Плазмоника для систем терагерцовой электроники

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

Институт физики твердого тела (ИФТТ РАН)



Институт физики твердого тела РАН





За 2015 год сотрудниками института опубликовано 320 статей в ведущих международных и отечественных научных журналах: Science, Nature, Physical Review, Scientific Reports, Applied Physics Letters, Physica, Surface Science, Physica Status Solidi, Успехи физических наук, Письма в ЖЭТФ и другие.

Институт физики твердого тела РАН





ОТЗЫВЫ ВЫПУСКНИКОВ КАФЕДРЫ:

Андрей Гейм

Выпускник кафедры 1982 года, Профессор Манчестерского университета (Великобритания).

«Охотно принимаю и готов принимать в будущем в свою лабораторию выпускников кафедры ФТТ, уровень подготовки которых, по-прежнему, очень высок.»





Игорь Кукушкин

Выпускник кафедры физики твердого тела 1984 г. Доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корр. РАН, главный научный сотрудник ИФТТ РАН.

«Трудно перечислить всех замечательных Ученых, с которыми мне посчастливилось общаться в Черноголовке, поскольку в этом месте, наверное, самая высокая в мире плотность интеллекта на единицу площади. Кроме уникальной возможности общения с умными людьми и профессиональными учеными, в ИФТТ собраны самые современные установки, так что остается просто прийти и реализовать практически любую интересную идею. Приходите и реализуйте свой потенциал!»





Государственная премия РФ им. Зворыкина 2008 г.

Алексей Устинов

Выпускник кафедры 1984 года, Профессор Технологического института Карлсруэ (Германия).

«Великолепное место для развития своих научных талантов и идей. Рекомендую кафедру физики твердого тела всем интересующимся физикой студентам!»



Последний технологически слабо освоенный частотный диапазон электромагнитного спектра.













НЕМТ транзистор



НЕМТ транзистор



$$\sigma = \frac{ne^2\tau/m^*}{1-\underline{i}\omega\tau}$$

Плазменный член

НЕМТ транзистор



$$\omega \tau = 1$$
 $\sigma = \frac{ne^2 \tau/m^*}{1 - \underline{i}\omega \tau}$ f = 500 ГГц

Плазменный член





q

Продольные и поперечные плазменные возбуждения

Поперечные плазмоны (электромагнитные)

Продольные плазмоны (электростатические)



• • • • • • •





SEPTEMBER 1, 1933 PHYSICAL REVIEW

VOLUME 44

Remarkable Optical Properties of the Alkali Metals

R. W. WOOD, Johns Hopkins University



Продольные 3D плазменные волны в металлах



Двумерные электронные системы на базе полупроводниковых наноструктур

Wafer	Density (1/cm ²)	Mobility (cm ² /Vs)
# 1	1.4 x 10 ¹¹	0.7 x 10 ⁶
# 2	1.4 x 10 ¹²	0.8 x 10 ⁵
# 3	6.4 x 10 ¹²	0.6 x 10 ⁵



Методика





В

Продольные 2D плазменные возбуждения







Observation of the Two-Dimensional Plasmon in Silicon Inversion Layers

S. J. Allen, Jr., D. C. Tsui, and R. A. Logan Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974 (Received 18 March 1977) Продольные 2D плазменные возбуждения

q = 2.4/d



Продольные 2D плазмоны в магнитном поле



S. J. Allen, Jr., H. L. Störmer, and J. C. M. Hwang^{*} Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974

Электродинамический отклик ДЭС

PHYSICAL REVIEW B 93, 041110(R) (2016) Fine structure of cyclotron resonance in a two-dimensional electron system

V. M. Muravev, I. V. Andreev, S. I. Gubarev, V. N. Belyanin, and I. V. Kukushkin



d

Электродинамический отклик ДЭС





Effective plasma frequency: $\omega_{p} = \sqrt{\frac{n_{s}e^{2}}{m^{*}\varepsilon_{0}(\varepsilon - 1)d}}$

PHYSICAL REVIEW B 102, 121404(R) (2020)

Rapid Communications

Superluminal electromagnetic two-dimensional plasma waves

P. A. Gusikhin[®], V. M. Muravev, and I. V. Kukushkin Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka 142432, Russia

Поперечные 2D плазменные волны

Terahertz plasma edge engineering in semiconductor membranes with a two-dimensional electron layer

Cite as: Appl. Phys. Lett. 120 , 031104 (2022); doi: 10.1063/5.0077188 Submitted: 31 October 2021 · Accepted: 5 January 2022 · Published Online: 18 January 2022	View Online	Labort Citation	
---	-------------	-----------------	--

A. S. Astrakhantseva,¹ 🙃 A. Shuvaev,² 💿 P. A. Gusikhin,¹ 💿 A. Pimenov,² 💿 I. V. Kukushkin,¹ and V. M. Muravev^{1,a)} 💿



Поперечные 2D плазменные волны





Гибридизация поперечных плазменных волн с Фабри-Перо резонансами



PHYSICAL REVIEW LETTERS 126, 136801 (2021)

Discovery of Two-Dimensional Electromagnetic Plasma Waves

A. Shuvaevo, ^{1,*} V. M. Muravev,^{2,*} P. A. Gusikhino,² J. Gospodaričo,¹ A. Pimenovo,¹ and I. V. Kukushkino² ¹Institute of Solid State Physics, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria ²Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka 142432, Russia Гибридизация поперечных плазменных волн с Фабри-Перо резонансами



Гибридизация поперечных плазменных волн с Фабри-Перо резонансами



Плазмонный и «металлический» режимы для Фабри-Перо резонансов

 $\omega \tau \gg 1$





PHYSICAL REVIEW B 104, 115408 (2021)





Терагерцовый фазовращатель

$$\sigma(\omega) = \frac{n_s e^2 \tau}{m^*} \frac{1}{1 + i\omega\tau},$$

$$Z_{2\text{DES}}(\omega) = R + i\omega L_{\text{K}}, \qquad L_{\text{K}} = \frac{m^*}{n_s e^2}$$

 $\omega L_{\rm K} \gg R$, which is equivalent to $\omega \tau \gg 1$

2DES

Applied Physics Letters ARTICLE scitation.org/journal/apl

Tunable terahertz phase shifter based on GaAs semiconductor technology

Cite as: Appl. Phys. Lett. **121**, 051101 (2022); doi: 10.1063/5.0101737 Submitted: 3 June 2022 · Accepted: 14 July 2022 · Published Online: 1 August 2022

V. M. Muravev,^{1,a)} 💿 A. Shuvaev,² 😰 A. S. Astrakhantseva,^{1,3} 💿 P. A. Gusikhin,¹ I. V. Kukushkin, ¹ and A. Pimenov² 💿



$$r = \frac{\frac{i\omega L_{\rm K} Z_0}{i\omega L_{\rm K} + Z_0} - Z_0}{\frac{i\omega L_{\rm K} Z_0}{i\omega L_{\rm K} + Z_0} + Z_0}$$

$$t = 1 + r = \frac{2}{2 + \frac{Z_0}{i\omega L_{\rm K}}}$$

$$\Delta \phi = \arg t = \arctan \frac{Z_0}{2\omega L_{\rm K}}$$

Реализация прибора





Терагерцовый фазовращатель



Терагерцовый фазовращатель





Перспектива – создание терагерцовой ФАР





Грант РНФ 18-72-10072 Грант РНФ 19-72-30003



Российский научный фонд

Благодарности



Плазмоника для систем терагерцовой электроники

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

Институт физики твердого тела (ИФТТ РАН)



Longitudinal 2D plasma excitations



Longitudinal 2D plasma excitations

$$\omega_p^2(q) = \frac{2\pi n_s e^2}{m^* \epsilon(q)} q \longrightarrow q^2 = \epsilon \omega^2 / c^2 + \left(\frac{\omega^2}{2\pi n_s e^2 / m^* \bar{\epsilon}}\right)^2$$



Observation of Retardation Effects in the Spectrum of Two-Dimensional Plasmons

I.V. Kukushkin,^{1,2} J.H. Smet,¹ S.A. Mikhailov,¹ D.V. Kulakovskii,^{1,2} K. von Klitzing,¹ and W. Wegscheider^{3,4}

Superluminal electromagnetic plasma waves - Hypothesis



Wave Vector

Experimental set-up



Transverse electromagnetic plasma waves





«Проксимити» плазмоны

PHYSICAL REVIEW B 99, 165304 (2019)

PHYSICAL REVIEW B **99**, 241406(R) (2019)

Rapid Communications

Interaction of gated and ungated plasmons in two-dimensional electron systems

A. A. Zabolotnykh and V. A. Volkov^{*} Kotelnikov Institute of Radio-engineering and Electronics of the RAS, Mokhovaya 11-7, Moscow 125009, Russia and Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskii per. 9, Dolgoprudny, Moscow region 141700, Russia

Two-dimensional plasmon induced by metal proximity

V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, A. M. Zarezin, I. V. Andreev, S. I. Gubarev, and I. V. Kukushkin Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka, 142432 Russia



«Релятивистские» плазмоны



Novel Relativistic Plasma Excitations in a Gated Two-Dimensional Electron System

V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, and I. V. Kukushkin

A tunable plasmonic resonator using kinetic 2D inductance and patch capacitance

Cite as: Appl. Phys. Lett. **117**, 151103 (2020); doi: 10.1063/5.0026034 Submitted: 20 August 2020 · Accepted: 28 September 2020 · Published Online: 14 October 2020



V. M. Muravev,^{a)} D N. D. Semenov, I. V. Andreev, D P. A. Gusikhin, and I. V. Kukushkin



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{1/4 + \ln(D/d)}} \sqrt{\frac{n_s e^2 h}{m^* \varepsilon \varepsilon_0}} \frac{2}{d} \qquad (D/d > 2)$$



Superluminal plasma waves



Transverse electromagnetic plasma waves





Influence of magnetic field



Simultaneous observation longitudinal and transverse 2D plasma waves





V. M. Muravev, I. V. Andreev, S. I. Gubarev, V. N. Belyanin, and I. V. Kukushkin



 $\omega \tau \gg 1$

Fabry-Perot peak position. Dirty regime.



Fabry-Perot peak position. Dirty regime.



Discovery of Two-Dimensional Electromagnetic Plasma Waves

A. Shuvaev^{1,*} V. M. Muravev^{2,*} P. A. Gusikhin³² J. Gospodarič³¹ A. Pimenov³¹ and I. V. Kukushkin³² ¹Institute of Solid State Physics, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria ²Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka 142432, Russia

PHYSICAL REVIEW B 102, 121404(R) (2020)

Rapid Communications

Superluminal electromagnetic two-dimensional plasma waves

P. A. Gusikhin[®], V. M. Muravev, and I. V. Kukushkin Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka 142432, Russia

Effect of a Conductive Layer on Fabry-Pérot Resonances

 P. A. Gusikhin^a, V. M. Muravev^a, K. R. Dzhikirba^a, A. Shuvaev^b, A. Pimenov^b, I. V. Kukushkin^a ^a Institute of Solid State Physics, RAS, Chernogolovka, 142432 Russia
 ^b Institute of Solid State Physics, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria

Conclusions

- We have experimentally discovered electromagnetic plasma waves propagating in a complex system of 2D plasma on a dielectric substrate—the arrangement commonly used in semiconductor devices.
- We show that the spectrum of these electromagnetic waves has several unique features. First, it is superluminal, which is characteristic of the propagating modes. Second, the electromagnetic plasma waves exhibit strong hybridization with Fabry-Perot light modes.
- We demonstrate that, in the presence of a finite magnetic field, electromagnetic 2D plasma resonance splits into two modes, with each one excited in a particular direction of the circular polarization.

Поглощение



FIG. S6. Absorption maxima in B-sweeps, calculated for the 2DES on a dielectric substrate of thickness d = 0.2 mm. Red, green, and blue curves refer to the electron densities $n_{s1} = 1.4 \times 10^{11}$ cm⁻², $n_{s2} = 1.4 \times 10^{12}$ cm⁻², and $n_{s3} = 6.4 \times 10^{12}$ cm⁻², respectively. Solid black line indicates the single-particle CR $\omega_c = eB/m^*$. Dashed lines denote the frequencies of the N = 1 and 2 Fabry-Pérot modes for the GaAs substrate.

Низкочастотные геликоидальные волны в металлах



SOVIET PHYSICS JETP VOLUME 11, NUMBER 1 JULY, 1960

POSSIBLE TRANSMISSION OF ELECTROMAGNETIC WAVES THROUGH A METAL IN A STRONG MAGNETIC FIELD

O. V. KONSTANTINOV and V. I. PEREL'

Leningrad Physico-technical Institute, Academy of Sciences U.S.S.R.

Submitted to JETP editor, June 24, 1959

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 38, 161-164 (January, 1960)

It is shown that an electromagnetic wave propagating along a magnetic field can penetrate a metal plate perpendicular to the field if the Larmor frequency is higher than the frequency of the propagating wave and much higher than the collision frequency, and if the electron Larmor radius is smaller than the wavelength in the metal.

VOLUME 7, NUMBER 9

PHYSICAL REVIEW LETTERS

NOVEMBER 1, 1961

OSCILLATORY GALVANOMAGNETIC EFFECT IN METALLIC SODIUM*

R. Bowers, C. Legendy, and F. Rose

Laboratory of Atomic and Solid-State Physics and Department of Physics, Cornell University, Ithaca, New York (Received October 5, 1961)



 $\omega \tau \gg 1$



Плазменные возбуждения в двумерных системах



Observation of Two-Dimensional Plasmons and Electron-Ripplon Scattering in a Sheet of Electrons on Liquid Helium

C. C. Grimes and Gregory Adams Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974 (Received 12 November 1975)

Observation of the Two-Dimensional Plasmon in Silicon Inversion Layers

S. J. Allen, Jr., D. C. Tsui, and R. A. Logan Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974 (Received 18 March 1977)