

Исследование распространения и фокусировки поверхностных плазмонных волн с помощью рассеяния на наноструктурах

П.Н.Мелентьев, А.А.Кузин, В.И.Балыкин

Измерение характеристик излучения, рассеянного плазмонной волной и регистрируемого в дальнем поле, является единственным эффективным методом исследования направленности распространения, величины волнового вектора, длины распространения таких волн. В настоящей работе показана возможность контроля свойств плазмонных волн, распространяющихся на поверхности металлических нанопленок, по рассеянию на созданных в нанопленке нанобъектах – наноканавках и наноямках. Показано, что использование такой методики позволяет измерять основные параметры плазмонных волн.

Ключевые слова: плазмонные волны, рассеяние волн, наноструктуры.

1. Введение

Поверхностные плазмонные волны (поверхностные плазмон-поляритоны, SPP) являются, по сути, осцилляциями в оптическом диапазоне частот свободных электронов металла на границе раздела металл–диэлектрик [1–4]. Большой интерес к исследованию развития возбуждения, а также к управлению и регистрации таких волн связан с возможностью использования их в качестве носителей информации, поскольку SPP сочетают в себе преимущества как электронов (возможность сильной пространственной локализации), так и фотонов (высокие частоты колебаний) [5, 6]. К настоящему времени уже реализованы различные элементы плазмонной оптики: плазмонные зеркала [7, 8], расщепители плазмонных пучков [9], волноводы [10], интерферометры [11, 12], линзы [13, 14], сенсоры [15–18].

Оптика плазмонных волн включает в себя следующие основные составляющие: среду для распространения SPP, источник SPP, оптические элементы SPP (линзы, зеркала и др.), устройства регистрации SPP. Все перечисленные элементы плазмонной оптики взаимосвязаны, поэтому добиться существенного улучшения какого-нибудь из них без развития остальных элементов невозможно.

Известно множество работ, посвященных поиску оптимальной среды для распространения SPP [19–22]. Оптимальная среда позволяет реализовать наименьшие потери для SPP – минимальные омические потери, а также отсутствие потерь на рассеяние, связанных с наличием поверхностной и объемной неоднородностей нанопленки. Это дает возможность достичь наибольших длин

распространения плазмонных волн. Наилучшие результаты по возбуждению и распространению плазмонных волн были получены с монокристаллическими пленками серебра и золота [12, 23, 24].

Большой проблемой для оптики плазмонных волн является измерение параметров их распространения. Наиболее развитым методом исследований является так называемая ближнепольная микроскопия [25, 26]. В этом методе в поле SPP помещается зонд ближнепольного микроскопа, рассеяние поля на котором регистрируется в дальнем поле. По измеренной зависимости амплитуды волны в дальнем поле и ее поляризации от положения зонда микроскопа можно охарактеризовать ближнее поле плазмонной волны [27]. Основные проблемы данного метода – это необходимость иметь в лаборатории дорогостоящий прибор, ближнепольный микроскоп; сложность настройки и работы с таким микроскопом; необходимость контроля геометрии зонда микроскопа для определения сечения рассеяния плазмонной волны; наличие сильного фонового сигнала рассеяния от возбуждающего лазерного излучения на макроскопических (микронного размера и более) частях основания и держателя зонда микроскопа. В связи с этим данный метод успешно используется лишь в ограниченном количестве лабораторий.

В настоящей работе предлагается другой подход к измерению свойств SPP. Идея состоит в том, чтобы в поле плазмонной волны поместить нанобъект контролируемой геометрии, создаваемый с помощью методов нанолитографии на поверхности металлической нанопленки. Измерение характеристик SPP происходит по рассеянию волны в дальнем поле (как и в методе ближнепольной микроскопии). Отметим основные достоинства предлагаемого подхода: известна геометрия наноструктуры, играющей роль зонда; геометрия такой наноструктуры не деградирует со временем (в отличие от зонда ближнепольного микроскопа); у такой наноструктуры нет макроскопических частей (отсутствуют держатели, поэтому нет сопутствующего фонового рассеяния возбуждающего лазерного излучения); отсутствует необходимость в дополнительном сложном оборудовании.

П.Н.Мелентьев, В.И.Балыкин. Институт спектроскопии РАН, Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5;
e-mail: melentiev@isan.troitsk.ru

А.А.Кузин. Институт спектроскопии РАН, Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 6 февраля 2017 г.

2. Образцы и оптические измерения

В работе использовались нанопленки двух типов: монокристаллические (111) нанопленки золота толщиной 200 нм, полученные в процессе эпитаксиального роста на слюде, производство Phasis (Швейцария) и поликристаллические пленки серебра толщиной 200 нм, созданные на поверхности поликристаллического кварца методом термического распыления в вакууме 10^{-7} мбар. Микро- и наноструктуры создавались с помощью установки FEI Quanta 3D с остророфокусированным пучком ионов Ga. Электронная микроскопия проводилась на растровом электронном микроскопе JEOL. Создание и характеристика образцов осуществлялись в условия чистого помещения класса 100.

Оптические измерения проводились с использованием инвертированного микроскопа Nikon Ti/U с CCD-камерой PhotonMax (Princeton Instruments). Источником лазерного излучения служил титан-сапфировый пере-страиваемый лазер, на выходе которого была установлена полуволновая фазовая пластинка, позволяющая управлять поляризацией его излучения.

На рис.1 представлены полученные с помощью электронного микроскопа изображения базовых элементов плазмонной оптики, изготовленных в монокристаллической пленке золота (111) толщиной 200 нм с использованием ионной литографии: нанощель, наноканавка, нанотверстие и наноямка. С использованием этих элементов можно построить различные элементы плазмонной оптики [1–3, 28]. Однако провести неразрушающие измерения параметров плазмонных волн представляется возможным с использованием только двух из представленных структур – наноканавок и наноямок, поскольку, как будет показано ниже, потери плазмонной волны на этих элементах малы.

Взаимодействие SPP с наноканавкой было рассмотрено в ряде работ [29–32], в которых показаны возможности ее использования в качестве эффективного рассеивателя, зеркала или расщепителя плазмонной волны. В частности, в работе [30] теоретически показано, что процесс взаимодействия распространяющейся по поверхности металлической пленки плазмонной волны с наноканавкой состоит из двух основных частей – возбуждения волноводной MDM-моды в наноканавке и интерференции этой волноводной моды с плазмонной волной. Было показано, что при условии возбуждения волноводной

MDM-моды величина рассеяния плазмонной волны на наноканавке может достигать нескольких десятков процентов.

В настоящей работе наноканавка использовалась как детектор плазмонной волны, который, по определению, должен вносить минимальное возмущение в распространение SPP. Как следует из работы [30], для этого необходимо выбрать такие параметры наноканавки, при которых волноводная MDM-мода не возбуждается. Так, согласно работе [30], при ширине наноканавки 100 нм и ее глубине 25 нм для волноводной моды реализуется режим отсечки, т.е. возбуждения волноводной MDM-моды в канавке не происходит. При этом коэффициент рассеяния плазмонной волны на наноканавке мал – примерно 1%. В случае наноямки коэффициент рассеяния еще меньше. Далее нами показано, как с помощью этих двух элементов можно не только визуализировать распространение SPP на поверхности металлической нанопленки, но и измерить ее основные параметры – длину распространения и направленность.

Чрезвычайно важным элементом плазмонной оптики является источник плазмонной волны. Известны следующие способы его создания: использование ближнего поля лазерного излучения при его полном внутреннем отражении [33, 34] и релаксация возбужденных квантовых объектов, расположенных вблизи металлической нанопленки [35, 36]. Наиболее универсальным, простым в применении и имеющим практическое значение является способ возбуждения плазмонных волн в результате рассеяния лазерного излучения на решетках или на наноструктурах [37, 38].

Применение периодически расположенных наноструктур позволяет обеспечить высокую эффективность передачи энергии лазерного излучения в плазмонную волну [39]. Если использовать для этого матрицу нанощелей с периодом Λ , созданных на поверхности металлической нанопленки, то для эффективного возбуждения плазмонной волны необходимо соблюдение следующего условия [37]:

$$\text{Re}(k_{\text{SPP}}) \approx (mG + k_0 n_{\text{sub}} \sin \alpha)x + (k_0 n_{\text{sub}} \sin \beta)y, \quad (1)$$

где k_{SPP} – волновое число плазмонной волны в рупоре; $G = 2\pi/\Lambda$ – модуль вектора обратной решетки нанощелей; α и β – углы падения возбуждающей волны в подложке относительно осей x и y ; $k_0 = \omega/c$ – волновое число в вакууме; m – целое число; n_{sub} – показатель преломления подложки.

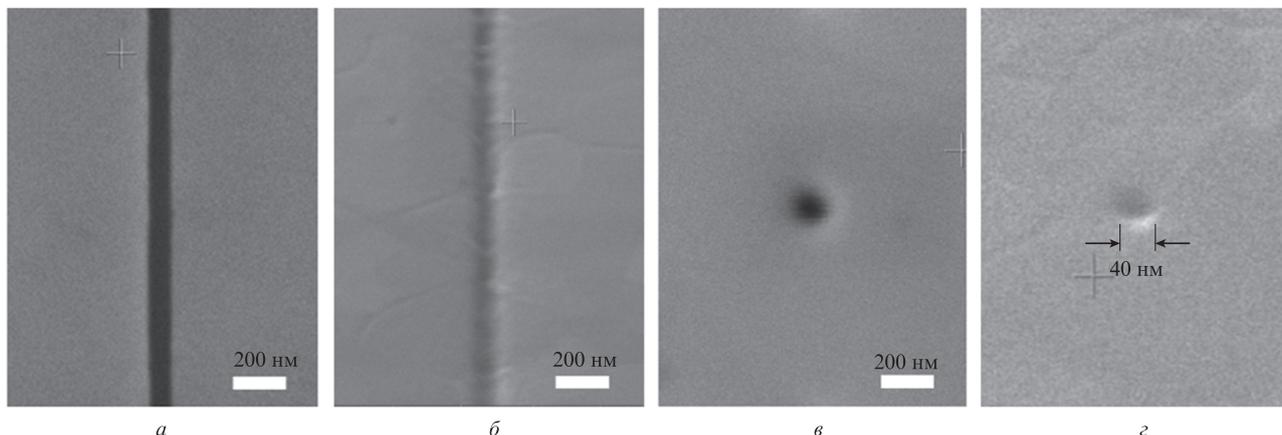


Рис.1. Базовые элементы плазмонной оптики, изготовленные в монокристаллической пленке золота (111) толщиной 200 нм: нанощель (а), наноканавка (б), нанотверстие (в), наноямка (г).

Наноканавки. На рис.2,*а* представлена схема регистрации возбуждаемой матрицей нанощелей плазмонной волны с помощью наноканавки. Вокруг матрицы создается наноканавка в виде круга, на которой происходит рассеяние SPP. Рассеяние на наноканавке создает источник излучения, локализованный на поверхности металлической нанопленки, который можно наблюдать в оптическом микроскопе. При этом поперечные размеры такого источника будут определяться только двумя параметрами – шириной наноканавки и шириной пучка плазмонной волны.

На рис.2,*б* представлено изображение в оптическом микроскопе созданного источника SPP, демонстрирующее реализацию этой схемы. Матрица из пятнадцати сквозных нанощелей размером $12\text{ мкм} \times 100\text{ нм}$ каждая окружена наноканавкой диаметром 200 мкм . Период нанощелей $\Lambda = 780\text{ нм}$, ширина и глубина наноканавки равны 100 и 25 нм соответственно. Наноструктуры изготовлены остросфокусированным пучком ионов Ga в монокристаллической пленке золота (111) толщиной 200 нм (Phasis, Швейцария). Лазерное излучение падало на представленный образец по нормали к плоскости нанопленки. Длина волны лазерного излучения составляла примерно 810 нм . Диаметр лазерного пучка в плоскости об-

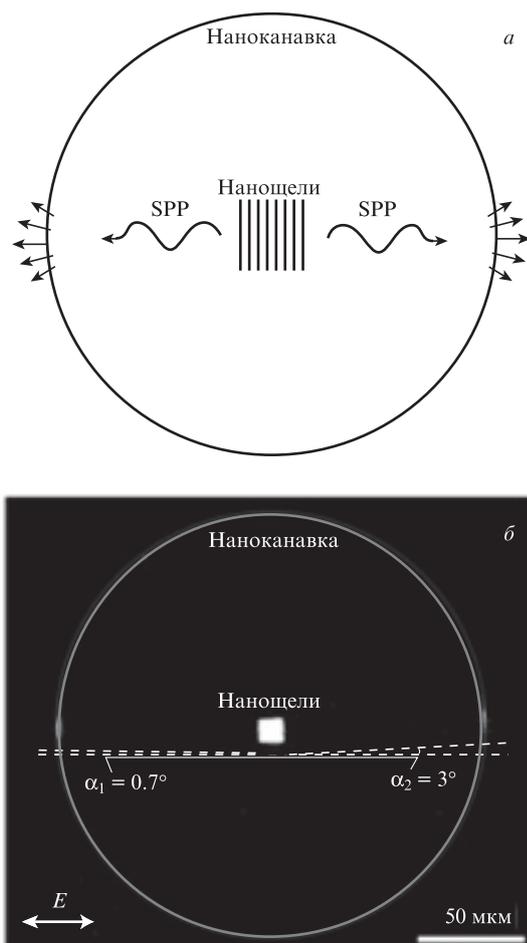


Рис.2. Схема источника плазмонных волн, включающая в себя созданные в металлической нанопленке нанощели и наноканавку в виде круга, на которой происходит рассеяние плазмонной волны (*а*), и оптическое изображение источника плазмонных волн, реализованного по этой схеме, при его возбуждении лазерным излучением с длиной волны 800 нм и с направлением поляризации E перпендикулярно нанощелям (*б*).

разца равнялся наибольшему размеру матрицы и формировался длиннофокусной линзой.

Как видно из рис.2,*б*, при выборе направления поляризации лазерного излучения, перпендикулярного нанощелям, в области наноканавки возникают два ярких источника излучения. (При смене направления поляризации лазерного излучения на ортогональное источники излучения исчезают.) Горизонтальный размер этих источников такой же, как и у дифракционно ограниченного пятна оптического микроскопа с установленным объективом $20\times$ ($NA = 0.45$). Вертикальный размер источников определяется размером плазмонной волны на расстоянии 100 мкм и составляет 8 мкм , что соответствует расчетным значениям.

Как видно из рис.2,*б*, источники, возникшие в результате рассеяния плазмонной волны на наноканавке, находятся под некоторыми углами относительно линии перпендикуляра к нанощелям. Это связано с тем, что возбуждаемые на матрице нанощелей плазмонные волны не расположены на одной прямой из-за ненулевых значений углов падения лазерного излучения α и β на подложку. Обработка экспериментальных данных показывает, что углы α и β равны 0.7 и 3 угловых градуса соответственно.

Наноямки. Другой наноструктурой, позволяющей определять параметры распространения SPP, является наноямка (рис.1,*з*). На рис.3 представлено полученное с помощью оптического микроскопа изображение образца, подобное представленному на рис.2, с тем лишь отличием, что вся поверхность внутри образованного наноканавкой круга заполнена созданными ионной литографией наноямками с диаметром 40 нм , глубиной 25 нм и периодом расположения 2 мкм . Чувствительность CCD-камеры была выбрана достаточно высокой, что позволило в эксперименте увидеть рассеяние SPP на единичной наноямке, образующей в этом случае нанолокализованный источник света. Видно, что распространение плазмонной волны сопровождается рассеянием на наноямках, что позволяет проследить направление ее распространения, а также сравнить его со случаем рассеяния плазмонной волны на наноямке.

Как видно из рис.3, при выбранной высокой чувствительности CCD-камеры, помимо источников излучения, образованных наноямками, возникает рассеяние на наноямке, которое характеризуется сложной периодической структурой. Анализ расчетных данных показывает, что

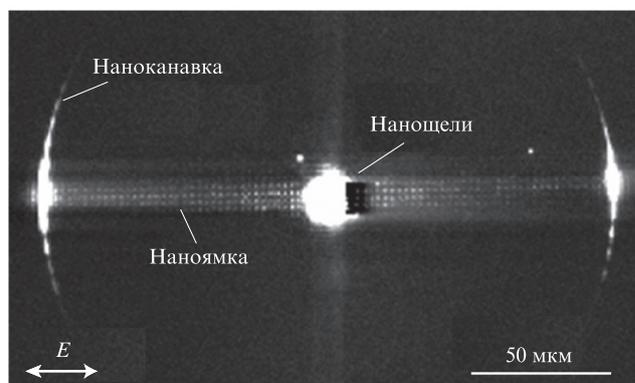


Рис.3. Оптическое изображение реализованного нанощелями источника плазмонных волн при регистрации SPP с помощью наноканавки в виде круга и наноямок при возбуждении лазерным излучением ($\lambda = 800\text{ нм}$) с направлением поляризации поля E перпендикулярно нанощелям.

это связано с дифракцией света на nanoщелях, имеющих конечную длину. Кроме этого виден артефакт, обусловленный самой CCD-камерой, который связан с миграцией зарядов между соседними пикселями камеры, что особенно сильно проявляется в направлении ее строк, вдоль которых и происходит сток зарядов. Для уменьшения влияния этого эффекта CCD-камера была ориентирована так, чтобы ее строки и, соответственно, миграция зарядов были направлены ортогонально распространению плазмонных волн. Как следствие этого от матрицы с nanoщелями, образующей самый яркий на рис.3 источник излучения, по направлениям вверх и вниз видны следы миграции зарядов, причем сигнал соответствующих пикселей CCD-камеры светлее сигнала не освещенных светом пикселей.

Результаты измерения распространения плазмонной волны с помощью наноямок представлены на рис.4. Оптическое изображение рассеяния возбужденной волны на наноямках, созданных в пленке серебра толщиной 200 нм, дано на рис.4,а. Параметры наноямок были выбраны идентичными описанным выше, на образце наноямки располагались в виде столбцов с периодом 66 мкм при расстоянии между соседними наноямками в столбце 15 мкм. Плазмонная волна возбуждалась с помощью матрицы nanoщелей длиной 200 мкм и лазерного излучения ($\lambda = 800$ нм), освещающего часть этой матрицы. Щели матрицы были параллельны столбцам из наноямок. Во избежание засветки CCD-камеры светом, прошедшим через щели, образец был расположен в микроскопе так, чтобы изображение матрицы находилось вне поля зрения CCD-камеры (слева от представленного на рис.4,а изображения).

Как видно из рис.4,а, наноямки позволяют визуализировать распространение плазмонной волны, возбуждаемой лазерным излучением с помощью матрицы nanoщелей. Видно, что из-за наличия небольшого отклонения лазерного излучения от нормали к образцу плазмонная волна тоже распространяется под некоторым углом относительно нормали к nanoщелям и столбцам из наноямок. При этом видно, что по мере своего распространения плазмонная волна затухает: амплитуды рассеяния на на-

ноямках, соответствующих разным длинам прохождения плазмонной волны, сильно различаются. На рис.4,б представлена измеренная зависимость интенсивности рассеяния распространяющейся плазмонной волны от расстояния между наноямками и источником SPP. Видно, что полученная зависимость затухания волны хорошо соответствует экспоненте с показателем, равным 95 мкм. Таким образом, измерения с помощью наноямок позволяют не только визуализировать трек плазмонной волны, но и измерять длину ее распространения.

В отдельном эксперименте были определены потери плазмонной волны на наноструктурах, использованных для зондирования поля плазмонной волны. Для этого был изготовлен образец, в котором были созданы три источника SPP идентичной геометрии с различными детекторами: одновременно наноканавки и наноямки, только наноканавки и только наноямки. В первом случае использовались nanoщели, которые позволяли эффективно возбуждать плазмонную волну лазерным излучением с длиной волны 800 нм (параметры щелей указаны в подписи к рис.2,б). Параллельно щелям на поверхности серебряной пленки были созданы семь наноканавок на расстоянии 10 мкм друг от друга. Каждая наноканавка имела длину 100 мкм, ширину 100 нм и глубину 25 нм. Между наноканавками, на расстоянии 2.5 мкм друг от друга, находились наноямки. Во втором случае использовалась та же геометрия из nanoщелей и наноканавок, но без наноямок. В третьем случае использовалась та же геометрия из nanoщелей и наноямок, но без наноканавок.

Все три типа структур «источник SPP + детектор» возбуждались лазерным излучением с $\lambda = 800$ нм в одинаковых условиях: нормальное падение, направление поляризации ортогонально nanoщелям. Сравнение рассеяния плазмонной волны на наноканавках и наноямках в трех описанных выше образцах позволило определить потери плазмонной волны в результате рассеяния на единичной наноямке и на единичной наноканавке, а также эффективность возбуждения плазмонной волны.

Так, измерения показали, что эффективность рассеяния SPP на единичной наноямке мала – 0.02% от интенсивности распространяющейся плазмонной волны. В случае наноканавки эффективность равна 5%, что на порядок больше значения, определенного в расчетах работы [30]. Отличие наших измерений от расчетов объясняется, по-видимому, известной неоднозначностью оптических констант металлических нанопленок, зависящих от способа их изготовления [40]. Зная эффективность рассеяния SPP на единичной наноканавке и считая, что других значимых каналов потерь плазмонной волны на наноканавке нет, можно определить эффективность возбуждения плазмонной волны системой nanoщелей. Найденная таким способом эффективность возбуждения лазерным излучением плазмонной волны в обе стороны от канавки составила 6.4%.

Фокусировка. В плазмонике известны различные методы фокусировки, при этом размер перетяжки волны в фокусе измеряется с помощью ближнепольной микроскопии [14] или микроскопии, основанной на излучении плазмонной волны в дальнее поле (leakage-radiation microscope) [13]. На рис.5 представлено изображение в электронном микроскопе нано- и микроstructures, позволяющей одновременно реализовать возбуждение и фокусировку плазмонной волны. Возбуждение SPP происходит за счет освещения периодической структуры сквозных

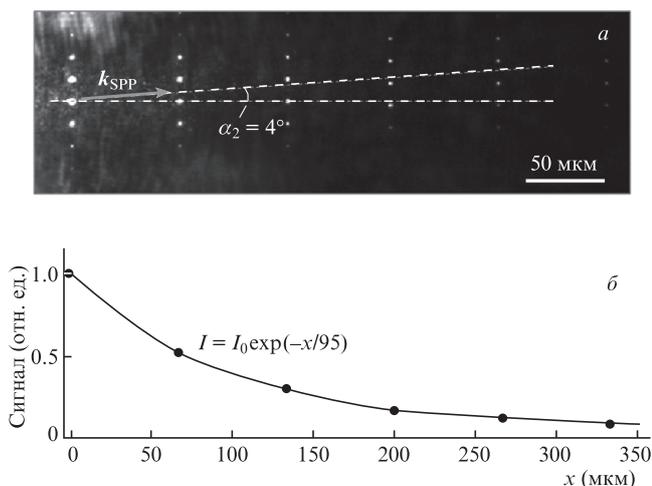


Рис.4. Измерение распространения плазмонной волны с помощью наноямок: оптическое изображение рассеяния возбужденной волны на наноямках, созданных в пленке серебра толщиной 200 нм (а), и измеренная зависимость интенсивности рассеяния на наноямках распространяющейся плазмонной волны от расстояния между наноямками и источником (б).

нанощелей в форме полукруга. Волновой вектор возбуждаемой при этом SPP имеет пространственно-неоднородное распределение: в точках пленки вблизи крайней нанощели он направлен по нормали к щели. Поэтому при распространении плазмонная волна сходится в точку, которая является геометрическим центром полукружностей, образованных нанощелями.

На практике возбудить плазмонную волну в такой системе довольно сложно. В первую очередь это обусловлено поляризационной зависимостью пропускания света нанощелями, а кроме того, технической сложностью создания пучка лазерного излучения, направление поляризации которого в каждой точке нанощели было бы ортогонально нанощелям в форме полукруга. Это приводит к тому, что на практике эффективность возбуждения плазмонных волн линейно поляризованным лазерным излучением различна в каждой точке нанощели.

На рис.5,б представлено оптическое изображение образца с нанощелями, изготовленными в пленке серебра толщиной 200 нм; внутренний радиус системы нанощелей равен 25 мкм. В области предполагаемой фокусировки плазмонной волны (геометрический центр образованных нанощелями полукружностей) расположены пять наноканавок длиной 12 мкм, шириной 110 нм и глубиной 25 нм, расстояние между которыми равно 2.2 мкм. На рис.5,в представлено оптическое изображение того же образца при освещении матрицы с нанощелями лазерным излучением с длиной волны 800 нм, направленным перпендикулярно плоскости образца. Диаметр пятна лазерного излучения составлял примерно 25 мкм. Поляризация лазерного излучения – линейная, направление ее ортогонально наноканавкам. Видно, что в этом случае в области расположения наноканавок появляется оптический сигнал, соответствующий рассеянию возбужденной на нанощелях SPP, которая распространяется по направлению к центру полукружностей, образованных нанощелями. Сигнал рассеяния показывает каустику плазмонной волны, отвечающей фокусировке SPP с углом схождения около 60°.

Минимальный размер перетяжки плазмонной волны составляет примерно 1 мкм.

Отметим, что полученная оптическая картина фокусировки плазмонной волны чрезвычайно чувствительна к параметрам возбуждающего лазерного излучения – длине волны, углу падения и поляризации. Это объясняется зависимостью от них эффективности возбуждения плазмонной волны и направлением ее волнового вектора (в соответствии с выражением (1)).

На приведенных оптических изображениях исследованного образца в отсутствие плазмонной волны (рис.5,б) и при ее возбуждении (рис.5,в) видны несовершенства поверхности серебряной нанопленки: сквозное отверстие, углубление, а также образованная в процессе создания нанопленки структура в виде бугорка. Наличие таких особенностей поверхности нанопленки приводит к потерям возбуждаемой поверхностной волны и к искажению ее волнового фронта. На рис.6 представлено оптическое изображение экспериментального образца, свободного от этих недостатков. На образце в области предполагаемой фокусировки плазмонной волны создана последовательность наноямок с расстоянием между ними 200 нм, выполняющая роль регистрирующего элемента. Изображение получено с помощью лазерного излучения с параметрами, идентичными использованным в предыдущем эксперименте.

Как видно из рис.6, в области фокуса системы нанощелей появляется яркое пятно, соответствующее рассеянию сфокусированной плазмонной волны на наноямках. Поперечное сечение пятна вдоль линии, проходящей через область фокусировки плазмонной волны, позволяет определить пространственный размер этой области – 1 мкм (см. рис.5,б).

Отметим, что интенсивность сфокусированного сигнала в четыре раза больше локальной интенсивности плазмонной волны, возникающей при прохождении лазерного излучения через систему нанощелей. Измерения показывают, что фокусировка плазмонной волны позво-

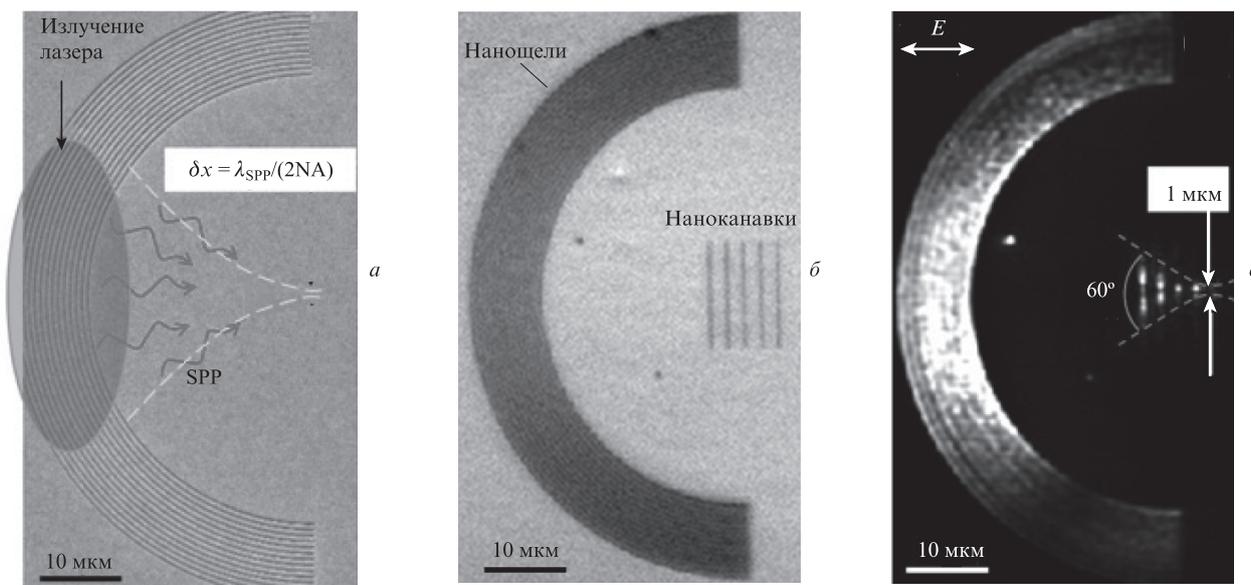


Рис.5. Фокусировка плазмонной волны: изображение в электронном микроскопе нанощелей в форме полукружностей, изготовленных в пленке серебра толщиной 200 нм, при возбуждении SPP лазерным излучением (а); оптическое изображение фокусирующего элемента на основе нанощелей и детекторов (наноканавок), расположенных в области фокусировки в отсутствие лазерного излучения (б); оптическое изображение фокусирующего элемента при облучении нанощелей лазерным излучением с длиной волны 800 нм ортогонально нанопленке при направлении поляризации излучения, ортогональном наноканавкам (в).

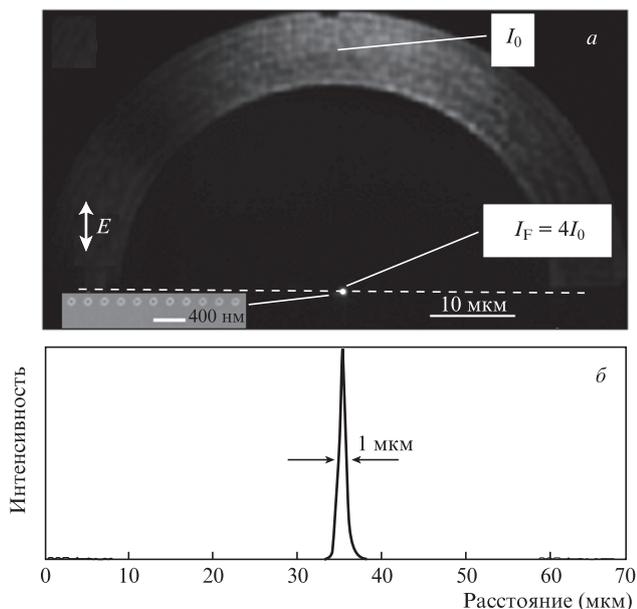


Рис.6. Фокусировка плазмонной волны. Оптическое изображение фокусирующего элемента (периодическая матрица нанощелей в форме полуокружности) при облучении нанощелей лазерным излучением ($\lambda = 780$ нм) ортогонально нанопленке серебра, в качестве детектора использовались наноямки диаметром 50 нм с расстоянием между ними 200 нм (а), а также поперечное сечение области фокусировки вдоль штриховой линии, определяющее пространственный размер области фокусировки плазмонной волны (б) (на вставке – изображение наноямок, сделанное в электронном микроскопе).

ляет значительно увеличить плотность энергии ее электромагнитного поля.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально показана возможность контроля свойств плазмонных волн, распространяющихся по поверхности металлических нанопленок, с помощью их рассеяния на созданных в пленке нанообъектах – наноканавках и наноямках. Показано, что использование такой методики позволяет измерять основные параметры плазмонных волн.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения», РФФИ (грант №17-02-01093), Фонда перспективных исследований (контракт №7/004/2013-2018 от 23.12.2013).

1. Maier S.A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (Springer Science & Business Media, 2007).
2. Klimov V.V. *Nanoplasmonics* (Singapore: Pan Stanford Publ., 2014).
3. Stockman M.I. *Opt. Express*, **19**, 22029 (2011).
4. Atwater H. A. *Sci. Am.*, **296**, 56 (2007).
5. Brongersma M.L., Shalaev V.M. *Science*, **328**, 440 (2010).

6. Zia R., Schuller J.A., Chandran A., Brongersma M.L. *Mater. Today*, **9**, 20 (2006).
7. Kuttge M., García de Abajo F.J., Polman A. *Opt. Express*, **17**, 10385 (2009).
8. Oulton R.F., Pile D.F.P., Liu Y., Zhang X. *Phys. Rev. B*, **76**, 035408 (2007).
9. Ditlbacher H. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1762 (2002).
10. Krasavin A.V., Zayats A.V. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 211101 (2007).
11. Temnov V.V., Nelson K.A., Armelles G., Cebollada A., Thomay T., Leitnerstorfer A., Bratschitsch R. *Opt. Express*, **17**, 8423 (2009).
12. Melentiev P.N., Kuzin A.A., Gritchenko A.S., Kalmykov A.S., Balykin V.I. *Opt. Commun.*, **382**, 509 (2017).
13. Radko I.P., Bozhevolnyi S.I., Brucoli G., Martín-Moreno L., García-Vidal F.J., Boltasseva A. *Opt. Express*, **17**, 7228 (2009).
14. Volkov V.S., Bozhevolnyi S.I., Rodrigo S.G., Martín-Moreno L., García-Vidal F.J., Devaux E., Ebbesen T.W. *Nano Lett.*, **9**, 1278 (2009).
15. Homola J., Sinclair S.Y., Gauglitz G. *Sens. Actuators, B*, **54**, 3 (1999).
16. Byun Kyung Min, Sung June Kim, Donghyun Kim. *Appl. Opt.*, **46**, 5703 (2007).
17. Tong L., Wei H., Zhang S., Xu H. *Sensors*, **14**, 7959 (2014).
18. Homola J., in *Frontiers in Planar Lightwave Circuit Technology, NATO Science Series II: Mathematics, Physics, and Chemistry* (Dordrecht: Kluwer, 2006, Vol. 216, p. 101).
19. Raether H. *Surface Plasmons on Smooth Surfaces* (Berlin, Heidelberg: Springer 1988).
20. Балькин В.И., Мелентьев П.Н. *УФН*, в печати (2017).
21. West P.R. et al. *Laser Photon. Rev.*, **4**, 795 (2010).
22. Boltasseva A., Atwater H.A. *Science*, **331**, 290 (2011).
23. Jer-Shing Huang et al. *Nature Commun.*, **1**, 150 (2010).
24. Melentiev P.N., Afanasiev A.E., Kuzin A.A., Gusev V.M., Kompanets O.N., Esenaliev R.O., Balykin V.I. *Nano Lett.*, **16**, 1138 (2016).
25. Dürig U., Pohl D.W., Rohner F. *J. Appl. Phys.*, **59**, 3318 (1986).
26. Betzig E.P.L.J.S., Finn P.L., Weiner J.S. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2484 (1992).
27. Bozhevolnyi S.I., Smolyaninov I.I., Zayats A.V. *Phys. Rev. B*, **51**, 17916 (1995).
28. Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W. *Nature*, **424**, 824 (2003).
29. Kuttge M., Abajo F.J.G., de Polman A. *Opt. Express*, **17**, 10385 (2009).
30. Liu J.S.Q., White J.S., Fan S., Brongersma M.L. *Opt. Express*, **17**, 17837 (2009).
31. Lypez-Tejeira F. et al. *Nat. Phys.*, **3**, 324 (2007).
32. Liu J.S.Q. et al. *Nature Commun.*, **2**, 525 (2011).
33. Kretschmann E., Raether H. *Z. Naturforsch. A*, **23a**, 2135 (1968).
34. Otto A. *Z. Phys.*, **216**, 398 (1968).
35. Lakowicz J.R., Malicka J., Gryczynski I., Gryczynski Z. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **307**, 435 (2003).
36. Zhang D., Fu Q., Yi M., et al. *Plasmonics*, **7**, 209 (2012).
37. Lopez-Tejeira F. et al. *Nature Phys.*, **3**, 324 (2007).
38. Renger J., Grafström S., Eng L.M. *Phys. Rev. B*, **76**, 045431 (2007).
39. Laluet J-Y. et al. *Opt. Express*, **15**, 3488 (2007).
40. Кузнецов С.М., Окатов М.А. *Справочник оптика-технолога* (Л.: Машиностроение, 1983).