

УДК 621.315

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА НА КОНИЧЕСКОМ КОНЦЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА, ПОКРЫТОГО СЛОЕМ ЗОЛОТА

Э.А. ДЖАНУНЦ¹, А.Ж. БАБАДЖАНИЯН²,
Р.Ж. ХАЧАТРЯН², Х.В. НЕРКАРАЯН²

¹Государственный инженерный университет Армении,

²Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 3 февраля 2004 г.)

Обнаружено явление резонансного возбуждения поверхностного плазмон-поляритона (ППП) на вершине покрытого золотом оптического волокна. Это происходит, когда энергия из волноводной моды переходит в моду ППП. Условие резонансного возбуждения ППП обеспечивается нанесением дополнительного слоя прозрачного диэлектрика определенной толщины на металлический слой. На эксперименте регистрировалась выходящая из волокна мощность излучения в процессе выхода и входа вершины волокна в жидкость. Резкие пики мощности излучения регистрировались, когда на поверхности металлического слоя возникал тонкий накрывающий слой жидкости, что свидетельствует о резонансном возбуждении ППП.

Существует большое количество теоретических работ, посвященных особенностям поверхностного плазмон-поляритона (ППП) в разных геометрических структурах [1,2], однако на эксперименте возбуждение ППП реализовано только в случае плоских поверхностей [1,2]. Между тем в структурах с цилиндрической, конической и сферической симметриями ППП приобретает совершенно новые качества. Важнейшим среди них является возможность сильной локализации волны [3-6]. В частности, в [6] было показано, что по мере приближения к концу конуса длина волны ППП уменьшается и дифракционные процессы не препятствуют его локализации в очень малых областях пространства.

Указанное явление сверхфокусировки ППП в конической структуре можно использовать для улучшения разрешающей способности нанометрического микроскопа [7]. Для этого микроскопа в качестве зонда используется покрытый металлом конический конец оптического волокна.

В настоящей работе изучается возможность перекачки волновой энергии из волноводной моды оптического волокна в моду ППП. Мы рассматриваем случай, когда радиус волокна значительно превосходит длину волны

света и процесс распространения волны можно описать методами геометрической оптики. На рис.1а представлен ход оптического луча в плоскости продольного сечения покрытого металлическим слоем конического конца волокна.

Если падающая волна распространяется вдоль оси волокна, а φ – угол конуса, то из рис.1а легко получить следующие значения для углов падения:

$$\vartheta_m = \frac{\pi - (2m - 1)\varphi}{2}; \quad m = 1; 2; 3; \dots \quad (1)$$

Здесь мы не будем рассматривать случаи $\vartheta_m < 0$, которые описывают ход луча, движущегося в обратном направлении.

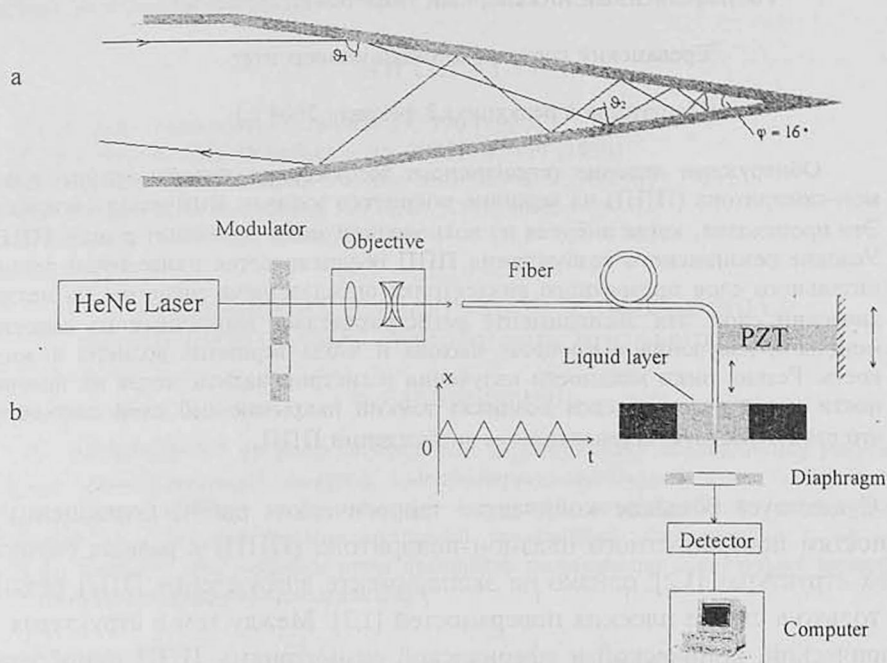


Рис.1.

Нетрудно заметить, что принцип возбуждения ППП в планарной системе по конфигурации Кричмана [1,2] очень похож на описанную здесь ситуацию. Можно предположить, что в нашем случае также может возбудиться ППП, если выполняются следующие условия:

1. Возможность туннелирования волн через покрывающий слой. Это условие выполняется при соответствующей толщине покрывающего слоя. Оценки показывают, что для золота оптимальная толщина покрывающего слоя составляет 50-80 нм.

2. Вектор магнитного поля волны должен иметь отличную от нуля

компоненту в направлении, перпендикулярном плоскости рис.1. Заметим, что в условиях конической симметрии всегда можно найти семейство плоскостей, где это условие выполняется.

3. Угол падения ϑ_{SPP} резонансного возбуждения ППП определяется по формуле [1,2]

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_1} \sin \vartheta_{SPP} = K_{SPP} . \quad (2)$$

Здесь ω — частота волны, c — скорость света, ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость волокна (плавленного кварца), K_{SPP} — волновой вектор ППП. В наших условиях, когда радиус кривизны значительно превосходит длину волны, значения K_{SPP} можно определить с помощью формулы для планарного ППП [1,2]:

$$K_{SPP} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_2 \epsilon_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}} , \quad (3)$$

где ϵ_2 и ϵ_3 — диэлектрические проницаемости металлического слоя и окружающей структуру среды. ППП возбуждятся при условии

$$\vartheta_{SPP} = \vartheta_m ; \quad m = 1; 2; 3; \dots \quad (4)$$

Это условие резонансного возбуждения ППП может реализоваться только при определенных значениях угла кона и диэлектрических проницаемостей сред. В рассматриваемой здесь ситуации контролируемое управление можно осуществить только над параметром ϵ_3 . В частности, выполнения условия (4) можно добиться нанесением на поверхность металла тонкого слоя прозрачного диэлектрика. В случае планарных ППП такие эксперименты проводились неоднократно [1,2], и было обнаружено, что наличие диэлектрического слоя по существу меняет значение ϵ_3 и, следовательно, резонансный угол. Цель проведенных нами экспериментов состояла в обнаружении процесса резонансного возбуждения ППП в окрестности покрытого металлическим слоем конического конца волокна.

Схема эксперимента представлена на рис.1б. Излучение He-Ne лазера мощностью 3 мВт входит в оптическое волокно с диаметром 130 мкм. Другой конец волокна имеет конобразную форму с углом $\varphi = 16 \pm 23^\circ$ и покрыт слоем золота толщиной около 70 нм. Приготовление тонкого конического конца волокна было осуществлено методом, описанным в [8]. Регистрировалась мощность излучения, выходящего из конобразного конца волокна в процессе его входа и выхода из жидкости (глицерина). Пьезоэлемент придавал концу волокна пилообразное колебательное движение в направлении, перпендикулярном плоскости жидкости, с амплитудой ~ 30 мкм со скоростью 3 мкм/с.

На рис.2 кривая показывает типичную зависимость мощности выходящего из волокна излучения от времени. В момент входа волокна в жидкость и выхода из него наблюдаются всплески мощности выходного излучения. Из рис.2 видно, что если в воздухе выходная мощность в относительных единицах составляет 0.1, в жидкости 0.25, то в переходной области значение выходной мощности доходит до 0.4.

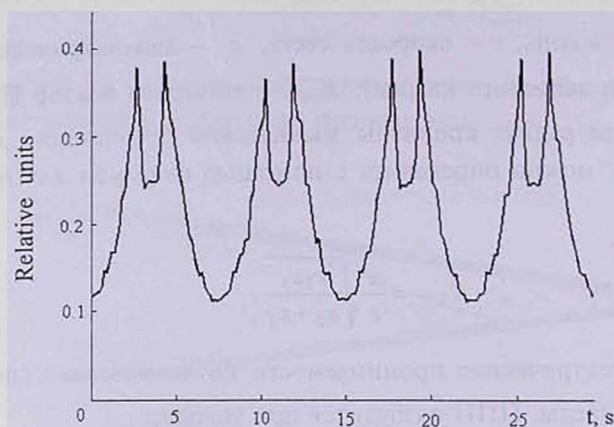


Рис.2.

Пики мощности излучения наблюдались также в случаях, когда в качестве жидкости вместо глицерина мы использовали воду или спирт. Примечательно, однако, что в случае покрывающего металлического слоя из алюминия пики выходной мощности исчезли.

Существенное увеличение выходной мощности в переходной области можно объяснить возбуждением ППП. Из-за смачивания металла на его поверхности может образоваться слой жидкости в форме мениска. В процессе выхода конического конца волокна из жидкости толщина этого слоя плавно уменьшается. Наличие дополнительного слоя диэлектрика эквивалентно увеличению значения ε_3 в (3), что согласно (2) приводит к изменению значения ϑ_{SPP} . Тогда можно найти положения, где выполняется условие резонансного возбуждения ППП (4). Тот факт, что в случае покрывающего слоя из алюминия эффект не наблюдается, также подтверждает наше предположение. Дело в том, что мнимая часть диэлектрической проницаемости алюминия велика, и на его поверхности не могут образоваться ППП.

Выявление механизма возбуждения ППП в области конического конца оптического волокна открывает новые возможности увеличения разрешающей способности нанометрического сканирующего оптического микроскопа. Как было отмечено, в конообразных структурах возможна сильная локализация ППП. Наличие дополнительного диэлектрического слоя решает проблему возбуждения ППП в таких структурах. Кроме того, дополнительный диэлектрический слой защищает структуру от возможных повреждений. От-

метим также, что возрастание интенсивности локализованной волны позволяет обнаружить различные нелинейные оптические эффекты и получить важную дополнительную информацию о поверхности.

Обнаруженный эффект может также служить основой для создания биохимических сенсоров. Хотя общая тенденция поведения выходной мощности в случаях использования разных жидкостей сохраняется и имеет форму, представленную на рис.2, однако наблюдаются также существенные отличия. Меняются как высота пиков, так и их полуширина. Это обстоятельство позволяет исследовать свойства жидкостей и идентифицировать их.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.M. Agranovich, D.L.Mills. Surface Polaritons. North-Holland, Amsterdam, 1982.
2. H. Raeter. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings. Springer, Berlin, 1988.
3. A.Lalayan, K.Bagdasaryan, P.Petrosyan, Kh.Nerkararyan, J.Ketterson. J. Appl. Phys., 91, 2965 (2002).
4. Kh.V.Nerkararyan, E.A.Janunts, K.S.Bagdasaryan. Phys. Lett. A, 269, 257 (2000).
5. Kh.V. Nerkararyan. Phys. Lett. A., 237, 103 (1997).
6. Kh.V.Nerkararyan, A.J.Babajanyan, N.L.Margaryan. J. Appl. Phys., 88, 3785 (2000).
7. U.Durig, D.Pohl, F.Rohner. J. Appl. Phys., 59, 3318 (1986).
8. R.Stockle, C.Fokas, V.Deckert, R.Zenobi, B.Sick, B.Hecht, U.P.Wild. Appl. Phys. Lett., 75, 160 (1999).

ՄԱԿԵՐԵԿՈՒՅԹԱՅԻՆ ՊԼԱՉՄՈՆ-ՊՈԼԱՐԻՏՈՆԻ ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՅԻՆ ԳՐԳՈՒՄԸ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԱԼԻԶԱՐԻ ՈՍԿԵՊԱՏ ԳԱԳԱԹԻՆ

Է.Ա.ՋԱՆՈՒՆՏ, Ա.Ժ.ԲԱԲԱՋԱՆՅԱՆ, Ռ.Ժ.ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Խ.Վ.ՆԵՐԿԱՐԱՐՅԱՆ

Բացահայտվել է մակերևութային պլազմոն-պոլյարիտոնի (ՄՊՊ) ռեզոնանսային գրգռումն օպտիկական ալիքատարի ոսկեպատ գագաթին: Դա տեղի է ունենում, երբ էներգիան ալիքատարային մոդից անցնում է ՄՊՊ մոդին: ՄՊՊ-ի ռեզոնանսային գրգռման պայմանը բավարարվել է մետաղական շերտի վրա դրոշակի հաստությամբ թափանցիկ դիէլեկտրական շերտի առկայության շնորհիվ: Փորձում գրանցվել է ալիքատարից դուրս եկած ճառագայթման հզորությունը՝ ալիքատարի գագաթը հեղուկի մեջ մտնելու և դուրս գալու ընթացքում: Դիտվել են ճառագայթման հզորության կտրուկ պիկեր, երբ մետաղական շերտի վրա առաջանում է հեղուկի բարակ ծածկող շերտ, ինչը վկայում է ՄՊՊ-ի ռեզոնանսային գրգռման մասին:

RESONANCE EXCITATION OF SURFACE PLASMON-POLARITON ON GOLD-COATED CONICAL APEX OF OPTICAL FIBER

E.A. JANUNTS, A.J. BABAJANYAN, R.J. KHACHATRYAN, KH.V. NERKARARYAN

The phenomenon of resonance excitation of surface plasmon-polariton (SPP) on a gold-coated optical fiber tip apex is revealed. It occurs at energy transfer from a waveguide mode to the SPP mode. The resonance excitation condition of SPP is realized in the presence of an additional transparent dielectric layer on the metal surface.