



ЗИМНЯЯ ШКОЛА ПО ФИЗИКЕ

ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ, ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ

Плазменные колебания в низкоразмерных электронных системах

Заболотных Андрей Александрович

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Москва*



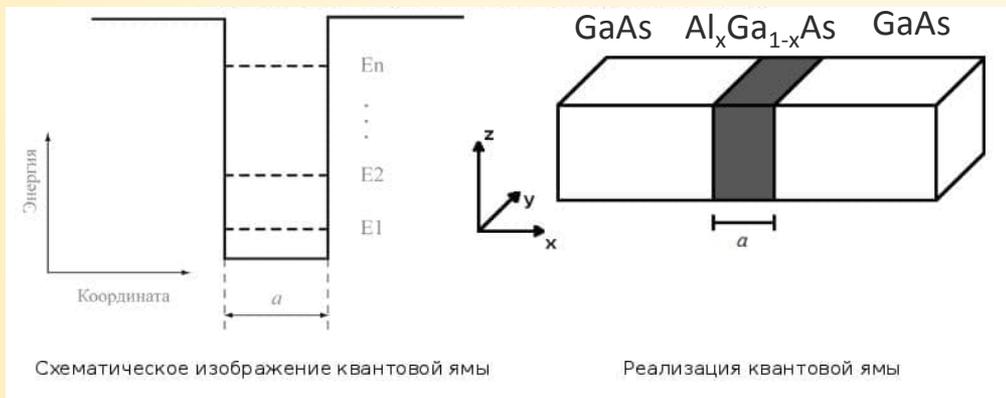
30 января 2021 года

План доклада

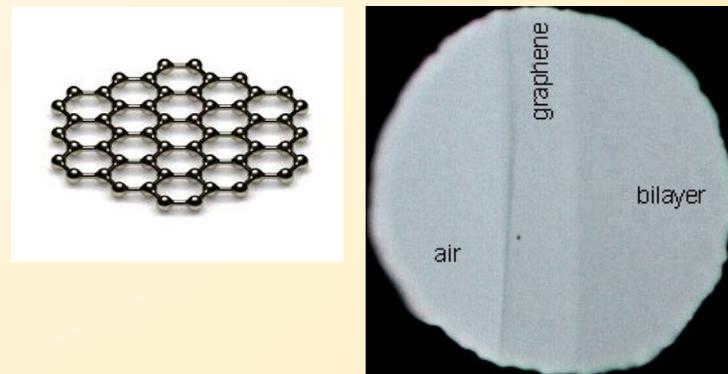
- Обзор: низкоразмерные системы
- Обзор: плазменные колебания – что такое и почему интересны
- Оригинальные результаты:
 - околосатворные плазмоны;
 - поглощение в 2D диске
- Заключение: чем мы ещё занимаемся

“Двумерные” электронные системы: примеры

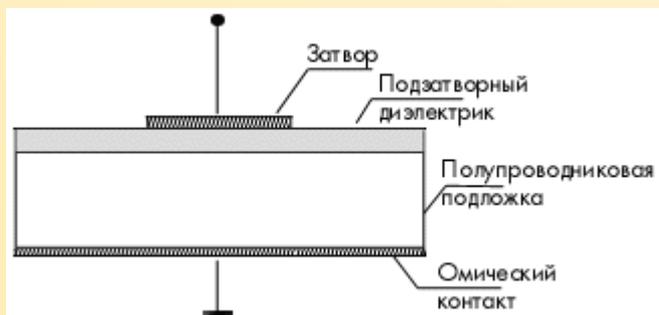
Квантовая яма



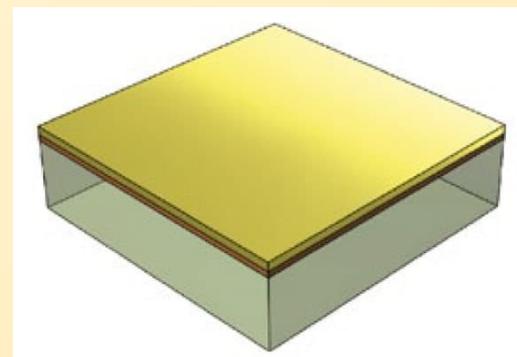
Графен



Структуры металл-изолятор-полупроводник (транзистор)

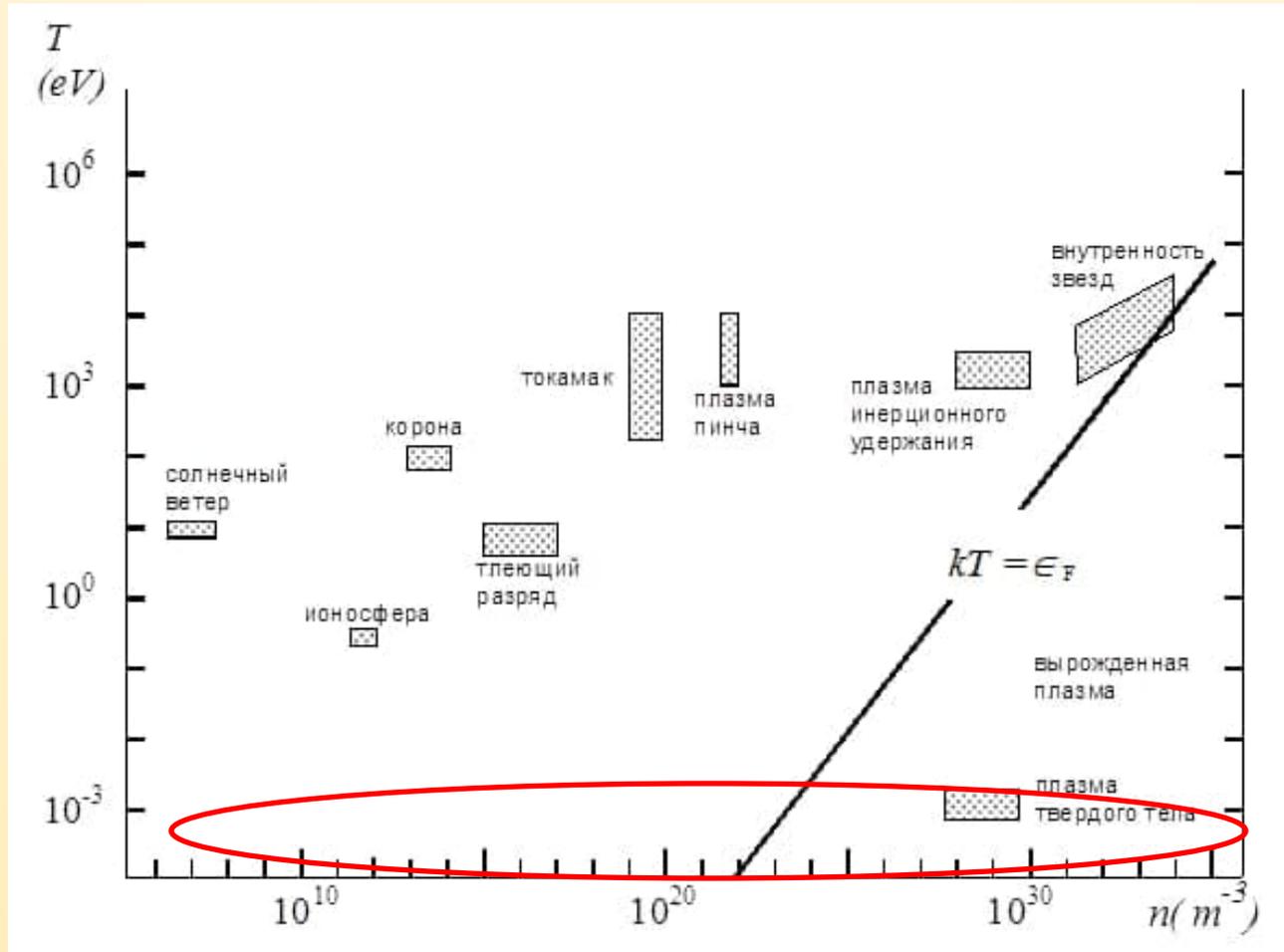


Тонкая металлическая пленка

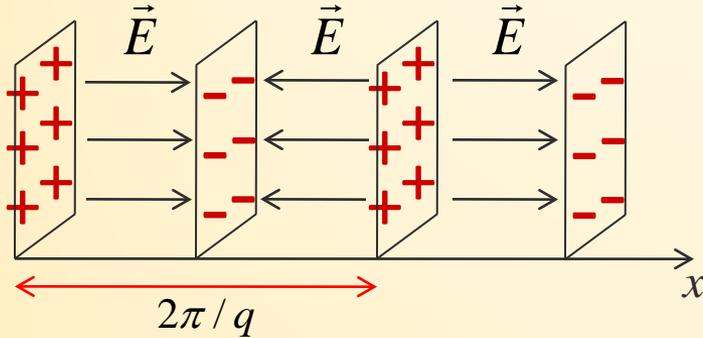


Не является двумерной для носителей заряда, но может быть двумерной с точки зрения плазменных колебаний

Плазма в окружающем мире



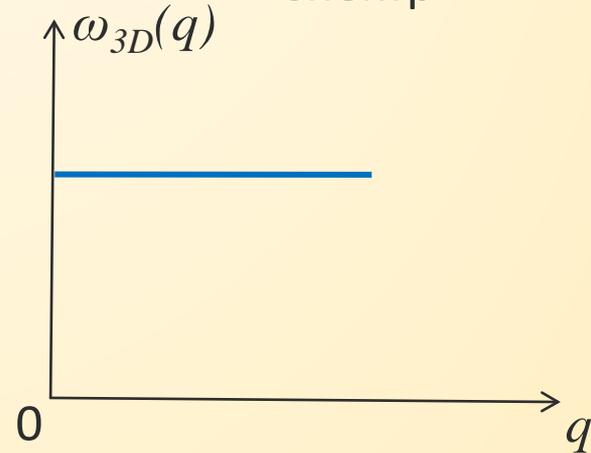
Плазменные колебания в 3D плазме



Второй закон Ньютона
для электрона в слое

$$m\ddot{x} = -eE$$
$$E = 2\pi\sigma = \text{const}(x)$$

Спектр

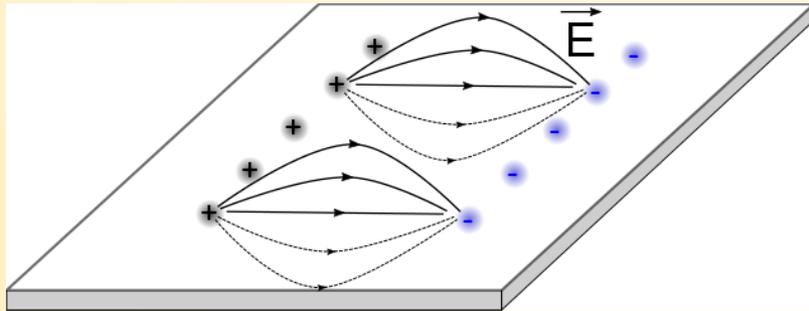


Получаем

$$\omega^2 \frac{\lambda}{2} = \frac{2\pi e\sigma}{m} \quad \Rightarrow \quad \omega_{3D}(q) = \sqrt{\frac{4\pi n_{3D} e^2}{m}}, \quad \text{где } n_{3D} = \sigma / (\lambda \cdot e)$$

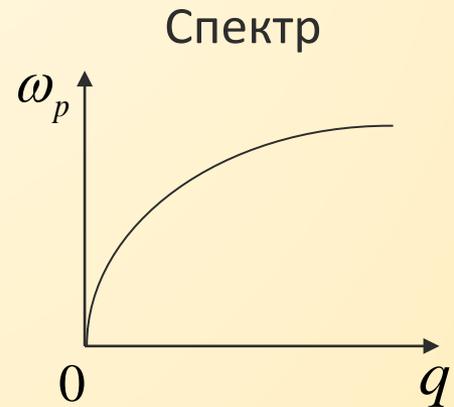
Частота не зависит от волнового вектора q .

2D плазмоны



Электрическое поле от заряженных «нитей» $E \propto \frac{1}{x}$

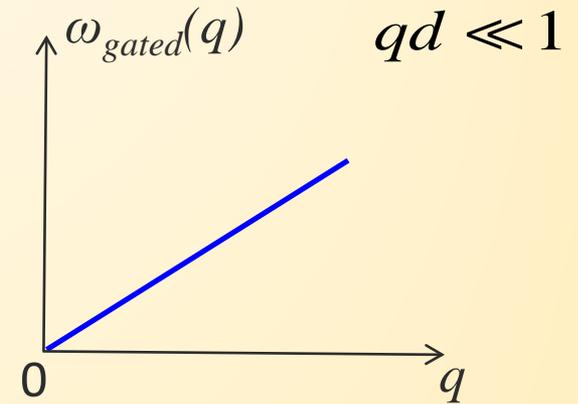
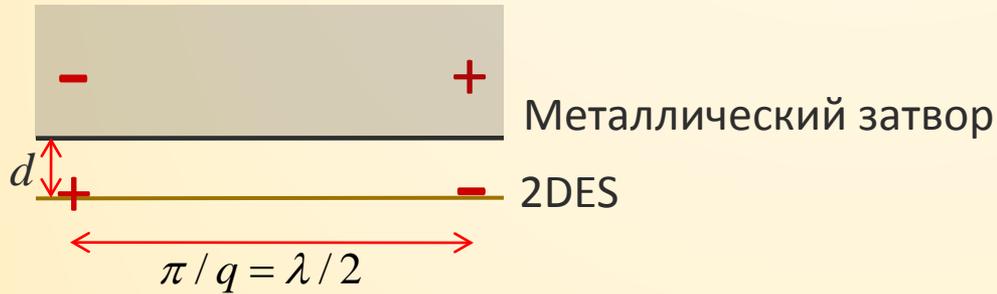
$$\omega_p(q) = \sqrt{\frac{2\pi n e^2}{m}} q, \quad \begin{array}{l} n - \text{2D концентрация} \\ \text{электронов,} \\ m - \text{эффективная масса} \end{array}$$



теория: Stern (1967)

эксперимент: Allen, Tsui, Logan (1977); Theis, Kotthaus, Stiles (1977)

Экранированные плазмоны в 2D электронной системе



Экранированная 2D электронная система

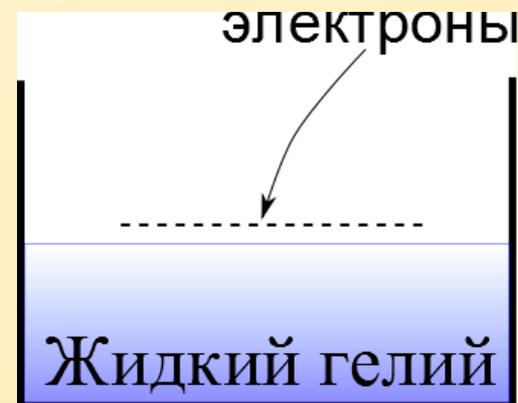
На расстоянии d параллельно 2D системе расположен бесконечный металлический затвор

$$\omega_{gated}(q) = qV_p \quad V_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2 d}{\kappa m}}$$

Теория: А.В. Чаплик (1972)

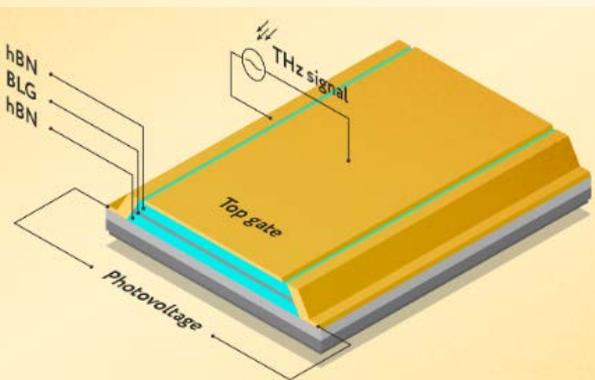
Эксперимент: Grimes, Adams (1976)

Электроны на поверхности жидкого гелия – ещё один из пример экранированной 2D системы



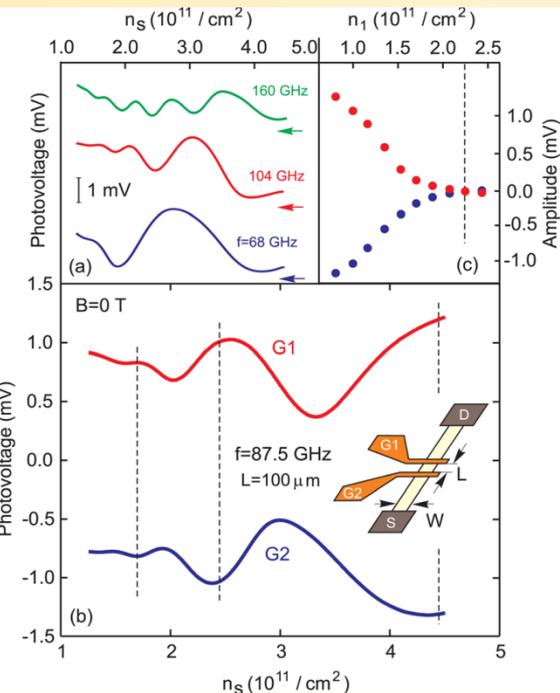
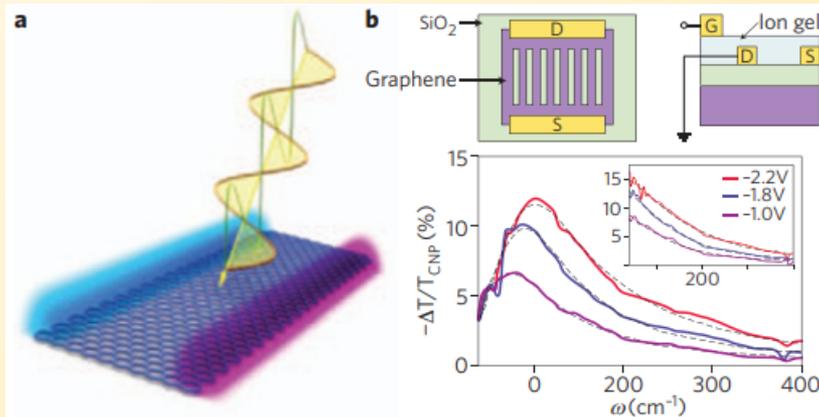
Применение плазмонов

Детекторы в терагерцовом диапазоне

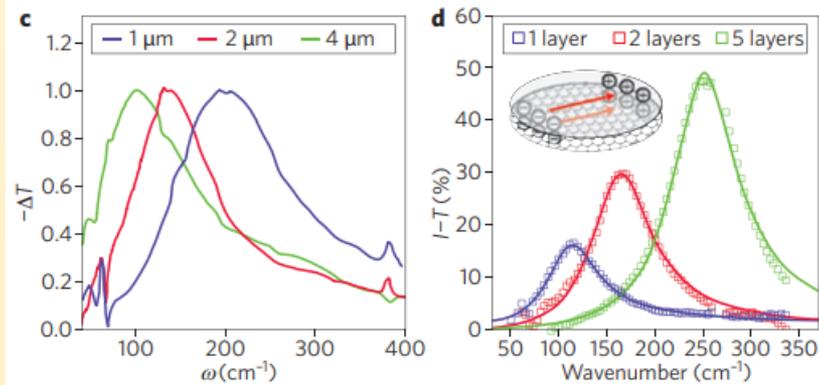


D. Bandurin, D. Svintsov et al. Nat. Commun (2018)

Электрооптические (настраиваемые) приборы (фильтры, модуляторы и др.)



V. M. Muravev, I. V. Kukushkin, Appl. Phys. Lett. 100, 082102 (2012)



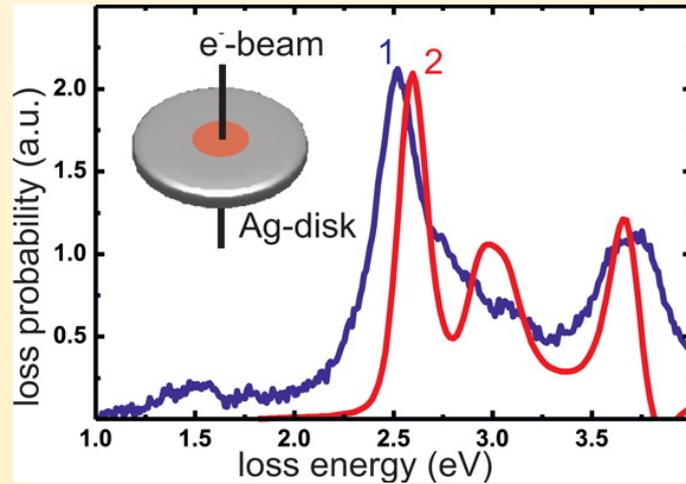
A.N. Grigorenko, M. Polini, K.S. Novoselov Nat. Photonics (2012)

- Потенциальные (будущие) приложения:
- Источники (генераторы) ЭМ излучения
 - Различные сенсоры

Пример эксперимента и моделирования плазменных возбуждений в диске

1. Experiment

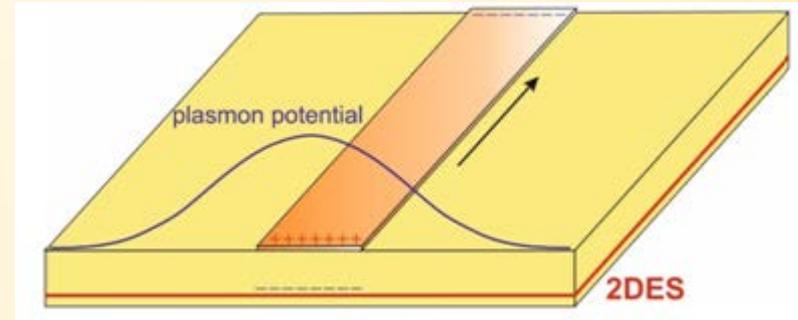
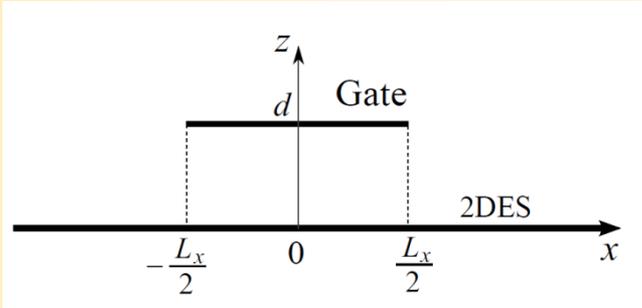
2. Simulation



Franz-Philipp Schmidt et al., “Dark Plasmonic Breathing Modes in Silver Nanodisks”, NanoLett. **12**, 5780–5783 (2012)

Некоторые оригинальные результаты по плазменным колебаниям

Околозатворные 2D плазмоны



Бесконечная 2D система
+ идеально проводящий затвор в виде полосы
шириной L_x . На затвор напряжение не подано,
2D система однородна.

Задача: найти плазменные моды,
распространяющиеся *вдоль* затвора и
локализованные около него.

Приближения:

-- «близкий» затвор $qd \ll 1$

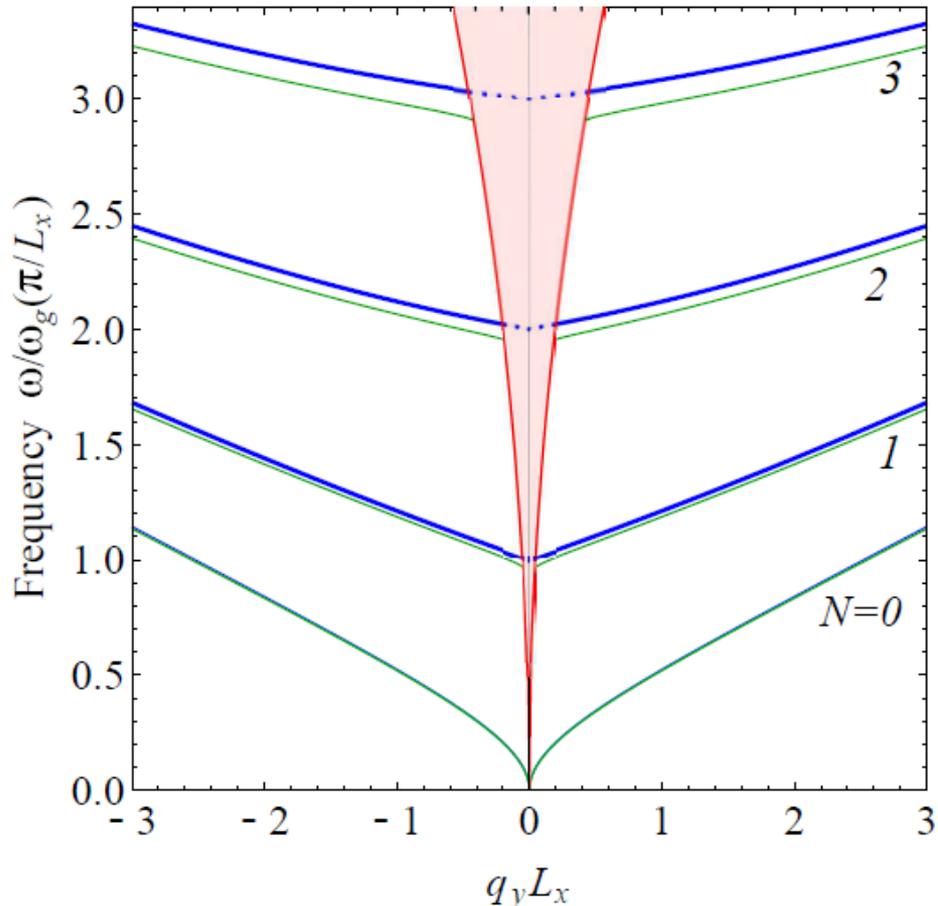
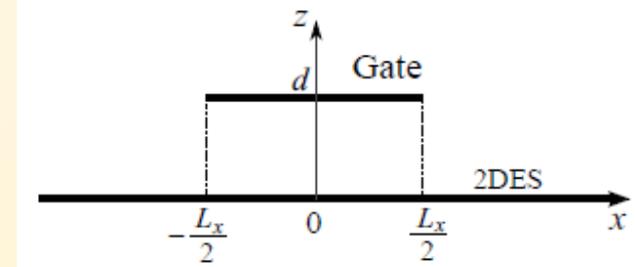
-- частота искомой моды мала по сравнению
с частотой неэкранированного 2D плазмона
с тем же q

$$\frac{\kappa m \omega^2}{2\pi n e^2 q} = \frac{\omega^2}{\omega_p^2(q)} \ll 1$$

Околозатворные плазмоны: спектр

Синие линии – спектр, найденный аналитически,
зелёные – найденный численно.

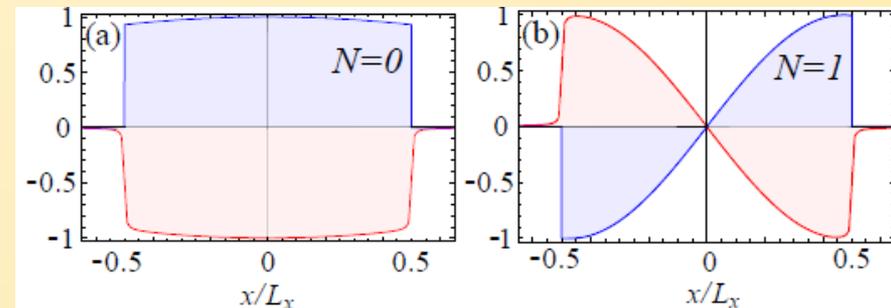
Красный – корневой спектр 2D плазмонов вдали от затвора



Основная мода $N=0$ в длинноволновом пределе $q_y L_x \ll 1$ имеет необычный закон дисперсии

$$\omega_{N=0}(q_y) = \sqrt{\frac{8\pi e^2 n d}{m\kappa} \frac{|q_y|}{L_x}}$$

Распределение плотности заряда плазмона в затворе (синий) и в 2D системе (красный)



$$\omega_g(\pi/L_x) = \frac{\pi}{L_x} \sqrt{\frac{4\pi n e^2 d}{\kappa m}}$$

Экспериментальное обнаружение

V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin,
I.V. Andreev, S.I. Gubarev, I.V. Kukushkin,
Phys. Rev. B **99**, 241406(R) (2019)

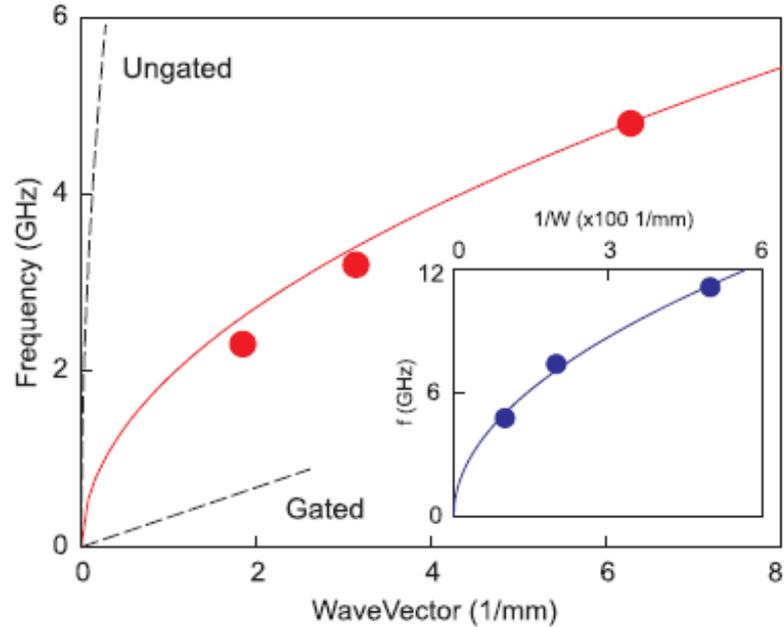
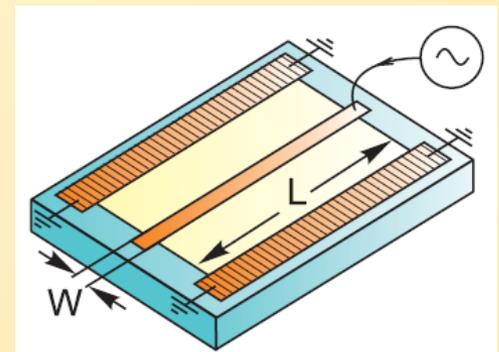
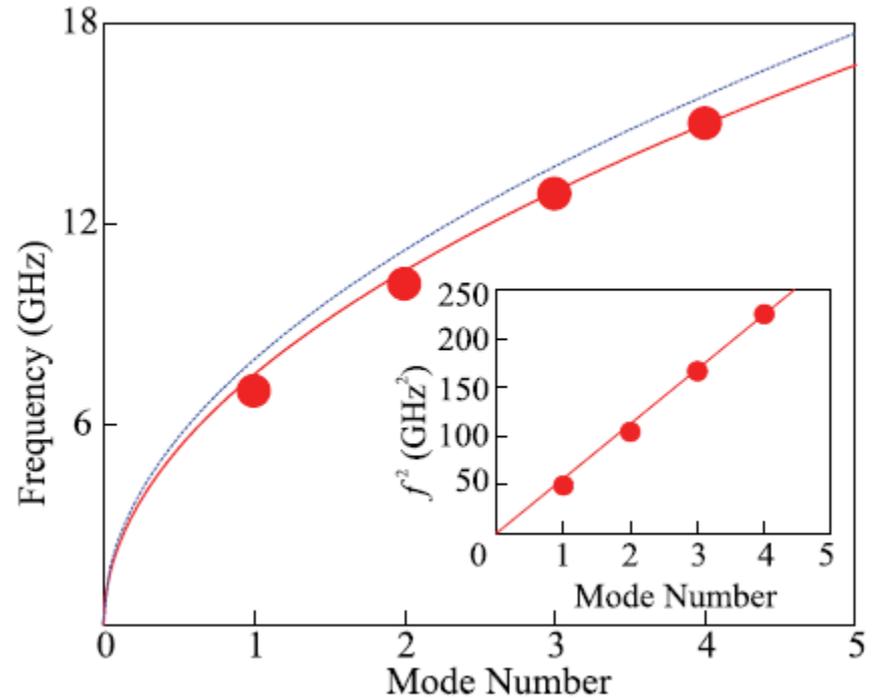


FIG. 2: Proximity plasmon dispersion measured for the gate strip width, $W = 100 \mu\text{m}$, gate strip length, $L = 0.5, 1.0$ and 1.7 mm and electron density, $n_s = 2.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. The theoretical curve is plotted with solid red line. For comparison, the calculated dispersion of ordinary gated and ungated 2D plasmons is indicated by dashed lines. The inset shows the dependence of plasmon frequency on $1/W$ with blue circles and solid line denoting measured and calculated data, respectively.

$$\omega_0(q_y) = \sqrt{\frac{8\pi e^2 n d}{m\kappa} \frac{|q_y|}{W}} \quad q_y = \frac{\pi}{L} N, N = 1, 2, \dots$$

А.М. Зарезин, П.А. Гусихин, В.М. Муравьев,
И.В. Кукушкин, *Письма в ЖЭТФ* **111**, 316 (2020).



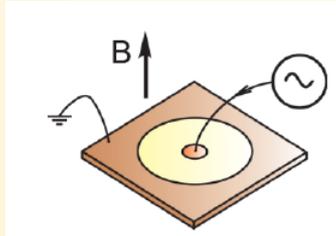
Околзатворные плазмоны: продолжение исследований

1. Геометрия диска

Теория:

AZ and V. Volkov,

Semicond. **53**, 1870 (2019)

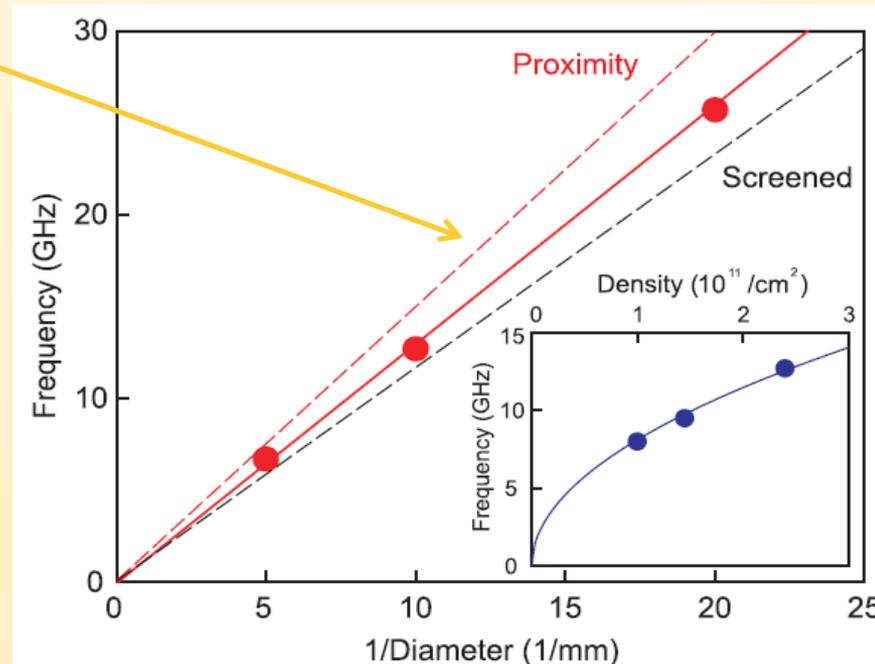


Эксперимент:

V. M. Muravev, A. M. Zarezin, P. A.

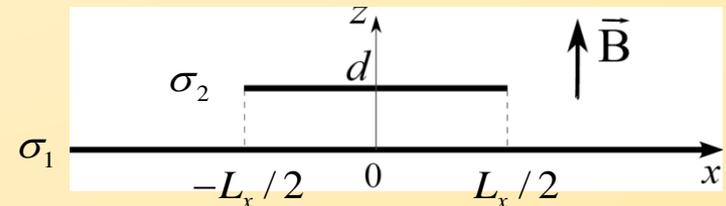
Gusikhin, A. V. Shupletsov and I. V.

Kukushkin, *Phys. Rev. B* **100**, 205405 (2019)



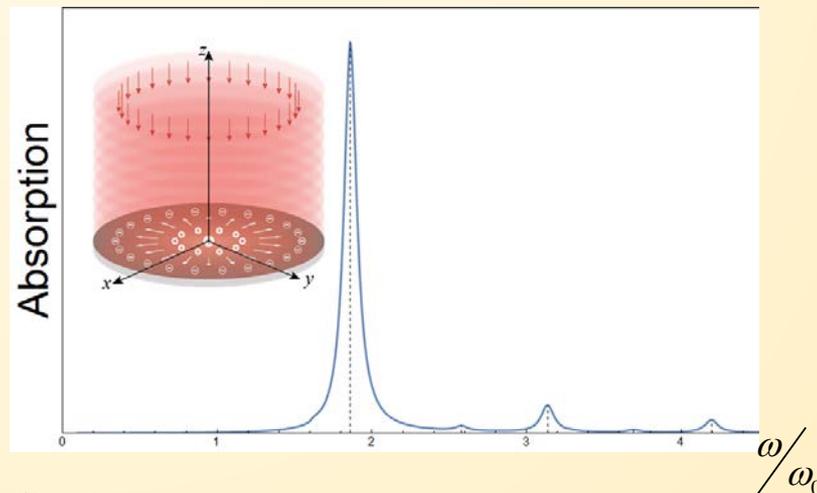
2. Учет проводимости затвора (в геометрии полосы)

AZ and V. Volkov, *Phys. Rev. B* **102**, 165306 (2020)



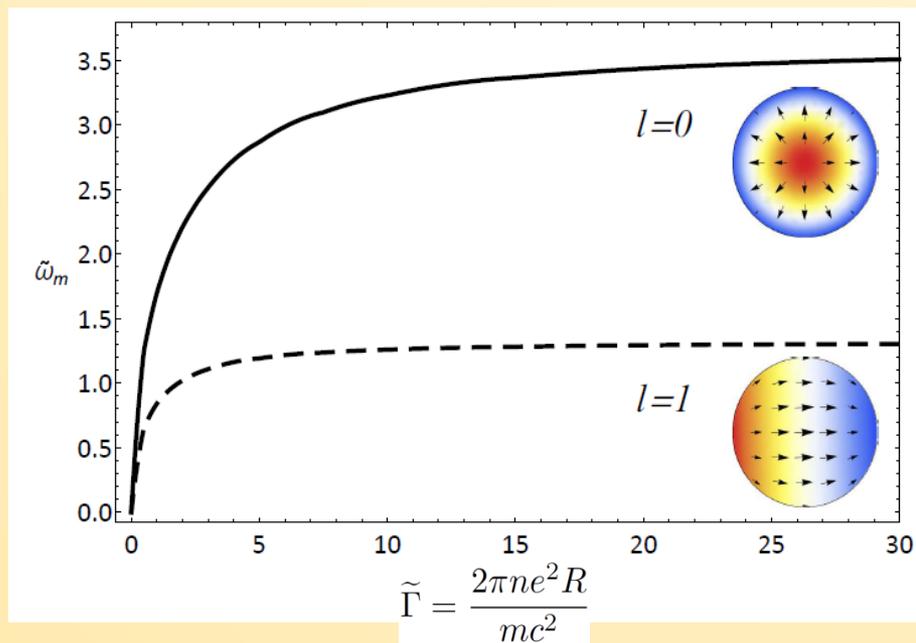
Поглощение электромагнитного излучения в 2D дисках

I.V. Zagorodnev, D.A. Rodionov, A.A. Zabolotnykh, arXiv:2011.00877

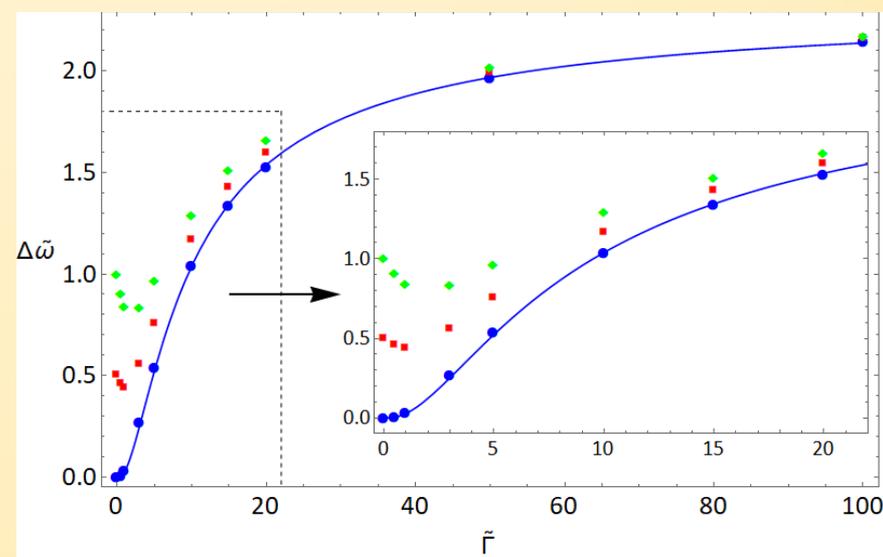


$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2\pi e^2 n}{mR}}$$

Положение максимума осесимметричного ($l=0$) и фундаментального ($l=1$) резонанса, $n_r=1$



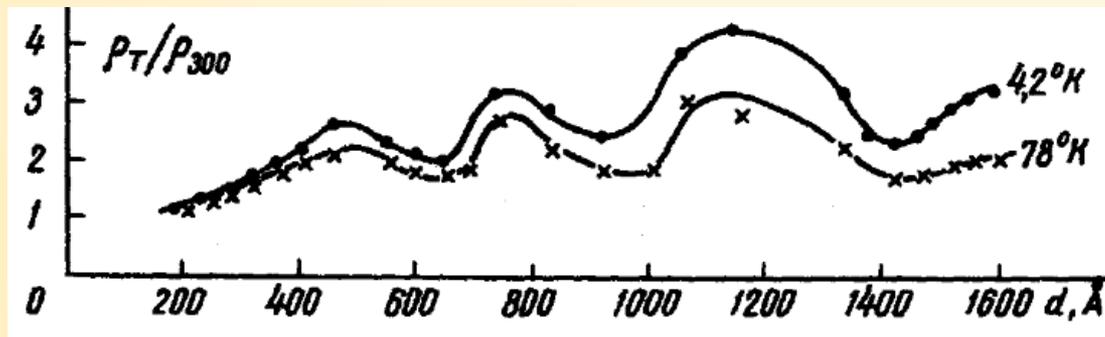
Ширина линии основного осесимметричного ($l=0, n_r=1$) резонанса



**Заключение: чем мы ещё
занимаемся**

История нашей лаборатории в ИРЭ

– Наблюдение квантово-размерного эффекта



Ю.Ф. Огрин, В.Н. Луцкий, М.И. Елинсон "О наблюдении квантовых размерных эффектов в тонких пленках висмута", Письма в ЖЭТФ **3**, 114 (1965).

Рис. Зависимость сопротивления пленок висмута в зависимости от толщины пленки для двух температур: 4,2 К, 78 К. Наличие осцилляций доказывает существование двумерного электронного газа.

– Точная теория краевых плазмонов и магнитоплазмонов

В.А. Волков, С.А. Михайлов, "Теория краевых магнитоплазмонов в двумерном электронном газе", Письма в ЖЭТФ **42**, 450 (1985); "Краевые магнитоплазмоны: низкочастотные слабозатухающие возбуждения в неоднородных двумерных электронных системах", ЖЭТФ **94**, 217 (1988).

– Оригинальный подход к описанию одночастичных состояний на краю (или поверхности) полупроводниковых материалов

В.А. Волков, В.В. Еналдиев, И.В. Загороднев "Электронные поверхностные состояния в полупроводниках и полуметаллах", Физматкнига, 2018.

Актуальные научные исследования в нашей лаборатории

Мы занимаемся фундаментальными теоретическими и экспериментальными исследованиями в следующих направлениях:

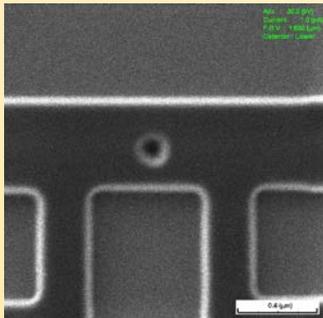
• Теория

- Плазменные колебания в низкоразмерных электронных системах
- Поверхностные электронные состояния в дираковских материалах, включая графен и топологические изоляторы

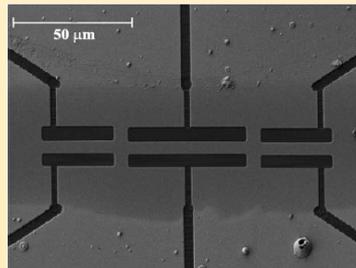
• Эксперимент

Транспортные измерения, электронная микроскопия и наноструктурирование следующих материалов

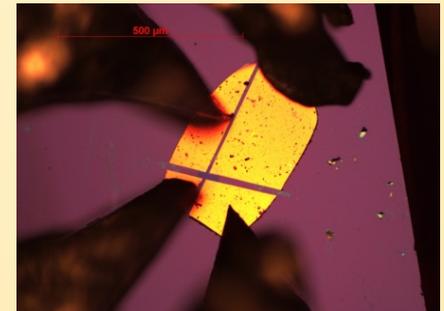
- Квази-1D (NbSe_3 , TaS_3), квази-2D (TbTe_3) проводники с волной зарядовой плотности
- Тонкий графит и графен
- Топологические изоляторы (Bi_2Se_3)
- Сверхпроводники на основе железа (FeSe)



Наноструктурированный графит



Мостики из топологическим материалов (полученные с помощью FIB)



Золотые контакты к графену

Сотрудники нашей лаборатории



Контакты

Андрей Александрович Заболотных: zabolotnyh_andre@mail.ru



Руководитель лаборатории
Игорь Витальевич Загороднев
igor.zagorodnev@gmail.com



Табличка у дверей нашей лаборатории

Спасибо за внимание!

Спасибо за внимание!