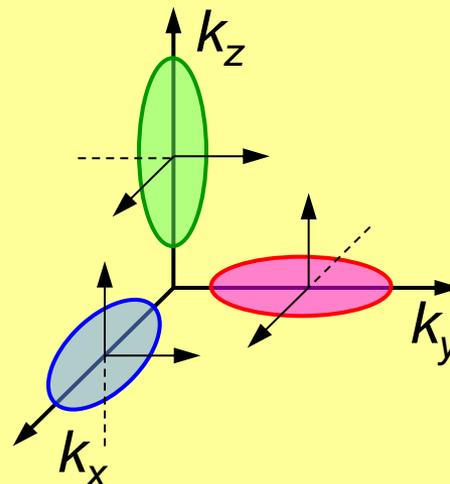
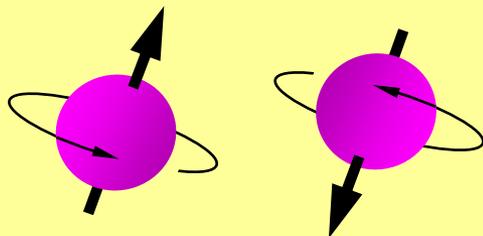

ДОЛИННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ



С.А. Тарасенко

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

СПИНОВЫЕ И ДОЛИННЫЕ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ



Селективное заселение спиновых зон
циркулярно поляризованным светом
(оптическая ориентация электронов)

G. Lampel, Phys. Rev. Lett. (1968)

Оптическая инжекция спиновых токов

R.D.R. Bhat et al., Phys. Rev. Lett. (2005)

Тарасенко, Ивченко, Письма в ЖЭТФ (2005)

H. Zhao et al., Phys. Rev. B (2005)

S.D. Ganichev et al., Nature Phys. (2006)

Селективное заселение долин
линейно поляризованным светом

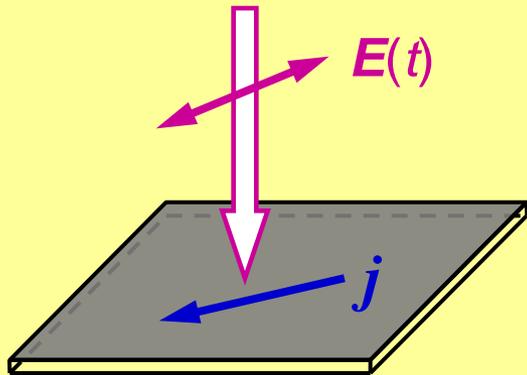
А.А. Каплянский, Н.С. Соколов, Б.В. Новиков,
С.В. Гастев, Solid State Commun. (1976)

Оптическая инжекция долинных токов

Тарасенко, Ивченко, Письма в ЖЭТФ (2005)

J. Karch et al., Phys. Rev. B (2011)

ОТКЛИК НА ПЕРЕМЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



Электрическое поле волны

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E} \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r} - i\omega t)$$

E – амплитуда

q – волновой вектор

ω – частота

Электрический ток

$$j_{\alpha} = \sum_{\beta} \sigma_{\alpha\beta} E_{\beta} + \sum_{\beta\gamma} P_{\alpha\beta\gamma} E_{\beta} E_{\gamma}^{*} + \sum_{\beta\gamma} D_{\alpha\beta\gamma} E_{\beta} E_{\gamma} + \dots$$

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

- фотогальванический эффект
- эффект храповика



генерация

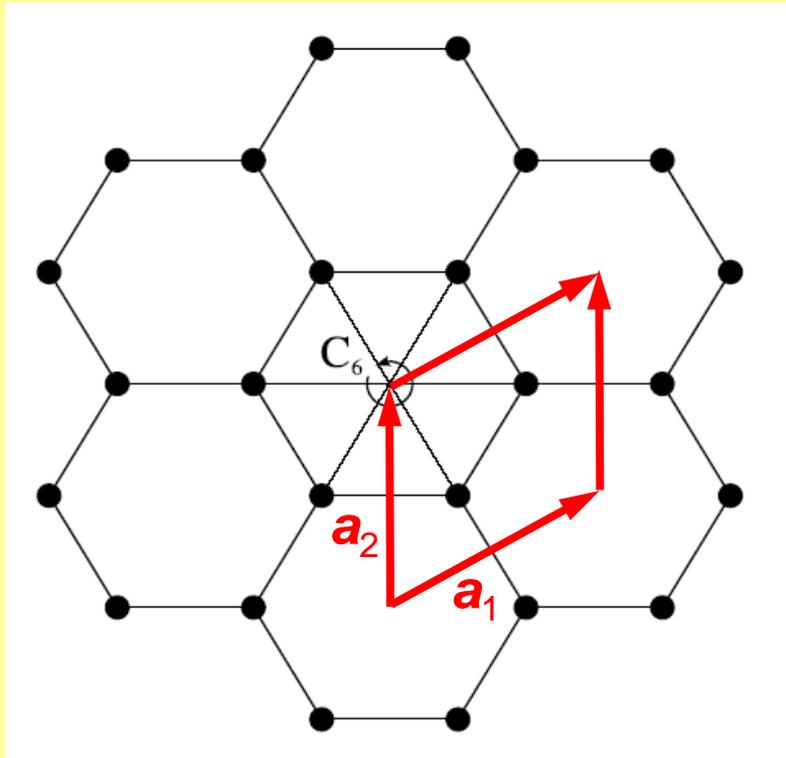
2^{ой} гармоники

среды без центра пространственной инверсии

ПЛАН ДОКЛАДА

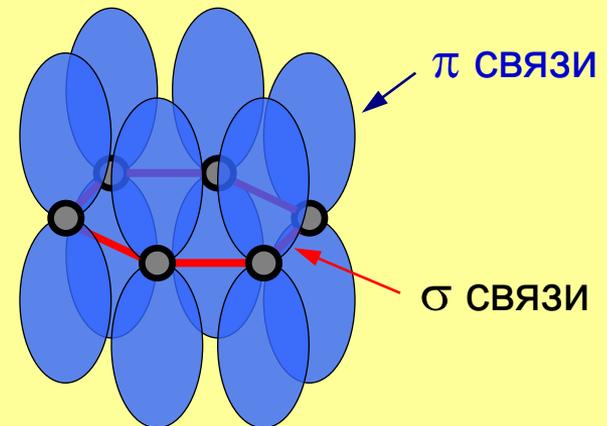
- Оптические долинные эффекты в графене
 - зонная структура графена
 - инжекция чисто долинных токов
 - генерация второй оптической гармоники
- Долинные фототоки в других многодолинных системах
 - инверсионные каналы на поверхности кремния
 - слои дихалькогенидов переходных металлов
- Основные результаты

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГРАФЕНА



Точечная группа D_{6h}
(есть центр инверсии)

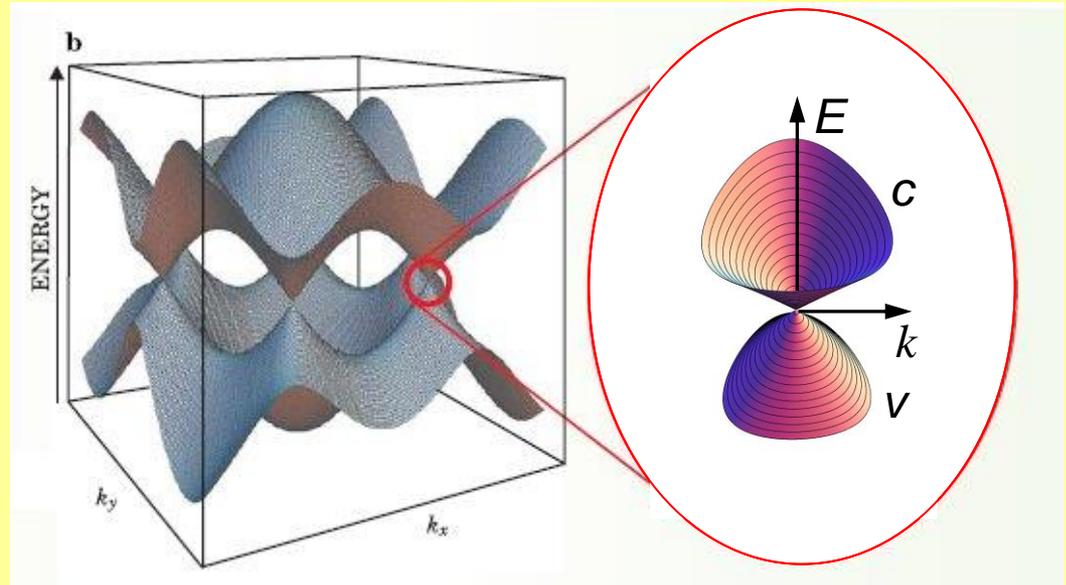
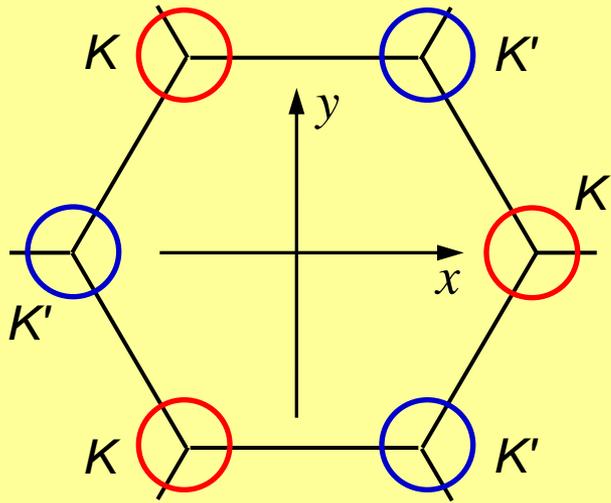
Два атома углерода
в примитивной ячейке



Термин «графен» для описания однослойной чешуйки графита предложил в 1962 году Hanns-Peter Boehm

ЗОННАЯ СТРУКТУРА ГРАФЕНА

Зона Бриллюэна



Блоховские состояния и энергия электронов вблизи точки K

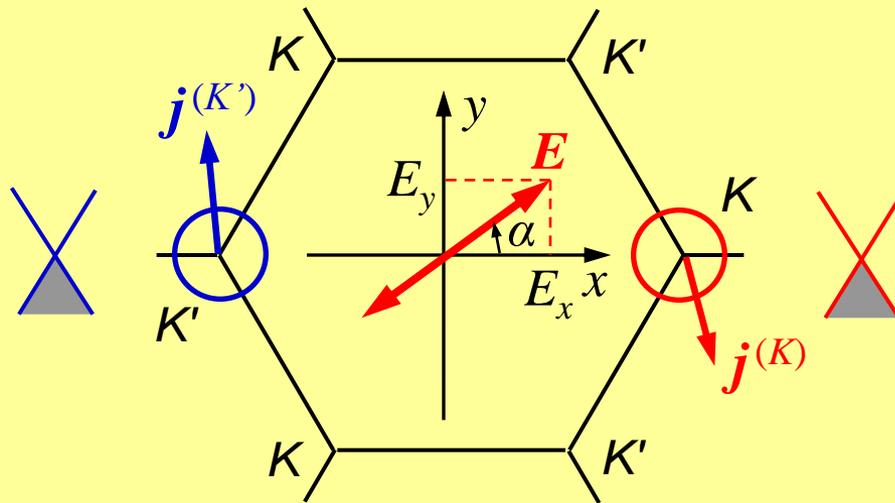
Волновая функция электрона

$$\psi_{n, \mathbf{K}+\mathbf{k}} = \exp[i(\mathbf{K} + \mathbf{k}) \cdot \mathbf{r}] u_{n, \mathbf{K}+\mathbf{k}}(\mathbf{r})$$

$$E = \pm v |\hbar \mathbf{k}|$$

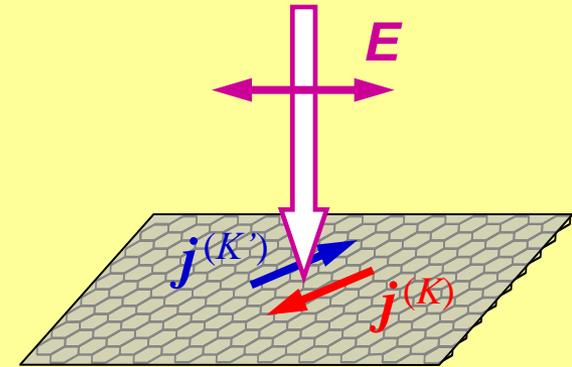
↑ ↓
СКОРОСТЬ квазиимпульс
 $\approx 10^8$ см/с

ЧИСТО ДОЛИННЫЕ ФОТОТОКИ



симметрия долины D_{3h}
(нет центра инверсии)

Геометрия эксперимента



точечная группа графена D_{6h}
(есть центр инверсии)

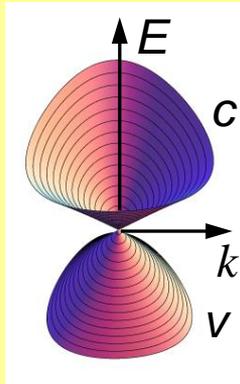
Фототоки в долинах K и K'

$$\mathbf{j}^{(K')} = -\mathbf{j}^{(K)}$$

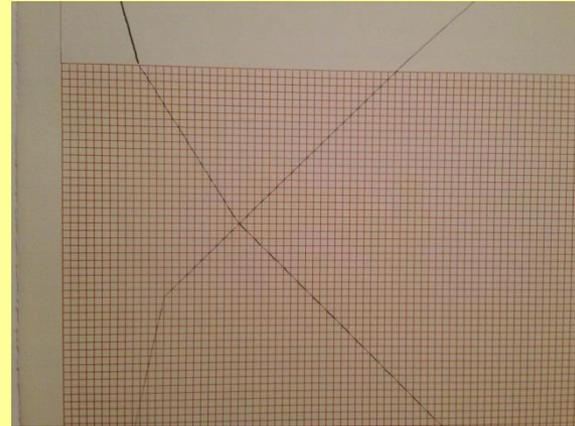
$$j_x^{(K)} = \chi (|E_x|^2 - |E_y|^2) \propto |E|^2 \cos 2\alpha$$

$$j_y^{(K)} = -\chi (E_x E_y^* + E_y E_x^*) \propto |E|^2 \sin 2\alpha$$

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ВБЛИЗИ ТОЧЕК К И К'



спектр в долине
(D_{3h} группа)



Untitled, Gertrud Goldschmidt, 1973
MoMA, New York

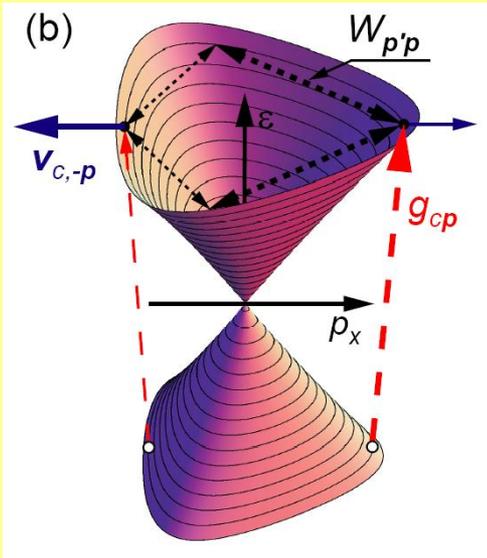
Эффективный гамильтониан вблизи точек K и K' зоны Бриллюэна

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} 0 & \Omega_p \\ \Omega_p^* & 0 \end{pmatrix}, \quad \Omega_p = \pm v_0(p_x - ip_y) - \mu(p_x + ip_y)^2$$

тригональная гофрировка

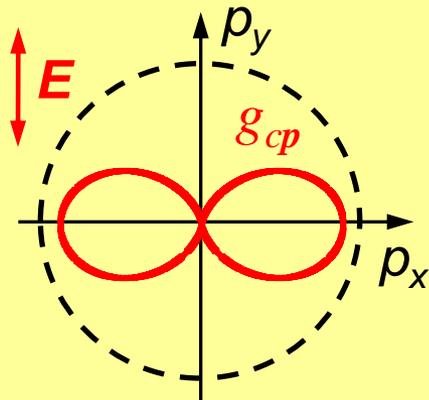
Обзор: A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim,
Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009)

ТЕОРИЯ ОРБИТАЛЬНО-ДОЛИННЫХ ТОКОВ



Энергетический спектр

$$\varepsilon_{cp} \approx v_F p - \mu p^2 \cos 3\varphi_p$$



Электрический ток в долине K

$$\mathbf{j} = 2e \sum_p (\mathbf{v}_{cp} f_{cp} + \mathbf{v}_{vp} f_{vp}) = 4e \sum_p \mathbf{v}_{cp} f_{cp}$$

Кинетическое уравнение

$$\sum_p (W_{pp'} f_{cp'} - W_{p'p} f_{cp}) + \text{St}^{(ee)}[f_{cp}] + g_{cp} = 0$$

Вероятность рассеяния

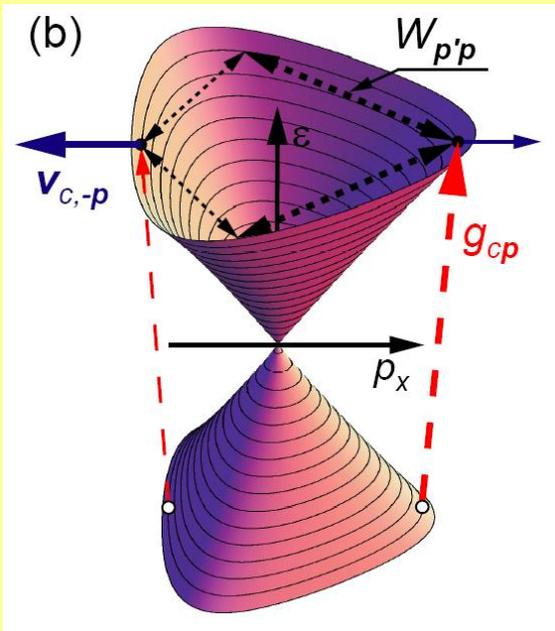
$$W_{pp'} = \frac{\pi}{2\hbar} \left| 1 + \frac{\Omega_p \Omega_{p'}^*}{|\Omega_p \Omega_{p'}^*|} \right|^2 K(\mathbf{p} - \mathbf{p}') \delta(\varepsilon_{cp} - \varepsilon_{cp'})$$

Темп оптических переходов

$$g_{cp} = \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{eA}{c} \right)^2 \left| \text{Im} \left(\frac{\Omega_p^*}{|\Omega_p^*|} \mathbf{e} \cdot \nabla_p \Omega_p \right) \right|^2 \delta(2\varepsilon_{cp} - \hbar\omega)$$

Оптическое выстраивание импульсов, $g_{cp} \propto |\mathbf{e} \times \mathbf{p}|^2$

ВКЛАДЫ В ОРБИТАЛЬНО-ДОЛИННЫЙ ТОК



Оценка

$$j^{(K)} \sim 10^{-4} \text{ A/cm}$$

$$\text{at } I = 1 \text{ kW/cm}^2, \tau = 10^{-12} \text{ s}$$

(i) Линейные по μ поправки к скорости

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

$\eta = \pi e^2 / \hbar c$ -- коэф. поглощения

τ_n – времена релаксаций гармоник

$\varepsilon_\omega = \hbar\omega/2$ – энергия фотоэлектронов

(ii) Линейные по μ поправки к генерации

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

(iii) Линейные по μ поправки к темпу рассеяния

$$\chi^{(\text{scat})} \text{ зависит от } \tau_1, \tau_2 \text{ и } \tau_3$$

L.E. Golub, S.A.T., M.V. Entin, and L.I. Magarill, Phys. Rev. B **84**, 195408 (2011)

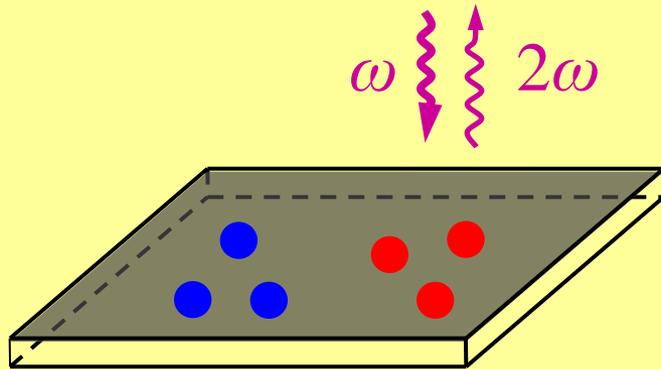
see also: R.R. Hartmann and M.E. Portnoi, LAP LAMBERT Academic Publishing (2011)

ПЛАН ДОКЛАДА

- Оптические долинные эффекты в графене
 - зонная структура графена
 - инжекция чисто долинных токов
 - генерация второй оптической гармоники
- Долинные фототоки в других многодолинных системах
 - инверсионные каналы на поверхности кремния
 - слои дихалькогенидов переходных металлов
- Основные результаты

ОПТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ДОЛИННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Генерация второй гармоники

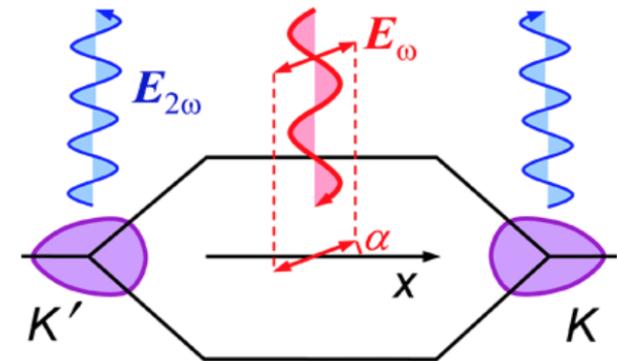


Локальное понижение симметрии до группы C_{3v} (нет центра инверсии)

Возможны **нелинейные оптические эффекты**, например генерация второй гармоники

EDITORS' SUGGESTION

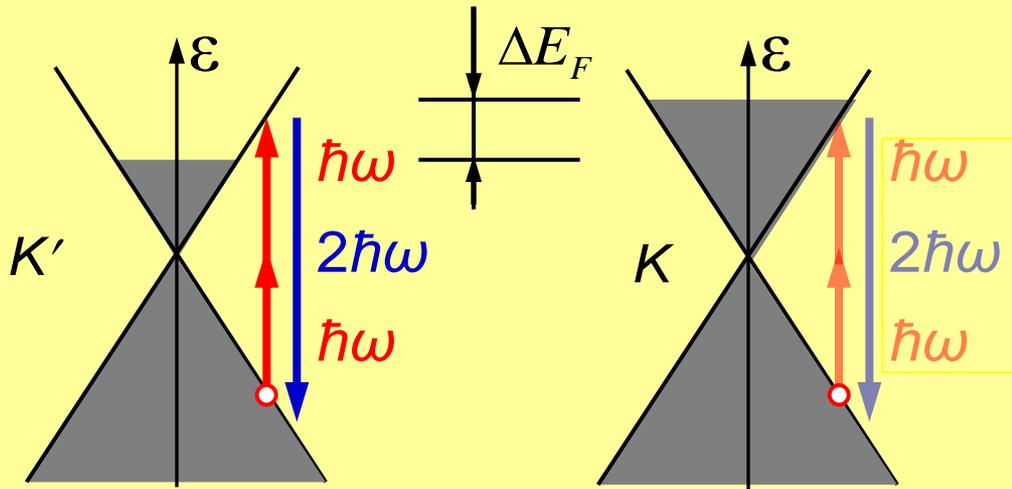
Valley polarization induced second harmonic generation in graphene



This paper suggests that an optical method can be used to reliably probe valley polarization in graphene. It shows that at normal incidence of photons, imbalance of carrier populations in two valleys gives rise to second harmonic generation in graphene which can be used to experimentally determine both the degree and sign of the valley polarization.

L. E. Golub and S. A. Tarasenko
[Phys. Rev. B **90**, 201402\(R\) \(2014\)](#)

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ



Поляризация на частоте 2ω

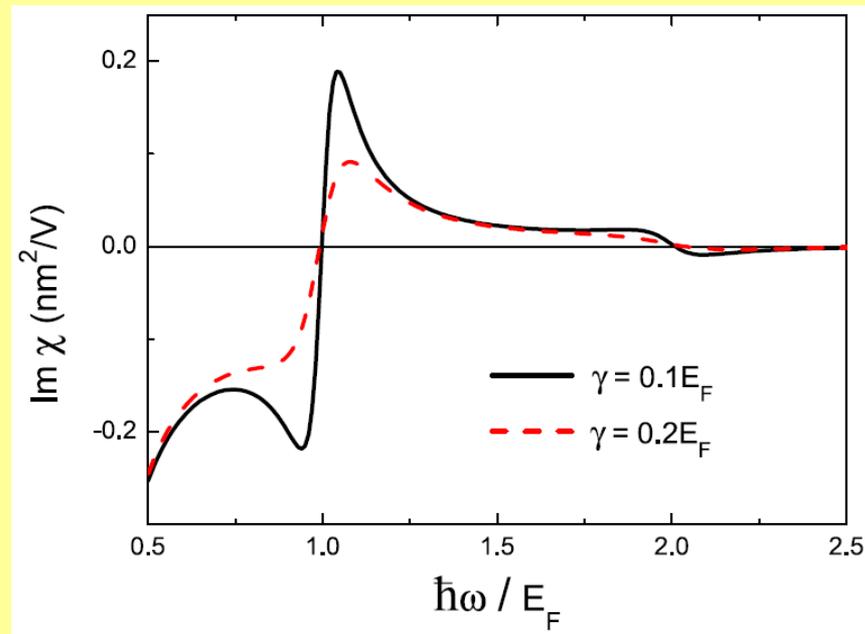
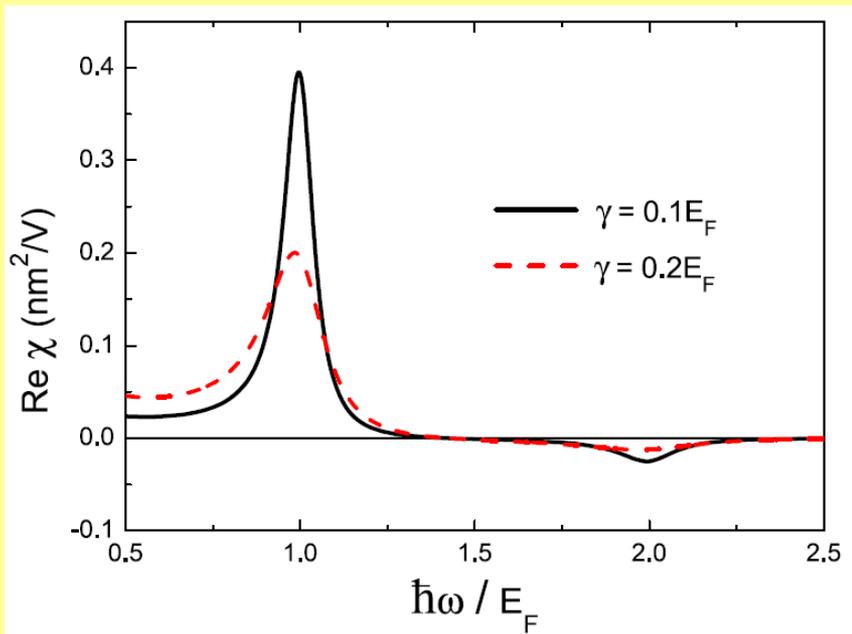
$$P_x(2\omega) = \chi [E_x^2(\omega) - E_y^2(\omega)]$$

$$P_y(2\omega) = -2\chi E_x(\omega)E_y(\omega)$$

Нелинейная восприимчивость, обусловленная долиной поляризацией

$$\chi = \frac{i\mu e^3 \hbar}{8\pi \nu E_F} \frac{\Delta E_F}{E_F} \frac{1}{\hbar\omega - E_F + i\gamma/2}$$

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ



Поляризация на частоте 2ω

$$P_x(2\omega) = \chi [E_x^2(\omega) - E_y^2(\omega)], \quad P_y(2\omega) = -2\chi E_x(\omega)E_y(\omega)$$

Оценка $\chi \approx 0.4 \text{ nm}^2/\text{V}$ **гигантская нелинейная восприимчивость**

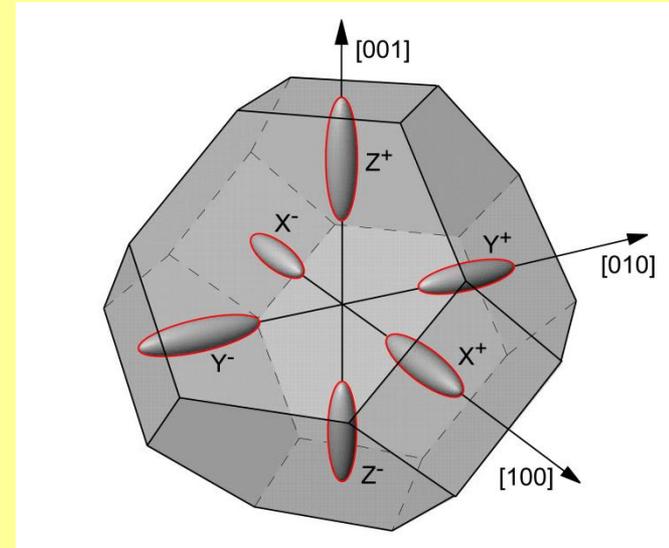
@ $\Delta E_F / E_F = 0.1$, $E_F = 100\text{meV}$, $\gamma = 10\text{meV}$

ПЛАН ДОКЛАДА

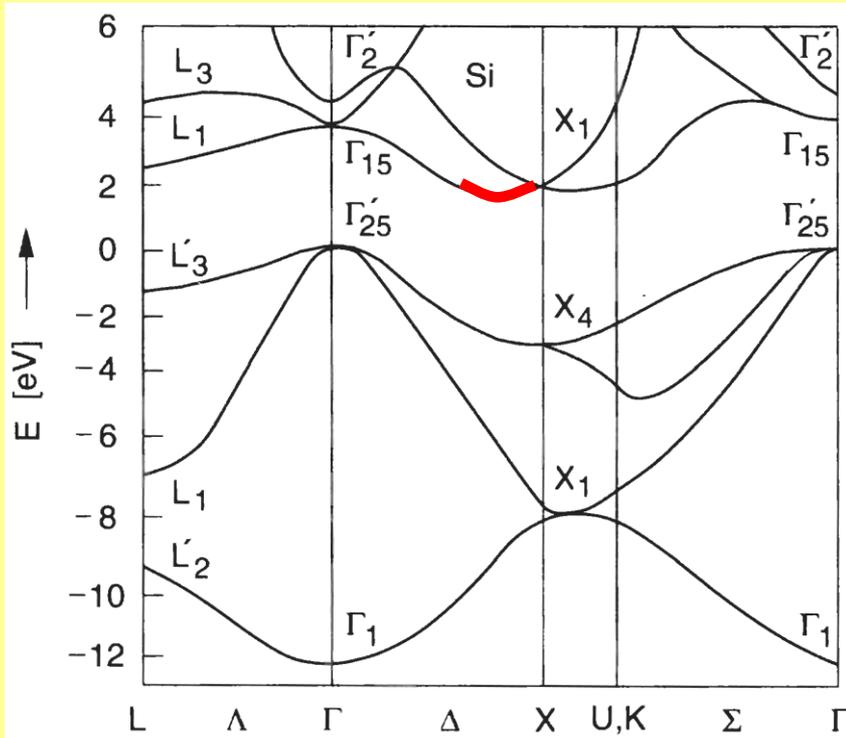
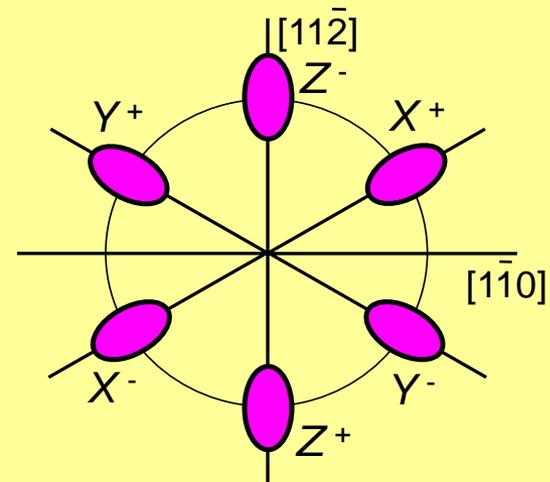
- Оптические долинные эффекты в графене
 - зонная структура графена
 - инжекция чисто долинных токов
 - генерация второй оптической гармоники
- Долинные фототоки в других многодолинных системах
 - инверсионные каналы на поверхности кремния
 - слои дихалькогенидов переходных металлов
- Основные результаты

ЗОННАЯ СТРУКТУРА КРЕМНИЯ

Зона Бриллюэна



Структура (111)



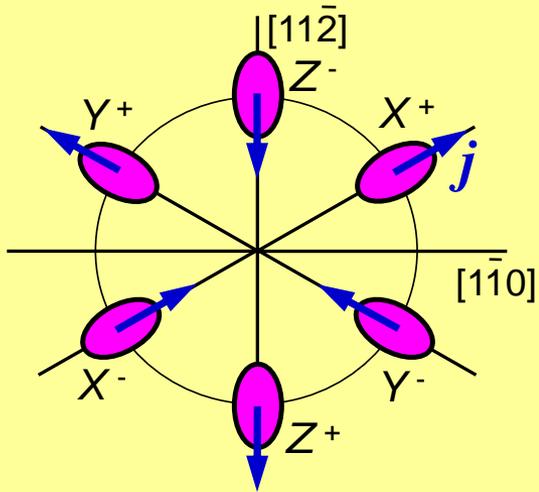
Спектр электронов в долинах

$$E_k = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m_{\parallel}} + \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m_{\perp}}$$

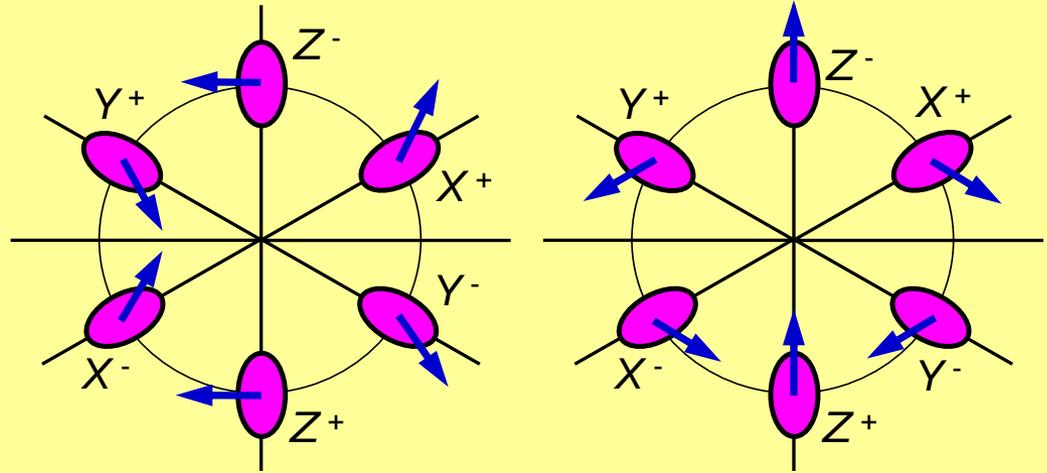
Сильная анизотропия $m_{\parallel}/m_{\perp} \approx 5$

КЛАССИФИКАЦИЯ ОРБИТАЛЬНО-ДОЛИННЫХ ФОТОТОКОВ

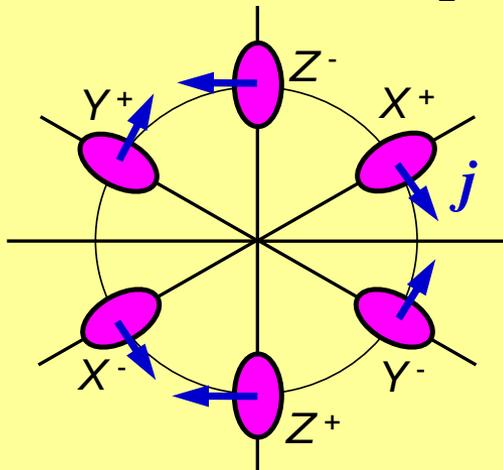
Представление A_1



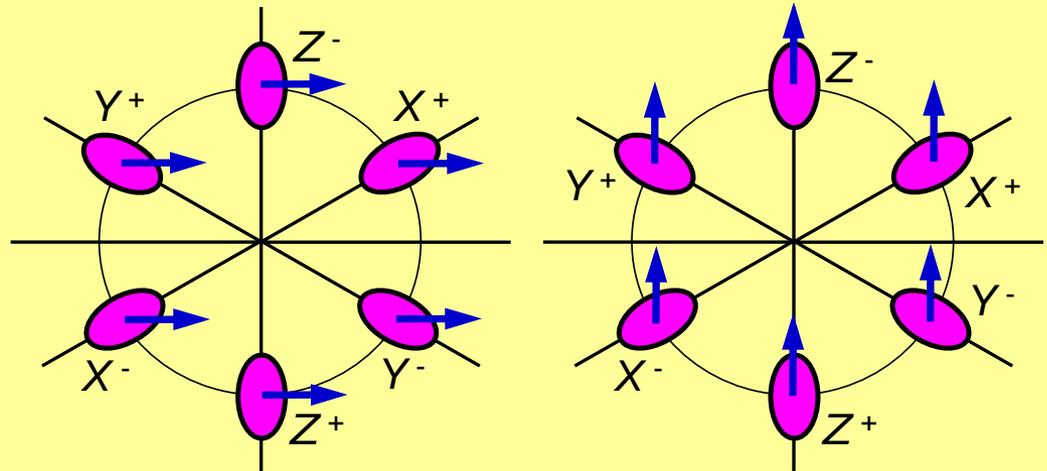
Представление E



Представление A_2

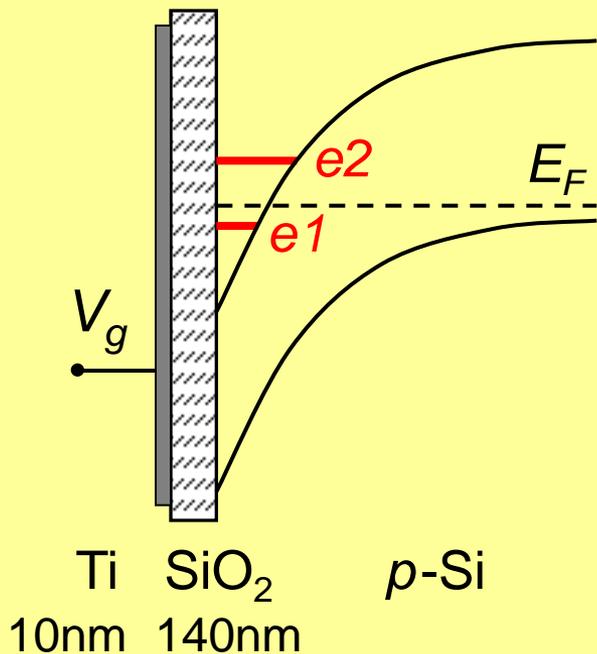


Представление E (электрический ток)



МДП СТРУКТУРА НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

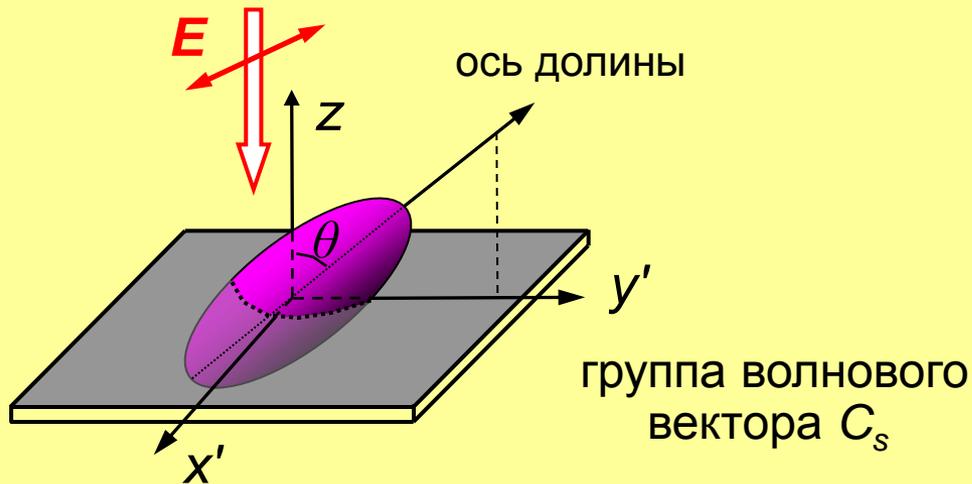
Электронный канал



Концентрация электронов

$$N_e = 2 \cdot 10^{11} \div 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

при $V_g = 1 \div 10 \text{ В}$

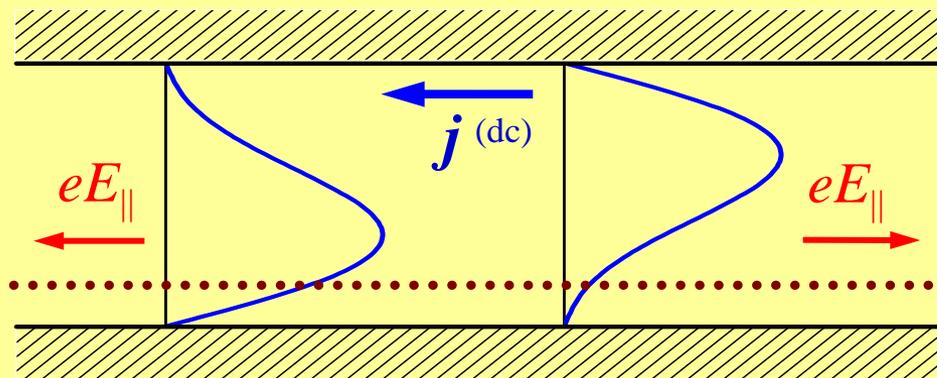
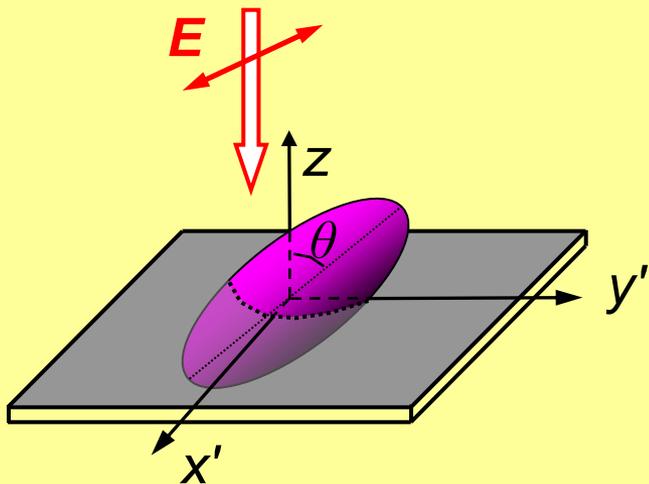


Эффективный гамильтониан

$$\hat{H} = \frac{p_{x'}^2}{2m_{x'x'}} + \frac{p_{y'}^2}{2m_{y'y'}} + \frac{p_z^2}{2m_{zz}} + \frac{p_{y'}p_z}{2m_{y'z}} + V(z)$$

T. Ando, A.B. Fowler, F. Stern, Rev. Mod. Phys. (1982)

НЕЛИНЕЙНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ТРАНСПОРТ



эффект
храповика



Постоянный ток в долине

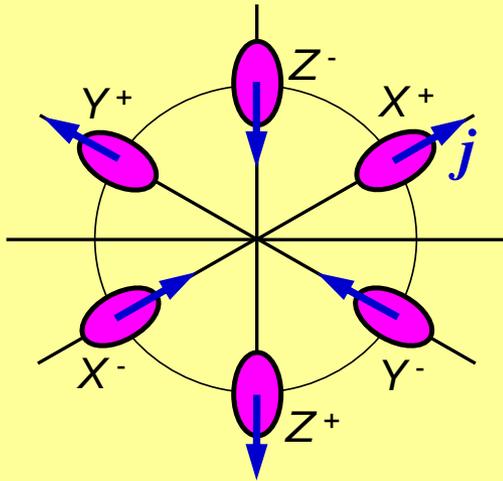
$$j_{x'} = -4 \frac{N_e e^3 \tau_p^0 / m_{x'x'}}{1 + (\omega \tau_p^0)^2} \frac{m_{zz}}{m_{y'z}} \sum_{n \neq 1} \frac{z_{n1} \xi_n}{\varepsilon_{n1}} \left[\underbrace{(E_{x'} E_{y'}^* + E_{y'} E_{x'}^*)}_{\text{линейный}} - \omega \tau_p^0 i \underbrace{(E_{x'} E_{y'}^* - E_{y'} E_{x'}^*)}_{\text{циркулярный}} \right]$$

$$j_{y'} = -4 \frac{N_e e^3 \tau_p^0 / m_{y'y'}}{1 + (\omega \tau_p^0)^2} \frac{m_{zz}}{m_{y'z}} \sum_{n \neq 1} \frac{z_{n1} \xi_n}{\varepsilon_{n1}} \left[1 - (|E_{x'}|^2 - |E_{y'}|^2) \right]$$

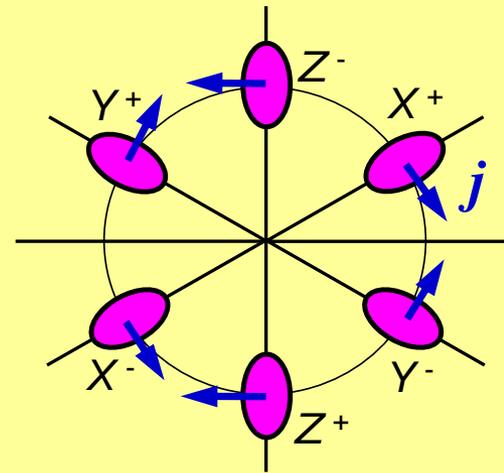
линейный

ТОКИ В МДП СТРУКТУРАХ НА ПОВЕРХНОСТИ (111)

Неполяризованное возбуждение



Циркулярно поляризованный свет

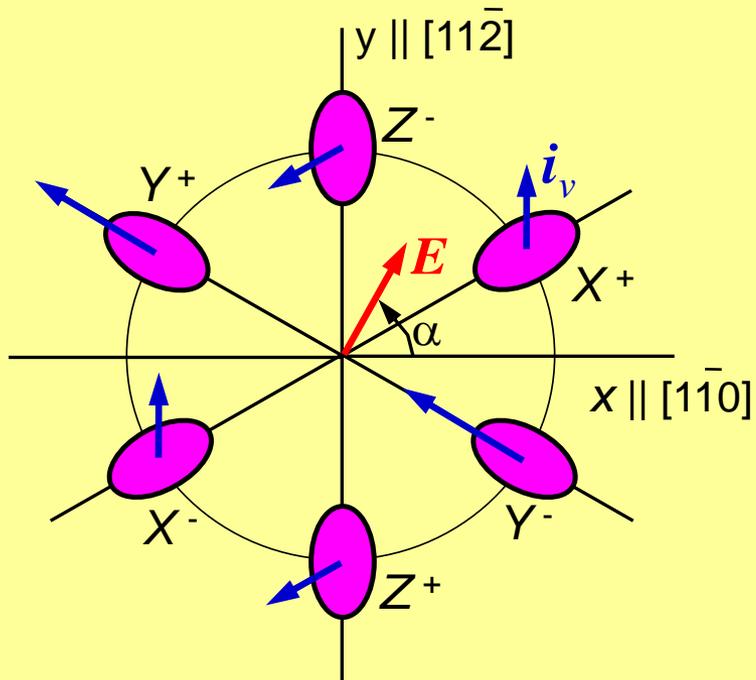


$$j_{\Sigma} = \sum_v j_v$$

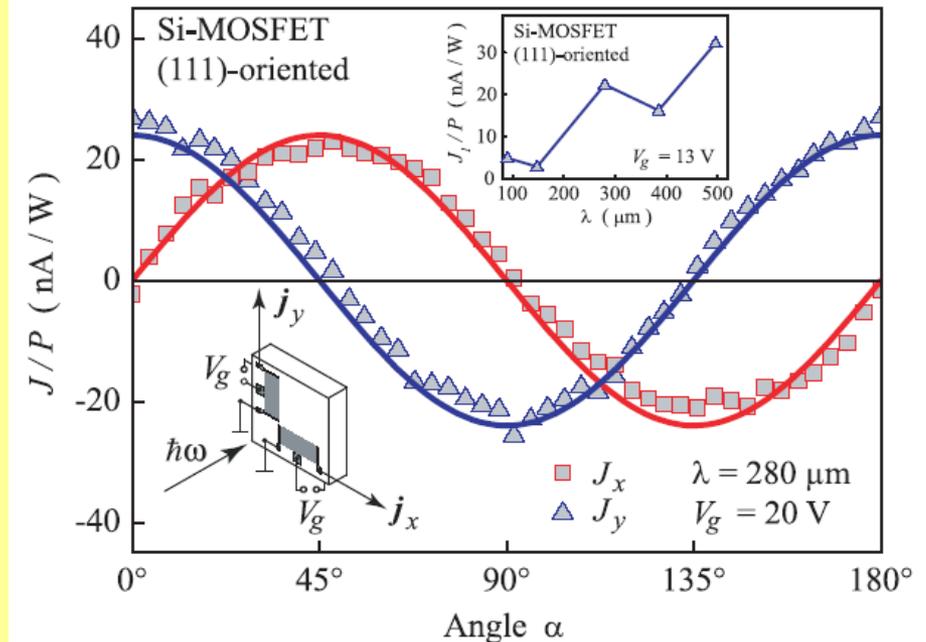
полный электрический ток

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМ СВЕТОМ

Распределения токов



Поляризационная зависимость тока



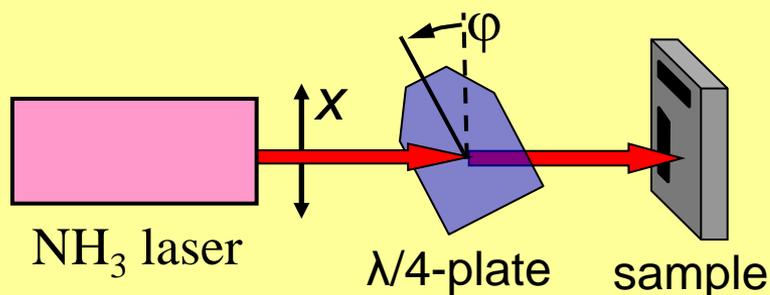
Полный электрический ток

$$j_x = \sum_v j_{v,x} = -3(B + D)(E_x E_y^* + E_y E_x^*) \propto \sin 2\alpha$$

$$j_y = \sum_v j_{v,y} = -3(B + D)(|E_x|^2 - |E_y|^2) \propto \cos 2\alpha$$

СТРУКТУРЫ НА РАЗОРИЕНТИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Геометрия эксперимента



Поляризация излучения

$$P_{\text{circ}} = \sin 2\varphi$$

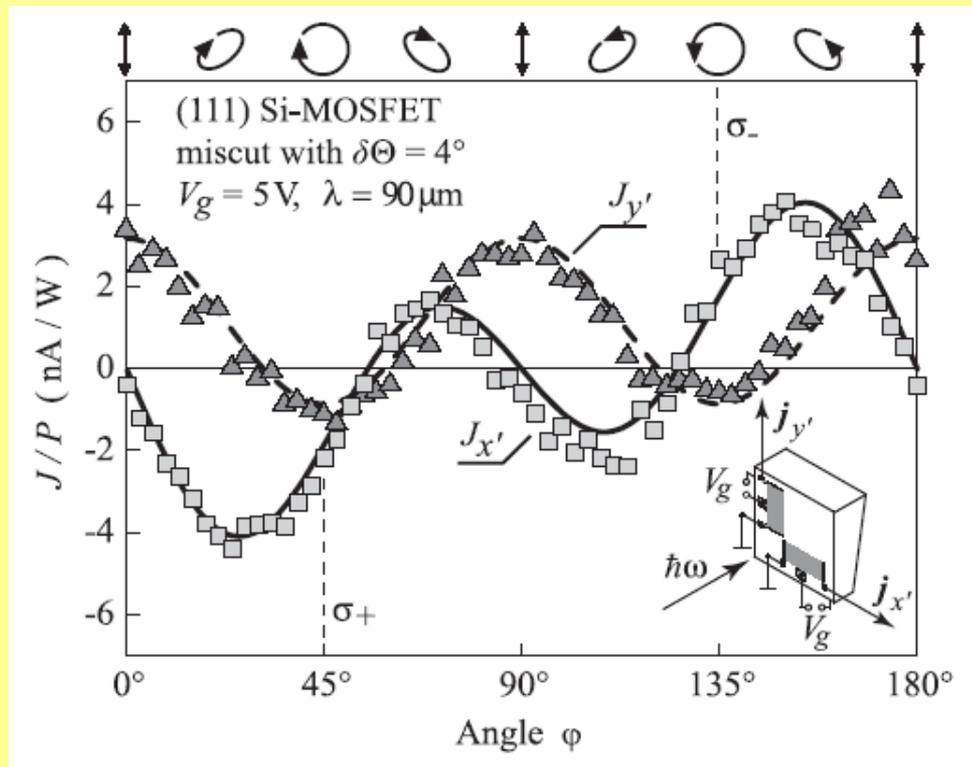
$$|e_x|^2 - |e_y|^2 = \cos^2 2\varphi$$

$$e_x e_y^* + e_y e_x^* = (1/2) \sin 4\varphi$$

Полный электрический ток

$$j_x = \gamma_1 P_{\text{circ}} + \gamma_2 \sin 4\varphi, \quad j_y = \gamma_3 + \gamma_3 \cos^2 2\varphi$$

Поляризационная зависимость тока

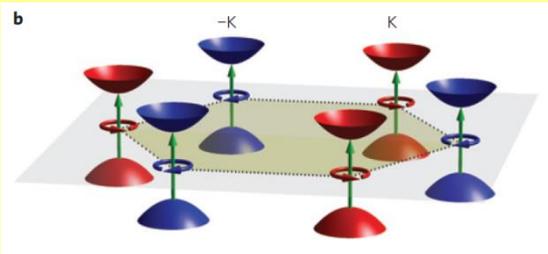
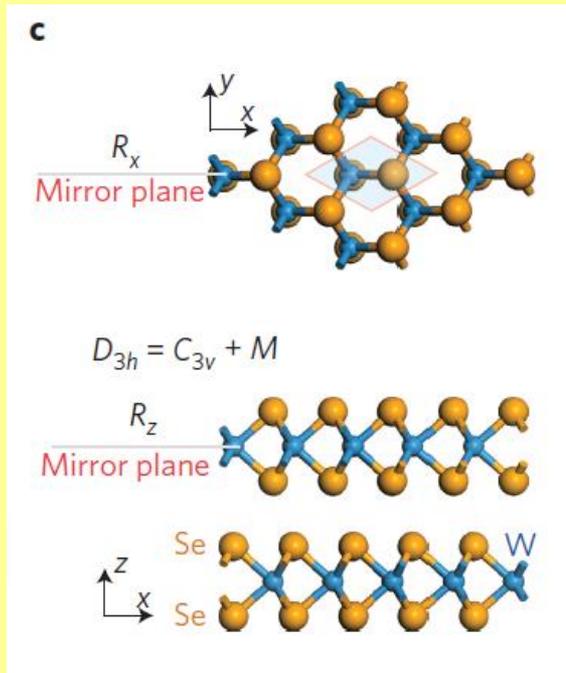


ПЛАН ДОКЛАДА

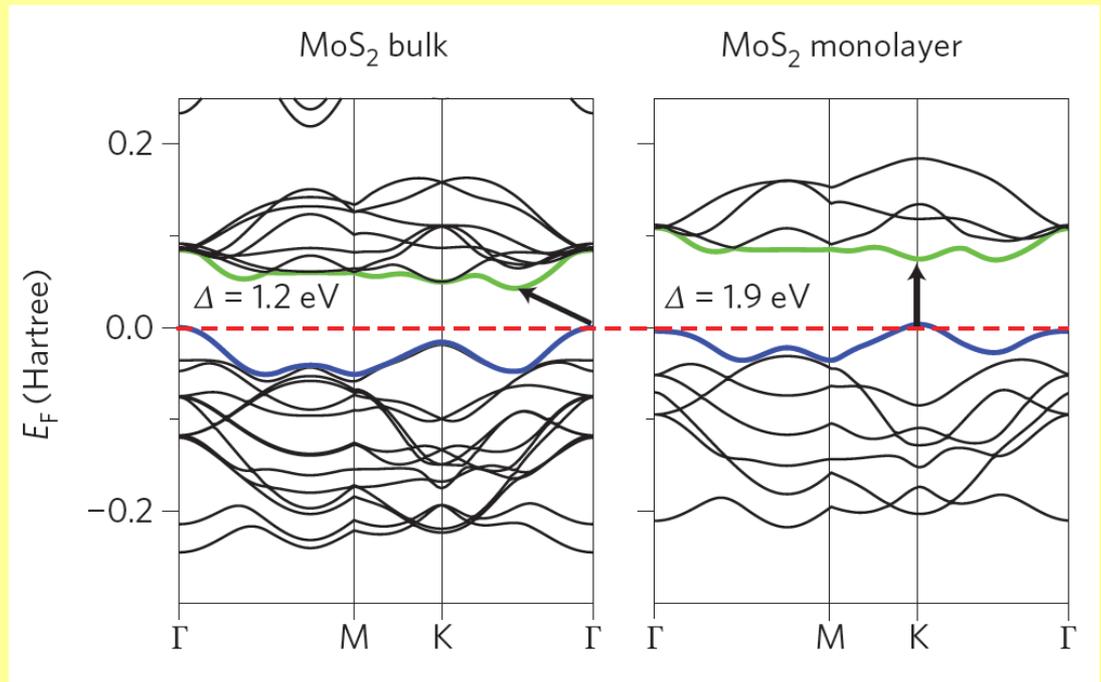
- Оптические долинные эффекты в графене
 - зонная структура графена
 - инжекция чисто долинных токов
 - генерация второй оптической гармоники
- Долинные фототоки в других многодолинных системах
 - инверсионные каналы на поверхности кремния
 - слои дихалькогенидов переходных металлов
- Основные результаты

ДИХАЛЬКОГЕНИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ MX_2 ($\text{M} = \text{Mo}, \text{W}$; $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$)

Кристаллическая структура



Зонная структура объемных систем и монослоев

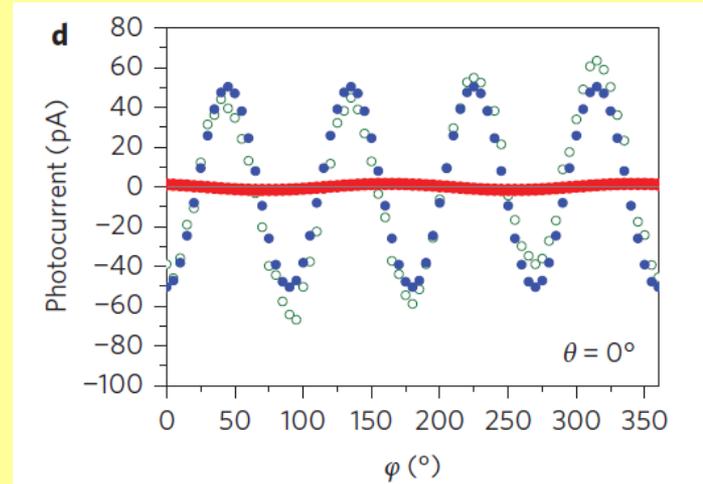
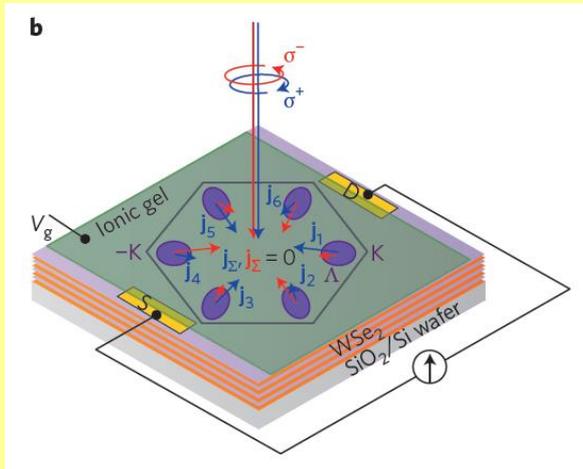


Q. H. Wang et al., Nature Nanotech. **7**, 699 (2012)

X. Xu et al., Nature Phys. **10**, 343 (2014)

ДОЛИННЫЕ ФОТОТОКИ В СЛОЯХ WSe_2

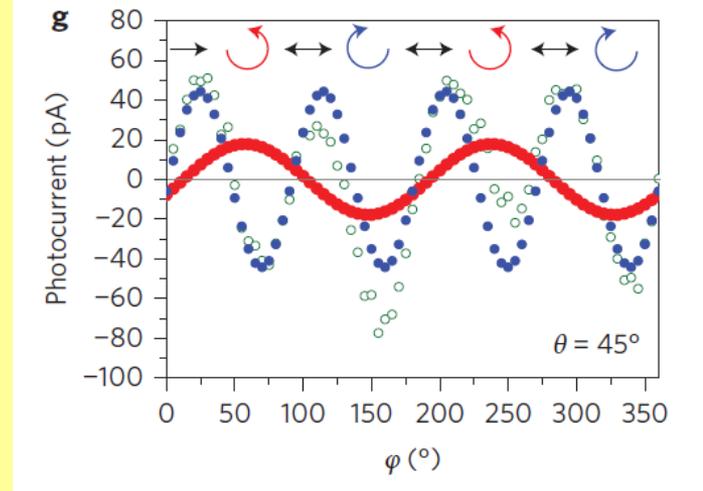
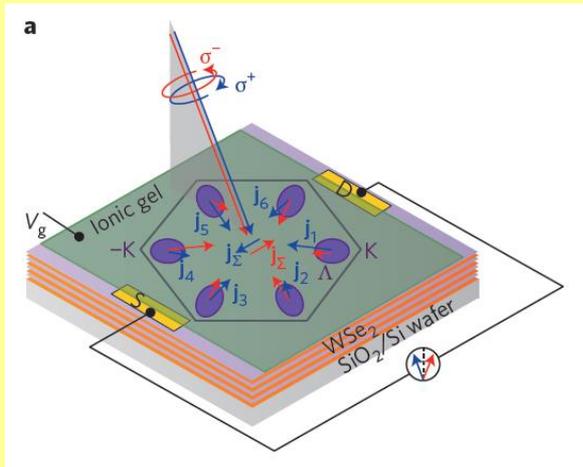
Нормальное падение света



Наклонное падение света

C_{3v} группа
структуры

C_1 группа
долины



H. Yuan et al., Nature Nanotech. **9**, 851 (2014)
S.A.T., Nature Nanotech. **9**, 752 (2014)

БЛАГОДАРНОСТЬ СОАВТОРАМ



Л.Е. Голуб, Е.Л. Ивченко
*Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербурга*



J. Karch, P. Olbrich, C. Drexler, and S.D. Ganichev
Universität Regensburg, Regensburg, Germany



Л.И. Магарилл, М.В. Энтин, З.Д. Квон
Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

ДОЛИННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

- Оптическая инжекция долинных токов
- Нелинейные оптические эффекты, обусловленные долинной поляризацией
- Возможность селективного управления и зондирования долинных состояний связана с низкой симметрией долин

