

06:07

## Взаимодействие поляризованного света с гребешковыми металлизированными наноструктурами

© И.А. Словинский, Р.П. Сейсян, М.Э. Сасин, И.Е. Панайотти, М.В. Максимов, С.О. Когновицкий

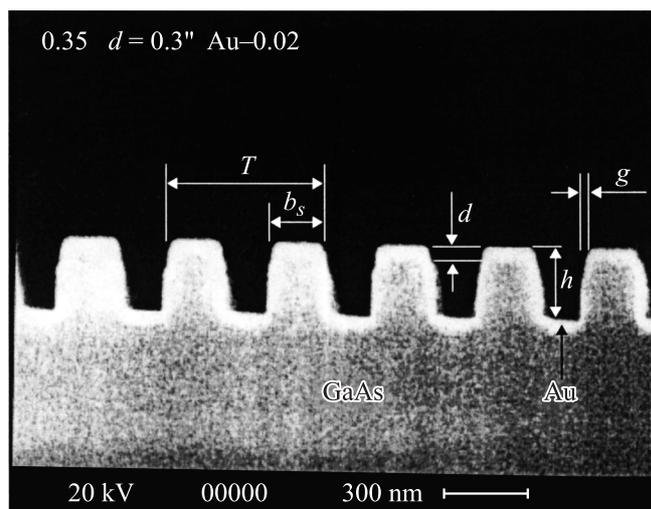
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: ilya@slovinsky.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2011 г.

Исследовались металлизированные золотом (20 nm) периодические структуры (период  $T = 350$  nm) с прямоугольным профилем, сформированные на поверхности подложки из GaAs. Спектры отражения линейно поляризованного света в диапазоне 600–1200 nm обнаруживают резкий максимум поляризационного контраста (более 20 крат) при 720–760 nm, его зависимость от угла поворота образца аппроксимируется функцией  $\cos^6\theta$ . Образование контраста и его особенности связываются с возбуждением поверхностных плазмонов в вертикальных стенках структуры на границе металл–воздух.

В работе исследовались металлизированные гребешковые структуры, сформированные на поверхности подложки из GaAs методом реактивного ионного травления через периодическую маску в фоторезисте, проэкспонированную с помощью оптической интерференционной засветки гелий-кадмиевым лазером. Слой золота толщиной в 20 nm был нанесен методом термического вакуумного напыления. На рис. 1 представлено изображение поперечного сечения структуры, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа. Ранее такие структуры исследовались в [1], а в [2] рассматривалась возможность их использования в оптических дисках памяти.

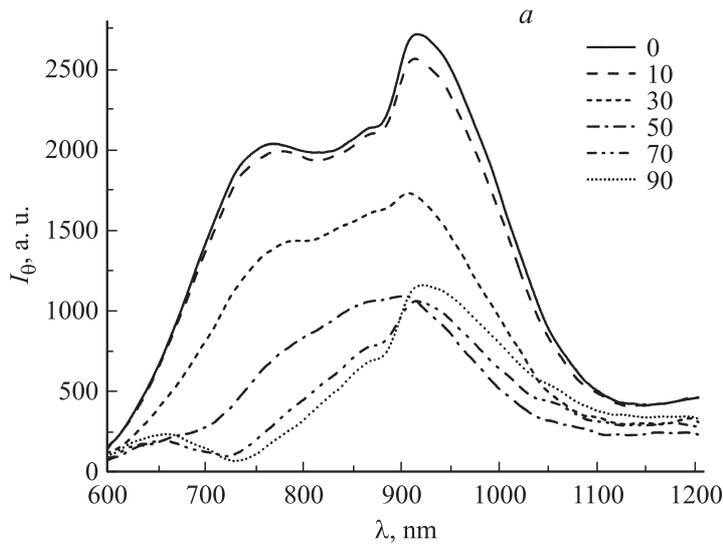
В процессе работы исследовались спектры отражения линейно поляризованного света от металлизированных гребешковых структур в диапазоне длин волн от 600 до 1200 nm. Источником света служила лампа накаливания. Регистрация сигнала производилась при помощи фотоэлектронного умножителя, развертка по длине волны обеспечивалась автоматизированным монохроматором с системой синхронного



**Рис. 1.** Изображение скола структуры, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа:  $T$  — период решетки,  $b_s$  — ширина гребешка,  $d$  — толщина слоя золота на горизонтальных плоскостях,  $g$  — толщина слоя золота на вертикальных плоскостях,  $h$  — глубина решетки.

детектирования. Образец закреплялся на вращающемся держателе, который обеспечивал точность установки по углу порядка  $20'$ . На пути между источником излучения и детектором свет проходил через первую поляризующую призму (поляризатор), и на образец под нормальным углом падал поляризованный плоскопараллельный пучок света. Излучение, отраженное от образца, проходило через вторую поляризующую призму (анализатор) и принималось системой детектирования. Важной особенностью измерительной системы являлась весьма малая расходимость пучка света от источника, приближающая условия регистрации сигнала к работе с лазером. Это достигалось за счет коллимации излучения.

Оценку расходимости пучка света от лампы можно произвести из соображений геометрической оптики. Так как ограничивающая щель находится в двойном фокусе линзы и на ней получено изображение лампы, то основополагающими параметрами для определения расходи-



**Рис. 2.** *a* — спектры интенсивности  $\theta$ , где  $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ , отраженного излучения в зависимости от угла между направлением вдоль гребешков и вектором поляризации света; *b* — спектр поляризационного контраста  $I_0/I_\theta$ , где  $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ , в зависимости от угла между направлением вдоль гребешков и вектором поляризации света.

мости пучка является величина ограничивающей щели  $d_1$  и фокусное расстояние линзы  $F_2$ . Угол расходимости  $\alpha$  можно определить из соотношения

$$\tan \alpha = \frac{d_1}{2F_2}. \quad (1)$$

Так как  $d_1 \ll F_2$  ( $d_1 = 1 \text{ mm}$ ,  $F_2 = 75 \text{ mm}$ ), то

$$\alpha \approx \frac{d_1}{2F_2} \approx 0.007 \text{ rad} = 0.382^\circ. \quad (2)$$

На практике производилась тонкая юстировка для выбранного диапазона длин волн за счет малого смещения линзы относительно фокусного расстояния  $F_2$ , что позволило получить расходимость пучка порядка нескольких миллиметров при длине оптического пути света  $L$

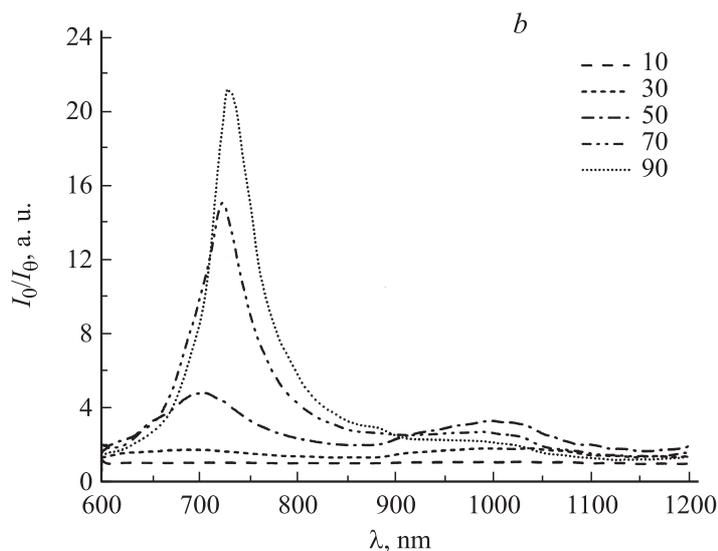
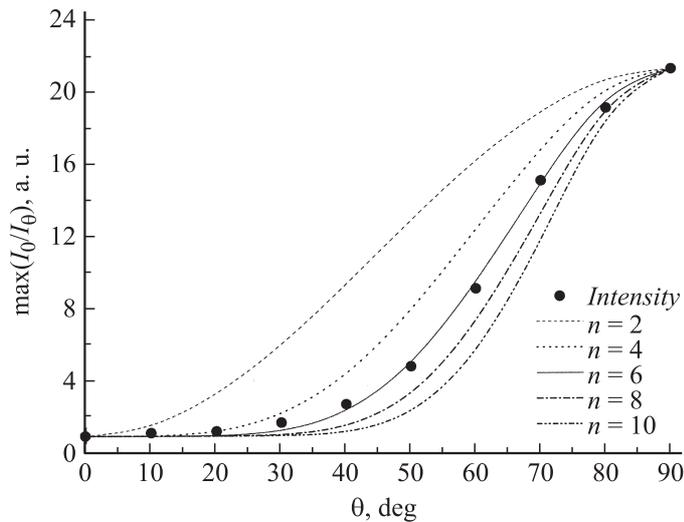


Рис. 2 (продолжение).

около 10 м. Таким образом, угол расходимости пучка составляет около 0.0003 рад или 0.017°.

В ходе работы была исследована серия образцов с периодом структуры около 300 нм. Измерение спектра отражения от образца проводилось для различных его положений вокруг оси нормального падения: вектор поляризации света направлен вдоль гребешков ( $\theta = 0^\circ$ ), перпендикулярно гребешкам ( $\theta = 90^\circ$ ), а также под углами  $\theta$  от 10 до 80° с шагом 10°. На рис. 2,а представлены экспериментально полученные спектры отражения для различных углов поворота полос относительно электрического вектора света в плоскости, перпендикулярной вектору Пойнтинга. Спектры имеют довольно сложную структуру, содержащую ряд максимумов и минимумов.

Для более наглядного представления результатов первичные спектры подвергались обработке. Спектр, полученный для угла поворота образца 0°, последовательно делился на спектр для каждого следующего положения по углу поворота образца. В результате были получены зависимости интенсивности поляризационного контраста (ПК)



**Рис. 3.** Зависимость амплитуды максимума  $\max(I_0/I_\theta)$ , где  $\theta = 10^\circ, 30, 50, 70, 90^\circ$ , поляризационного контраста от угла (точки). Линии — зависимости, пропорциональные  $\cos^n \theta$ , где  $n = 2, 4, 6, 8, 10$ .

от длины волны (рис. 2, *b*). Его рассмотрение обнаруживает весьма острый основной спектральный максимум при 720–760 nm, достигающий в рассматриваемой серии образцов 20-кратного превышения „параллельного“ отражения над „перпендикулярным“. (Отметим, что при некоторых условиях ПК мог достигать по амплитуде величины порядка 400 [2]). Существенной особенностью спектра ПК является наличие второго, менее интенсивного максимума при длине волны около 1020 nm, что около полутора раз больше первого по длине волны. Принципиально важно также сравнить спектральное положение основного максимума с периодом решетки  $p$ , который оказывается более чем вдвое меньше „резонансной“ длины волны.

На основе полученных экспериментальных данных были построены зависимости величины поляризационного контраста от угла поворота образца (рис. 3). Сплошными линиями показаны зависимости, пропорциональные  $\cos^n \theta$ . Экспериментальная кривая хорошо аппроксимируется функцией, пропорциональной  $\cos^6 \theta$ . Интересно сравнить эту

зависимость с законом Малюса, которому соответствует  $n = 2$ . Эта зависимость оказывается существенно сложнее. Положение максимума поляризационного контраста по длине волны в зависимости от угла поворота образца, как выясняется, также зависит от  $\theta$ ; при его увеличении максимум ПК смещается в сторону больших длин волн. Величина смещения не превышает 50 nm.

Таким образом, анализ спектров отражения свидетельствует о невозможности простого объяснения наблюдаемых зависимостей поляризующими свойствами дифракционной решетки. Наиболее вероятной представляется возможность возбуждения поверхностных плазмонов (ПП) в вертикальных стенках гребешковой структуры на границе металл–воздух. Условия и способы возбуждения поверхностных плазмонов давно и хорошо изучены. Этому вопросу посвящено большое количество научных статей и монографий, например [3,4]. Возникновение плазмонных колебаний на границе „металл–диэлектрик“ становится возможным, если параллельная поверхности компонента импульса фотона достигает значений, при которых на заданной частоте света выполняется дисперсионное соотношение:

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m(\omega)\varepsilon_d(\omega)}{\varepsilon_m(\omega) + \varepsilon_d(\omega)}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_m(\omega)$  и  $\varepsilon_d(\omega)$  — диэлектрические проницаемости металла и воздуха соответственно, т. е. волновой вектор ПП равен продольной компоненте волнового вектора фотона.

Максимальное поглощение оптической энергии происходит на длинах волн, соответствующих дисперсионному уравнению (3). С его помощью можно оценить величину волнового вектора и длину волны плазмонных колебаний, основываясь на экспериментальных данных. Если считать, что оптические свойства металла согласуются с законом дисперсии Друде

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pl}^2}{\omega^2}, \quad (4)$$

где  $\omega_{pl}$  — плазменная частота свободного электронного газа в золоте ( $\hbar\omega_{pl} \approx 9.0$  eV), то при длине волны фотонов  $\lambda \approx 740$  nm ( $\hbar\omega \approx 1.68$  eV) и  $\varepsilon_d(\omega) = 1$  волновой вектор плазмона оказывается примерно равным  $k_{sp} = 8.65 \cdot 10^6$ , а длина волны ПП —  $\lambda_{plas} = 727$  nm.

В рассматриваемой системе ПП могут иметь только ТМ-поляризацию [5], следовательно, максимальный поляризационный контраст должен достигаться при угле  $90^\circ$  между вектором поляризации падающего света и границей раздела сред, что хорошо согласуется с экспериментом.

То, что положение максимума поляризационного контраста смещается по оси длин волн при изменении угла поворота образца, возможно, связано с тем, что вертикальные стенки гребешков образца не являются абсолютно отвесными.

Важным свойством ПП является их сильная локализация вблизи границы раздела сред, т.е. электрические поля экспоненциально спадают по мере удаления от нее. Однако в исследуемой системе не следует исключать возможность перекрытия электрических полей при распространении ПП вдоль вертикальных стенок внутри одной лунки. Данный вопрос требует отдельного исследования и будет являться предметом будущих публикаций.

## Список литературы

- [1] *Averkiev N.S., Kognovitsky S.O., Seisyan R.P., Travnikov V.V.* // Nanostructures: Physics and Technology (International Symposium). St. Petersburg, June 14–18, 1999. P. 38–41.
- [2] *Сейсян Р.П.* Патент № 2195026, 2002.
- [3] *Teng Y.Y., Stern E.A.* // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 511.
- [4] *Климов В.В.* Наноплазмоника. / 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2010. 480 с.
- [5] *Stefan A. Maier.* Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer Science, 2007.