

УДК 621.793+537.533.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ В ПЕРИОДИЧЕСКИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ МЕТОДОМ ФОТОННОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

В. М. Ясинский, Е. В. Ивакин, А. В. Суходолов, А. Я. Хайруллина, А. Н. Кокиц

Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ, пр-т Независимости 68, г. Минск, Беларусь
E-mail: yasin@dragon.bas-net.by

Введение

В последнее время значительный интерес вызывают эффекты взаимодействия излучения оптического диапазона с наноразмерными проводящими структурами в связи с возможностью реализации на их основе оптических элементов с размерами меньше длины волны [1, 2]. В основе работы таких оптических элементов лежит механизм возбуждения светом в проводящих структурах плазмон-поляритонов. Возможности ближнеполевой оптической микроскопии позволяют эффективно исследовать процессы возбуждения плазмон-поляритонов и их взаимодействия с проводящими наноразмерными структурами. Особенно эффективно позволяет это сделать так называемый фотонный сканирующий туннельный микроскоп (ФСТМ) – разновидность сканирующего ближнеполевого оптического микроскопа (СБОМ).

Для проведения таких исследований наночастицы или структуры на их основе, как правило, изготавливаются методом электронной литографии либо методом сфокусированного ионного пучка. Это достаточно универсальные методы, которые позволяют изготовить частицу или ансамбль частиц со строго заданными размерами, однако они достаточно дороги и не всем доступны. В настоящей работе для создания наноструктурированных металлических образцов использовался метод лазерной модификации металлических пленок.

Эксперимент

Лазерная модификация пленок осуществлялась путем воздействия на пленку пространственно модулированным лазерным излучением. Пространственная модуляция излучения осуществлялась за счет интерференции двух волн, падающих на поверхность пленки под углами примерно $\pm 12^\circ$. Использовалось излучение второй гармоники YAG лазера ($\lambda = 532$ нм) с длительностью импульса ~ 12 нс и частотой повторения 10 Гц. Время экспозиции соответствовало приблизительно 100–200 импульсам. Плотность энергии варьировалась в диапазоне 10–70 мДж/см². Степень модификации пленки контролировалась путем наблюдения дифракции излучения гелий-неонового лазера на создаваемой решетке. Модифицированные таким образом пленки исследовались далее методом фотонной сканирующей туннельной ближнеполевой оптической микроскопии. Для возбуждения в наноструктурированных ме-



таллических пленках плазмон-поляритонов использовалась геометрия Кречмана, когда пленка освещалась излучением лазера в режиме полного внутреннего отражения, а зонд СБОМ работал в режиме сбора рассеянного излучения. Угол падения излучения на пленку составлял $\sim 60^\circ$. Исследовались два типа пленок на кварцевых подложках: пленка меди, изготовленная методом лазерной электродисперсии [3], и пленка золота (метод магнетронного распыления).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены топографические и оптические изображения модифицированной пленки меди. Анализ топографических изображений показал, что лазерная модификация пленки пространственно модулированным лазерным излучением привела к образованию периодической структуры на поверхности пленки, состоящей из равноотстоящих полос, отличающихся высотой и структурой поверхности. Там, где интенсивность излучения мала, поверхность осталась немодифицированной, а там, где интенсивность излучения значительна, образовались более крупные частицы и высота полос за счет этого увеличилась примерно на 15–20 нм. На рис. 2 представлен фрагмент изображения модифицированного участка в более крупном масштабе и соответствующее сечение. Видно, что размер частиц в плоскости X,Y составляет примерно 100 нм. Размер частиц меди до модификации, согласно данным, полученным с помощью электронного микроскопа, составлял примерно 5 нм. Образование более крупных частиц, видимо, произошло за счет плавления мелких частиц.

Оптические ближнеполевые изображения получены с использованием излучения двух длин волн ($\lambda = 633$ нм и $\lambda = 532$ нм) и соответственно для двух ортогональных поляризаций на каждой длине волны. На рис. 1 представлены оптические изображения для $\lambda = 532$ нм. Сравнивая оптические и топографические изображения на рис. 1, можно увидеть, что они значительно отличаются друг от друга. Более того, отличаются друг от друга и оптические изображения для *s*- и *p*-поляризаций. Оптические изображения имеют более сложный вид. Они характеризуются большим количеством светлых и темных полос по сравнению с топографическим изображением. Это хорошо проявляется в различии Фурье-спектров соответствующих сечений. Вместе с тем, оптические и топографические изображения имеют определенное сходство, состоящее в том, что светлые и темные полосы ориентированы в соответствии с полосами на топографическом изображении. Следует отметить, что характер оптического изображения соответствующего одной частице (рис. 3), имеет совсем другой вид. Аналогичные изображения для одной частицы получены экспериментально и теоретически в работе [4].

На рис. 4 представлено топографическое изображение модифицированной пленки золота, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (а), и соответствующее сечение (б). Сравнивая это изображение с топографическим изображением пленки меди (рис. 1), можно установить, что характер модификации пленки золота и пленки меди отличается. При воздействии лазерного излучения на пленку меди за счет плавления образуются более крупные частицы и поверхность в этих местах становится выше, по сравнению с местами, где модификации не было. В случае пленки золота происходит понижение уровня поверхности в

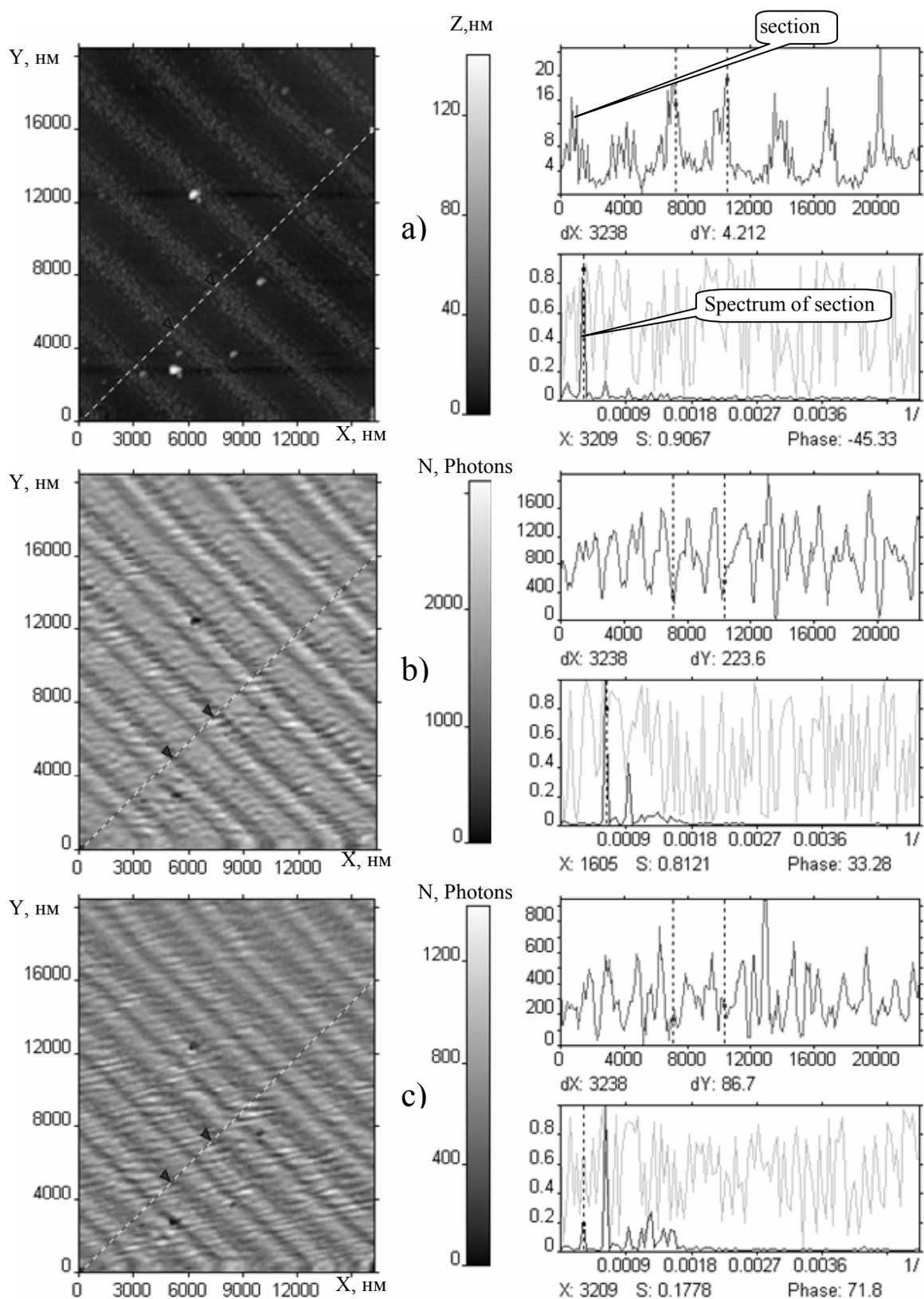


Рис. 1. Топографическое (а) и оптические (б, в) изображения модифицированной пленки меди, $\lambda = 532$ нм; б) р-поляризация, в) s-поляризация

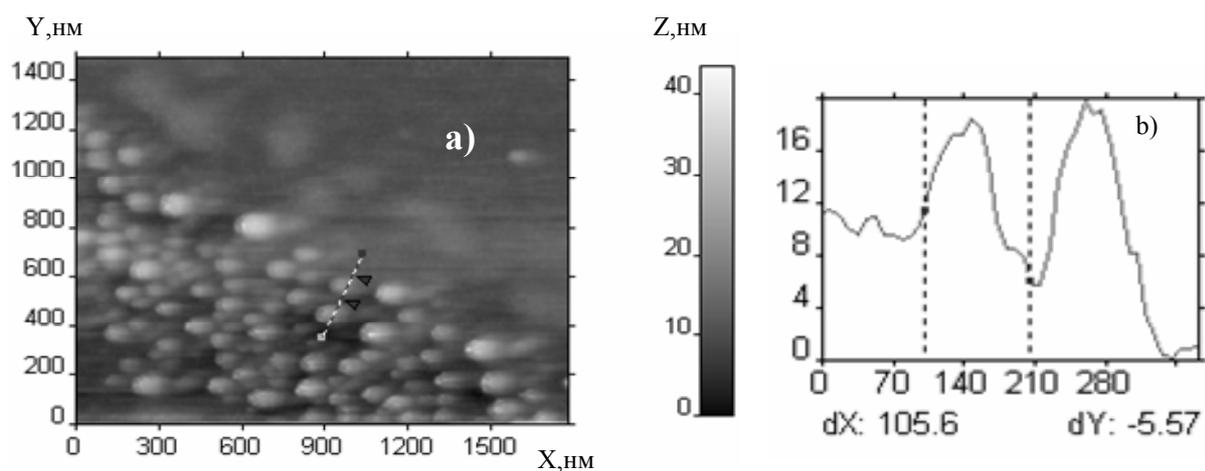


Рис.2. Топографическое изображение в увеличенном масштабе, (а) и сечение (b)

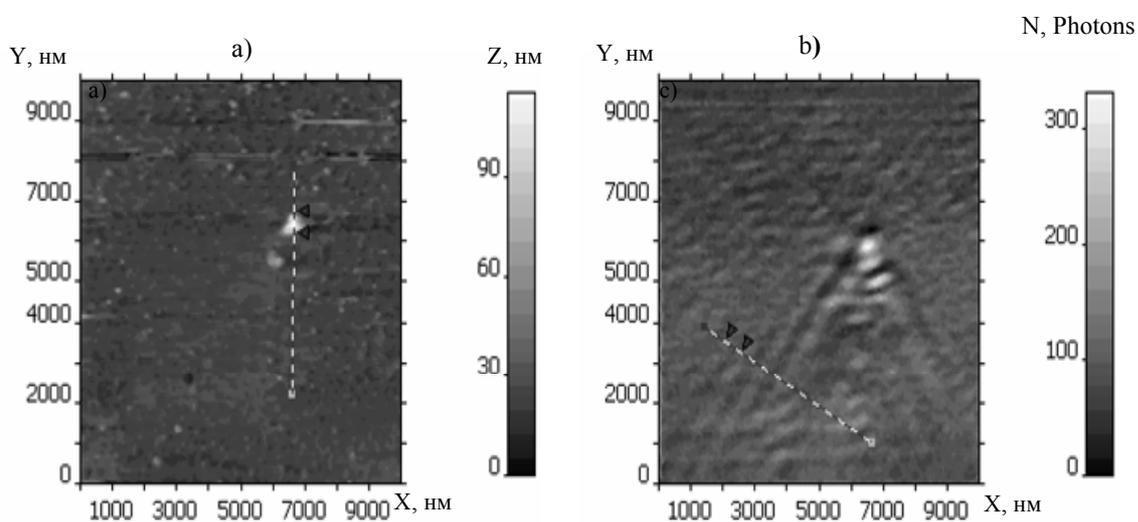


Рис. 3. Топографическое (а) и оптическое (b) изображение одной частицы

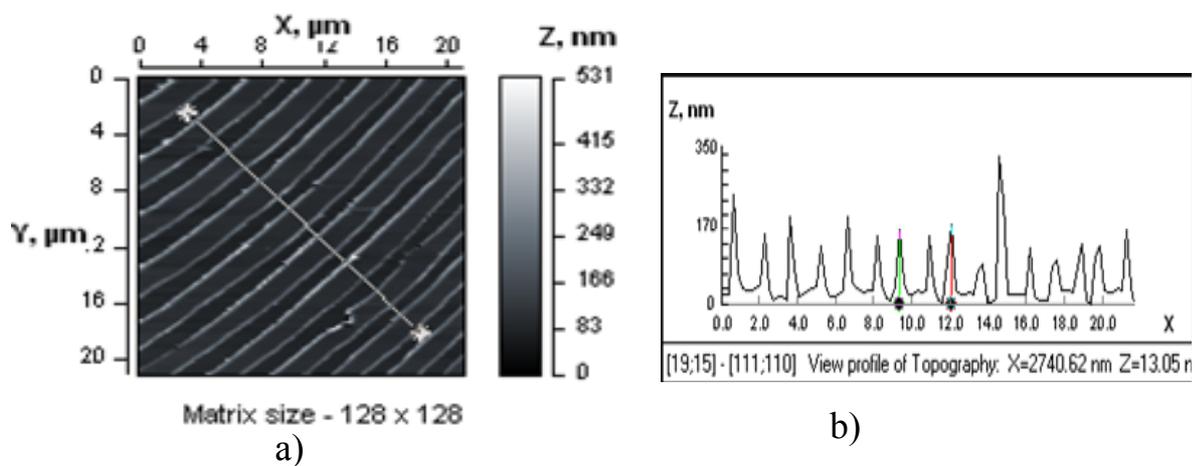


Рис. 4. Топографическое изображение модифицированной пленки золота, (а) и сечение (b)

местах модификации с образованием канавок, но при этом по краям канавок возникают узкие бортики высотой порядка 10 нм над уровнем немодифицированной поверхности. Это различие, видимо, связано как с разными значениями температуры плавления, теплопроводности и коэффициента поверхностного натяжения расплава для меди и золота, а также с различием толщины пленок и методов их изготовления. Оптические изображения модифицированной пленки золота для s - и p -поляризаций представлены на рис. 5. Они практически одинаковы, но в целом отличаются от аналогичных изображений для модифицированной пленки меди.

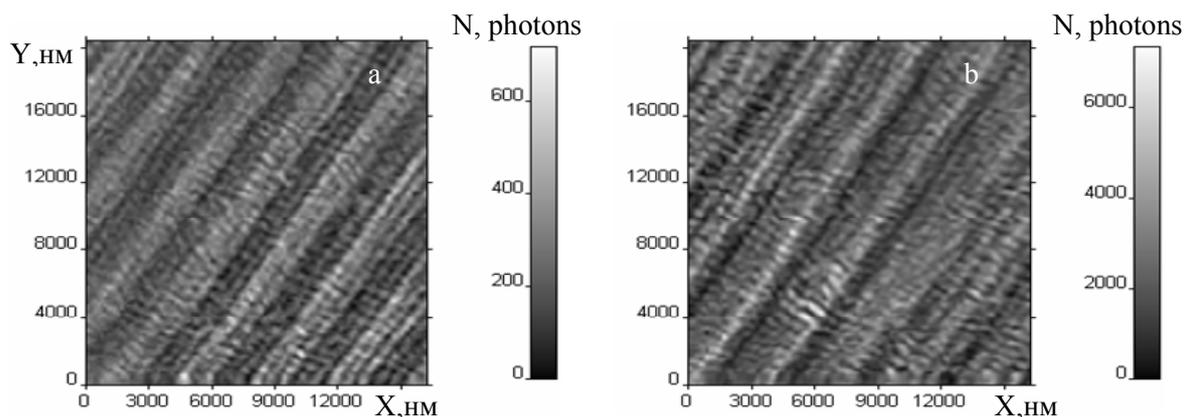


Рис. 5. Оптические ближнеполевые изображения модифицированной пленки золота: а) $\lambda = 532$ нм, p -поляризация, б) $\lambda = 532$ нм, s -поляризация

Для качественного объяснения полученных результатов воспользуемся понятием фотонных и плазмон-поляритонных кристаллов. Как известно, фотонными кристаллами называют структуры с пространственно-периодической диэлектрической проницаемостью и периодом порядка длины волны. Характерная особенность оптических характеристик фотонных кристаллов – образование фотонных запрещенных зон. По аналогии структуры с периодически наноструктурированными металлами называют плазмон-поляритонными кристаллами. Для таких кристаллов характерной особенностью является наличие плазмон-поляритонных запрещенных зон. Если рассматривать модифицированные металлические пленки как двумерные плазмон-поляритонные кристаллы, то образование строго упорядоченных оптических изображений можно объяснить тем, что в результате возбуждения поверхностных и локализованных плазмонов, а также их взаимодействия (интерференции) с падающей и дифрагированными оптическими полями образуются запрещенные и разрешенные зоны, в которых соответственно отсутствует либо присутствуют оптические поля. Это объяснение качественно согласуется с результатами работ [5, 6].

Заключение

Представлены результаты исследования модифицированных пространственно модулированным лазерным излучением пленок меди и золота методом фотонной сканирующей туннельной микроскопии. Установлено, что оптические изображения имеют свои особенности по сравнению с топографическими изображениями, которые можно объяснить возбуждением и интерференцией плазмон-поляри-

тонов. Показано, что с помощью лазерной модификации металлических пленок при определенных условиях можно создавать периодические наноструктурированные системы, которые обладают свойствами двумерных плазмон-поляритонных кристаллов. Такие кристаллы могут использоваться для управления параметрами световых полей.

Литература

1. Girard C, Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68, Pp. 1883–1933.
2. Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W. // Nature. 2003. Vol. 434. Pp. 824–830.
3. Kozhevnikov V.M., Yavsin D.A., Kouznetsov V.M. etc. // J.Vac. Sci. Technol. B. 2000. Vol. 18. P. 1402.
4. Salerno M., Fe'lidj N., Krenn J.R., etc. // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 63. 165422.
5. Salerno M., Krenn J.R., Hohenau A, etc. // Optics Communications. 2005. Vol. 248. Pp. 543–549.
6. Smolyaninov I. I., Atia W., Davis C.C. // Phys. Rev. B. Vol. 59. Pp. 2454.