



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Interference effects with surface plasmons

Kuzmin, N.V.

### Citation

Kuzmin, N. V. (2008, January 10). *Interference effects with surface plasmons. Casimir PhD Series*. LION, Quantum Optics Group, Faculty of Science, Leiden University. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/12551>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/12551>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# Интерференционные эффекты с поверхностными плазмонами

## Волны в природе

Волны и волновые процессы окружают нас. Мы слышим звуки, доносимые до нас звуковыми волнами, мы видим волны на поверхности воды, мы ощущаем сейсмические волны, мы широко используем волны электромагнитные: радиоволны, световые волны, рентгеновские волны и т.д. Волновые движения можно условно разделить на два подкласса: волны, распространяющиеся внутри среды (объемные волны), и волны, распространяющиеся на поверхности среды, т.е. на границе раздела сред (поверхностные волны). Примерами поверхностных волн в природе могут служить волны на поверхности воды и поверхностные сейсмические волны Рэлея (см. Рис. 1). В обоих случаях частицы на поверхности среды описывают эллиптические траектории.



Рис. 1. Волны в природе.

Электромагнитные волны также могут распространяться вдоль границы раздел сред. Хорошо известными примерами таких волн являются радиоволны Зоммерфельда, длиной от 100 до 1000 метров, распространяющиеся около или по поверхности земли.

## Поверхностные плазмоны

### Свойства поверхностных плазмонов

Поверхностные электромагнитные волны играют главную роль в данной диссертации. Это электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела металла и диэлектрика (воздуха или стекла). Эти волны называются *поверхностными оптическими волнами* или *поверхностными плазмонами* (ПП). Они представляют собой совместное колебание плотности свободных электронов внутри металла и электромагнитной волны в диэлектрике, колебание, локализованное у границы раздела этих сред. Особенностью поверхностного плазмона является его чисто двумерная природа: ПП распространяется только вдоль границы раздела и его поле быстро затухает при удалении от этой границы (см. Рис. 2).



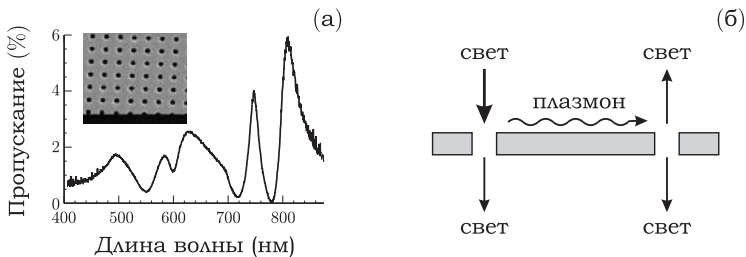
**Рис. 2.** Возбуждение поверхностного плазмона на поверхности металла.

Вследствие этого свойства поверхностного плазмона напрямую зависят от свойств поверхности, по которой он распространяется. Оптические свойства металла и диэлектрика, а так же рельеф границы раздела будут целиком определять скорость распространения поверхностного плазмона, зависимость этой скорости от длины волны (дисперсию ПП), а так же затухание плазмона. Другим следствием двумерной природы поверхностного плазмона является то, что свободно-распространяющаяся электромагнитная волна, переходя в поверхностный плазмон, сосредотачивается в тонком приповерхностном слое, и ее амплитуда увеличивается в десятки-сотни раз. Такое значительное усиление локального поля поверхностным

плазмон является привлекательным для изучения нелинейных оптических эффектов, интенсивность которых растет пропорционально квадрату (кубу и т.п.) возбуждающего поля<sup>1</sup>.

### История открытия и изучения поверхностных плазмонов

Интерес к поверхностным плазмонам развивался циклически. В начале прошлого века английский физик Роберт Вуд обнаружил темные линии в спектрах дифракции белого света на металлических решетках: некоторые цвета, составляющие белый спектр, не испытывали отражения. Это явление получило название Вудовской аномалии. В сороковых годах прошлого века это явление получило объяснение в работах итальянского физика-теоретика Уго Фано, предположившего существование поверхностных волн, резонансно возбуждаемых определенными длинами волн падающего света на поверхности решетки, и препятствующих последующему отражению этих длин волн. В шестидесятых годах прошлого века были сформулированы условия существования ПП и схемы их возбуждения (А. Отто, Е. Кретчманн). В шестидесятые-семидесятые годы поверхностные плазмоны активно изучались в предложенных геометриях Отто и Кретчманна, использовавших эффект увеличения волнового вектора света, прошедшего через стеклянную призму, что позволяло возбуждать поверхностные плазмоны и исследовать их характеристики на гладких и шероховатых поверхностях.



**Рис. 3.** (а) Спектр пропускания перфорированной металлической пленки; (б) Преобразование “свет→плазмон→свет” на отверстиях в металлической пленке.

Недавний всплеск интереса к поверхностным плазмонам был вызван работой группы французского ученого Томаса Эббесена (1998 г.), в которой изучались спектры пропускания металлических пленок, перфори-

<sup>1</sup>) которым, в данном случае, является интенсивное поле поверхностного плазмона

рованных множеством крохотных отверстий с диаметром много меньше длины волны падающего света (см. Рис.3а). В случае, когда местоположение отверстий на пленке носило случайных характер, количество света, прошедшего через них, было незначительным, и хорошо описывалось общепринятыми теоретическими моделями, объясняющими распространение света через единичное отверстие. В случае же, когда расположение отверстий было строго упорядоченным — отверстия находились в узлах квадратной сетки, пропускание света через такую систему возрастало во много раз. Это возрастание, однако, происходило только для определенных длин волн падающего света, пропускание же остальных длин волн было таким же незначительным. Иначе говоря, спектр пропускания упорядоченной системы отверстий имел резонансный характер с аномально большим пропусканием в максимумах и глубокими минимумами (см. Рис.3а).

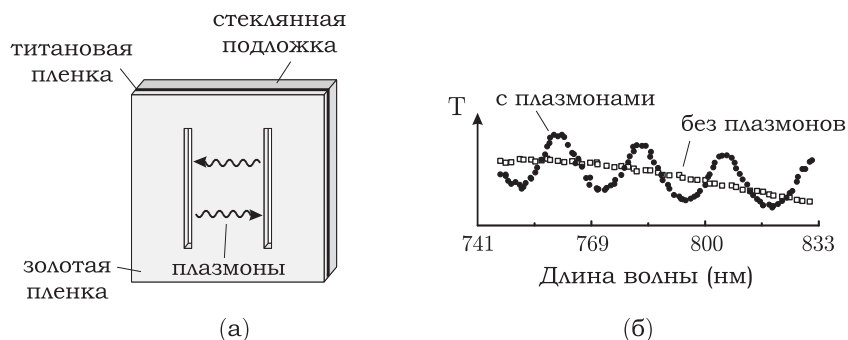
Такая система отверстий представляла собой не что иное, как двумерную дифракционную решетку Вуда, и не удивительно, что аномально большое пропускание света нельзя было бы описать с помощью феномена поверхностных плазмонов. С одной стороны, прямое пропускание света через отверстия весьма мало. С другой же стороны, отверстия рассеивали падающий на них свет в поверхностные плазмоны, которые, как предполагалось, были ответственны за резонансное усиление пропускания.

За работой Эббесена последовала целая серия теоретических и экспериментальных исследований, посвященных физике структурированных металлических пленок и их взаимодействию со светом. Эта новая область исследований получила название “плазмоника” или “нано-плазмоника”. В первую очередь, интерес был сосредоточен на структурах, подобных эббесеновской, а именно, металлических пленках, перфорированных сериями равноотстоящих нано-отверстий различного диаметра и формы: круглой, эллиптической, квадратной, прямоугольной. Их свойства исследовались не только в оптическом, но и в инфракрасном и микроволновом диапазонах, и значительным образом зависели от формы отверстий, геометрии их расположения, длины волны и поляризации падающего излучения, а так же свойств металла. Было так же опубликовано множество теоретических работ, в которых делались попытки приближенно описать рассматриваемую систему. В таких работах поверхностные плазмоны рассматривались на гладких поверхностях, и влияние отверстий на дисперсию поверхностных плазмонов не учитывалось<sup>1</sup>, что приводило к рассогласованию теоретических и экспериментальных результатов. Предлагались новые модели, объяснявшие одни аспекты, но испытывающие затруднения в других, тон

---

<sup>1</sup>) Аналитически, такой учет является крайне сложным.

дискуссий накалялся, и было необходимо внести упрощение, прежде всего в экспериментально-рассматриваемую систему.



**Рис. 4.** (а) Система двух параллельных щелей в тонкой золотой пленке; (б) Спектр пропускания данной системы.

## Поверхностные плазмоны и двущелевая система в металлической пленке

В 2003 году Тако Фиссер (Свободный Университет Амстердама) теоретически рассмотрел намного более простую систему, состоящую всего лишь из двух узких параллельных щелей в металлической пленке, расположенных на некотором расстоянии друг от друга (см. Рис.4а). В зависимости от поляризации падающего излучения смоделированный спектр пропускания такой системы состоял либо из периодических равноотстоящих максимумов, либо не имел ярко выраженных особенностей (см. Рис.4б). Фиссер связал это с наличием поверхностных плазмонов, распространявшихся между щелями и интерферировавших со светом, напрямую распространявшимся через них.

Важно отметить, что система двух щелей в непрозрачном экране является канонической системой физики. Она послужила английскому физика Томасу Юнгу для доказательства волновой природы света, а так же сыграла важную роль в понимании многих аспектов квантовой механики при изучении интерференции электронов, атомов и молекул.

С точки зрения физики поверхностных плазмонов привлекательностью данной системы является то, что каждая щель является как источником, так и приемником поверхностных плазмонов (Рис.3б). Более того, так как длина щели предполагается много больше длины волны падающего света, то щель представляет собой антенну, переизлучающую падающую на нее

световую волну в направленную волну поверхностных плазмонов, распространяющуюся перпендикулярно щели по поверхности металла (Рис.4а). Это дает возможность расположить вторую щель-приемник на достаточно большом расстоянии от щели-источника, что позволяет поверхностным плазмонам распространяться по плоской, невозмущенной поверхности металлической пленки, где свойства поверхностного плазмона могут быть описаны в простой аналитической форме.

## Тема и содержание диссертации

Система, состоящая из двух и более щелей в различных металлических пленках, легла в основу данной диссертации. Целью диссертации было исследование возможности возбуждения ПП в двущелевой системе, измерение эффективности и фазовых характеристик данного процесса, исследование дисперсии и затухания ПП и т.д.

Экспериментальные исследования были проведены в Лейденском университете под руководством профессора Херта Хоофта и доктора Эрика Элиэля. Теоретическое моделирование делалось в соавторстве с доктором Тако Фиссером и Хьюго Схаутеном (Свободный Университет, Амстердам), а так же профессором Полом Урбахом и Олафом Янсенем (Технический Университет, Дельфт). Экспериментальные образцы были изготовлены при содействии доктора Пола Алкемаде (Технический Университет, Дельфт).

## Экспериментальные образцы

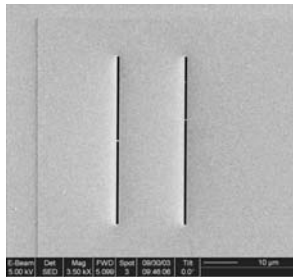
Экспериментальные образцы, исследованные в данной диссертации, состояли из золотых и серебряных пленок толщиной  $200 \text{ нм}^1$ , напыленных на стеклянные подложки, размерами  $18 \times 18 \times 0.5 \text{ мм}$ . Толщина пленки выбиралась таким образом, чтобы с одной стороны быть много больше глубины скин-слоя (глубины проникновения поля в металл), а с другой стороны быть меньше половины длины волны возбуждающего света, чтобы исключить резонансный характер пропускания щели. Резонансы в пропускании возникают из-за того, что щель в достаточно толстой пленке (больше половины длины волны) может вести себя как резонатор Фабри-Перо: световая мода, распространяющаяся внутри нее испытывает множественные отражения на границе щель-воздух, эти отражения интерферируют

---

<sup>1</sup>) 1 миллиметр (мм) = 1000 микрометров (микрон, мкм) = 1,000,000 нанометров (нм)

между собой, и спектр пропускания щели становится резонансным. Отражения происходят из-за того, что значение постоянной распространения моды внутри щели превосходит показатель преломления воздуха, равный единице.

Критерием выбора золота и серебра, как основных металлов для производства пленок, служило то, что ПП на данных металлах обладают в видимом оптическом диапазоне сравнительно небольшим затуханием и распространяются на расстояния до сотни микрон. Преимуществом золота является то, что оно не окисляется на воздухе, поэтому удобно рассматривать ПП на границе раздела золото-воздух. Преимуществом серебра, в отличие от золота, является отсутствие поглощения в сине-зеленой области видимого спектра<sup>1</sup>, что позволяет наблюдать “синие” ПП, поле которых сосредоточено больше в металле, чем в диэлектрике, и поэтому они обладают большой дисперсией и затуханием. Такие плазмоны представляют интерес для интегрированных нано-цепей, где необходима сверхмалая длина волны ПП.



**Рис. 5.** Изображение поверхности экспериментального образца со щелями, полученное с помощью электронного сканирующего микроскопа.

С помощью сфокусированного пучка ионов галлия в золотых и серебряных пленках были изготовлены двущелевые системы различных размеров. Длина щелей составляла 50 мкм, ширина каждой щели составляла 100–200 нм, а расстояние между щелями изменялось от нескольких микрон до десятков микрон.

Ширина щели выбиралась таким образом, чтобы эффект ПП был наи-

<sup>1</sup>) Так как серебро является металлом во всем видимом световом диапазоне, то есть действительная часть его диэлектрической проницаемости меньше нуля, то оно одинаково отражает все цвета видимого спектра и выглядит белым. Золото же перестает быть металлом и становится диэлектриком уже в сине-зеленой части видимого спектра и поэтому имеет характерный желтый цвет в отражении и сине-зеленый на просвет.



более заметен на фоне прямого пропускания света через щель. Как выяснилось позже, преобразование падающего света в плазмон напрямую зависело от ширины щели, и было наиболее оптимальным, когда ширина щели составляла около четверти длины волны падающего света, то есть около 200 нм.

Расстояние между щелями выбиралось таким образом, чтобы оно с одной стороны было: а) много больше, чем длина волны падающего света, для исключения влияния щели на характер распространения ПП по гладкой металлической поверхности, и б) было меньше, чем длина затухания ПП. К примеру, длина затухания ПП с длиной волны 800 нм, распространяющегося по границе раздела воздух-золото, составляет около 100 мкм. На этой длине напряженность поля ПП падает в  $e \simeq 2.7183$  раз.

Стоит упомянуть два различных механизма, определяющих затухание ПП: излучательный и безызлучательный, когда энергия плазмона переходит или в свет или в тепло. Излучательное затухание происходит, когда ПП рассеивается обратно в свет на шероховатостях поверхности, по которой он распространяется. На абсолютно гладких поверхностях излучательное затухание отсутствует. Безызлучательное затухание имеет место всегда, даже когда ПП распространяется по гладкой поверхности раздела — его причиной служит рассеяние ПП на кристаллической решетке металла, приводящее к ее разогреванию.

В образце с золотой пленкой были так же изготовлены системы из трех щелей в форме буквы Z: две щели, параллельные друг другу и одна наклонная щель, пересекающая их под углом  $\sim 10$  град. Наклонная щель служила пробником для стоячей волны, образованной поверхностными плазмонами, распространяющимися друг навстречу другу между параллельными щелями. В подобном образце были сделаны и одиночные щели различной ширины для изучения поведения мод светового поля в них.

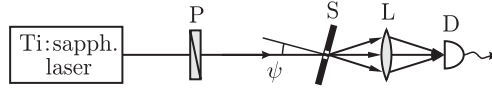
## Эксперименты и результаты

Для исследования образцов с различными щелевыми структурами было создано несколько экспериментальных установок. Ниже приводятся схемы установок и обсуждаются результаты экспериментов.

### Спектры пропускания

**Глава 2.** Идеей первого эксперимента была проверка существования ПП в двущелевой системе. В качестве источника света использовался титан-

сапфировый лазер с возможностью перестройки длины волны в небольшом диапазоне 740–830 нм. Пучок диаметром около 1 мм равномерно освещал исследуемую двущелевую систему в экспериментальном образце и свет, прошедший через щели собирался системой линз на фотодиодный детектор (Рис.6). Сигнал детектора записывался регистрационной системой как функция длины волны падающего света.



**Рис. 6.** Схема экспериментальной установки: титан-сапфировый лазер, P — поляризатор, S — образец, L — система линз, D — детектор.

Полученные спектры пропускания двущелевых систем (см. Рис.4б) представляли гармонические (почти синусоидальные) зависимости, хорошо согласующиеся с теоретическими расчетами Т. Фиссера. Для доказательства того, что такая модуляция спектра пропускания была вызвана именно плазмонами, были проделаны дополнительные эксперименты. В первом из них поляризация падающего на щели света, то есть направление электрического вектора, была выбрана параллельно щелям, в отличие от основного эксперимента, где она была перпендикулярна щелям. Для такой поляризации не должно было происходить возбуждения ПП. Действительно, спектр пропускания в этом случае не содержал никаких выраженных особенностей и слабо зависел от длины волны (см. Рис.4б). Аналогичный спектр для обеих поляризаций падающего света наблюдался и в случае, когда исследовалось пропускание сквозь щели, изготовленные в титановой пленке. Титан хотя и поддерживает ПП в рассматриваемом диапазоне длин волн, но длина затухания ПП составляет меньше одного микрона, то есть много меньше расстояния между щелями, и влияние ПП сводится к нулю.

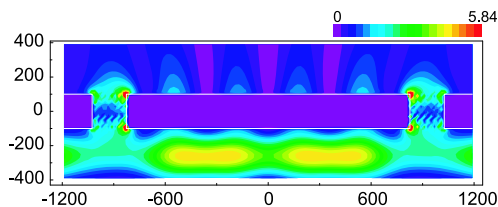
Измеренные спектры пропускания хорошо описывались простой моделью, рассматривавшей интерференцию света напрямую прошедшего через щель и ПП, сгенерированного другой щелью и падающего на данную щель. Так как фаза этого плазмона, прошедшего от щели-источника к щели-приемнику зависела от длины волны падающего света, то для определенных длин волн имела место конструктивная/деструктивная интерференция между световым и плазмонным каналами, результатом чего был максимум/минимум в спектре пропускания. По амплитуде модуляции сигнала в спектре пропускания была определена относительная амплитуда плазмонного канала по сравнению с прямым световым каналом. Она со-

ставила около 20%. Помимо того, из теоретических расчетов напряженности электромагнитного поля ПП вокруг щелей следовало, что между ними образуется стоячая волна, сформированная поверхностными плазмонами, распространяющимися друг навстречу другу (Рис.7). Это предположение экспериментально исследовано в Гл.5. Таким образом, в данной главе было однозначно показано наличие поверхностных плазмонов в двущелевой системе и их влияние на пропускание света через нее.

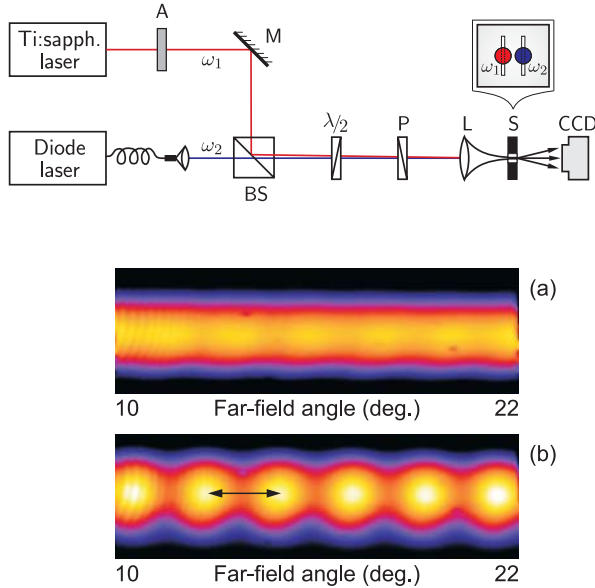
**Глава 7.** В Главе 7 исследован спектр (дисперсия) поверхностных плазмонов в гораздо более широком диапазоне длин волн — от синей области видимого диапазона ( $\sim 450$  нм) до ближней инфракрасной области ( $\sim 1300$  нм). ПП изучались на границе стекло-серебро на двущелевых системах с шириной щелей 100 нм и расстоянием между щелями 8 и 25 мкм. Источником света служил волоконный лазер Fianium с ультра-широким спектром излучения (450–1700 нм) и выходной мощностью около 2 Вт. В данном эксперименте, однако, использовалась лишь небольшая часть мощности лазера. Свет, прошедший через щели собирался системой линз на входной апертуре волоконного спектрометра, позволявшего измерять интенсивность всех спектральных компонент одновременно. Полученные спектры пропускания позволили рассчитать дисперсию и групповую скорость ПП. В синей части диапазона ПП распространялся со скоростью примерно в три раза меньше скорости света в вакууме. Длина волны этого коротковолнового плазмона составила всего около 260 нм.

### Интерференция в дальнем поле (Глава 3)

В данной главе рассматривалось влияние ПП на пространственную когерентность светового поля, переизлучаемого щелями. Изучалось распреде-



**Рис. 7.** Моделирование распределения интенсивности электромагнитного поля в системе: отчетливо видна стоячая волна на поверхности металла между щелями, образованная плазмонами, распространяющимися друг навстречу другу.



**Рис. 8.** Схема экспериментальной установки и распределения интенсивностей интерференционных картин в дальнем поле для различных частот падающего излучения ( $\omega_{1,2}$ ). В случае а) модуляция интенсивности поля равна нулю, в случае б) она максимальна.

ление интенсивности света, прошедшего через щели, на достаточном от них удалении ( $\sim 10$  см), то есть в дальнем поле. Для возбуждения ПП использовались два взаимно-некогерентных лазера<sup>1</sup> с немного отличающимися длинами волн, пучки которых освещали только одну щель каждый: пучок первого лазера освещал левую щель, а пучок второго лазера — правую щель (Рис.8). При этом на экране наблюдалась стабильная интерференционная картинка с синусоидальным распределением интенсивности, модуляция которой зависела от длин волн лазеров, один из которых можно было перестраивать. Наблюдаемый эффект, таким образом, заключался в том, что, будучи освещенными некогерентными полями, щели излучали поля когерентные и степень когерентности зависела от длин волн этих полей. Более того, при изменении поляризации лазерного света, освещающего обе щели, с перпендикулярной щелям на параллельную, при которой возбуждения ПП не происходило, модуляция в интерференционной картинке становилась равной нулю.

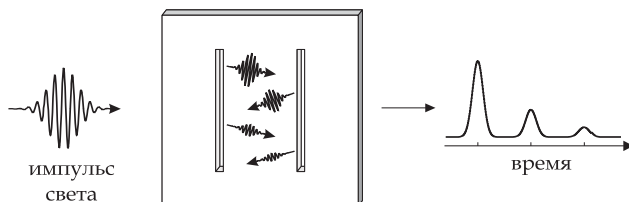
<sup>1)</sup> Пучки таких лазеров не будут давать стабильной интерференционной картинки, так как разность фаз их световых полей непостоянна во времени.

Данный эффект также объясняется наличием ПП между щелями. Суть его заключается в том, что плазмон, распространяющийся от освещенной щели, доставляет часть световой энергии “темной щели” без потери фазы. Темная щель переизлучает этот плазмон на выходной стороне. Таким образом, пучок каждого лазера расщепляется на два источника света: первый, определяемый прямым пропусканием через щель-источник и второй — плазмонный, излучаемый щелью-приемником. Так как процесс рассеяния света в плазмон и обратно происходит с сохранением фазы света, то эти два источника могут давать интерференционную картинку, что и наблюдается в эксперименте. Таким образом, если осветить только одну щель, то на выходе будет наблюдаться интерференционная картина. Когда же освещены две щели, на экране наблюдаются две наложенные друг на друга интерференционные картины. Их поля взаимно-некогерентны и поэтому происходит сложение интенсивностей, а не амплитуд, этих полей. В отличие от классической интерференции Юнга, “плазмонная” интерференционная картинка при перестройке длины волны света перемещается как целое вправо или влево, в зависимости от того, какая щель освещена и от того, увеличивается или уменьшается длина волны света. В случае юнговской интерференции нулевой порядок (максимум) находится в центре интерференционной картины и при перестройке длины волны остается на месте. В случае интерференции с ПП нулевого порядка *не существует*. Это происходит из-за того, что скорость распространения плазмона по поверхности металла (Гл.4) меньше скорости света и нет такого места на экране (угла наблюдения), в котором оптические пути света, излученного “освещенной” и “темной” (плазмонной) щелями, были бы равны. Перестраивая длину волны одного из лазеров можно пространственно сдвигать одну интерференционную картинку относительно другой и наблюдать перечисленные эффекты.

#### **Отклик системы на импульсное воздействие (Глава 4)**

В основе данной главы стоит предположение о том, что каждая щель является не только источником и приемником поверхностных плазмонов, преобразуя падающий свет в ПП и обратно, но и плазмонным *зеркалом*. Таким образом, двущелевая система является резонатором типа Фабри-Перо для поверхностных плазмонов, испытывающих множественные отражения от щелей и постепенно затухающих (Рис.9). Множественные отражения влияют как на спектр пропускания такой системы, делая максимумы пропускания более резкими (Рис.4б), так и на временную эволюцию ультракороткого импульса, проходящего через систему двух щелей. От-

кликом системы на импульсное воздействие будет, таким образом, серия затухающих импульсов. Исходя из ранее полученных спектров пропускания (Рис.4б) можно было судить, что возможное количество плазмонных отражений очень невелико, так как ширина максимумов в спектре лишь немного ширины минимумов. Иными словами, коэффициент отражения щели для ПП являлся небольшой величиной. Поэтому, чтобы экспериментально выявить наличие плазмонных отражений, был использован метод импульсного автокорреляционного анализа.



**Рис. 9.** Множественные отражения плазмонного импульса между щелями и зависимость интенсивности света на выходе из щелей от времени.

Время жизни ПП на границе раздела “воздух-золото” при длине волны возбуждающего света порядка 800 нм составляет несколько сотен фемтосекунд<sup>1</sup>. За это характерное время напряженность поля поверхностного плазмона падает в  $e \simeq 2.7182$  раз. Таким образом, чтобы “увидеть” поверхностный плазмон во времени, удобно использовать лазер, излучающий ультракороткие импульсы света, длительностью меньше времени жизни ПП. В эксперименте двущелевая система освещалась лазерными импульсами длительностью около 50 фс с перестраиваемой центральной длиной волны 770–805 нм. Свет, прошедший через щели собирался системой линз на фотодиодный детектор. Малое время жизни ПП определяло и систему детектирования, использованную для наблюдения плазмонных отражений. Так как временное разрешение любого детектора много больше времени жизни ПП, то прямое детектирование плазмонных импульсов невозможно. Поэтому, в данном эксперименте был использован корреляционный метод: система освещалась двумя идентичными импульсами — импульсом накачки и сканирующим импульсом, разнесенными во времени. При этом в системе двух щелей возбуждались две серии плазмонных отражений, которые в зависимости от времени задержки интерферировали.

<sup>1</sup>) 1 секунда = 1,000 миллисекунд (мс) = 1,000,000 микросекунд (мкс) = 1,000,000,000 наносекунд (нс) = 1,000,000,000,000 пикосекунд (пс) = 1,000,000,000,000,000 фемтосекунд (фс)

Результат их интерференции — свет, прошедший через щели, регистрировался детектором как функция времени задержки, давая сигнал, называемый *интерферограммой*. Интерферограмма состояла из серии равноотстоящих максимумов одинаковой формы и экспоненциально уменьшающейся амплитуды. Расстояние между максимумами равнялось времени, которое было необходимо плазмонному импульсу, чтобы пройти расстояние от одной щели к другой. Это время, порядка нескольких сотен фемтосекунд, в совокупности с известным расстоянием между щелями (50–90 микрон), позволяло непосредственно вычислить групповую скорость ПП, которая составила порядка 90% от скорости света. Как было показано в Гл.7, для коротковолновых плазмонов в синей области видимого диапазона, групповая скорость может составлять всего 30% скорости света.

По амплитудам пиков в интерферограммах были определены амплитудные коэффициенты преобразования “свет→плазмон→свет” ( $\sim 0.20$ ), а так же коэффициент плазмонного отражения от щели, который так же составил порядка 0.20. Это означало, что щель отражает лишь 4% интенсивности падающего на него плазмона обратно в плазмон. Таким небольшим коэффициентом отражения обладает, например, обычное оконное стекло. В практических целях для создания эффективных плазмонных зеркал используются несколько (5–10) равноотстоящих канавок в металлических пленках, глубиной около 50–100 нанометров и периодом, равным половине длины волны ПП. Каждая такая канавка отражает падающий на нее ПП, и отражения ото всех канавок конструктивно интерферируют, давая суммарный коэффициент отражения порядка 80–90%.

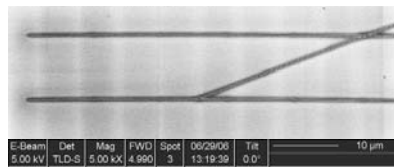
Более того, интерферограммы позволили определить разность фаз коэффициента преобразования “свет→плазмон→свет” и коэффициента отражения. Она оказалась равной нулю. Таким образом, как при первом, так и при втором преобразовании, свет испытывал одинаковый скачок фазы. Далее, в одном из экспериментов Главы 6, измеряется абсолютное значение этого скачка.

## **Распределение интенсивности поля вдоль щелей (Глава 5, 6)**

В данных главах исследуются системы, состоящие, в отличие от предыдущих, из одной (Глава 6) и трех щелей (Глава 5). Экспериментальная методика одинакова для обоих экспериментов: исследуемая щелевая система освещается пучком лазера с однородным распределением интенсивности и фазы по сечению. Длина волны излучения может плавно изменяться в пределах от 740 до 830 нм. Поляризация излучения так же может устанавливаться параллельно, перпендикулярно или под произвольным углом

по отношению к щелям. Изображение системы проецируется с помощью объектива на ПЗС<sup>1</sup> матрицу. Изображение с матрицы передается на компьютер, где оно анализируется. По распределению интенсивности вдоль щелей исследуется амплитуда и фаза света, прошедшего напрямую через щели, а так же вклад поверхностных плазмонов.

**Глава 5.** Изучаемая система состоит из двух параллельных щелей, пересеченных третьей. Длина щелей составляет 100 мкм, расстояние между ними 10 мкм и наклонная щель пересекает их под углом около 10 градусов (Рис.10). Наклонная щель используется в данном эксперименте как сенсор для стоячей волны, образованной поверхностными плазмонами, распространяющимися друг навстречу друга от параллельных щелей-источников. Подобная стоячая волна образуется и в классическом оптическом резонаторе. Анализ распределения интенсивности светового поля вдоль наклонной щели для различных длин волн в сравнении с амплитудой пропускания через параллельные щели позволял рассчитать абсолютное значение фазы преобразования "свет→плазмон→свет", равное  $\pi$ .



**Рис. 10.** Изображение трехщелевой системы, полученное с помощью электронного сканирующего микроскопа.

**Глава 6.** Вопрос, поставленный в данной главе, возник еще в самом начале данного проекта. Как уже было сказано, в Главе 2 изучалась двущелевая система, где рассматривалось "сообщение" между щелями, посредством поверхностных плазмонов.

Для возбуждения ПП поляризация падающего света выбиралась перпендикулярной щели. В случае же, когда поляризация падающего света была параллельна щели, возбуждение ПП не наблюдалось. Физика процесса возбуждения ПП понятна. Электрическое и магнитное поля, составляющие свободно распространяющуюся электромагнитную волну, ориентиро-

<sup>1</sup>) ПЗС-матрица — аналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных фотодиодов, выполненная на основе кремния, и на базе ПЗС — приборов с зарядовой связью.



ваны перпендикулярно друг другу и направлению распространения волны. Щели, исследованные в экспериментах, являются одномерными объектами: длина щели много больше ее ширины и может считаться практически бесконечной. Таким образом, при нормальном падении световой волны на щель, можно рассмотреть два основных случая взаимных ориентаций поля и оси щели: 1) электрическая компонента поля перпендикулярна оси щели (поперечная магнитная волна, ТМ); 2) магнитная компонента поля перпендикулярна оси щели (поперечная электрическая волна, ТЕ). Только в случае ТМ волны в ней и в поле ПП имеются однонаправленные компоненты магнитных полей, и может происходить переход энергии от светового поля в поверхностный плазмон.

Одновременно с процессом возбуждения ПП, каждая щель напрямую пропускала падающий на нее свет. Результаты эксперимента Главы 2 показывали, что ТМ и ТЕ поляризованный свет одинаково проходил через щели. Другими словами, коэффициент пропускания щели для ТМ и ТЕ поляризованных волн был практически одинаковым. С точки зрения волноводной теории щель в металлической пленке можно рассматривать как волновод для оптического излучения. Ширина рассматриваемой в эксперименте щели была в четыре раза меньше длины волны падающего света. Граничные условия для электрического и магнитного полей ТЕ волны на границах такой щели-волновода приводят к ее чисто затухающему характеру. При этом ТМ волна остается распространяющейся для любой ширины щели-волновода и ее затухание невелико. Таким образом, в эксперименте наблюдалось аномально большое пропускание ТЕ волны и данный факт не объяснялся простыми представлениями волноводной теории. Более того, линейно-поляризованная волна с направлением поляризации под углом  $45^\circ$  к оси щели, проходя через щель, становилась поляризованной по кругу. Щель, таким образом, работала как четверть-волновая пластинка. Компоненты электрического поля, ориентированные параллельно и перпендикулярно оси пластинки, пройдя через нее, испытывают относительную фазовую задержку, равную  $\pi/2$ . При этом линейно поляризованный свет с произвольным направлением поляризации относительно оси пластинки, преобразуется ей в свет, поляризованный эллиптически.

С целью объяснения первоначально полученных экспериментальных данных был проделан эксперимент Главы 6, в котором исследовалась ступенчатая щель, ширина элементов которой изменялась от 50 до 500 нм, а длина составляла 10 мкм. Анализ интенсивности и поляризации света, прошедшего через нее показал, что действительно при ширине щели порядка 250 нм ТМ и ТЕ поля обладают одинаковыми коэффициентами

пропускания и их фазовая задержка составляет около  $\pi/2$ . Для больших ширин щели разность между пропусканием ТЕ и ТМ полей становилась неразличимой, а для меньших ширин затухание ТЕ волны значительно увеличивалось.

Теоретическое объяснение данного эффекта, подтвержденное моделированием, состояло в том, что глубина щели-волновода, или другими словами, толщина золотой пленки, в которой была проделана щель, составляла 200 нанометров, то есть четверть длины волны падающего излучения. Это имело двойное влияние на ТМ/ТЕ пропускание. Во-первых, затухание ТЕ волны было небольшим — волна не успевала испытать значительное затухание на такой небольшой длине волновода. При выходе из щели эта волна снова превращалась в свободно распространяющийся свет. Фаза ТЕ волны при таком распространении не меняется, ввиду ее затухающего характера. Во-вторых, ТМ волна может распространяться через щель-волновод и ее фаза увеличивается как раз на  $\pi/2$ . Если бы толщина золотой пленки была бы, например, равна 400 нм, это значение составило бы  $\pi$ . Таким образом, щель являлась дихроическим двулучепреломляющим устройством: в ней могли распространяться две волны с ортогональными поляризациями и различным затуханием. Фазы и амплитуды волн, прошедших через щель, зависели от ее ширины и глубины (толщины пленки). Подбирая параметры щели можно было варьировать поляризацию поля, которое проходит через нее.

## Заключение

В данной диссертации показана роль поверхностных плазмонов при распространении световых полей через субдлинноволновые щели, измерены эффективности возбуждения и взаимодействия плазмонов со щелями, а так же фазовые портреты данных процессов. Результаты данной работы позволяют более глубоко понять физику взаимодействия поверхностных плазмонов не только со щелями, но и их роль в системах отверстий в металлических пленках. По итогам диссертации опубликовано 3 и планируется к публикации еще 4 статьи. Понимание элементарных процессов взаимодействия света с поверхностными плазмонами в таких системах позволит в дальнейшем конструировать устройства, использующие ПП, например, в качестве эффективных информационных носителей в интегрированных оптических цепях, а так же в качестве усилителей локальных электромагнитных полей в различных нано-системах.

