

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.1>

УДК: 533.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ НЕОДНОРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО НА ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛОСКОСТИ

О.В. Осипов, Д.Н. Панин

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Самара, ул. Льва Толстого, 23

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2022 г.

Аннотация. Предложена методика численного моделирования отражения электромагнитного излучения от планарного слоя плазмы с неоднородной электронной концентрацией частиц, расположенного на идеально проводящей плоскости. Рассчитаны частотные характеристики модулей коэффициентов отражения волны при различных углах падения и профилях электронной концентрации носителей с использованием метода дифференциальной прогонки. Показано, что в области плазменного резонанса наименьшим отражением обладает плазменный слой с параболическим профилем концентрации носителей заряда. Исследовано влияние эффективной частоты столкновений электронов в неоднородном слое плазме на уровень отражения электромагнитных волн.

Ключевые слова: плазма, электромагнитная волна, отражение, идеально проводящая плоскость, неоднородность, коэффициент отражения, уравнение Риккати.

Автор для переписки: Панин Дмитрий Николаевич, pdntec@mail.ru

Введение

Плазма, как четвертое состояние материи и ионизированный газ, в последнее время находит интересное применение в электромагнитной технике [1-5]. Столкновительная плазма обладает большим коэффициентом поглощения, чем традиционные радиопоглощающие материалы. Плазма, как перестраиваемая среда, вызывает значительный интерес с целью обеспечения широкополосного поглощения. Кроме того, столкновительная плазма может быть использована для экранирования от электромагнитного излучения, благодаря значительному уровню отражения на высоких частотах. Также, в последнее время активно развивается технология «плазменной невидимости» [3-5]. «Невидимая» плазма может быть использована для сокрытия радиолокационных систем [6]. Влияние тепловых потоков в газоразрядной плазме на ее электрические свойства исследовано в [7].

В указанной связи является актуальным исследование влияния слоистой структуры «плазма-металл» на рассеяние электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона. В работе проведено электродинамическое моделирование отражающих свойств планарного неоднородного слоя плазмы, в котором концентрация носителей заряда является функцией поперечной координаты.

1. Взаимодействие электромагнитной волны с неоднородным слоем плазмы, расположенным на идеально проводящей плоскости

В работе рассмотрена задача о наклонном падении плоской электромагнитной волны на планарный слой плазмы толщины L (область 2), разделяющий в общем случае области 1 и 3.

Геометрия задачи показана на рис. 1. На планарный слой плазмы из области 1 (вакуум) с материальными параметрами $\varepsilon_1 = 1, \mu_1 = 1$ под углом θ падает плоская электромагнитная волна линейной поляризации (E или H-типа). Плазменный слой (область 2) описывается частотно-зависимой комплексной

относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{c2}(\omega, x)$ и относительной магнитной проницаемостью $\mu_2 = 1$. Область 3 описывается материальными параметрами ε_3, μ_3 . На рис. 1 через R обозначен комплексный коэффициент отражения, а через T – комплексный коэффициент прохождения.

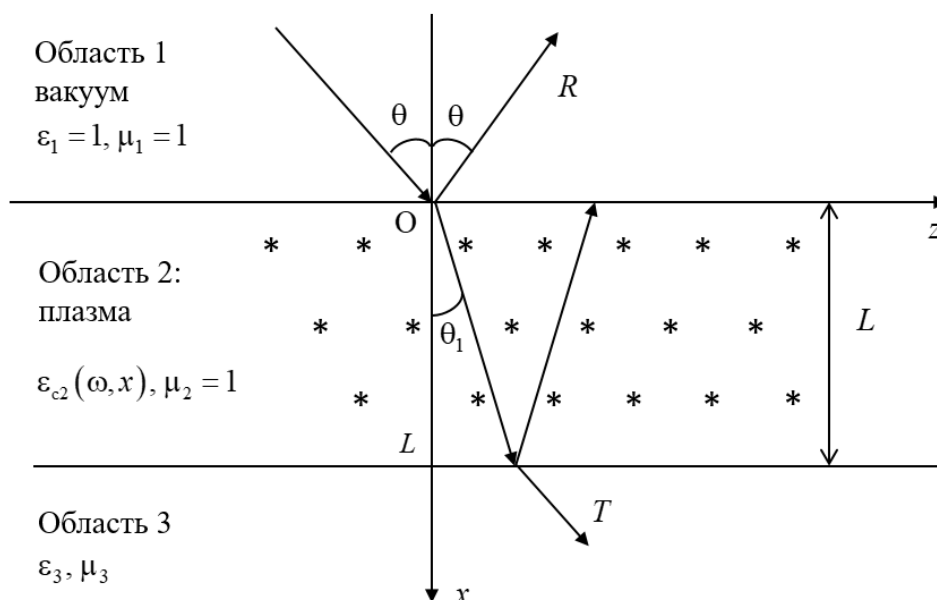


Рис. 1. Геометрия задачи

Уравнения Максвелла для комплексных амплитуд векторов \vec{E} и \vec{H} в неоднородном слое плазмы имеют следующий вид:

$$\frac{dE_y}{dx} = -i\omega\mu_0 H_z; \quad \frac{dH_z}{dx} = -i\omega\varepsilon_0 [\varepsilon_{c2}(\omega, x) - \sin^2 \theta] E_y, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{c2}(\omega, x) = 1 - i\omega_p^2(x) / [\omega(v_{\text{eff}} + i\omega)]$ – комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы; ω – угловая частота; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; ε_0 и μ_0 – абсолютные электрическая и магнитная проницаемости вакуума; θ – угол падения электромагнитной волны на слой плазмы; $\omega_p(x)$ – плазменная частота электронного газа; v_{eff} – эффективная частота соударений электронов с ионами и нейтральными молекулами.

Для удобства в уравнениях (1) введем следующие нормированные параметры:

$$U(\xi) = \frac{E_y(\xi)}{E_0}; \quad V(\xi) = \frac{Z_0 H_z(\xi)}{E_0}, \quad (2)$$

где $U(\xi)$, $V(\xi)$ – нормированные напряженности электрического и магнитного полей, соответственно; $\xi = x/L$ – нормированная координата; L – толщина слоя плазмы; E_0 – амплитуда напряженности электрического поля падающей волны; $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ – характеристическое сопротивление вакуума.

С использованием нормировочных соотношений (2) из соотношений (1) получается система дифференциальных уравнений относительно функций $U(\xi)$ и $V(\xi)$:

$$\frac{dU(\xi)}{d\xi} = -iKV(\xi); \quad \frac{dV(\xi)}{d\xi} = -iK[\epsilon_c(K, \xi) - \sin^2 \theta]U(\xi), \quad (3)$$

где $K = k_0 L$ – волновое число, нормированное на толщину слоя плазмы; $k_0 = \omega/c$ – волновое число для плоской однородной электромагнитной волны в вакууме; c – скорость света. С входящими в выражение для ϵ_c плазменной частотой ω_p и эффективной частотой столкновений ν_{eff} также можно связать нормированные параметры (частоты): $K_p = \omega_p L/c$ и $K_\nu = \nu_{\text{eff}} L/c$.

Рассмотрим в качестве примера «холодную» равновесную плазму с учетом столкновений, в которой не учитывается пространственная дисперсия. В данной модели используется следующая формула для комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_c [8]:

$$\epsilon_c(K, \xi) = 1 - \frac{iK_p^2(\xi)}{K(K_\nu + jK)}. \quad (4)$$

С учетом соотношения (4) уравнения Максвелла (1) можно записать в следующем нормированном виде:

$$\frac{dU(\xi)}{d\xi} = A_1(\xi)V(\xi); \quad \frac{dV(\xi)}{d\xi} = A_2(\xi)U(\xi), \quad (5)$$

где $A_1(\xi) = -iK$; $A_2(\xi) = -iK[\epsilon_c(K, \xi) - \sin^2 \theta]$.

Запишем граничные условия, вытекающие из условий непрерывности тангенциальных составляющих векторов поля на границах раздела при $\xi = 0$ и $\xi = 1$:

$$U(0) = 1 + R; \quad V(0) = (1 - R)\cos\theta; \quad U(1) = T; \quad V(1) = \frac{Z_0}{Z_3}T\cos\theta, \quad (6)$$

где R, T – комплексные коэффициенты отражения и прохождения (по полю); $Z_3 = \sqrt{\mu_3/\varepsilon_3}$ – характеристическое сопротивление области 3.

С использованием метода дифференциальной прогонки для граничной задачи (5)-(6) было получено уравнение для комплексного коэффициента отражения R следующего вида [9]:

$$\frac{dR(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{2\cos\theta} \left\{ A_1(\xi)\cos^2\theta[1 - R(\xi)]^2 - A_2(\xi)[1 + R(\xi)]^2 \right\}. \quad (7)$$

Подобное дифференциальное уравнение Риккати было получено в [10] для коэффициентов отражения звуковой и электромагнитной волн от слоя с произвольным законом изменения параметров.

При численном моделировании интерес представлял случай, когда область 3 является идеально проводящей. Путем интегрирования уравнения (7) по координате ξ с учетом условия $R(1) = -1$, можно получить значение коэффициента отражения в любом сечении неоднородного слоя плазмы.

2. Результаты численного моделирования

В данном разделе рассмотрим результаты численного расчета частотных зависимостей модуля коэффициента отражения от неоднородного слоя плазмы с различными профилями изменения электронной концентрации частиц для случая падения электромагнитной волны Е-поляризации, расположенного на идеально проводящей плоскости. В работе были проанализированы следующие распределения нормированной плазменной частоты: $K_p(\xi) = K_{pm} = 5$ – однородный слой; $K_p(\xi) = 4K_{pm}(1 - |1 - 2\xi|)$ – слой с линейным профилем;

$K_p(\xi) = 4K_{pm}(1-\xi)\xi$ – слой с параболическим профилем. Нормированная эффективная частота столкновений электронов в плазме при расчетах: $K_{\text{eff}} = 0.5$.

2.1. Исследование зависимости модуля коэффициента отражения $|R|$ от частоты K

На рис. 2 приведены зависимости модуля коэффициента отражения $|R|$ от нормированной частоты K для случая плазменного слоя с линейным профилем концентрации носителей заряда для случаев, когда угол падения $\theta = 0$ (сплошная линия), $\theta = \pi/6$ (штриховая линия) и $\theta = \pi/4$ (штрих-пунктирная линия). Как видно из графиков, приведенных на рис. 2 имеется диапазон нормированных частот K , в котором модуль коэффициента отражения принимает минимальные значения. Причем эффект снижения уровня отражения наиболее сильно проявляется при нормальном падении волны Е-поляризации на неоднородный плазменный слой. Также из представленных графиков видно, что с увеличением угла падения волны соответствующие характеристики модуля коэффициента отражения смещаются в частотной области, а уровень отражения от структуры – увеличивается. За счет смещения частотных характеристик резонансную частоту поглощения можно варьировать путём изменения угла падения электромагнитной волны.

На рис. 3 приведены зависимости модуля коэффициента отражения $|R|$ от нормированной частоты K для случая плазменного слоя с параболическим профилем концентрации носителей заряда для случаев, когда угол падения $\theta = 0$ (сплошная линия), $\theta = \pi/6$ (штриховая линия) и $\theta = \pi/4$ (штрих-пунктирная линия).

В случае параболического профиля изменения концентрации носителей заряда в плазме, в целом наблюдаются явления, как и в случае линейного профиля. Однако, как видно из графиков зависимостей, приведенных на рис. 3, в области частот, где наблюдаются минимальные уровни отражения волны

Е-поляризации удастся достичь более меньшего значения модуля коэффициента отражения, чем в случае линейного профиля.

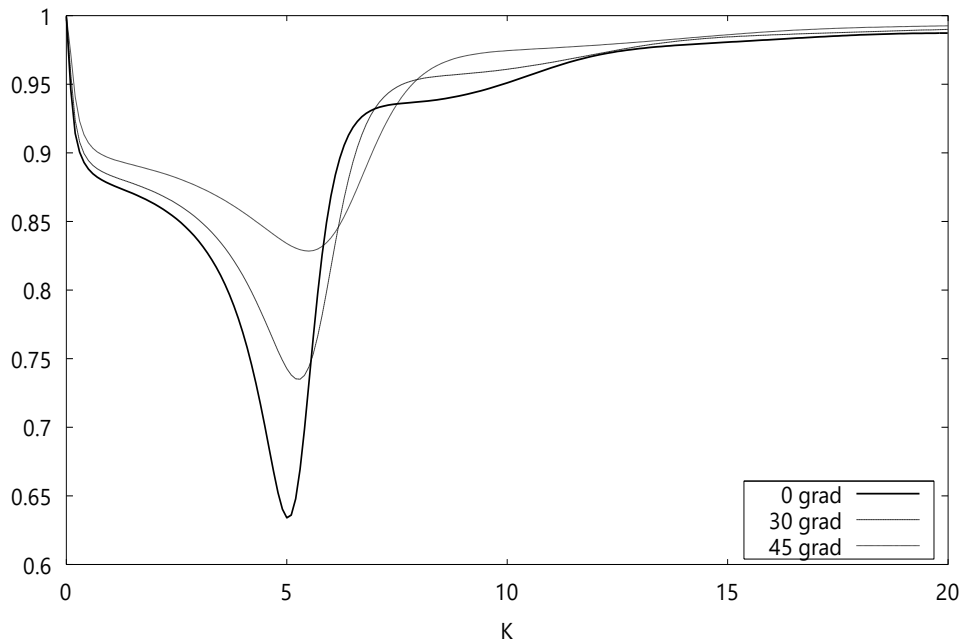


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента отражения от нормированной частоты K для случая линейного профиля

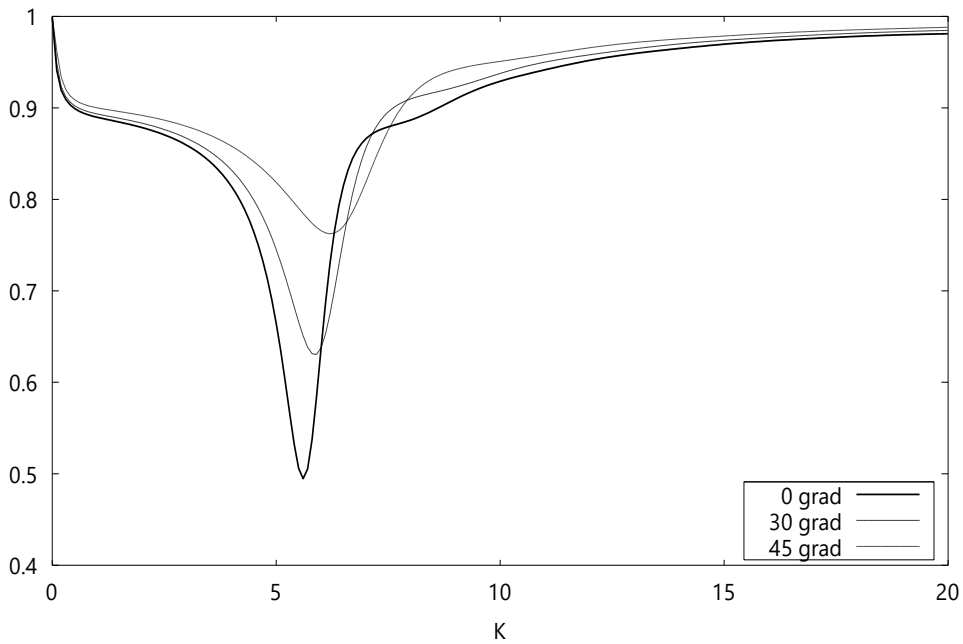


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента отражения от нормированной частоты K для случая параболического профиля

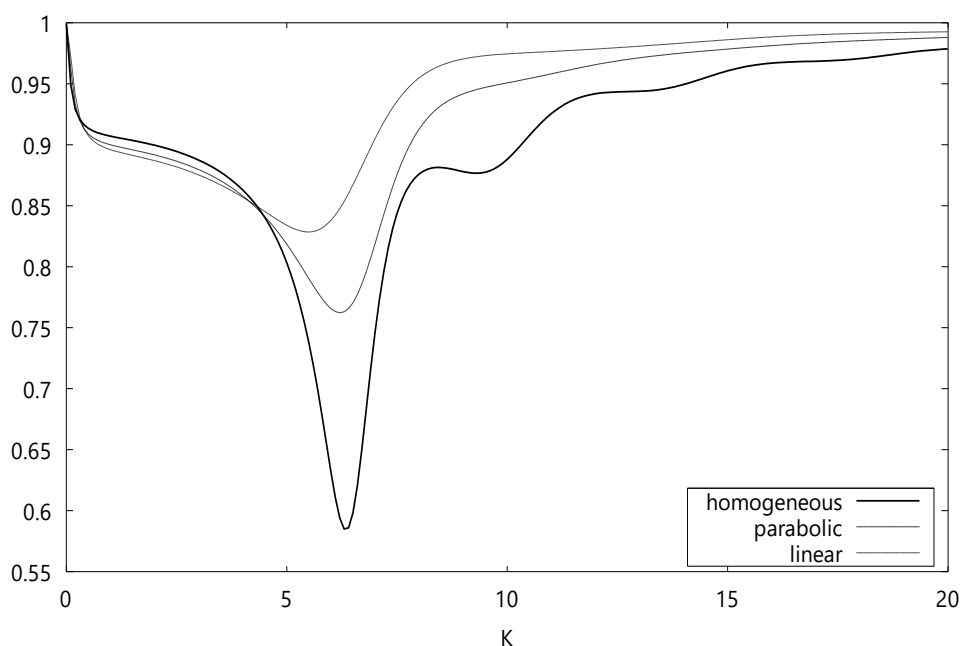


Рис. 4. Зависимости модуля коэффициента отражения от нормированной частоты K для случаев однородного слоя (сплошная линия), слоя с линейным профилем (штрихпунктирная линия) и слоем с параболическим профилем (штриховая линия)

На рис. 4 приведены зависимости модуля коэффициента отражения $|R|$ от нормированной частоты K при падении волны Е-поляризации под углом $\theta = \pi/4$ для случаев однородного слоя (сплошная линия), линейного профиля (штрихпунктирная линия) и параболического профиля (штриховая линия). Как видно из сравнения представленных зависимостей в частотных областях снижения уровня отражения эффект наибольшего уменьшения модуля коэффициента отражения наблюдается в однородном плазменном слое, однако такая ситуация не может быть реализована на практике. С точки зрения применения плазменных слоев с профилями концентрации носителей заряда, более предпочтительным для уменьшения уровня отражения является использование слоя с параболическим профилем $K_p(\xi) = 4K_{pm}(1 - \xi)\xi$.

Заметим, что полученный эффект не является новым для физики плазмы и ранее был получен для однородного слоя плазмы [8]. Сильное поглощение электромагнитной волны в плазменном связано со столкновениями электронов с молекулами и ионами, а также со значительным ростом преобразования

электромагнитной энергии в тепловую энергию движения тяжелых частиц в области плазменного резонанса.

Заметим, что предложенная методика позволяет также проводить расчеты зависимостей модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от всех возможных параметров отражающей структуры, в т.ч. от нормированной частоты столкновений и плазменной частоты. K_{eff}

2.2. Исследование зависимости модуля коэффициента отражения $|R|$ от нормированной частоты столкновений K_{eff}

На рис. 5, 6, 7 представлены результаты расчетов зависимостей модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны Е-поляризации от нормированной частоты столкновений K_{eff} . Расчеты проводились для нормированных частот $K = 3; 5; 7$. Рис. 5 соответствует случаю однородного плазменного слоя; рис. 6 – случаю плазменного слоя с линейной зависимостью электронной концентрации частиц от координаты; рис. 7 – случаю слоя с параболической зависимостью.

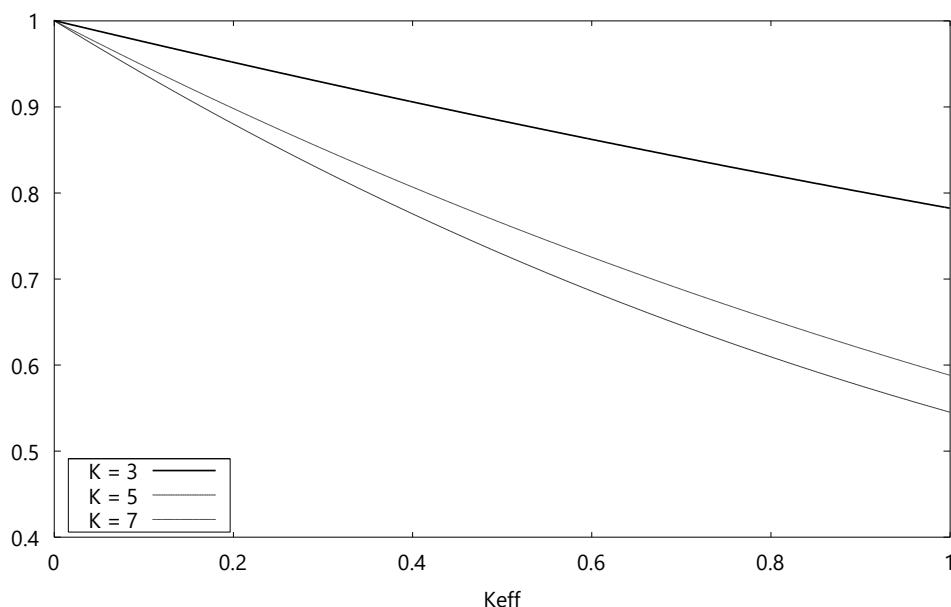


Рис. 5. Зависимость модуля коэффициента отражения от нормированной частоты столкновений K_{eff} для случая однородного плазменного слоя

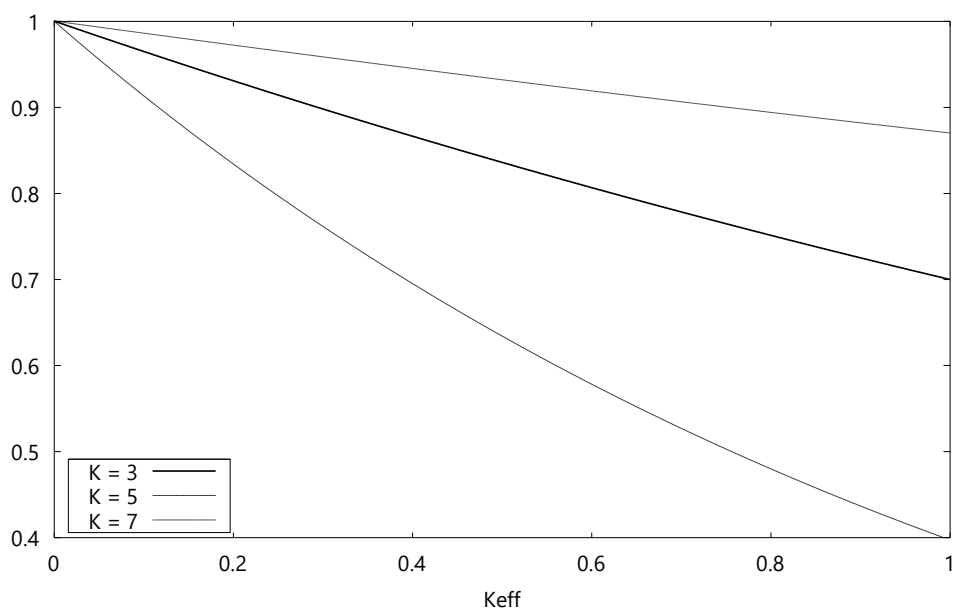


Рис. 6. Зависимость модуля коэффициента отражения от нормированной частоты столкновений K_{eff} для случая линейного профиля

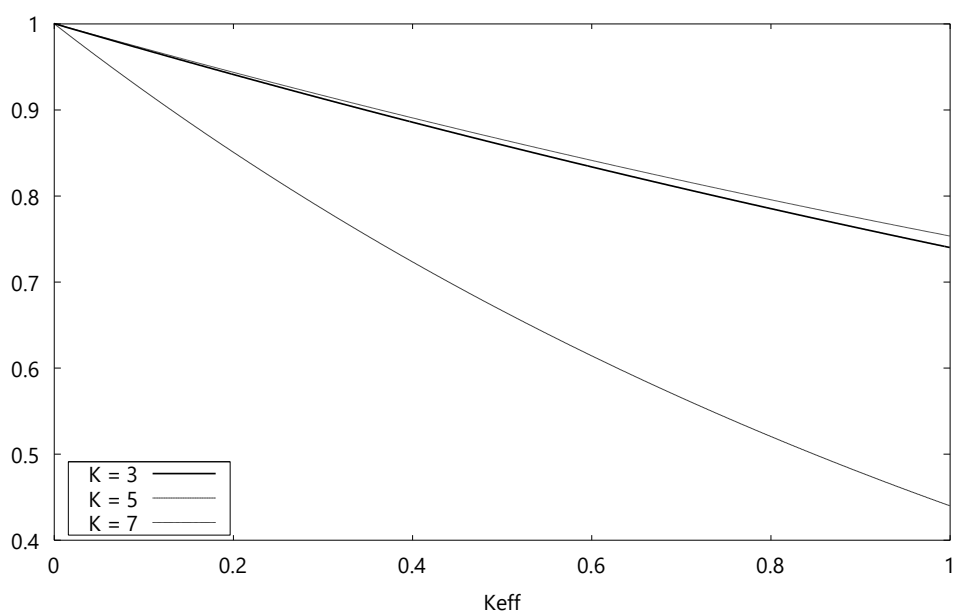


Рис. 7. Зависимость модуля коэффициента отражения от нормированной частоты столкновений K_{eff} для случая параболического профиля

Как видно из рис. 5, 6, 7, рост эффективной частоты столкновений приводит к уменьшению модуля коэффициента отражения при всех используемых для расчета значений нормированной частоты K . Наибольшее уменьшение уровня отражения волны Е-поляризации наблюдается при $K = 5$, которая попадает в область минимума модуля коэффициента отражения (рис. 4).

На рис. 8 приведены зависимости модуля коэффициента отражения от нормированной частоты столкновений K_{eff} для случая однородного слоя (сплошная линия), слоя с линейным профилем (штриховая линия) и слоя с параболическим профилем (штрихпунктирная линия) при $K = 5$. Из рис. 8 видно, что наименьшее значение модуля коэффициента отражения от плазменного слоя наблюдается при линейном профиле концентрации носителей.

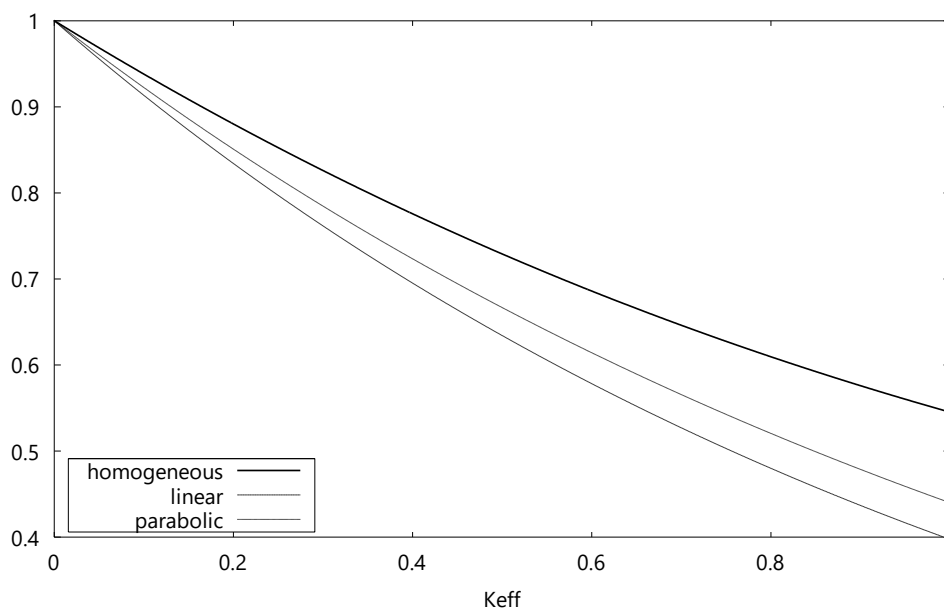


Рис. 8. Зависимости модуля коэффициента отражения от нормированной частоты столкновений K_{eff} для случая однородного слоя (сплошная линия), линейного профиля (штриховая линия) и параболического профиля (штрихпунктирная линия)

Таким образом, можно сделать вывод о том, что с точки зрения использования при создании маскировочных плазменных покрытий можно использовать как плазменные слои с линейным, так и с параболическим профилями концентрации носителей заряда.

Заключение

В представленной работе проведено численное моделирование взаимодействия плоской электромагнитной волны линейной поляризации с неоднородным слоем плазмы, расположенном на идеально проводящей плоскости. Теоретически доказана возможность использования слоев плазмы с неоднородными профилями концентрации носителей заряда для создания

управляемых широкополосных поглощающих структур. Результаты работы могут быть полезны при разработке малоотражающих покрытий в авиационно-космической отрасли и защищенных систем связи.

Литература

1. Ghayekhloo A., Abdolali A., Armaki S.H.M. Observation of radar cross-section reduction using low-pressure plasma-arrayed coating structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. V.65. №6. P.3058. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2690311>
2. Wu R., Liu J., Meng G., et al. Electromagnetic scattering characteristics of the plasma sheath around Re-entry hypersonic vehicles. *Proceedings of 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. 2017. P.1. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2017.8420820>
3. Zhang Q., Tian Z., Tang W., et al. Study of attenuation characteristics of electromagnetic waves in multilayer plasma slabs. *Journal of Applied Physics*. 2019. V.125. №9. P.094902. <https://doi.org/10.1063/1.5037417>
4. Kılıç Ö., Gürel Ç.S. Response of magnetized plasma having linearly varying electron density profile to oblique electromagnetic wave incidence. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2018. V.32. №18. P.2046. <https://doi.org/10.1080/09205071.2018.1489311>
5. Xuyang C., Fangfang S., Yanming L., et al. Study of plasma-based stable and ultra-wideband electromagnetic wave absorption for stealth application. *Plasma Science and Technology*. 2018. V.20. №6. P.065503. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaaa18>
6. Liu H.Y., Chao Y., Liu S. Researches on the scattering characteristics in THz band of conductor cylinder coated with parabolic distribution and time-varying plasma media. *Optik*. 2020. V.207. P.163891. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163891>

7. Банковский А.С., Захаров А.А., Потапов А.А., Швачко А.А. Влияние тепловых потоков в газоразрядной плазме на ее электрические свойства. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.2>
8. Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. Москва, Наука. 1967. 683 с.
9. Matveev I., Mishin D., Osipov O., Panin D. Investigation of the plane optical waves reflection from an inhomogeneous nonreciprocal chiral media. *Proceedings of ITNT 2020 – 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*. 2020. V.6. P.9253198. <https://doi.org/10.1109/itnt49337.2020.9253198>
10. Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. Москва, Наука. 1973. 343 с.

Для цитирования:

Осипов О.В., Панин Д.Н. Исследование отражения плоской электромагнитной волны от неоднородного плазменного слоя, расположенного на идеально проводящей плоскости. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.1>