

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2024. Т. 32, № 3
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(3)

Научная статья
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003100
EDN: RRNDFW

Электродинамический метод расчета спектров поглощения плазмонов в прямоугольнике с двумерным электронным газом, возбужденных падающей электромагнитной волной

Д. В. Фатеев^{1,2}✉, К. В. Машинский²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия
E-mail: ✉fateevedv@yandex.ru, konstantin-m92@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.11.2023, принята к публикации 30.01.2024,
опубликована онлайн 22.03.2024, опубликована 31.05.2024

Аннотация. Цель настоящего исследования — разработка электродинамического метода вычисления плазмонного спектра в трехмерной структуре с двумерным электронным газом при возбуждении падающей электромагнитной волной. **Методы.** Разработанный метод основан на решении интегральных уравнений, сформированных относительно индуцированных токов в проводящих частях трехмерной структуры. **Результаты.** Исследованы сходимость метода и время расчета. Выявлены условия сходимости расчета высших плазмонных резонансов в прямоугольной структуре с двумерным электронным газом. Исследовано нормальное падение произвольно поляризованной электромагнитной волны на прямоугольник с двумерным газом. Рассчитаны спектры сечений поглощения, экстинкции, прямого и обратного рассеяния падающей волны. **Заключение.** Выяснено, что в прямоугольной структуре, содержащей двумерный электронный газ, спектр плазмонных резонансов модифицируется по сравнению с устоявшимися двумерными моделями постановки задачи, в которых структура предполагается бесконечной и однородной в одном из направлений. Установлено, что падающая волна наиболее эффективно возбуждает фундаментальные плазмонные моды. Плазмонные моды демонстрируют сильное накопление заряда на краях прямоугольника, что существенно влияет на резонансные частоты возбуждения плазмонных мод.

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, плазмон, двумерный электронный газ, терагерцы.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00611.

Для цитирования: Фатеев Д. В., Машинский К. В. Электродинамический метод расчета спектров поглощения плазмон в прямоугольнике с двумерным электронным газом, возбужденных падающей электромагнитной волной // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 3. С. 347–356. DOI: 10.18500/0869-6632-003100. EDN: RRNDFW

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Electrodynamic approach for calculating the absorption spectra of plasmons in a rectangle with a two-dimensional electron gas excited by an incident electromagnetic wave

D. V. Fateev^{1,2}✉, K. V. Mashinsky²

¹Saratov State University, Russia

²Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Russia

E-mail: ✉ fateevdv@yandex.ru, konstantin-m92@yandex.ru

Received 22.11.2023, accepted 30.01.2024, available online 22.03.2024, published 31.05.2024

Abstract. The purpose of this research is to develop an electrodynamic method for calculating the plasmon spectrum in a three-dimensional structure with a two-dimensional electron gas excited by an incident electromagnetic wave. *Methods.* The developed method is based on solving integral equations formed with respect to induced currents in the conducting parts of a three-dimensional structure. *Results.* The convergence of the method and the calculation time were studied. The conditions for the convergence of calculations of higher plasmon resonances in a rectangular structure with a two-dimensional electron gas are determined. The normal incidence of an arbitrarily polarized electromagnetic wave on a rectangle with a two-dimensional gas is studied. The spectra of the absorption, extinction, forward and back scattering cross sections of the incident wave are calculated. *Conclusion.* It is found that in a rectangular structure containing a two-dimensional electron gas, the spectrum of plasmon resonances is modified in comparison with established by two-dimensional models of problem formulation, in which the structure is assumed to be infinite and homogeneous in one of the directions. It has been established that the incident wave most effectively excites fundamental plasmon modes. Plasmonic modes exhibit strong charge accumulation at the edges of the rectangle, which significantly affects the resonant excitation frequencies of plasmonic modes.

Keywords: integral equations method, plasmon, two-dimensional electron gas, terahertz.

Acknowledgements. This work was supported by Russian Science Foundation Grant No. 22-19-00611.

For citation: Fateev DV, Mashinsky KV. Electrodynamic approach for calculating the absorption spectra of plasmons in a rectangle with a two-dimensional electron gas excited by an incident electromagnetic wave. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2024;32(3):347–356. DOI: 10.18500/0869-6632-003100

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

В последнее время появился широкий интерес к созданию терагерцевых (ТГц) устройств с использованием двумерных плазмонов как для локализации и усиления электромагнитных полей, так и для использования нелинейных свойств плазмонов [1]. Традиционно двумерный электронный газ образуется при формировании квантовой ямы в зоне проводимости полупроводниковых гетероструктур. Известно, что в полевых транзисторах микронных и субмикронных размеров с двумерным электронным каналом возможно возбуждение двумерных плазмонов терагерцевого диапазона [2]. Основываясь на свойствах двумерных плазменных волн, теоретические исследования ТГц плазмонных эффектов решаются в двумерной постановке задачи, в которой и считают направление, перпендикулярное распространению плазмона, бесконечным и однородным [3, 4]. Такая постановка задачи значительно упрощает решение как дисперсионных задач, так и задач о возбуждении плазмонов внешней электромагнитной волной. Упрощенный двумерный подход может быть применим к плазмонным структурам, размер которых в направлении, поперечном направлению распространения плазмона, на порядок и более превышает длину волны терагерцевого плазмона. Принципиально миллиметровые размеры экспериментально достижимы в плазмонных

структурах, созданных на основе полупроводниковых гетероструктур. При типичной микронной длине волны терагерцевого плазмона размеры полупроводниковых гетероструктур могут достигать нескольких миллиметров [5]. Однако размеры создаваемых плазмонных структур часто сравнимы с размерами коротковолновых плазмонов, а связь с длинной электромагнитной волной осуществляется с помощью дополнительных антенн. В структурах таких размеров влияние краевых эффектов наведенных полей на отклик становится значительным, а иногда и доминирующим. Несмотря на невозможность описания краевых эффектов в двумерном подходе, с его помощью были описаны новые плазмонные физические эффекты, такие как плазмон-плазмонное рассеяние [3, 6], увеличение эффективной длины волны в плазмонных резонаторах и радиационное затухание плазмонов. В этом случае для решения проблемы возбуждения плазмонных мод в резонаторе двумерных электронных систем необходим учет электромагнитного запаздывания. Наиболее исследованными трехмерными структурами являются плазмонные структуры с симметричной формой резонатора двумерной системы в виде круглого диска (или кольца) [7–12]. Значительно меньше работ посвящено возбуждению плазмонов в прямоугольном двумерном электронном резонаторе [13–15]. Прямоугольный резонатор имеет пониженную симметрию по сравнению с геометрией диска (или кольца), поэтому теоретическое рассмотрение становится более сложным. Теоретические подходы, применяемые для изучения плазмонных возбуждений в прямоугольных плазмонных резонаторах, используют либо коммерческие численные решатели [14–16], либо упрощающие аппроксимации [13]. К сожалению, методы конечных элементов сталкиваются с серьезными трудностями при применении к задачам, в которых задействованы электромагнитные процессы сильно разных масштабов. Именно такие трудности возникают при исследовании плазмонных структур, в которых длина терагерцевой электромагнитной волны и длина волны плазмона отличаются на два порядка величины.

В данной работе разработан алгоритм расчета и исследованы особенности спектров плазмонов, возбужденных нормально падающей электромагнитной волной, в прямоугольнике с двумерным электронным газом.

1. Метод

Исследовано возбуждение двумерных токов в прямоугольнике с двумерным электронным газом, на плоскость которого нормально падает электромагнитная волна произвольной поляризации. Длина прямоугольника в направлении OX обозначается как w , ширина в направлении OY — l , а волна падает на прямоугольник в направлении OZ по направлению из среды 1 в среду 2. Плоскость OXY разделяет два полупространства с разными диэлектрическими проницаемостями.

Разработанный метод состоит из следующих этапов. На первом этапе электрические и магнитные поля рассеянных волн раскладываются в двойной пространственный интеграл Фурье в направлениях OX и OY , а зависимость Фурье-компонент от координаты z считается экспоненциальной. Для примера показана E_x -компонента электрического поля

$$E_x^{(1,2)}(x, y, z, t) = \exp(-i\omega t) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{x,q_x,q_y}^{(1,2)} \exp\left(ik_{z,q_x,q_y}^{(1,2)} z\right) \exp(iq_y y) \exp(iq_x x) dq_x dq_y, \quad (1)$$

где q_x и q_y — компоненты волновых векторов Фурье-гармоник в плоскости прямоугольника, $k_{z,q_x,q_y}^{(1,2)}$ — поперечные компоненты волновых векторов Фурье-гармоник в средах и ω — круговая частота волны. Уравнения Максвелла решаются в полубесконечных диэлектрических средах, окружающих прямоугольник с двумерным электронным газом. Для сшивания решений в диэлектрических средах используются граничные условия для компонент электрического и магнитного

полей в плоскости двумерного газа. С использованием закона Ома, в котором двумерный электронный газ описывается проводимостью Друде σ [3], сформированы интегральные уравнения для токов j_x и j_y в двумерном газе:

$$j_x(x, y) = \sigma \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-w/2}^{w/2} j_x(x', y') G_{q_x, q_y}^{xx}(x, x', y, y') dx' dy' + \sigma \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-w/2}^{w/2} j_y(x', y') G_{q_x, q_y}^{xy}(x, x', y, y') dx' dy' + \sigma Z_{0x} E_{in, x}, \quad (2)$$

$$j_y(x, y) = \sigma \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-w/2}^{w/2} j_x(x', y') G_{q_x, q_y}^{yx}(x, x', y, y') dx' dy' + \sigma \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-w/2}^{w/2} j_y(x', y') G_{q_x, q_y}^{yy}(x, x', y, y') dx' dy' + \sigma Z_{0y} E_{in, y},$$

где $G_{q_x, q_y}^{mn}(x, x', y, y')$ – ядра интегральных уравнений, $m, n = x, y$, Z_{0x} и Z_{0y} – коэффициенты связи с падающей волной, $E_{in, x}$ и $E_{in, y}$ – компоненты амплитуды электрического поля падающей волны. Система интегральных уравнений (2) решается методом Галеркина путем разложения искомых токов j_x и j_y в ряды по полиномам Лежандра по направлениям x и y . Это позволяет преобразовать систему интегральных уравнений в бесконечную систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложения токов. С учетом сходимости, разложение неизвестных токов в двойной ряд по полиномам Лежандра обрывается до полинома порядка N

$$j_x(\chi'_x, \xi'_y) = \sum_{n, n_1=0}^N \beta_{n, n_1}^{(x)} P_{n_1}(\xi'_y) P_n(\chi'_x), \quad (3)$$

$$j_y(\chi'_x, \xi'_y) = \sum_{n, n_1=0}^N \beta_{n, n_1}^{(y)} P_{n_1}(\xi'_y) P_n(\chi'_x),$$

где $P_n(\chi'_x)$ – полиномы Лежандра, $\beta_{n, n_1}^{(x, y)}$ – коэффициенты разложения токов, (χ'_x, ξ'_y) – пространственные координаты (x, y) , приведенные к отрезку $[-1, 1]$. Каждое слагаемое в правой части уравнения с неизвестным током (2) создает N^2 алгебраических уравнений и, соответственно, N^2 неизвестных коэффициентов разложения. Матрица алгебраической системы состоит из элементов вида

$$M_{n_1, r_1, n, r} = \sigma \frac{lw}{4\pi^2} i^{r_1+r} i^{n+n_1} (-1)^{n+n_1} W_{n_1, r_1, n, r} - \frac{\delta_{nr}}{2r+1} \frac{\delta_{n_1 r_1}}{2r_1+1}, \quad (4)$$

где

$$W_{n_1, r_1, n, r} = \int_{-\infty}^{+\infty} J_{n_1}^{(s)}\left(q_y \frac{a}{2}\right) J_{r_1}^{(s)}\left(q_y \frac{a}{2}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} Z(q_x, q_y) J_n^{(s)}\left(q_x \frac{w}{2}\right) J_r^{(s)}\left(q_x \frac{w}{2}\right) dq_x dq_y, \quad (5)$$

где $Z(q_x, q_y)$ – адмиттансы системы, вычисленные из уравнений Максвелла; $J_n^{(s)}\left(q_x \frac{w}{2}\right)$ – сферические функции Бесселя; (q_x, q_y) – волновые векторы в Фурье-представлении; n, n_1 – индексы

строк матричных элементов, r, r_1 — индексы столбцов элементов матрицы (индексы n, n_1, r, r_1 принимают значения от 0 до N). Полный размер квадратной матрицы M системы уравнений составляет $2N^2$.

Полученная система алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения токов $\beta_{n,n_1}^{(x,y)}$ решается методом исключения Гаусса путем приведения матрицы системы к треугольному виду. Рассчитанные индуцированные токи (3) позволяют определить резонансные электродинамические свойства прямоугольника с двумерным электронным газом.

Для вычисления энергетических характеристик взаимодействия электромагнитной волны и прямоугольника двумерного газа необходимо представить поля рассеянных волн вперед и назад как сумму полей отраженного от однородной границы раздела сред и рассеянного поля. Для примера записана компонента электрического поля в 1-ой среде

$$E_x(x, y, z) = E_{x,R} \exp\left(ik_{z,0,0}^{(1)}z\right) + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}_{x,q_x,q_y} \exp\left(ik_{z,q_x,q_y}^{(1)}z\right) \exp(iq_y y) dq_y \exp(iq_x x) dq_x, \quad (6)$$

где $E_{x,R}$ — электрическое поле волны, отраженной от однородной границы раздела сред, а \tilde{E}_{x,q_x,q_y} — амплитуды Фурье-компонент электрического поля рассеянной волны назад. Средний поток мощности Умова–Пойнтинга будет описывать уходящие рассеянные прямоугольником волны

$$P_{zR,T} = 2\pi^2 \iint_{\pm\omega\sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_0\mu_0}} \left(\tilde{E}_{x,q_x,q_y} \tilde{H}_{y,q_x,q_y}^* - \tilde{E}_{y,q_x,q_y} \tilde{H}_{x,q_x,q_y}^* \right) dq_y dq_x. \quad (7)$$

Исключая потоки волн отраженных и прошедших через границу раздела сред и используя уравнения Максвелла, потоки рассеянного излучения прямоугольником назад P_{zR} и P_{zT} вперед запишем как

$$P_{zR,T} = 2\pi^2 \iint_{\pm\omega\sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_0\mu_0}} \frac{\left| \tilde{E}_{x,q_x,q_y} \right|^2 (\varepsilon_0\varepsilon_{1,2}\mu_0\omega^2 - q_y^2) + \left| \tilde{E}_{y,q_x,q_y} \right|^2 (\varepsilon_0\varepsilon_{1,2}\mu_0\omega^2 - q_x^2)}{k_{z_{1,2}}^* \mu_0 \omega} dq_y dq_x + \\ + 2\pi^2 \iint_{\pm\omega\sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_0\mu_0}} \frac{2\text{Re} \left(\tilde{E}_{x,q_x,q_y} \tilde{E}_{y,q_x,q_y}^* \right) q_y q_x}{k_{z_{1,2}}^* \mu_0 \omega} dq_y dq_x. \quad (8)$$

Поглощенная электромагнитная мощность в прямоугольнике осциллирующими токами может быть вычислена как

$$A = \text{Re} \left(\frac{1}{\sigma(\omega)} \right) \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-l/2}^{l/2} \left(|j_x(x, y)|^2 + |j_y(x, y)|^2 \right) dx dy, \quad (9)$$

а плотность потока мощности падающей волны определяется выражением

$$P_{in} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_1}{\mu_0}} \left(|E_{in,x}|^2 + |E_{in,y}|^2 \right). \quad (10)$$

Полученные энергетические характеристики позволяют вычислить сечение поглощения $\alpha_{CS} = A/P_{in}$, сечение рассеяния вперед $\alpha_T = P_{zT}/P_{in}$, сечение рассеяния назад $\alpha_R = P_{zR}/P_{in}$ и сечение экстинкции $\alpha_{CS} = (A + |P_{zT}| + |P_{zR}|) / P_{in}$.

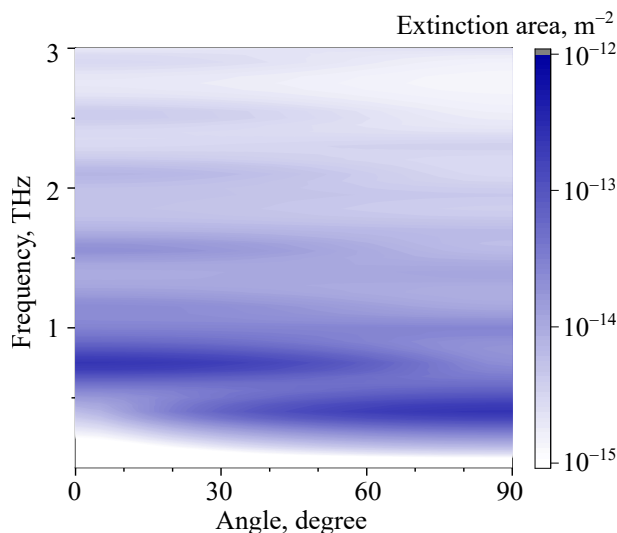


Рис. 1. Зависимость спектра площади сечения экстинкции от угла поляризации электрического поля нормально падающей волны в прямоугольнике с размерами $w = 1$ мкм, $l = 2$ мкм. Двумерный газ описывается проводимостью Друде со следующими параметрами: время релаксации импульса электрона 1 пс, концентрация электронов $2 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ и эффективная масса электрона $0.067m_e$ (цвет онлайн)

Fig. 1. Dependence of the extinction cross-sectional area spectrum on the polarization angle of the electric field of a normally incident wave in a rectangle with dimensions $w = 1 \mu\text{m}$, $l = 2 \mu\text{m}$. A two-dimensional gas is described by Drude conductivity with the following parameters: electron momentum relaxation time 1 ps, electron density $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and effective electron mass $0.067m_e$ (color online)

также приводит к значительному замедлению вычислений по сравнению с одномерным интегрированием при решении двумерных задач. В связи с этим время расчета каждого матричного элемента трехмерной задачи также растет квадратично по сравнению с двумерной задачей. Вычисленная площадь экстинкции прямоугольника с двумерным газом (рис. 1) получена при выполнении оптической теоремы с погрешностью в 0.1%. Поиск сходимости решения показал необходимость учета 12 полиномов Лежандра в разложении токов для исследования первых четырех плазменных резонансов для достижения погрешности 0.1%. Для выполнения расчетов создана программа на языке программирования Фортран. Расчеты проведены на персональном компьютере с 10-ядерным процессором, что позволило рассчитать свойства системы на заданной частоте за 15 секунд.

2. Результаты и обсуждение

С использованием разработанного электродинамического подхода были вычислены индуцированные поля и токи в структуре, рассчитаны спектры сечения прямого и обратного рассеяния (рис. 2), сечение поглощения и сечение экстинкции (см. рис. 2) для прямоугольника двумерного газа на основе гетероструктуры AlGaAs с размерами $w = 1$ мкм, $l = 2$ мкм (типичные экспериментальные структуры продемонстрированы в работах [5, 17]).

Рассчитанное сечение поглощения имеет резонансный характер, что соответствует возбуждению в структуре различных плазменных мод. Для идентификации возбужденных плазменных

Сходимость результатов вычисления резонансных характеристик определяется сравнением рассчитанных индуктивных токов, полученных при последовательном увеличении размера матрицы системы. Отдельным необходимым условием является сходимость расчета матричных элементов, каждый из которых представляет собой двойное интегрирование в пространстве волновых векторов по направлениям q_x и q_y . Численное интегрирование каждого коэффициента производится с учетом сходимости и с разбиением интеграла в волновом пространстве на два — внутри светового конуса при $q_x, q_y \leq \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon}$ и вне светового конуса при $q_x, q_y > \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon}$, где ε — наибольшая диэлектрическая проницаемость окружающих сред. Такое разбиение необходимо, так как в субволновых структурах излучающиеся и затухающие индуцированные поля имеют пространственные масштабы, различающиеся на порядок и более. Основным отличием разработанного метода от используемого в двумерных задачах является существенное замедление вычислений из-за увеличения размера матрицы N^2 при увеличении числа полиномов Лежандра по сравнению с размером матрицы N в двумерных задачах. Двойное интегрирование в пространстве импульсов при вычислении матричных элементов

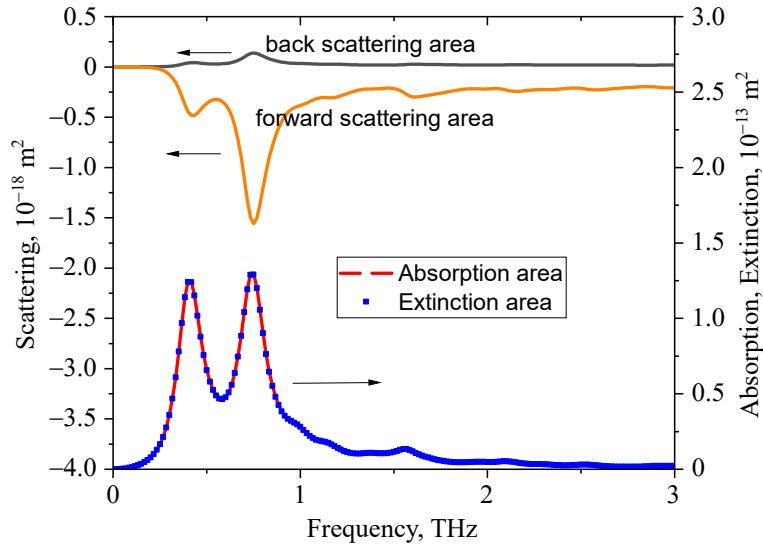


Рис. 2. Спектры сечения поглощения (красная кривая), сечения экстинкции (синие точки), сечения обратного рассеяния (черная кривая) и сечения прямого рассеяния (зеленая кривая) для прямоугольника с размерами $w = 1$ мкм, $l = 2$ мкм. Двумерный газ описывается проводимостью Друде со следующими параметрами: время релаксации импульса электрона 1 пс, концентрация электронов $2 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ и эффективная масса электрона 0.067. Вектор электрического поля падающей волны направлен под углом 45 градусов относительно оси OX (цвет онлайн)

Fig. 2. Spectra of the absorption cross section (red curve), extinction cross section (blue dots), backscattering cross section (black curve) and forward scattering cross section (green curve) for a rectangle with dimensions $w = 1 \mu\text{m}$, $l = 2 \mu\text{m}$. A two-dimensional gas is described by Drude conductivity with the following parameters: electron momentum relaxation time 1 ps, electron concentration $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and effective electron mass 0.067. The electric field vector of the incident wave is directed at an angle of 45 degrees relative to the OX axis (color online)

мод можно использовать модель резонатора с идеально отражающими границами. В такой модели волновой вектор плазмонной моды будет иметь дискретные значения $q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$, где $q_x = \frac{\pi}{w}p$ — по направлению x и $q_y = \frac{\pi}{l}p_1$ — по направлению y , p и p_1 — целые числа. Следовательно, каждой плазмонной моде в прямоугольнике можно приписать два индекса (p, p_1) .

Для идентификации мод построены мгновенные распределения плотности заряда, осциллирующего в прямоугольнике с двумерным газом. Для этого с использованием уравнения непрерывности вычислено распределение линейной плотности заряда для плазмонного резонанса в прямоугольнике с двумерным газом:

$$\rho = -\frac{i}{\omega} \left(\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} \right). \quad (11)$$

Построены распределения плотности заряда на частотах плазмонного резонанса 0.4009 ТГц, 0.7342 ТГц, 0.9675 ТГц и 1.551 ТГц (рис. 3), которые позволяют сделать выводы о структуре плазмонных мод и идентифицировать их с помощью модели дискретизации волнового числа. Плазмону на частоте 0.4009 ТГц соответствуют индексы (0,1), на частоте 0.7342 ТГц — (1,0), на частоте 0.9675 ТГц — (2,1), а на частоте 1.551 ТГц — (1,2). Логарифмический график спектров экстинкции и поглощения показывает, что в прямоугольнике наиболее эффективно возбуждаются фундаментальные плазмонные моды с индексами (0,1) и (1,0), тогда как для высших плазмонных резонансов сечение экстинкции падает на порядок и более. На рис. 3 видно сильное накопление заряда на краях прямоугольника, что существенно влияет на резонансные частоты плазмонных мод по сравнению с частотами, предсказываемыми упрощенными моделями. Такое накопление заряда

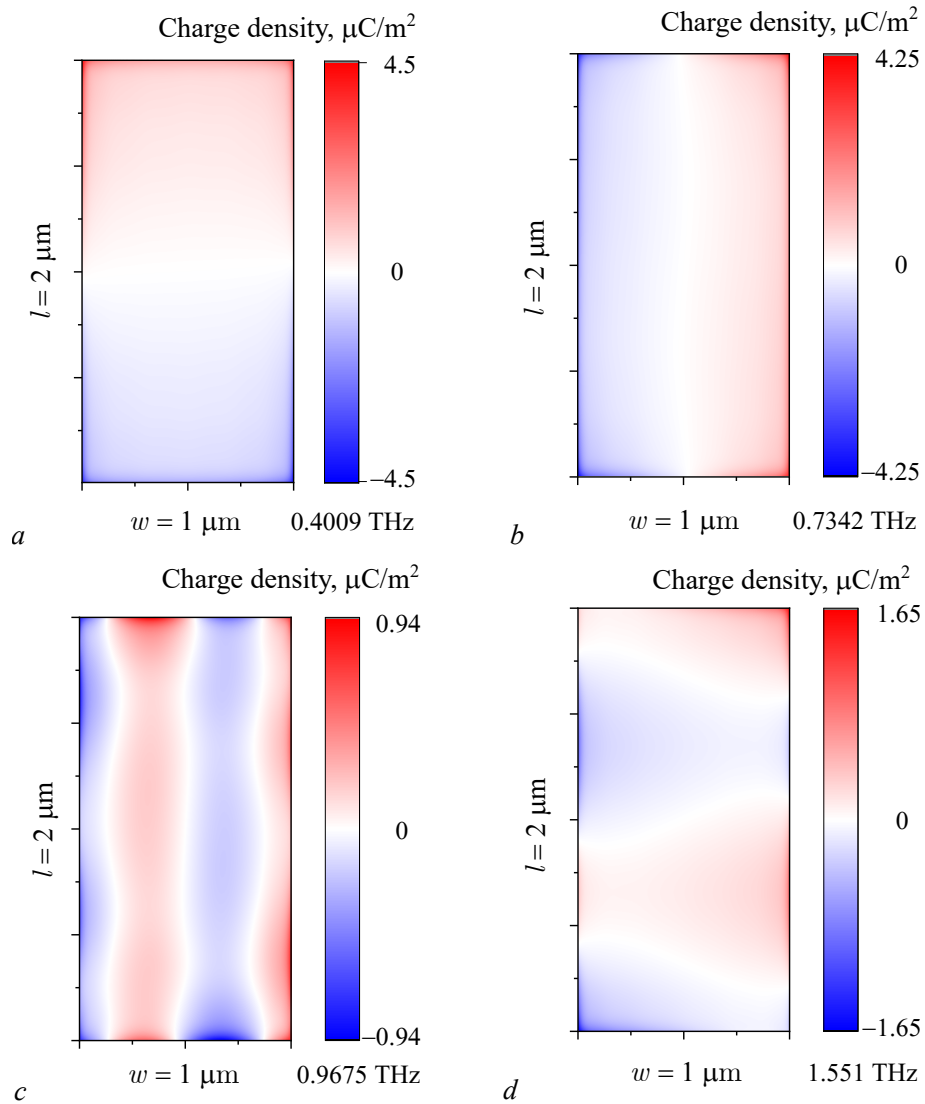


Рис. 3. Распределение плотности заряда в плоскости прямоугольника с двумерным электронным газом в плазмонных резонансах, соответствующих резонансам на рис. 1 на частотах 0.4009 ТГц (a), 0.7342 ТГц (b), 0.9675 ТГц (c) и 1.551 ТГц (d) (цвет онлайн)

Fig. 3. Charge density distribution in the plane of a rectangle with a two-dimensional electron gas in plasmon resonances corresponding to resonances in Fig. 1 at frequencies of 0.4009 THz (a), 0.7342 THz (b), 0.9675 THz (c) and 1.551 THz (d) (color online)

связано с увеличением электрического поля на границах прямоугольника с двумерным электронным газом и приводит к значительному выходу поля за границы прямоугольника, что уменьшает резонансные частоты возбуждения плазмонных мод. Разработанный алгоритм позволяет более точно предсказывать электромагнитные свойства прямоугольника с двумерным электронным газом по сравнению с коммерческими программами, основанными на методе конечных элементов, поскольку не требует помещения исследуемой системы в область решения. И, следовательно, моды области решения не подмешиваются к истинным решениям рассматриваемой системы. Предложенный алгоритм позволяет исследовать многослойные трехмерные структуры и решать задачи с пространственной дисперсией в двумерном электронном газе, не решаемые методами конечных элементов.

Заключение

Таким образом, в данной работе разработан алгоритм расчета токов, наведенных электромагнитной волной в прямоугольнике с двумерным электронным газом. Найдены условия сходимости алгоритма и проведено сравнение его быстродействия в сравнении с аналогичным алгоритмом для вычисления плазмонных свойств в двумерной постановке задачи. Рассчитаны сечения поглощения и экстинкции, а также пространственные распределения плотности заряда в плазмонных резонансах. Установлено, что падающая волна наиболее эффективно возбуждает фундаментальные плазмонные моды с индексами (0,1) и (1,0). Плазмонные моды демонстрируют сильное накопление заряда на краях прямоугольника, что существенно влияет на резонансные частоты возбуждения плазмонных мод.

References

1. Popov VV. Plasmon excitation and plasmonic detection of terahertz radiation in the grating-gate field-effect-transistor structures. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2011;32:1178–1191. DOI: 10.1007/s10762-011-9813-6.
2. Meziani YM, Handa H, Knap W, Otsuji T, Sano E, Popov VV, Tsymbalov GM, Coquillat D, Teppe F. Room temperature terahertz emission from grating coupled two-dimensional plasmons. *Applied Physics Letters*. 2008;92(20):201108. DOI: 10.1063/1.2919097.
3. Popov VV, Polischuk OV, Shur MS. Resonant excitation of plasma oscillations in a partially gated two-dimensional electron layer. *Journal of Applied Physics*. 2005;98(3):033510. DOI: 10.1063/1.1954890.
4. Fateev DV, Mashinsky KV, Polischuk OV, Popov VV. Excitation of propagating plasmons in a periodic graphene structure by incident terahertz waves. *Physical Review Applied*. 2019;11(6):064002. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.064002.
5. Marem'yanin KV, Ermolaev DM, Fateev DV, Morozov SV, Maleev NA, Zemlyakov VE, Gavrilenko VI, Popov VV, Shapoval SYu. Wide-aperture detector of terahertz radiation based on GaAs/InGaAs transistor structure with large-area slit grating gate. *Technical Physics Letters*. 2010;36:365–368. DOI: 10.1134/S106378501004022X.
6. Popov VV, Tsymbalov GM, Shur MS, Knap W. The resonant terahertz response of a slot diode with a two-dimensional electron channel. *Semiconductors*. 2005;39(1):142–146. DOI: 10.1134/1.1852665.
7. Allen SJ, Jr, Stormer HL, Hwang JCM. Dimensional resonance of the two-dimensional electron gas in selectively doped GaAs/AlGaAs heterostructures. *Phys. Rev. B*. 1983;28:4875. DOI: 10.1103/PhysRevB.28.4875.
8. Fetter AL. Magnetoplasmons in a two-dimensional electron fluid: Disk geometry. *Physical Review B*. 1986;33(8):5221. DOI: 10.1103/PhysRevB.33.5221.
9. Dahl C, Kotthaus JP, Nickel H, Schlapp W. Magnetoplasma resonances in two-dimensional electron rings. *Physical Review B*. 1993;48:15480. DOI: 10.1103/PhysRevB.48.15480.
10. Mikhailov S. Radiative decay of collective excitations in an array of quantum dots. *Physical Review B*. 1996;54(15):10335. DOI: 10.1103/PhysRevB.54.10335.
11. Kovalskii VA, Gubarev SI, Kukushkin IV, Mikhailov SA, Smet JH, von Klitzing K, Wegscheider W. Microwave response of two-dimensional electron rings. *Physical Review B*. 2006;73(19):195302. DOI: 10.1103/physrevb.73.195302.
12. Rodionov DA, Zagorodnev IV. Oscillations in radiative damping of plasma resonances in a gated disk of a two-dimensional electron gas. *Physical Review B*. 2022;106(23):235431. DOI: 10.1103/PhysRevB.106.235431.
13. Zarezin AM, Mylnikov D, Petrov AS, Svintsov D, Gusikhin PA, Kukushkin IV, Muravev VM.

- Plasmons in a square of two-dimensional electrons. *Physical Review B*. 2023;107(7):075414. DOI: 10.1103/PhysRevB.107.075414.
14. Dawood A, Park SJ, Parker-Jervis R, Wood C, Li L, Linfield EH, Davies AG, Cunningham JE, Sydoruk O. Effect of mesa geometry on low-terahertz frequency range plasmons in two-dimensional electron systems. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022;55:015103. DOI: 10.1088/1361-6463/ac2401.
 15. Mylnikov D, Svintsov D. Limiting capabilities of two-dimensional plasmonics in electromagnetic wave detection. *Physical Review Appl.* 2022;17(6):064055. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.064055.
 16. Nikitin AY, Alonso-González P, Vélez S, Mastel S, Centeno A, Pesquera A, Zurutuza A, Casanova F, Hueso LE, Koppens FHL, Hillenbrand R. Real-space mapping of tailored sheet and edge plasmons in graphene nanoresonators. *Nat. Photonics*. 2016;10:239. DOI: 10.1038/nphoton.2016.44.
 17. Popov VV, Yermolaev DM, Maremyanin KV, Zemlyakov VE, Maleev NA, Gavrilenko VI, Bespalov VA, Yegorkin VI, Ustinov VM, Shapoval SYu. Detection of terahertz radiation by tightly concatenated InGaAs field-effect transistors integrated on a single chip. *Applied Physics Letters*. 2014;104(16):163508. DOI: 10.1063/1.4873540.



Фатеев Денис Васильевич — родился в Саратове (1983). Окончил с отличием физический факультет Саратовского государственного университета по направлению «Физика» (2005). Кандидат физико-математических наук (2008, СГУ). Работает на кафедре общей, теоретической и компьютерной физики Саратовского государственного университета в должности доцента. Научные интересы — терагерцевое излучение, математическое моделирование, электромагнитное моделирование. Опубликовал свыше 100 научных работ по указанным направлениям.

Россия, 410054 Саратов, ул. Зеленая, 38
 Саратовский филиал Института радиотехники
 и электроники им. В. А. Котельникова РАН
 E-mail: fateevdv@yandex.ru
 ORCID: 0000-0003-1406-5385
 AuthorID (eLibrary.Ru): 179002



Машинский Константин Викторович — родился в Саратове (1992). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета по направлению «Физика» (2014). Работает в лаборатории фотоники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Научные интересы — терагерцевое излучение, математическое моделирование, электромагнитное моделирование. Опубликовал свыше 30 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 410054 Саратов, ул. Зеленая, 38
 Саратовский филиал Института радиотехники
 и электроники им. В. А. Котельникова РАН
 E-mail: konstantin-m92@yandex.ru
 ORCID: 0000-0002-0724-6391
 AuthorID (eLibrary.Ru): 983332