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



- 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

Chart of the Electromagnetic Spectrum eference. man's height paperclip Size cells viruses atom \bigcirc **hickness** subatomic paper bacteria baseball water molecule particles → football field thickness 1 ft 1 cm 1 mm 1,µ 1 nm 1 Å 1 pm 1 mil wavelength λ (m) 10^{2} 10-2 10-3 10-5 10-6 10-7 10-8 10-9 10-10 10-12 103 10 10-1 10-4 10-11 wavenumber (cm⁻¹) 10-5 10-3 10-2 10³ 107 10^{8} 10⁹ 10-4 10-1 1 10 10² 104 105 106 10¹⁰ electron volt 10-3 106 (eV) 10-9 10-8 10-7 10-6 10-5 10-4 10-2 10-1 10 10² 10³ 104 105 1 1 MHz 1 GHz 1 THz 1 PHz 1 EHz 1 ZHz frequency (Hz) 10⁵ 10¹⁰ 1013 10¹⁷ 1020 106 107 108 10⁹ 1011 10¹² 1014 1015 10¹⁶ 10¹⁸ 10¹⁹ 10²¹ Bands **Radio Spectrum** Terahertz Infrared Ultraviolet Gamma X-ray Near IN Extreme UV Far IR Mid IR **Broadcast and Wireless Microwave** Soft X-ray Hard X-ray electronics optics Visible wavelengths (nm) 170 Fiber telecom **Dental Curing** 0.7-1.4 µ 200-350nm of Medical X-rays FM radio Uses 10-0.1 Å Frequency Band **Mobile Phones** AM radio 88-108 MHz 900MHz-2.4GHz Radar 600kHz-1.6MHz Cosmic ray 1-100 GHz Visible Light 425-750THz observations Sources and **Bio imaging** <<1 Å 1-10 THz 700-400nm Baggage screen Remotes 10-1.0 Å **TV Broadcast** Wireless Data 850 nm 54-700 MHz ~ 2.4 GHz Ultrasound PET imaging Screening 1-20 MHz Suntan 0.1-0.01 Å 0.2-4.0 THz 400-290nm Sound Waves Crystallography "mm wave" 2.2-0.7 Å ← 20Hz-10kHz Night Vision Microwave Oven "sub-mm" 10-0.7 µ 2.4 GHz © 2005 SURA Southeastern Universities www.sura.org $\lambda = 3x10^8$ /freg = 1/(wn*100) = 1.24x10⁻⁶/eV SURA Research Association ® Copyrighted images used with permission. Rev2C 6-June-2005

http://www.rezonator.net/gipotezy-i-teorii/teoreticheskie-osnovy-chast-2

Терагерцовое излучение сравнительно БЕЗВРЕДНО для человеческого организма!

контроль •Метеоконтроль •Радиоастрономия •Диагностика термоядерной плазмы •Радары высокого разрешения •Направленная (скрытая) связь

Антитеррористический

Неразрушающая дефектоскопия Терагерцовая томография

Беспроводные межсоединения в интегральных схемах
 Мобильный Интернет

А ТАКЖЕ:

Обнаружение и идентификация взрывчатых и вредных химических и биологических веществ

Биология и медицина: молекулярные сенсоры





Science Vol. 297,









Терагерцовая щель



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



- 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





Плазмонные моды в полевом транзисторе с 2D электронным каналом



InGaAs гетеротранзистор с 2D электронным каналом для генерации ТГц излучения







InP подложка



Lusakowski, Teppe, Dyakonova, Meziani, Knap, Parenty, Bollaert, Cappy, Popov, Shur / physica status solidi-a (2005)



Недостатки транзисторов с одиночным затвором



11

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



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

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

$$\begin{split} E_{\omega_{0},q}(d) &= Z_{q}^{(1,1)} j_{\omega_{0},q}(d) + Z_{q}^{(1,2)} j_{\omega_{0},q}(0) + \eta_{1} E_{\omega_{0}} \delta_{q,0}, \\ E_{\omega_{0},q}(0) &= Z_{q}^{(2,1)} j_{\omega_{0},q}(d) + Z_{q}^{(2,2)} j_{\omega_{0},q}(0) + \eta_{2} E_{\omega_{0}} \delta_{q,0}, \\ \underline{\text{Шаг 2: Материальные уравнения}}_{j_{\omega_{0},q}(x) &= \sum_{q'} \sigma_{q,q'}(\omega_{0}) E_{\omega_{0},q'} \\ j_{\omega_{0}}(x) &= \sigma_{\omega_{0}}(x) E_{\omega_{0}}(x) \end{split}$$



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

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

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

 $P_n(
ho)$ – Полиномы Лежандра $J_n^{
m (s)}(qw/2)$ – Сферические функции Бесселя



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





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



Д.В. Фатеев, В.В. Попов, М.S. Shur // ФТП, 2010

0,5000

0.2299

0,1057

0,04862 _y

0,02236

0,01028

0.004729

0,002175

1,000E-03



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

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

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

V.V. Popov, D.V. Fateev, O.V. Polischuk, M.S. Shur // Optics Express, 2010



- 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



Резонансное детектирование: $\omega \tau_p > 1$

Гидродинамические уравнения:

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

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

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

Постоянный ток уменьшает затухание плазменной волны

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

Нерезонансное детектирование: $\omega \tau_n < 1$

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

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

*т*_{*p*} время релаксации плазмона

Постоянный ток увеличивает амплитуду детектирования

D. Veksler et al. (2006)



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



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



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

Measured Photoresponse





Транзисторная структура с двойным решеточным затвором и 2D электронным каналом



Терагерцовая фоточувствительность транзисторной двухрешеточной структуры



Responsivity



Терагерцовая фоточувствительность транзисторной двухрешеточной структуры





равнительные характеристики неохлаждаемых детекторов ТГц диапазона

	Температура	Быстродейс твие	Частотный диапазон	Мощность эквивалентного шума
Ячейка Голэя	300K	~20Гц	<20ТГц	10 ⁻¹⁰ ВтГц ^{-0.5}
Пироэлектрическ ий детектор	300K	<10КГц	<200ТГц	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁹ ВтГц ^{-0.5}
Диод Шоттки	300K	<20ГГц	<1.0ТГц	10⁻⁹-10⁻¹¹ВтГц^{-0.5}
Микроболометр	300K	<1МГц		10 ⁻¹⁰ ВтГц ^{-0.5}
Транзисторы	300K	~20ГГц и выше	до 10 ТГц	<10 ⁻¹⁰ ВтГц ^{-0.5}



Выводы

Двумерная электронная система с решеточным затвором образует планарный плазмонный кристалл, в котором возбуждаются интенсивные и высокодобротные 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 РФФИНЦНИ Франции № 10-02-93120 «Плазмонные явления и детектирование терагерцового излучения в периодических транзисторных структурах с асимметричной элементарной ячейкой».

Совместный российско-японскому проекту РФФИЯФ № 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».





ТГц детекторы и смесители ТГц генераторы

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)

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 at al., APL (1999) R. Bratshitsch et al., APL (2000) Y. Deng at al., APL (2004) W. Knap et al., APL (2004) W. Knap et al., APL (2004) M. Dyakonov and M.S.Shur, APL (2005) N. Dyakonova et al., APL (2008) A. El Fatimy et al. JAP (2010)