

# Планарные плазмонные кристаллы как среда для обработки терагерцовых сигналов

Фатеев Д.В.

*Саратовский филиал Института радиотехники и  
электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
лаборатория фотоники, г. Саратов*

*Лаборатория «Метаматериалы» раздел  
«Исследование свойств плазмонных кристаллов»*

*e-mail: [FateevDV@yandex.ru](mailto:FateevDV@yandex.ru)*



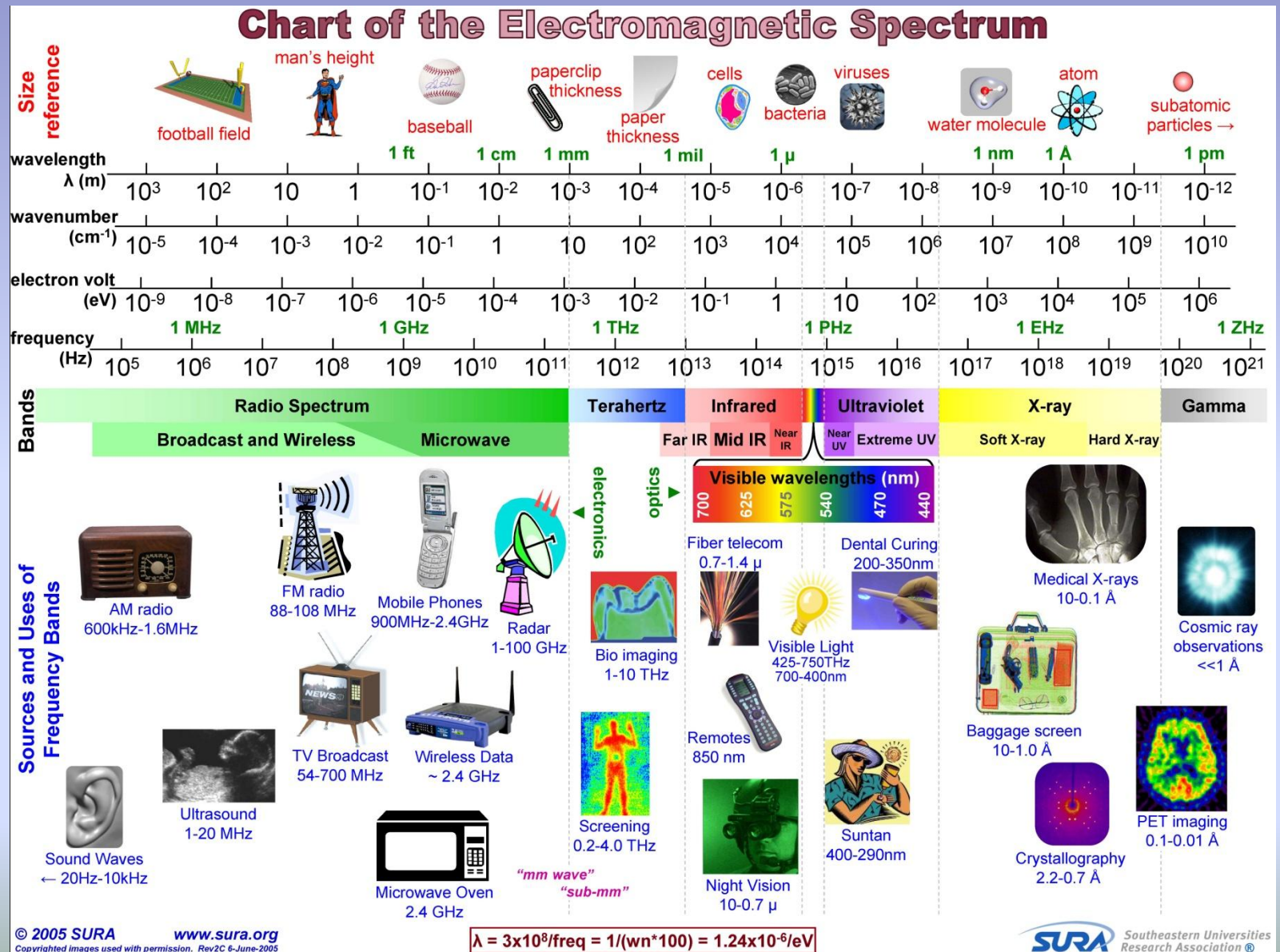
# Содержание

---

- Терагерцовые электромагнитные волны
- Двумерные плазмоны в полупроводниковых структурах
- Плазмоны в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Детектирование терагерцового излучения в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Выводы



# Электромагнитный спектр

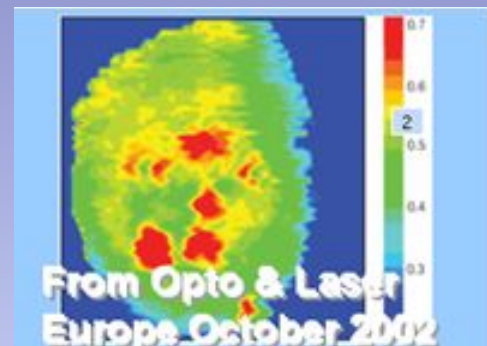
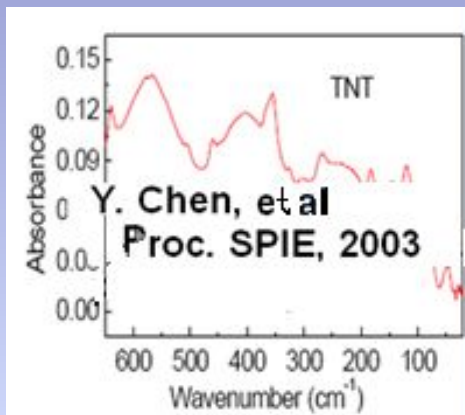




# Применения терагерцового излучения

Биология и медицина:  
молекулярные сенсоры

Обнаружение и идентификация  
взрывчатых и вредных химических  
и биологических веществ



Неразрушающая дефектоскопия  
Терагерцовая томография



Антитеррористический  
контроль



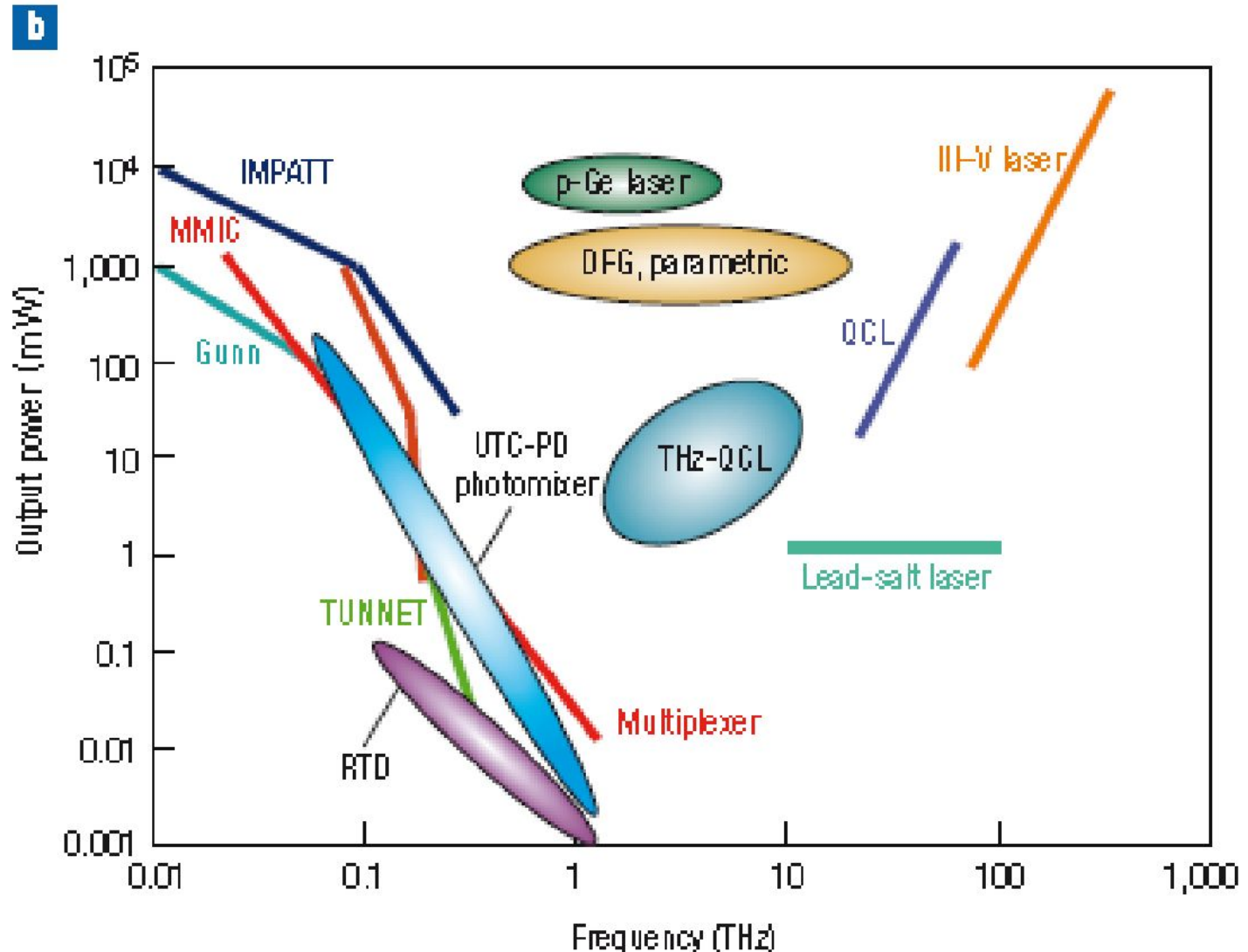
**А ТАКЖЕ:**

- Метеоконтроль
- Радиоастрономия
- Диагностика термоядерной плазмы
- Радары высокого разрешения
- Направленная (скрытая) связь
- Беспроводные межсоединения в интегральных схемах
- Мобильный Интернет

*Терагерцовое излучение сравнительно БЕЗВРЕДНО для  
человеческого организма!*



# Терагерцовая щель



From: M. Tonouchi, Nature Photon. **1**, 97 (2007)

# Плазмоны в двумерных электронных системах

---

- ✓ частоты плазмонов в двумерных электронных системах находятся в терагерцовом частотном диапазоне
- ✓ классический характер плазменных колебаний – нет квантовых ограничений в терагерцовом диапазоне
- ✓ плазмонный отклик может быть как широкополосным, так и частотно-селективным
- ✓ возможность широкой электрической перестройкой частоты плазмонного резонанса
- ✓ возможность электрического считывания и возбуждения плазмонного отклика
- ✓ плазмонный отклик является быстродействующим



# Содержание

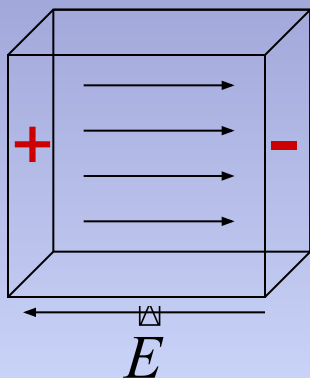
---

- Терагерцовые электромагнитные волны
- Двумерные плазмоны в полупроводниковых структурах
- Плазмоны в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Детектирование терагерцового излучения в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Выводы

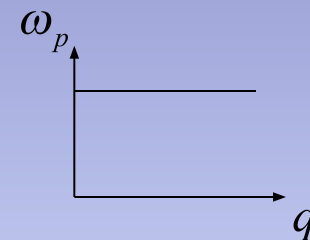


# Дисперсионные соотношения для плазменных волн

3D

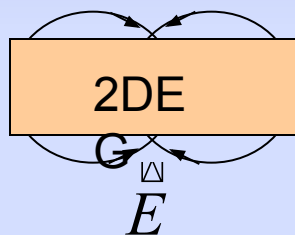


$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_{3D}}{\epsilon \epsilon_0 m}}$$

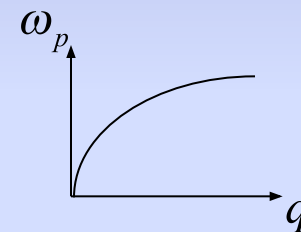


2D

(неэкранированы  
е)

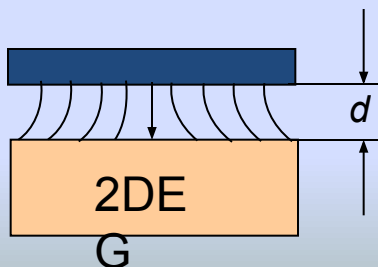


$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_{2D}}{2\epsilon \epsilon_0 m}} q$$

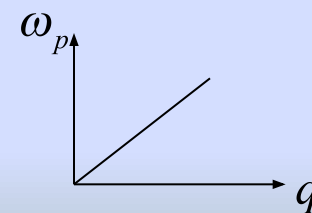


2D

(экранированы  
е)



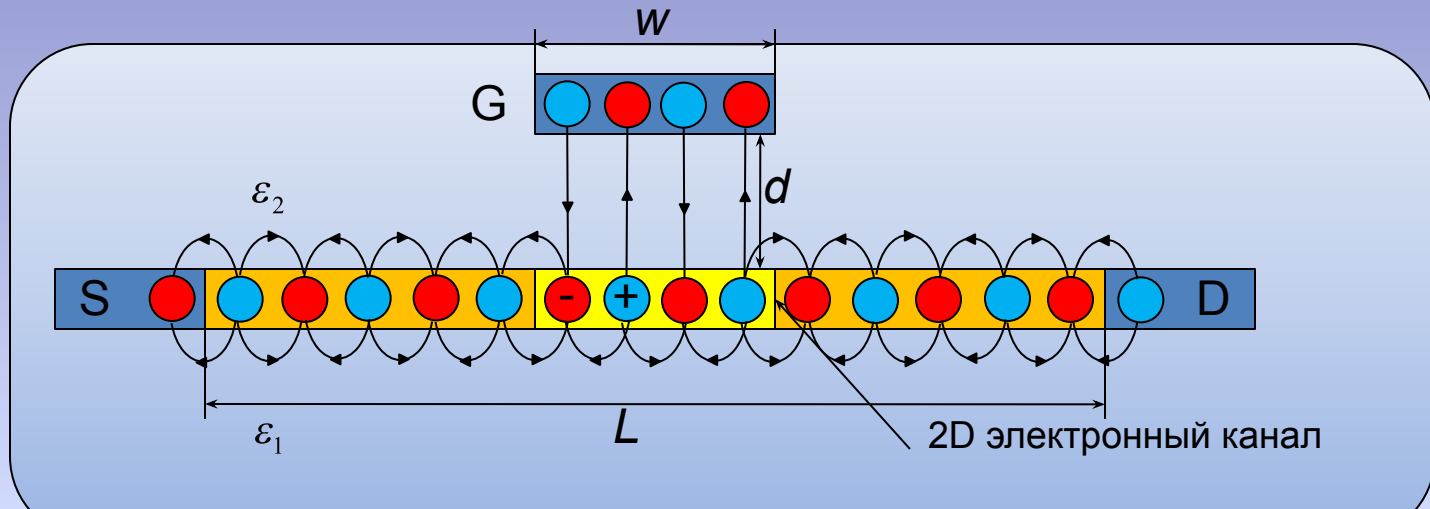
$$\omega_p = q \sqrt{\frac{e^2 n_{2D} d}{\epsilon \epsilon_0 m}}$$







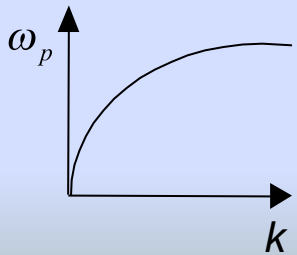
# Плазмонные моды в полевом транзисторе с 2D электронным каналом



Межконтактные 2D плазмоны

Подзатворные 2D плазмоны ( $kd \ll 1$ )

$$\omega = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N}{m^* (\epsilon_1 + \epsilon_2)}} q$$

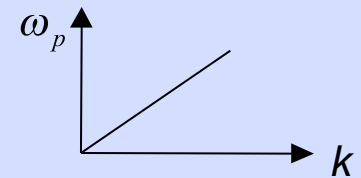


R.H. Ritchie, PR (1957)  
F. Stern, PRL (1967)

$$\omega = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N d}{m^* \epsilon_2}} q$$

$$N = \frac{\epsilon_2}{4\pi e} \frac{U_g - U_{th}}{d}$$

А.В. Чаплик, ЖЭТФ (1972)



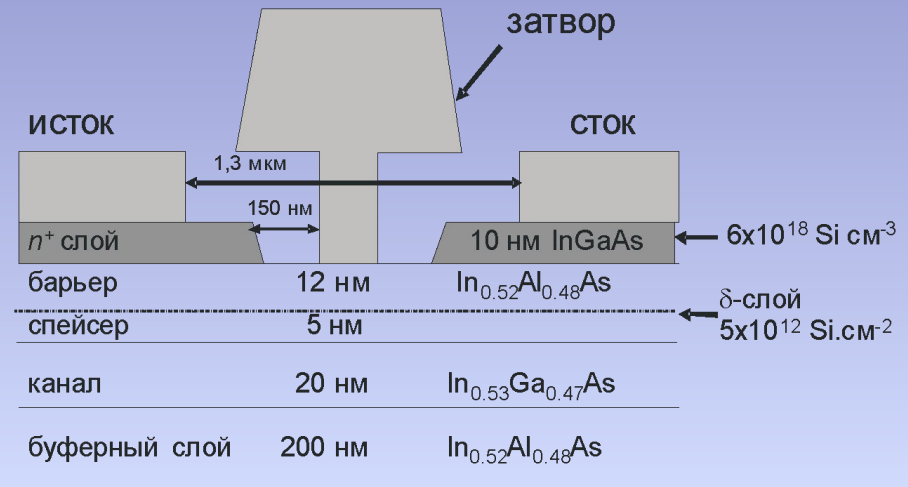
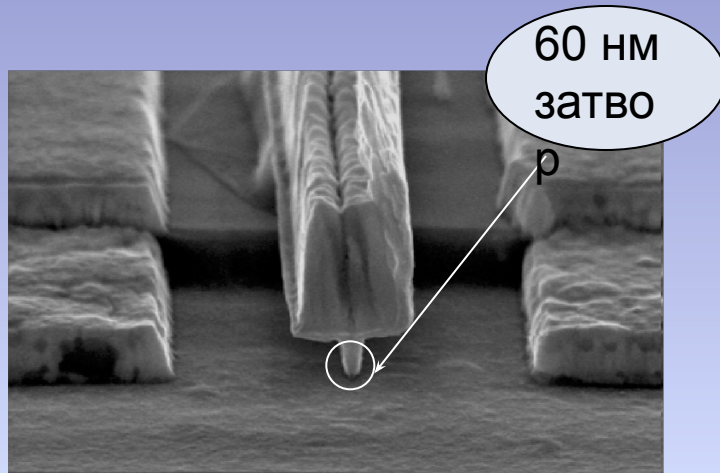
$$\omega = sk,$$

M.Dyakonov, M.Shur, PRL (1993)

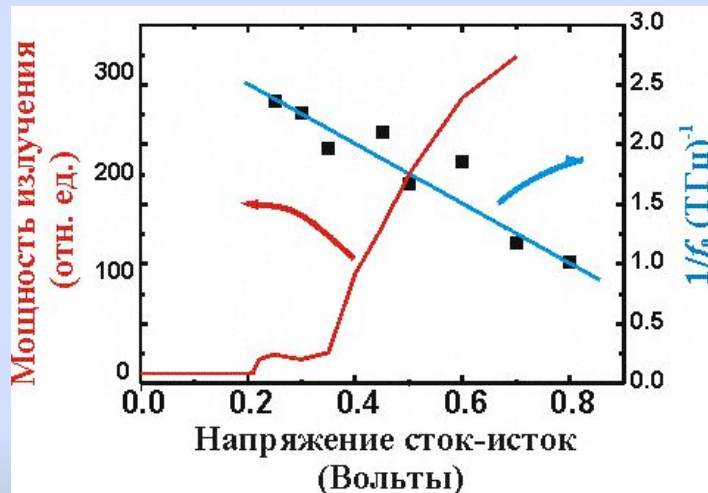
$$s = \sqrt{\frac{eU_0}{m^*}}$$

$S \gg V_{drift}$  (!!!)

# InGaAs гетеротранзистор с 2D электронным каналом для генерации ТГц излучения



InP подложка



## Коллектив разработчиков

- Институт радиотехники и электроники РАН, г.Саратов, Россия
- Университет г.Монпелье, Франция
- Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологии, г.Лилль, Франция
- Политехнический институт Ренсселаера г.Троя, США



# Недостатки транзисторов с одиночным затвором



Поперечное сечение  
ТГц пучка

HEMT

Размер обычного одиночного плазмонного транзистора гораздо меньше площади поперечного сечения ТГц пучка

Минусы одиночного транзистора:

- Рабочие частоты малы
- Плазмоны слабо связаны с ТГц излучением
- Необходим антенный элемент

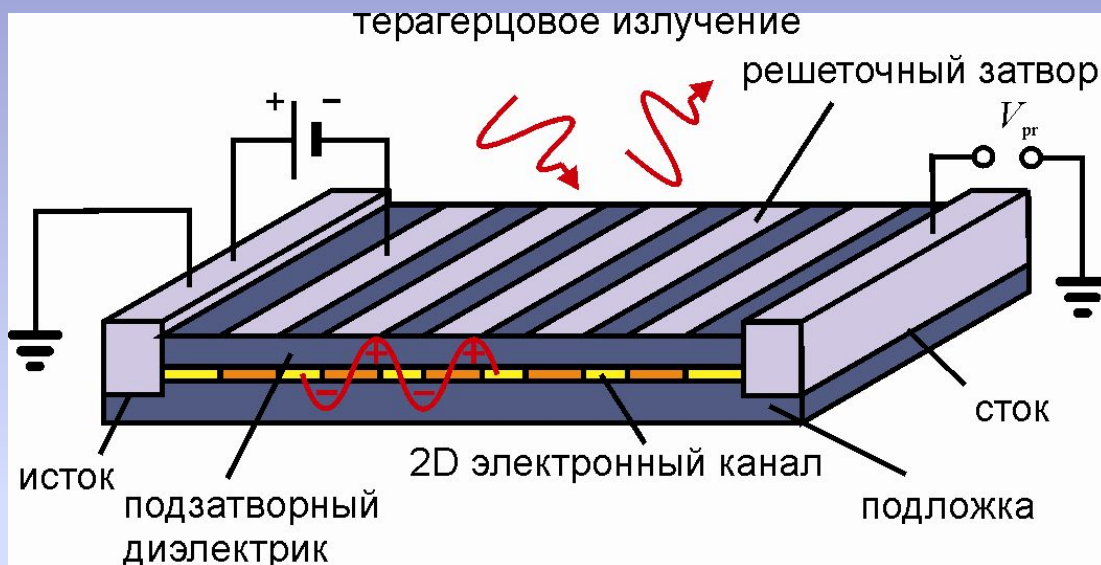
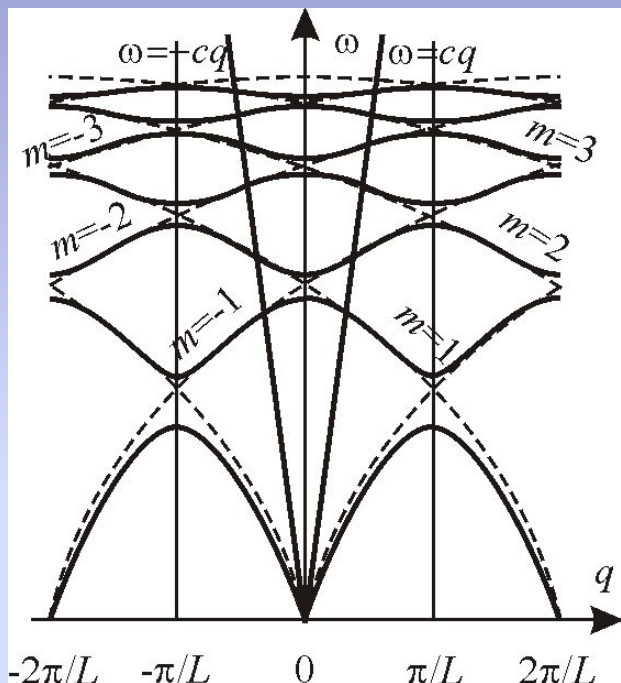
# Содержание

---

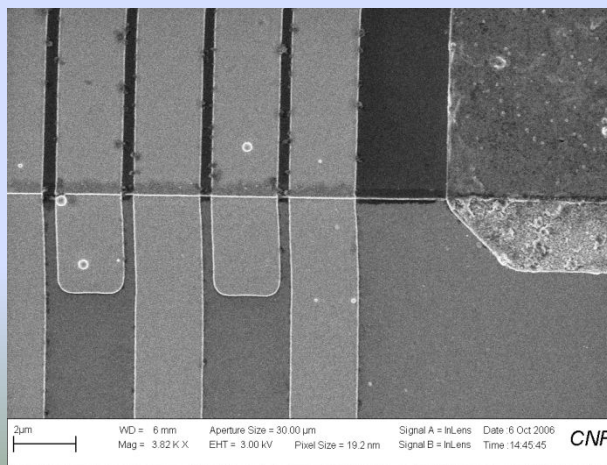
- Терагерцовые электромагнитные волны
- Двумерные плазмоны в полупроводниковых структурах
- Плазмоны в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Детектирование терагерцового излучения в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Выводы



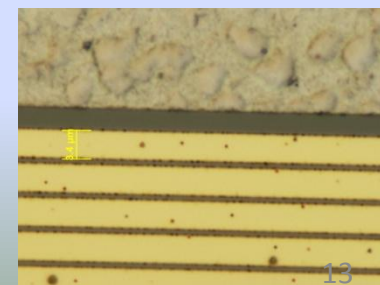
# Структура полевого транзистора с 2D электронным каналом и решеточным затвором большой площади



Вид сверху СТМ



Вид сверху  
оптическая  
микрофотография



# Электродинамическое описание транзисторной структуры с решеточным затвором и 2D электронным каналом

## Шаг 1: Фурье-гармоники продольного электрического поля в плоскости канала и затвора

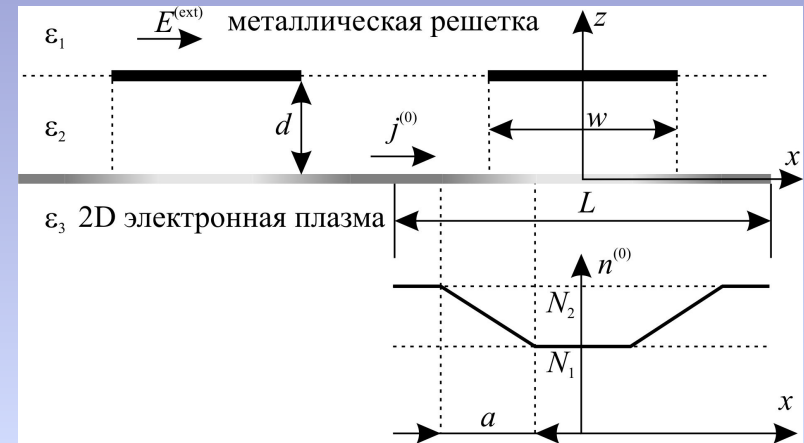
$$E_{\omega_0, q}(d) = Z_q^{(1,1)} j_{\omega_0, q}(d) + Z_q^{(1,2)} j_{\omega_0, q}(0) + \eta_1 E_{\omega_0} \delta_{q,0},$$

$$E_{\omega_0, q}(0) = Z_q^{(2,1)} j_{\omega_0, q}(d) + Z_q^{(2,2)} j_{\omega_0, q}(0) + \eta_2 E_{\omega_0} \delta_{q,0},$$

## Шаг 2: Материальные уравнения

$$j_{\omega_0, q}(x) = \sum_{q'} \sigma_{q, q'}(\omega_0) E_{\omega_0, q'}$$

$$j_{\omega_0}(x) = \sigma_{\omega_0}(x) E_{\omega_0}(x)$$



## Шаг 3: Система интегральных уравнений в плоскости затвора и 2D плазмы

$$j_{\omega_0}(x, d) = \int_{-w/2}^{w/2} j_{\omega_0}(x', d) G_{1,1}(x, x') dx' + \int_{-L/2}^{L/2} j_{\omega_0}(x', 0) G_{1,2}(x, x') dx' + G_{1,0},$$

$$j_{\omega_0}(x, 0) = \int_{-w/2}^{w/2} j_{\omega_0}(x', d) G_{2,1}(x, x') dx' + \int_{-L/2}^{L/2} j_{\omega_0}(x', 0) G_{2,2}(x, x') dx' + G_{2,0}(x),$$

## Шаг 4: Процедура Галеркина

$$j_{\omega_0}(x, d) = \sum_{n=0}^{\infty} r_n P_n(\rho),$$

$P_n(\rho)$  – Полиномы Лежандра

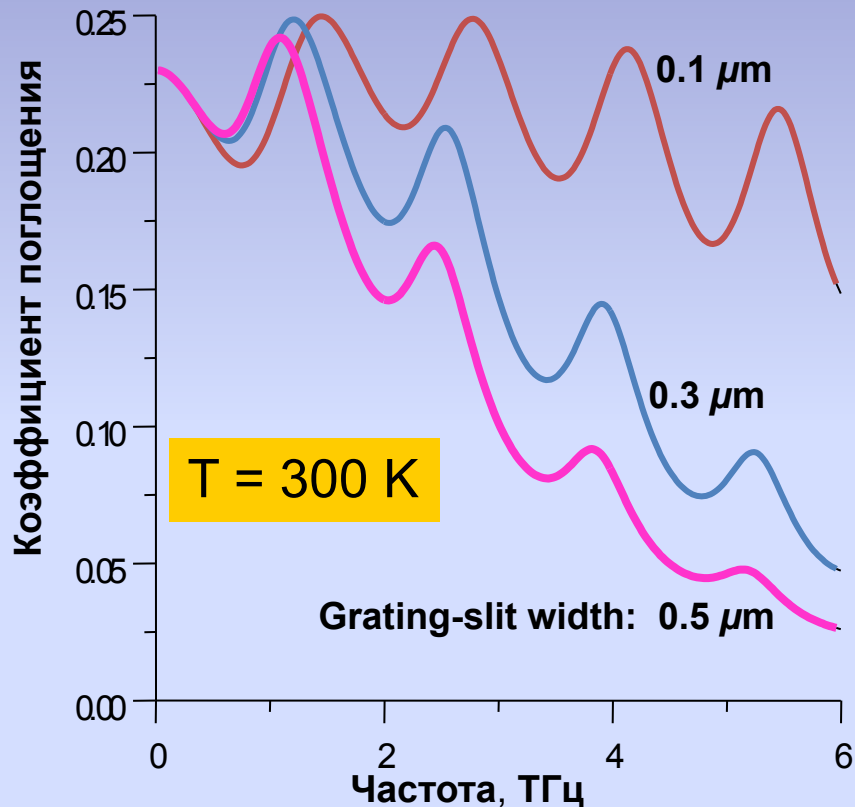
$$j_{\omega_0}(x, 0) = \sum_{n=0}^{\infty} s_n P_n(\xi),$$

$J_n^{(s)}(qw/2)$  – Сферические функции Бесселя



# Плазмонные резонансы в AlGaN/GaN полевом транзисторе с узкощелевым решеточным затвором

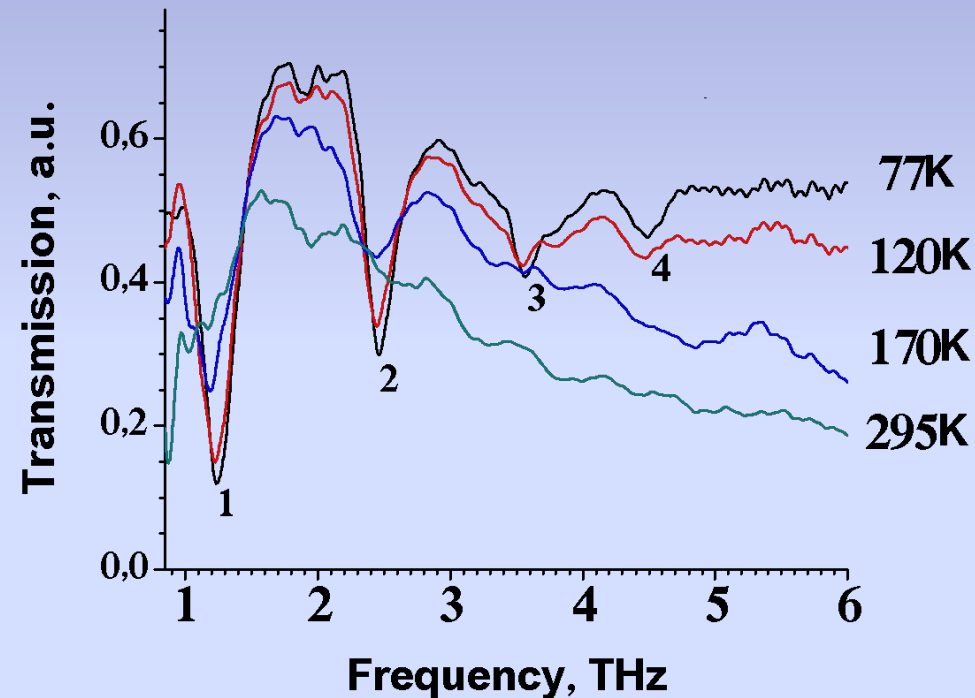
## Теория



Ширина затворного электрода  $1 \mu\text{m}$

## Эксперимент

A.V. Muraviev et al. APL (2010)



1 – 77K; 2 – 120K

3 – 170K; 4 – 295K

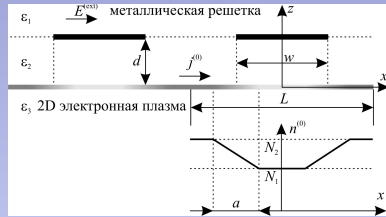
$w = 1.1 \mu\text{m}$ ;  $s = 0.4 \mu\text{m}$

Площадь затвора  $2 \times 2 \text{ mm}$

В.В. Попов, Г.М. Цымбалов, Т.В. Теперик, Д.В. Фатеев,  
М.С. Шур // Известия РАН. Серия физическая, 2007

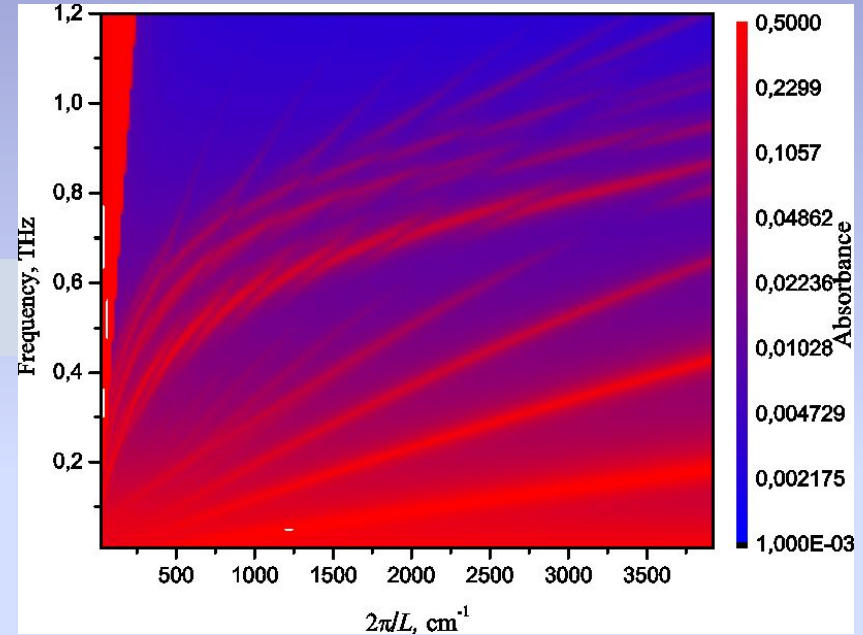
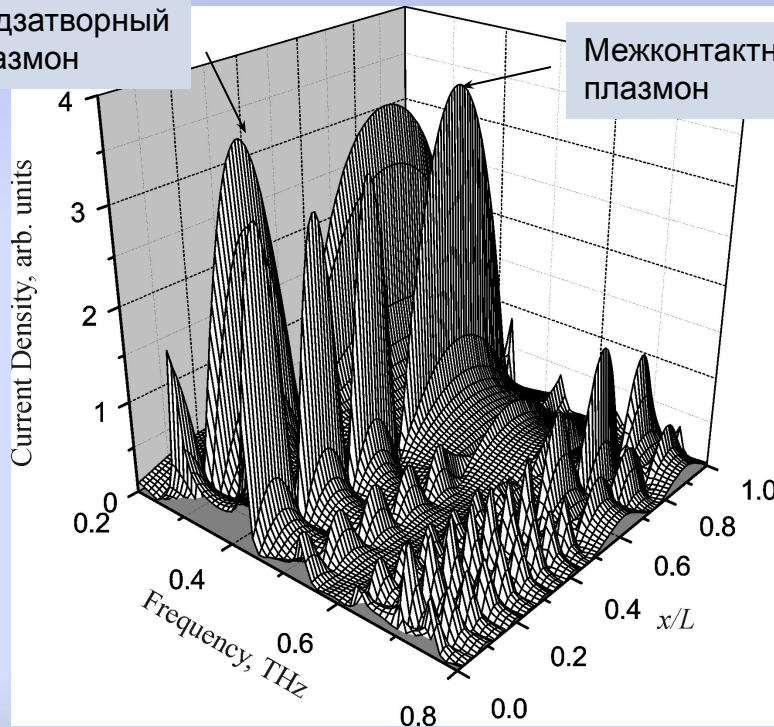


# Плазмонные моды в структуре полевого транзистора с пространственно периодическим 2D электронным каналом



Подзатворный плазмон

Межконтактный плазмон

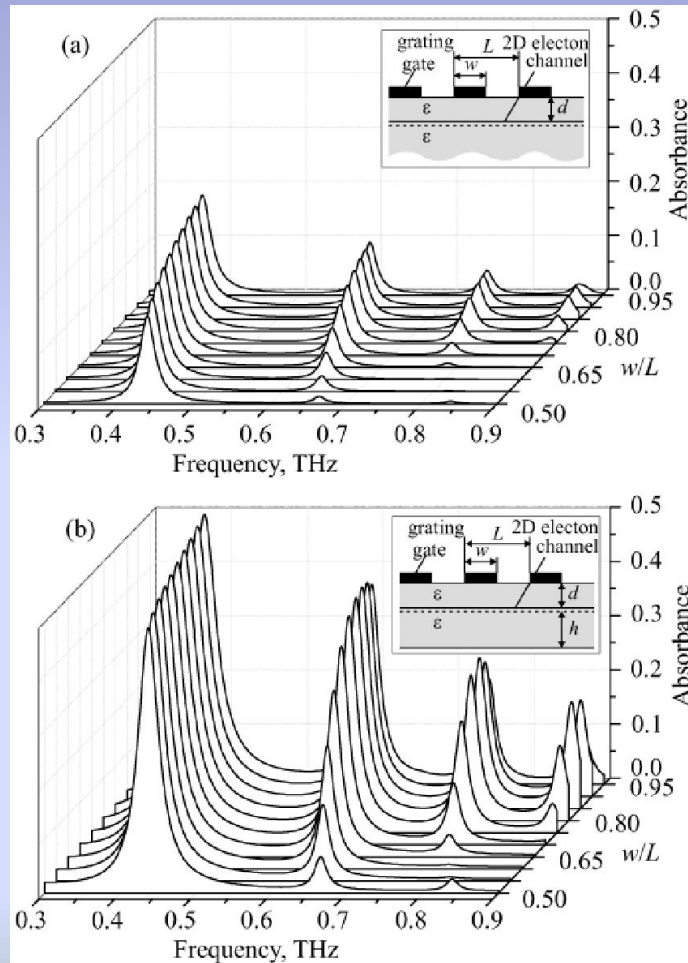


- Интенсивность плазмонного резонанса падает на два порядка величины при обеднении межконтактных областей 2D канала
- Резонансные возбуждения межконтактных плазмонов могут значительно усилить подзатворные плазмонные резонансы





# Плазмонные резонансы в структуре с решеточным затвором на мембранной подложке



- В структуре с мембранной подложкой подавляется отраженная ТГц волна
- В структуре с мембранной подложкой коэффициент связи плазмонов с ТГц волной увеличивается в два раза по сравнению со структурой на объемной подложке

$$\text{for } \varepsilon \approx 10 \quad \gamma_{rad}^{(M)} \approx 2\gamma_{rad}^{(B)}$$

$$A_{res}^{(M)} \approx 2 \frac{\gamma_{rn}}{\gamma_e} \approx 5 A_{res}^{(B)}$$

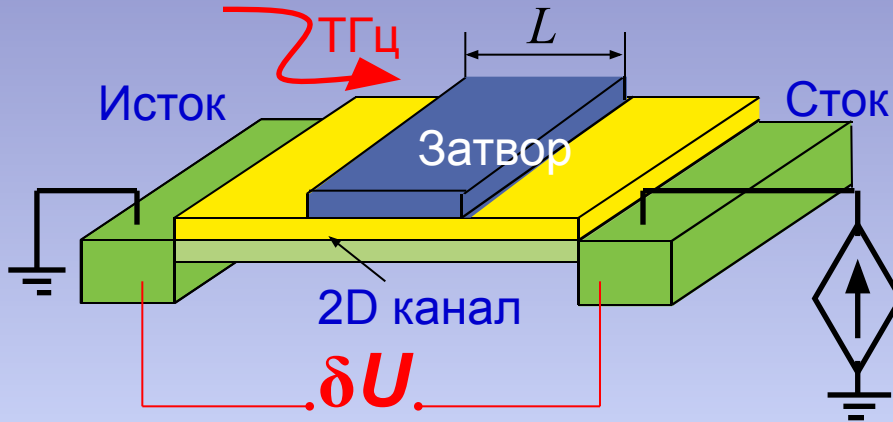
# Содержание

---

- Терагерцовые электромагнитные
- Двумерные плазмоны в полупроводниковых структурах
- Плазмоны в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Детектирование терагерцового излучения в транзисторных структурах с периодическим решеточным затвором
- Выводы



# Плазмонное детектирование ТГц излучения



Гидродинамические уравнения:

$$\frac{\partial V(x)}{\partial t} + V(x) \frac{\partial V(x)}{\partial x} + \frac{V(x,t)}{\tau} = -\frac{e}{m^*} E(x)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} N(x) + \frac{\partial}{\partial x} [N(x)V(x)] = 0$$

Резонансное детектирование:  $\omega\tau_p > 1$

M. Dyakonov, M Shure // IEEE Trans., 1996

$$\delta U(L) \approx \frac{U_a^2}{4U_0} \frac{\omega_0^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (1/2\tau - v_d/L)^2}$$

Постоянный ток уменьшает затухание плазменной волны

$$U_0 = U_g - U_{th}$$

Нерезонансное детектирование:  $\omega\tau_p < 1$

$\tau_p$  время релаксации плазмона

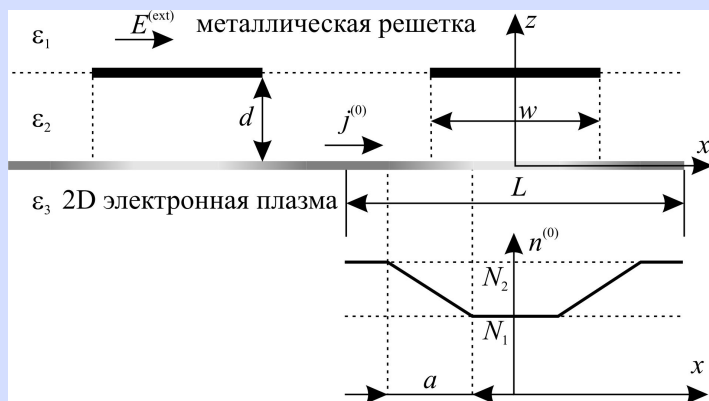
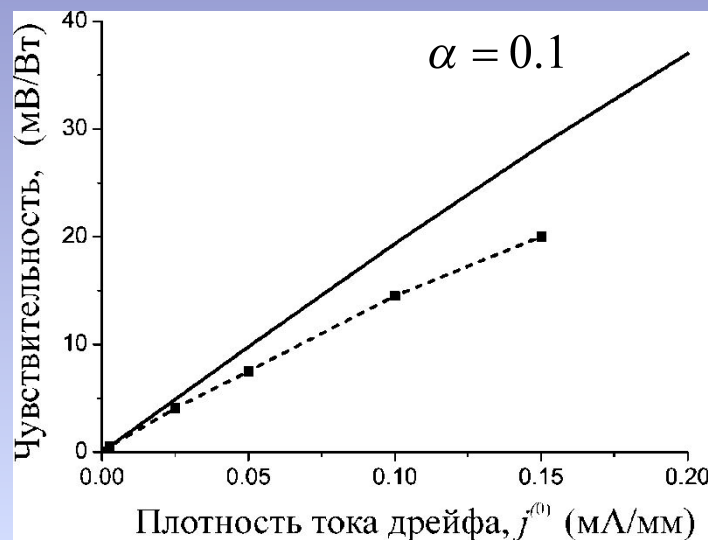
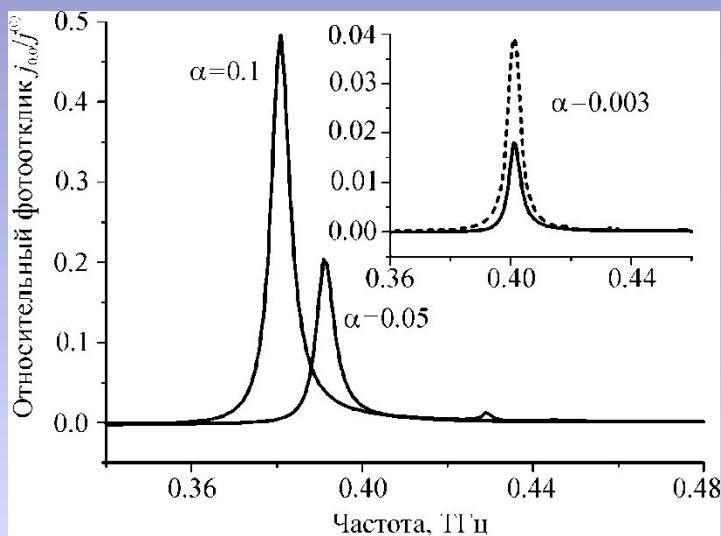
$$\delta U(L) \approx \frac{U_a^2}{4U_0} \frac{1}{\sqrt{1 - j_d/j_{sat}}}$$

Постоянный ток увеличивает амплитуду детектирования

D. Veksler et al. (2006)



# Фотоотклик транзисторной структуры с решеточным затвором и пространственно-периодическим 2D электронным каналом



$$j^{(0)} = 0.05 \text{ A/мм} \quad N_2 = 1.57 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$$

$$d = 400 \text{ нм} \quad \alpha = \frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_1} \quad a = d$$

$$w = 2 \text{ мкм} \quad L = 4 \text{ мкм}$$

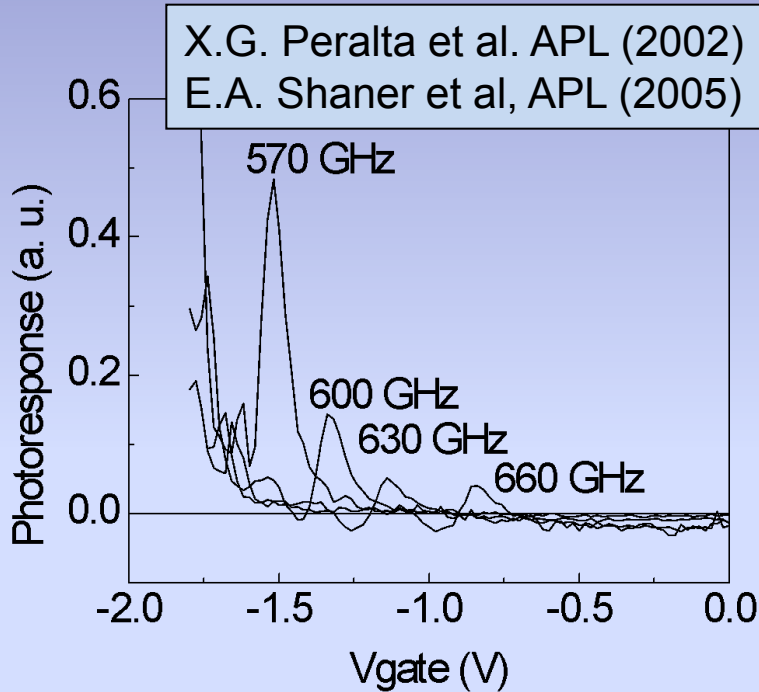
$$\delta j_{00} = -2e \text{Re} \sum_{q \neq 0} \delta n_{\omega q}^{(1)} (\delta v_{\omega q}^{(1)})^* - e \sum_{q \neq 0} [n_q^{(0)} \delta v_{0,-q}^{(2)} + v_q^{(0)} \delta n_{0,-q}^{(2)}]$$

Эффекты увлечения электронов 2D плазмонами и электрострикция 2D электронной плазмы включены в число основных достижений Российской академии наук за 2006 и 2007 годы.

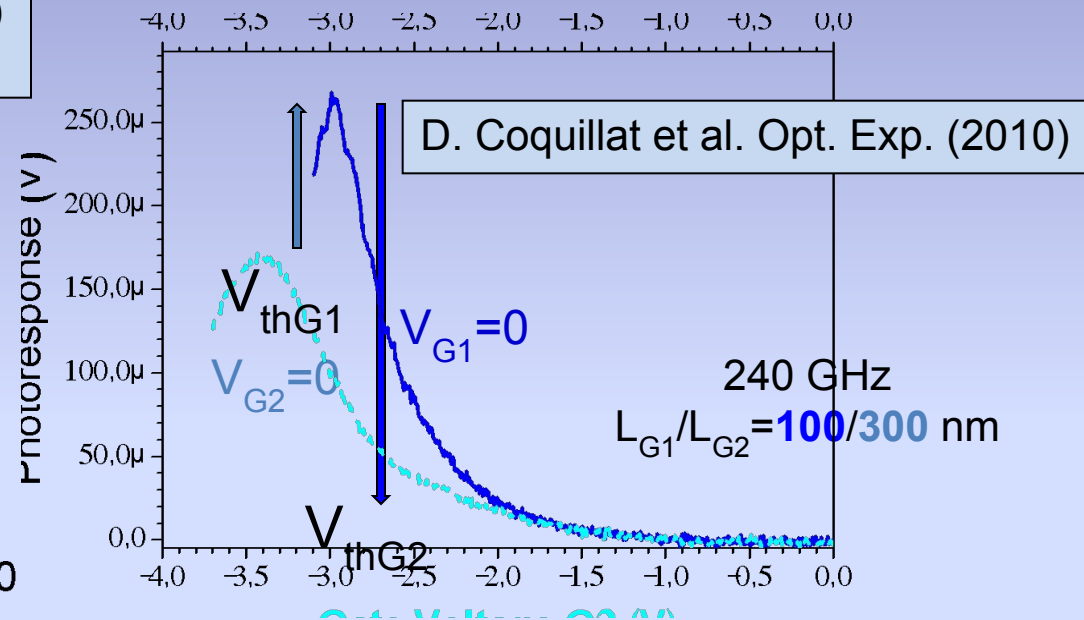
G.R Aizin, D.V. Fateev, G.M. Tsymbalov, V.V. Popov // Appl. Phys. Lett., 2007

# Measured Photoresponse

**T = 20 K (Resonant detection)**

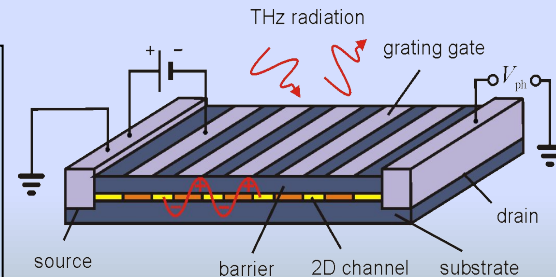


**T = 300 K (Nonresonant detection)**



## Slit-grating gate:

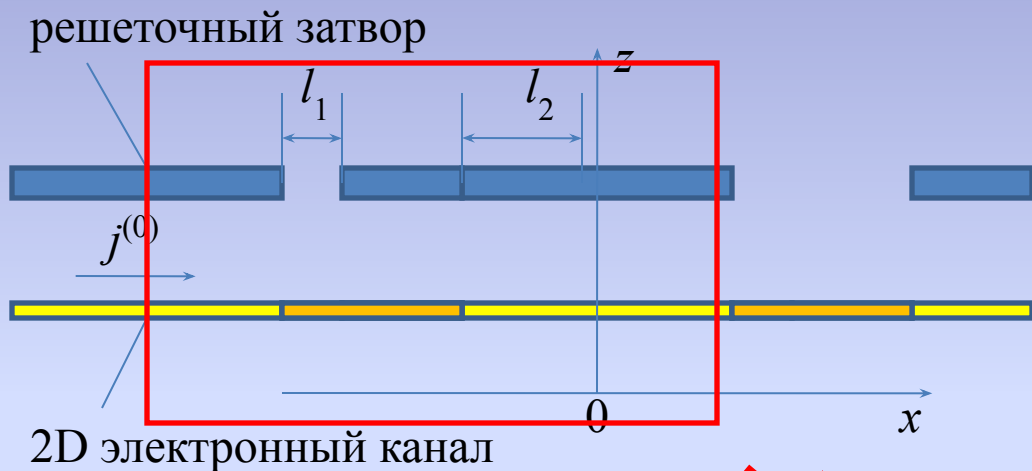
K.V. Maremyanin, D.M. Ermolaev, D.V. Fateev,  
C.V. Morozov, N.A. Maleev, V.E. Zemlyakov,  
V.I. Gavrilenko, V.V. Popov, S.Yu. Shapoval,  
Tech. Phys. Lett. (2010)



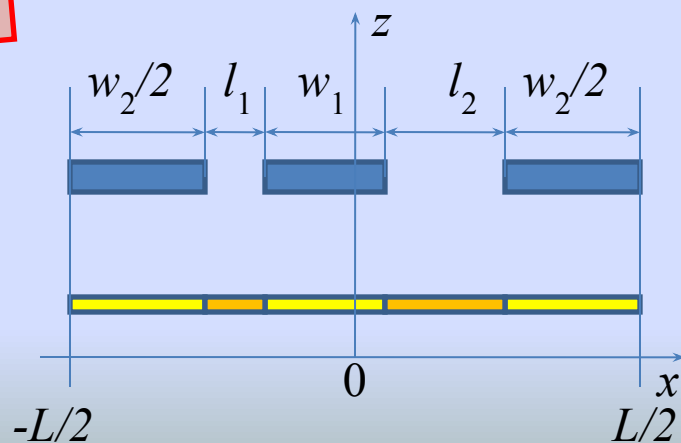
**Responsivity  
200 mV/W**



# Транзисторная структура с двойным решеточным затвором и 2D электронным каналом



$$0 < \frac{l_1}{l_2} < 1 \quad \text{параметр асимметрии}$$





# Терагерцовая фоточувствительность транзисторной двухрешеточной структуры

$$w_1 = 100 \text{ nm}$$

$$w_2 = 600 \text{ nm}$$

$$l_1 + l_2 = 200 \text{ nm}$$

$$d = 65 \text{ nm}$$

$$U_1 = 0 \text{ V}$$

$$U_2 = 0 \text{ V}$$

$$N_s = 2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

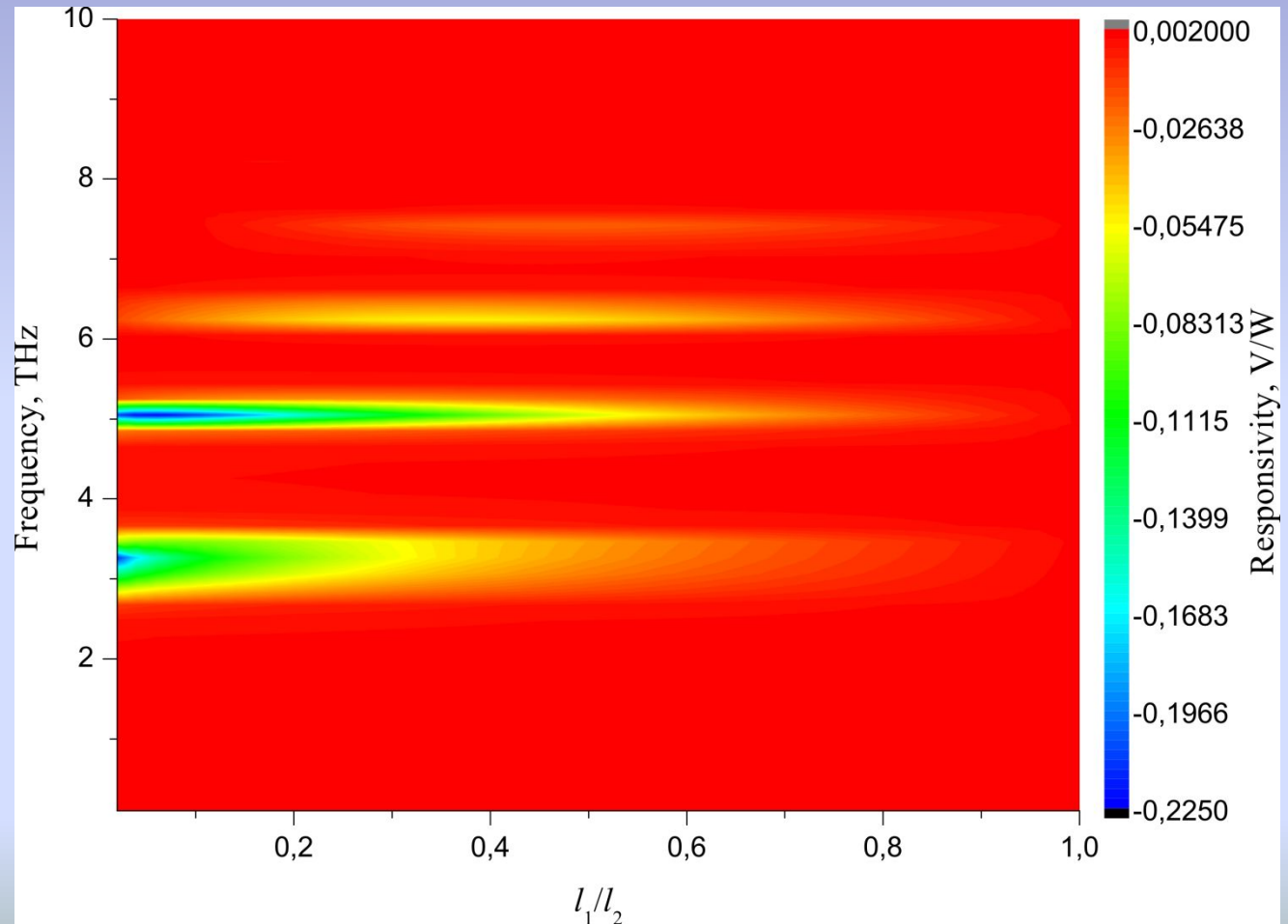
$$\tau = 6.8 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-2}$$

$$\text{Power} = 1 \text{ W / cm}^2$$

$$\text{Power} = 24 \text{ mW}$$

$$\text{length} = 80 \text{ mkm}$$

$$\text{width} = 30 \text{ mkm}$$





# Терагерцовая фоточувствительность транзисторной двухрешеточной структуры

$$w_1 = 100 \text{ nm}$$

$$w_2 = 600 \text{ nm}$$

$$l_1 + l_2 = 200 \text{ nm}$$

$$d = 65 \text{ nm}$$

$$N_{w_1} = 2.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

$$N_{w_2} = 2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$N_{l_1} = 2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$N_{l_2} = 2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

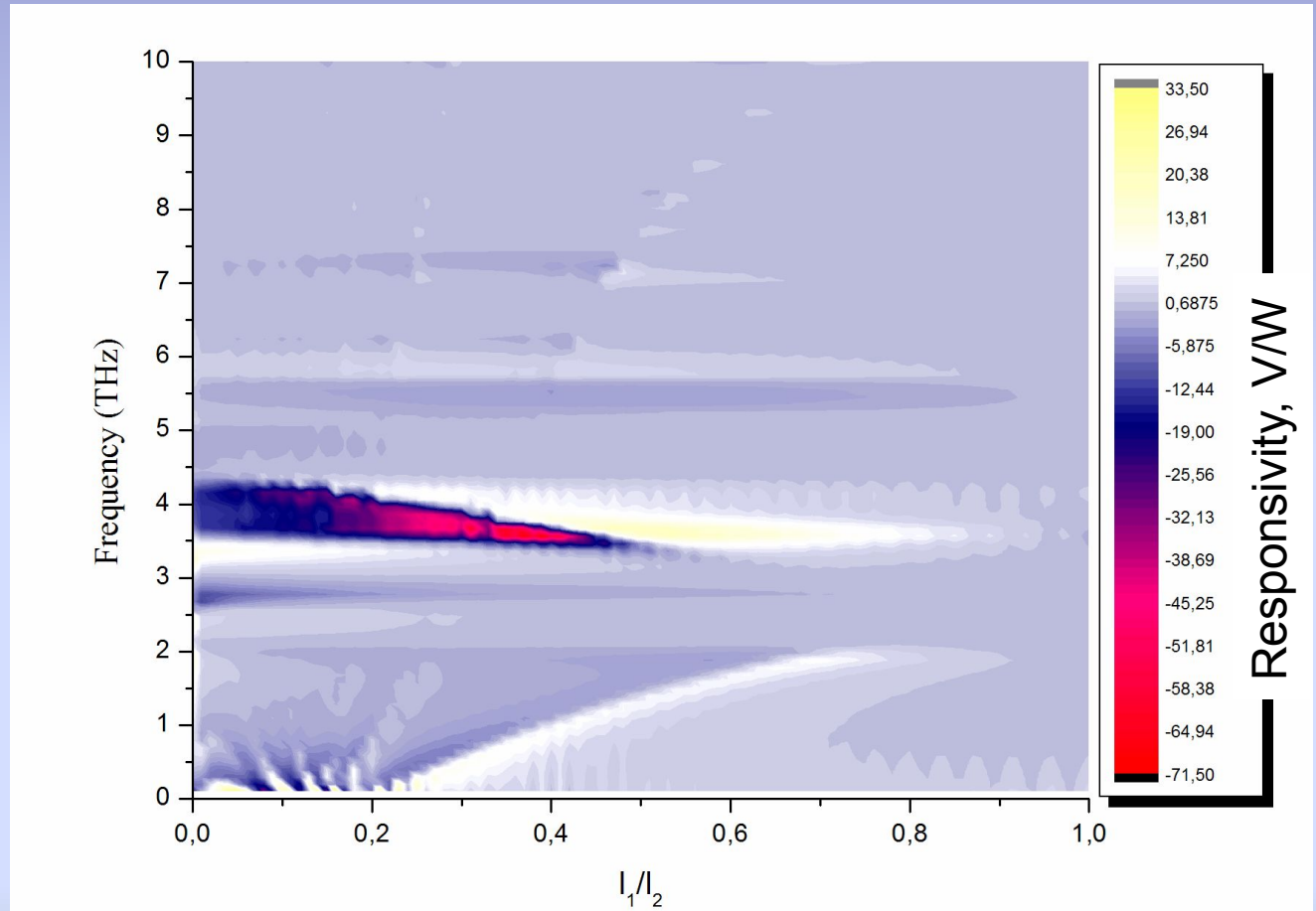
$$\tau = 6.8 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-2}$$

$$\text{Power} = 1 \text{ W / cm}^2$$

$$\text{Power} = 24 \text{ mW}$$

$$\text{length} = 80 \text{ mkm}$$

$$\text{width} = 30 \text{ mkm}$$







## Сравнительные характеристики неохлаждаемых детекторов ТГц диапазона

	Температура	Быстродействие	Частотный диапазон	Мощность эквивалентного шума
Ячейка Голэя	300К	~20Гц	<20ТГц	$10^{-10} \text{ВтГц}^{-0.5}$
Пироэлектрический детектор	300К	<10КГц	<200ТГц	$10^{-7}-10^{-9} \text{ВтГц}^{-0.5}$
Диод Шоттки	300К	<20ТГц	<1.0ТГц	$10^{-9}-10^{-11} \text{ВтГц}^{-0.5}$
Микроболометр	300К	<1МГц		$10^{-10} \text{ВтГц}^{-0.5}$
Транзисторы	300К	~20ТГц и выше	до 10 ТГц	$<10^{-10} \text{ВтГц}^{-0.5}$



# Выводы

---

Двумерная электронная система с решеточным затвором образует планарный плазмонный кристалл, в котором возбуждаются интенсивные и высокочастотные коллективные плазмонные моды

Плазмонные моды эффективно возбуждаются падающим ТГц излучением в транзисторных структурах с узкощелевым решеточным затвором на мембранной подложке в широкой полосе частот

Полевой транзистор с решеточным затвором и 2D электронным каналом может использоваться для детектирования ТГц излучения без использования дополнительных антенных элементов.

Использование геометрически асимметричной ячейки в транзисторной в структуре с двойным решеточным затвором приводит к росту ТГц фоточувствительности на два порядка величины и выше.

Проект «Детектирование и генерация терагерцового излучения на основе плазмонных эффектов в массивах нанотранзисторов и транзисторных решетках с двумерным электронным газом»

Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

Проект РФФИ № 09-02-00395 по теме «Взаимодействие терагерцового излучения с плазменными волнами в гетероразмерных и многоканальных нанотранзисторах».

Совместный российско-французский проект РФФИ-АНЦИ Франции № 10-02-93120 «Плазмонные явления и детектирование терагерцового излучения в периодических транзисторных структурах с асимметричной элементарной ячейкой».

Совместный российско-японскому проекту РФФИ-ЯФ № 11-02-92101 «Исследование электромагнитной связи плазмонов с терагерцовым излучением в полупроводниковых наноструктурах».

Лаборатория входит в состав Международного научного объединения (ЕНО) «Полупроводниковые источники и детекторы в области терагерцовых частот».

Спасибо за внимание



# Плазмонные устройства в ТГц диапазоне

## ТГц детекторы и смесители

M. Dyakonov, M. Shur, IEEE T-ED (1996)  
K. Guven et al., PRB (1997)  
V. Ryzhii et al., JAP (2002)  
W. Knap et al., APL, JAP (2002)  
X.G. Peralta et al., APL (2002)  
A. Satou et al., SST (2003)  
V.V. Popov et al., JAP (2003)  
V. Ryzhii et al., JAP (2003)  
F. Teppe et al., APL (2005)  
I.V. Kukushkin et al., APL (2005)  
M. Lee et al. APL (2005)  
D. Veksler et al., PRB (2006)  
V.M. Muraviev et al., JETP Lett. (2009)  
A. Lisauskas et al. JAP (2009)

## ТГц генераторы

M. Dyakonov, M. Shur, PRL (1993)  
K. Hirakawa, APL (1995)  
K. D. Maranowski, APL (1996)  
V.V. Popov et al., Physica A (1997)  
S.A. Mikhailov, PRB (1998); APL (1998)  
P. Bakshi et al., APL (1999)  
N. Sekine et al., APL (1999)  
R. Bratshitsch et al., APL (2000)  
Y. Deng et al., APL (2004)  
W. Knap et al., APL (2004)  
M. Dyakonov and M.S.Shur, APL (2005)  
N. Dyakonova et al., APL (2006)  
Y.M. Meziani et al. APL (2008)  
A. El Fatimy et al. JAP (2010)