

# Детектирование ТГц излучения двумерными полупроводниками

Аспирант 3 г.о.:

Кадыков А.М.

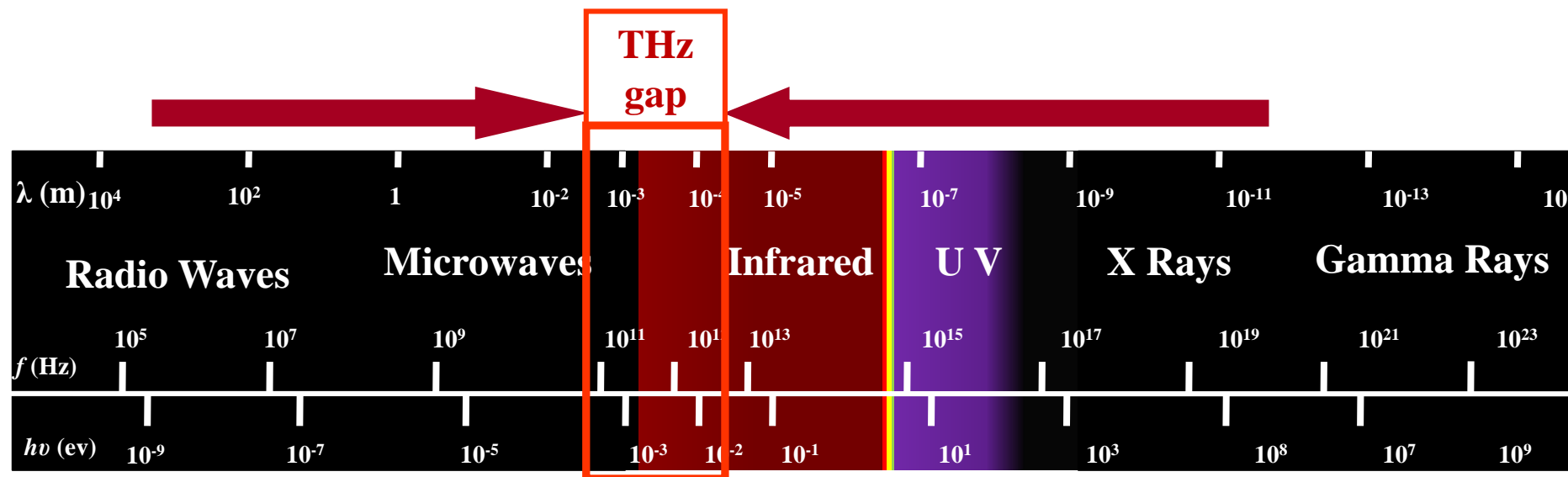
Научные руководители:

Морозов С.В.<sup>1</sup>, Терре F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

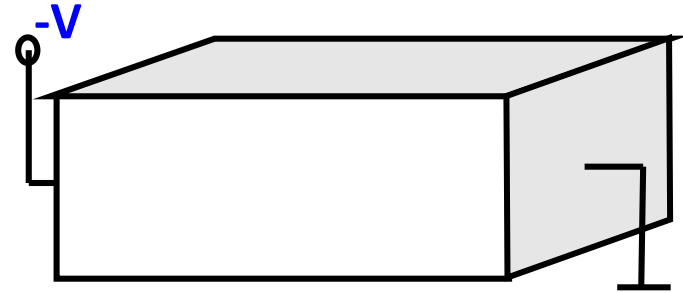
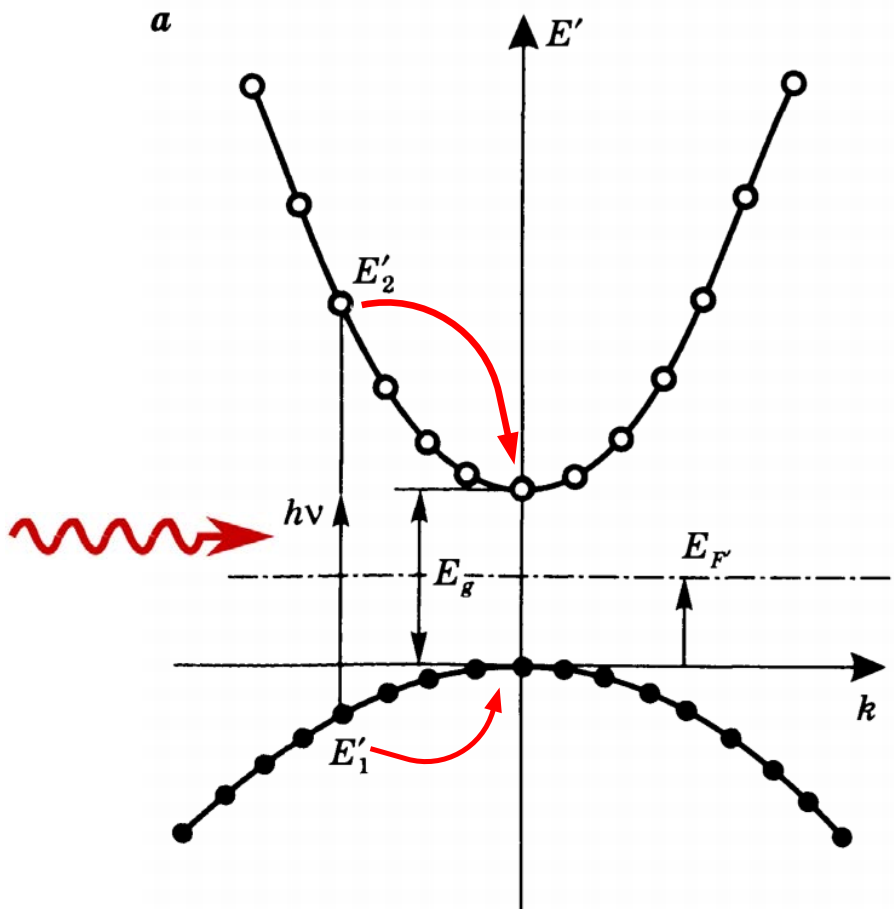
<sup>2</sup>Laboratoire Charles Coulomb, Universite Montpellier 2, France

# ТГц диапазон



- Безопасное сканирование
- Высокоскоростная передача данных
- Исследование вращательных спектров молекул
- И др.

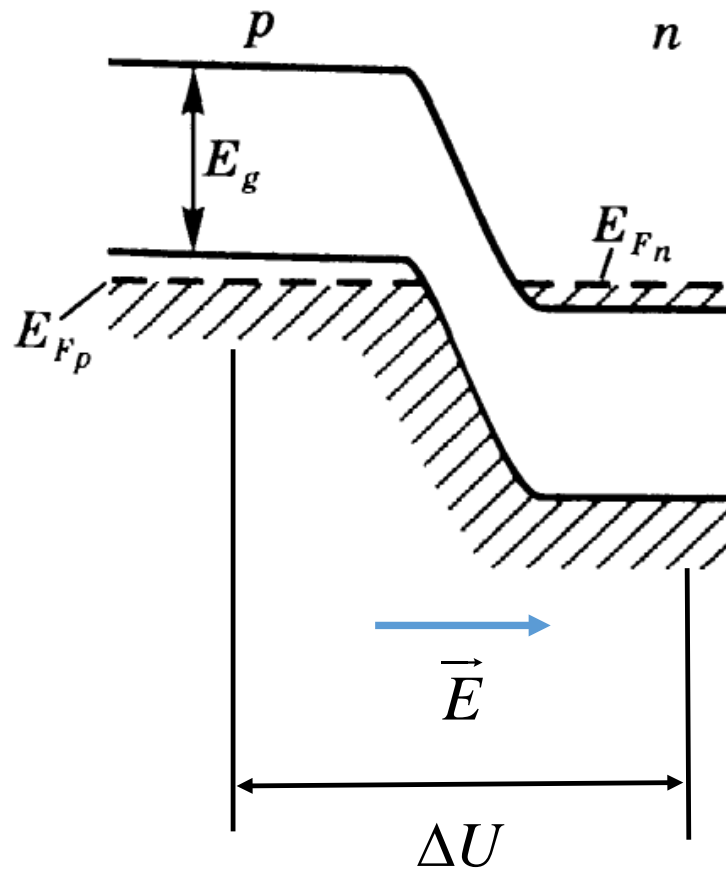
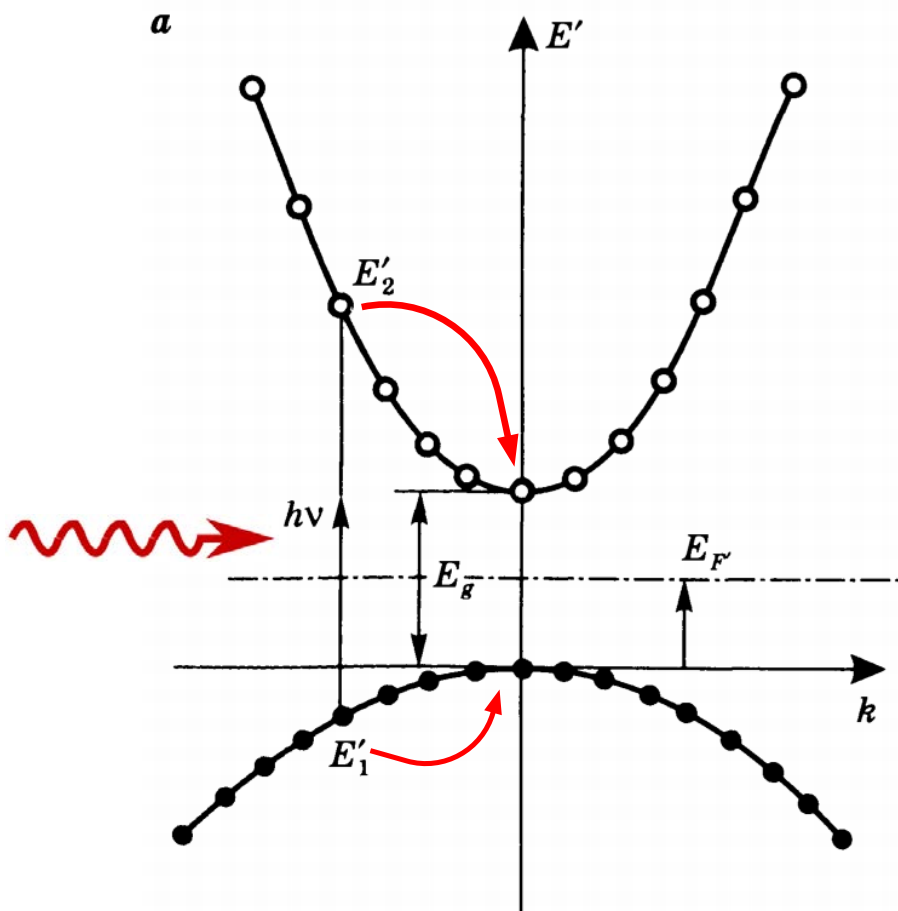
# Межзонная рекомбинация



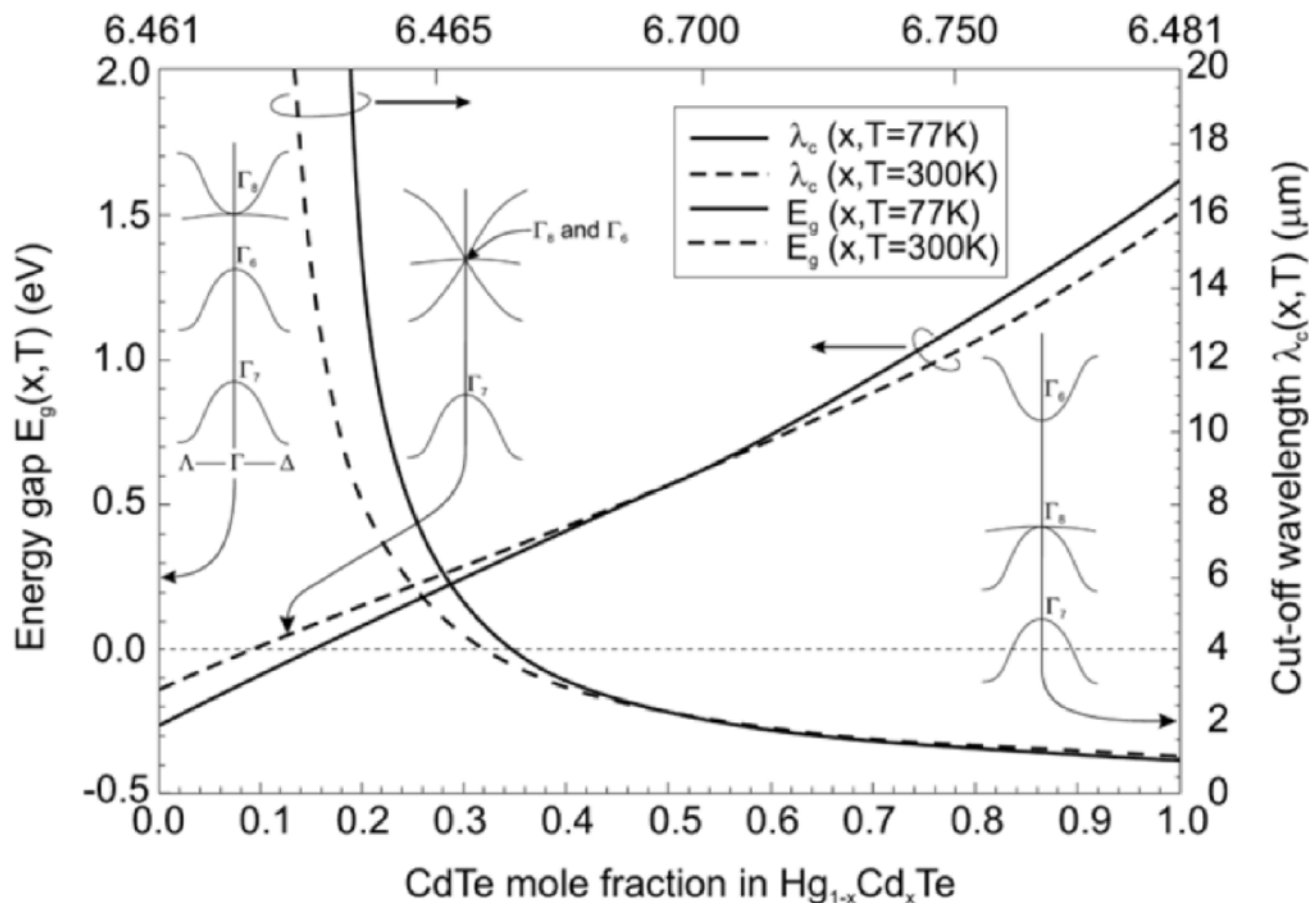
$$\vec{j} = en\vec{v}_d = en\mu\vec{E}$$

$$n \uparrow \Rightarrow \vec{j} \uparrow$$

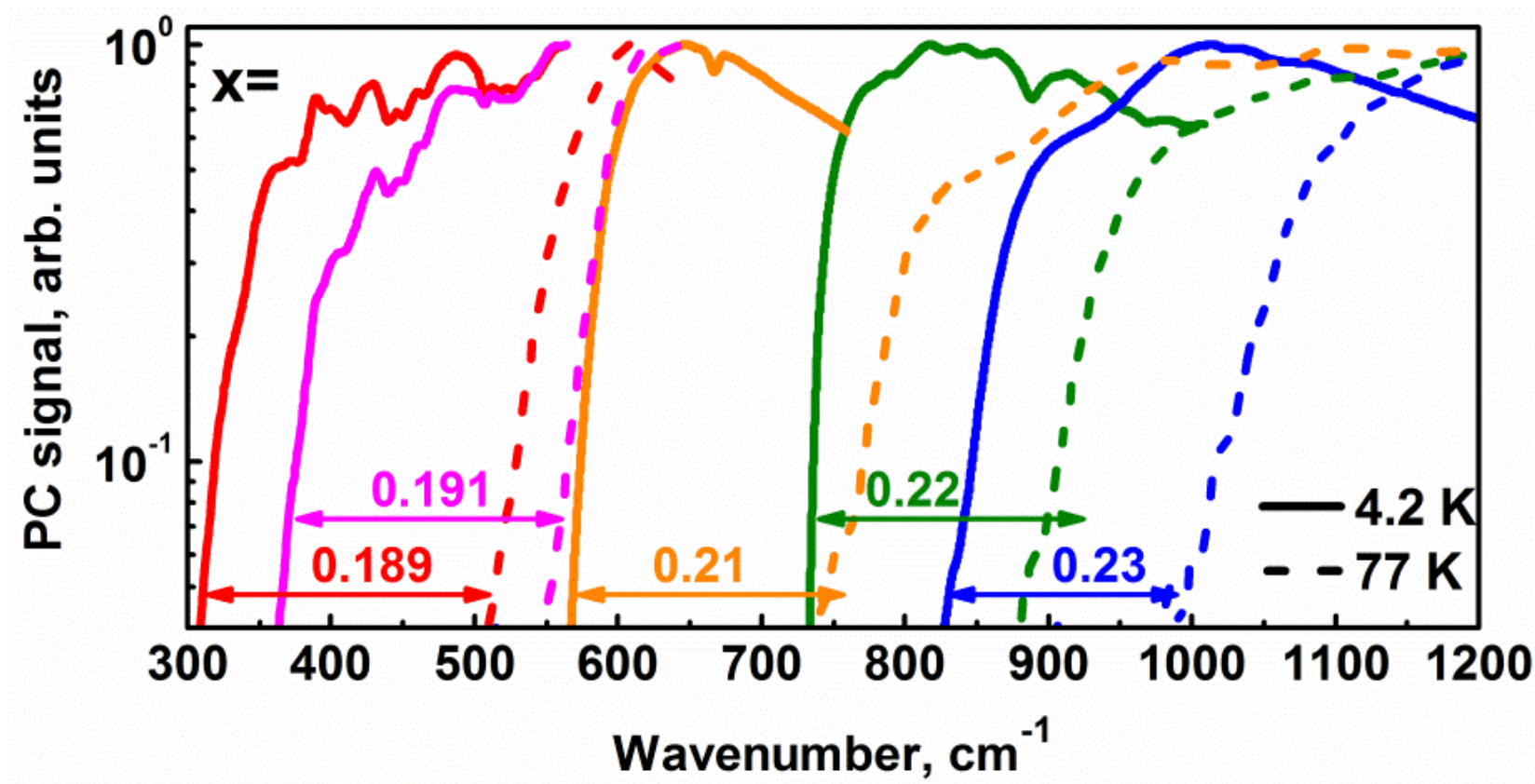
# Межзонная рекомбинация



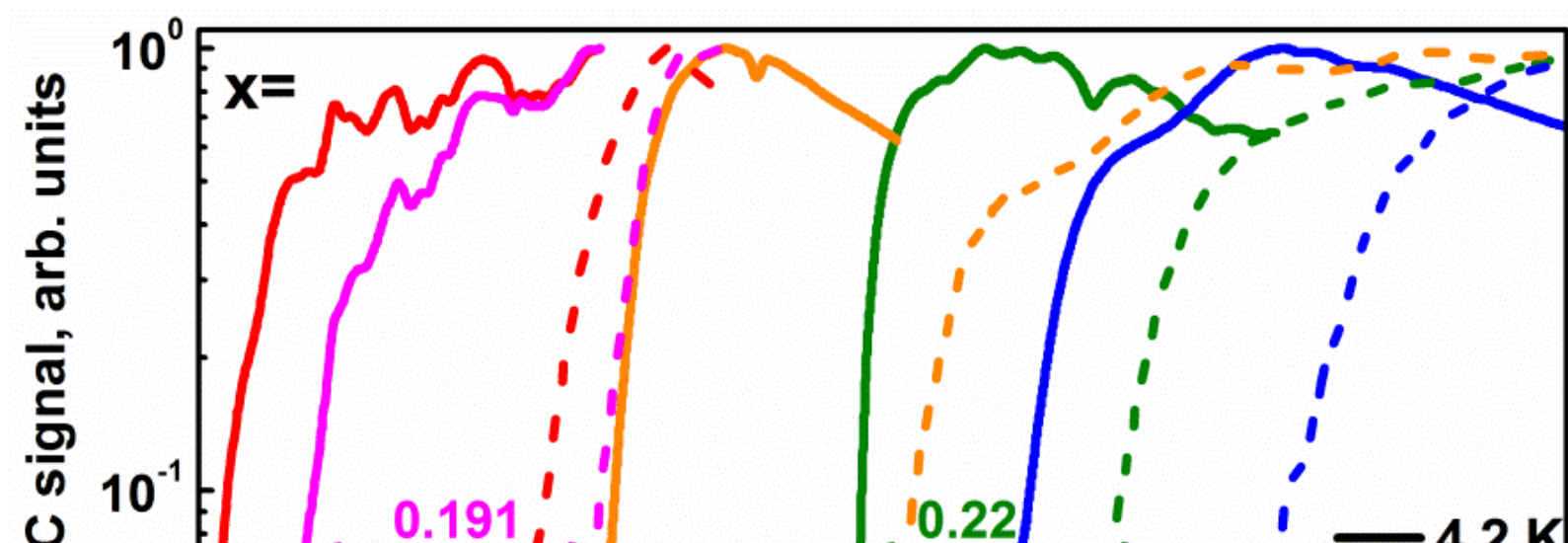
# Детектирование с помощью твёрдых растворов HgCdTe



# Детектирование с помощью твёрдых растворов HgCdTe

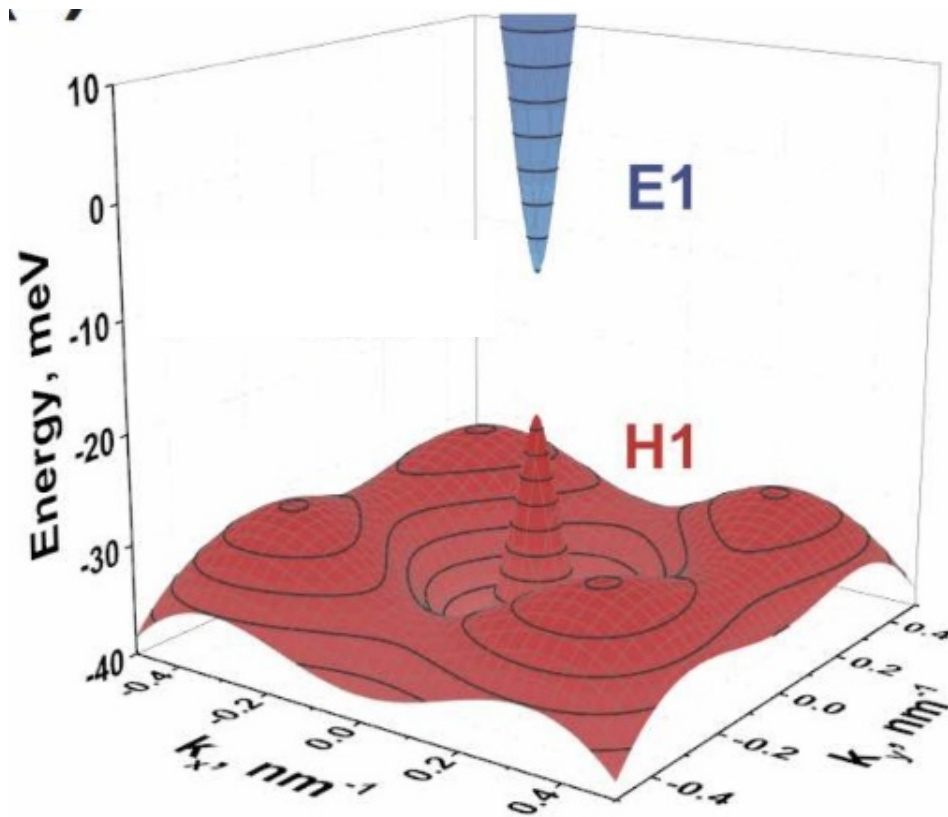
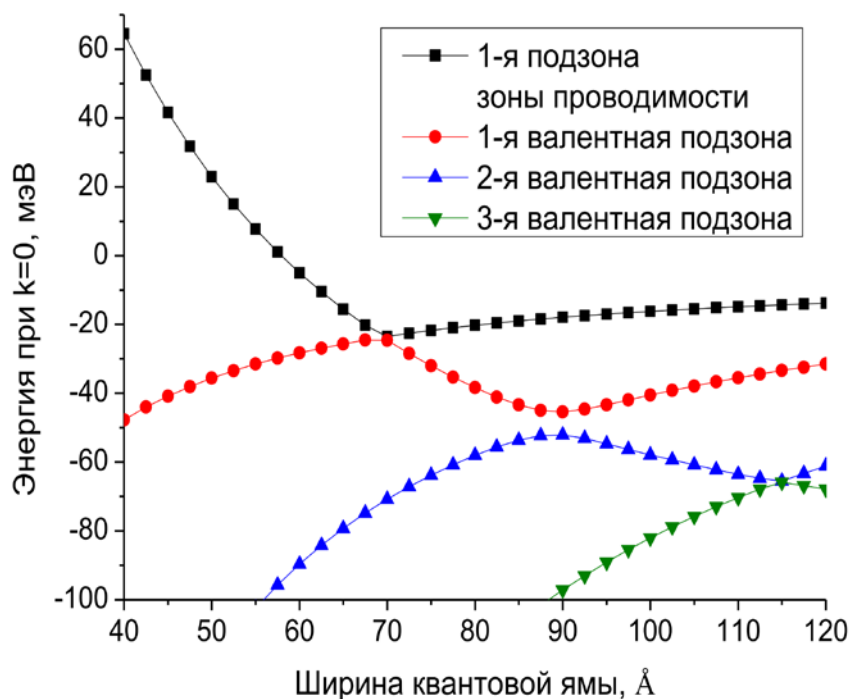


# Детектирование с помощью твёрдых растворов HgCdTe



- Необходима малая  $E_g$
- Возрастает вклад рекомбинаций Оже и Шокли-Рида-Холла

# Квантовые ямы HgTe/CdHgTe

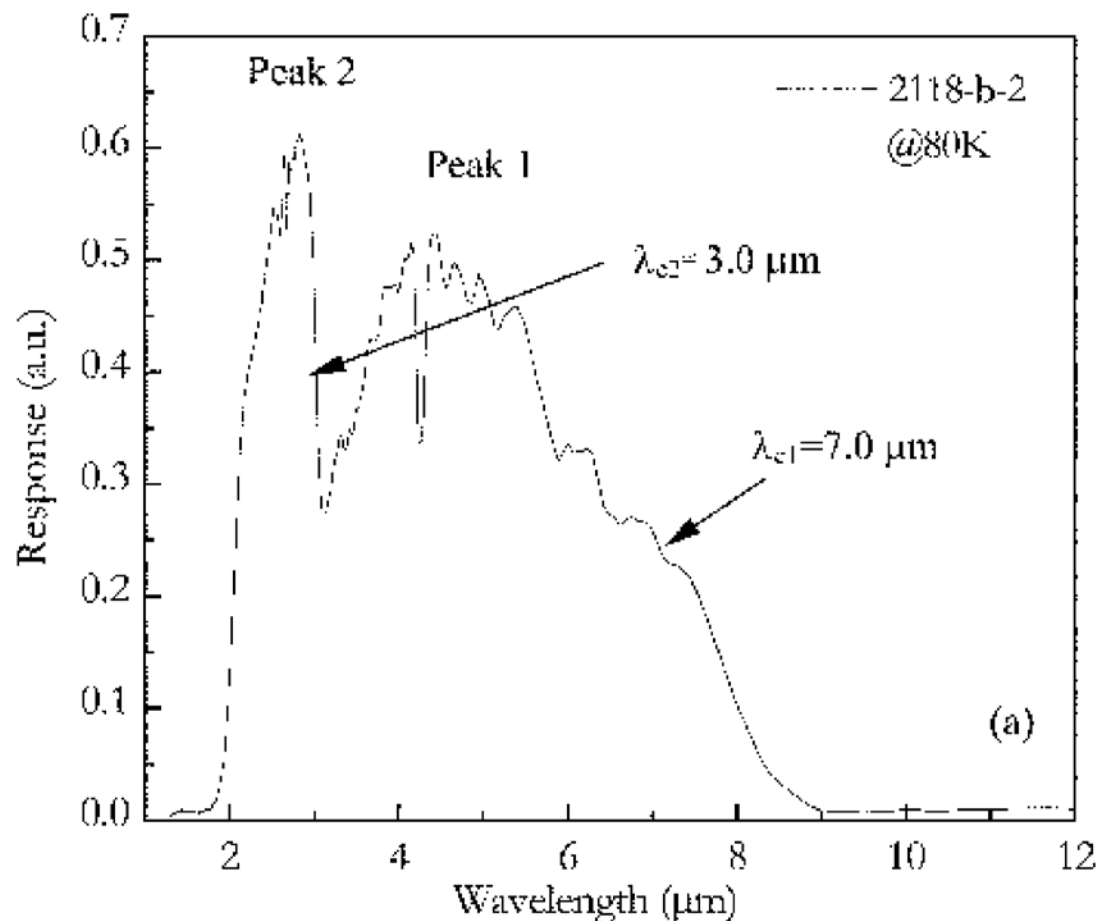


Zholudev, M. S. (2013) *Terahertz Spectroscopy of HgCdTe/CdHgTe quantum wells.*

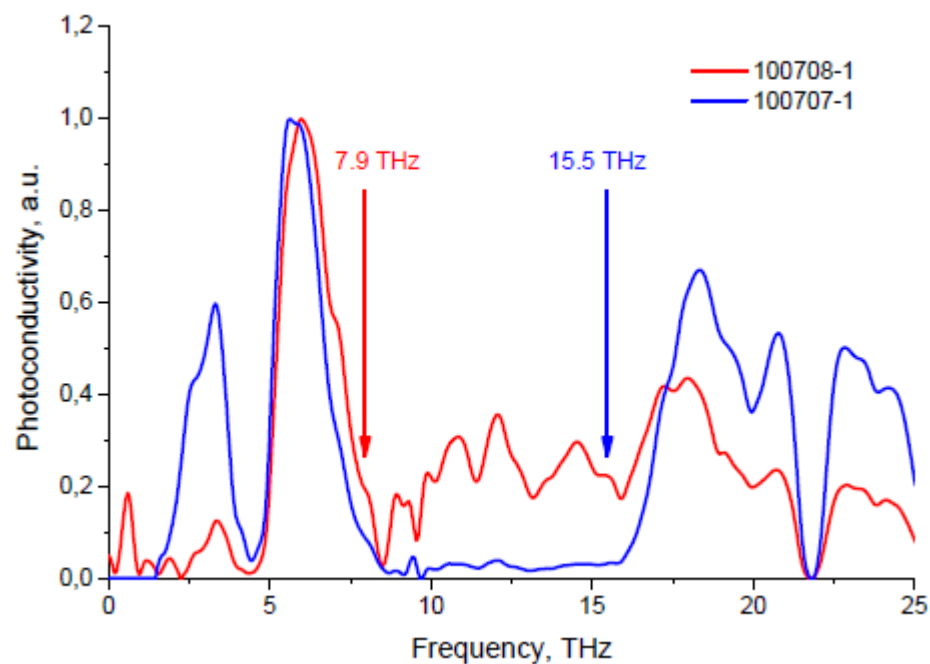
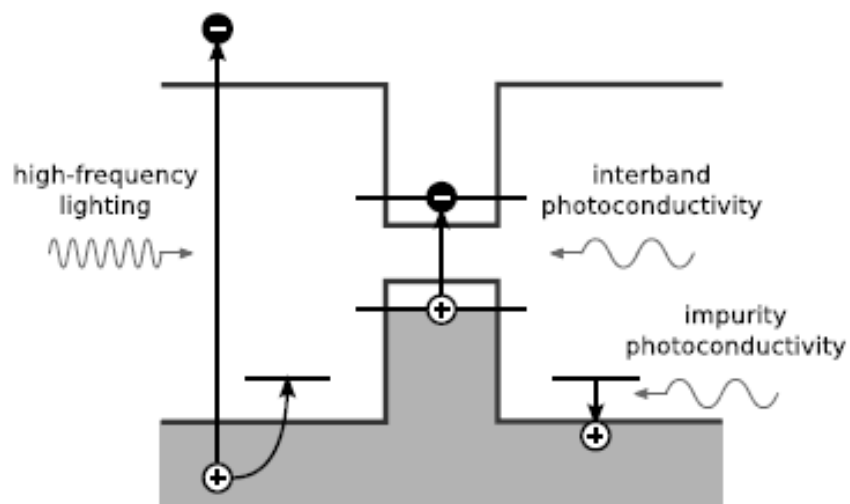
arXiv:1702.06869



# Сверхрешётки HgTe/CdHgTe



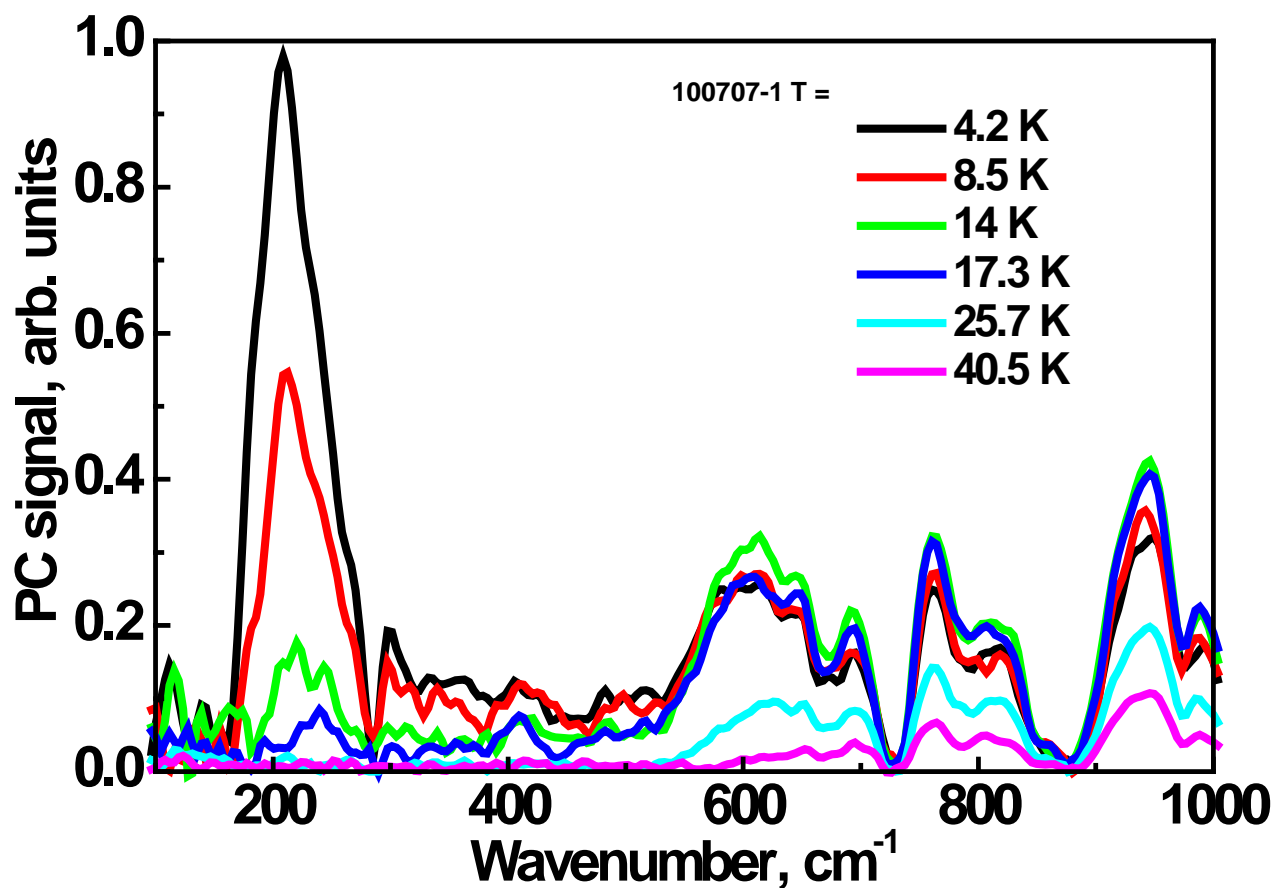
# Примесное детектирование



$$\vec{j} = en\vec{v}_d \quad n \uparrow \Rightarrow \vec{j} \uparrow$$

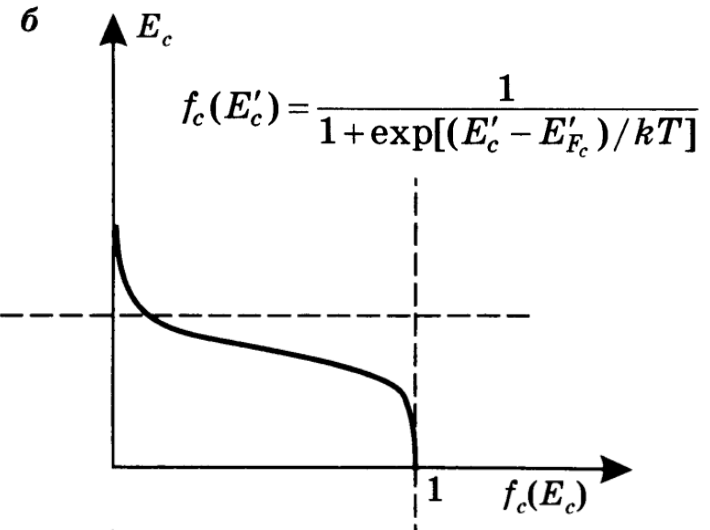
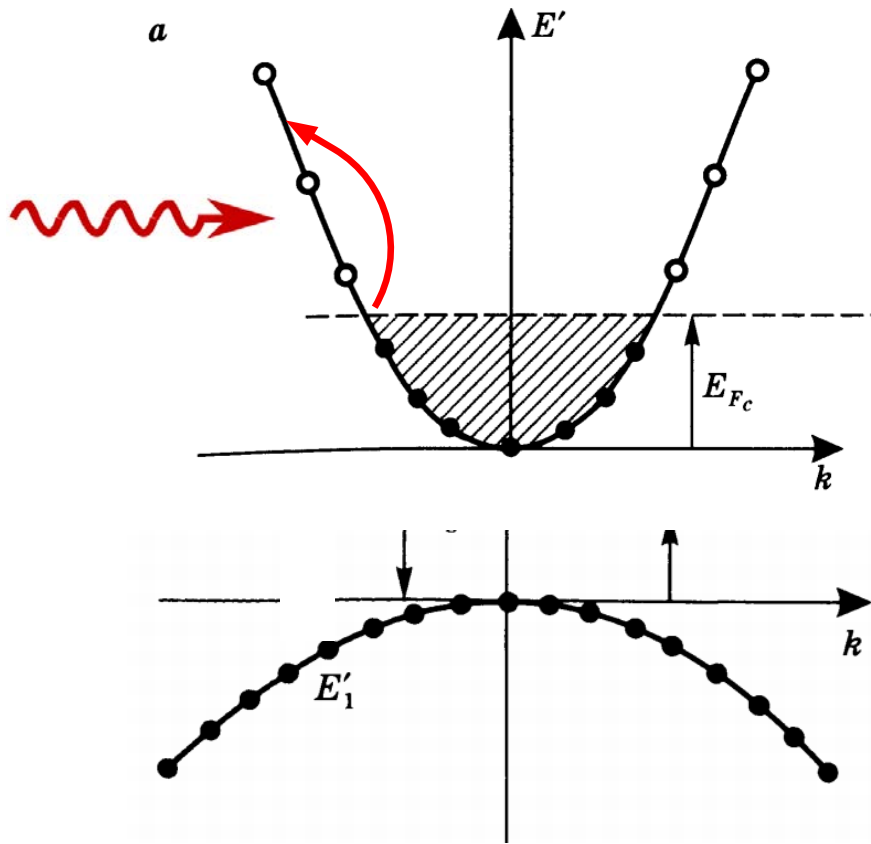
100707-1	0.186	0.702	30
100708-1	0.176	0.646	30

# Температурное гашение примесной фотопроводимости

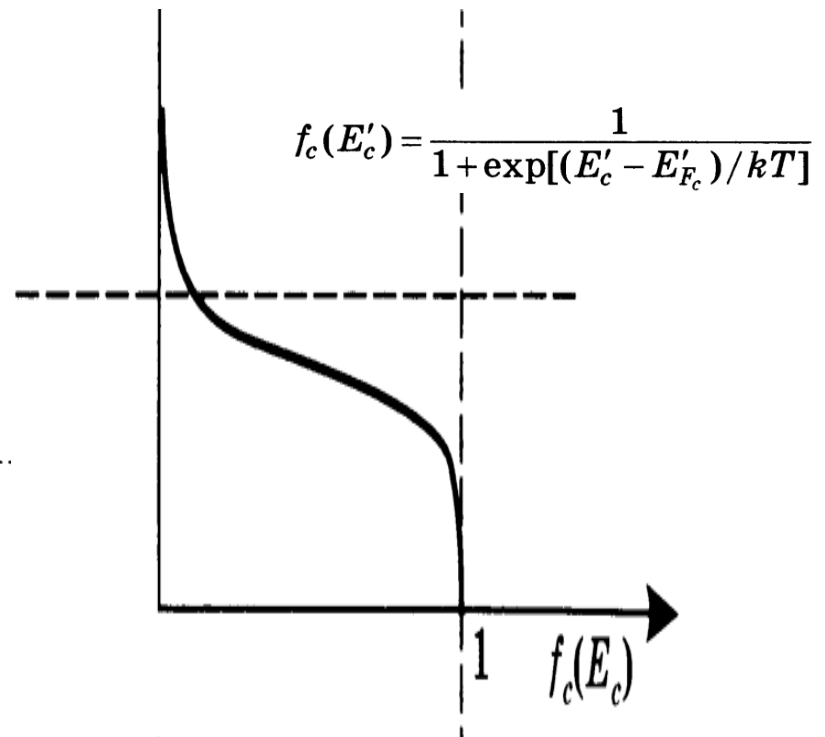
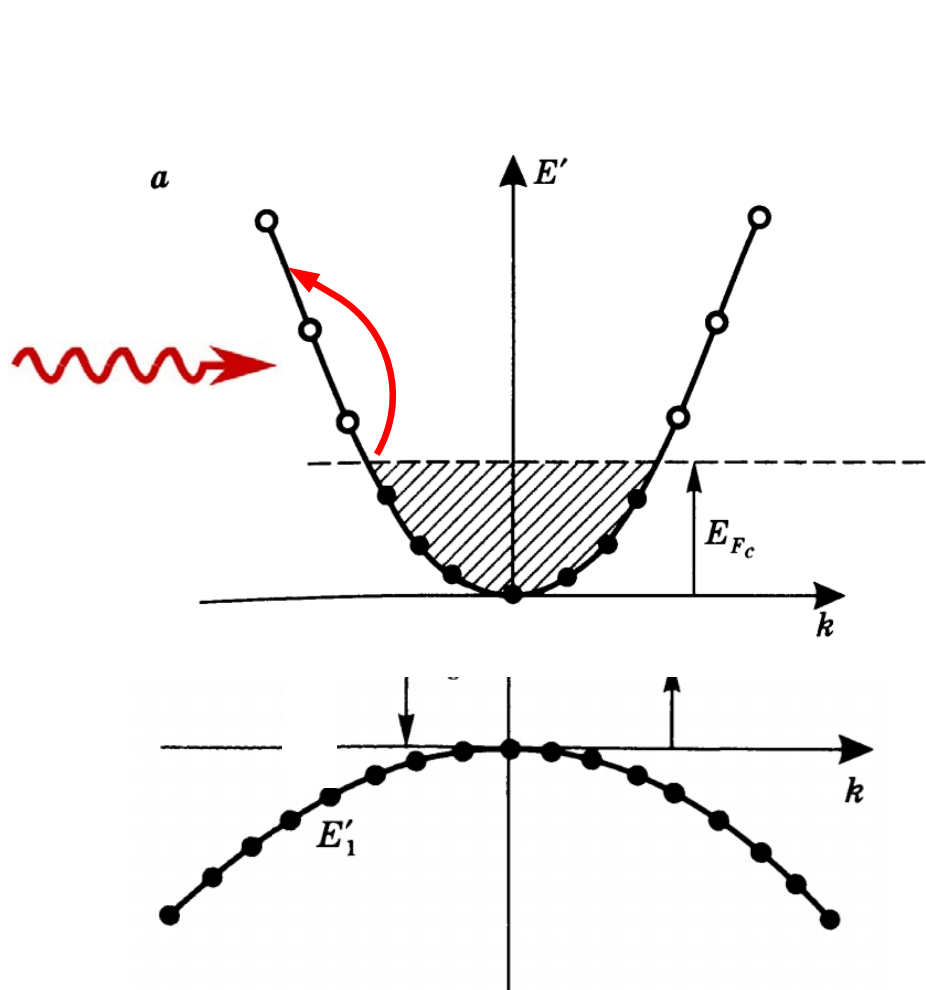


Низкая квантовая эффективность

# Разогрев носителей



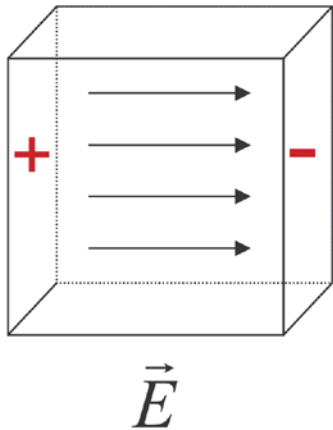
# Разогрев носителей



$$\vec{j} = en\mu\vec{E}$$

$$T \uparrow \Rightarrow \Delta\mu \Rightarrow \Delta\vec{j}$$

# Плазменные колебания в полупроводниках



$$\rho(\vec{r}, t) = \rho_0(\vec{r}) + \rho_1(\vec{r}, t)$$

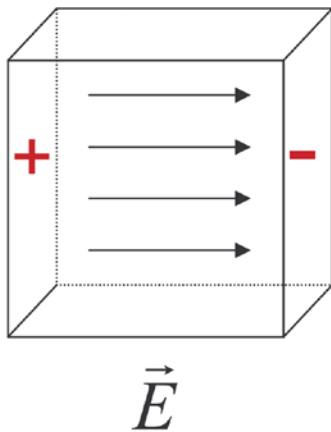
$$\vec{v}_d(\vec{r}, t) = \vec{v}_{d0}(\vec{r}) + \vec{v}_{d1}(\vec{r}, t) = \vec{v}_{d1}(\vec{r}, t)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0 \quad \vec{j} = \rho \vec{v}_d$$

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} + \rho_0 \text{div} \frac{\partial \vec{v}_{d1}}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial \vec{v}_{d1}}{\partial t} = -\frac{e}{m} \vec{E}$$

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} - \frac{e \rho_0}{m} \text{div } \vec{E} = 0$$

# Плазменные колебания в объёмных полупроводниках



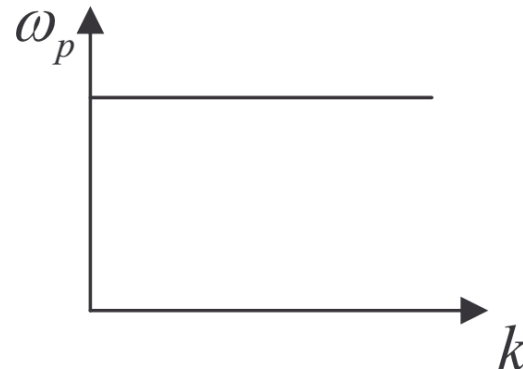
$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} - \frac{e\rho_0}{m} \operatorname{div} \vec{E} = 0$$

$$\mathbf{3D:} \quad \operatorname{div} \vec{E} = -\frac{4\pi}{\varepsilon} (\rho_0 + \rho_1)$$

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} + \frac{4\pi e\rho_0}{\varepsilon m} \rho_1 = 0$$

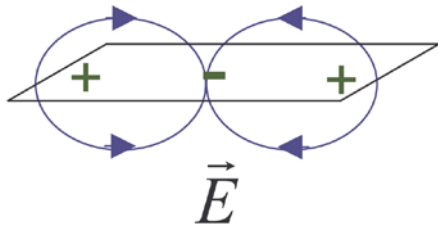
Ленгмюровские  
колебания

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_0 e^2}{\varepsilon m}}$$



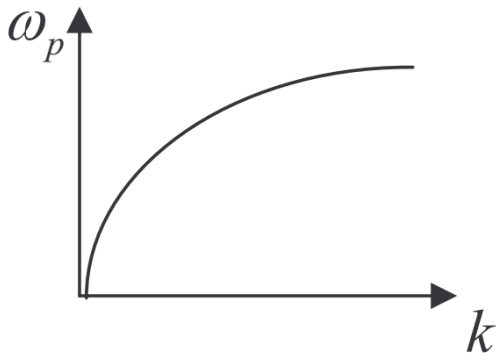
# Плазменные колебания в двумерных полупроводниках

**2D:**



$$\frac{\partial^2 \rho_k}{\partial t^2} + \frac{2\pi n_0 e^2 k}{\epsilon m} \rho_k = 0$$

$$\omega(k) = \sqrt{\frac{2\pi n_0 e^2 k}{\epsilon m}}$$



Волны на глубокой воде:

$$\omega(k) = \sqrt{gk}$$

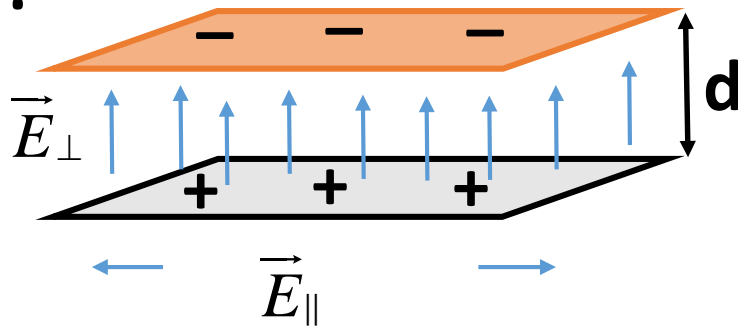




# Плазмоны в двумерных полупроводниках с затвором

Приближение плавного канала ( $\lambda \gg d$ )

**FET:**



$$\vec{E} = -\text{grad } U = -\frac{1}{C} \text{grad } \rho$$

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} - \frac{e\rho_0}{m} \text{div } \vec{E} = 0$$

$$\rho = CU \quad U = V_g - V_{th}$$

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} - \frac{ne^2}{mC} \Delta \rho_1 = 0$$

Волны на мелкой воде:

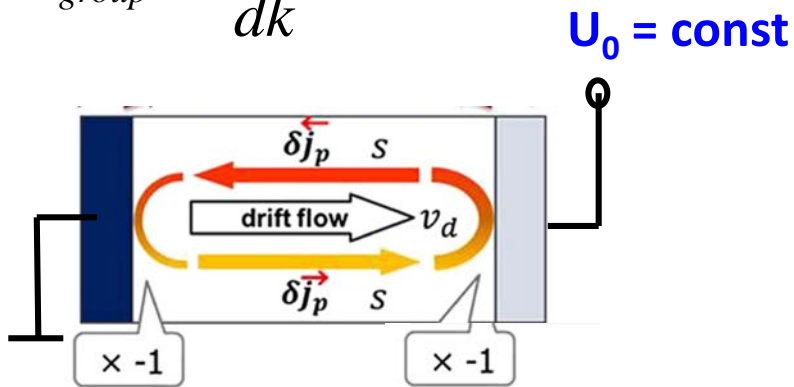
$$\omega(k) = k\sqrt{gh}$$

$$\omega(k) = sk \quad s = \sqrt{\frac{ne^2}{mC}} = \sqrt{\frac{eU}{m}}$$

# Неустойчивость Дьяконова-Шура

$$\omega(k) = sk$$

$$V_{group} = \frac{d\omega}{dk} = s$$



$$\text{wavy red arrow pointing right} \quad v = s + v_d$$

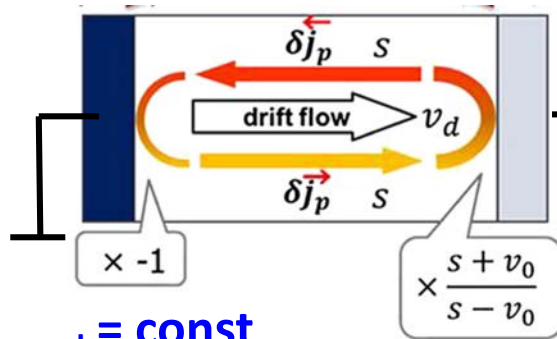
$$\text{wavy red arrow pointing left} \quad v = s - v_d$$

$$U_{ground} = \text{const}$$

# Неустойчивость Дьяконова-Шура

$$\omega(k) = sk$$

$$V_{group} = \frac{d\omega}{dk} = s$$



$$\text{red wavy arrow} \rightarrow v = s + v_d$$

$$\Delta j' = e\Delta n'(s + v_d)$$

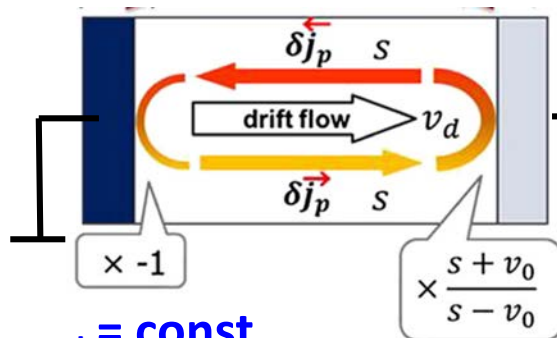
$$\text{red wavy arrow} \leftarrow v = s - v_d$$

$$\Delta j'' = e\Delta n''(s - v_d)$$

# Неустойчивость Дьяконова-Шура

$$\omega(k) = sk$$

$$V_{group} = \frac{d\omega}{dk} = s$$



$$U_{ground} = \text{const}$$

$$U_0 = \text{const}$$

$$R \gg R_{ch}$$

$$I = \text{const}$$

$$\text{wavy red arrow} \quad v = s + v_d$$

$$\Delta j' = e\Delta n'(s + v_d)$$

$$\text{wavy red arrow} \quad v = s - v_d$$

$$\Delta j'' = e\Delta n''(s - v_d)$$

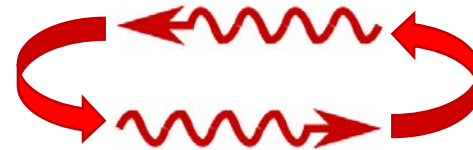
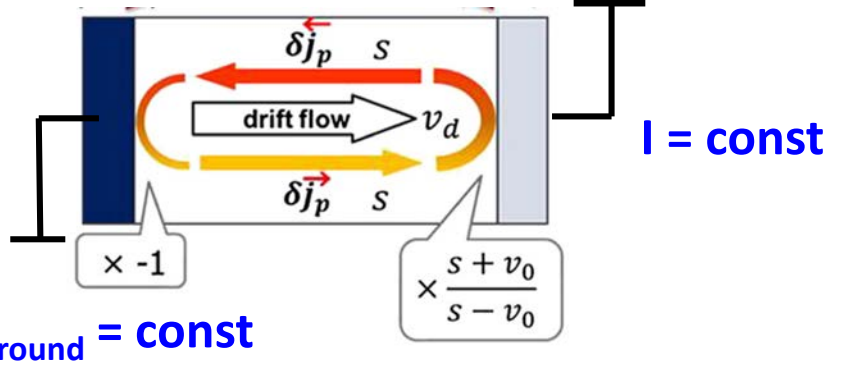
$$|\Delta j'| = |\Delta j''| \Rightarrow \Delta n'' = \frac{(s + v_d)}{(s - v_d)} \Delta n'$$

$$\frac{(s + v_d)}{(s - v_d)} > 1$$

# Неустойчивость Дьяконова-Шура

$$\omega(k) = sk$$

$$V_{group} = \frac{d\omega}{dk} = s$$



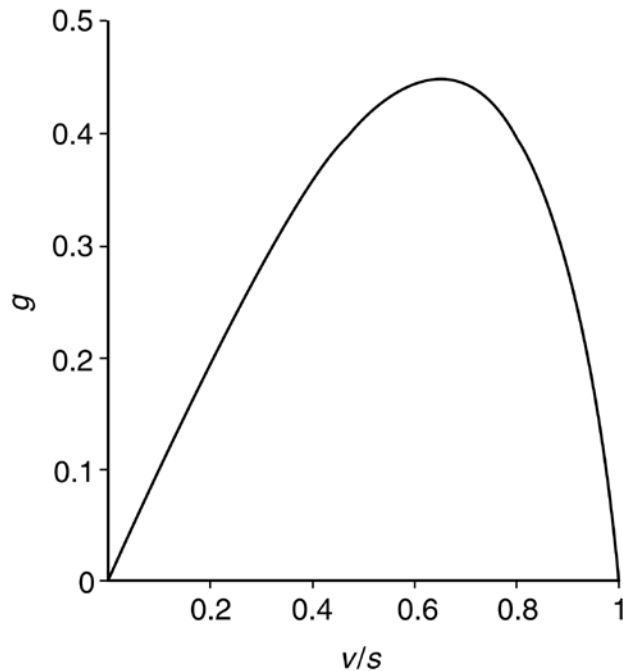
$$\tau = \frac{L}{v_0 - s} + \frac{L}{v_0 + s}$$

$$\left( \frac{v_0 + s}{v_0 - s} \right)^{\frac{t}{\tau}} = \exp(\omega'' t)$$

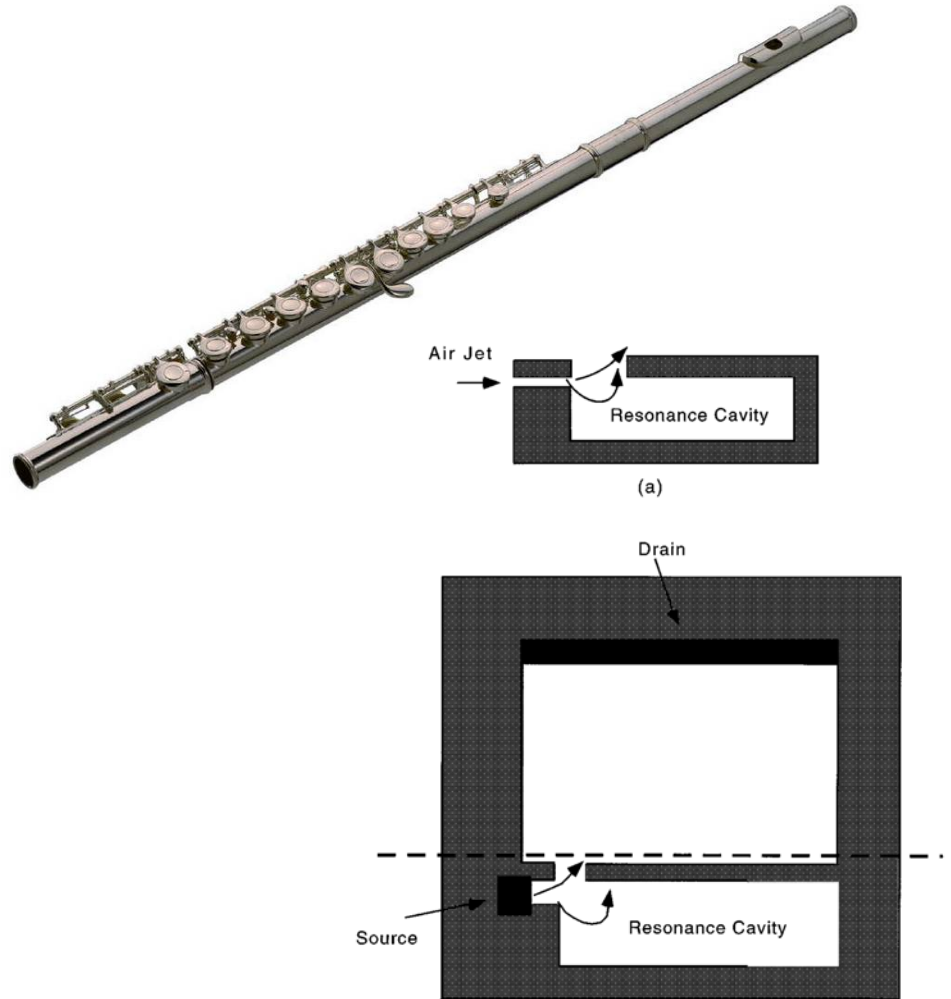
$$\omega'' = \frac{s}{2L} \left( 1 - \frac{v_0^2}{s^2} \right) \ln \left| \frac{v_0 + s}{v_0 - s} \right|$$

# Неустойчивость Дьяконова-Шура

$$\omega'' = \frac{s}{2L} \left( 1 - \frac{v_0^2}{s^2} \right) \ln \left| \frac{v_0 + s}{v_0 - s} \right|$$

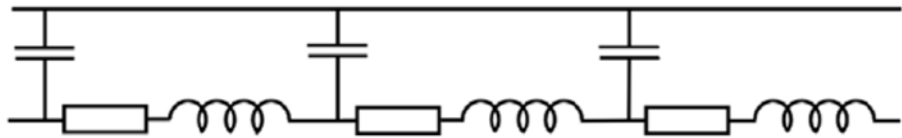
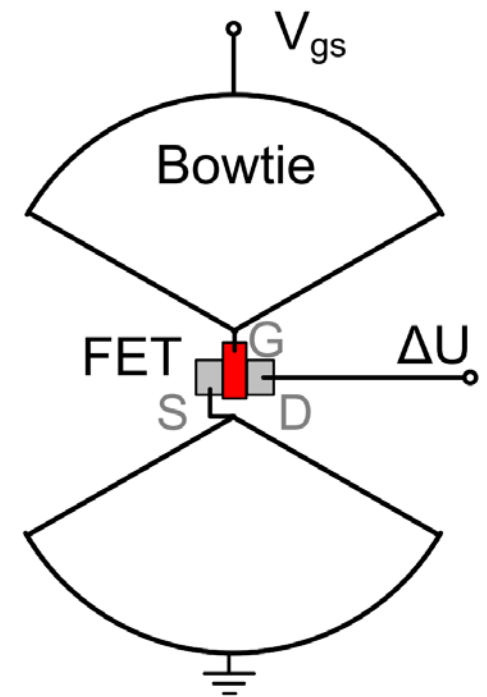
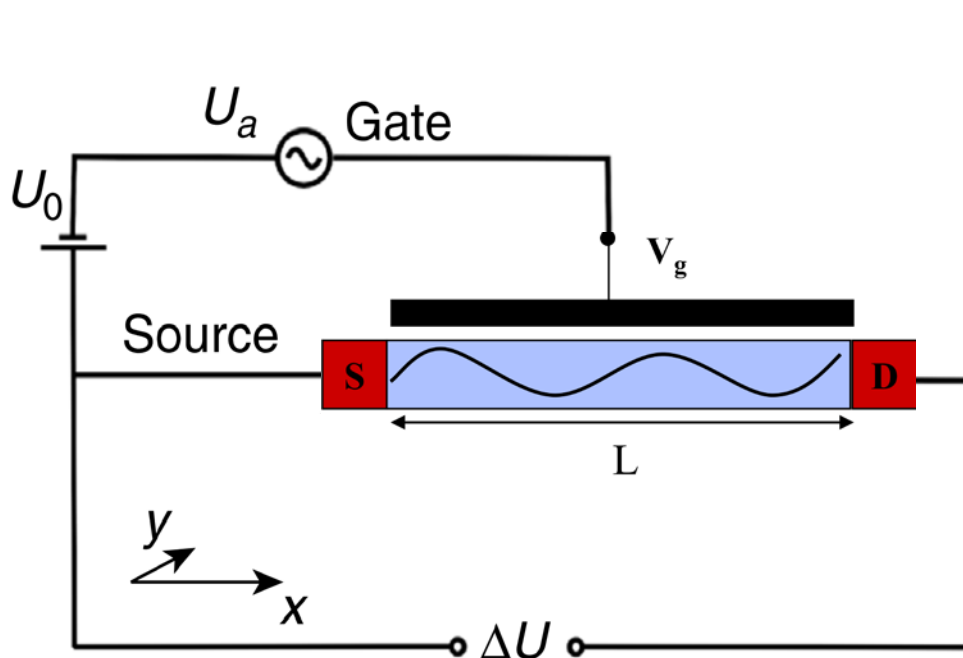


Dyakonov, M. and Shur, M.  
*PRL*.71(15), 2465, 1993.



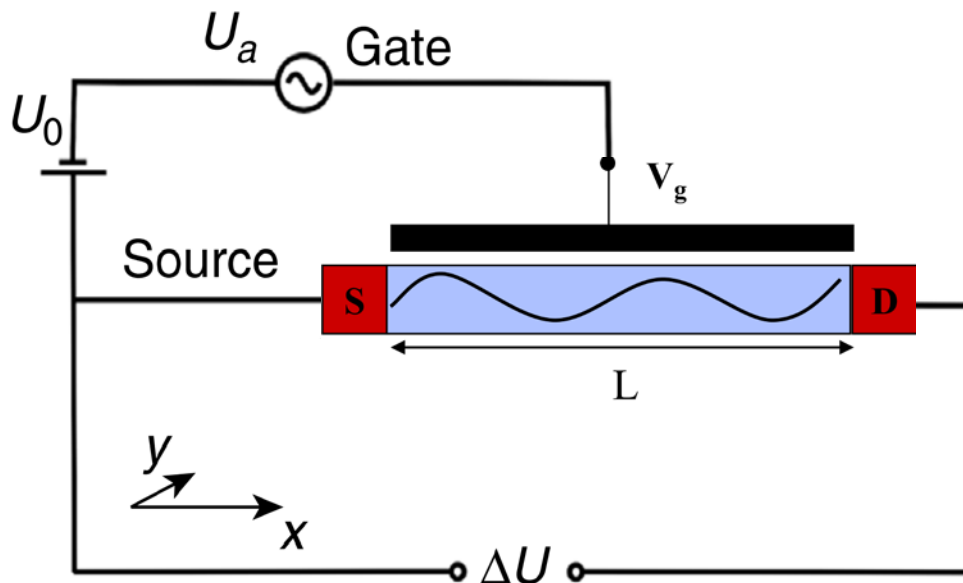
Dyakonov, M. I. and Shur, M. S.,  
*APL*, 67(8), p. 1137, (1995)

# Детектирование по механизму Дьяконова-Шура



Dyakonov, M. and Shur, M. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 43(3), p. 380, (1996)

# Детектирование по механизму Дьяконова-Шура



$$f_p = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{eU}{m}}$$

$$L = 0.1 - 1 \mu\text{m}$$

$$U = 1 \text{ V}$$

$$m = 0.06 - 0.26 m_e$$

➡  $f_p \approx 0.6 - 4 \text{ THz}$

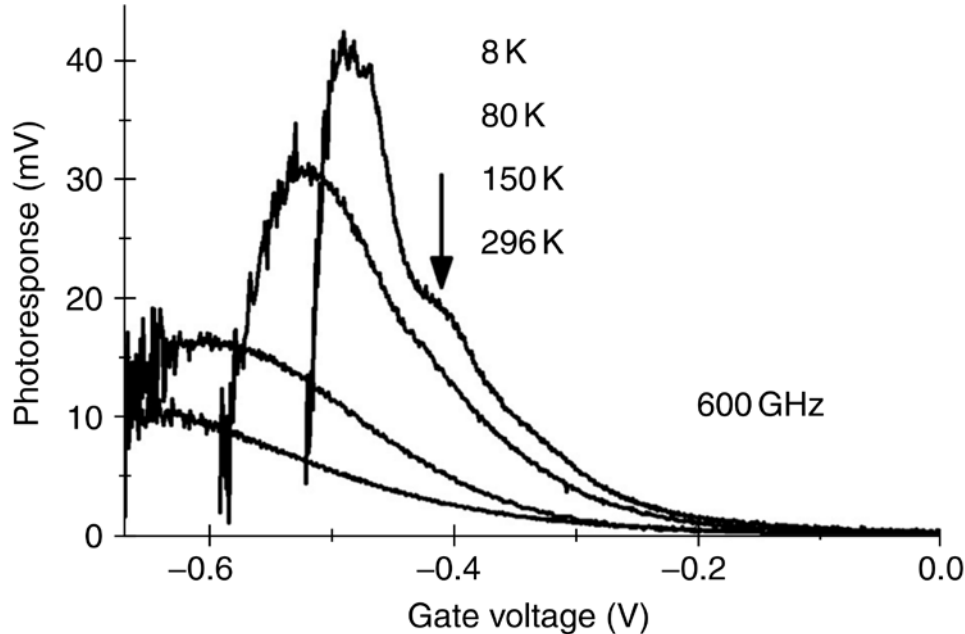


Dyakonov, M. and Shur, M. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 43(3), p. 380, (1996)



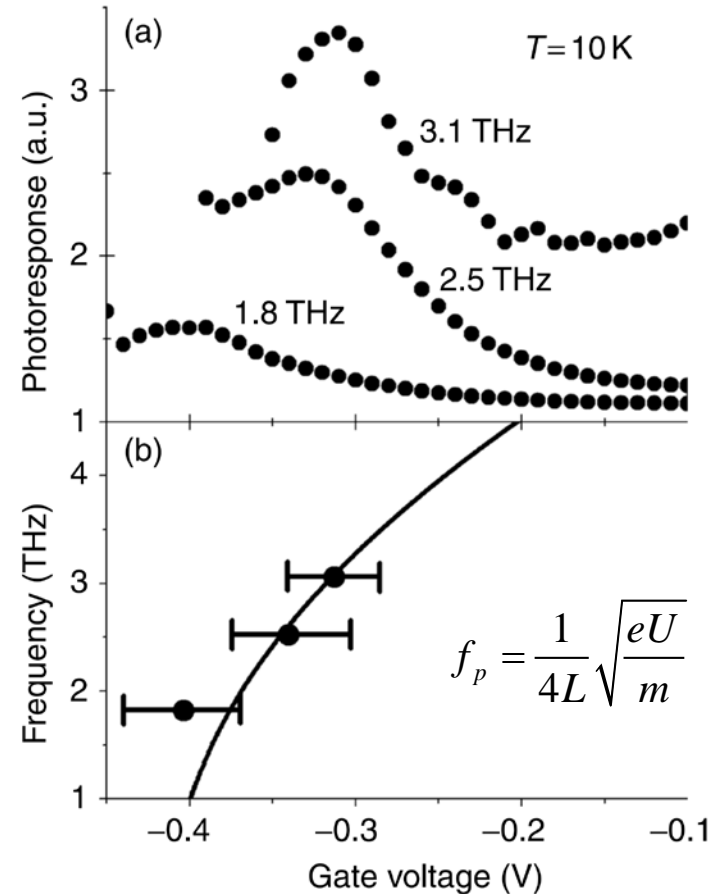
# Резонансное детектирование

FET GaAs 150 nm



Knap, W., et al., *Journal of Applied Physics.*, 91(11), p. 9346, (2002)

FET InGaAs/AlInAs 50 nm

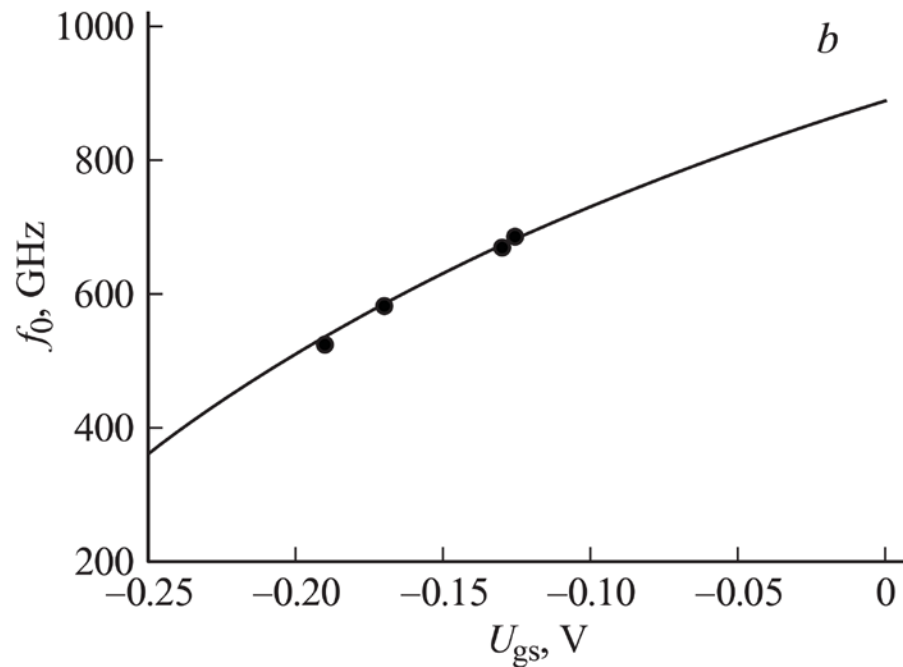
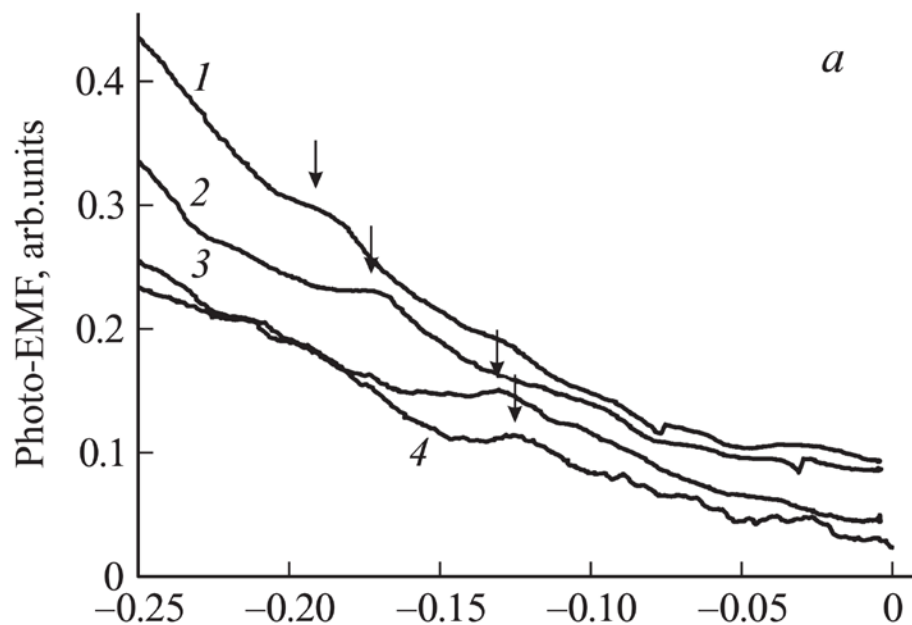


El Fatimy, A. et al., *Applied Physics Letters.* 89(13), p. 131926. (2006)

# Резонансное детектирование

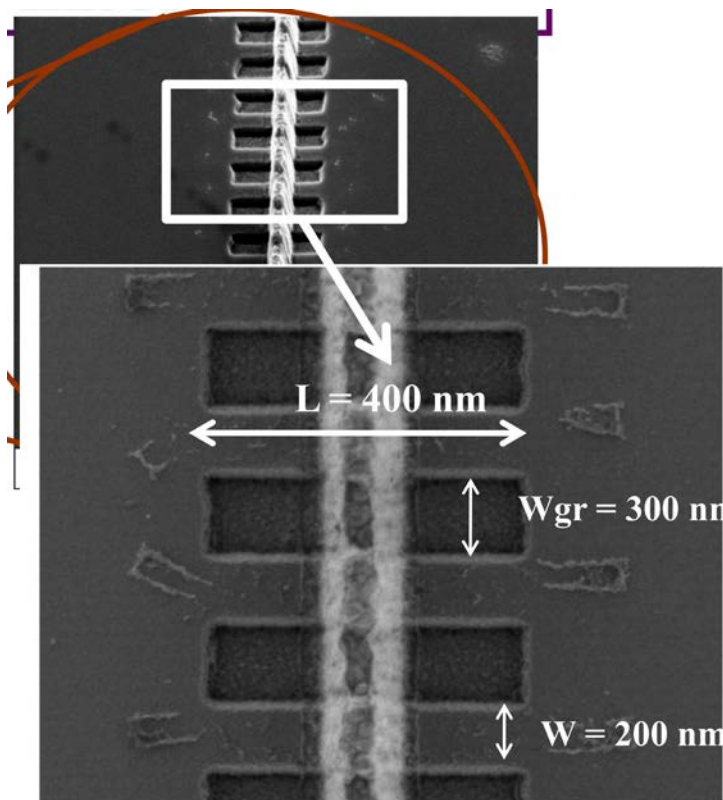
GaAs/AlGaAs при  $T = 4.2$  K

$$f_0 = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{e}{m} (U_{\text{gs}} - U_{\text{th}})}$$

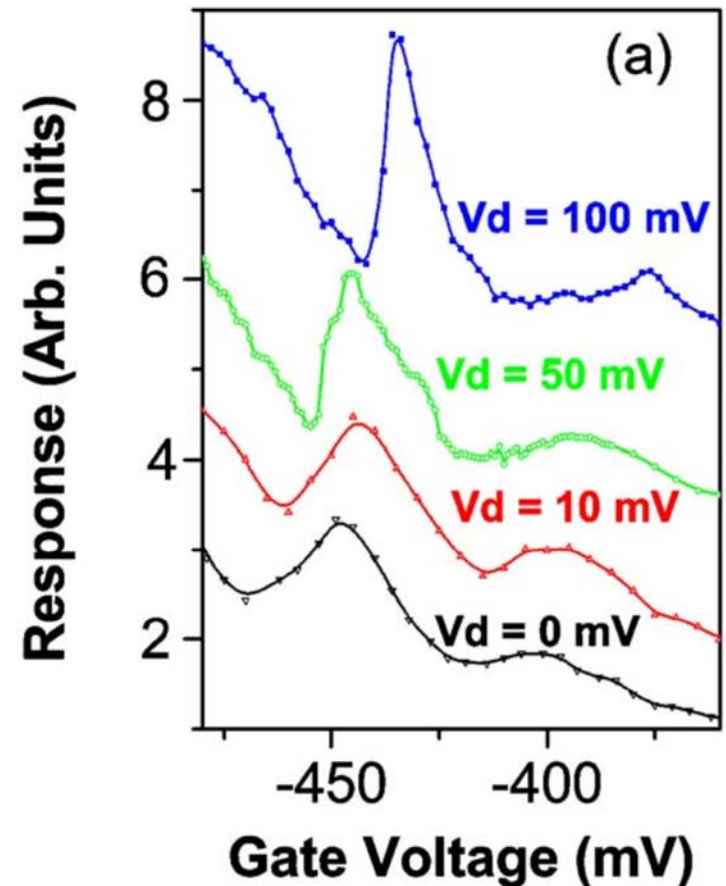


# Мультиканальный FET

FET InGaAs/AlInAs 540 GHz 10 K

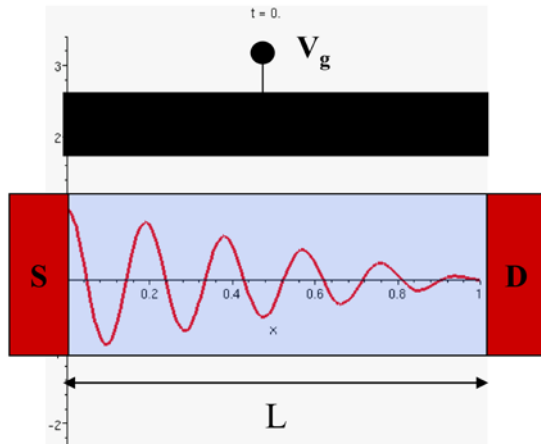


56 узких каналов



Boubanga-Tombet, S., et al., *APL*, 92(21), p. 212101. (2008)

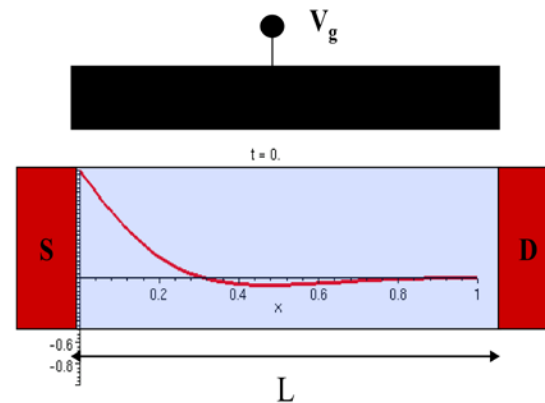
# Резонансное и нерезонансное детектирование



$$\omega\tau \gg 1$$

$$L \ll s\tau$$

Гелиевая температура

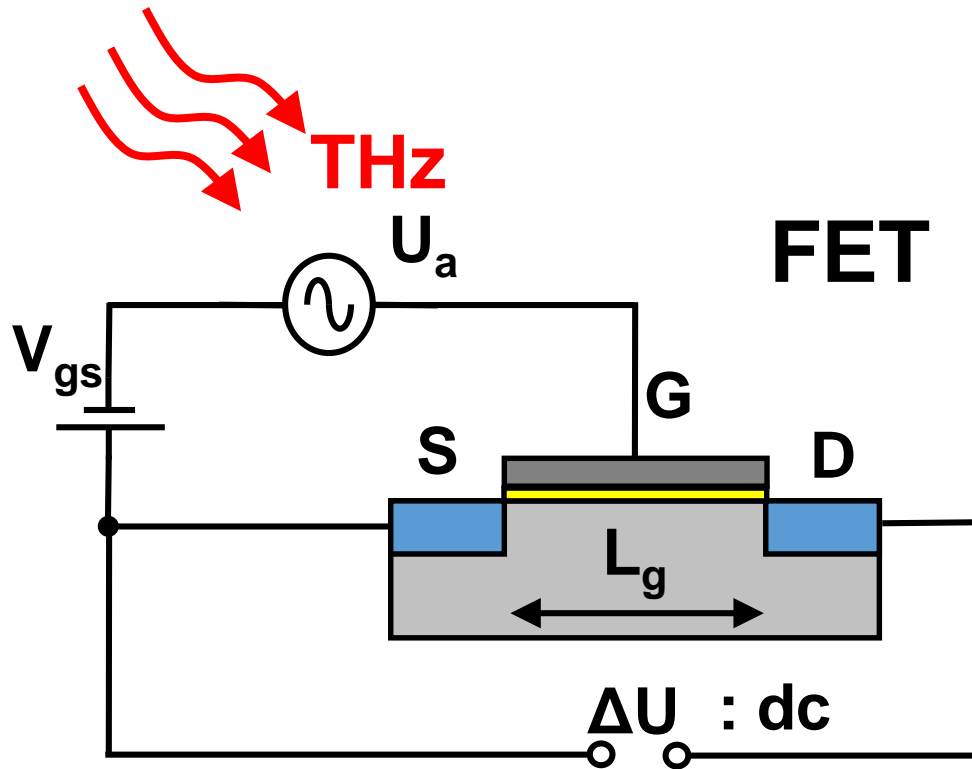


$$\omega\tau \ll 1$$

$$l = s\sqrt{\frac{\tau}{\omega}}$$

Комнатная температура

# Нелинейность в нерезонансном случае



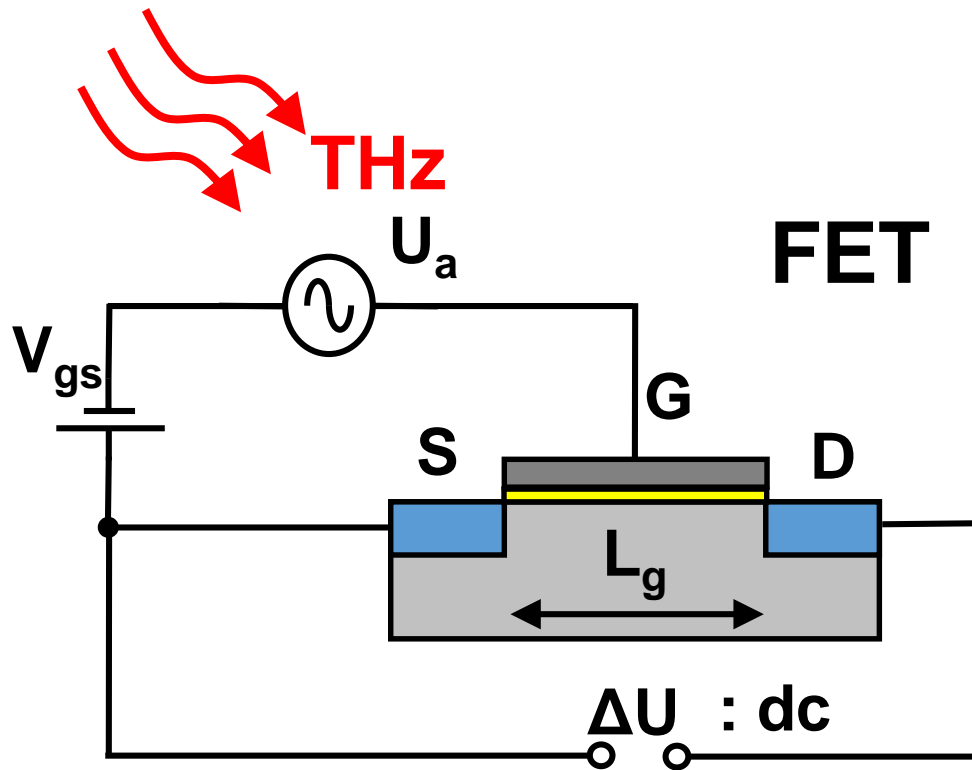
$$j = nev_d$$

$$v_d(t) = v_{d0} \cos(\omega t)$$

$$n(t) = n_0 \cos(\omega t)$$

$$j = e \langle n(t) v_d(t) \rangle = \\ = en_0 v_{d0} \langle \cos^2(\omega t) \rangle$$

# Детектирование в нерезонансном случае



$$C \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \sigma \frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

$$U|_{x=0} = U_0 + U_a \cos(\omega t)$$

$$U|_{x \rightarrow \infty} = const$$

$$U(x, t) = U_0 + U_1(x, t) + U_2(x)$$

$$C \frac{\partial U_1}{\partial t} - \sigma_0 \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} = 0$$

$$U_1(x, t) = U_a \exp(-kx) \cos(\omega t - kx)$$

$$k = \frac{\omega C}{2\sigma_0}$$

# Детектирование в нерезонансном случае

$$C \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \sigma \frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

$$U(x, t) = U_0 + U_1(x, t) + U_2(x)$$

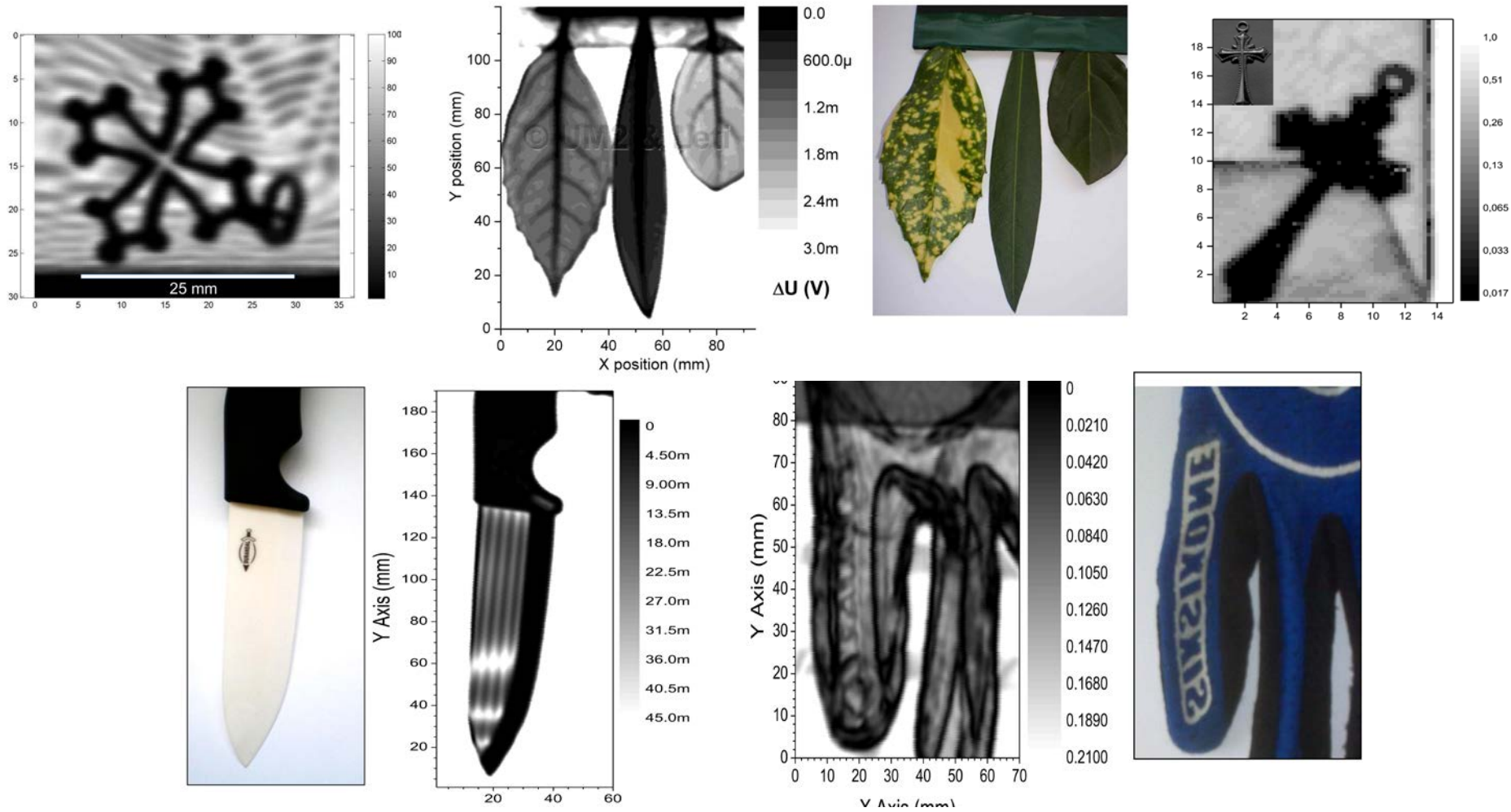
$$U_1(x, t) = U_a \exp(-kx) \cos(\omega t - kx)$$

$$\frac{d}{dx} \left[ \sigma_0 \frac{dU_2}{dx} + \frac{\partial \sigma}{\partial U} \bigg|_{U=U_0} \left\langle U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \right\rangle \right] = 0$$

$$U_2(x) = \frac{U_a^2}{4} \frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dU} \bigg|_{U=U_0} (1 - \exp(-2kx))$$

$$U(x) = \frac{U_a^2}{4} \frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dU} \bigg|_{U=U_0}$$

# ТГц детектирование при комнатной температуре

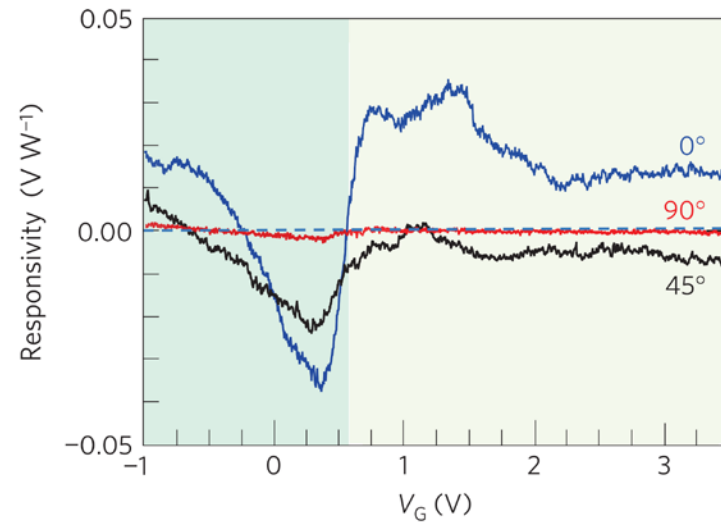
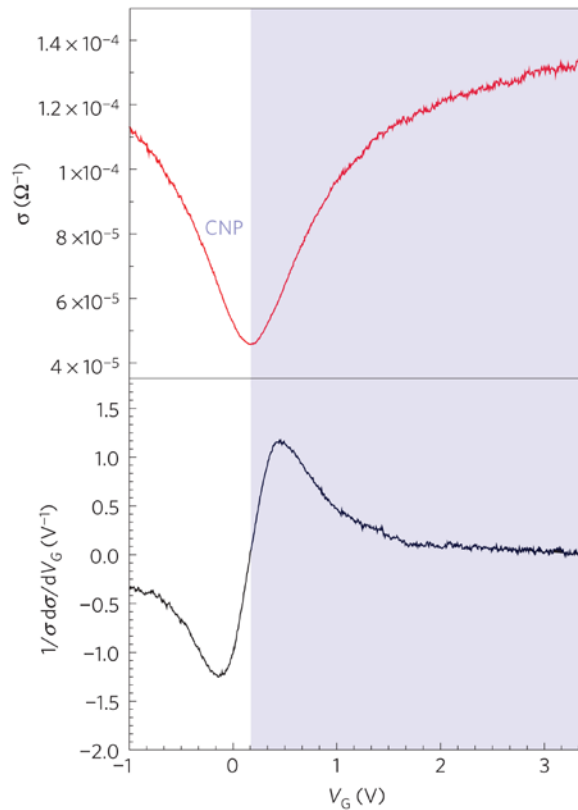
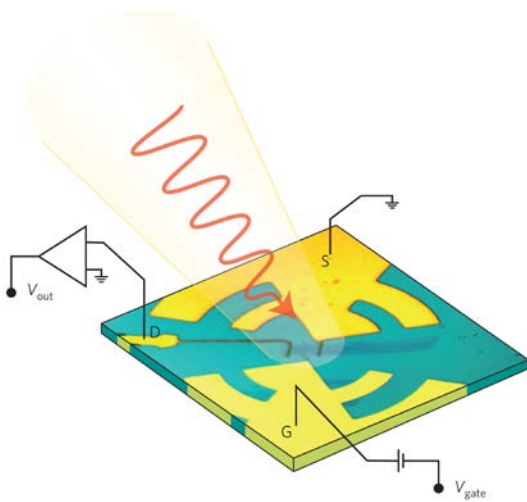


A. Lisauskas, W. von Spiegel, S. Boubanga, A. El Fatimy, D. Coquillat, F. Teppe, N. Dyakonova, W. Knap, and H. G. Roskos, *Electr. Lett.* **44**, 408 (2008).



# ТГц детектирование при комнатной температуре

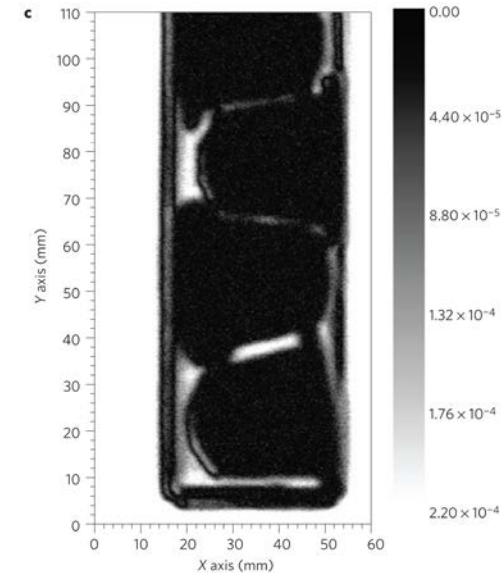
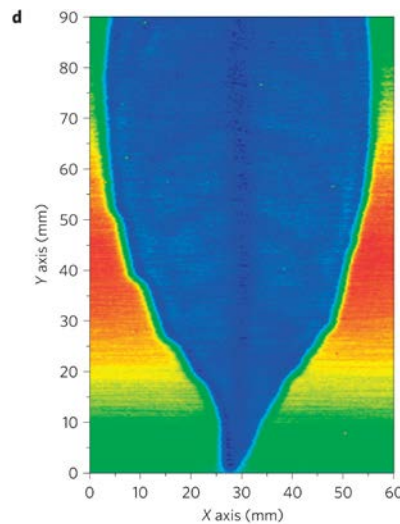
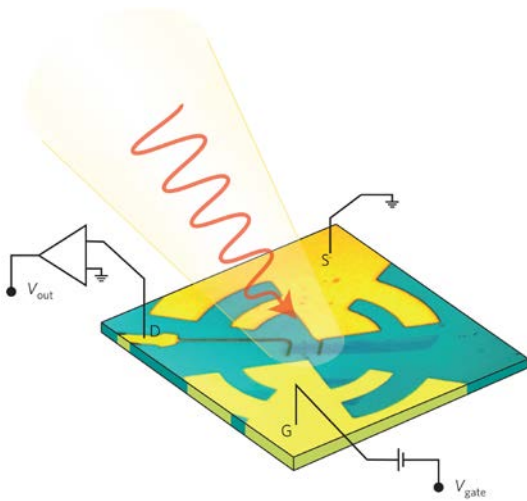
FET graphene on SiO<sub>2</sub>



$$U(x) = \frac{U_a^2}{4} \frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dU} \bigg|_{U=U_0}$$

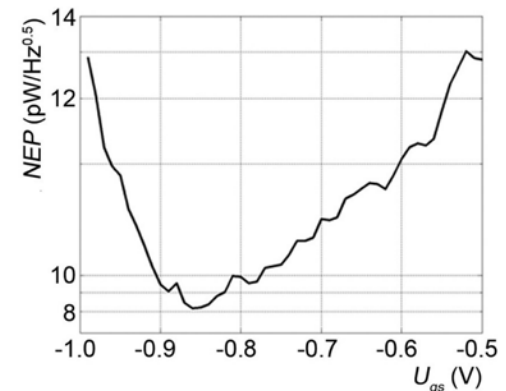
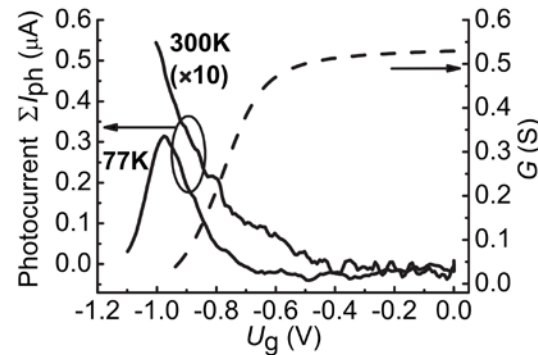
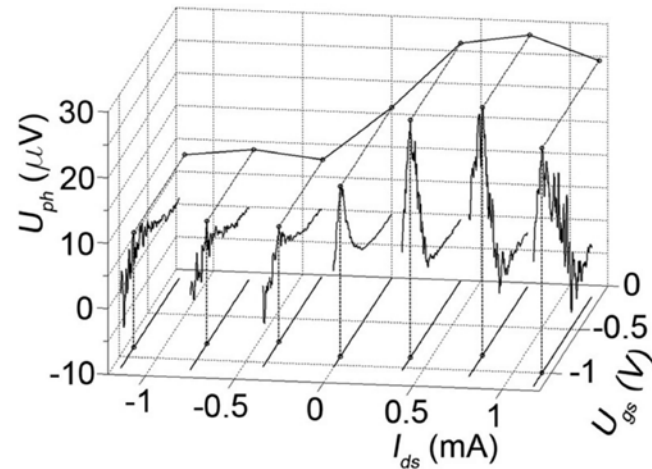
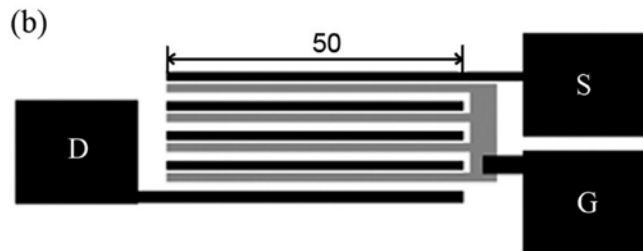
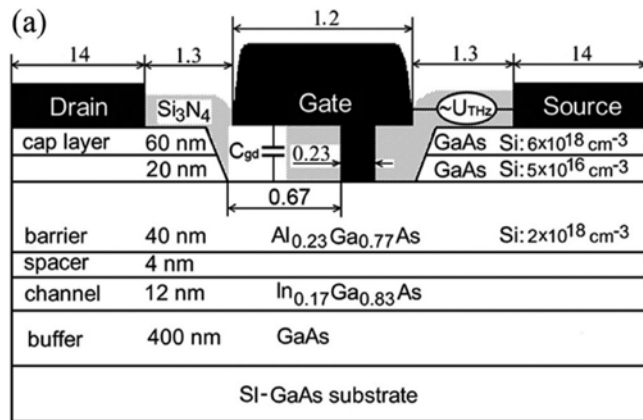
# ТГц детектирование при комнатной температуре

## Graphene FET



Vicarelli, L., et al., *Nature Materials*, 11(10), p. 865. (2012)

# ТГц детектирование при комнатной температуре

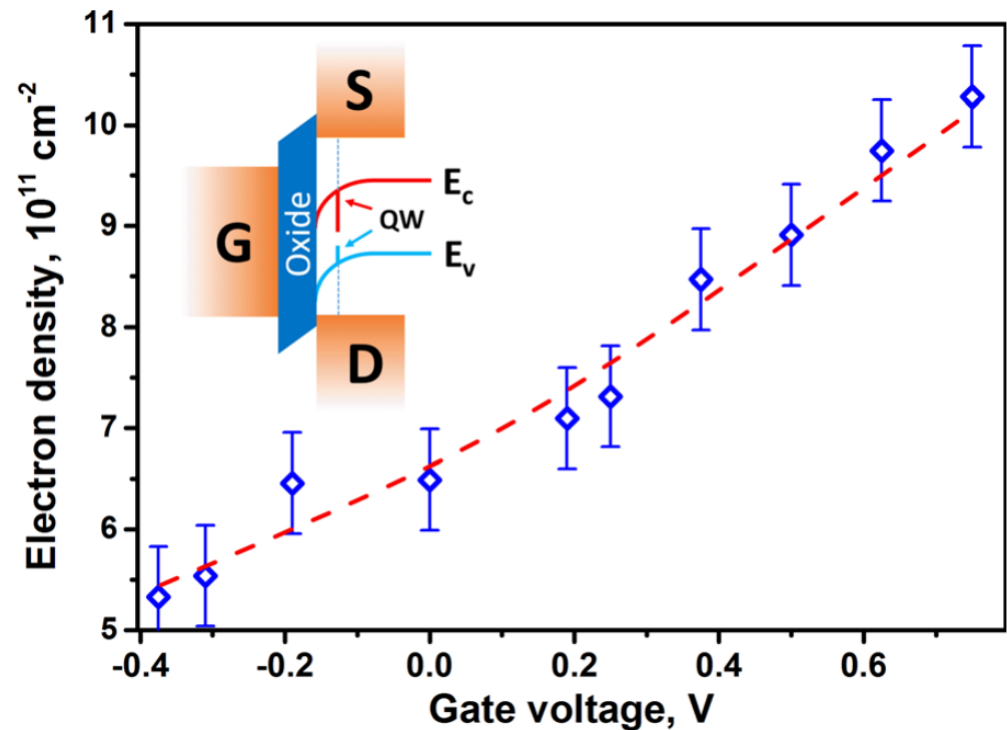
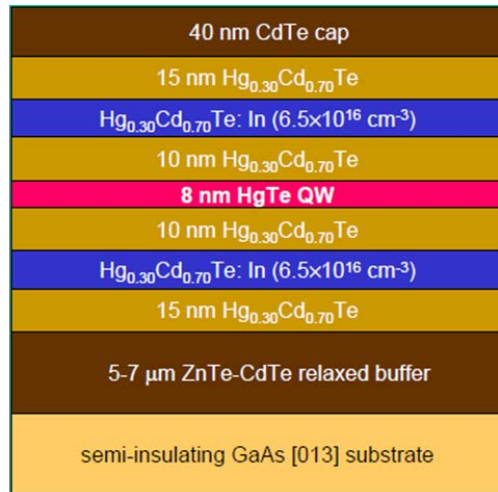


Popov, V. V., et al., *APL*, 104(16), p. 163508. (2014)

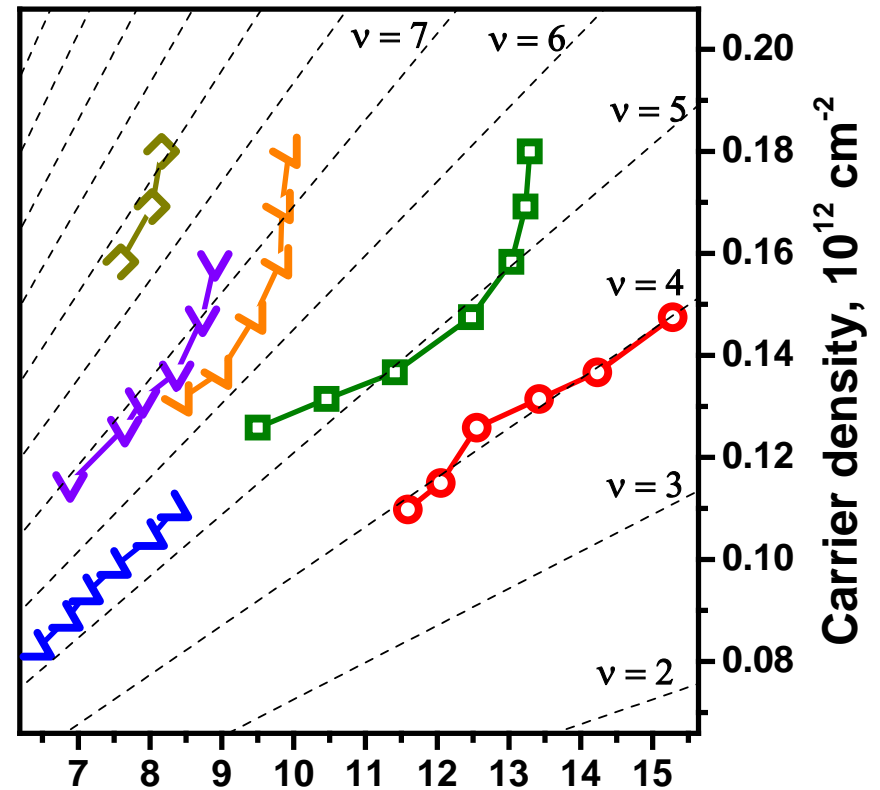
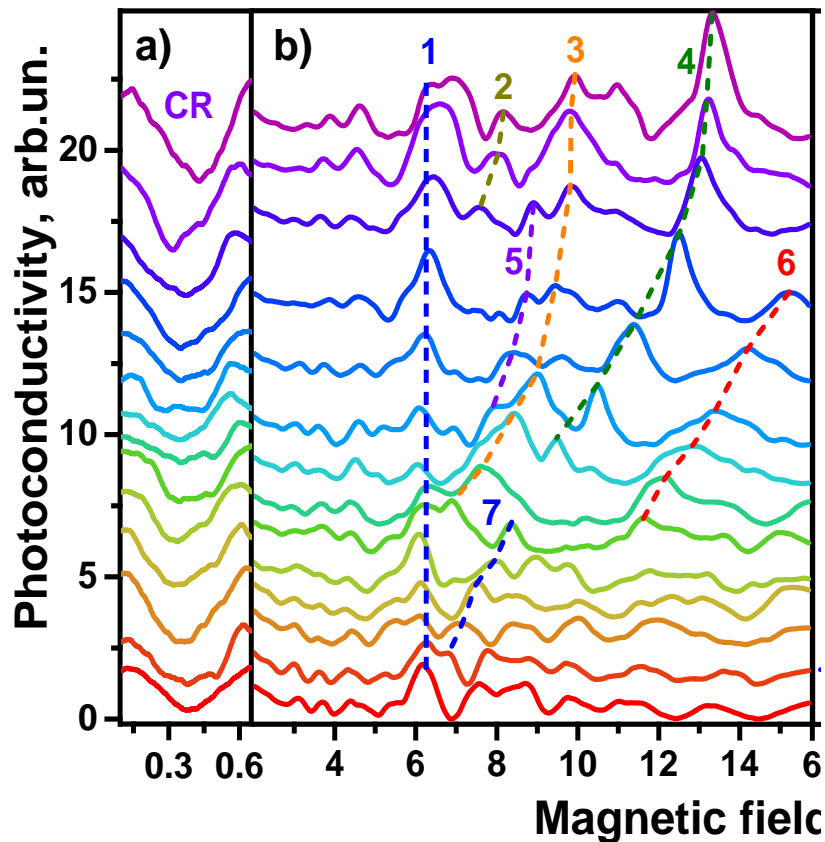
Popov, V. V., et al., *APL*, 98(15), p. 153504. (2011)

# Исследование полевых транзисторов на основе гетероструктур HgTe/CdHgTe

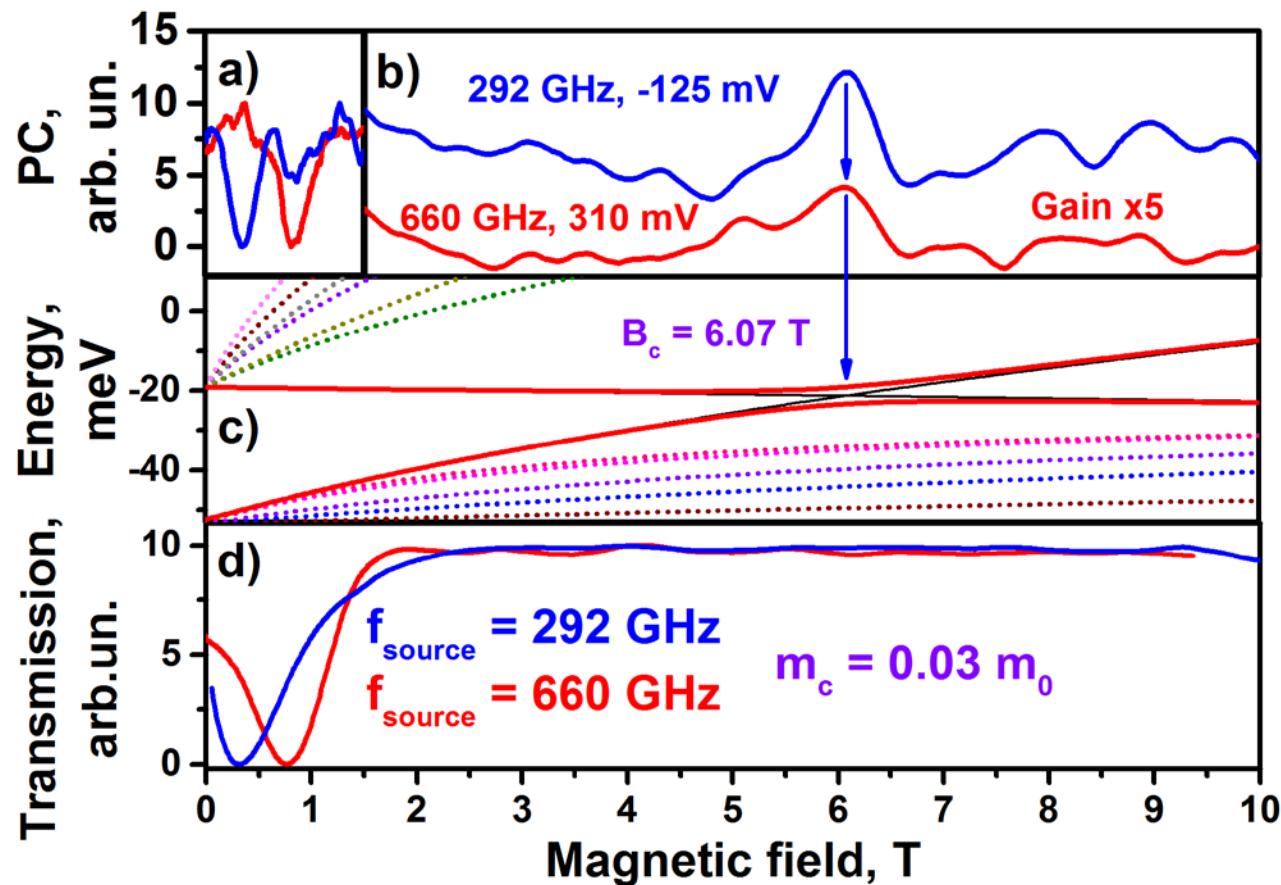
Инvertированная КЯ HgCdTe



# Фотоотклик в магнитном поле полевых транзисторов на основе гетероструктур HgTe/CdHgTe

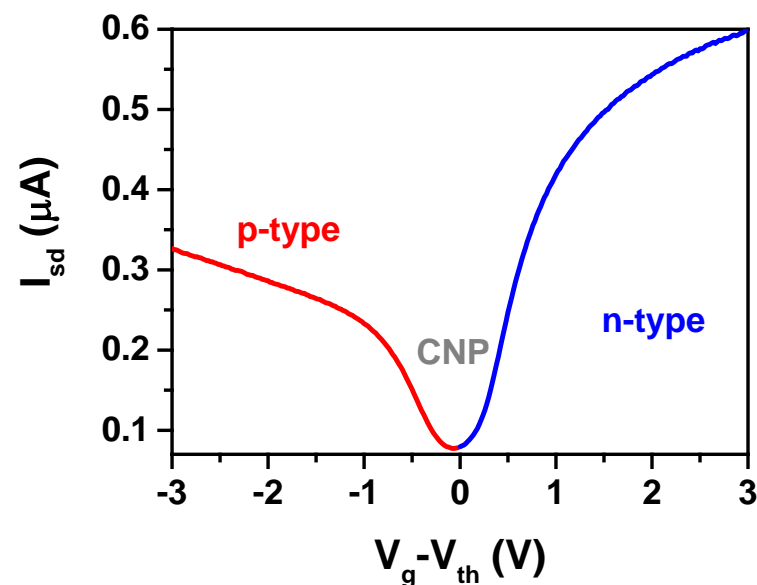
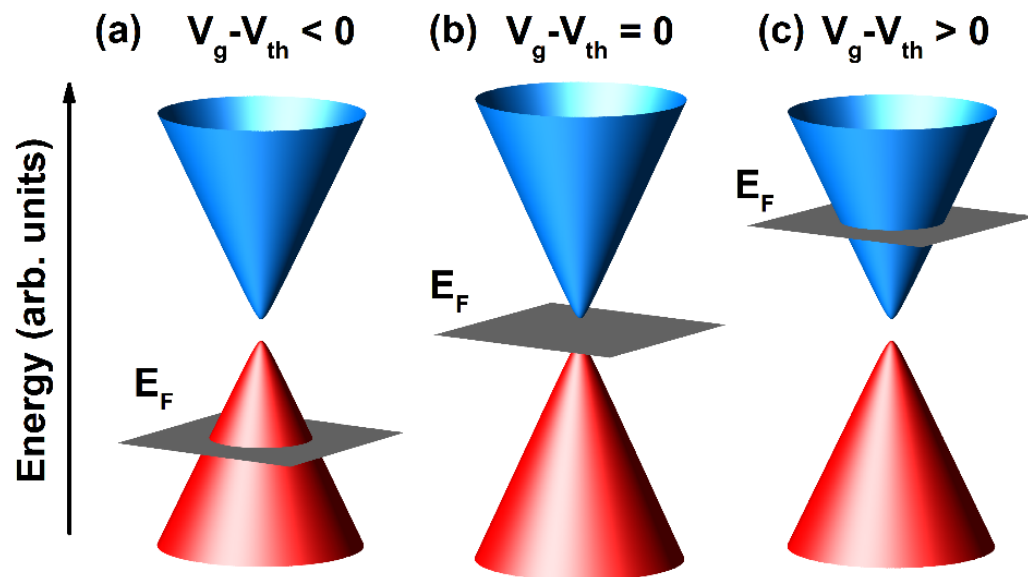
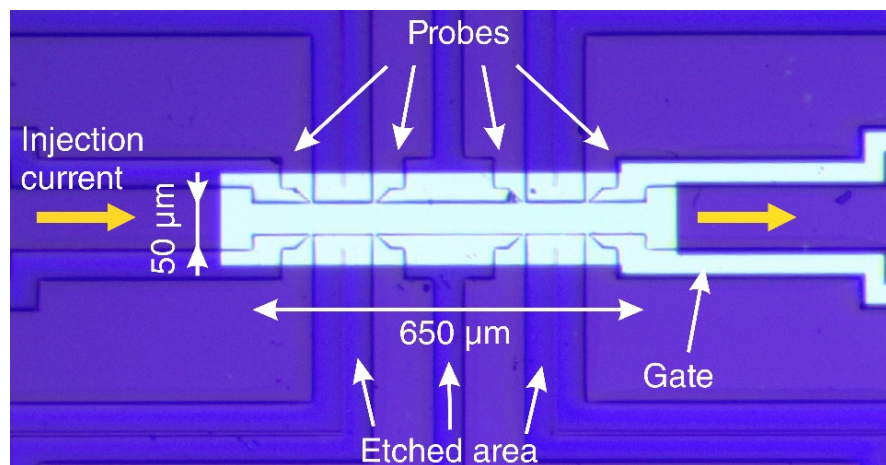


# Фотоотклик в магнитном поле полевых транзисторов на основе гетероструктур HgTe/CdHgTe



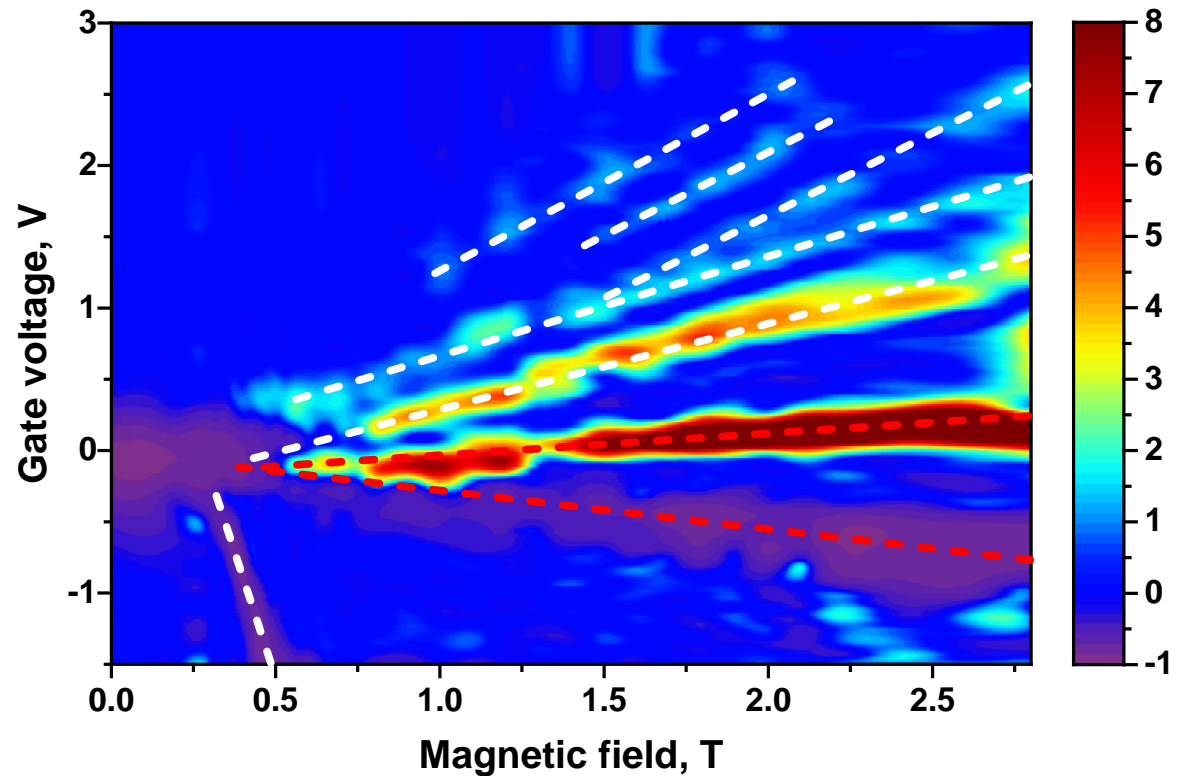
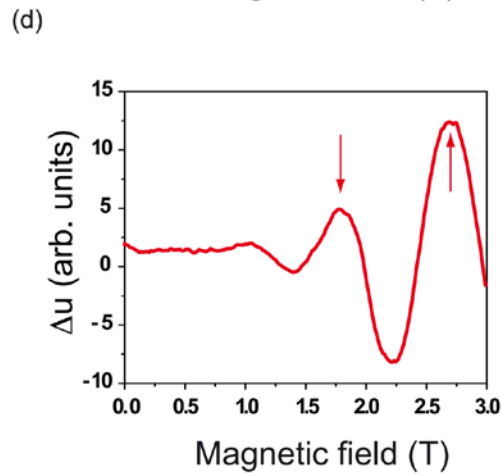
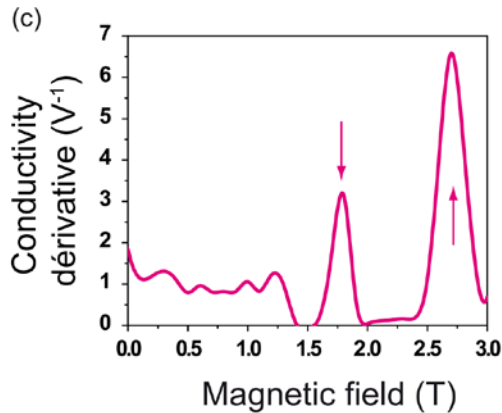
# Холловский мостик с затвором

$$d_{QW} = 6.6 \text{ nm} \\ > d_c \approx 6.3 \text{ nm}$$





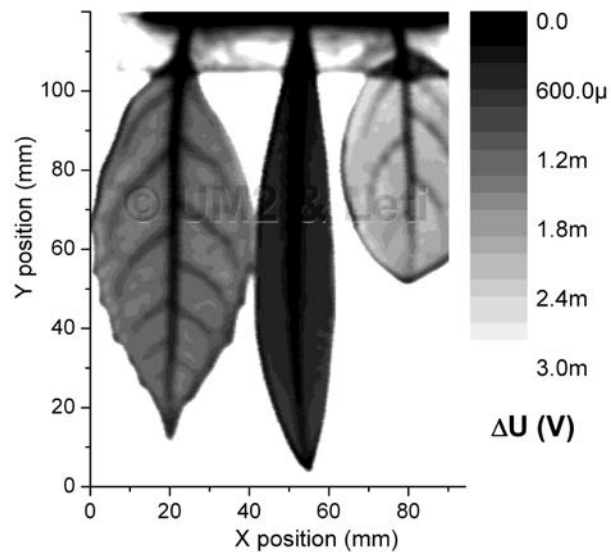
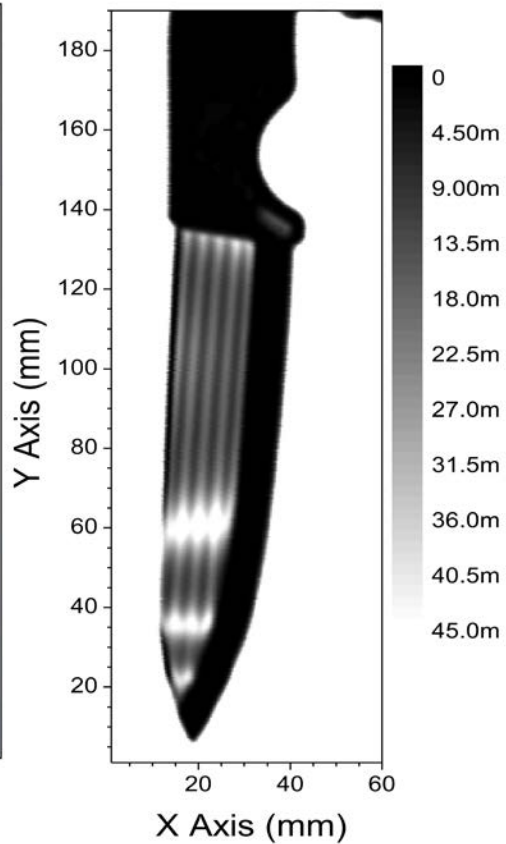
# Фотоотклик на монохроматичное ТГц излучение



$$\Delta U = \frac{U_a^2}{4} \left[ \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dU} \right]_{U=V_g} = \frac{U_a^2}{4} \frac{d(\ln \sigma)}{dV_g}$$

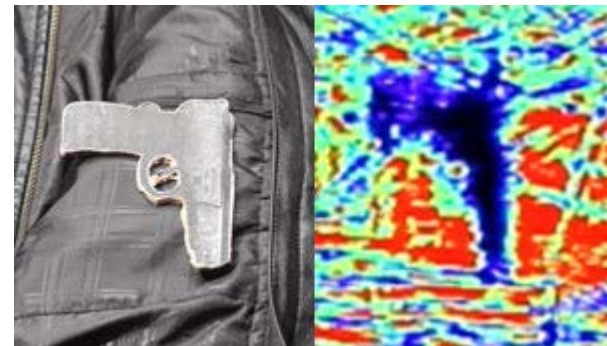


# Спасибо за внимание



# Практические разработки

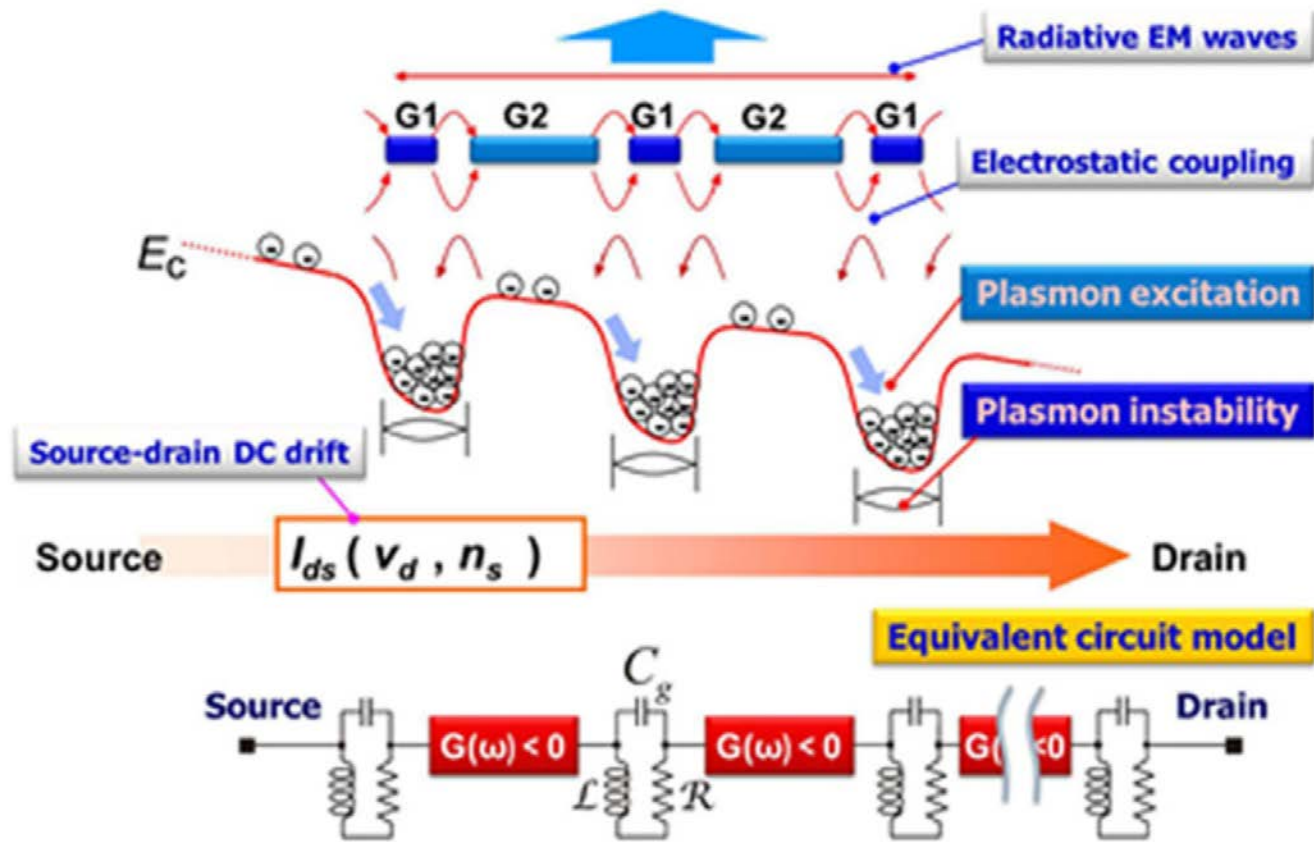
Tera/Ense



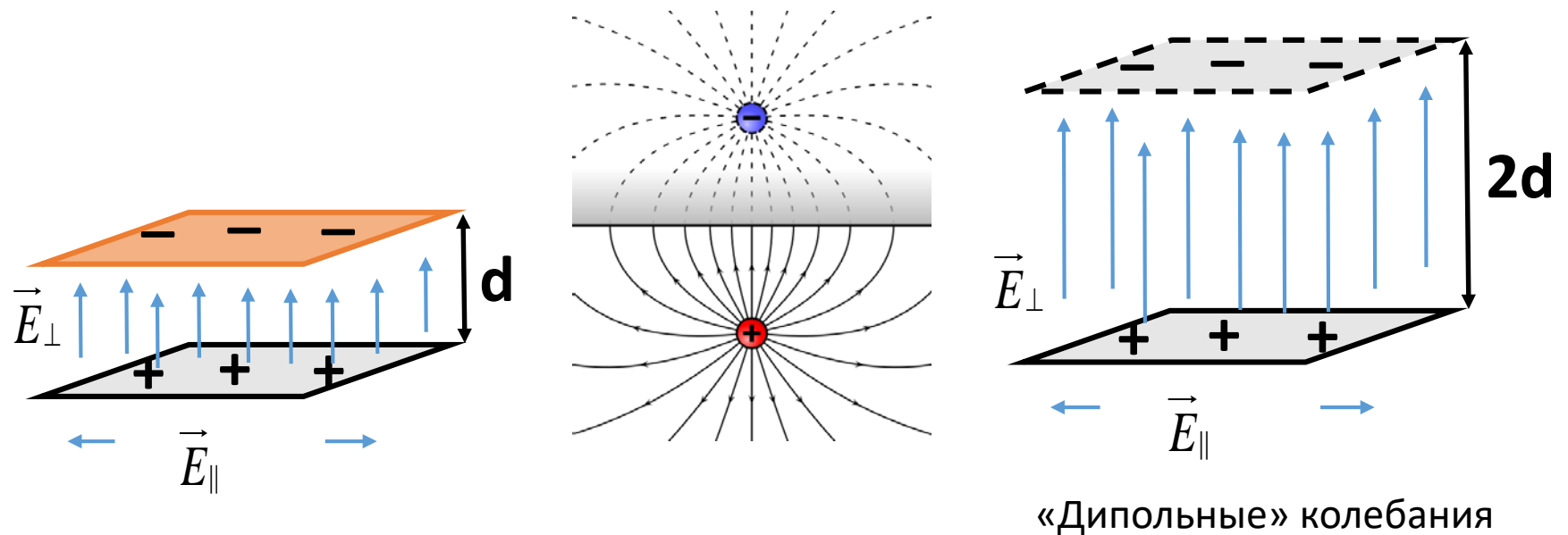
## Ultrafast Terahertz Detectors

	Ultrafast	Fast
Response time	150 ps	1 $\mu$ s
Spectral range	50 GHz - 0.7 THz	50 GHz - 0.7 THz
Impedance	50 $\Omega$	10 k $\Omega$
Responsivity	0.5 V/W	10 V/W
Noise equivalent power	2 nW/ $\sqrt$ Hz	1 nW/ $\sqrt$ Hz
No power supply	✓	✓

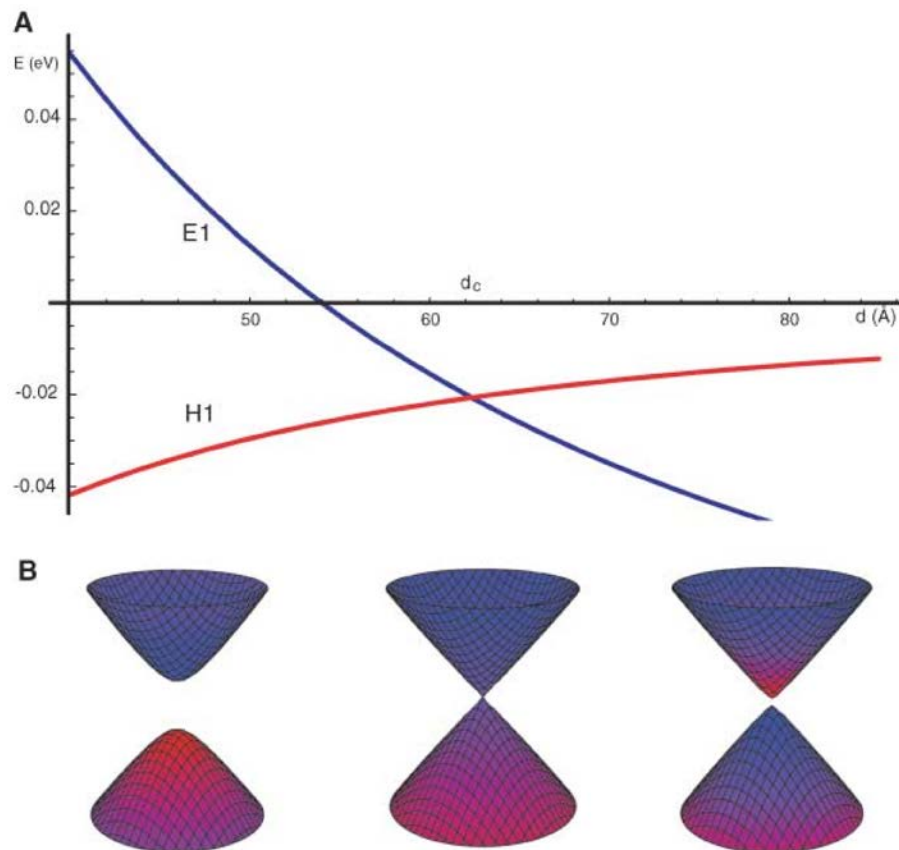
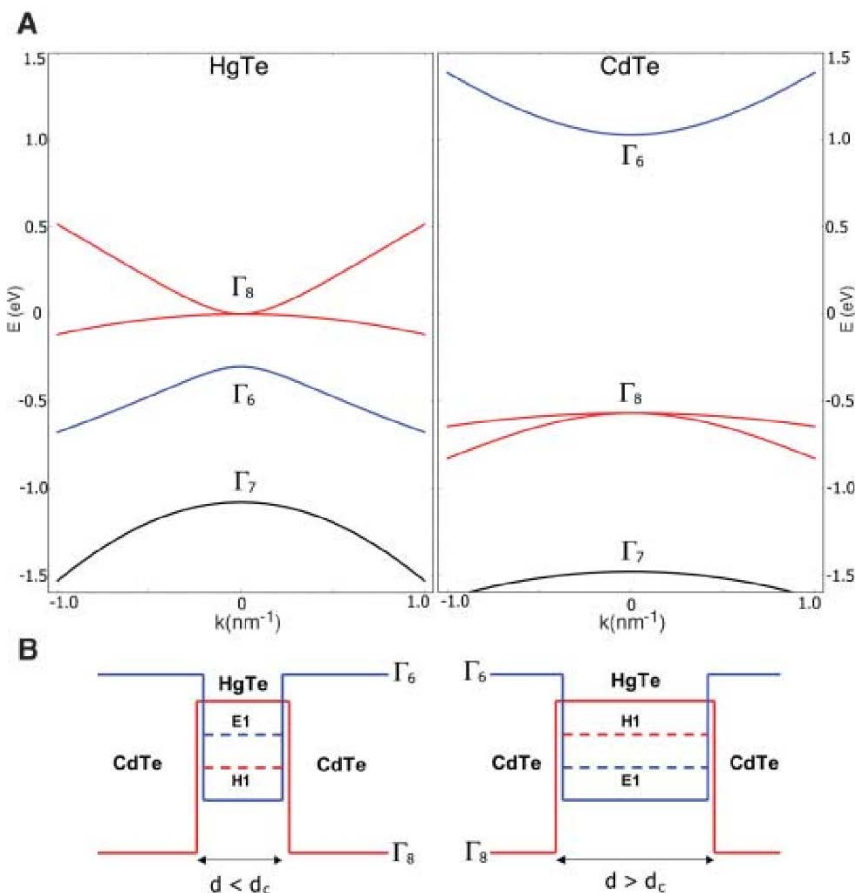
# Затворы в виде двойной решётки



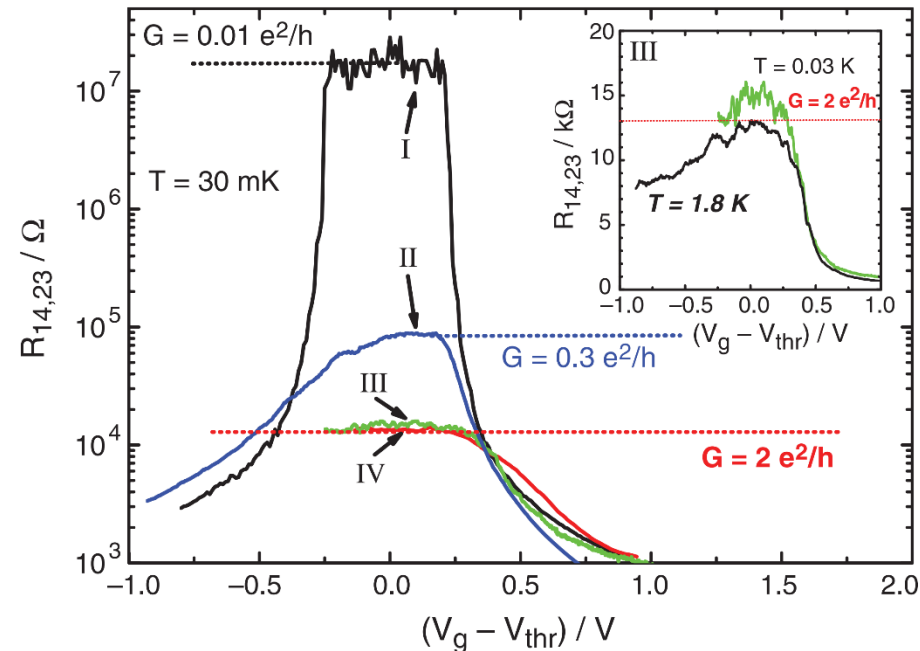
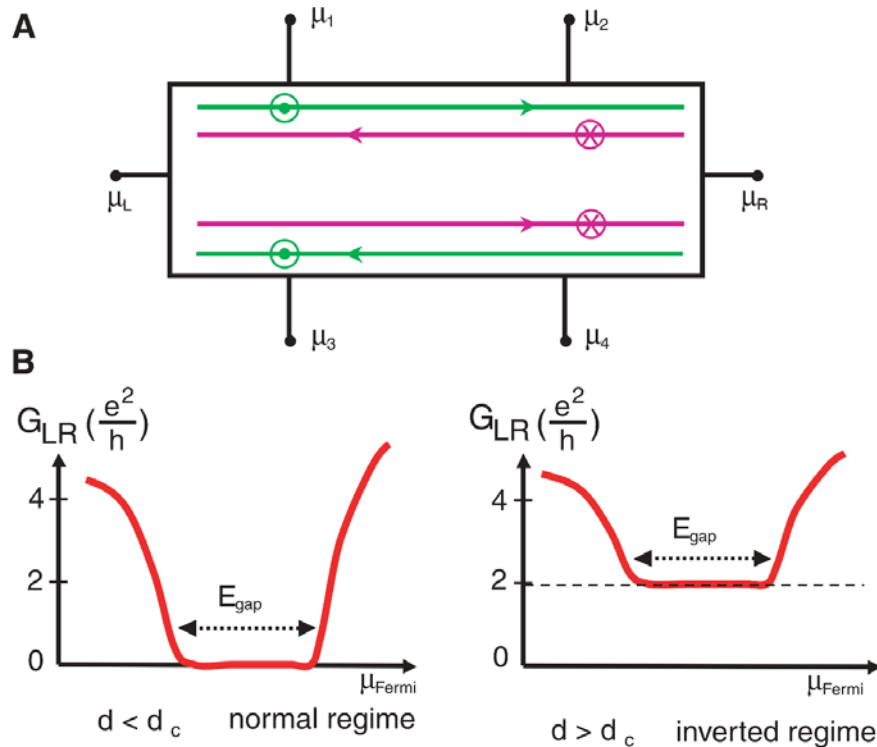
# Плазмоны в двумерных полупроводниках с затвором



# Зонная структура КЯ HgTe/CdHgTe



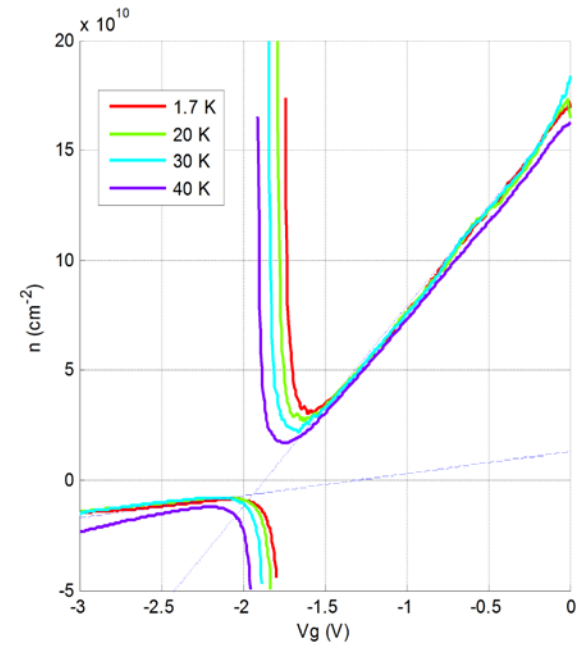
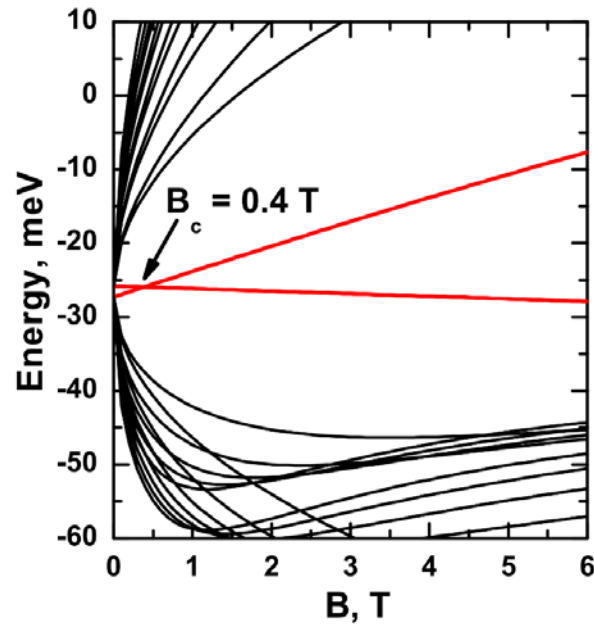
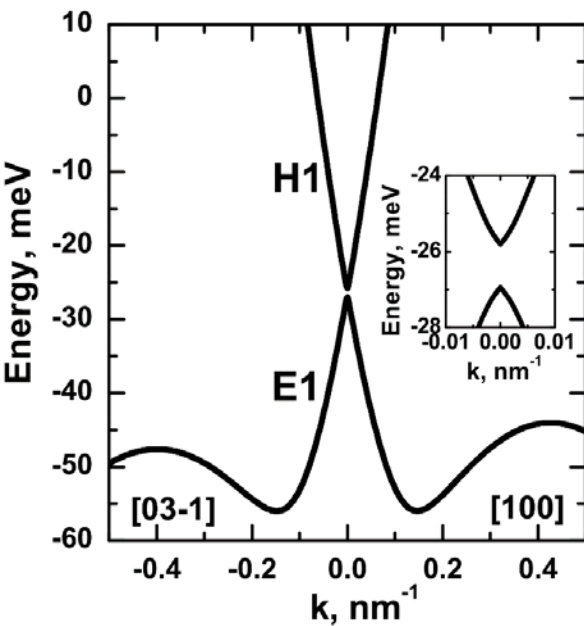
# Квантовый спиновый эффект холла



Bernevig, B. A., Hughes, T. L. and Zhang, S.-C. (2006), *Science*, 314(5806), pp. 1757–1761.

König, M., et. al., *Science*, 318(5851), pp. 766–770.

# Связь $E_F$ с затворным напряжением

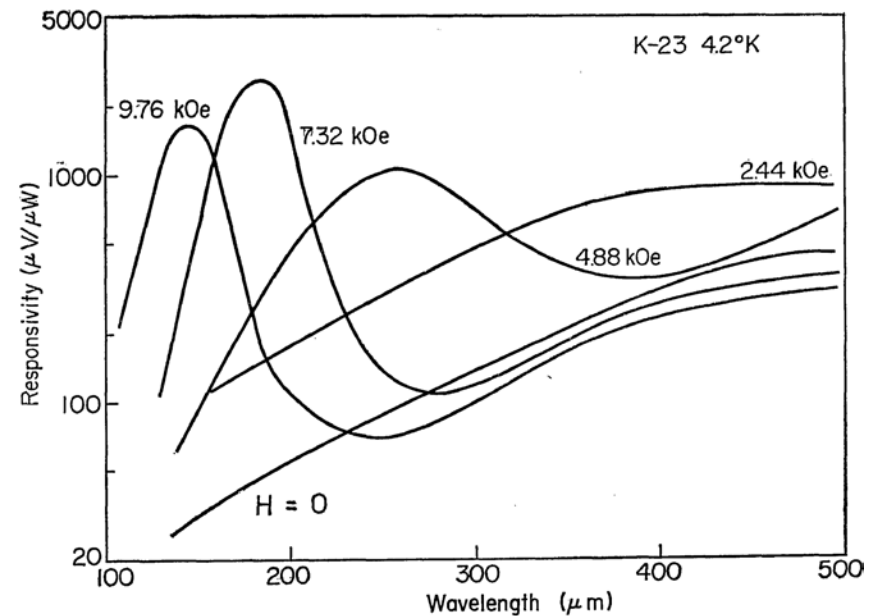


$$n \sim V_g$$

$$n \sim \int_E^{E_F} D(E) dE$$

# Циклотронный резонанс между уровнями Ландау

n-type InSb  
4.2 K





# Циклотронный резонанс и плазменные колебания

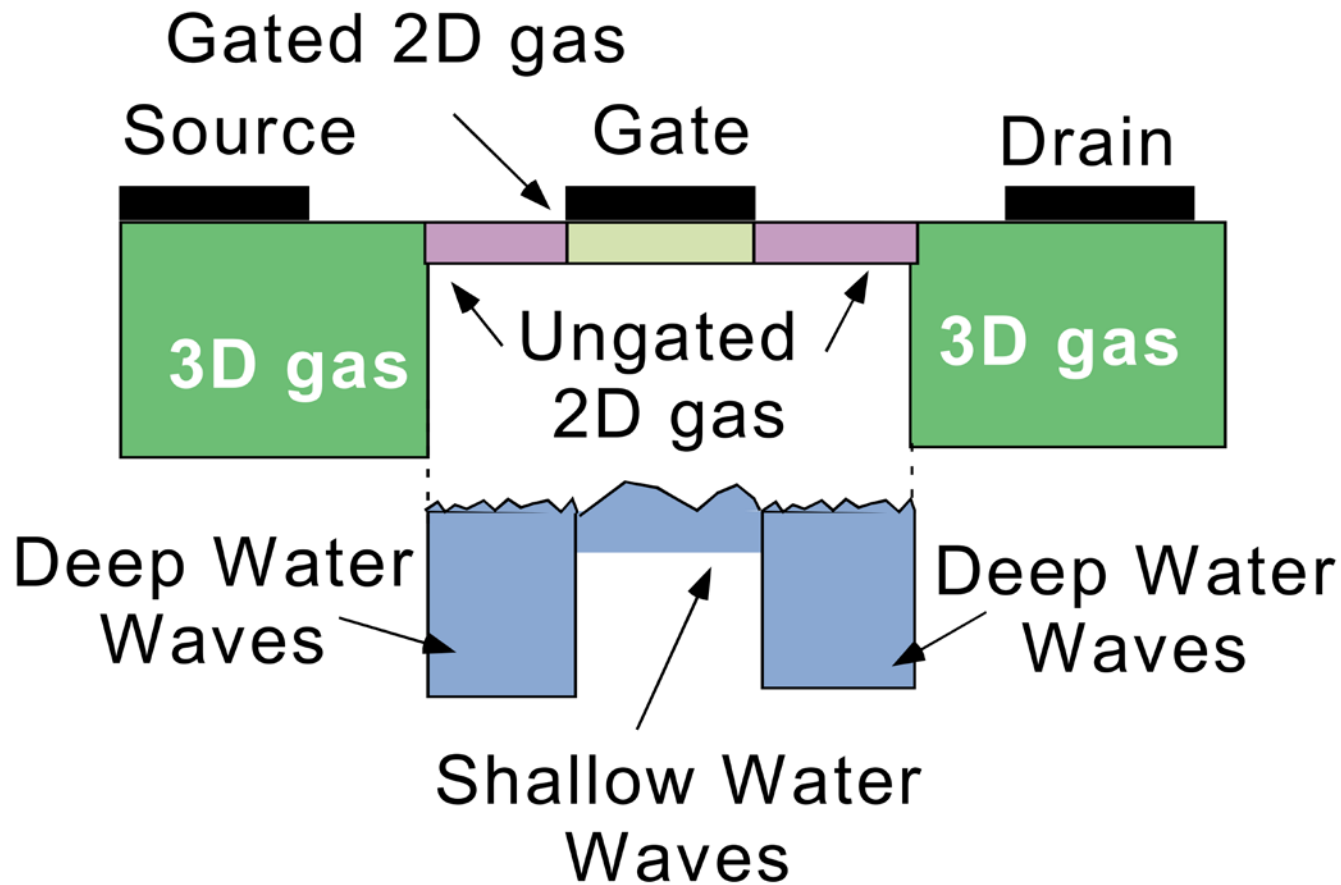
$$\omega = sk$$

$$\omega = \sqrt{\omega_c^2 + (sk)^2}$$

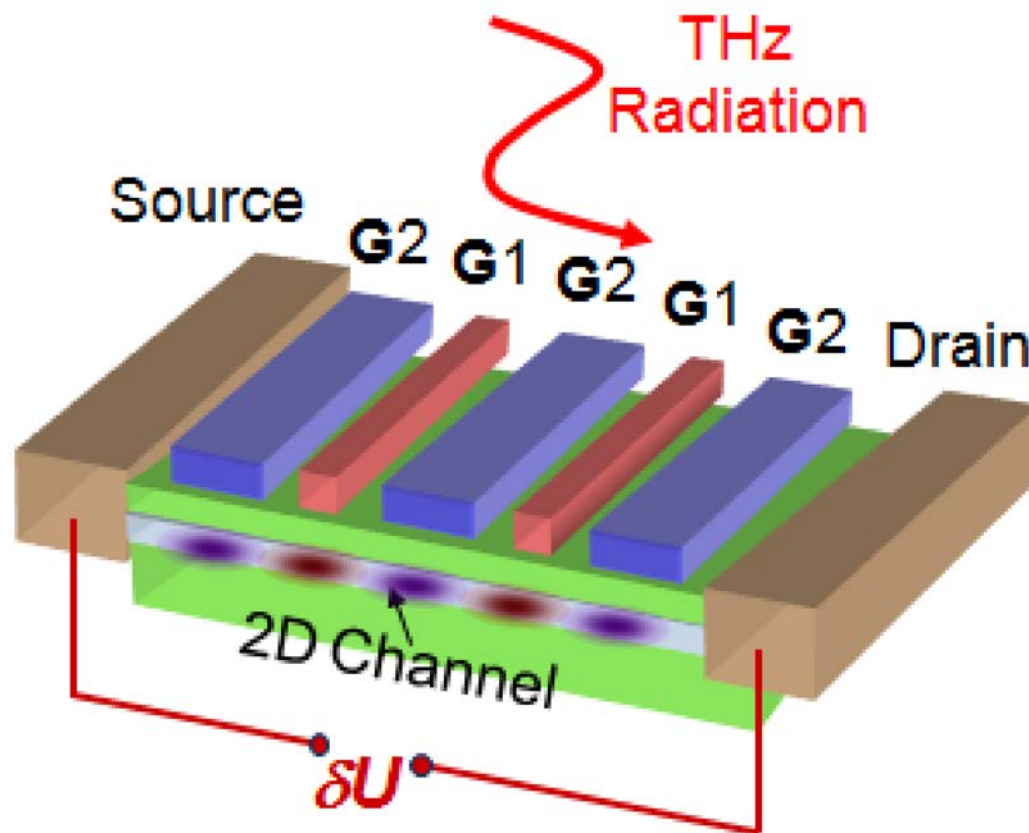
$$k = \frac{\omega}{s} \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2}}$$

При  $\omega < \omega_c$  плазменные возбуждения не распространяются

# Утечка плазменных возбуждений из подзатворной области



# FET с двойным решётчатым затвором



# Параметры ТГц детекторов комнатной температуры

		Sampling frequency (MAX)		NEP ( $\text{pW/Hz}^{0.5}$ )
Golay Cell		$\sim 20\text{Hz}$		<b>100</b>
Pyroelectric		$< 10\text{KHz}$		<b>1000</b>
Schottky Diodes		<b><math>&lt; 20\text{GHz}</math></b>		<b>10</b>
Microbolometers		$< 1\text{MHz}$		<b>10</b>
<b>Si transistors</b>		<b>30GHz or higher</b>		<b>10</b>

# Разогрев электронного газа

$$j = nev_d$$

$$v_d = \mu E$$

$$\frac{1}{\mu} = aT^{-3/2} + bT^{3/2}$$

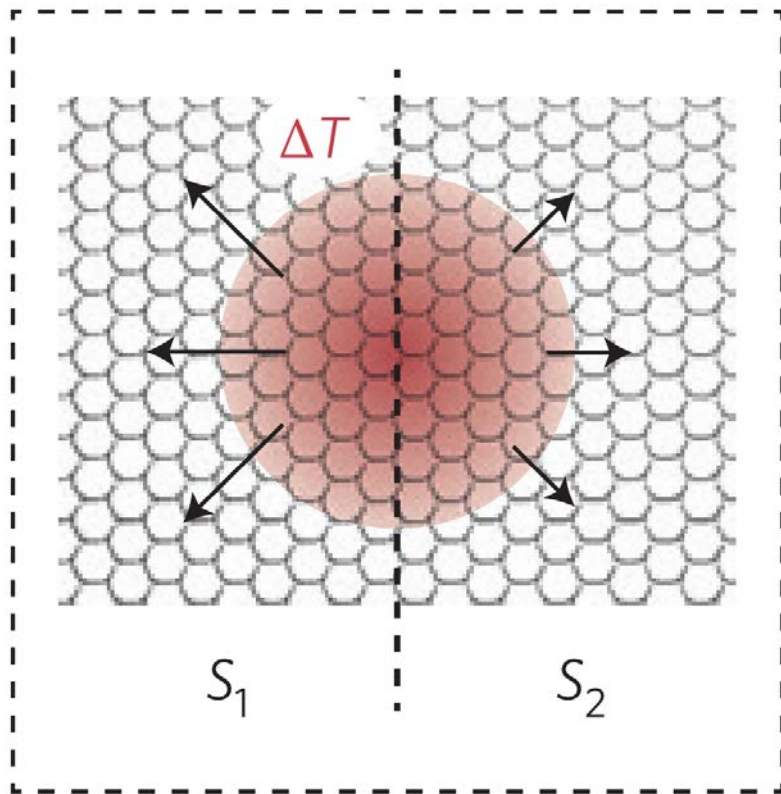


Changes by 2DEG THz heating

PC  $\sim$  injection current

# Фототермоэлектрический эффект

Photo-thermoelectric



$$\vec{V}_{\text{PTE}} = (\vec{S}_1 - \vec{S}_2) \Delta T_e$$

$$\vec{V}_{\text{PTE}} = \int \vec{S} \cdot \nabla T_e d\vec{x}$$

$$S = - \frac{\pi^2 k_B^2 T_e}{3q} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$$