УДК 533.951, 535.393, 538.958

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-54-65

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПЛАЗМА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ S-ВОЛНЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

Бедрикова Е. А., Зверев Н. В., Парёнкина В. И., Юшканов А. А.

Московский государственный областной университет

141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация

Аннотация

Цель: исследование влияния кинетических и квантовых волновых свойств вырожденной электронной плазмы на взаимодействие S-волны с металлическим полупространством.

Процедура и методы. Зависимость энергетического коэффициента поглощения S-волн металлическим полупространством от частоты излучения, не превосходящей плазменную частоту, изучается и анализируется с помощью теоретических соотношений, учитывающих поперечную диэлектрическую проницаемость плазмы электронов проводимости.

Результаты. Показано, что при обычных значениях частоты столкновений электронов проводимости результаты для квантовой электронной плазмы отличаются от результатов для классической электронной плазмы и классического электронного газа. А в случае малых значений частоты столкновений электронов результаты для квантовой и классической электронной плазмы практически совпадают при частотах, меньших плазменной частоты, и отличаются при частотах вблизи этой частоты.

Теоретическая/практическая значимость. Полученные результаты целесообразно использовать при теоретическом исследовании взаимодействия излучения с металлами, а также при создании оптических устройств, использующих металлические детекторы излучения.

Ключевые слова: оптические коэффициенты, металл, полупространство, электронная плазма

Благодарности. Авторы выражают благодарность профессору Беляеву В. В. (зав. кафедрой теоретической физики МГОУ) за полезные замечания и активную поддержку. Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ, грант № 19-07-00537 А.

QUANTUM ELECTRON PLASMA AND S-WAVE INTERACTION WITH METAL HALF-SPACE

E. Bedrikova, N. Zverev, V. Paryonkina, A. Yushkanov

Moscow Region State University

24 ulitsa Very Voloshinoi, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

Aim. We study the influence of kinetic and quantum wave properties of degenerate electron plasma on the S-wave interaction with metal half-space.

Methodology. The dependence of the energy absorption coefficient of S-waves by metal half-space on the radiation frequency not exceeding the plasma frequency is studied and analyzed using theoretical formulae that take into account the transverse dielectric permittivity of the plasma of conduction electrons.

Results. It is shown that at the usual values of the collision frequency of conduction electrons, the results for quantum electron plasma differ from the results for classical electron plasma and for classical electron gas. In the case of small values of the collision frequency of electrons, the results for quantum and classical electron plasmas almost coincide at the frequencies less than the plasma frequency, and differ at frequencies near this frequency.

Research implications. The obtained results can be used in the theoretical study of interaction of radiation with metals, as well as in the development of optical devices using metal radiation detectors.

Keywords: optical coefficients, metal, half-space, electronic plasma

Acknowledgments. The authors are grateful to Professor V. V. Belyaev (Head of the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University) for useful comments and active support. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 19-07-00537 A).

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию взаимодействия электромагнитного излучения с проводящими объектами, в том числе с теми из них, которые имеют достаточно малые размеры [1–8]. Интерес к такому исследованию вызван, с одной стороны, развитием нанотехнологий и связанным с ним созданием оптических устройств, обладающих тонкими характеристиками. С другой стороны, данное исследование имеет фундаментальное значение, направленное на развитие теоретической и прикладной физики.

Для теоретического исследования взаимодействия излучения с проводящими веществами обычно используют кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения электронов проводимости [9; 10]. Как правило, это уравнение рассматривают в приближении времени релаксации. В данном подходе учитываются кинетические свойства электронов проводимости. Этот подход приводит к неплохому согласию с экспериментальными данными при частотах излучения, много меньших плазменной частоты [7].

Однако при частотах порядка плазменной частоты необходимо учитывать квантовые волновые свойства электронов проводимости [6]. Для этого вместо кинетического уравнения Больцмана необходимо рассматривать уравнение Лиувилля-Шрёдингера с матрицей плотности проводящих электронов [11]. В то же время исследования с использованием данного подхода сталкиваются с определённой трудностью. Проблема состоит в том, что при рассмотрении тел малых размеров необходимо принимать во внимание граничные эффекты электронов проводимости. А описание этих эффектов не переносится напрямую с классической функции распределения к матрице плотности электронов вследствие

волновых свойств и наличия принципа неопределённости (о выборе граничных условий для электронов проводимости в квантовом подходе см. [12]). Поэтому исследования квантовой плазмы электронов проводимости ведутся достаточно слабо (электронная плазма с учётом квантовых волновых свойств рассматривается в работе [13]).

Настоящая работа направлена на восполнение пробела в изучении волновых свойств электронов проводимости в электронной плазме. В данной работе численно исследуется влияние кинетических и квантовых волновых свойств вырожденной электронной плазмы на взаимодействие S-волн с металлическим полупространством. При этом выполняется сравнение результатов для квантовой вырожденной электронной плазмы с результатами для классической вырожденной плазмы и классического электронного газа в случае энергетического коэффициента поглощения излучения при частотах излучения, не превосходящих плазменную частоту.

1. Модель и диэлектрические проницаемости вырожденной электронной плазмы

Мы предполагаем, что в одной части полупространства с $z < 0$ находится прозрачная диэлектрическая среда с постоянной диэлектрической проницаемостью ϵ , а другую часть полупространства с $z > 0$ занимает металлическая среда (рис. 1). Металлическую среду будем считать изотропной, т. е. поверхность Ферми электронов проводимости имеет сферическую форму. Пусть со стороны диэлектрической среды на поверхность металлической среды под углом θ падает электромагнитная волна. Мы рассматриваем S-волну, вектор $\mathbf{H}$ которой лежит в плоскости падения XZ (см. рис. 1).

Рис. 1 / Fig. 1. Схема распространения электромагнитного излучения /
Scheme of propagation of electromagnetic radiation

Источник: по данным авторов.

При низких частотах поля задача может быть рассмотрена в рамках макроскопической электродинамики. При этом электромагнитное поле проникает вглубь металла на глубину скин-слоя. Это описывается в теории скин-эффекта. При низких частотах электромагнитного поля мы имеем дело с нормальным скин-эффектом. При этом диэлектрическую проницаемость металла можно считать

не зависящей от частоты поля. Можно пренебречь временной и пространственной дисперсией. По мере роста частоты поля глубина скин-слоя уменьшается. Когда толщина скин-слоя становится сравнимой с длиной пробега электронов в металле, предположение о постоянстве диэлектрической проницаемости становится неприменимым. Мы переходим в область аномального скин-эффекта. В этом случае необходимо учитывать зависимость диэлектрической проницаемости металла от частоты и волнового вектора. Свой вклад вносит зависимость характера взаимодействия электронов с электромагнитным излучением от квантовых эффектов. Учёт этой зависимости будет предметом изучения в данной работе.

В данной работе мы изучаем безразмерный энергетический коэффициент поглощения A . Для металлического полупространства в случае S -волны этот коэффициент имеет вид [14; 15]:

$$A = 1 - R, \quad R = \left| \frac{Z\sqrt{\epsilon} \cos \theta + 1}{Z\sqrt{\epsilon} \cos \theta - 1} \right|^2, \quad (1)$$

где Z – безразмерный поверхностный импеданс S -волны для металлического полупространства:

$$Z = \frac{1}{Z_0} \frac{E_y}{H_x} \Big|_{z=0} = \frac{2c\omega}{\pi i} \int_0^{+\infty} \frac{dk_z}{\omega^2 \epsilon_{tr}(\omega, k) - (ck)^2}. \quad (2)$$

Данный импеданс получен в предположении зеркального отражения электронов от поверхности металла. Здесь Z_0 – волновое сопротивление вакуума в системе СИ, E_y и H_x – проекции векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ волны на оси Y и X соответственно (рис. 1), ω – частота излучения, c – скорость света, $\epsilon_{tr}(\omega, k)$ – поперечная диэлектрическая проницаемость электронной плазмы, k – волновое число. В формуле (2) оно равно

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_z^2}, \quad (3)$$

где k_x – проекция волнового вектора $\mathbf{k}$ падающей S -волны на ось X (рис. 1):

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} \sin \theta. \quad (4)$$

В данной работе рассматривается поперечная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{tr}^{(qu)}(\omega, k)$ квантовой вырожденной электронной плазмы при нулевой температуре с постоянной частотой столкновений, полученная в подходе Мермина с использованием матрицы плотности [11]:

$$\epsilon_{tr}^{(qu)}(\omega, k) = 1 - \frac{1}{\Omega^2} \left(1 + \frac{\Omega F(\Omega + i\gamma, Q) + i\gamma F(0, Q)}{\Omega + i\gamma} \right). \quad (5)$$

Здесь функция

$$F(\Omega + i\gamma, Q) = B(\Omega_+ + i\gamma, Q) - B(\Omega_- + i\gamma, Q) + \\ + \frac{9}{8} \left(\frac{\Omega + i\gamma}{Q} \right)^2 + \frac{3}{32} (rQ)^2 - \frac{5}{8}, \quad (6)$$

где

$$B(\Omega + i\gamma, Q) = \frac{3}{16rQ^5} \left[(\Omega + i\gamma)^2 - Q^2 \right]^2 \ln \frac{\Omega + i\gamma - Q}{\Omega + i\gamma + Q}, \quad (7)$$

а также

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_p}, \quad \Omega_{\pm} = \Omega \pm \frac{1}{2} r Q^2, \quad \gamma = \frac{\nu}{\omega_p}, \quad Q = \frac{v_F k}{\omega_p}, \quad r = \frac{\hbar \omega_p}{m_e v_F^2}. \quad (8)$$

В этих обозначениях ω_p – плазменная частота электронной плазмы, ν – частота столкновений электронов в плазме, m_e – эффективная масса электронов проводимости, v_F – скорость Ферми электронов вырожденной плазмы, $\hbar$ – постоянная Планка.

В диэлектрической проницаемости (5) учитываются как кинетические, так и квантовые волновые свойства вырожденной электронной плазмы. В классическом пределе $\hbar \rightarrow 0$ проницаемость $\epsilon_{tr}^{(qu)}(\omega, k)$ переходит в поперечную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{tr}^{(cl)}(\omega, k)$ классической вырожденной электронной плазмы [9]:

$$\epsilon_{tr}^{(cl)}(\omega, k) = 1 - \frac{3}{4\Omega Q^3} \left\{ 2(\Omega + i\gamma)Q + [(\Omega + i\gamma)^2 - Q^2] \ln \frac{\Omega + i\gamma - Q}{\Omega + i\gamma + Q} \right\}. \quad (9)$$

Эта проницаемость учитывает только кинетические свойства электронов. А в длинноволновом пределе $k \rightarrow 0$ обе проницаемости $\epsilon_{tr}^{(qu)}(\omega, k)$ и $\epsilon_{tr}^{(cl)}(\omega, k)$ переходят в поперечную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{tr}^{(DL)}(\omega)$ классического электронного газа в подходе Друде-Лоренца [1; 9; 14; 15]:

$$\epsilon_{tr}^{(DL)}(\omega) = 1 - \frac{1}{\Omega(\Omega + i\gamma)}. \quad (10)$$

Последняя диэлектрическая проницаемость не описывает ни кинетических, ни квантовых волновых свойств электронной плазмы.

Рис. 2 / Fig. 2. Зависимость коэффициента поглощения A S-волны от частоты ω для угла падения $\theta = 75^\circ$ в случае частоты столкновений $\nu = 10^{-3}\omega_p$ (рис. 2а) и $\nu = 10^{-6}\omega_p$ (рис. 2б): 1 – квантовая электронная плазма (сплошная линия); 2 – классическая электронная плазма (пунктирная линия); 3 – классический электронный газ (точечная линия) / Dependence of the absorption coefficient A of the S-wave on the frequency ω for the angle of incidence $\theta = 75^\circ$ in the case of the collision frequency $\nu = 10^{-3}\omega_p$ (fig. 2a) and $\nu = 10^{-6}\omega_p$ (fig. 2b): 1 – quantum electron plasma (solid line); 2 – classical electron plasma (dashed line); 3 – classical electron gas (dotted line).

Источник: [16].

2. Результаты исследования

Нами по формулам (1) – (10) выполнены численные исследования энергетического коэффициента поглощения A электромагнитной S-волны в металлическом полупространстве в зависимости от частоты излучения ω при различных углах падения θ . При этом данный коэффициент был рассчитан для квантовой вырожденной плазмы, классической вырожденной плазмы и классического электронного газа. Данным случаям соответствуют диэлектрические проницаемости (5), (9) и (10) в поверхностном импедансе (2).

В качестве вещества металлического полупространства нами выбран алюминий. Плазменная частота, эффективная масса и скорость Ферми электронов проводимости в вырожденной электронной плазме алюминия при обычных температурах равны, соответственно, $\omega_p = 1,93 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$, $m_e = 1,35 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ и $v_F = 1,34 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ [14]. Рассмотрены различные частоты столкновений электронов проводимости алюминия [1; 14]: обычная частота столкновений $\nu = 10^{-3}\omega_p$ при нормальных температурах и пониженная частота столкновений $\nu = 10^{-6}\omega_p$ при достаточно низких температурах. В качестве прозрачного диэлектрика мы рассматриваем воздух с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1$. Рассматриваемые нами частоты излучения лежат в диапазоне $\omega = (10^{-4} \div 1)\omega_p$.

Типичные результаты численного исследования коэффициента поглощения A в зависимости от частоты излучения ω представлены на рис. 2 [16]. Видно, что в случае обычной для алюминия частоты столкновений электронов $\nu = 10^{-3}\omega_p$ коэффициент поглощения квантовой вырожденной электронной плазмы от-

личается от коэффициентов поглощения классической вырожденной плазмы и классического электронного газа при всех частотах из рассматриваемого диапазона $\omega = (10^{-4} \div 1)\omega_p$ (рис. 2а). При этом коэффициент поглощения в случае классической вырожденной плазмы отличается от данного коэффициента для классического электронного газа при частотах $\omega \ll \omega_p$, причём $\omega \sim 3 \cdot 10^{-3}\omega_p$. Но при частотах излучения $\omega \sim 10^{-4}\omega_p$ и $\omega \sim (0,1 \div 1)\omega_p$ коэффициенты поглощения классической плазмы и классического электронного газа практически совпадают.

Ситуация существенно меняется при значительном уменьшении частоты столкновений электронов (рис. 2б). В случае пониженной частоты столкновений $\nu = 10^{-6}\omega_p$ происходит совпадение значений коэффициента поглощения A квантовой и классической вырожденной электронной плазмы при частотах $\omega \ll \omega_p$. При этих частотах коэффициент поглощения квантовой и классической электронной плазмы значительно превосходит данный коэффициент в случае классического электронного газа. Однако при частотах $\omega \sim (0,1 \div 1)\omega_p$ коэффициент поглощения квантовой вырожденной плазмы отличается от данного коэффициента классической вырожденной плазмы. А коэффициент поглощения классической плазмы при частотах $\omega \sim (0,5 \div 1)\omega_p$ почти совпадает с коэффициентом поглощения классического электронного газа.

3. Обсуждение

Полученные результаты численного исследования коэффициента поглощения излучения металлическим полупространством можно истолковать следующим образом.

Из формулы (5) для поперечной диэлектрической проницаемости квантовой вырожденной электронной плазмы $\epsilon_{tr}^{(qu)}(\omega, k)$ с функциями (6), (7) и обозначениями (8) видно, что существенный вклад в диэлектрическую проницаемость этой плазмы даёт слагаемое $F(0, Q)$, причём данный вклад не исчезает даже при малых значениях волнового числа k . Из-за этого вклада при обычных значениях частоты столкновений электронов проводимости $\nu = 10^{-3}\omega_p$ результаты для коэффициента поглощения A квантовой вырожденной электронной плазмы отличаются от результатов данного коэффициента как классической электронной плазмы, так и классического электронного газа. Отличие коэффициента поглощения классической плазмы от классического электронного газа при $\omega \sim 3 \cdot 10^{-3}\omega_p$ наблюдалось в работах [1; 14; 15]. Для плазменного полупространства в случае классической вырожденной электронной плазмы данное отличие имеет место при частотах излучения $\omega \sim (\nu_F/c)\omega_p$; метод оценки представлен в [10]. Такое поведение соответствует результатам расчётов, поскольку в случае алюминия $\nu_F / c \cong 4,47 \cdot 10^{-3}$. При этих же частотах наблюдается максимум коэффициента поглощения квантовой вырожденной плазмы (рис. 2а). А при других частотах излучения, в том числе при $\omega \geq 0,1\omega_p$, существенный вклад в импеданс (2) дают малые волновые числа k , для которых согласно (9) и (10) $\epsilon_{tr}^{(qu)}(\omega, k) \approx \epsilon_{tr}^{(DL)}(\omega)$ в случае обычных значений частоты столкновений ν . Этим можно объяснить согласие при данных частотах коэффициентов поглощения

классической вырожденной электронной плазмы и классического электронного газа.

Однако при пониженных значениях частоты столкновений электронов ν , таких как $\nu = 10^{-6}\omega_p$, становится заметным влияние кинетических свойств электронной плазмы. При этом влияние слагаемого $F(0, Q)$ в поперечной диэлектрической проницаемости квантовой вырожденной электронной плазмы $\epsilon_{tr}^{(qu)}(\omega, k)$ согласно (5) с обозначениями (8) становится достаточно малым. Вследствие этого при частотах $\omega \leq 0,1\omega_p$ коэффициент поглощения A квантовой вырожденной электронной плазмы практически совпадает с коэффициентом поглощения классической вырожденной электронной плазмы. Отличие коэффициентов поглощения классической вырожденной электронной плазмы от классического электронного газа при малых значениях частоты столкновений электронов ν объясняется наличием затухания Ландау в плазме [1; 5; 9; 10]. Данное затухание имеет место даже в случае отсутствия столкновений электронов в плазме, когда $\nu \rightarrow 0$. Поэтому коэффициенты поглощения квантовой и классической электронной плазмы при малых ν в области частот $\omega \ll \omega_p$ превосходят коэффициент поглощения классического электронного газа. В то же время, согласно формулам (6) – (8), при частотах $\omega \sim \omega_p$ ($\omega \leq \omega_p$) происходит вклад в диэлектрическую проницаемость выражений, содержащих коэффициент r . Данные слагаемые отвечают за квантовые волновые свойства электронов плазмы. Поэтому в области частот $\omega > 0,1\omega_p$ проявляются квантовые волновые свойства электронов вырожденной плазмы, что приводит к отличию коэффициентов поглощения A квантовой и классической вырожденной электронной плазмы.

Заключение

В данной работе численно исследовано влияние кинетических и квантовых волновых свойств вырожденной плазмы электронов проводимости на взаимодействие электромагнитного излучения с металлическим полупространством. Изучен энергетический коэффициент поглощения электромагнитной S-волны металлическим полупространством методом диэлектрической проницаемости электронной плазмы в предположении зеркального отражения электронов от поверхности металла. Рассмотрены диэлектрические проницаемости квантовой электронной плазмы с учётом её кинетических и квантовых свойств, классической плазмы с учётом только кинетических свойств и, наконец, классического электронного газа без учёта кинетических и квантовых свойств. Исследования выполнены при частотах излучения, не превышающих плазменную частоту, при двух значениях частоты столкновений электронов плазмы.

Численными исследованиями показано, что в случае обычной частоты столкновений электронов при частотах излучения, не превышающих плазменную частоту, коэффициент поглощения электромагнитной S-волны для квантовой плазмы отличается от коэффициентов поглощения для классической плазмы и для классического электронного газа. При этом коэффициент поглощения для классической плазмы отличается от коэффициента поглощения для классиче-

ского электронного газа в области частот, много меньших плазменной частоты. А в случае пониженной частоты столкновений электронов происходит совпадение значений коэффициентов поглощения для квантовой и классической вырожденной электронной плазмы при малых частотах излучения по сравнению с плазменной частотой. В этом случае данные коэффициенты поглощения значительно превышают значение коэффициента поглощения для классического электронного газа. Однако при частотах излучения порядка плазменной частоты коэффициент поглощения для квантовой плазмы отличается от коэффициента для классической плазмы.

На основе материалов используемой литературы предложено качественное объяснение полученных численных результатов. Данные результаты следует учитывать при теоретическом исследовании взаимодействия излучения с металлами, а также при создании оптических устройств, использующих металлические детекторы излучения.

Статья поступила в редакцию 01.10.2021 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нелокальные эффекты в электродинамике металлических пластин / Парадес-Хуарес А., Диас-Монхе С., Макаров Н. М., Перес-Родригес Ф. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 90. № 9. С. 687–692.
2. Manzanares-Martinez J. Analytic expression for the effective plasma frequency in one-dimensional metallic-dielectric photonic crystal // Progress in Electromagnetics Research M. 2010. Vol. 13. P. 189–202. DOI: 10.2528/PIERM10061905.
3. Using metallic photonic crystals as visible light sources / Belousov S., Bogdanova M., Deinega A. etc. // Physical Review B. 2012. Vol. 86. Iss. 17. P. 174201.
4. Электромагнитные экраны инфракрасного диапазона на основе наноразмерных слоёв металла, SiO_2 и SiO / Давидович М. В., Яфаров Р. К., Доронин Д. М., Шиловский П. А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 2. С. 19–21.
5. Landau damping of electromagnetic transport via dielectric-metal superlattices / Paredes-Juarez A., Iakushev D. A., Flores-Desirena B., Makarov N. M., Perez-Rodriguez F. // Optics Letters. 2015. Vol. 40. Iss. 15. P. 3588–3591. DOI: 10.1364/OL.40.003588
6. Yushmanov A. A., Zverev N. V. Quantum Electron Plasma, Visible and Ultraviolet P-wave and Thin Metallic Film // Physics Letters A. 2017. Vol. 381. Iss. 6. P. 679–684. DOI: 10.1016/j.physleta.2016.12.012.
7. Расчёт высокочастотной электропроводности тонкого полупроводникового слоя в случае различных коэффициентов зеркальности его поверхностей / Кузнецова И. А., Романов Д. Н., Савенко О. В., Юшканов А. А. // Микроэлектроника. 2017. Т. 46. № 4. С. 275–283. DOI: 10.7868/S0544126917040032.
8. Castillo-Lopez S. G., Makarov N. M., Perez-Rodriguez F. Quantum resonances of Landau damping in the electromagnetic response of metallic nanoslabs // Optics Letters. 2018. Vol. 43. Iss. 10. P. 2410–2413. DOI: 10.1364/OL.43.002410.
9. Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 407 с.
10. Кондратенко А. Н. Проникновение поля в плазму. М.: Атомиздат, 1979. 232 с.

11. Латышев А. В., Юшканов А. А. Поперечная электрическая проводимость квантовой столкновительной плазмы в подходе Мермина // Теоретическая и математическая физика. 2013. Т. 175. № 1. С. 132–143. DOI: 10.4213/tmf8422.
12. Frensky W. R. Wigner-function model of a resonant-tunneling semiconductor device // Physical Review B. 1987. Vol. 36. Iss. 3. P. 1570–1580. DOI: 10.1103/PhysRevB.36.1570.
13. Kuznetsova I. A., Savenko O. V., Romanov D. N. The influence of Fermi surface anisotropy and the charge carrier surface scattering kinetics on the electrical conductivity of a thin metal film in the view of the quantum size effect // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2056. International Conference “Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics with Using of ToDate Achievements of Theoretical Physics” (MRSU 2021, 20–23 April 2021, Moscow, Russia). P. 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/2056/1/012018.
14. Kliewer K. L., Fuchs R. Anomalous Skin Effect for Specular Electron Scattering and Optical Experiments at Non-Normal Angles of Incidence // Physical Review. 1968. Vol. 172. Iss. 3. P. 607–624. DOI: 10.1103/PhysRev.172.607.
15. Fuchs R., Kliewer K. L. Optical Properties of an Electron Gas: Further Studies of a Nonlocal Description // Physical Review. 1969. Vol. 185. Iss. 3. P. 905–913. DOI: 10.1103/PhysRev.185.905.
16. Зверев Н. В., Юшканов А. А. Квантовый эффект поглощения Н-волн в металлическом полупространстве // Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ (18–24 ноября 2019 года). Фундаментальная и прикладная физика: сборник тезисов. М.: МФТИ, 2019. С. 228–230.

REFERENCES

1. Parades-Khуares A., Dias-Monkhe S., Makarov N. M., Peres-Rodrigues F. [Nonlocal effects in the electrodynamics of metallic slabs]. In: *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters], 2009, Vol. 90, no. 9, pp. 687–692.
2. Manzanares-Martinez J. Analytic expression for the effective plasma frequency in one-dimensional metallic-dielectric photonic crystal. In: *Progress in Electromagnetics Research M*, 2010, vol. 13, pp. 189–202. DOI: 10.2528/PIERM10061905.
3. Belousov S., Bogdanova M., Deinega A. etc. Using metallic photonic crystals as visible light sources. In: *Physical Review B*, 2012, vol. 86, iss. 17, pp. 174201.
4. Davidovich M. V., Yafarov R. K., Doronin D. M., Shilovskii P. A. [Electromagnetic hot screens based on nanodimensional metall -SiO₂ -SiO layers]. In: *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of Wave Processes and Radio Systems], 2012, vol. 15, no. 2, pp. 19–21.
5. Paredes-Juarez A., Iakushev D. A., Flores-Desirena B., Makarov N. M., Perez-Rodriguez F. Landau damping of electromagnetic transport via dielectric-metal superlattices. In: *Optics Letters*, 2015, vol. 40, iss. 15, pp. 3588–3591. DOI: 10.1364/OL.40.003588
6. Yushkanov A. A., Zverev N. V. Quantum Electron Plasma, Visible and Ultraviolet P-wave and Thin Metallic Film. In: *Physics Letters A*, 2017, vol. 381, iss. 6, pp. 679–684. DOI: 10.1016/j.physleta.2016.12.012.
7. Kuznetsova I. A., Romanov D. N., Savenko O. V., Yushkanov A. A. [Calculating the high-frequency electrical conductivity of a thin semiconductor film for different specular reflection coefficients of its surface]. In: *Mikroelektronika* [Russian Microelectronics], 2017, vol. 46, no 4, pp. 275–283. DOI: 10.7868/S0544126917040032.
8. Castillo-Lopez S. G., Makarov N. M., Perez-Rodriguez F. Quantum resonances of Landau damping in the electromagnetic response of metallic nanoslabs. In: *Optics Letters*, 2018, vol. 43, iss. 10, pp. 2410–2413. DOI: 10.1364/OL.43.002410.

9. Aleksandrov A. F., Bogdankevich L. S., Rukhadze A. A. *Osnovy elektrodinamiki plazmy* [Foundations of electrodynamics of plasma]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 407 p.
10. Kondratenko A. N. *Pronikновение polya v plazmu* [The penetration of the field into the plasma]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 232 p.
11. Latyshev A. V., Yushkanov A. A. [Transverse electrical conductivity of a quantum collisional plasma in the Mermin approach]. In: *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika* [Theoretical and Mathematical Physics], 2013 vol. 175, no. 1, pp. 132–143. DOI: 10.4213/tmf8422.
12. Frenslley W. R. Wigner-function model of a resonant-tunneling semiconductor device. In: *Physical Review B*, 1987, vol. 36, iss. 3, pp. 1570–1580. DOI: 10.1103/PhysRevB.36.1570.
13. Kuznetsova I. A., Savenko O. V., Romanov D. N. The influence of Fermi surface anisotropy and the charge carrier surface scattering kinetics on the electrical conductivity of a thin metal film in the view of the quantum size effect. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2056. International Conference “Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics with Using of ToDate Achievements of Theoretical Physics” (MRSU 2021, 20–23 April 2021, Moscow, Russia), pp. 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/2056/1/012018.
14. Kliewer K. L., Fuchs R. Anomalous Skin Effect for Specular Electron Scattering and Optical Experiments at Non-Normal Angles of Incidence. In: *Physical Review*, 1968, vol. 172, iss. 3, pp. 607–624. DOI: 10.1103/PhysRev.172.607.
15. Fuchs R., Kliewer K. L. Optical Properties of an Electron Gas: Further Studies of a Nonlocal Description. In: *Physical Review*, 1969, vol. 185, iss. 3, pp. 905–913. DOI: 10.1103/PhysRev.185.905.
16. Zverev N. V., Yushkanov A. A. [Quantum Effect of H-wave Absorption in a Metal Half-space] In: *Trudy 62-y Vserossiiskoi nauchnoy konferentsii MFTI (18–24 noyabrya 2019 g.). Fundamental'naya i prikladnaya fizika*. [Fundamental and Applied Physics: Proceedings of 62-th All-Russian Scientific MIPT Conference (November 18–24, 2019).] Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology Publ., 2019, pp. 228–230.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бедрикова Екатерина Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического анализа и геометрии Московского государственного областного университета;
e-mail: bedrikova@mail.ru;

Зверев Николай Витальевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического анализа и геометрии Московского государственного областного университета;
e-mail: zverev_nv@mail.ru;

Парёнкина Виктория Игоревна – ассистент кафедры математического анализа и геометрии Московского государственного областного университета;
e-mail: vi.parenkina@mgou.ru;

Юшканов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Московского государственного областного университета;
e-mail: yushkanov@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai V. Zverev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Mathematical Analysis and Geometry, Moscow Region State University;
e-mail: zverev_nv@mail.ru;

Ekaterina A. Bedrikova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Mathematical Analysis and Geometry, Moscow Region State University;
e-mail: bedrikova@mail.ru;

Victoria I. Paryonkina – Assistant Lecturer, Department of Mathematical Analysis and Geometry, Moscow Region State University;
e-mail: vi.parenkina@mgou.ru;

Aleksandr A. Yushkanov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University;
e-mail: yushkanov@inbox.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Бедрикова Е. А., Зверев Н. В., Парёнкина В. И., Юшканов А. А. Квантовая электронная плазма и взаимодействие S-волны с металлическим полупространством // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2021. №4. С. 54–65.

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-54-65.

FOR CITATION

Bedrikova E. A., Zverev N. V., Paryonkina V. I., Yushkanov A. A. Quantum electron plasma and S-wave interaction with metal half-space. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2021, no. 4, pp. 54–65.

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-54-65.