УДК 533.951, 535.393, 538.958

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-8-18

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЁНКИ ПО ПЛАЗМОННЫМ РЕЗОНАНСАМ

Зверев Н. В., Зотов А. А., Юшканов А. А.

Московский государственный областной университет
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская
Федерация

Аннотация.

Цель работы – описание и исследование метода определения характеристик тонких проводящих плёнок на основе использования частот плазмонных резонансов.

Процедура и методы исследования. Зависимости коэффициентов отражения и прохождения излучения от частоты для тонкой проводящей плёнки изучаются и анализируются с помощью теоретических соотношений, учитывающих диэлектрические проницаемости плазмы электронов проводимости.

Результаты исследования. Предложен и описан метод измерения характеристик тонких проводящих плёнок по плазмонным резонансам. Выполнено исследование особенностей плазмонных резонансов. Показана связь частот плазмонных резонансов и характеристик тонкой проводящей плёнки, таких как её толщина и температура, позволяющая измерять характеристики плёнки по этим резонансным частотам. Получены условия для толщины плёнки, измеряемой рассматриваемым методом. Приведена оценка для разности частот плазмонных резонансов.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенный метод измерения характеристик тонких проводящих плёнок целесообразно использовать в микроэлектронике для контроля параметров интегральных схем, в оптике для определения толщин тонких слоёв оптических структур, а также в промышленности для контроля тонкоплёночных покрытий.

Ключевые слова: оптические коэффициенты, наноплёнка, электронная плазма, плазмонный резонанс

CHARACTERISTICS OF A THIN CONDUCTIVE FILM BY PLASMON RESONANCES

N. Zverev, A. Zotov, A. Yushkanov

Moscow Region State University

ul. Very Voloshinoy 24, 141014 Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation

Abstract.

Purpose. The paper describes and studies a method for determining the characteristics of thin flat conducting films based on the use of plasmon resonances.

Methodology and Approach. The dependences of the reflection and transmission coefficients of radiation on the frequency for a thin conducting film are studied and analyzed by using theoretical relations taking into account the dielectric permittivity of the conduction electron plasma.

Results. A method for measuring the characteristics of thin conducting films by plasmon resonances is proposed and described. The features of plasma resonances are investigated. The relationship between the frequencies of plasmon resonances and the characteristics of a thin conducting film, such as its thickness and temperature, is shown, which makes it possible to measure the characteristics of the film using these resonant frequencies. Conditions for the film thickness measured by this method are obtained. An estimate is given for the frequency difference of plasmon resonances.

Theoretical and practical implications. The proposed method for measuring the characteristics of thin conducting films can be used in microelectronics to control the parameters of integrated circuits, in optics to determine the thickness of thin layers of optical structures, and in industry to control thin film coatings.

Keywords: optical coefficients, nanofilm, electron plasma, plasmon resonance

Введение

В настоящее время в связи с бурным развитием таких тонких технологий, как нанотехнологии или атомные технологии, большое значение приобретает задача достаточно точного измерения толщин тонких объектов, имеющих размеры от 1 нанометра (нм) до 1 микрометра (мкм). Существующие оптические методы измерения размеров тонких объектов дают лишь усреднённые значения длин или толщин этих объектов с точностью не выше 10% (см. также [1–3]). Поэтому требуется более точный метод измерения размеров тонких тел. Повышенная точность определения малых размеров необходима при создании таких устройств, как интегральные схемы, слоистые структуры и т. д.

Таким методом измерения характеристик малоразмерных объектов является метод плазмонных резонансов [4–6] (см. также [7] с методом поверхностных плазмонов). Этот метод применим к проводящим объектам, таким как металлы, полуметаллы и полупроводники, и основан на возникновении резонансов в плазме электронов проводимости, заключённой в узком пространстве, при её взаимодействии с электромагнитным излучением.

Кроме этого, с помощью данного метода можно измерять не только размеры, но и другие характеристики малоразмерных объектов, например, температуру

или параметры вещества, из которого данный объект создан. И, наконец, этот метод пригоден для дистанционного измерения характеристик тонких объектов.

Целью настоящей работы является описание и исследование метода определения характеристик тонких плоских проводящих плёнок, используя данные частот плазменных резонансов. При этом изучаются зависимости оптических коэффициентов отражения и прохождения излучения, для тонкой проводящей плёнки, и проводится исследование теоретических зависимостей этих коэффициентов от частоты, учитывающих диэлектрические проницаемости плазмы электронов проводимости.

Схема установки и оптические коэффициенты

Схема установки показана на рис. 1 [6]. Предполагаем, что плоская проводящая плёнка (conductive film) толщиной d имеет неограниченные размеры по плоскостным измерениям и расположена между двумя прозрачными средами с постоянными положительными диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Также предполагаем, что данная плёнка сделана из однородного изотропного проводника.

Рис. 1. Схема установки.

Fig. 1. Installation diagram.

Источник: [6].

Пусть источник монохроматического электромагнитного излучения (radiation source) находится в среде с ϵ_1 , и электромагнитная E -волна (плоскость колебаний вектора E волны лежит в плоскости падения) от данного источника падает на плёнку под углом падения θ (рис. 1). Затем данная волна либо отражается от плёнки, либо проходит через неё, либо поглощается в плёнке. После отражения

от плёнки или прохождения через плёнку излучение попадает в два датчика (detector), плоскость каждого из которых расположена перпендикулярно направлению распространения излучения («лобовое» измерение).

Тогда оптические коэффициенты отражения R и прохождения T_r излучения определяются из эксперимента по формулам:

$$R = \frac{J_R}{J_I}, \quad T_r = \operatorname{Re} \left(\frac{\cos \theta'}{\cos \theta} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \right) \frac{J_T}{J_I}, \quad (1)$$

где J_I , J_R и J_T – интенсивности падающего, отражённого и проходящего излучений при «лобовом» измерении, θ' – угол преломления излучения в среде с ϵ_2 (рис. 1).

Теоретические значения данных коэффициентов R и T_r определяются по формулам [8; 9]:

$$R = \left| \frac{U^{(1)} + U^{(2)}}{V^{(1)} + V^{(2)}} \right|^2, \quad T_r = \operatorname{Re} \left(\frac{\cos \theta'}{\cos \theta} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \right) \left| \frac{U^{(1)} V^{(2)} - U^{(2)} V^{(1)}}{V^{(1)} + V^{(2)}} \right|^2, \quad (2)$$

где величины $U^{(j)}$ и $V^{(j)}$ ($j = 1, 2$) имеют вид:

$$U^{(j)} = \frac{\cos \theta - Z^{(j)} \sqrt{\epsilon_1}}{\cos \theta' + Z^{(j)} \sqrt{\epsilon_2}}, \quad V^{(j)} = \frac{\cos \theta + Z^{(j)} \sqrt{\epsilon_1}}{\cos \theta' + Z^{(j)} \sqrt{\epsilon_2}}. \quad (3)$$

В формулах (3) $Z^{(j)}$ – поверхностный импеданс Е-волны проводящей плёнки, равный в предположении зеркального отражения электронов проводимости от поверхности плёнки [10; 11]:

$$Z^{(j)} = \frac{2ic\omega}{d} \sum_n \frac{1}{k_n^2} \left(\frac{k_x^2}{\omega^2 \epsilon_l(\omega, k_n)} + \frac{(\pi n/d)^2}{\omega^2 \epsilon_{tr}(\omega, k_n) - (ck_n)^2} \right). \quad (4)$$

Здесь ω – частота излучения, c – скорость света в вакууме, величины k_n и k_x равны:

$$k_n = \sqrt{\left(\frac{\pi n}{d} \right)^2 + k_x^2}, \quad k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_1} \sin \theta, \quad (5)$$

а суммирование выполняется по всем нечётным $n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ при $j = 1$ и по всем чётным $n = 0, \pm 2, \pm 4, \dots$ при $j = 2$.

В формуле (4) $\epsilon_l(\omega, k)$ и $\epsilon_{tr}(\omega, k)$ – продольная и поперечная диэлектрические проницаемости однородной изотропной плазмы электронов проводимости. Эти проницаемости известны из работ [12; 13] для квантовой электронной плазмы при учёте квантовых волновых свойств электронов. Данные проницаемости определяются безразмерными величинами $\frac{\omega}{\omega_p}$ и $\frac{vk}{\omega_p}$, где ω_p – плазменная

частота электронной плазмы, и либо $v = v_F$ – скорость Ферми электронов проводимости в случае вещества металла плёнки (вырожденная электронная плазма),

либо $v = v_T = \sqrt{\frac{2k_B T}{m_e}}$ – тепловая скорость электронов проводимости в случае

вещества полуметалла или полупроводника (невыврожденная электронная плазма). Здесь T – абсолютная температура электронов проводимости, k_B – постоянная Больцмана, m_e – эффективная масса электронов проводимости. Эти проникаемости зависят также от частоты ν столкновений электронов в плазме и от массы m_e .

Особенности плазмонных резонансов и результаты исследования

Плазмонные резонансы в тонкой проводящей плёнке возникают вследствие взаимодействия электромагнитных Е-волн с колебаниями плазмы электронов проводимости, находящейся внутри узкого плоского слоя [4; 5; 7–10]. Частоты плазмонных резонансов ω_{res} определяются из условия $\text{Re}\epsilon_l(\omega_{res}, k_n) = 0$ в формуле (4) [10]. При этом $\omega_{res} > \omega_p$ и $\omega_{res} \sim \omega_p$. Из формул (2)–(5) следует, что критическое поведение оптических коэффициентов R и T_r при резонансных частотах ω_{res} возможно только при отличном от нуля угле падения θ .

Как следует из структуры диэлектрической проникаемости $\epsilon_l(\omega, k)$, частоты ω_{res} в основном зависят от толщины d плёнки, а также от величин ω_p и либо от v_F в случае вещества металла, либо от v_T в случае вещества полуметалла или полупроводника плёнки (см. [4]). Они очень слабо зависят или почти не зависят от остальных параметров веществ плёнки и окружающих сред, а также от угла падения, если выполняется условие:

$$d \ll \frac{c}{\omega_p}. \quad (6)$$

Необходимость данного условия вытекает из оценки вклада k_x в k_n согласно (5). С физической точки зрения, величина c/ω_p есть толщина скин-слоя, являющаяся глубиной проникновения электромагнитного излучения в проводник. И естественно понять, что плазмонные резонансы можно наблюдать в слое толщиной d гораздо меньшей, чем толщина скин-слоя.

Нижняя оценка для толщины d проводящей плёнки, понимаемая в рамках классической физики, следует из того, что эта толщина должна быть много больше характерной длины волны де Бройля электронов проводимости, т. е. должно быть выполнено условие

$$d \gg \frac{\hbar}{m_e v}, \quad (7)$$

где $\hbar$ – приведённая постоянная Планка, и либо $v = v_F$ для металлической, либо $v = v_T$ для полуметаллической или полупроводниковой плёнок.

Далее, в [4; 10] показано, что расстояние между соседними резонансными частотами имеет порядок:

$$\Delta\omega_{res} \sim \frac{\pi v}{d}, \quad (8)$$

где либо $v = v_F$ для металлической, либо $v = v_T$ для полуметаллической или полупроводниковой плёнок. Данная оценка качественно следует из структуры проницаемости $\epsilon_1(\omega, k)$ и формул (4) и (5). С одной стороны, формула (8) позволяет достаточно быстро оценить толщину плёнки по известным резонансным частотам ω_{res} и скорости v электронов проводимости. С другой стороны, по известным величинам ω_{res} и d по формуле (8) можно определить параметр v и, следовательно, найти либо скорость Ферми v_F , либо по тепловой скорости v_T определить температуру T электронов проводимости.

Чтобы определить из эксперимента частоты плазмонных резонансов ω_{res} , находят коэффициенты отражения R и прохождения T_r излучения в проводящей плёнке по измеренным интенсивностям J_L , J_R и J_T излучений и формуле (1) для частот ω в области, в которой находятся частоты ω_{res} . Эти резонансные частоты соответствуют критическому поведению коэффициентов R и T_r . Далее, по набору частот ω_{res} и формул (2)–(5) для R и T_r находят толщину d проводящей плёнки, а также её другие характеристики, такие как температура T в случае вещества полуметалла или полупроводника, а также характеристики материала плёнки из величин ω_p , v , v_F и m_e .

Для точного нахождения этих величин должны выполняться условия (6) и (7), а для быстрой оценки величин можно использовать формулу (8). Условия (6) и (7) с учётом обычных значений ω_p , v_F и T для металлов, полуметаллов и полупроводников показывают, что толщины d тонких проводящих плёнок должны лежать в области от 1 нм до 1 мкм. И тогда частоты плазмонных резонансов плёнки ω_{res} находятся в диапазонах от терагерцового до инфракрасного для вещества полуметалла или полупроводника и от видимого до ультрафиолетового для металла.

Рис. 2. Зависимость коэффициента R от ω для плёнки из калия различной толщины d , $\omega_p = 6,61 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$: 1 – $d = 1,286 \text{ нм}$, 2 – $d = 6,43 \text{ нм}$.

Fig. 2. The dependence of the coefficient R on ω for a potassium film of various thicknesses d , $\omega_p = 6,61 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$: 1 – $d = 1,286 \text{ nm}$, 2 – $d = 6,43 \text{ nm}$.

Источник: [8].

На рис. 2 и 3 даны теоретические зависимости коэффициентов R и T_r от частоты излучения ω . На рис. 2 показана зависимость коэффициента отражения R от ω для плёнок из металла калия двух различных толщин d [8]. А на рис. 3 изображены зависимости коэффициента прохождения T_r от ω для плёнки из полуметалла графита одной толщины при трёх различных температурах [9]. При этом всюду угол падения $\theta = 60^\circ$, а диэлектрические проницаемости $\epsilon_1 = 1$ и $\epsilon_2 = 2$. Толщины d этих плёнок удовлетворяют условиям (6) и (7), поскольку для калия $\omega_p = 6.61 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ и $v_F = 8.5 \cdot 10^5 \text{ м/с}$, а для графита в изотропном приближении $\omega_p = 2.54 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, и эффективная масса электронов проводимости примерно равна массе свободного электрона.

Эти зависимости показывают критическое поведение оптических коэффициентов R и T_r при резонансных частотах $\omega_{res} > \omega_p$. При этом выполняются соотношения (8), а также зависимость резонансных частот от температуры T в случае полуметалла или полупроводника. Значения же резонансных частот можно определить с достаточно малой погрешностью, и относительная погрешность определения толщины плёнки d оказывается не хуже 1% (см. [4]).

Рис. 3. Зависимость коэффициента T_r от частоты ω для плёнки из графита толщиной $d = 20 \text{ нм}$ при различных температурах T , $\omega_p = 2,54 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$:

1 – $T = 265 \text{ K}$, 2 – $T = 294 \text{ K}$, 3 – $T = 323 \text{ K}$.

Fig. 3. The dependence of the coefficient T_r on the frequency ω for a graphite film of thickness $d = 20 \text{ nm}$ at various temperatures T , $\omega_p = 2,54 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$:

1 – $T = 265 \text{ K}$, 2 – $T = 294 \text{ K}$, 3 – $T = 323 \text{ K}$.

Источник: [9].

Заключение

В данной работе предложен и описан метод измерения характеристик тонких проводящих плёнок по плазмонным резонансам. В результате теоретического анализа зависимостей оптических коэффициентов отражения и прохождения излучения от частоты для тонкой проводящей плёнки, содержащих диэлектрические проницаемости плазмы электронов проводимости, показана связь частот

плазмонных резонансов и характеристик тонкой проводящей плёнки, таких как её толщина и температура. При этом выполнено исследование особенностей плазмонных резонансов, на основании которого получены условия для толщины плёнки, измеряемой рассматриваемым методом, а также приведена оценка для разности частот плазмонных резонансов.

Предложенный метод измерения характеристик тонких проводящих плёнок целесообразно использовать в микроэлектронике для контроля параметров интегральных схем, в оптике для определения толщин тонких слоёв оптических структур, а также в промышленности для контроля тонкоплёночных покрытий.

Статья поступила в редакцию 10.06.2020 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору Беляеву В. В. (заведующему кафедрой теоретической физики МГОУ) за полезные замечания и активную поддержку. Работа поддержана грантом РФФИ № 19-07-00537_A.

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).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерный рефлектометрический метод измерения толщины и оптических характеристик тонких плёнок в процессе их роста / Белов М. Л., Белов А. М., Городничев В. А., Козинцев В. И., Федотов Ю. В. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2 (83). С. 16–24.
2. Автоматизированный быстродействующий лазерный интерферометр для контроля толщины прозрачных плёнок / Гончар И. В., Иванов А. С., Манухов В. В., Федорцов А. Б. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 5. С. 72–78.
3. Кондрашин В. И. Определение толщины тонких оптически прозрачных плёнок SnO₂ конвертным методом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. № 2 (38). С. 93–101.
4. Латышев А. В., Юшканов А. А. Определение толщины наноплёнки с помощью резонансных частот // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 3. С. 270–274.
5. Гордеева Н. М., Юшканов А. А. Невырожденная электронная плазма в слое во внешнем электрическом поле с зеркальным условием на границе // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 5. С. 687–695.
6. Зотов А. А., Зверев Н. В., Юшканов А. А. Метод определения характеристик тонкой проводящей плёнки по плазмонным резонансам и прибор на его основе // Молодёжные научно-инновационные проекты Московской области: тезисы Четырнадцатой научно-практической конференции (4–5 декабря, 2019, г. о. Черноголовка – Подольск, п. Дубровицы). Дубровицы: ВИЖ им. Л. К. Эрнста, 2019. С. 32–36.

7. Поверхностный плазмонный резонанс как средство контроля в системах управления ростом металлических и диэлектрических плёнок / Валянский С. И., Виноградов С. В., Кононов М. А., Кононов В. М., Савранский В. В., Тишков В. В. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 103–108.
8. Yushkanov 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.
9. Зверев Н. В., Юшканов А. А. Квантовая электронная плазма и взаимодействие Р-волн с тонким слоем графита // Физическая электроника: Материалы X Всероссийской конференции ФЭ-2018 (24–27 октября 2018 г.). Махачкала: ИПЦ ДГУ, 2018. С. 149–153.
10. Jones W. E., Kliewer K. L., Fuchs R. Nonlocal Theory of the Optical Properties of Thin Metallic Films // Physical Review. 1969. Vol. 178. Iss. 3. P. 1201–1203.
11. Kliewer K. L., Fuchs R. Optical Properties of an Electron Gas: Further Studies of a Nonlocal Description // Physical Review. 1969. Vol. 185. Iss. 3. P. 905–913.
12. 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.
13. Латышев А. В., Юшканов А. А. Продольная электрическая проводимость в квантовой плазме с переменной частотой столкновений в рамках подхода Мермина // Теоретическая и математическая физика. 2014. Т. 178. № 1. С. 147–160.

REFERENCES

1. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A., Kozintsev V. I., Fedotov Yu. V. [Laser Reflectometric Method of Measuring the Thickness and Optical Characteristics of Thin Films in the Process of Their Growth]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2011, no. 2 (83), pp. 16–24.
2. Gonchar I. V., Ivanov A. S., Manukhov V. V., Fedortsov A. B. [Computer-added high-performance laser interferometer for transparent films thickness measurement]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2012, vol. 55, no. 5, pp. 72–78.
3. Kondrashin V. I. [Determination of SnO₂ thin optically transparent films' thickness by the envelope method]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences], 2016, no. 2 (38), pp. 93–101.
4. Latyshev A. V., Yushkanov A. A. [Nanofilm thickness measurement by resonant frequencies]. In: *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2015, vol. 45, no. 3, pp. 270–274.
5. Gordeeva N. M., Yushkanov A. A. [Nondegenerate Electron Plasma in a Layer in an External Electric Field with a Mirror Boundary Condition]. In: *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature], 2018, vol. 56, no. 5, pp. 687–695.
6. Zotov A. A., Zverev N. V., Yushkanov A. A. [A method for determining the characteristics of a thin conductive film by plasmon resonances and a device based on it]. In: *Molodezhnye nauchno-innovatsionnye proekty Moskovskoi oblasti: tezisy Chetyrnadtsatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (4–5 dekabrya, 2019, g. o. Chernogolovka – Podolsk, p. Dubrovitsy)* [Youth scientific and innovative projects of the Moscow region: theses of the Fourteenth Scientific and Practical Conference (December 4–5, 2019, Chernogolovka – Podolsk, Dubrovitsy). Dubrovitsy, L. K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry Publ., 2019, pp. 32–36.

7. Valyanskii S. I., Vinogradov S. V., Kononov M. A., Kononov V. M., Savranskii V. V., Tishkov V. V. [Surface plasmon resonance in control systems of metal and dielectric films growth]. In: *Prikladnaya fizika* [Plasma Physics Reports], 2017, no. 6, pp. 103–108.
8. 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.
9. Zverev N. V., Yushkanov A. A. [Quantum electron plasma and the interaction of P-waves with a thin layer of graphite]. In: *Fizicheskaya elektronika: Materialy X Vserossiiskoi konferentsii FE-2018 (24–27 oktyabrya 2018 g.)* [Physical Electronics: Materials of the X All-Russian Conference FE-2018 (October 24–27, 2018).]. Makhachkala, Dagestan State University Publ., 2018, pp. 149–153.
10. Jones W. E., Kliever K. L., Fuchs R. Nonlocal Theory of the Optical Properties of Thin Metallic Films. In: *Physical Review*, 1969, vol. 178, iss. 3, pp. 1201–1203.
11. Kliever K. L., Fuchs R. Optical Properties of an Electron Gas: Further Studies of a Nonlocal Description. In: *Physical Review*, 1969, vol. 185, iss. 3, pp. 905–913.
12. 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.
13. Latyshev A. V., Yushkanov A. A. [Longitudinal electric conductivity in a quantum plasma with a variable collision frequency in the framework of the Mermin approach]. In: *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika* [Theoretical and Mathematical Physics], 2014, vol. 178, no. 1, pp. 147–160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Зотов Александр Александрович – студент физико-математического факультета Московского государственного областного университета; e-mail: aleksandr.zotov.99@mail.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 – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor at the Department of Mathematical Analysis and Geometry, Moscow Region State University; e-mail: zverev_nv@mail.ru;

Aleksandr A. Zotov – student of the Physical-Mathematical Department, Moscow Region State University; e-mail: aleksandr.zotov.99@mail.ru;

Aleksandr A. Yushkanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Theoretical Physics, Moscow State Regional University; e-mail: yushkanov@inbox.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Зверев Н. В., Зотов А. А., Юшканов А. А. Характеристики тонкой проводящей плёнки по плазмонным резонансам // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. №2. С. 8–18.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-8-18

FOR CITATION

Zverev N. V., Zotov A. A., Yushkanov A. A. Characteristics of a thin conductive film by the plasmon resonances. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 2, pp. 8–18.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-8-18