

УДК 621.372.8:535

ПЛАЗМОННЫЕ МОДЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК
ПРИ АНОМАЛЬНОМ СКИН-ЭФФЕКТЕЕ. А. ЧУДАКОВ¹, А. Б. СОТСКИЙ¹, С. О. ПАРАШКОВ²¹Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова²Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

При контроле параметров сред и иммуноанализе широко применяются оптические сенсоры, использующие в качестве рабочих плазмонные моды, направляемые поверхностями металлических пленок. Для решения соответствующих обратных оптических задач необходимо иметь корректное математическое описание данных мод. В настоящее время обычно используется модель, в которой металл рассматривается как сплошная среда с комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_m . Однако такой подход, известный как приближение нормального скин-эффекта, нельзя считать бездефектным. Он основан на классической теории Друде, в которой принимается допущение о пространственно-локальной связи между плотностью тока свободных электронов j и напряженностью электрического поля E . Но такое допущение может быть корректным при условии, что средняя длина свободного пробега электрона много больше толщины скин-слоя. Это условие может нарушаться в видимом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Кроме того, практически используемые металлические пленки часто имеют толщины меньшие, чем длина свободного пробега электрона. В этом случае допущение о локальной связи между векторами j и E в пределах пленки также выглядит проблематичным. Более корректное описание взаимодействия света с металлом возможно в рамках теории аномального скин-эффекта, основанной на совместном рассмотрении уравнений Максвелла и кинетического уравнения Больцмана и сводящей дело к решению интегро-дифференциальных уравнений относительно напряженности электрического поля в области металла. Но в замкнутом виде такое решение опубликовано только для случая нормального падения плоской волны на поверхность полуограниченного металла. При расчете плазмонных мод, распространяющихся вдоль металлических пленок, теория аномального скин-эффекта существенно усложняется и до настоящего времени практически не разработана. Такой расчет выполнен в данном сообщении. Результат достигнут за счет сведения интегро-дифференциальных уравнений теории аномального скин-эффекта к интегральным уравнениям Фредгольма второго рода. Уравнения сформулированы для случая диффузного рассеяния свободных электронов на границах металла. Их численное решение получено методом квадратур.

В табл. 1 и на рис. 1 представлены результаты расчета характеристик плазмонных мод, направляемых алюминиевыми пленками различной толщины d . Длина световой волны $\lambda = 800$ нм. Пленки контактируют с воздухом и находятся на кремниевой подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_s = (3,695 - i0,0066)^2$. Константы пленок: диэлектрическая проницаемость $\epsilon_m = (2,767 - i8,354)^2$, концентрация свободных электронов $n = 1,807 \cdot 10^{29}$ 1/м³, время свободного пробега электрона $\tau = 7,2$ фс.

Табл. 1. Постоянные распространения плазмонных мод

d , нм	β	β_n
10	$1,00119 - i8,167E-3$	$1,00151 - i8,458E-3$
60	$1,00534 - i4,034E-3$	$1,00550 - i3,912E-3$

Примечание – β – теория аномального скин-эффекта; β_n – приближение нормального скин-эффекта

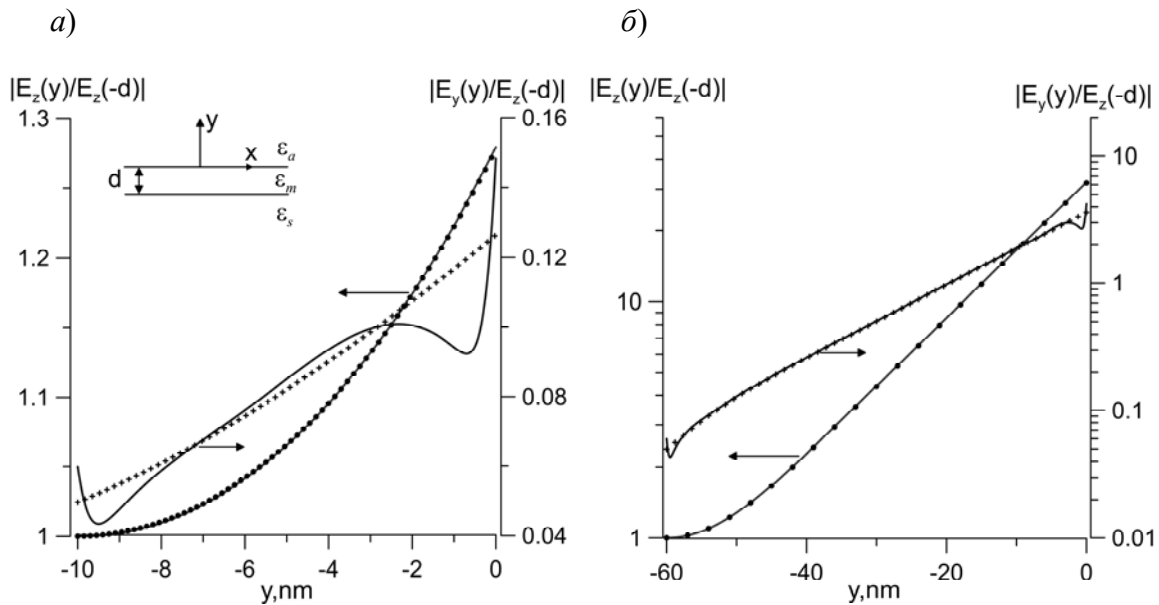


Рис. 1. Электрические поля плазмонных мод в алюминиевых пленках толщиной 10 нм (а) и 60 нм (б). Сплошные кривые – теория аномального скин-эффекта, дискретные значки (\bullet – E_z компонента, $+$ – E_y компонента) – приближение нормального скин-эффекта

Согласно представленным данным, аномальный скин-эффект сказывается главным образом на компоненте электрического поля, нормальной границам пленки, приводя к ее усилению в окрестности данных границ.

Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника, опто- и микроэлектроника».