

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В КВАНТОВЫХ ЯМАХ InGaN/GaN МЕТОДОМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

Е.Р. Бурмистров, Л.П. Авакянц
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1/2, 119991 Москва, Россия,
eugeni.conovaloff@yandex.ru, avakants@genphys.phys.msu.su

Предложен новый комплексный подход к определению параметров двумерного электронного газа в квантовых ямах InGaN/GaN. Метод основан на регистрации терагерцовых частот двумерных плазмонных резонансов, возбуждаемых в исследуемых образцах гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN. Показано, что двумерный электронный газ, локализованный в квантовых ямах InGaN/GaN, демонстрирует резонансное поведение. Обнаружен эффект модуляции фазы вблизи частот плазмонных резонансов, а также перенормировки эффективной массы двумерного электронного газа с увеличением температуры образца от 90 К до 170 К.

Ключевые слова: плазмонный резонанс; квантовые ямы; гетероструктуры; время релаксации; двумерный электронный газ; терагерцовые частоты.

STUDY OF DYNAMIC PARAMETERS OF TWO-DIMENSIONAL ELECTRONIC GAS IN InGaN / GaN QUANTUM WELLS BY THE TERAHERTZ PLASMON RESONANCE METHOD

E.R. Burmistrov, L.P. Avakyants
M.V. Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia,
eugeni.conovaloff@yandex.ru, avakyants@genphys.phys.msu.su

A new integrated approach to determination of parameters of two-dimensional electronic gas in quantum holes of InGaN/GaN is offered. The method is based on recording terahertz frequencies of two-dimensional plasmon resonances excited in the examined samples of heterostructures InGaN/AlGaIn/GaN femtosecond laser pulses at a wavelength of 797 nm. It has been shown that a two-dimensional electron gas localized in quantum wells InGaN/GaN exhibits resonant behavior in the frequency range from 1-5 THz. The effect of phase modulation near the frequencies of plasmon resonances was found, as well as renormalization of the effective mass of a two-dimensional electron gas with an increase in the temperature of the sample from 90 K to 170 K. The proposed method is universal, non – contact and can be used in a wide temperature range.

Keywords: plasmon resonance; quantum wells; heterostructures; relaxation time; two – dimensional electronic gas; terahertz frequencies.

Введение

Эффективность работы фотодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN [1, 2] зависит от параметров двумерного электронного газа (2ДЭГ), определение которых представляет собой сложную исследовательскую задачу. Среди экспериментальных методов наиболее успешно зарекомендовали себя в исследовании электрических свойств 2ДЭГ в квантовых ямах (КЯ) InGaN/GaN циклотронный резонанс и осцилляции Шубникова – де Гааза [3], которые ограничиваются преимущественно температурами жидкого гелия. В области

высоких исследуемых температур необходимо применять оптические методы, основанные на спектроскопии в дальней ИК области [4]. Это объясняется усилением интенсивности междолинного фононного рассеяния 2ДЭГ в активном слое InGaN/GaN, сильным экранированием внешнего возмущения электронной системой, а также влиянием случайных флуктуаций сплава, что приводит к появлению дополнительных центров рассеяния.

Электронный газ в структурах InGaN/GaN демонстрирует резонансное поведение в ТГц диапазоне, что связано с

коллективным возбуждением плазмонных волн в 2ДЭГ. Терагерцовая спектроскопия (ТГц) во временной области [5] является ключевым методом всесторонней характеристики 2ДЭГ в суб- и ТГц диапазонах частот.

В данной работе метод ТГц спектроскопии дополнен быстрым Фурье – преобразованием (БФП) [6], что позволило сравнить отдельные гармоники сигналов, прошедших через пустой криостат и криостат с образцом. Фурье – преобразование каждого из них предоставило возможность определить амплитуду и фазу составляющих частот. На основании сравнения частотно зависимых амплитуд и фаз падающего и прошедшего излучения изучены коллективные электронные возбуждения и основные параметры 2ДЭГ в КЯ InGaN/GaN, такие как эффективная масса, подвижность и время релаксации.

Результаты эксперимента

Объектом исследования является типичная для светодиодных гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN в p-n-переходе GaN слоевая структура, выращенная методом газовой фазной эпитаксии (ГФЭ) [7] на сапфировой подложке в направлении [0001]. Для гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN первыми являются низкотемпературный и буферный слои нелегированного i-GaN с толщинами 20 нм и 0.7 мкм соответственно. Следующими идут слои n-GaN, легированный кремнием толщиной 3.6 мкм для образцов «Светлана-оптоэлектроника» и 4.5 мкм для образцов серии «LumiLEDs», буферная сверхрешетка InGaN/GaN и активная область, состоящая из 5 КЯ/барьеров $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ толщиной 3/12 нм для образца «Светлана-оптоэлектроника» и 4/4 нм для образцов серии «LumiLEDs». Затем следует слой p-AlGaIn (толщина 20 нм), легированный магнием и p-GaN (толщина 120 нм). Типичная слоевая структура и внешний вид образцов гетероструктур представлены в работе [8].

На основании расчетов, представленных в [8], концентрация 2ДЭГ в КЯ

InGaN/GaN составляет $2.61 \cdot 10^{13} \text{см}^{-2}$, при этом подвижность и время релаксации 2ДЭГ в условиях приложенного к гетероструктуре InGaN/AlGaIn/GaN внешнего электрического поля равны $2.14 \cdot 10^3 \text{см}^2/\text{Vs}$ и $5.77 \cdot 10^{-9} \text{с}$ соответственно.

Исследование плазмонных структур проведено с помощью спектрометра «THz-TD», сопряженного с криостатом. Сигналы во временной области были записаны через апертуру диаметром 1.5 мм при нормальном угле падения P – поляризации электрического поля ТГц импульсов. На рис. 1 представлен пример записанных сигналов $E_{\text{об}}(t)$ (передается через пустой криостат) и $E_{\text{об}}(t)$ (опорный сигнал, переданный через криостат с образцом) во временной области.

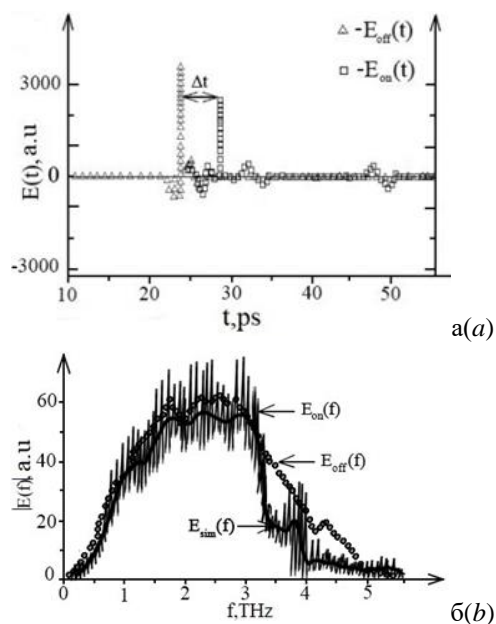


Рис. 1. Полученные зависимости: а – осциллограммы электрического поля ТГц импульсов во временной области; б – соответствующие частотные зависимости амплитуд БФП сигналов. Спектры получены при температуре 90 К

Fig. 1. Obtained relationships: *a* - oscillograms of the electric field of THz pulses in the time domain; *b* - corresponding frequency dependencies of amplitudes of FFT signals. Spectra are obtained at temperature 90 K

Как видно из рис. 1, основной пик сигнала, прошедшего через криостат с образцом, сдвинут во времени на Δt относительно опорного сигнала. Уменьшение сигнала обусловлено потерями энергии в

слоях гетероструктуры и частичным отражением от поверхностей слоев. Задержка импульса является результатом конечного времени перестройки электронной системы 2ДЭГ в КЯ InGaN/GaN. На рис. 1а влияние подложки связывается с появлением дополнительных пиков с гораздо меньшей амплитудой при $t = 130$ фс и $t = 135$ фс, т.е. «эхо» падающего импульса вследствие его отражения от краев образца.

В целях моделирования сигнала, прошедшего через криостат с образцом, использовалось быстрое преобразование Фурье (БПФ) опорного сигнала $E_{\text{об}}(t)$:

$$E_{\text{сум}}(t) = F(0)E_{\text{об}}(0) + \sum_k F(f_k)E_{\text{об}}(f_k)\exp(2\pi i f_k t), \quad (1)$$

где $F(f)$ была найдена путем решения уравнений Максвелла в гидродинамической модели высокочастотных свойств 2ДЭГ как отклик среды на плоскую волну с частотой f , $f_k = k/\Delta t$, $k = 1, 2, \dots$ и Δt – временное окно импульсов. Функция $F(f)$ зависит от ряда параметров, в том числе от эффективной массы μ , концентрации 2ДЭГ N_{2DEG} и времени релаксации электронной системы τ , характеризующего безызлучательные потери в слоях гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN. Функция $F(f)$ также зависит от характеристик диэлектрического окружения 2ДЭГ. Тонкие промежуточные слои в активном слое InGaN/GaN рассматривались как один слой с эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_d . В то же время буферный слой GaN и подложка моделировались как один слой с эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_k . Из рис. 1б видно, что моделирование БПФ спектра ТГц импульса хорошо согласуется с данными измерений.

БПФ использовалось для получения Фурье – компонент измеряемых сигналов в частотной области:

$$E_{\text{об},\text{об}}(f) = |E_{\text{об},\text{об}}(f)|\exp(i\varphi_{\text{об},\text{об}}(f)), \quad (2)$$

где $|E_{\text{об},\text{об}}(f)|$, $\varphi_{\text{об},\text{об}}(f)$ – Фурье-амплитуды и

фазы опорного сигнала и сигнала, прошедшего через криостат с образцом. Для характеристики спектров пропускания определялись следующие параметры: спектральная мощность

$P_i(f) = |E_{\text{об}}(f)|^2 / |E_{\text{об}}(f)|^2$ и фазовый сдвиг $\Phi_i(f) = \varphi_{\text{об}}(f) - \varphi_{\text{об}}(f)$. Соответствующие частотные зависимости для двух ($i = t_1, t_2$) временных окон лазерных импульсов представлены на рис. 2. Частотная зависимость Фурье-амплитуды представлена на рис. 1б.

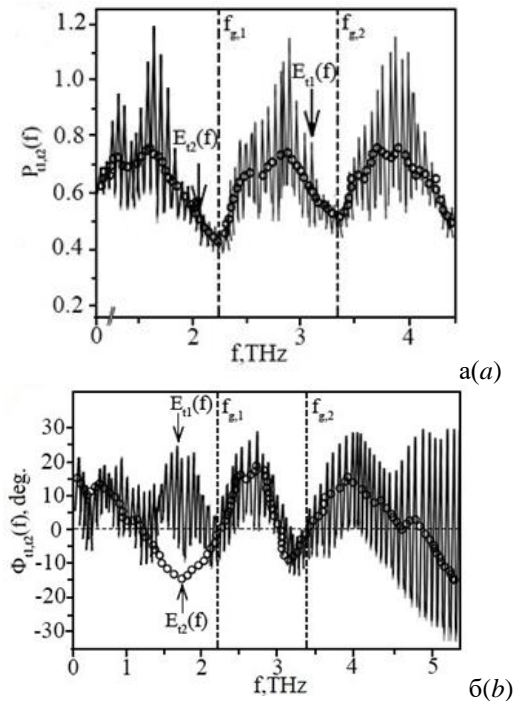


Рис. 2. Частотные зависимости мощности (а) и фазы сигналов (б). Спектры получены при возбуждении образцов гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN фемтосекундными лазерными импульсами с двумя временными окнами длительностью $t_1 = 130$ фс и $t_2 = 135$ фс на длине волны 797 нм

Fig. 2. Frequency dependencies of power (a) and phase of signals (b). Spectra are obtained by excitation of heterostructure samples InGaN/AlGaIn/GaN femtosecond laser pulses with two time windows of duration $t_1 = 130$ fs and $t_2 = 135$ fs at wavelength 797 nm

На рис. 2 представлены модулированные полосами Фабри-Перо осцилляции функций $P_{i,t_1,t_2}(f)$ и $\Phi_{i,t_1,t_2}(f)$ в диапазоне частот от 1 до 5 ТГц. На частотной зависимости мощности излучения хорошо выражены провалы вблизи частот двумерных (2Д) плазмонных резонансов.

Таблица 1. Параметры 2ДЭГ в КЯ InGaN/GaN по данным частот плазмонных резонансов
 Table 1. Parameters of two-dimensional electron gas in quantum wells InGaN / GaN according to the data of plasmon resonance frequencies

Серия образцов	$f_{g,1}$, ТГц	$f_{g,2}$, ТГц	τ , 10^{-9} с	$\langle m^* \rangle$	μ , 10^3 см ² /В·с
1	2.37	3.48	5.7	$0.27 m$	2.14
2	2.22	3.56	5.1	$0.26 m$	2.23
3	2.55	3.78	5.5	$0.28 m$	1.18
4	2.67	3.12	4.8	$0.32 m$	2.34
5	2.8	3.51	4.3	$0.35 m$	2.20

Эффект «бахромы» Фабри – Перо был подавлен путем вырезания дорожек сигнала для импульсов с $t_2 = 135$ фс перед первым «эхом» на временной зависимости (рис. 1а). Для анализа фазовых спектров $\Phi_{1,2}(f)$ была применена процедура разворачивания фазы. Результаты для разных временных окон показаны на рис. 2б. На рис. 2а видны первые две резонансные частоты 2Д плазмонов, обозначенные как f_{g1}, f_{g2} . Видно, что фазовый сдвиг вблизи плазмонных резонансов ведет себя как точка перегиба функции, что соответствует минимумам в спектрах мощности $P_{1,2}(f)$. Для рассматриваемых плазмонных структур резонансные частоты оценивались из закона дисперсии стробируемых 2Д плазмонов [9]:

$$f_{g,n} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi e^2 N |q_n|}{m^* (\epsilon_s + \epsilon_d \coth(|q_n|d))}}, \quad (3)$$

где $q_n = 2\pi n / P$, $n = 1, 2, \dots$ (в случае гетероструктур AlGaIn/InGaIn/GaN $n = 2$), ϵ_s – диэлектрическая постоянная, $\epsilon_d = 8.2 + i\gamma$ – диэлектрическая проницаемость, в выражение для которой введен параметр $\gamma = 1.8$, учитывающий радиационные потери в слоях гетероструктуры, m^* – эффективная масса, определяемая из (3),

d – период активного слоя InGaIn/GaN.

Подстановка резонансных частот в формулу (3) дает возможность получить численную оценку эффективной массы m^* . В свою очередь, с помощью найденного ранее (см. рис. 1а) значения времени релаксации τ определяется подвижность $\mu = e\tau / m^*$ 2ДЭГ в слое InGaIn/GaN (табл. 1).

Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложен метод ТГц-плазмонного резонанса в целях определения времени релаксации, подвижности и эффективной массы 2ДЭГ, локализованного в КЯ InGaIn/GaN. Показано резонансное поведение 2ДЭГ в диапазоне частот от 1 до 5 ТГц на примере 2ДЭГ в КЯ InGaIn/GaN. Моделирование взаимодействия ТГц сигнала с плазмонной структурой и полученные значения времени релаксации ($\sim 10^{-9}$ с), подвижности ($\sim 10^3$ см²/В·с) и эффективной массы ($0.27 m$) хорошо согласуется с теоретическими данными работы [8].

С целью обработки и анализа полученных данных метод ТГц плазмонного резонанса дополнен быстрым Фурье – преобразованием, что позволило сравнить отдельные гармоники сигналов и определить амплитуду и фазу составляющих частот. На основании сравнения частотно зависимых амплитуд и фаз падающего и прошедшего излучения изучены коллективные электронные возбуждения и основные параметры 2ДЭГ в КЯ InGaIn/GaN.

Предложенный подход к изучению низкоразмерных структур с помощью методики ТГц-плазмонного резонанса является бесконтактным и служит для комплексной оценки параметров 2ДЭГ в широком диапазоне температур.

Детальный анализ амплитудных и фазовых спектров передаваемых ТГц импульсов позволил выявить значительную модуляцию фазы (до 6°) вблизи 2Д плазмонный резонансов, что может быть использовано в различных приложениях фотоники и терагерцовой цифровой голографии.

Библиографические ссылки

1. Лерер А.М., Иванова И.Н., Макеева Г.С. Генерация третьей гармоники терагерцовых волн нелинейной графеновой многослойной метаповерхностью. *Оптика и спектроскопия* 2021; 91(3): 89-92.
2. Кукушкин В.И., Гришина Я.В., Егоров С.В. Комбинированный диэлектрический и плазмонный резонанс для гигантского усиления рамановского рассеяния света. *Письма в ЖЭТФ* 2016; 103(8): 572-577.
3. Авакянц Л.П., Горелик С.В., Поляков П.А. Комбинационное рассеяние света на фонон-плазмонных модах в ионно-легированном арсениде галлия. *Краткие сообщения по физике* 1999; 999(3): 24-31.
4. Толмачев В.А., Жарова Ю.А., Грудинкин С.А. Исследование оптических и плазмонных особенностей в спектрах отражения слоев наночастиц серебра, осажденных из раствора AgNO_3 на поверхности кремния. *Оптика и спектроскопия* 2020; 90(12): 1868-1873.
5. Любовский Р.Б., Песоцкий С.И., Шилов Г.В. Электронная структура металлических слоев в двухслойном квазидвумерном органическом металле $(\text{BETS})_4\text{HgBr}_4(\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2)$. *Письма в ЖЭТФ* 2013; 98(3): 40-43.
6. Wang H., Tan Q., He X. Microstructure and formation mechanism of V-defects in the InGaN/GaN multiple quantum wells with a high In content. *Письма в ЖЭТФ* 2020; 112 (3): 172-173.
7. Wang H., Jin G., Tan Q. Joule–Thomson cooling in graphene. *Письма в ЖЭТФ* 2020; 111(5): 173-174.
8. Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П. Пьезоэлектрическая релаксация двумерного электронного газа в гетероструктурах с квантовыми ямами InGaN/GaN. *Известия вузов. Физика* 2021; 64(6): 9-16.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: ФИЗМАТЛИТ; 1976. 312 с.

References

1. Lerer A.M., Ivanova I.N., Makeeva G.S. Generation of the third harmonic of terahertz-out waves by a nonlinear graphene multi-layer metasurface. *Optics and Spectroscopy* 2021; 91(3): 89-92.
2. Kukushkin V.I., Grishina Ya.V., Egorov S.V. Combined dielectric and plasmon resonance for giant amplification of Raman light scattering. *JETP Letters* 2016; 103(8): 572-577.
3. Avakyants L.P., Gorelik S.V., Polyakov P.A. Combination scattering of light on phonon-plasmon modes in gallium ion-doped arsenide. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 1999; 999(3): 24-31.
4. Tolmachev V.A., Zharova Yu.A., Grudinkin S.A. Investigation of optical and plasmon features in reflection spectra of silver nanoparticle layers deposited from AgNO_3 solution on silicon surface. *Optics and Spectroscopy* 2020; 90(12): 1868-1873.
5. Lyubovskiy R.B., Pesotskiy S.I., Shilov G.V. Electronic structure of metal layers in two-layer quasi-double-dimensional organic metal (BETS) $4\text{HgBr}_4(\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2)$. *JETP Letters* 2013; 98(3): 40-43.
6. Wang H., Tan Q., He X. Microstructure and formation mechanism of V-defects in the InGaN/GaN multiple quantum wells with a high In content. *JETP Letters* 2020; 112 (3): 172-173.
7. Wang H., Jin G., Tan Q. Joule–Thomson cooling in graphene. *JETP Letters* 2020; 111(5): 173-174.
8. Burmistrov E.R., Avakyants L.P. Piezoelectric relaxation of two-dimensional electronic gas in heterostructures with quantum holes of InGaN/GaN. *Russian Physics Journal* 2021; 64(6): 9-16.
9. Landau L.D., Lifshits E.M. *Kvantovaya mekhanika. Nerelyativistskaya teoriya*. M.: FIZMATLIT; 1976. 312 p. (In Russian)