

Волгоградский государственный социально-педагогический университет

Physical Laboratory of Low-Dimensional Systems

<http://edu.vspu.ru/physlablds>

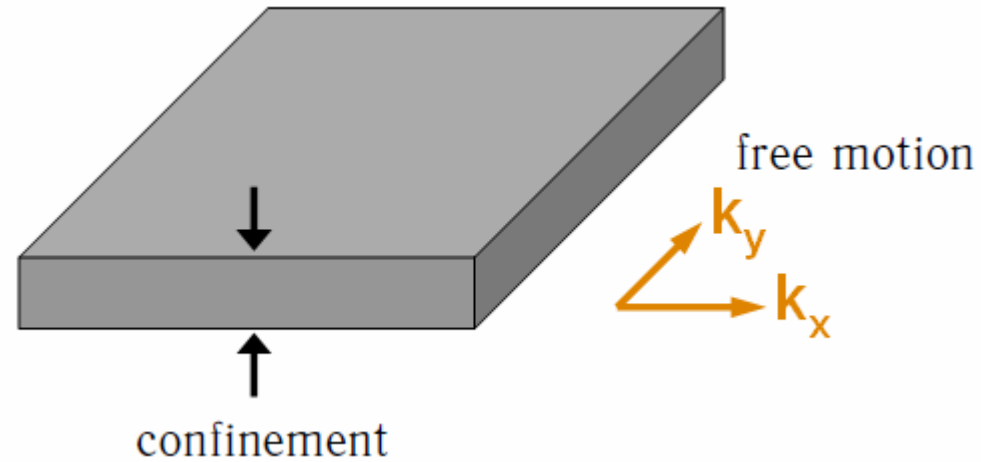
ФИЗИКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ НАУКИ

проф. Крючков С.В.

доц. Кухарь Е.И.

ВИДЫ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

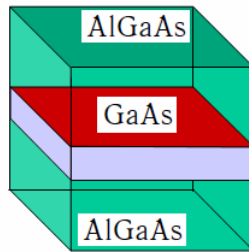
(1) **2D-системы** (квантовые ямы, 2D-электронный газ, тонкие пленки, графен)



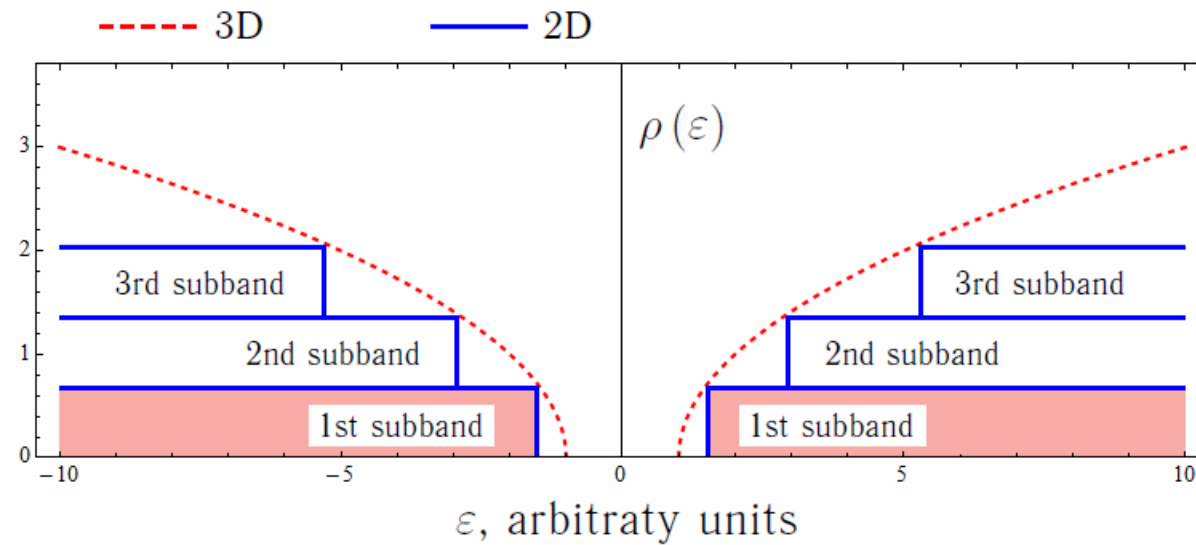
$$\varepsilon_{\mathbf{p}_{\perp},n} = \frac{\mathbf{p}_{\perp}^2}{2m_{\text{eff}}} + \varepsilon_n$$

ε_n — квантованная часть энергии, связанная с конфайнментом.

Quantum Well

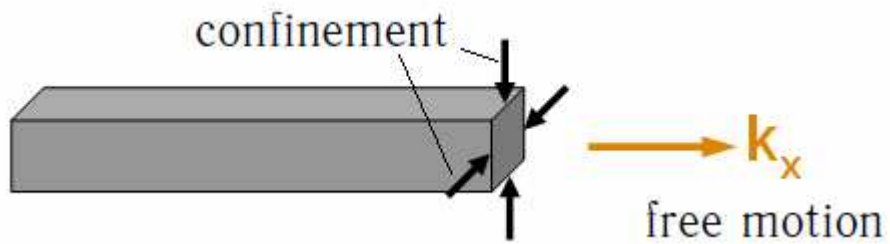


Плотность состояний – число энергетических состояний в малом интервале энергий, отнесенное к ширине этого интервала.

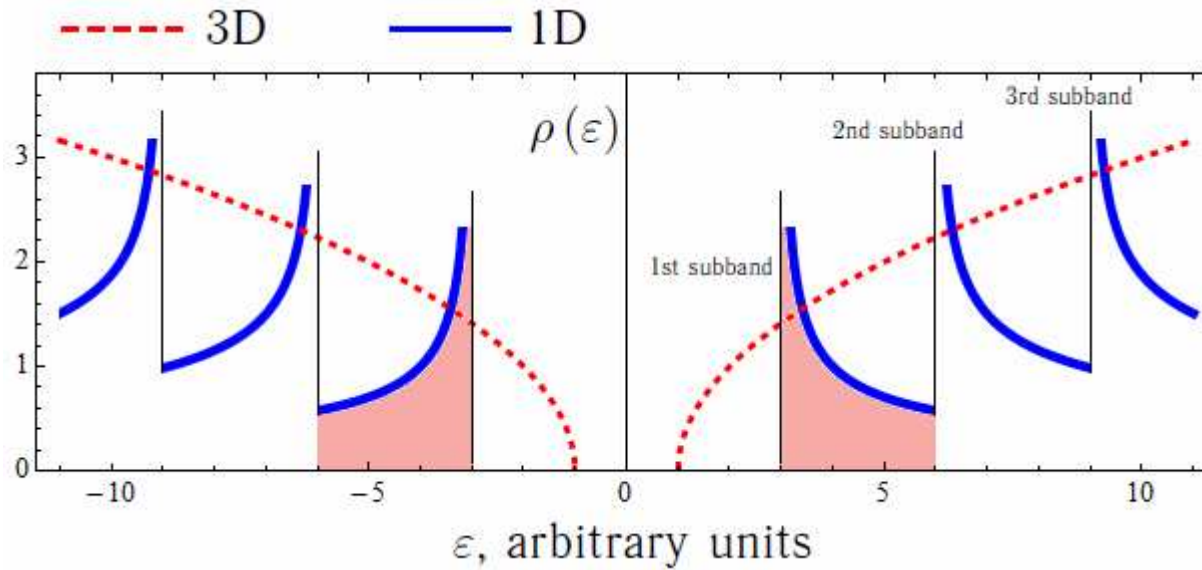


$$\rho_{2D}(\varepsilon) = \frac{m_{\text{eff}}}{\pi \hbar^2} \sum_n \theta(\varepsilon - \varepsilon_n)$$

(2) 1D-системы (квантовые нити, проволоки, графеновые наноленты, УНТ)

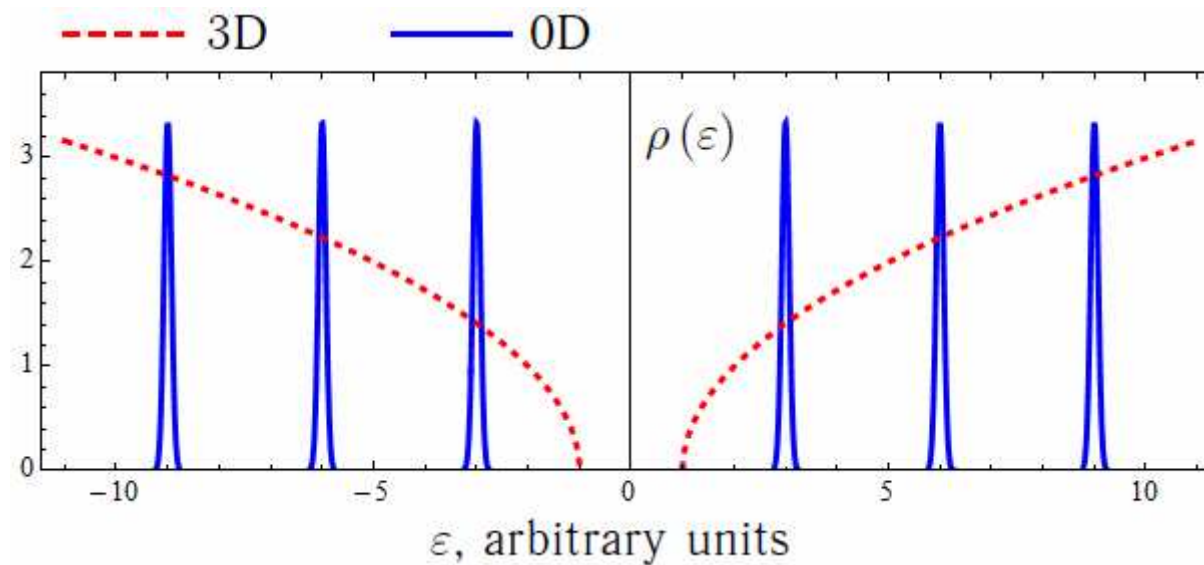
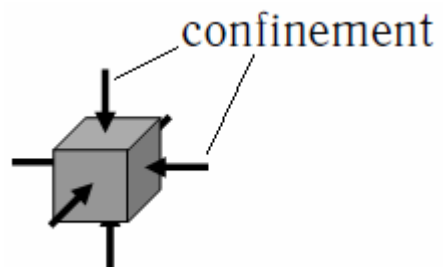


$$\varepsilon_{p_z, n} = \frac{p_x^2}{2m_{\text{eff}}} + \varepsilon_n$$



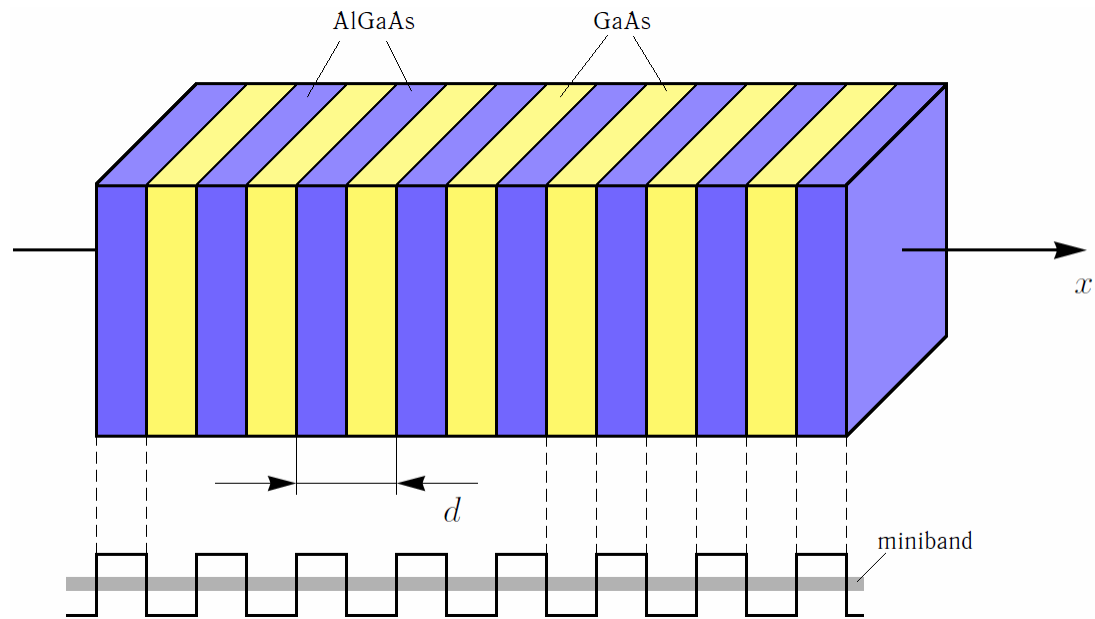
$$\rho_{1D}(\varepsilon) = \frac{\sqrt{2m_{\text{eff}}}}{\pi\hbar} \sum_n \frac{\theta(\varepsilon - \varepsilon_n)}{\sqrt{\varepsilon - \varepsilon_n}}$$

(3) 0D-системы (квантовые точки)

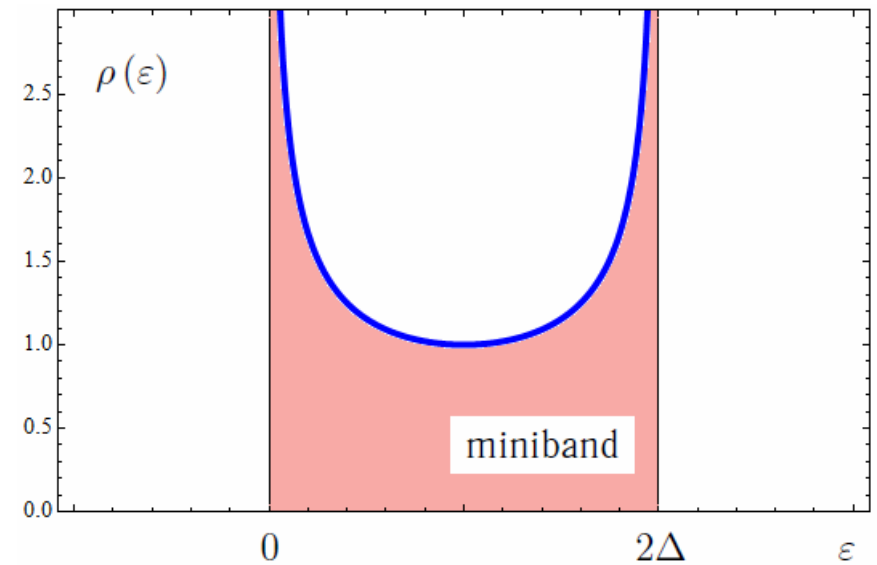


$$\rho_{0D}(\varepsilon) = 2 \sum_n \delta(\varepsilon - \varepsilon_n)$$

(4) Полупроводниковые сверхрешетки (СР)



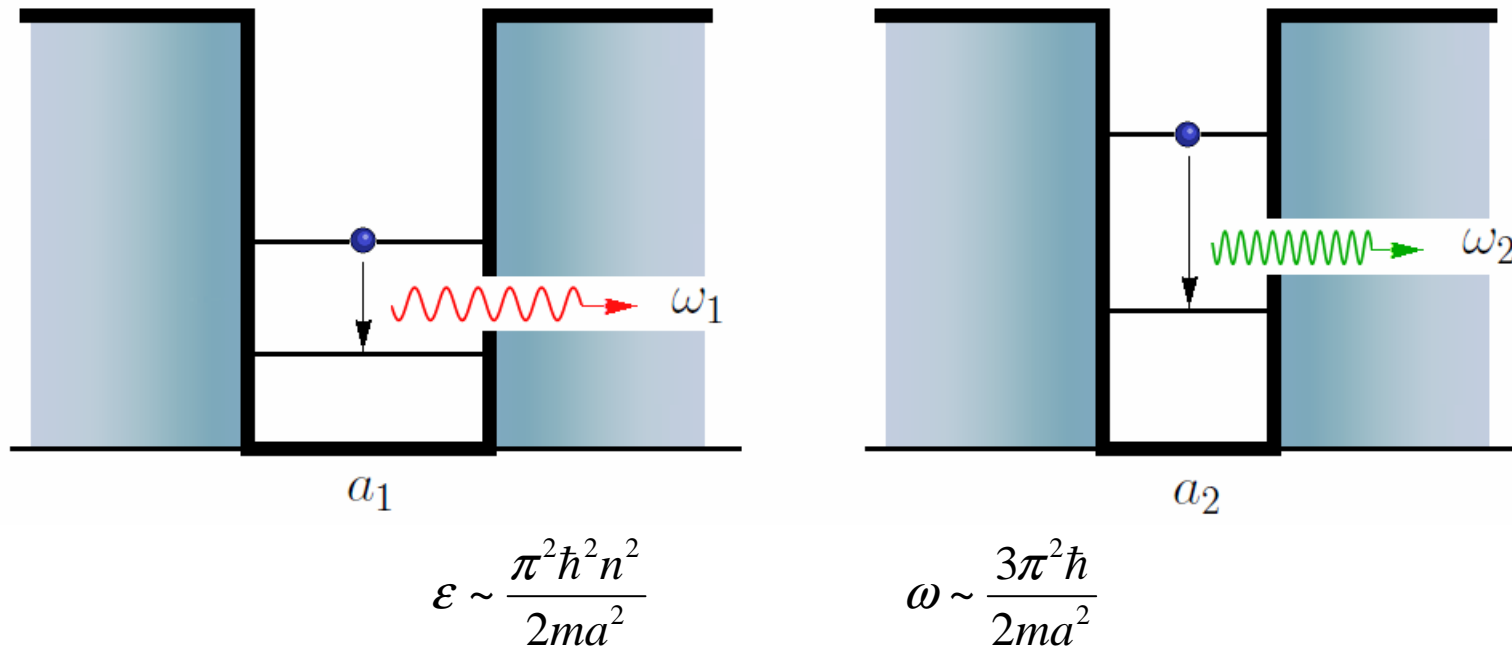
$$\varepsilon(p_x) = \Delta \left(1 - \cos \frac{p_x d}{\hbar} \right)$$



$$\rho_{\text{SL}}(\varepsilon) = \frac{\hbar}{d} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(2\Delta - \varepsilon)}}$$

ПРЕИМУЩЕСТВА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

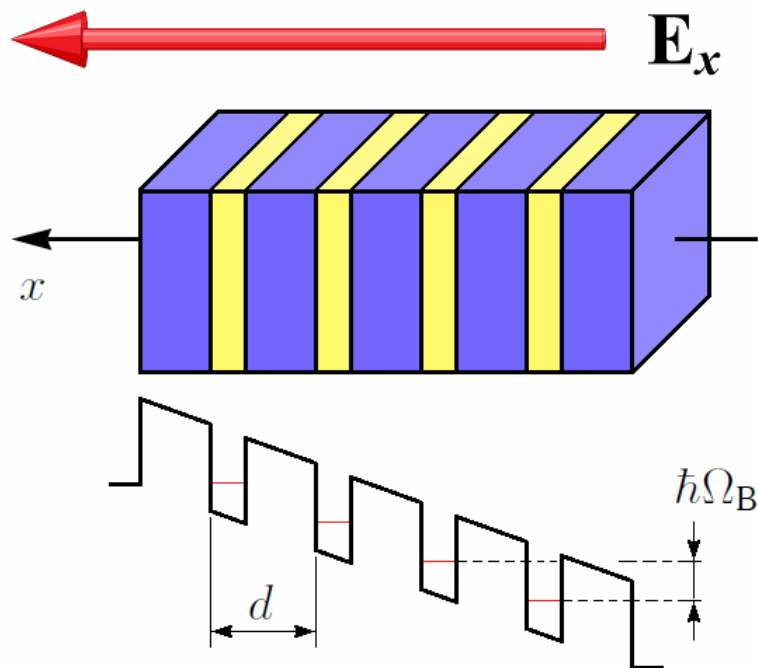
- Возможность изготовления структур с наперед заданными зонными характеристиками



- Возможность объединения большего числа полупроводниковых элементов на основе 2D-, 1D-, 0D-структур на одной интегральной схеме по сравнению с 3D-элементами

- Перестраиваемость энергетических характеристик электронных приборов на основе низкоразмерных структур и возможность управления их оптическими и электронными свойствами за счет изменения внешнего силового поля

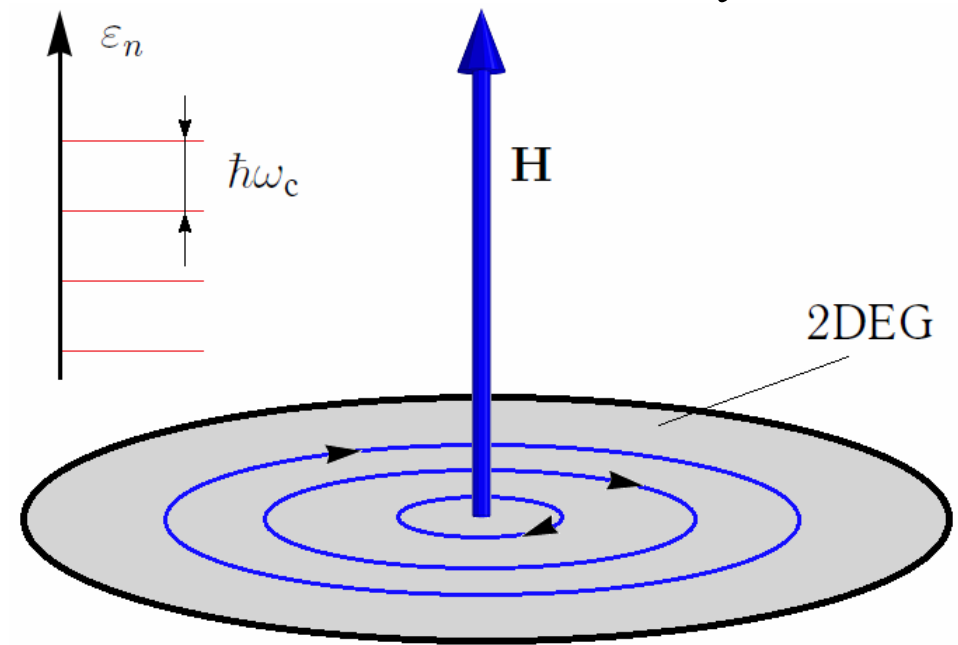
Штарковская лестница



$$\varepsilon_n = \hbar \Omega_B n$$

$$\Omega_B = eEd/\hbar$$

Квантование Ландау

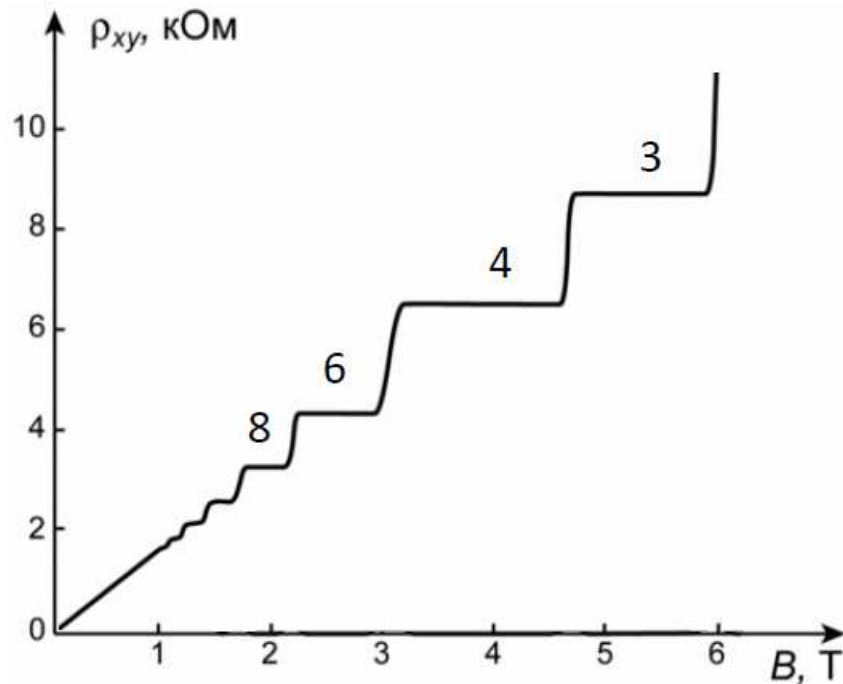


$$\varepsilon_n = \hbar \omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

$$\omega_c = eH/m_{\text{eff}}c$$

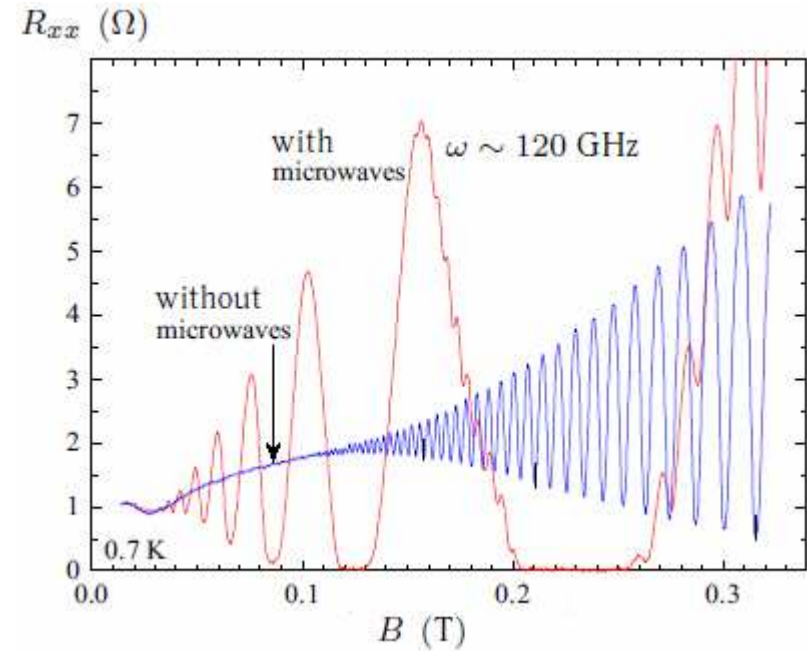
- Способствуют открытиям фундаментального характера в области теории твердого тела

Квантовый эффект Холла



К. фон Клитцинг // УФН 150, 107 (1986)

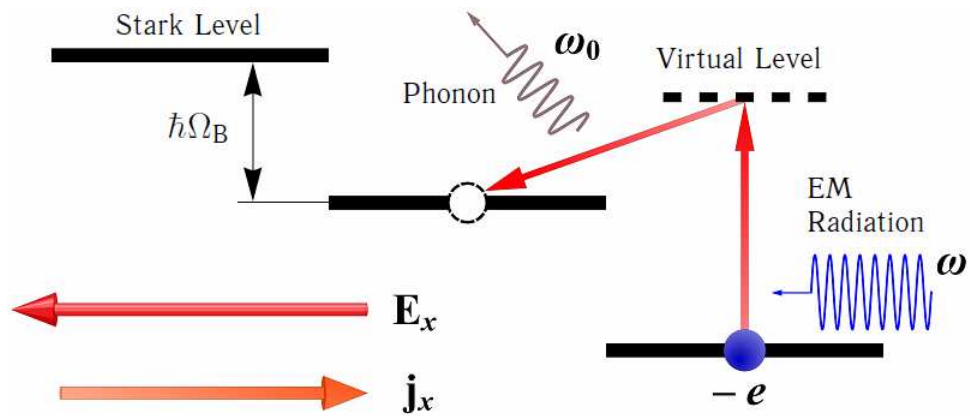
Гигантские осцилляции магнитосопротивления 2DEG, индуцированные микроволновым излучением



R.G. Mani, et al. // Nature 420, 646 (2002)

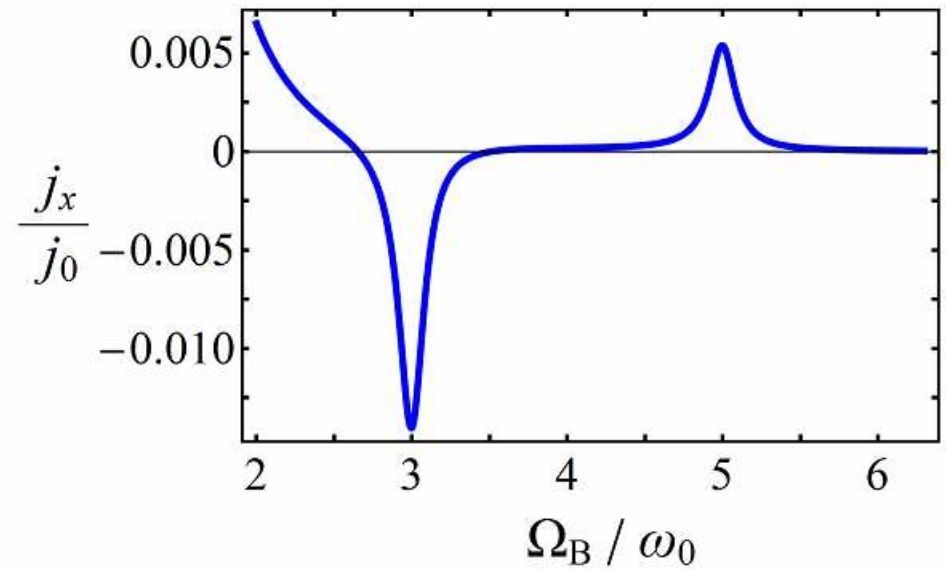
А.А. Быков и др. // Письма в ЖЭТФ 84, 466 (2006)

Абсолютная отрицательная проводимость



$$\omega = \omega_0 + \Omega_B$$

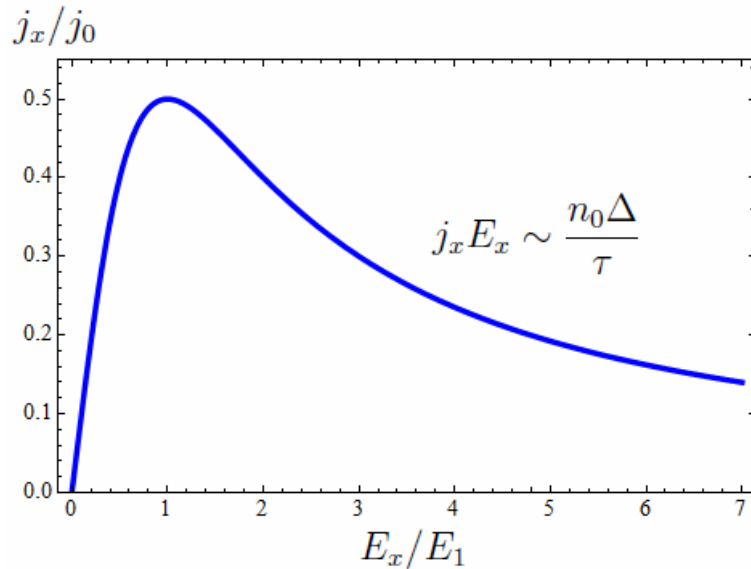
$$j_x \sim -\frac{e^2 n_0 d^2 \Delta^2 \tau}{m_{\perp} \omega^2} \frac{E_0}{\Omega_B^2}$$



ВАН СР, подверженной ЭМ излучению
 $\omega_0 \tau = 10$, $\omega = 4\omega_0$

- Проявление нелинейных оптических и электрических свойств в сравнительно слабых внешних полях

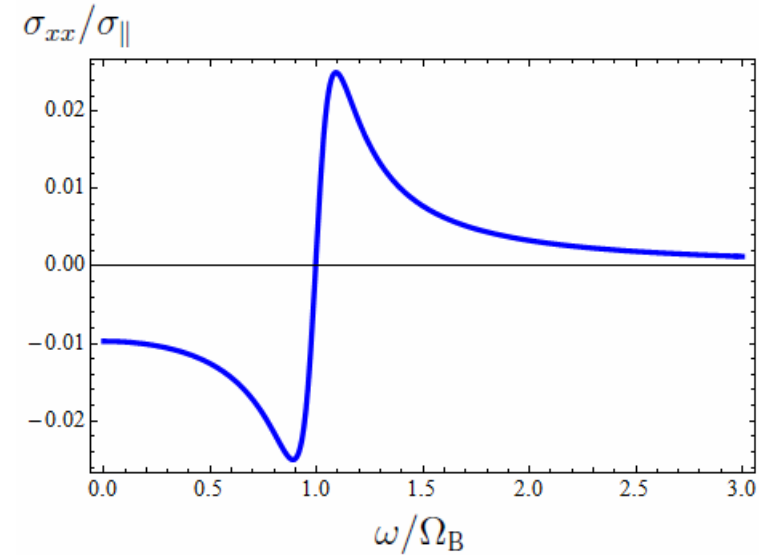
Статическая ОДП



$$j_x = \frac{j_0 \Omega_B \tau}{1 + \Omega_B^2 \tau^2}$$

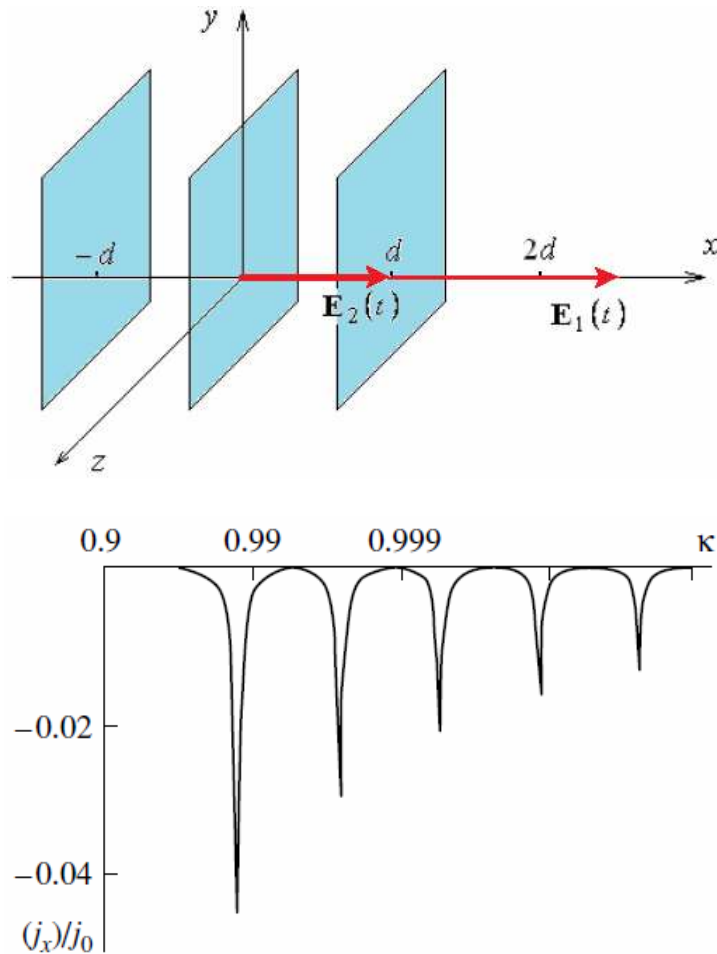
$$E_1 \sim 10^3 \text{ В/см}$$

Динамическая ОДП



$$\sigma_{xx}(\omega) = \frac{\sigma_{||}}{2\omega} \left(\frac{\omega + \Omega_B}{1 + (\omega + \Omega_B)^2 \tau^2} + \frac{\omega - \Omega_B}{1 + (\omega - \Omega_B)^2 \tau^2} \right)$$

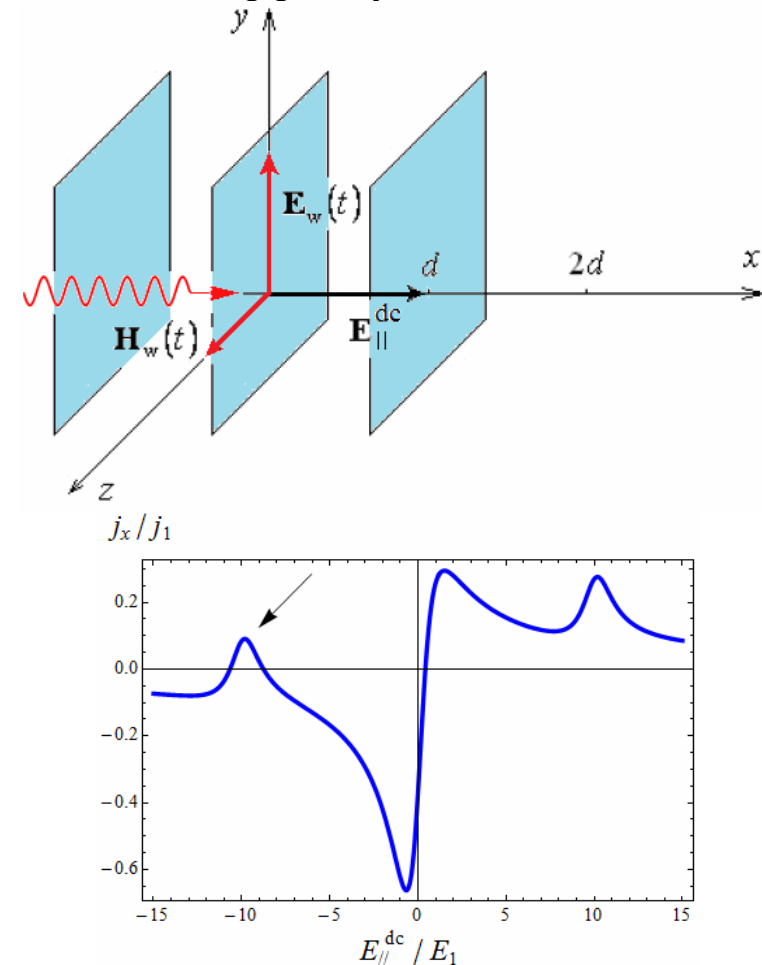
Взаимное выпрямление ЭМ волн



Зависимость плотности выпрямленного тока от параметра нелинейности K кноидальной волны.

Д.В. Завьялов, С.В. Крючков, Е.И. Кухарь // Опт. и спектроскопия 100, 989 (2006)

Влияние постоянного электрического поля на эффект увлечения

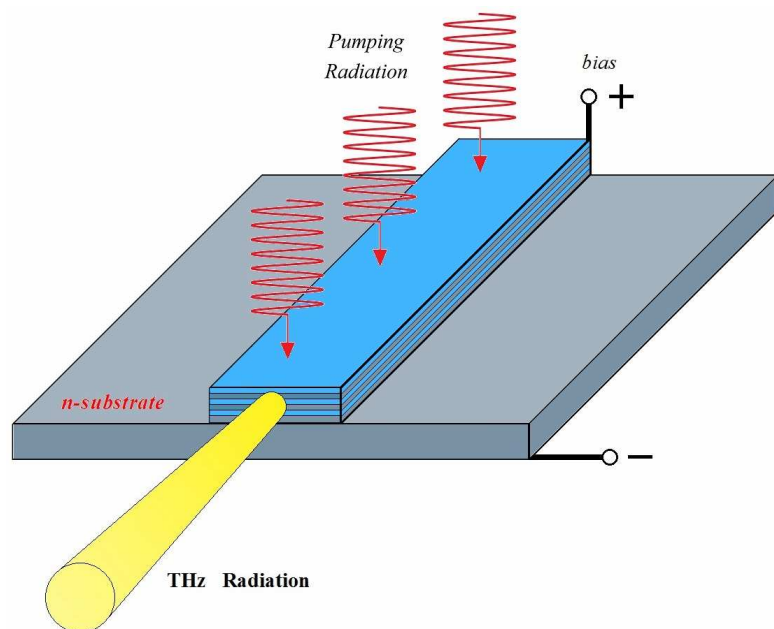


Зависимость плотности тока увлечения от напряженности постоянного поля

Д.В. Завьялов, С.В. Крючков, Е.И. Кухарь // ФТП 41, 726 (2007)

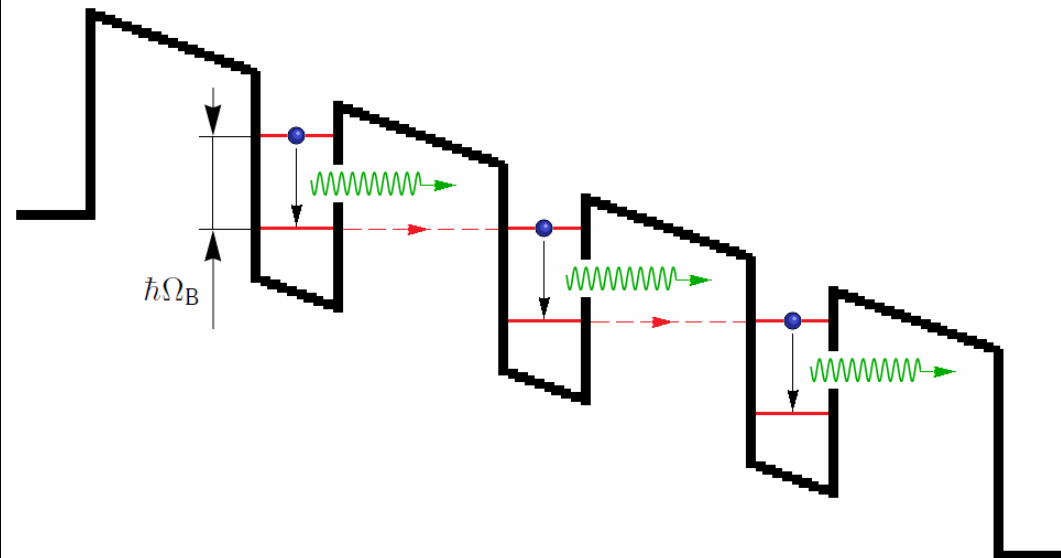
ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХРЕШЕТОК

Блоховский генератор



А.А. Андронов и др. // ФТП 37, 378 (2003)
 Ю.А. Романов и др. // ФТП 39, 162 (2005)

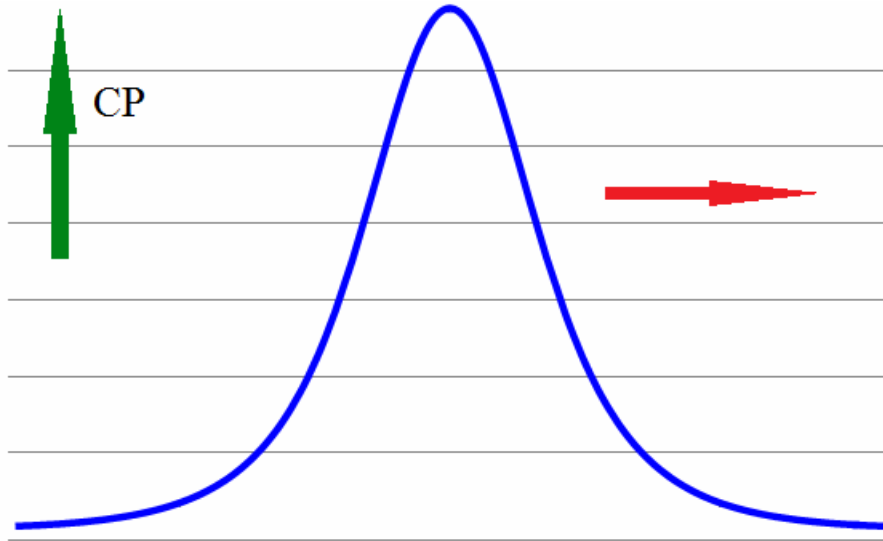
Лазер на штарковской лестнице



В.Ф. Елесин и др. // УФН 173, 776 (2003)

Нелинейные ЭМ волны, ЭМ солитоны

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \omega_{\text{pl}}^2 \sin \varphi = 0$$



Э.М. Эпштейн // ФТП 14, 2422 (1980)

Ф.Г. Басс и др. //

Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. М.: Наука, 1989

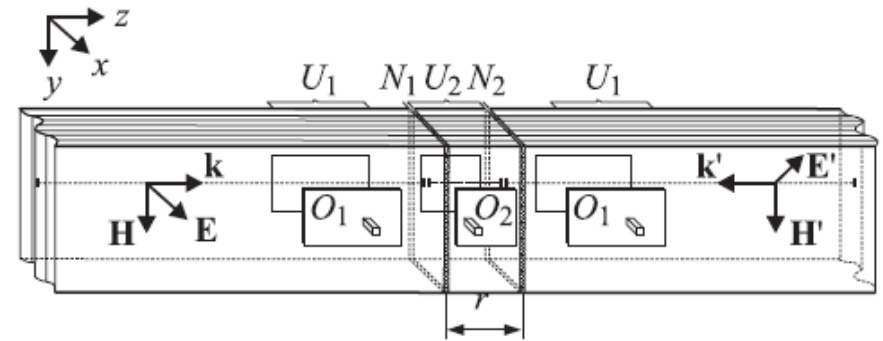
S.V. Kryuchkov, et al. // Laser Phys. 13, 1158 (2003)

Стабилизация формы ЭМ солитона ВЧ полем

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial t} - c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + J_0(a) \omega_{\text{pl}}^2 \sin \varphi = 0$$

Ф.Г. Басс, С.В. Крючков, А.И. Шаповалов // ФТП 29, 19 (1995)

Солитонная ячейка памяти



С.В. Крючков, Е.В. Капля // ЖТФ 73, 53 (2003)

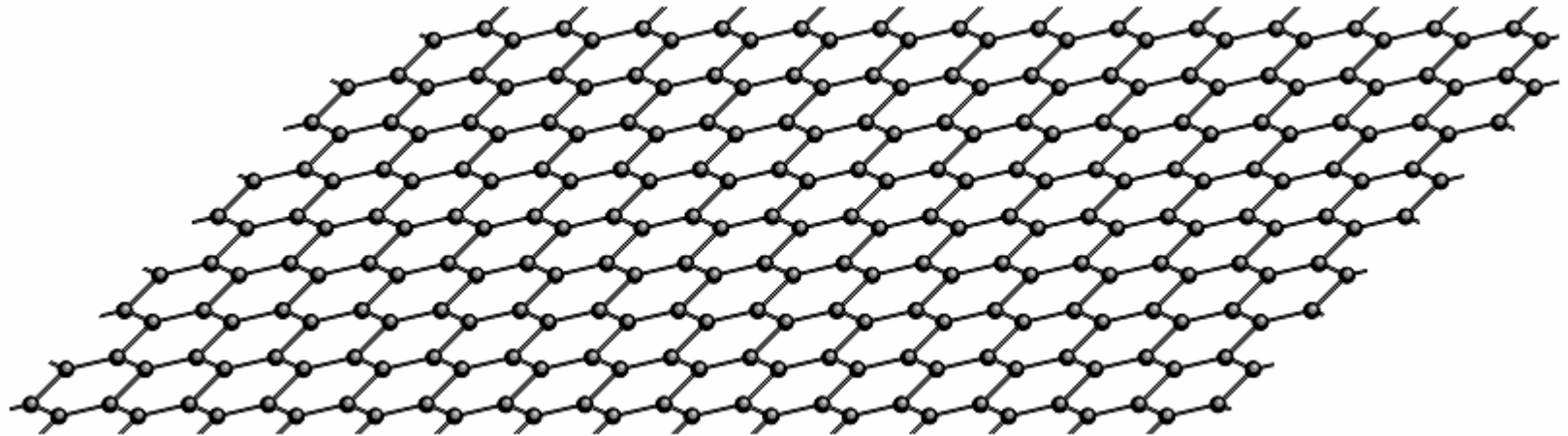
ГРАФЕН – НОВЫЙ ДВУМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ

Особенности графена

Истинный 2D-материал:
локализация в плоскости сильнее,
чем в полупроводниковых 2D-
структурах

Высокая подвижность носителей
заряда при комнатных температурах:
 $\mu \sim 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \sim 10^2 \mu_{\text{Si}}, \mu_{\text{GaAs}}$

Выдерживает большие плотности
тока, превышающие 10^8 А/см^2

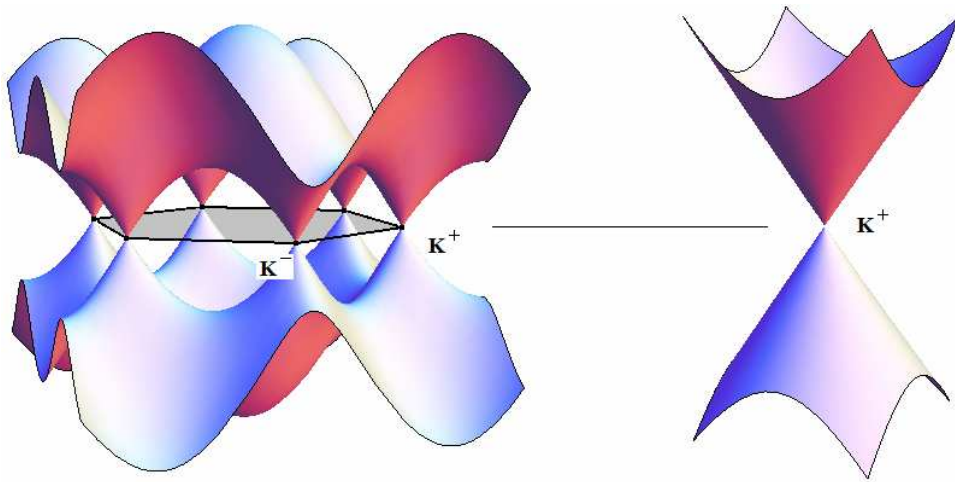


Особенности графена

Однослойный графен – полуметалл: валентная зона и зона проводимости соединяются в точках, получивших название дираковских точек

В окрестности дираковской точки закон дисперсии линейен по квазиимпульсу
 $\varepsilon = v_F p$

Неаддитивный электронный спектр
 $V_x = f(p_x, p_y)$



$$\hat{H}_{K^+} = v_F \hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}$$

A.H. Castro Neto, et al. // Rev. Mod. Phys. 81, 109 (2009)
 N.M.R. Peres // J. Phys.: Condens. Matter 21, 323201 (2009)

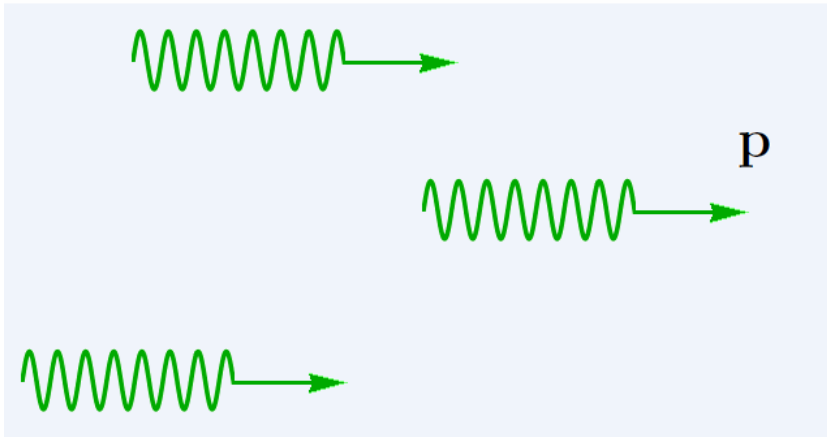
Трудность! Для функционирования нанoeлектронных приборов (транзисторов) в зонной структуре рабочей среды необходимо наличие запрещенной зоны

Фундаментальное значение

Графен – экспериментальная база для проверки релятивистских эффектов

Фотон в вакууме

$$\varepsilon = c p$$

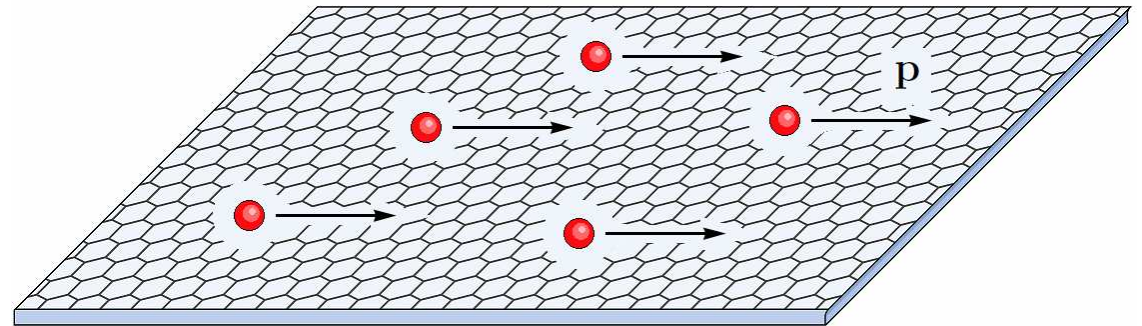


$$c \sim 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$$

Спин 1

Электрон в графене

$$\varepsilon = v_F p$$



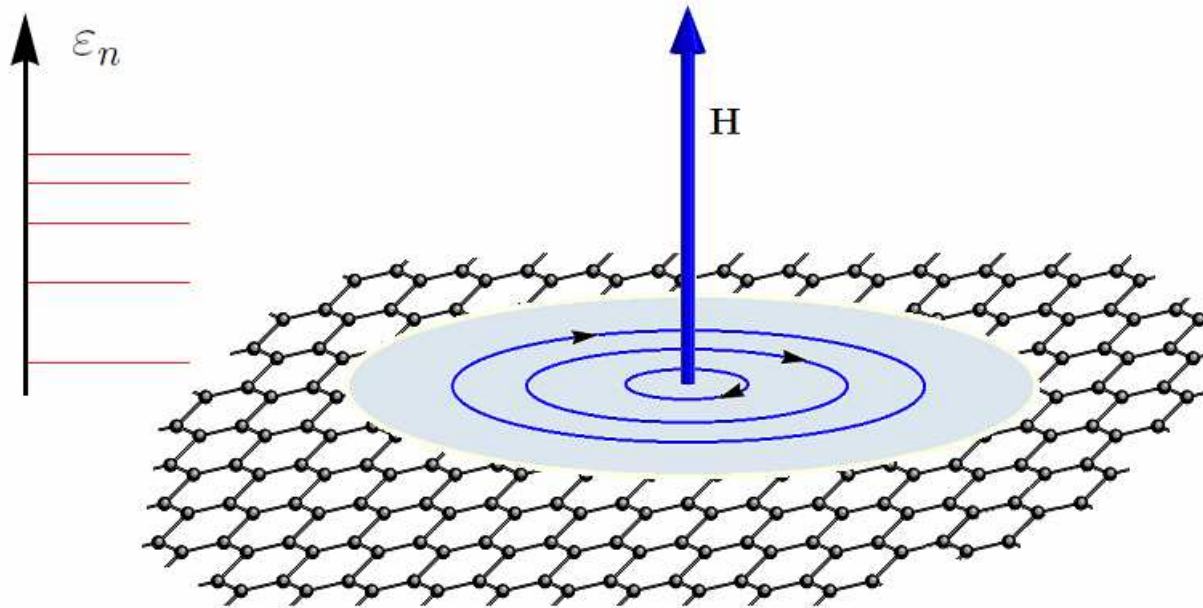
$$v_F \sim 10^8 \text{ см/с}$$

Спин $\frac{1}{2}$

Фундаментальное значение

Графен – экспериментальная база для проверки релятивистских эффектов

Квантование энергии в магнитном поле



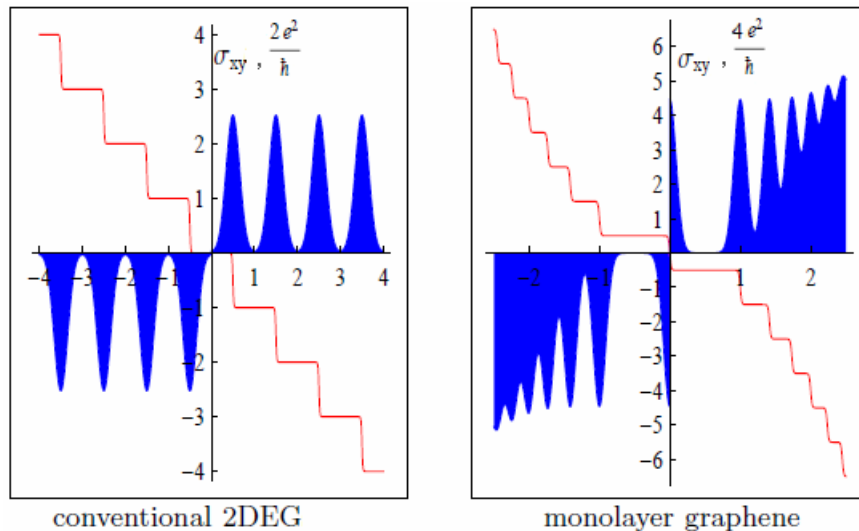
$$\varepsilon_n = \hbar \omega_c \sqrt{n}$$

$$\omega_c = v_F \sqrt{2eH / c\hbar}$$

Фундаментальное значение

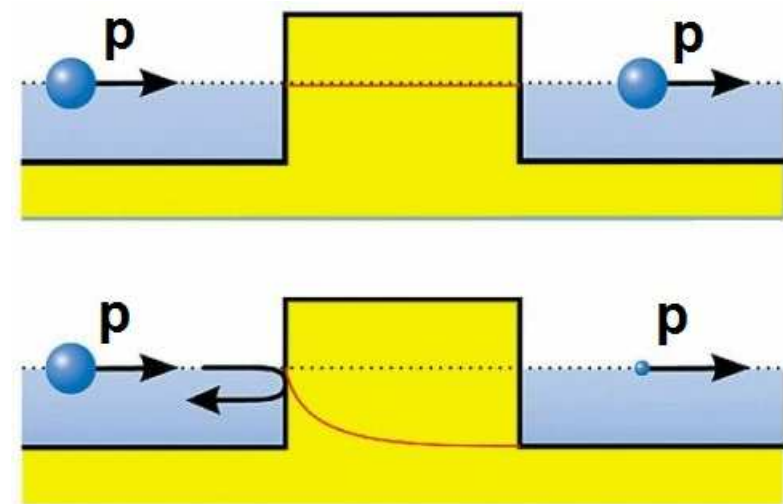
Графен – экспериментальная база для проверки релятивистских эффектов

Квантовый эффект Холла в графене



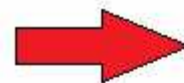
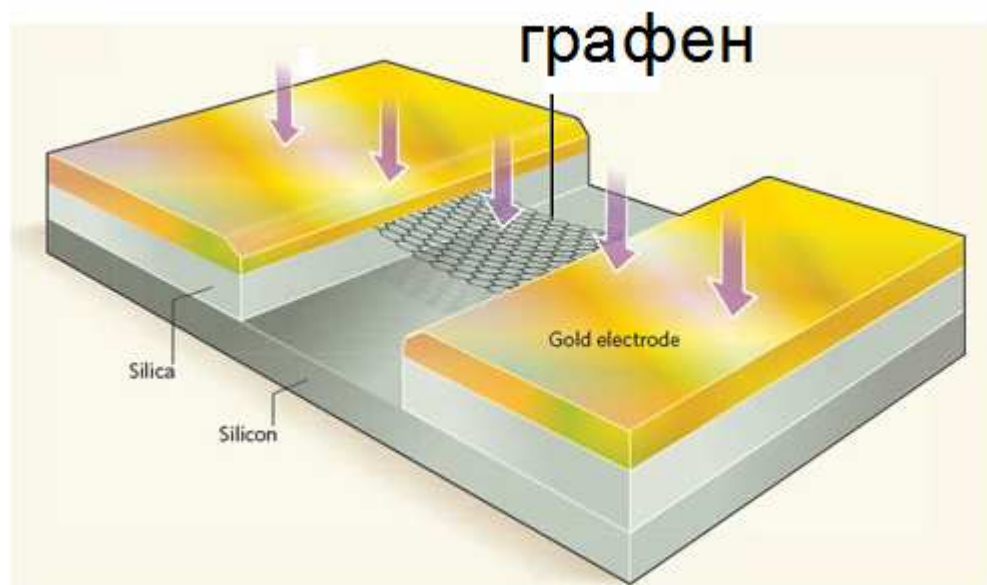
V.P. Gusynin, et al. // Phys. Rev. Lett. 95, 146801 (2005)
 K.S. Novoselov, et al. // Nature 438, 197 (2005)
 Y. Zhang, et al. // Nature 438, 201 (2005)

Парадокс Клейна



M.I. Katsnelson, et al. // Nature Physics 2, 620 (2006)

Применение графена



нанoeлектроника



оптика



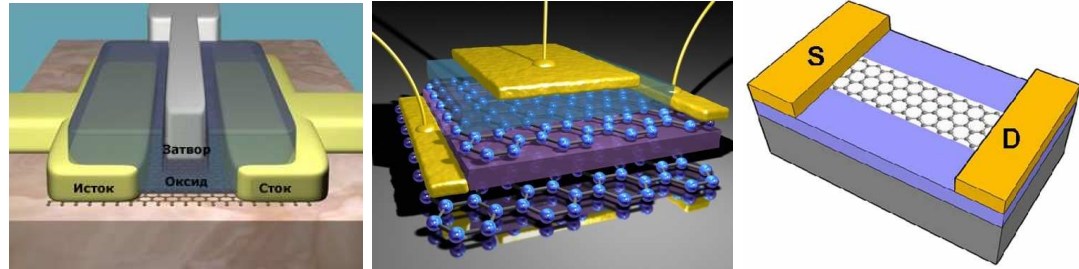
оптоэлектроника



биомедицина

НАНОЭЛЕКТРОНИКА:

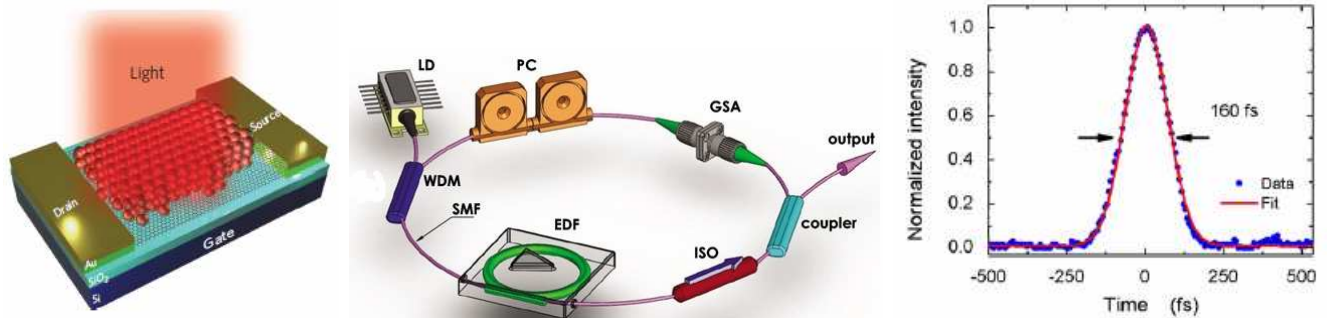
- полевые транзисторы
- суперконденсаторы
- нанопровода



Y.Q. Wu, et al. // Appl. Phys. Lett. 92, 092102 (2008)
 X. Wang, et al. // Phys. Rev. Lett. 100, 206803 (2008)
 S.A. Mikhailov, et al. // J. Phys.: Condens. Matter 20, 384204 (2008)
 Д.А. Свинцов и др. // ФТП 47, 244 (2013)

ОПТИКА:

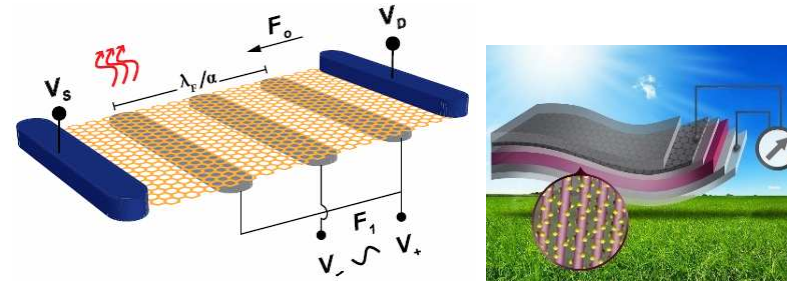
- графеновые поглотители ЭМ излучения
- генераторы фемтосекундных ЭМ импульсов
- волноводы



S. Thongrattanasiri, et al. // Phys. Rev. Lett. 108, 047401 (2012)
 Z. Sun, et al. // Physica E 44, 1082 (2012)
 G. Konstantatos, et al. // Nat. Nanotechnol. 7, 363 (2012)
 J.G. Pedersen, et al. // Phys. Rev. B 86, 245410 (2012)

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА:

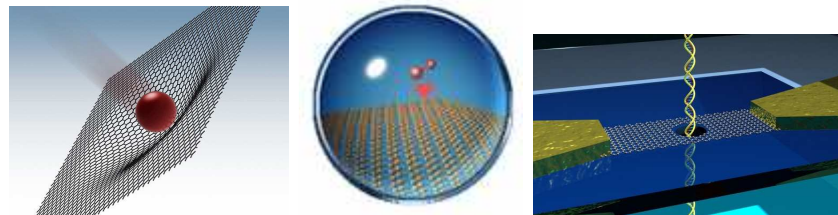
- генераторы ТГц излучения
- высокочувствительные фотодетекторы
- гибкие фотоэлементы
- солнечные батареи
- сенсорные экраны



R.R. Hartmann, et al. // Nanotechnology 25, 322001 (2014)
 S. Sekwao, et al. // Appl. Phys. Lett. 106, 063109 (2015)
 L. Liao, et al. // Mater. Today 15, 328 (2012)

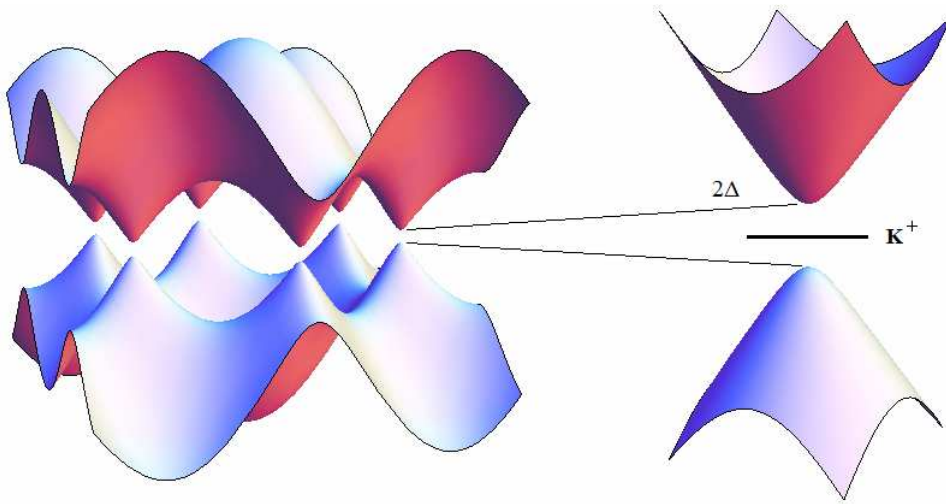
ДРУГИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ:

- непроницаемые мембраны
- детекторы отдельных молекул
- биомедицина: детектор ДНК на базе графенового транзистора



F. Schedin, et al. // Nature Mater. 6, 652 (2007)

Щелевая модификация графена



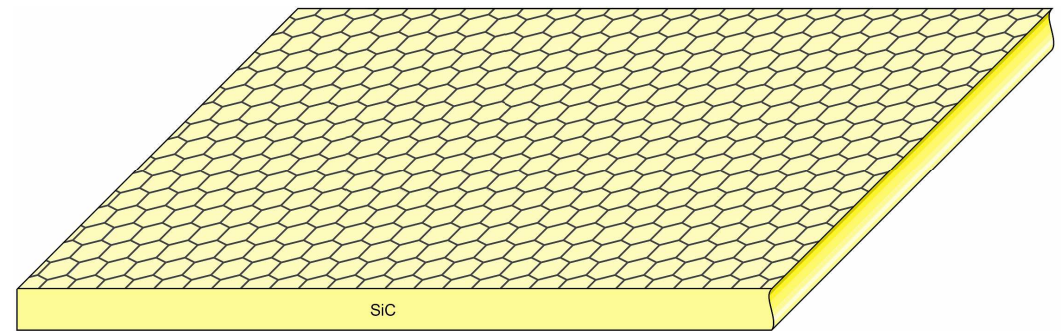
$$\hat{H} = v_F \hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \Delta \hat{\sigma}_z$$

D.S. Novikov // Phys. Rev. B 76, 245435 (2007)

Релятивистская частица

$$\varepsilon = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Графен на подложке



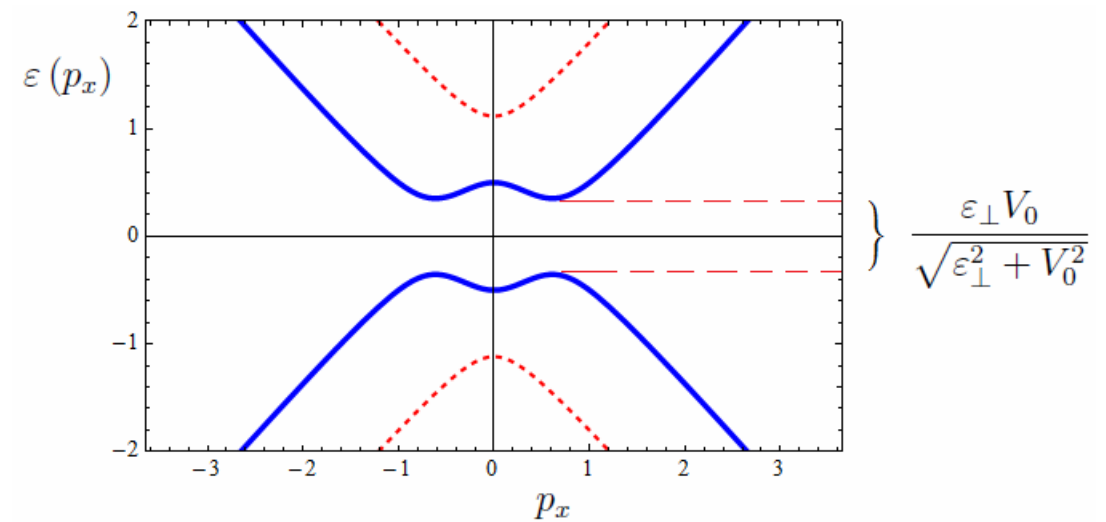
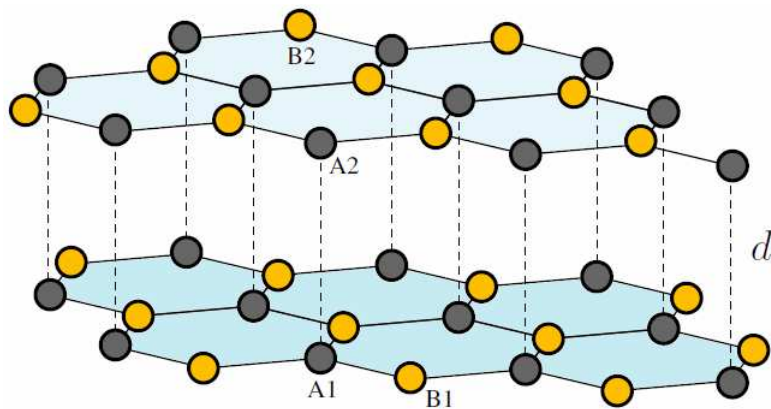
Подложка SiC: $2\Delta = 0.26$ эВ

A. Mattausch, et al. // Phys. Rev. Lett. 99, 076802 (2007)

Электрон в щелевом графене

$$\varepsilon = \sqrt{\Delta^2 + p^2 v_F^2}$$

Биграфен

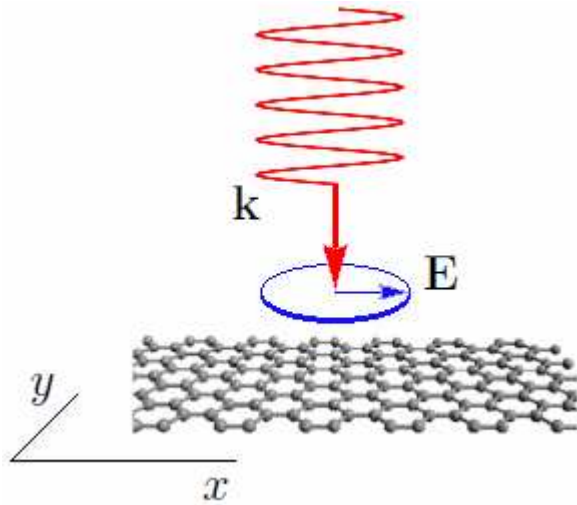


$$\varepsilon(\mathbf{p}) = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp}^2}{2} + \frac{V_0^2}{4} + v_F^2 \mathbf{p}^2} \mp \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp}^4}{4} + (\varepsilon_{\perp}^2 + V_0^2) v_F^2 \mathbf{p}^2}$$

$$V_0 = eE_{\perp}d$$

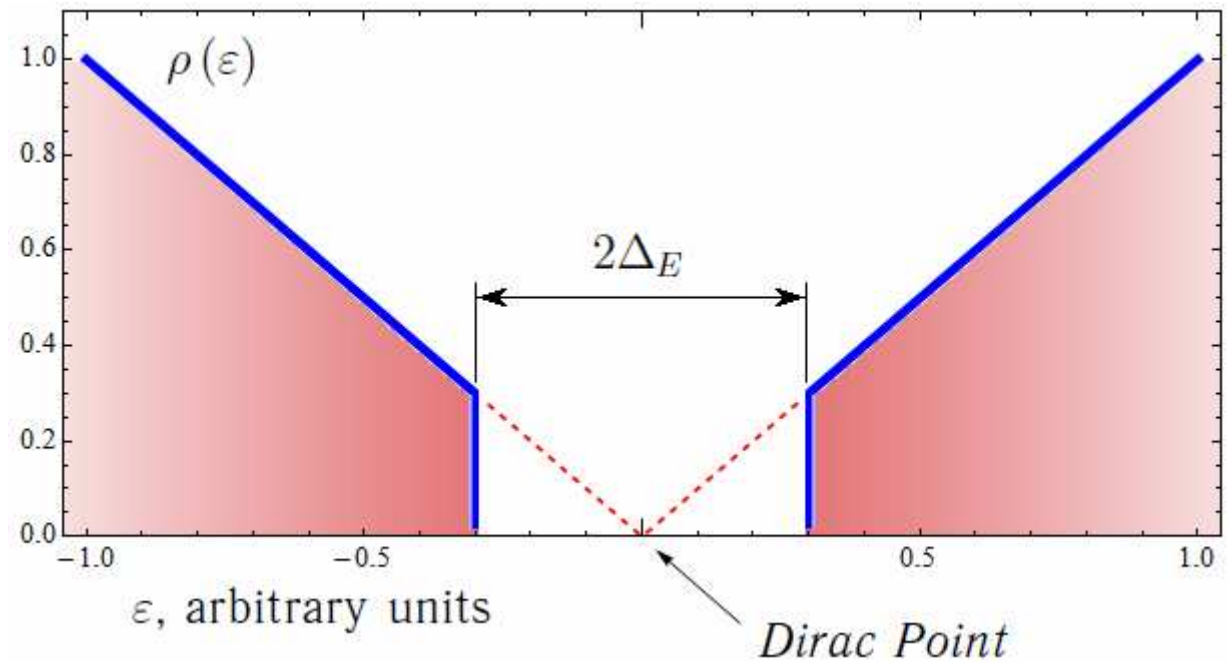
$$\varepsilon_{\perp} = 0.35 \text{ eV}$$

Динамическое наведение щели в зонной структуре графена ВЧ электрическим полем



Для волны, поляризованной по кругу:

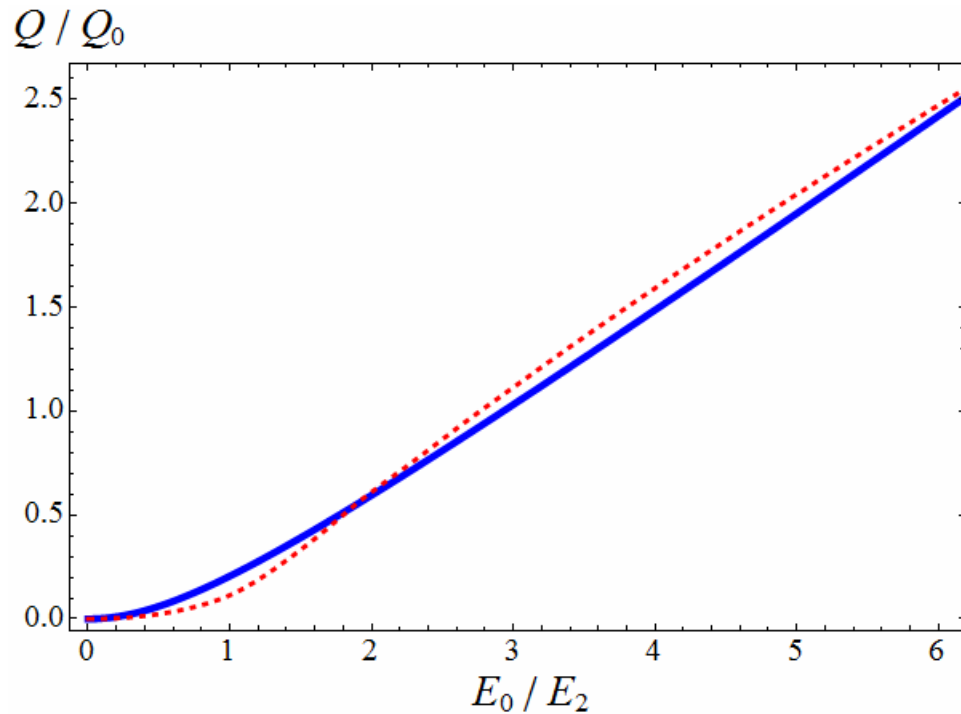
$$\Delta_E = \frac{e^2 v_F^2}{\hbar \omega^3} E^2$$



T. Oka, et al. // Phys. Rev. B 79, 081406 (2009)

H.L. Calvo, et al. // Appl. Phys. Lett. 98, 232103 (2011)

Поглощение ЭМ волны щелевым графеном



Зависимость поглощаемой графеном мощности от амплитуды ЭМ волны. Пунктирная линия – численный расчет, сплошная линия – расчет в приближении времени релаксации

$$E_2 = \Delta / e v_F \tau$$

Слабая волна: $E_0 \ll \omega \Delta / 2 v_F e$

$$Q = \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \frac{n_0 e^2 v_F^2 E_0^2}{\Delta} \quad (5.3)$$

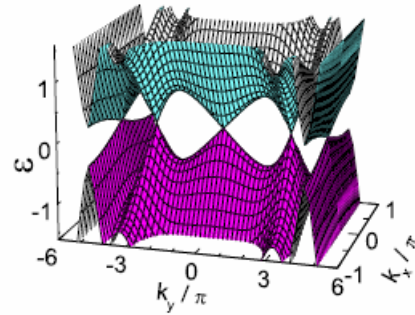
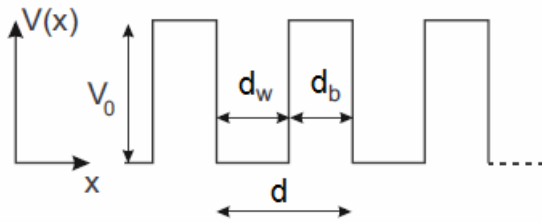
Сильная волна: $E_0 \gg \omega \Delta / 2 v_F e$

$$Q = \frac{4 n_0 e v_F}{4 + \omega^2 \tau^2} E_0 \operatorname{cth} \frac{\pi}{\omega \tau} \quad (5.4)$$

ГРАФЕНОВЫЕ СВЕРХРЕШЕТКИ (ГСР)

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГСР

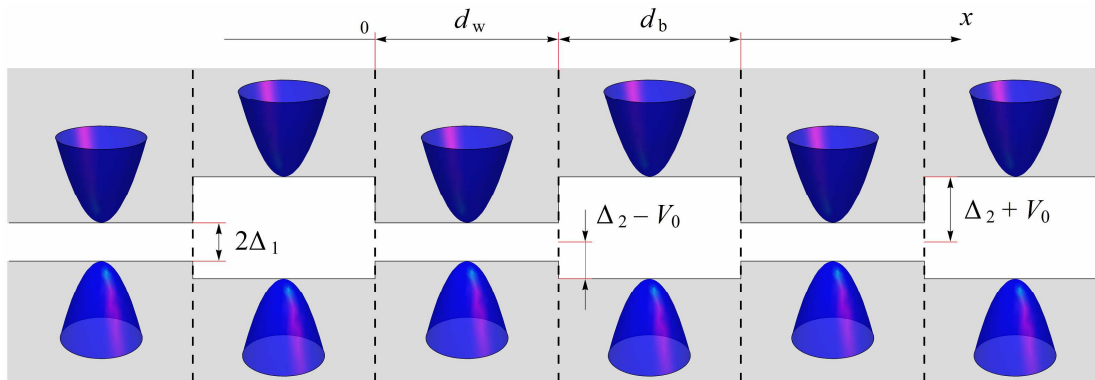
- периодический электростатический потенциал
М. Barbier, et al. // Phys. Rev. B 81, 075438 (2010)



$$\hat{H}_{\text{GSL}} = v_F \hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \hat{\mathbf{p}} + V(x)$$

$V(x)$ – прямоугольный профиль

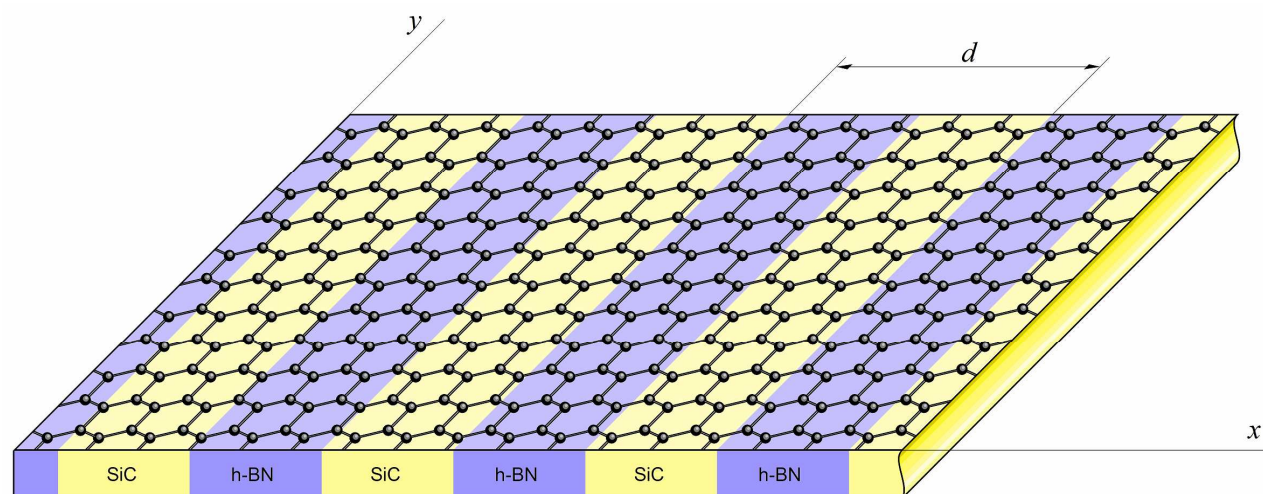
- периодическая подложка
П.В. Ратников // Письма в ЖЭТФ 90, 515 (2009)



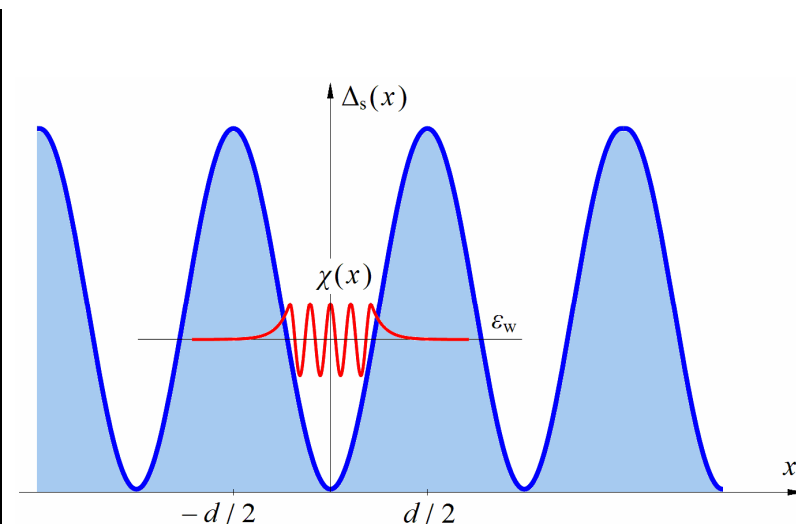
$$\hat{H}_{\text{GSL}} = v_F \hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \hat{\mathbf{p}} + \sigma_z \Delta_s(x) + V(x)$$

$V(x)$, $\Delta_s(x)$ – прямоугольные профили

ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТР ГРАФЕНОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ



ГСР, сформированная на полосчатой подложке



Профиль периодической модуляции щели в графене

$$\varepsilon(\mathbf{p}) = \sqrt{\Delta^2 + v_F^2 p_y^2 + \Delta_1^2 \left(1 - \cos \frac{p_x d}{\hbar}\right)} \quad (1.7)$$

$$\Delta \sim 0.07 - 0.2 \text{ эВ}, \quad \Delta_1 \sim 0.01 - 0.05 \text{ эВ}$$

С.В. Крючков, Е.И. Кухарь, В.А. Яковенко // Известия РАН. Серия физическая 74, 1759 (2010)

S.V. Kryuchkov, E.I. Kukhar' // Physica E 46, 25 (2012)

Генерация постоянного тока за счет суперпозиции переменных электрических полей (взаимное выпрямление переменных полей) в ГСР

Особенности взаимного выпрямления переменных полей в ГСР

Генерация возможна в случае, когда напряженности электрических полей осциллируют во взаимно перпендикулярных направлениях

Величиной и направлением выпрямленного тока можно управлять путем изменения дополнительного электрического поля поперечного по отношению к току

