



ФОКУСИРОВКА ПЛАЗМОНОВ НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОПЛАСТИНКЕ ЗОЛОТА

Д. Вирмани, Институт физики твердого тела
Института Макса Планка, Штутгарт, Германия,
d.virmani@fkf.mpg.de;
Dr.H. Waasem, niklas.waasem@hubner-germany.com,
Hübner GmbH & Co. KG, Photonics@hubner-germany.com,
Кассель, Германия

Манипуляции с высоколокализованными полями поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) создают основу для широкой области их применения. В статье представлены результаты исследования ППП, возбуждаемых на монокристаллической нанопластинке золота с мелкоструктурной плазмонной линзой. Исследования рассеянного света проводились с помощью ближнепольного сканирующего оптического микроскопа. ППП возбуждались на разных длинах волн с помощью нового непрерывно перестраиваемого в видимом диапазоне лазерного источника. Выбор волнового вектора ППП, возбужденных на поверхности золота, находится в хорошем соответствии с расчетным дисперсионным соотношением.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) представляют собой возбужденные связанные колебания электромагнитного поля световой волны и электронов проводимости металла или полупроводника, распространяющиеся вдоль границы раздела металл-диэлектрик с эванесцентным электрическим полем, перпендикулярным поверхности. Благодаря локальному усилению поля и высокой чувствительности к поверхностным неоднородностям, а также и легкости осуществления манипуляции с ними, ППП оказались превосходным инструментом для многих применений. С их помощью можно визуализировать ближнее поле [1], усилить поверхностное комбинационное рассеяние [2], провести зондирование, осуществить нанолитографию, создавать интегральные схемы на основе плазмонов, устройства памяти [3] и т.д. Одному из основных требований, необходимых для создания таких интегрированных оптических устройств и датчиков, удовлетворяет возможность фокусировки поля ППП, обеспечивающей субдифракционное разрешение, существенно меньшее

PLASMON FOCUSING ON SINGLE CRYSTALLINE GOLD PLATELETS

D. Virmani, Max Planck Institute for Solid State Research,
Stuttgart, Germany, d.virmani@fkf.mpg.de,
Dr.N. Waasem, Hübner GmbH & Co. KG, Kassel, Germany,
niklas.waasem@hubner-germany.com

The manipulation of highly localized fields of surface plasmon polaritons (SPPs) forms the backbone for a vast field of applications. We investigate the SPPs excited on a single crystalline gold nanoplatelet milled with a plasmonic lens structure using a scattering type scanning near-field optical microscope. SPPs are excited at different wavelengths in the visible regime employing a new tunable continuous wave source. Wave vector selection of the SPPs by the gold structures corresponded well with the numerically calculated dispersion relationship.

BACKGROUND

Surface plasmon polaritons (SPPs) are electromagnetic excitations propagating along a metal-dielectric interface with an evanescent electric field perpendicular to the surface. Due to their local field enhancements, high sensitivity to surface inhomogeneities and the ease with which they can be manipulated, SPPs are excellent candidate's in many fields of application such as near-field imaging [1], surface enhanced Raman scattering [2], sensing, nanolithography, plasmonic based integrated circuits, memory devices [3] etc. One of the major requirements for such integrated optical devices and sensors is the possibility to focus the SPP fields to sub diffraction limit sized spots. A simple approach to achieve SPP focusing the use of periodic circular slits (plasmonic lens) etched on metal films to guide the SPP waves to the geometrical centers of the structure [4,5]. A CW-laser source is usually employed for exciting SPPs in such experiments.

EXPERIMENT

In our experiment we investigate the excitation and focusing of SPPs on a single crystalline gold (Au) nanoplatelet with a plasmonic lens structure milled on it. Figure 1 shows a scanning electron microscopy (SEM) and an atomic force measurement (AFM) image of a typical platelet. The excitation energies were chosen close to the SPP resonance according

дифракционного предела. Простым методом фокусировки ППП оказалось использование периодически расположенных круговых щелей (плазмонных линз), протравленных на металлических пленках, направляющих волны ППП к геометрическим центрам структуры [4, 5]. В таких экспериментах для возбуждения ППП обычно используется лазерный источник с непрерывным спектром излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В проведенном эксперименте исследовалось возбуждение и фокусировка ППП на монокристаллической нанопластинке золота (Au) с нанесенной на ее поверхности структурной плазмонной линзой. На рис.1 представлены изображения в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) и в атомном силовом микроскопе (АСМ) такой типовой пластинки с плазмонной линзой. Энергии возбуждения были выбраны близкими к резонансу ППП в соответствии с дисперсионным соотношением (рис.2). Дисперсионное соотношение получено путем моделирования для 20-нм пластинки Au на подложке SiO₂. Поля ППП отображались при помощи безынерционного рассеивающего сканирующего оптического микроскопа ближнего поля (s-SNOM) [6]. Экспериментальная установка представлена на рис.3. Источник света с соответствующей поляризацией сфокусирован на кончике s-SNOM, который осуществляет растровое сканирование образца. Рассеянный свет от образца направляется обратно по тому же оптическому пути, детектор оптического отклика расположен в дальнем поле. Топографические и оптические изображения генерируются одновременно. Для возбуждения поля ППП при нескольких энергиях возбуждения, близких к резонансу ППП, требуется источник с непрерывной перестройкой длин волн в диапазоне настройки от 450 до 650 нм. Лазерное устройство C-WAVE, созданное в компании Hübner, обеспечивает настройку длины волны в этом диапазоне, позволяя проводить измерения с одним источником света с высоким спектральным разрешением. Переключение длины волны управляется с помощью компьютера: длина волны устанавливается в настройках GUI и C-WAVE автоматически на заданные длины волн. Высокая выходная мощность, хорошее качество луча и узкая ширина линии позволяют получать изображения с высоким разрешением. Устройство C-WAVE исключает необходимость дополнительной юстировки для изменения оптического пути луча после переключения длин волн.

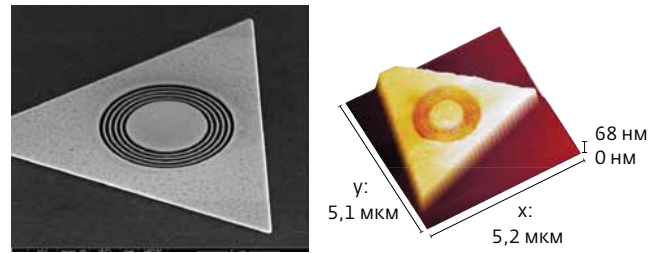


Рис.1. Экспериментальные образцы: SEM- и АСМ-изображения
Fig.1. SEM and AFM images of a typical platelet which are triangular and hexagonal in shape

to the dispersion relationship as can be seen in Fig. 2. The dispersion relationship has been obtained by simulations for a 20 nm Au platelet on a SiO₂ substrate. The SPP fields were mapped by an apertureless scattering type scanning near-field optical microscope (s-SNOM) [6].

The experimental setup can be seen in Fig. 3. A light source with appropriate polarization is focused onto the tip of the s-SNOM which raster scans the sample. The scattered light from the sample is directed back through the same pathway and is detected in the far field. Topographical and optical images are generated simultaneously. In order to map the SPP fields at several excitation energies close to the SPP resonance, a continuous wave source with a tuning range between 450–650 nm is necessary. The C-WAVE by Hübner offers wavelength tunability in this range making it possible to conduct spectrally resolved measurements with a single light source. Wavelength

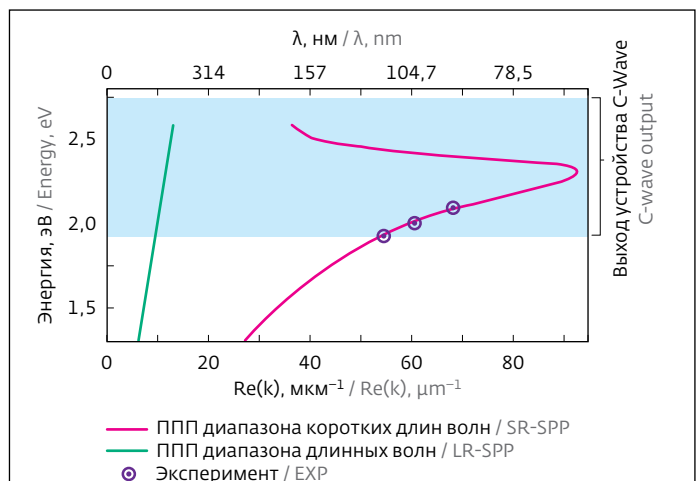


Рис.2. Дисперсионная кривая для ППП, распространяющихся вдоль границы 20-нм пластинки Au на подложке Si, покрытой слоем SiO₂ толщиной 2,5 нм
Fig. 2. Plasmon dispersion relationship for a 20 nm Au platelet on a Si substrate coated with a 2.5 nm SiO₂ layer

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью лазера C-WAVE в эксперименте возбуждались и детектировались поля ППП на нескольких энергиях возбуждения в диапазоне от 530 до 650 нм длин волн. На рис.4. можно увидеть сигнал поля ППП при 630 нм, полученный на четвертой гармонике, а также профиль волн ППП. Когда кантилевер (зондовый наконечник) работает в режиме tapping mode с частотой отклонения tapping frequency, ближнее поле вблизи наконечника модулируется в соответствии с частотой отклонения. Это позволяет достичь более высокого соотношения сигнал-шум на высоких гармониках путем фильтрации немодулированного сигнала в соответствии с псевдогетеродинным режимом детектирования [7]. На рис.4 хорошо видны ППП, возбуждаемые по краям пластинки, а также влияние структуры плазменной линзы на направление распространения ППП. Длина волн ППП, полученных на основе экспериментальных данных, находится в хорошем согласии с численными расчетами.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Исследования полей ППП с одновременной возможностью манипулирования ими являются важным аспектом для проведения многих экспериментов в опытах по развитию многих нанофотонных устройств и улучшению их свойств. Из-за сильной чувствительности получаемых полей от природы среды возбуждения, ее размерности и геометрии в таких экспериментах необходимо вести исследования на разных волнах возбуждения, то есть использовать источники с разными длинами волн.

Устройство C-WAVE обеспечивает настройку в видимом (450–650 нм) и в ИК- (900–1300 нм) диа-

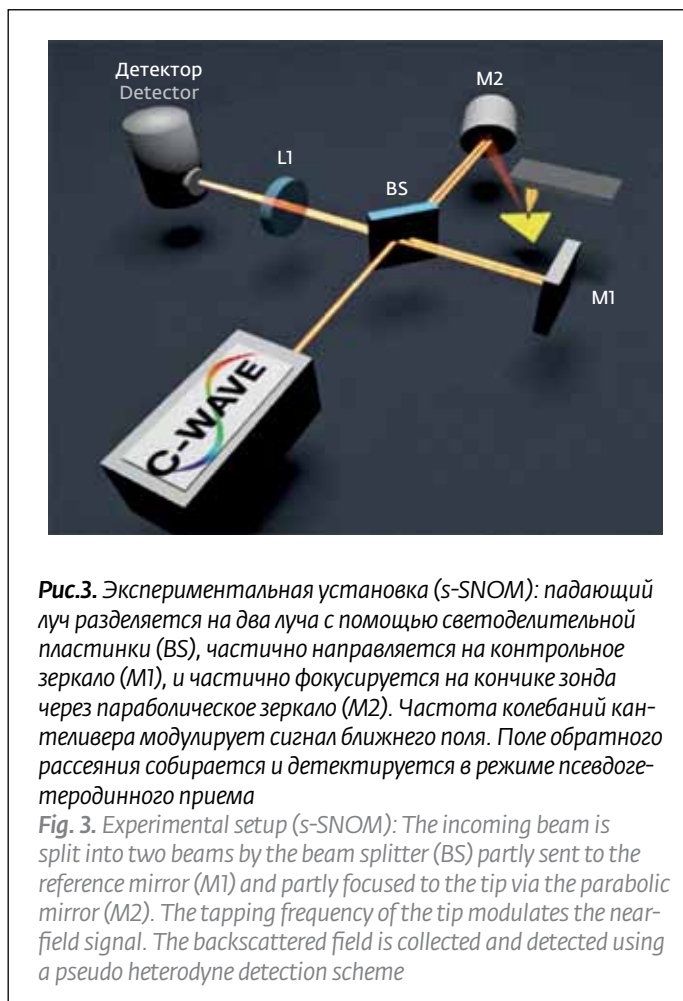


Рис.3. Экспериментальная установка (s-SNOM): падающий луч разделяется на два луча с помощью светоделительной пластинки (BS), частично направляется на контрольное зеркало (M1), и частично фокусируется на кончике зонда через параболическое зеркало (M2). Частота колебаний кантилевера модулирует сигнал ближнего поля. Поле обратного рассеяния собирается и детектируется в режиме псевдогетеродинного приема

Fig. 3. Experimental setup (s-SNOM): The incoming beam is split into two beams by the beam splitter (BS) partly sent to the reference mirror (M1) and partly focused to the tip via the parabolic mirror (M2). The tapping frequency of the tip modulates the near-field signal. The backscattered field is collected and detected using a pseudo heterodyne detection scheme

switching is computer controlled: The wavelength is set in the GUI and C-WAVE tunes to the set wavelength automatically. The high output power, good beam quality and the narrow linewidths allows capturing of sharp images. No changes to the optical beam path were necessary after switching wavelengths owing to its high pointing stability.

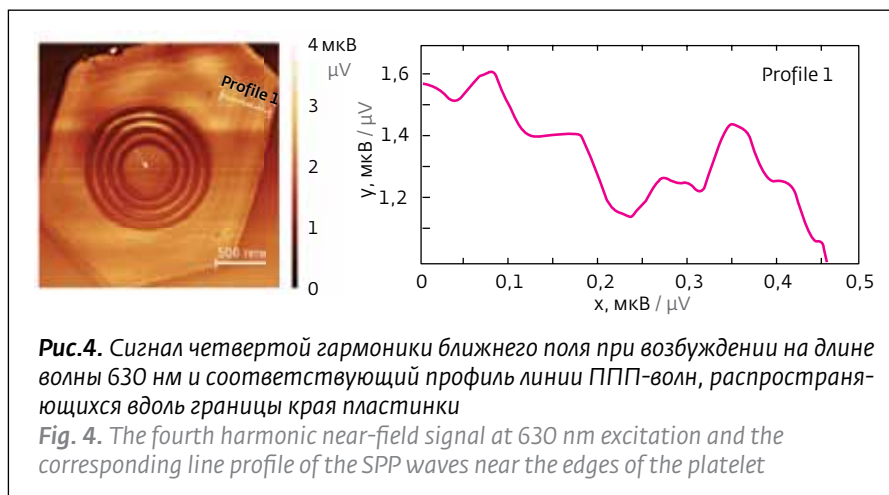


Рис.4. Сигнал четвертой гармоники ближнего поля при возбуждении на длине волны 630 нм и соответствующий профиль линии ППП-волн, распространяющихся вдоль границы края пластинки

Fig. 4. The fourth harmonic near-field signal at 630 nm excitation and the corresponding line profile of the SPP waves near the edges of the platelet

RESULTS

With the help of C-WAVE we were able to excite and probe the SPP fields at several excitation energies ranging from 530 to 650 nm. The fourth harmonic optical signal of the SPP field at 630 nm as well as the line profile of the SPP waves can be seen in Fig. 4. As the tip is operated in tapping mode the near-field in the vicinity of the tip is modulated according to the tapping frequency. This enables to reach a higher signal to noise ratio



пазонах, которые являются наиболее важными режимами в большинстве плазмонных экспериментов. Компактная конструкция, высокое спектральное качество луча, широкий диапазон настройки, а также легкость и скорость переключения длины волны делают устройство C-WAVE очень удобным и простым в использовании для таких экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **W.L. Barnes, A. Dereux, T.W. Ebbesen.** Surface plasmon subwavelength optics. – *Nature*, 2003, v. 424, p. 824–830.
2. **K. Kneipp, M. Moskovits, H. Kneipp.** Surface-enhanced Raman scattering: physics and applications (Vol. 103). – Springer Science and Business Media, 2006.
3. **E. Ozbay.** Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. – *Science* 2006, v. 311, p. 189–193.
4. **Y. Fu and X. Zhou.** Plasmonic lenses: a review. – *Plasmonics*, 2010, v. 5, p. 287–310.
5. **Z. Liu, J. M. Steele, W. Srituravanich, Y. Pikus, C. Sun, X. Zhang.** Focusing surface plasmons with a plasmonic lens. – *Nano Lett.*, 2005, v. 5, p. 1726–1729.
6. **S. Patane, P. G. Gucciardi, M. Labardi, M. Allegrini.** Apertureless near-field optical microscopy. – *Riv. Nuovo Cimento*, 2004, 27, 1–46.
7. **N. Ocelic, A. Huber, R. Hillenbrand.** Pseudoheterodyne detection for background-free near-field spectroscopy. – *App. Phys. Lett.*, v. 89, (101124).

in higher harmonics by filtering the unmodulated signal following a pseudo-heterodyne detection scheme [7]. SPPs excited at the edges of the platelet as well as the effect of the plasmonic lens structure on the direction of SPP propagation can be seen clearly in the figure. The wavelength of the SPP waves obtained from the experimental data matched well with the numerical predictions.

OUTLOOK

Probing and manipulating SPP fields at resonance is an important aspect in many experiments designated to the improvement and development of many nanophotonic devices. Due to the strong dependency on the nature, dimensionality and geometry of the excitation medium, sources at different wavelengths are required in such experiments. The C-WAVE offers a tuning in the visible (450–650 nm) and in IR (900–1300 nm) range, which are the most important regimes in most plasmonic experiments. The compact design, high spectral quality of the beam, wide tuning range and the ease and speed with which wavelength switching is achieved makes the C-WAVE a very convenient and easy to integrate tool for such experiments.