

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

Плазмоны в тонких металлических пленках

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
БАКАЛАВРА

студента (ки) 4 курса 422 группы

направления (специальности) 03.03.03 Радиофизика
код и наименование направления (специальности)

физического факультета
наименование факультета, института, колледжа

Захарова Александра Сергеевича
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

д.ф.-м. н., проф. Давидович М.В.

должность, ученая степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Консультант

должность, ученая степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав.кафедрой

д.ф.-м. н., проф. Глухова О.Е.

должность, ученая степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2017

Введение

Плазмоны играют огромную роль в оптических свойствах металлических сред, локализованные поверхностные плазмоны присутствуют в металлах и используются как средство передачи информации в чипах, т.к. они могут поддерживать частоты в 100 ТГц и провода для них могут быть намного тоньше, чем обычные и большие потери энергии происходят при частоте 10 ТГц. Свет с частотой ниже плазменной отражается потому, что электроны в металле экранируют электрическое поле электромагнитной волны. Свет с частотой выше плазменной проходит, потому что электроны не могут достаточно быстро среагировать, чтобы экранировать его. В основном в металлах плазменная частота находится в ультрафиолетовой области спектра, делая их блестящими в видимом диапазоне. А так же в легированных полупроводниках плазменная частота находится в ультрафиолетовой области. С типичной точки зрения плазменная частота определяется осцилляциями валентных электронов в металле по отношению к положительно заряженным атомам. Поверхностные плазмон-поляритон впервые обнаружил Дэвид Брюстер в 1815 году и это послужило открытию закона оптики названный его именем, выражающий связь показателей преломления двух сред с таким углом падения, при котором отраженная волна будет полностью поляризована в плоскости, перпендикулярной плоскости падения [1].

Цель дипломной работы состоит в исследовании плазмонов в металлических пленках. Для их исследований был использован численный метод, т.к. были применены комплексные решения, которых в литературе не рассмотрены.

Исходя из этого, решим следующие задачи в виде программной реализации на языке C++ в среде QtCreator:

- 1) Получить решение диэлектрической проницаемости.
- 2) Получить решение волнового сопротивления металлической пленки.

- 3) Получить решение волнового сопротивления металлической пленки на диэлектрической подложке.
- 4) Получить решение и построить зависимость дисперсии, деленное на $k_p = \omega_p/c$ от безразмерной величины k_0/k_p .
- 5) Определить прямые и обратные волны.

1. Плазмоны в металлах

«Плазмоны – это квазичастицы (кванты), возникающие в результате колебаний электронов проводимости относительно ионов» [7]. Действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости металла имеет вид модели Друде-Зоммерфельда:

$$\varepsilon' = 1 - \frac{\omega_p^2}{1 + \omega^2} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega_p^2}{(1 + \omega^2)\omega} \quad (1.8)$$

где ω_p – плазменная частота, $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$.

В металлах, при частотах ниже плазменной частоты действительная часть отрицательна, а при частотах выше плазменной мнимая часть становится малой величиной и тогда можно записать следующее выражение:

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1.9)$$

В легирующих полупроводниках и металлах существует несколько видов плазмонов:

- 1) Объемные – это электромагнитная волна, которая существует при частотах выше плазменной, когда металл имеет минимальный коэффициент поглощения, а так же положительную диэлектрическую проницаемость.
- 2) Поверхностные – это электромагнитные волны, которые приводятся в движение сменой полярности поверхностных зарядов, распространяющихся в слое металл – диэлектрик.
- 3) Двумерные – это электромагнитные волны, которые можно возбуждать поперечной электромагнитной волной ИК-диапазона. Это аналогично поверхностным плазмонам и у них есть поперечная составляющая электрического поля.

1.1 Плазмоны на границе металл – диэлектрик

В основном в оптике волны рассматриваются на границе активной среды с воздухом или другими прозрачными диэлектриками. Для металлов с большой

концентрацией свободных носителей зарядов, в которых простирается область от аномальной дисперсии диэлектрической постоянной до инфракрасного спектра металлов, выполняется условие:

$$\varepsilon_2 < 0, |\varepsilon_2| > \varepsilon_1 \quad (1.24)$$

Поверхностные электромагнитные волны (поверхностные плазмоны или фотон-поляритоны) возбуждаются на поверхностях проводников и диэлектриков в средней части инфракрасного диапазона[6].

Плазменной частотой ω_p и частотой столкновений ω_c можно определить свойства плазмонов на границе раздела двух сред, металл-диэлектрик, в электронной плазме металла. В общем случае металл играет роль открытого волновода, в котором происходит распространение волны по его поверхности на расстоянии L_i , определяемые диссипативными потерями. Для видимой области спектра используя активные благородные металлы, такие как золото (Au) и серебро (Ag), поверхностные плазмоны будут являться сильно локализованными, что необходимо для создания разнообразных устройств, например, оптический поверхностно-плазмонный микроскоп. «Микроскоп – сенсор на основе поверхностно плазмонного резонанса – можно использовать для снятия кинетики протекания химических и биохимических реакций, контролировать размер образующихся на поверхности комплексов»[7].

Данный микроскоп позволяет наблюдать объекты ангстремной (\AA) толщины при помощи видимого света. Поверхностно-плазмонный микроскоп работает при условии резонансного возбуждения поверхностных плазмонов, и они зависят от свойств металлической пленки и от диэлектрических свойств среды, с которой будет граничить пленка. Представим локальное изменение диэлектрических свойств среды от любой тонкой пленки на поверхности металла и это будет отражаться на условии резонансного возбуждения на месте поверхностных плазмонов.

1.2 Формирование и транспортировка

В терагерцовых диапазонах частот удобно использовать параметры поверхностных электромагнитных волн для разнообразных практических применений, относящиеся к использованию данной волны для транспортировки энергии. Например, к биомедицинской диагностике и к мощным терагерцовым лазерам, которые служат для обработки поверхности методом непосредственного излучения металлов или формированием плазмы на поверхности диэлектриков. Во всех этих применениях нужно сформировать поверхностную электромагнитную волну вблизи поверхности.

Необходимо отметить, что исследования поверхностной электромагнитной волны в терагерцовой области находится пока что на стадии фундаментальных исследованиях, однако уже приближаются к развитию реальных технологий. Текущими заданиями являются исследования транспортировки терагерцового излучения и влияние диэлектрического покрытия на волну, эти задания создадут спектрометр поверхностной электромагнитной волны.

2. Дисперсионные характеристики металлической пленки

Дисперсию плазмонов вдоль безграничного пространства на бесконечно тонкой металлической пластине можно получить следующей формулой (рис. 2.1):

$$k_x = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}} \quad (2.1)$$

Данная формула справедлива как для быстрых, так и для медленных поверхностных плазмонов. Впервые оно было получено методом сшивания Д. Ценнеком [21]. Диэлектрическую проницаемость (ε) будем вычислять следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_L - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\omega_c\omega} \quad (2.2)$$

Где ω_p – плазменная частота, ω_c – частота связи, ε_L – Лоренцев член.

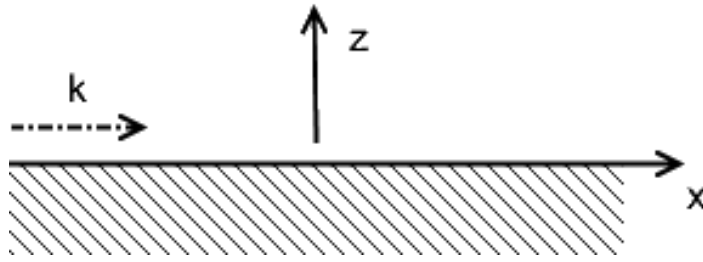


Рис.2.1 Модель движения плазмонов (k) на поверхности металла

Для решения дисперсионного уравнения нужно найти волновые сопротивления, которое имеют вид (рис.2.2):

$$\rho_{\text{вх}} = j * \rho * \text{tg}(\theta) \quad (2.5)$$

$$\tilde{\rho}_{\text{вх}} = \frac{\rho_d * \rho_{\text{вх}} + j * \rho_d * \text{tg}(\theta')}{\rho_d + j * \rho_{\text{вх}} * \text{tg}(\theta')} \quad (2.6)$$

Выражения ρ , ρ_d и θ' можно получить следующим образом:

$$\rho = \frac{k_z}{\epsilon k_0} = \frac{\sqrt{k_0^2 \epsilon - k_x^2}}{\epsilon k_0} \quad (2.7)$$

$$\rho_d = \frac{\tilde{k}_z}{\epsilon_d k_0} = \frac{\sqrt{k_0^2 \epsilon_d - k_x^2}}{\epsilon_d k_0} \quad (2.8)$$

$$\theta' = t \sqrt{k_x^2 - k_0^2 \epsilon_d} \quad (2.9)$$

Где t – толщина диэлектрического слоя, ϵ_d – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

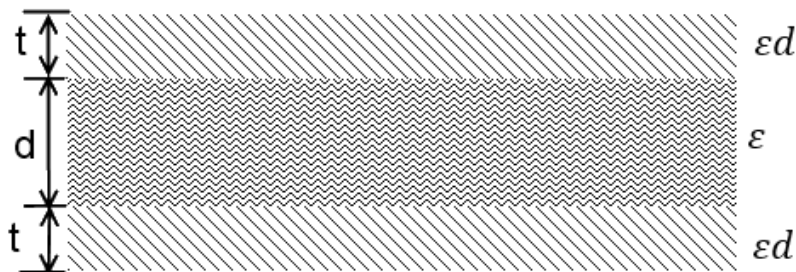


Рис. 2.2 Модель для расчета дисперсионного уравнения на поверхности металла с диэлектрической подложкой. d – толщина слоя металла, t – толщина слоя диэлектрика, ϵ , ϵ_d – диэлектрическая проницаемость металла и диэлектрика.

3. Результаты вычисления

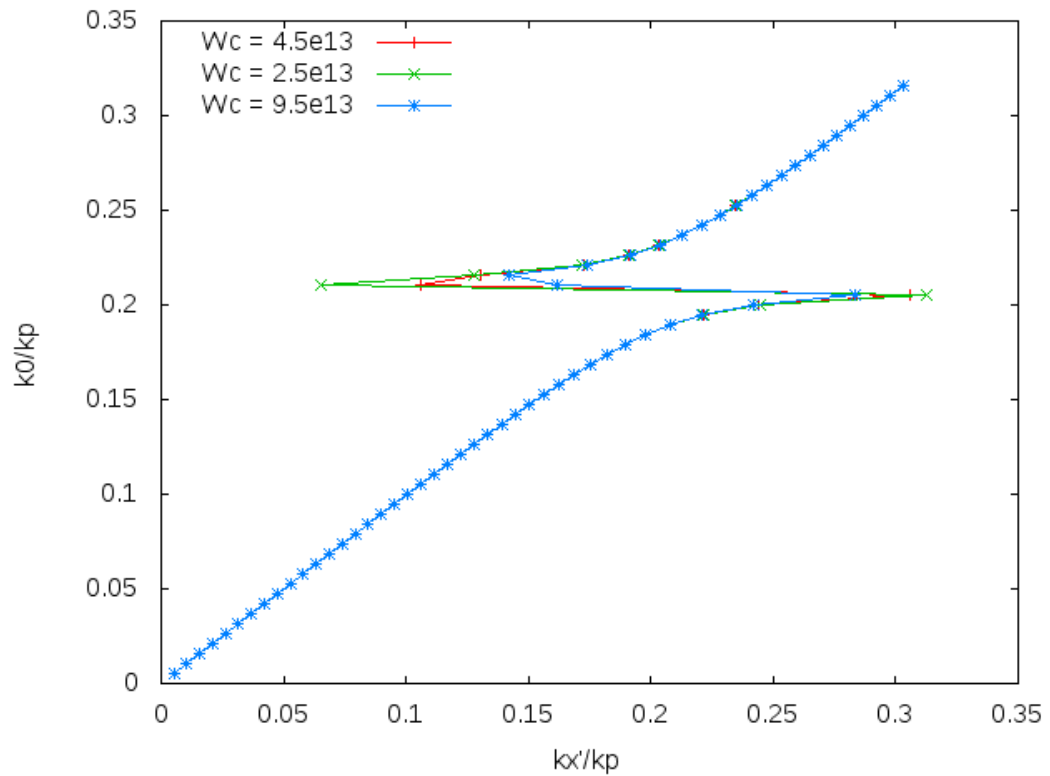


Рис.3.1 Результат программного вычисления уравнения (2.1) для k_x' при различных частот связи.

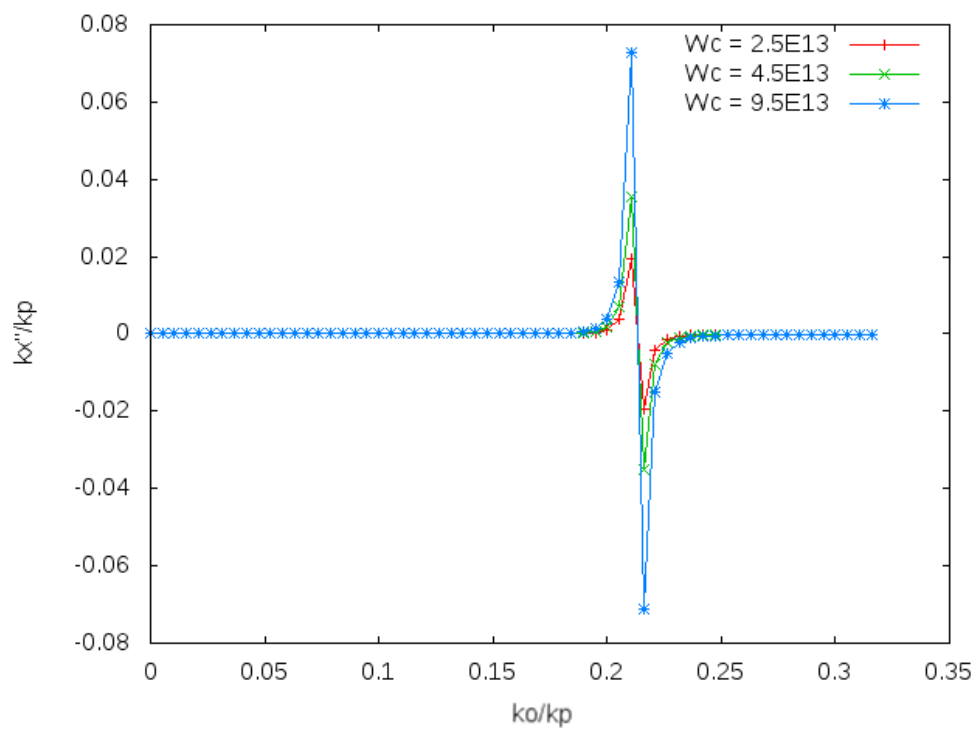


Рис.3.2 Результат программного вычисления уравнения (2.1) для k_x'' при различных частот столкновений.

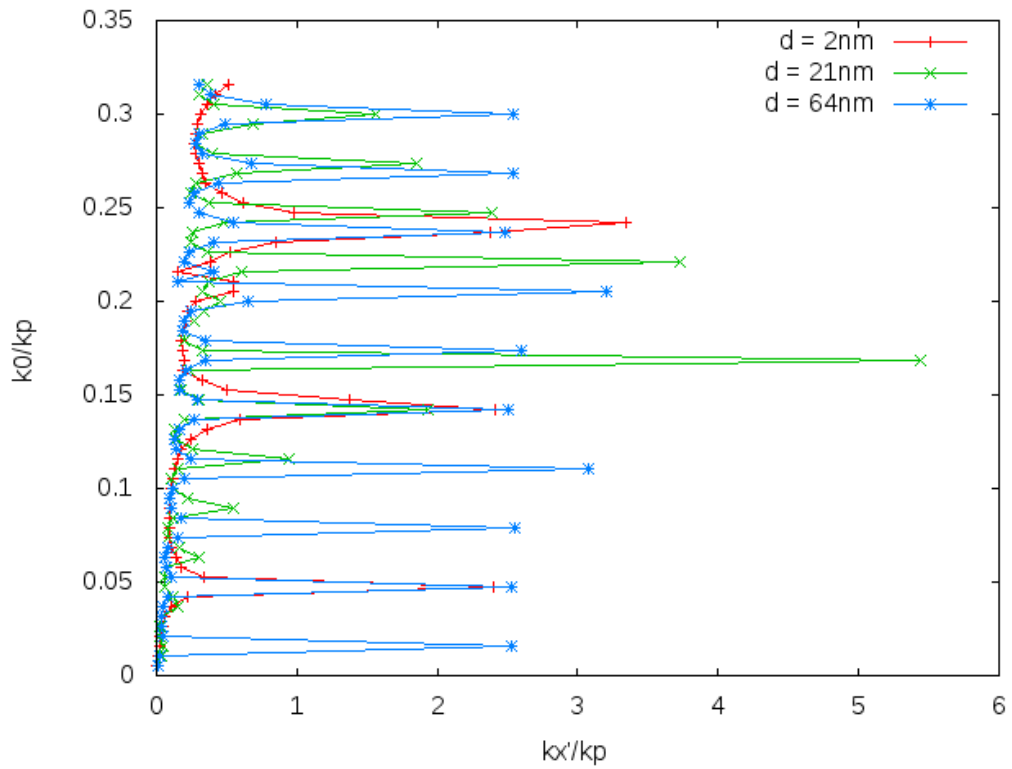


Рис.3.3 Результат вычисления уравнения (3.1) для k_x' на поверхности серебра толщиной 50 нм при изменении толщины слоя диэлектрика.

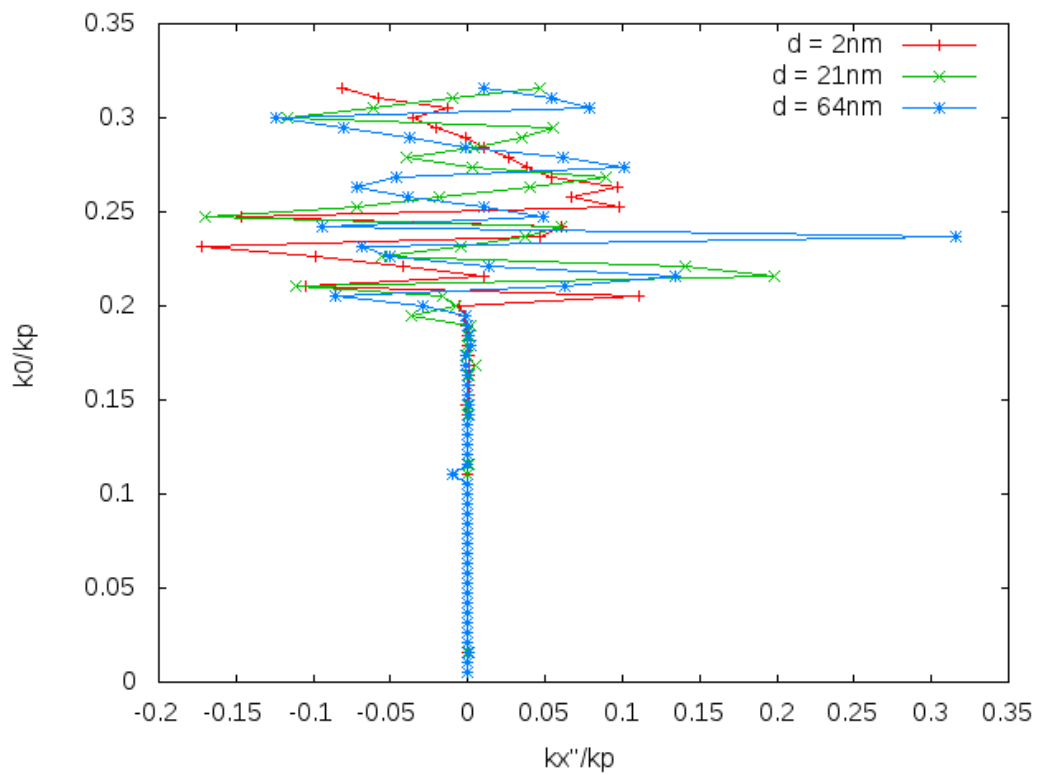


Рис.3.4 Результат вычисления уравнения (3.1) для k_x'' на поверхности серебра толщиной 50 нм при изменении толщины слоя диэлектрика.

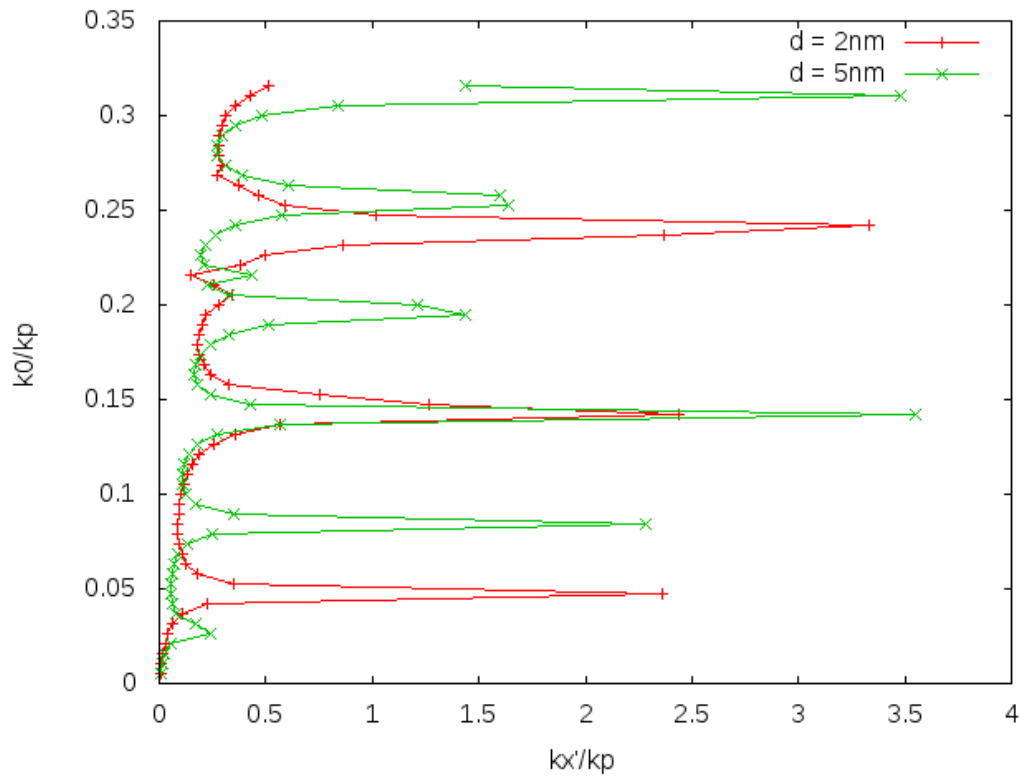


Рис.3.5 Результат вычисления уравнения (3.1) для k'_x на поверхности серебра толщиной 5 нм при изменении толщины слоя диэлектрика.

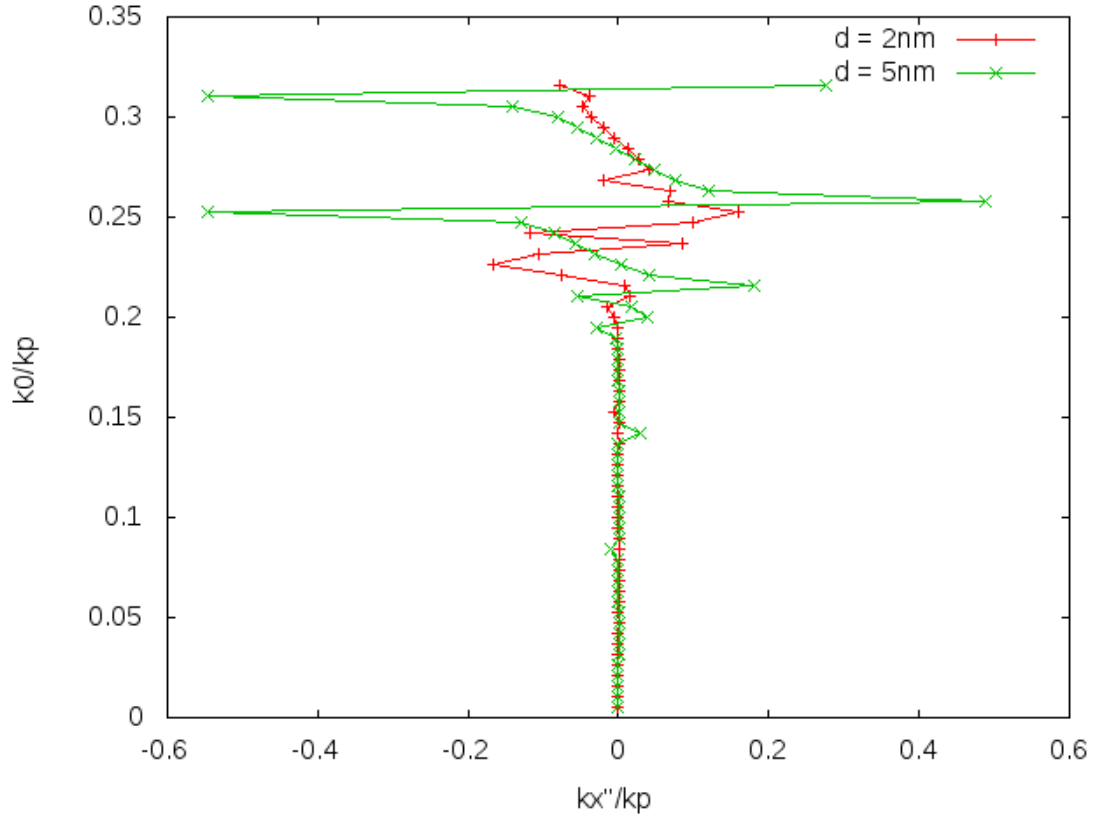


Рис.3.6 Результат вычисления уравнения (3.1) для k''_x на поверхности серебра толщиной 5 нм при изменении толщины слоя диэлектрика.

Заключение

В результате проделанной работы были получены зависимости дисперсионного уравнения для различных размеров толщины диэлектрика (стекло) и металла (серебро). Результаты реализуемого кода на с++ показали, что увеличивая толщину диэлектрика можно опустить плазмон в низкочастотный диапазон для использования в радиофизических устройствах. Достоверность результатов была проверена теоретическими расчетами. Если в уравнение (8) установить толщину диэлектрика (t) равную нулю, то получается тот же самый результат, что и по формуле (2.3).