

A SURFACE-PLASMON MICROSCOPE

S. I. VALYANSKY

The physical principles of the operation of an optical device, surface plasmons microscope, are considered. This microscope makes possible the investigation of low contrast objects and thin (nanometric) films.

Рассмотрены физические принципы действия оптического прибора – микроскопа на поверхностных плазмонах, позволяющего при применении излучения оптического диапазона исследовать низкоконтрастные объекты и тонкие (нанометровые) пленки. Дается описание его применения.

МИКРОСКОП НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМАНАХ

С. И. ВАЛЯНСКИЙ

Московский государственный авиационный институт
(технический университет)

Можно ли с помощью видимого света наблюдать объекты ангстремной толщины? Обычный ответ – нет. Но, оказывается, можно, при определенных условиях. Ниже мы не только разберемся в них, но и опишем конструкцию оптического прибора – микроскопа, реализующего эти возможности на практике. Причем его разрешение тем больше, чем более длинноволновое излучение мы используем.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

В 1821 году знаменитый немецкий оптик и конструктор Й. Фраунгофер (J. Fraunhofer), создатель большого количества оптических приборов непревзойденного качества, составлявших гордость лабораторий и обсерваторий, их использовавших, провел следующий эксперимент. Он навел зрительную трубу на находящийся на достаточно удаленном расстоянии источник света и стал помещать перед объективом трубы различные непрозрачные экраны с отверстиями. Оказалось, что вид изображения наблюдаемого источника зависит от размера и формы последних. Более того, когда был взят экран с очень маленьким отверстием, источник света в виде светящейся нити превратился в размытую светлую полосу с несколькими максимумами и минимумами.

Разберемся с тем, что произошло. Исходно параллельный пучок света (таковым он является, если его испускает достаточно удаленный точечный источник), проходя через, например, круглое отверстие диаметра d , становится расходящимся (или по крайней мере приобретает большую расходимость, чем была у этого пучка до его попадания на экран с отверстием). Это можно легко обнаружить, измерив размеры пучка в двух плоскостях, перпендикулярных его оси и находящихся на разных расстояниях от отверстия. Кроме того, в пучке света после прохождения его через отверстие вокруг центрального светлого пятна появляется набор чередующихся светлых и темных концентрических окружностей.

То, что мы наблюдаем, есть явление огибания светом препятствий (краев отверстия) и носит название дифракции (от лат. diffractus – разломанный).

Угол φ расходимости пучка, прошедшего через диафрагму (так будем в дальнейшем именовать экран с отверстием), определяется соотношением

$$\sin \varphi = \frac{n\lambda}{d},$$

где λ — длина волны света, а $n = 1, 2, 3, \dots$ (целые числа). Видно, что, чем меньше диаметр отверстия, тем больше расходимость пучка. То же будет происходить и при увеличении λ .

Именно явление дифракции света устанавливает предел разрешающей способности микроскопа, то есть, иными словами, определяет, до минимального расстояния между двумя светящимися точками, при котором мы их увидели бы в микроскоп как две, а не одну.

Действительно, мы имеем два точечных источника света, лучи от них проходят через входную линзу объектива, размеры которой ограничены. Она и будет тем отверстием, на котором будет дифрагировать их свет, то есть будет давать две системы концентрических окружностей. Тогда, чтобы убедиться, что у нас две точки, а не одна, мы должны на экране видеть их изображение, разнесенное на расстояние, равное радиусу первого темного дифракционного кольца. (Это называется условием Рэлея (Rayleigh).)

После небольших вычислений оказывается, что минимальное расстояние, на котором могут находиться две светящиеся точки, будет порядка половины длины волны света, на которой они излучают. Так, для излучения на длине волны 630 нм можно рассчитывать на разрешение объектов размером не более 315 нм.

Но на явление дифракции можно взглянуть с другой стороны. Известно, что свет — это поток фотонов, квантовых частиц. Известно также, что для последних существуют ограничения, называемые соотношениями неопределенности. В том числе и такое:

$$\Delta g \Delta p \geq h,$$

связывающее неопределенности в определении векторов координат \mathbf{g} и импульса \mathbf{p} частицы, h — постоянная Планка.

Во что выливается это требование в случае света? Рассмотрим пролет фотонов через отверстие диафрагмы. Будем считать, что изначально они летели перпендикулярно к плоскости диафрагмы. Тогда мы знаем координату фотонов, пролетевших через нее, с точностью до размера ее отверстия, то есть $\Delta x = d$. А изменение проекции импульса фотонов на плоскость диафрагмы $\Delta p_x = p \sin \varphi$, где φ — угол, на который отклоняются частицы от исходного направления после пролета диафрагмы. Тогда

$$\Delta x \Delta p_x = dp \sin \varphi \geq h.$$

Вспомним, что, согласно соотношению де Бройля (L. de Broglie), $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} / 2\pi$, где \mathbf{k} — волновой вектор, равный по модулю $2\pi / \lambda$. Тогда получаем, что $\sin \varphi \geq \lambda / d$, то есть мы получили практически тот же результат, что и для дифракции света на щели. Таким образом, дифракция — это проявление квантовых свойств света на макроскопическом уровне.

Именно квантовая механика поможет нам понять, как можно получить разрешение, намного превосходящее дифракционный предел.

Дело в том, что соотношение неопределенности связывает два вектора: импульс частицы \mathbf{p} и ее радиус-вектор \mathbf{r} . (Согласно соотношению де Бройля вместо \mathbf{p} можно рассматривать волновой вектор \mathbf{k} .) Каждый из этих векторов существует в своем трехмерном пространстве. Тогда точность, с которой мы можем измерять импульс, дает некоторый объем в пространстве импульсов Δk , а точность определения координат — объем в пространстве координат Δr . Соотношение же неопределенности указывает, что точность определения координаты и импульса не может быть меньше, чем некоторый объем $\Delta k \Delta r$ порядка единицы, подобно тому как если бы мы хотели нарисовать какую-нибудь картинку, то не смогли бы ее нарисовать более точно, чем толщина пишущей части нашего карандаша.

Теперь если мы, например, задались неопределенностью в определении импульса, то тем самым мы задали ту неопределенность в определении координаты квантового объекта, уменьшить которую мы уже не можем. Это задает нам некоторый объем в координатном пространстве. Пусть это будет некоторый кубик известного объема. Но никто не запрещает нам его деформировать, не изменяя его объем и не нарушая тем самым общего соотношения неопределенности. А деформируем мы этот кубик в некоторый тонкий блин, имеющий большую площадь, но маленькую толщину.

Если квант будет двигаться в направлении, параллельном плоскости этого блина, то в силу большой неопределенности его локализации в плоскости блина можно получить достаточно большую определенность в проекции импульса на эту плоскость. Вместе с тем мы получаем достаточно высокую локализацию кванта в перпендикулярном к этой плоскости направлении, но огромную неопределенность в проекции импульса на это направление.

Таким образом, точность определения направления движения кванта в плоскости, параллельной плоскости блина, напрямую связана с толщиной этого блина. Иначе говоря, чем в более тонкий блин раскатаем наш объем, тем с большей точностью мы сможем измерять направление движения кванта в плоскости блина. Итак, мы, оказывается, можем точно определять одну из проекций радиуса-вектора и одну из проекций импульса. Только эти проекции взаимно перпендикулярны.

Но это теория. Как ее реализовать на практике? Ведь чтобы работать с большими потоками квантов, локализованных в тонком слое (иначе говоря, со светом большой интенсивности, а мы хотим работать именно с ним, чтобы не возникали сложности с его регистрацией), надо, чтобы они достаточно хорошо распространялись в этом тонком слое, поскольку мы хотим сделать область их локализации в направлении, перпендикулярном их движению, нанометровых размеров. Известно, что излучение в световоде с такими параметрами не распространяется, то есть его амплитуда будет очень быстро

затухать. А это значит, что размер площади блина будет не столь велик. И мы по этой причине не достигнем нужного нам разрешения.

Но решение этой проблемы есть. Какое оно, сейчас увидим.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОНЫ И ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС

Плазмоны — это квазичастицы (кванты), возникающие в результате колебаний электронов проводимости относительно ионов. Для твердых тел, например металлов, это колебания электронов проводимости относительно ионного остова кристалла.

Механизм введения этих квазичастиц следующий. Если мы рассмотрим энергию системы, состоящей из электронов проводимости и ионов, то наряду с некоторой постоянной и достаточно большой ее частью, связанной с кулоновским взаимодействием между отдельными элементами системы, существует небольшая относительно ее величина, которая еще и переменна во времени и пространстве. Иначе говоря, эта вторая часть представляет некоторое возмущение энергии системы.

Согласно представлениям квантовой теории поля, это переменное поле можно проквантовать. В результате оно может быть описано как газ квантовых частиц, не взаимодействующих друг с другом. Таким образом и появляются квазичастицы-плазмоны. Квазичастицами они названы для того, чтобы отличить от настоящих квантовых частиц — электронов, протонов, нейтронов и т.д. Их различие заключается в том, что если нагреть металл так, чтобы он превратился в газ исходно составлявших его атомов, то там никаких плазмонов не будет. Они существуют только тогда, когда есть металл как целое.

Плазмон — это не единственная квазичастица. Существует огромное количество частиц, ответственных за различные физические свойства твердых тел: поляритоны, магноны, ротоны, фононы и т.д. Подробнее с квазичастицами можно познакомиться в работе [1].

Нас в дальнейшем будут интересовать кванты электромагнитного поля, связанные с осцилляциями поверхностных зарядов при отсутствии возбуждающего поля. По аналогии с обычными плазмонами вводят квазичастицы — поверхностные плазмоны (ПП). Область их локализации находится вблизи поверхности раздела, где локализованы поверхностные заряды.

“Соросовский Образовательный Журнал” уже писал о ПП [2, 3]. В этих статьях они рассматривались не как кванты, а как результат решения уравнений Максвелла (J. Maxwell), то есть с позиций классической электродинамики. Тем более интересно взглянуть на эти образования с точки зрения квантовой теории поля. Все результаты, полученные при классическом рассмотрении, имеют место и при квантово-полевом.

Но продолжим наше рассмотрение. ПП можно возбудить фотонами. При этом должны соблюдаться законы сохранения энергии $\hbar\omega_c = \hbar\omega_p$, где ω_c — частота света, а ω_p — частота плазмона, и импульса $\hbar\mathbf{k}_c = \hbar\mathbf{k}_p$, где \mathbf{k}_c — волновой вектор света, а \mathbf{k}_p — волновой вектор плазмона.

И тут возникают сложности. Дело в том, что энергия кванта и его импульс связаны вполне определенными соотношениями. На языке классической физики это соответствует связи частоты поля и его волнового вектора, называемой законом дисперсии.

Закон дисперсии для света

$$\frac{E_c}{p_c} = \frac{\omega_c}{k_c} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}},$$

где c — скорость света в вакууме, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, в которой свет распространяется. А дисперсионное отношение для ПП

$$\frac{E_p}{p_p} = \frac{\omega_p}{k_{px}} = \frac{c\sqrt{\epsilon_1 + \epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1\epsilon_2}},$$

где k_{px} — составляющая волнового вектора вдоль оси x , лежащей в плоскости распространения ПП.

На рис. 1, *a* показаны эти две дисперсионные кривые. Видно, что при данной частоте и параметрах устройства либо можно вообще ничего не возбудить, либо возбуждается только вполне определенный плазмон. Такой способ возбуждения называется резонансным, так как если возбуждать ПП немонохроматическим пучком света, то только кванты света, для которых будут выполняться одновременно законы сохранения энергии и импульса, будут возбуждать ПП.

Попутно отметим, что ПП имеют граничную частоту существования (см. рис. 1). Это связано с тем, что поверхностные возбуждения существуют только до тех пор, пока генерация объемных затруднена. И это справедливо для любых поверхностных возбуждений, например акустических. Граничная частота между возбуждением поверхностных и объемных волн для плазмонов есть собственная частота электронного газа металла. При частотах, меньших этой частоты, возможны только ПП. Для частот больших — только объемные плазмоны.

Итак, оказывается, возбуждение ПП — довольно сложная задача. В работах [2, 3] рассказано о трех способах, которыми это можно сделать: с помощью дифракционной решетки и двумя способами с помощью призм. Поэтому сейчас не будем на этом останавливаться. Рассмотрим еще одно квантовое свойство ПП.

Речь пойдет о свойствах ПП, связанных с тем, что они имеют конечное время жизни. Выше мы говорили об одном из соотношений неопределенности. Теперь обратимся к другому:

$$\Delta t \Delta E \geq \hbar,$$

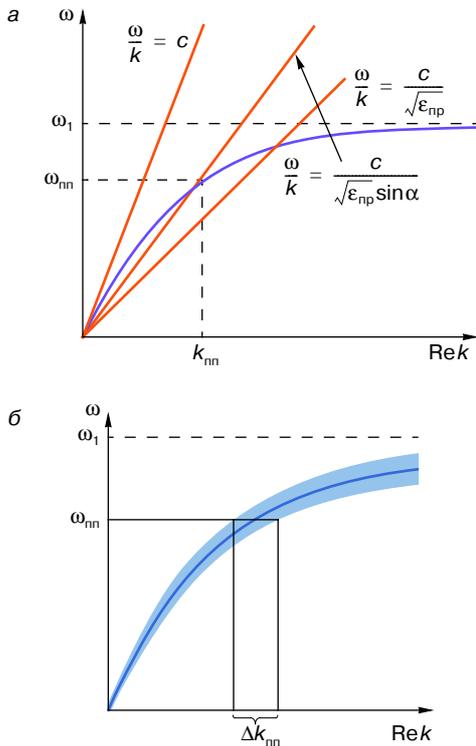


Рис. 1. а – дисперсионные кривые для света (оранжевые) и плазмонов (фиолетовая кривая). ω_1 – граничная частота возбуждения ПП, ϵ_{np} – диэлектрическая проницаемость материала призмы, α – угол падения света на металлическую пленку, ω_{np} и k_{np} – частота и волновой вектор возбуждаемого светом плазмона; б – дисперсионная кривая с учетом конечного времени жизни ПП. Δk_{np} – интервал изменений волнового вектора, в котором возможна генерация ПП при фиксированной частоте возбуждения

где ΔE – размытость энергетического уровня, на котором находится квантовая частица, а Δt – время жизни частицы на этом уровне. Так же как и предыдущее соотношение неопределенности, оно имеет классический аналог $\Delta t \Delta \omega \geq 1$ при учете того, что, согласно соотношению де Бройля, $E = \hbar \omega$.

Сделаем небольшое отступление. Функции $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ определены на интервале изменений аргумента от $-\infty$ до $+\infty$. Если же хотим описать процесс, протекающий на ограниченном интервале изменений α и совпадающий на нем с функцией, например $\cos \alpha$, то на самом деле это есть сумма функций $\sin \alpha_i$ и $\cos \alpha_i$ с разными α_i , меняющимися от $-\infty$ до $+\infty$.

Что это значит, рассмотрим на примере уравнения, описывающего колебания точки: $x = \cos \omega t$. Ясно, что t здесь изменяется в конечных пределах. (Колебания когда-то начались и когда-то кончатся.) При этом оказывается, что колебания происходят не с одной частотой, а с некоторым набором $\Delta \omega$. Связь между длительностью процесса и частотным

диапазоном, необходимым для его описания, дает так называемое преобразование Фурье (J.V. Fourier). Любой радиотехник знает об этом соотношении. Чем короче сообщение, тем больше должна быть частотная полоса у передатчика и приемника. В современной квантовой электронике лазер с короткой длительностью импульса (например, единицы фемтосекунд (1 фемтосекунда = 10^{-15} с)) имеет ширину спектра излучения порядка 10^{14} Гц (в нем будут присутствовать все частоты видимого света). Поэтому если квантовый объект находится ограниченное время в возбужденном состоянии, то он описывается не одночастотной функцией, а набором частот $\Delta \omega$.

Если опять обратиться к рис. 1, то нужно рисовать не тонкую кривую, соответствующую дисперсионной кривой ПП, а некоторую размытую линию (рис. 1, б). А если у квазичастицы есть спектр частот, то у нее будет и спектр импульсов. (К этому мы еще вернемся, когда будем обсуждать, как работает поверхностно-плазмонный микроскоп.)

КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

В начале века внимание ученых было занято решением задачи распространения вдоль поверхностной диэлектрической среды локализованных возле нее электромагнитных волн, то есть таких, у которых амплитуда убывала бы экспоненциально с ростом расстояния от поверхности как в глубину диэлектрика, так и в сторону контактирующего с ней вакуума. Интерес к такого рода задачам был связан с проблемами распространения радиоволн вдоль поверхности Земли.

Были достигнуты большие успехи в создании теории этих процессов, выведены условия их существования и дисперсионные соотношения для таких поверхностных волн. Наибольший вклад в решение этой задачи внес немецкий физик-теоретик Арнольд Зоммерфельд (A. Sommerfeld) со своими сотрудниками. Но до практической реализации так и не дошло. Поэтому эти работы не вызвали особого резонанса у научной общественности.

Приблизительно в то же время (в 1902 году) американский оптик Роберт Вуд (R.W. Wood) обнаружил изменение интенсивности пучка света, дифрагирующего на решетке. Это было первое экспериментальное наблюдение ПП в оптическом диапазоне. Но понято это было только в 1941 году, когда итальянскому физику-теоретику Уго Фано (U. Fano) удалось объяснить аномалии Вуда. И даже после этого никто не увидел похожесть этих объектов на те, которые изучал Зоммерфельд.

Только в конце 60-х годов Андреас Отто (A. Otto) применил идеи, развитые в работах немецкого физика, к электромагнитным волнам оптического диапазона. Он сформулировал условия, при которых можно возбуждать ПП-волны на гладких поверхностях, и указал метод, как можно их возбуждать в оптическом диапазоне длин волн. Тем самым был

открыт путь к экспериментальному исследованию ПП в оптическом диапазоне.

В 1971 году, через три года после выхода работы Отто, Эрвин Кречманн (E. Kretschmann) предложил еще одну схему возбуждения ПП в оптическом диапазоне.

Теперь это два широко известных способа возбуждения ПП, называемые методами нарушенного полного внутреннего отражения. Только в геометрии Отто ПП возбуждаются с помощью призмы, но через воздушную прослойку между призмой и металлом, в котором они возбуждаются, а в геометрии Кречманна тонкая проводящая пленка, на поверхности которой возбуждаются ПП, наносится прямо на призму, с помощью которой они возбуждаются.

В 1988 году Вольфганг Кноль (W. Knoll) и Бенно Ротенхойслер (B. Rothenhäusler) предложили использовать ПП для микроскопии. Они продемонстрировали рабочую модель микроскопа, в котором ПП возбуждались по схеме Кречманна, для исследования специально сделанной сетки с известными параметрами. Результаты оказались столь впечатляющими, что в ближайшие несколько лет появились работы по возможности применения нового прибора в физике, химии, биологии и технике. Многие исследователи обратились к этому прибору в силу, с одной стороны, простоты его конструкции, а с другой – высокого разрешения.

РАЗРЕШЕНИЕ МИКРОСКОПА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМАОНАХ

Прежде чем переходить к конструкции микроскопа, разберемся, от чего зависит его разрешение. Главный элемент всего прибора – тонкая металлическая пленка. От правильного выбора ее толщины и качества зависит разрешение всего устройства. И вот почему.

Пусть параллельный пучок света через призму падает на металлическую пленку. Если мы будем менять угол падения пучка и наблюдать за интенсивностью отраженного света, то, пока ПП не возбуждаются, интенсивность отраженного пучка будет практически неизменна. Это происходит потому, что угол, при котором возбуждаются ПП, больше, чем угол полного внутреннего отражения, поэтому интенсивность отраженного пучка в данном диапазоне углов и является константой. Когда же угол падения светового пучка совпадет с резонансным углом возбуждения ПП, энергия падающего света будет частично тратиться на их возбуждение и интенсивность отраженного пучка будет меньше. (Поэтому метод их возбуждения и называется методом нарушенного полного внутреннего отражения.)

На рис. 2 представлен результат такого эксперимента – зависимость интенсивности отраженного света от угла падения. Провал на этой кривой соответствует возбуждению ПП. Для простоты будем называть эту кривую резонансной.

На графике видно, что возбуждение ПП происходит не при каком-то определенном угле падения, а при наборе углов. Если вспомнить, что набор углов соответствует набору импульсов фотонов (набору волновых векторов) и рис. 1, б с объяснениями к нему, то все станет понятным. Причина эта лежит в конечном времени жизни ПП.

Большая ширина резонансной кривой соответствует большому разбросу в энергии ПП, то есть малому их времени жизни. А мы помним, что разрешение микроскопа будет тем лучше, чем на большее расстояние сумеет распространиться ПП. Если скорость распространения его фиксирована, то за меньшее время жизни он распространится на меньшее расстояние. И ясно, что из-за поглощения и рассеяния на шероховатостях металлической пленки длина пробега может только уменьшиться.

Однако не только поверхность пленки ответственна за время жизни ПП, но и ее объемные свойства. Диэлектрическая проницаемость металла имеет как действительную, так и мнимую часть. Из-за наличия последней происходит поглощение электромагнитной энергии и соответственно затухание (уменьшение времени жизни) ПП. Поэтому для увеличения разрешения микроскопа надо брать металл с минимальной величиной мнимой диэлектрической проницаемости. Таким металлом является серебро.

Неблагоприятным аспектом, однако, является то, что серебряная пленка быстро деградирует. Характерное время ее окисления порядка недели. Но эту трудность можно преодолеть. В лаборатории автора был разработан метод защиты поверхности серебряной пленки так, чтобы ни глубина минимума резонансной кривой, ни его ширина не отличались от тех же величин для обычной серебряной пленки.

Но не только этими причинами определяется время жизни ПП. Если металлическая пленка будет

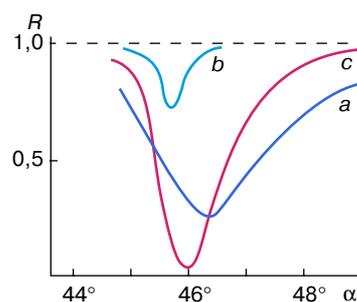


Рис. 2. Зависимость интенсивности отраженного света от угла падения (резонансная кривая). По оси ординат отложено отношение интенсивности отраженного P-поляризованного света (возбуждающего ПП) к интенсивности S-поляризованного света (не возбуждающего ПП). α – угол падения света на металлическую пленку резонансной кривой. Кривая *a* – толщина металлической пленки меньше оптимальной, *b* – толщина пленки больше оптимальной, *c* – оптимальная толщина пленки

тонкой, то близкая граница призмы приведет к тому, что ПП будет выгоднее распасты и преобразоваться в объемное излучение, чем оставаться поверхностным возбуждением, то есть время жизни его будет невелико. По той же причине доля энергии, которая идет на генерацию ПП, будет невелика (рис. 2, а).

Очевидно, если толщина металлической пленки будет слишком большой, то практически вся энергия возбуждающей электромагнитной волны будет поглощаться в объеме пленки, не доходя до ее поверхности. И никаких ПП возбуждаться не будет. А поглощенная энергия будет переизлучаться электронами металла назад. И пленка будет работать как зеркало.

Теперь, если уменьшать толщину пленки, наступит такая ситуация, что часть электромагнитной волны будет достигать внешней границы пленки металла, но из-за удаленности от поверхности призмы ее влияние на время жизни ПП будет уменьшено. Полуширина резонансной кривой будет тем меньше, чем толще пленка, но и интенсивность света, пошедшая на возбуждение ПП, при этом будет уменьшаться из-за поглощения в объеме металла. В результате амплитуда минимума будет небольшой (рис. 2, b).

Естественно, есть оптимальная толщина, при которой практически вся энергия падающей волны превращается в энергию ПП. Амплитуда минимума будет максимальной. Что касается величины времени жизни ПП, то она будет иметь промежуточное значение (рис. 2, с).

Отметим, что энергия, потраченная на возбуждение ПП, никуда не пропадает после его распада. Она опять преобразуется в обычную объемную электромагнитную волну. Но рассеивается последняя при этом во все стороны.

КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСКОПА

Как мы уже отмечали, в основу конструкции поверхностно-плазмонного микроскопа положена схема возбуждения ПП по методу Кречманна (см. [2]). Он устроен так. На гипотенузную грань прямоугольной треугольной призмы наносится тонкая металлическая пленка. Ее освещают со стороны призмы монохроматическим линейно поляризованным светом (причем вектор поляризации лежит в плоскости падения света – так называемый Р-поляризованный свет) с расходимостью на порядок меньше, чем полуширина резонансной кривой для данной пленки. Отраженный от пленки свет попадает на фотоматрицу, сигнал с которой обрабатывается компьютером (рис. 3). Мы помним, что разрешение в плоскости пленки у нас несколько микрон. Поэтому между призмой и фотоматрицей на пути света ставится телескоп, расширяющий пучок так, чтобы свет, идущий с микронной площадки пленки, захватывал несколько элементов фотоматрицы.

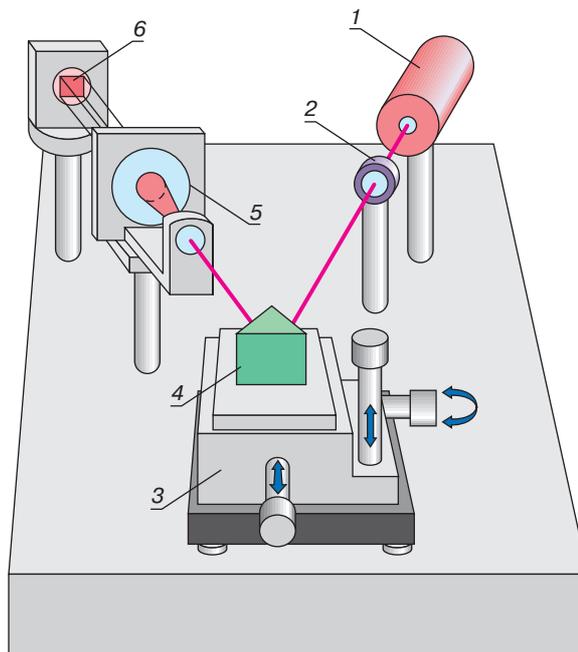


Рис. 3. Схема поверхностно-плазмонного микроскопа: 1 – лазер, 2 – поляризатор света, 3 – координатно-поворотное устройство, 4 – призма, на гипотенузную грань которой нанесена металлическая пленка, в которой возбуждается ПП, 5 – телескоп, 6 – фотоматрица

Это одна из простых схем поверхностно-плазмонного микроскопа, но далеко не единственная. Существует большое количество их модификаций, удобных для решения конкретных задач.

Как же работает поверхностно-плазмонный микроскоп? Условия резонансного возбуждения ПП зависят не только от свойств металлической пленки, на поверхности которой они возбуждаются, но и от диэлектрических свойств среды, с которой эта пленка граничит. Любую тонкую пленку на поверхности металла можно представить как локальное изменение диэлектрических свойств внешней среды. А это сразу сказывается на условии резонансного возбуждения в этом месте ПП. Иначе говоря, резонансная кривая смещается в этом месте относительно кривой для чистой пленки в область больших углов.

Значит, если настроить наш микроскоп на угол, соответствующий оптимальному возбуждению ПП для чистой металлической пленки, то в тех местах, где будет находиться измеряемый объект, интенсивность отраженного света будет больше, и тем больше, чем толще этот фрагмент (рис. 4).

На самом деле ясно, что микроскоп реагирует не на толщину, а на изменения параметра ϵd , где ϵ – диэлектрическая проницаемость, d – толщина измеряемого объекта.

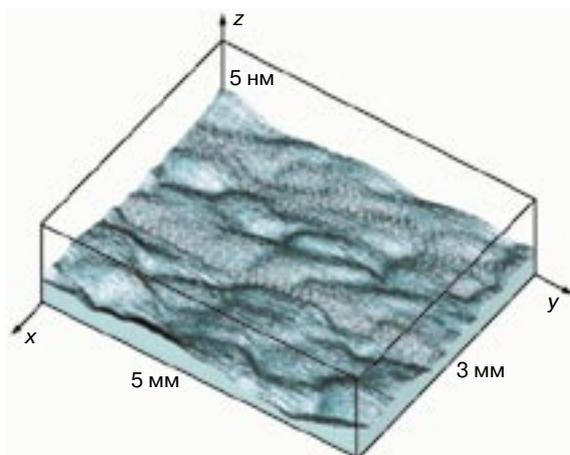


Рис. 4. Изображение диэлектрической пленки на поверхности серебряной пленки, полученной с помощью ППМ после компьютерной обработки сигнала с фотоматрицы

Теперь несколько цифр. При разрешении в плоскости пленки в 2 мкм сдвиг резонансной кривой в $0,05^\circ$ соответствует изменению толщины объекта с фиксированной диэлектрической проницаемостью в 0,25 нм. При фиксированной толщине можно измерять изменения в диэлектрической проницаемости объекта при том же сдвиге резонансной кривой не хуже, чем 10^{-3} . Поэтому микроскоп может работать с низкоконтрастными объектами.

ПРИМЕНЕНИЕ

В заключение отметим некоторые области применения микроскопа на поверхностных плазмонах.

Как мы уже отмечали, ПП-резонанс — явление, условия существования которого чрезвычайно чувствительны к состоянию поверхности металла. Поэтому данный эффект достаточно широко применяется в качестве метода исследования различных переходных слоев и тонких (толщина много меньше длины волны зондирующего излучения) пленок. Это основная область его применения. Микроскоп и конструировали первоначально для наблюдения за организацией мономолекулярных ориентированных пленок (так называемые пленки Ленгмюра—Блоджетт) в момент их формирования на поверхности жидкости и при переносе их на твердые подложки.

Другая область применения — биология, прямое наблюдение биологических объектов. Здесь важно не столько высокое разрешение микроскопа по толщине, сколько высокое разрешение объектов, внутренняя структура которых определяется элементами с малыми изменениями в диэлектрической проницаемости.

Биологические объекты подобны механическим часам, корпус и внутренний механизм которых сле-

даны из стекла. Рассмотреть их устройство просто так практически невозможно. Поэтому биологи для наблюдения своих объектов обычно вводят контрастную жидкость, после чего их можно наблюдать. Плазмонный микроскоп позволяет наблюдать их без этих ухищрений. Было показано, что можно, например, различить в водной среде границу между цитоплазмой и клеточной стенкой.

А вот несколько неожиданное применение микроскопа. В последнее время наблюдается повышенное внимание к созданию новых сенсоров, способных быстро и надежно детектировать наличие тех или иных химических веществ в исследуемой среде (жидкой или газообразной). Основные области их применения — это медицина, технологический и экологический контроль.

Оказывается, поверхностно-плазмонный микроскоп может служить таким сенсором. На металлическую пленку наносят тонкую пленку вещества, способную вступать в селективную реакцию с некоторым другим веществом, которое мы хотим обнаружить. Таким образом, с помощью микроскопа можно обнаружить наличие всего 10^5 – 10^7 частиц в одном кубическом сантиметре воздуха. (Всего в нем содержится 10^{19} частиц.) Это очень высокая чувствительность. Гораздо большую чувствительность можно получить при работе с вирусами и антигенами — 10–100 частиц.

Кроме того, микроскоп — сенсор на основе ПП-резонанса — можно использовать для снятия кинетики протекания химических и биохимических реакций, контролировать размер образующихся на поверхности комплексов.

Мы описали далеко не все возможности этого уникального прибора. Его простота и надежность в обращении сулят ему большое будущее. И его принцип работы не только не противоречит основным принципам физики, но и полностью согласуется с ними.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Валянский С.И.* Квазичастичный метод // Методы научного познания и физика. М.: Наука, 1985. С. 302–317.
2. *Либенсон М.Н.* Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 10. С. 92–98.
3. *Либенсон М.Н.* Поверхностные электромагнитные волны в оптике // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 11. С. 103–110.
4. *Rothenhäusler B., Knoll W.* Surface-Plasmon Microscopy // Nature. 1988. № 6165. P. 615–617.

* * *

Сергей Иванович Валянский, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики МАИ, зав. лабораторией Института общей физики РАН. Область научных интересов — взаимодействие излучения с веществом, нелинейная физика. Автор более 50 научных статей и одной монографии.