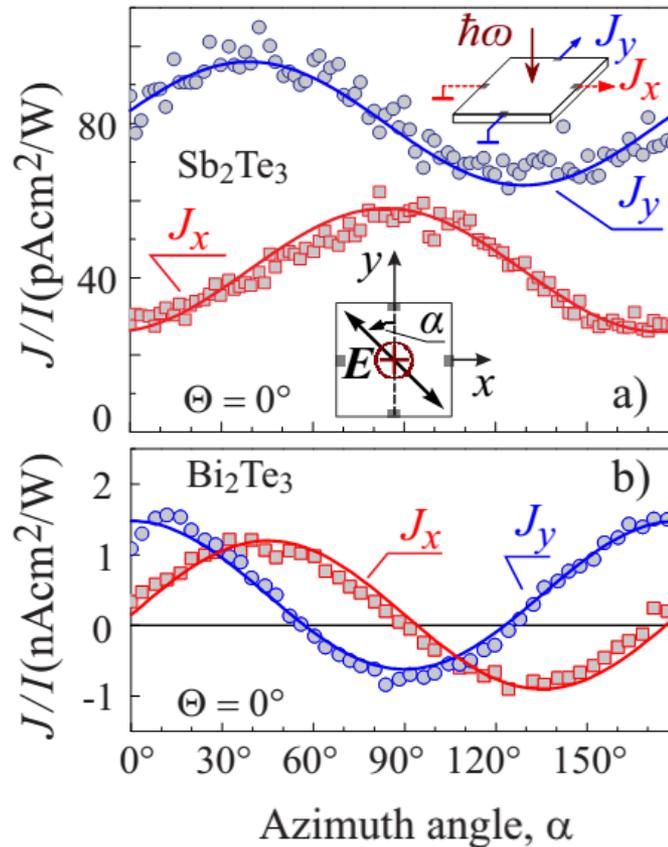
$$j_y = \chi (E_x E_y^* + E_y E_x^*)$$



Эксперимент: фототок



$f = 2.03$ THz



Возбуждение:

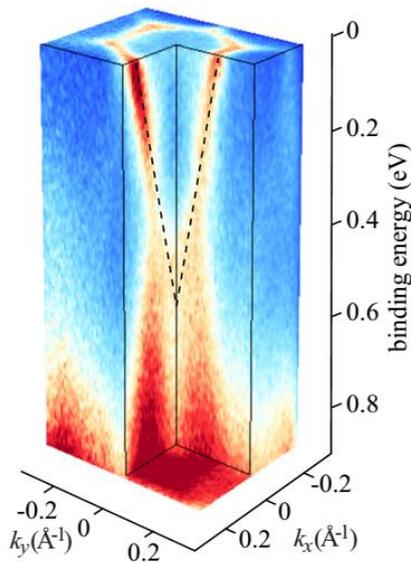
линейно-поляризованное
терагерцовое излучение
молекулярного лазера

$$j_x = \chi (|E_x|^2 - |E_y|^2)$$

$$= \chi |E|^2 \cos 2\alpha$$

$$j_y = \chi (E_x E_y^* + E_y E_x^*)$$

$$= \chi |E|^2 \sin 2\alpha$$



Теория

Кинетическое уравнение

$$\frac{\partial f_{\mathbf{p}}}{\partial t} + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial f_{\mathbf{p}}}{\partial \mathbf{p}} = - \sum_{\mathbf{p}'} (W_{\mathbf{p}',\mathbf{p}} f_{\mathbf{p}} - W_{\mathbf{p},\mathbf{p}'} f_{\mathbf{p}'})$$

$$f_{\mathbf{p}}(t) = f_0(\varepsilon_{\mathbf{p}}) + f_{\mathbf{p}}^{(1)}(t) + f_{\mathbf{p}}^{(2)} \quad f_{\mathbf{p}}^{(2)} \propto |E|^2$$

$$f_{\mathbf{p}}^{(1)} = \frac{ev_0\tau}{1 - i\omega\tau} \frac{(\mathbf{E} \cdot \mathbf{p})}{p} \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon_{\mathbf{p}}} \right) + c.c.$$

$$f_{\mathbf{p}}^{(2)} \quad -i\omega \tilde{f}_{\mathbf{p}} + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial f_{\mathbf{p}}^{(1)}}{\partial \mathbf{p}} = - \sum_{\mathbf{p}'} W_{\mathbf{p}',\mathbf{p}}^{(s)} (\tilde{f}_{\mathbf{p}} - \tilde{f}_{\mathbf{p}'}) \quad \sum_{\mathbf{p}'} W_{\mathbf{p}',\mathbf{p}}^{(a)} \tilde{f}_{\mathbf{p}'} + \frac{f_{\mathbf{p}}^{(2)}}{\tau_1} = 0$$

$$\delta f_{\mathbf{p}}^{(2)} \quad \sum_{\mathbf{p}'} W_{\mathbf{p}',\mathbf{p}}^{(a)} f_{\mathbf{p}'}^{(1)} + \frac{\tilde{f}_{\mathbf{p}}^{(1)}}{\tau_{2\omega}} = 0 \quad e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \tilde{f}_{\mathbf{p}}^{(1)}}{\partial \mathbf{p}} = -\frac{\delta f_{\mathbf{p}}^{(2)}}{\tau_1}$$

Фототок

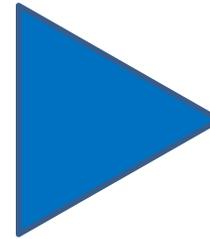
$$\mathbf{j} = e \sum_{\mathbf{p}} v_0 \frac{\mathbf{p}}{p} \left(f_{\mathbf{p}}^{(2)} + \delta f_{\mathbf{p}}^{(2)} \right)$$

Фотогальванический ток

$$j_x = |E_x|^2 \frac{e^3 v_0 \varepsilon_F^2}{4\pi \hbar^2 [1 + (\omega \tau_{tr})^2]} \left[\frac{\tau_{tr}}{\varepsilon_F^3} \frac{d(\Xi \tau_2 \varepsilon_F^2)}{d\varepsilon_F} + \frac{1 - \omega^2 \tau_{tr} \tau_2}{1 + (\omega \tau_2)^2} \Xi \tau_2 \frac{d(\tau_{tr}/\varepsilon_F)}{d\varepsilon_F} \right]$$

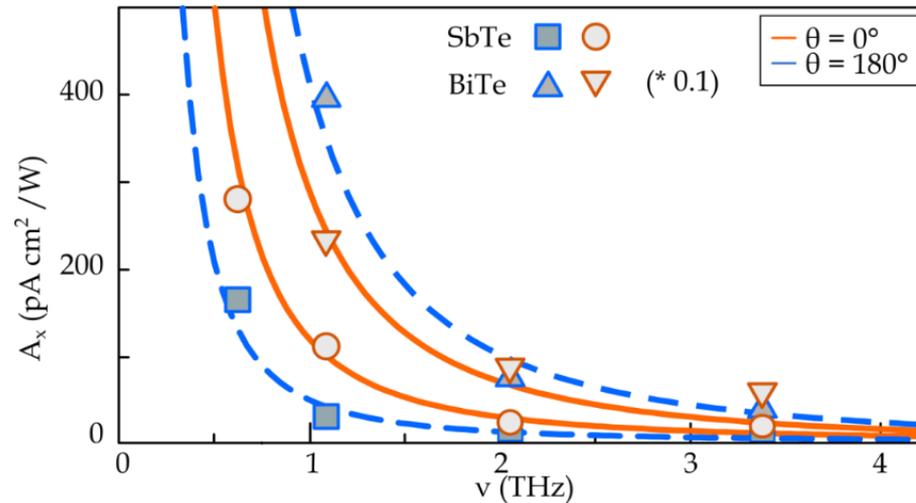
Учёт асимметрии рассеяния:

$$\Xi = \tau_{tr} \sum_{p'} \left\langle 2 \cos \varphi_p \cos 2\varphi_{p'} W_{p',p}^{(a)} \right\rangle_{\varphi_p}$$



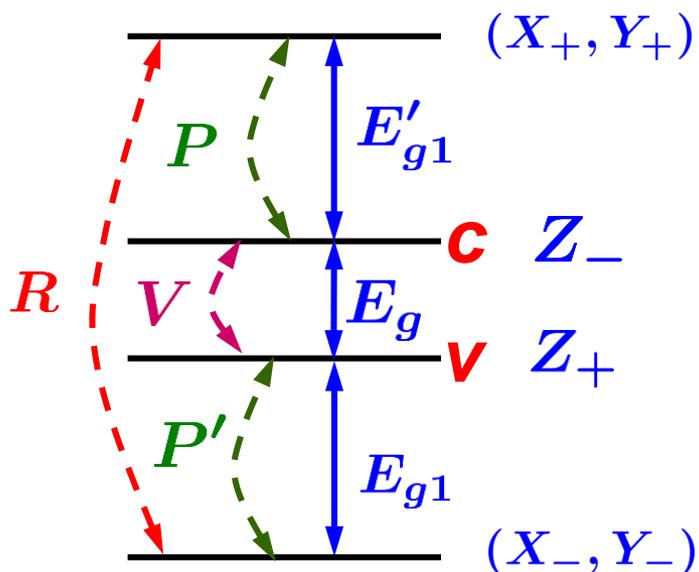
Частотная
зависимость:

$$j \propto 1/\omega^2$$



Асимметрия рассеяния в Тl

Симметрия
объёмных зон



C_{3v}



$$\psi_{n\mathbf{p}} = u_{n\mathbf{p}} e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}}$$

$$U_{\mathbf{p}'\mathbf{p}} = U_0(\mathbf{p}' - \mathbf{p}) \frac{\langle Z_-(\mathbf{p}') | Z_-(\mathbf{p}) \rangle + \langle Z_+(\mathbf{p}') | Z_+(\mathbf{p}) \rangle}{2}$$

Фурье-образ
потенциала

перекрывание блоховских
функций

$$Z_-(\mathbf{p}) = Z_- + \left[\frac{iVP'(p_x - ip_y)}{E_g} - \frac{RP(p_x + ip_y)^2}{E'_{g1}} \right] \frac{X_- + iY_-}{2(E_g + E_{g1})}$$

$$Z_+(\mathbf{p}) = Z_+ + \left[\frac{iVP(p_x + ip_y)}{E_g} + \frac{RP'(p_x - ip_y)^2}{E'_{g1}} \right] \frac{X_+ - iY_+}{2(E_g + E'_{g1})}$$

$$U_{\mathbf{p}'\mathbf{p}} \propto U_0(\mathbf{p}' - \mathbf{p}) \left\{ 1 - i \frac{VRPP'}{4E_g} \left[\frac{(p_x + ip_y)^2(p'_x + ip'_y) - (p'_x - ip'_y)^2(p_x - ip_y)}{(E_g + E_{g1})^2 E'_{g1}} + \frac{(p_x - ip_y)^2(p'_x - ip'_y) - (p'_x + ip'_y)^2(p_x + ip_y)}{(E_g + E'_{g1})^2 E_{g1}} \right] \right\}$$

Сравнение теории и эксперимента

Короткодействующие примеси: $U_0(\mathbf{p} - \mathbf{p}') \propto \cos(\theta_{\mathbf{p}\mathbf{p}'}/2)$ $\Xi = 0$

Кулоновские примеси: $U_0(\mathbf{p} - \mathbf{p}') \propto |\tan(\theta_{\mathbf{p}\mathbf{p}'}/2)|$ $\Xi \neq 0$

Оценка: $\Xi \sim \frac{\varepsilon_F U_s}{(\hbar v_0)^2} \left(\frac{\varepsilon_F}{E_g}\right)^3 \frac{V}{E_g} \frac{RPP'}{v_0^3} \sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$

ФОТОТОК: $J/I \sim 0.1 \dots 1 \text{ nA cm}^2/\text{W}$ \checkmark Совпадает с экспериментом

Sb_2Te_3 $\varepsilon_F = 65 \text{ meV}$ $J/I \approx 0.28 \text{ nA cm}^2/\text{W}$

Bi_2Te_3 $\varepsilon_F = 100 \text{ meV}$ $J/I \approx 2 \text{ nA cm}^2/\text{W}$



P. Olbrich, L.E.G., T. Herrmann et al., Phys. Rev. Lett. (2014)

ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

- **Фотогальванический эффект**
- **Полупроводники**
- **Графен**
- **Асимметрия рассеяния**
- **Топологические изоляторы**

Фотогальванический ток

Закон Ома: $j = \frac{ne^2}{m} \tau E$ Эффект Холла: $j_H \sim \omega_c \tau j \propto B_z \tau^2 E$

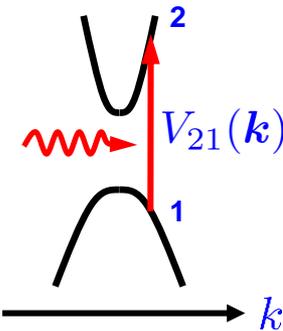
Циркулярный ФГЭ: $j_\alpha \propto \varepsilon_\beta G \tau$ $G \propto \delta(\varepsilon_c - \varepsilon_v - \hbar\omega)$

Линейный ФГЭ: $j_\alpha \propto G \tau$? $\times \frac{1}{\tau}$ $j = e \sum_{p,s} v_p f_p$ $f_p = \mathcal{O}\left(\frac{\hbar}{\bar{\varepsilon} \tau}\right)$

$\Delta j = e \sum_{n \neq n'} \rho_{nn'} v_{n'n}$ $\rho_{n'n} \sim \frac{\rho_{nn}}{\varepsilon_{n'} - \varepsilon_n}$ $v_{n'n} = \frac{i}{\hbar} (\varepsilon_{n'} - \varepsilon_n) r_{n'n}$

Межзонный вклад в линейный ФГЭ

Микроскопические сдвиги

$$\Delta \mathbf{j} = e \sum_{n \neq n'} \rho_{nn'} \mathbf{v}_{n'n}$$


$$W_{21}(\mathbf{k}) = \frac{2\pi}{\hbar} |V_{21}(\mathbf{k})|^2 \delta(\varepsilon_2(\mathbf{k}) - \varepsilon_1(\mathbf{k}) - \hbar\omega)$$

Межзонный вклад:

$$\Delta \mathbf{j} = e \sum_{s, \mathbf{k}} R_{21}(\mathbf{k}) W_{21}(\mathbf{k})$$

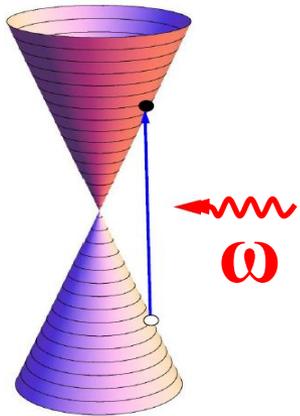
$$R_{21}(\mathbf{k}) = -\nabla_{\mathbf{k}} \Phi_{21}(\mathbf{k}) + \Omega_2(\mathbf{k}) - \Omega_1(\mathbf{k}) \quad V_{21}(\mathbf{k}) = |V_{21}| \exp(i\Phi_{21})$$

Сдвиг в реальном пространстве
при поглощении фотона

$$\psi_{n\mathbf{k}} = u_{n\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$$

$$\Omega_n(\mathbf{k}) = i \langle u_{n\mathbf{k}} | \nabla_{\mathbf{k}} | u_{n\mathbf{k}} \rangle$$

Сдвиговой фототок в топологических изоляторах



$$j_y = \chi \left(E_x E_y^* + E_y E_x^* \right) \quad j_x = \chi \left(|E_x|^2 - |E_y|^2 \right)$$

$$H_0 = v_0 (\sigma_x p_y - \sigma_y p_x)$$

$$\varepsilon_{c,v} = \pm v_0 p$$



Анизотропная
поправка

$$H_w = \lambda \sigma_z p^3 \sin 3\varphi_p$$

$$M_{cv} = \frac{eE}{\omega} \left[v_0 \sin(\varphi_E - \varphi_p) + 3i\lambda p^2 \sin(\varphi_E + 2\varphi_p) \right]$$

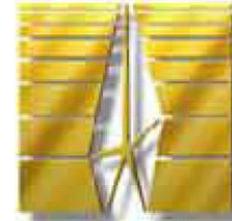
$$j^{shift} = e \sum_{\mathbf{p}} \frac{2\pi}{\hbar} \delta[\varepsilon_c(\mathbf{p}) - \varepsilon_v(\mathbf{p}) - \hbar\omega] \text{Im}(M_{cv}^* \hbar \nabla_{\mathbf{p}} M_{cv})$$

$$\chi = \frac{15e^3 \lambda}{16v_0^2}$$

СОТРУДНИЧЕСТВО

В.В. Бельков, С.А. Тарасенко, Е.Л. Ивченко

*Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург*



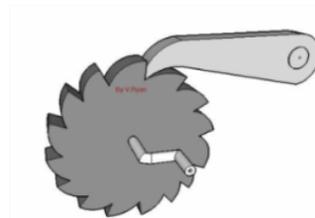
S.D. Ganichev

*Terahertz Center,
University of Regensburg,
Germany*

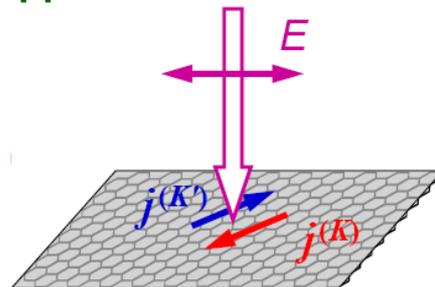


ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

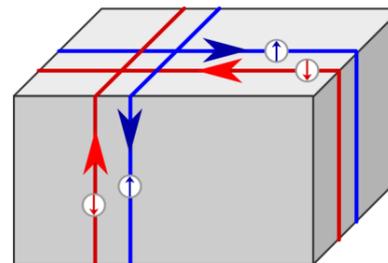
✓ Фотогальванический эффект



✓ Полупроводники



✓ Графен



✓ Топологические изоляторы

