

06:07

Цилиндрические многослойные металлодиэлектрические структуры

© М.Е. Сасин¹, Н.Д. Ильинская¹, Ю.М. Задиранов¹,
Н.А. Калитеевская^{2,3}, А.А. Лазаренко³, В.А. Мазлин^{2,3},
П.Н. Брунков^{1,2,3}, С.И. Павлов¹, М.А. Калитеевский^{1,2,3}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический
университет РАН

E-mail: m.kaliteevski@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2015 г.

Описан метод создания цилиндрических структур, состоящих из тонкого металлического слоя и многослойного брэгговского диэлектрического отражателя. Формирование структур экспериментально наблюдалось в результате отрыва от подложки и скручивания тонкого слоя золота с нанесенным на него многослойным SiO₂/TiO₂ брэгговским отражателем. Предполагается, что подобные структуры могут представлять интерес для создания новых оптоэлектронных приборов.

Таммовские плазмоны (ТП) — состояния электромагнитного поля, локализованные на границе металла и брэгговского отражателя, были недавно теоретически предсказаны [1] и экспериментально обнаружены [2]. Структуры на основе ТП могут быть использованы для создания лазеров [3], источников одиночных фотонов [4], оптических интегральных схем [5,6]. Структуры с металлическими слоями внутри микрорезонатора [7,8] представляют интерес для создания вертикальных лазеров с органической активной областью и электрической накачкой, поскольку особенности ТП могут быть использованы для подавления поглощения света металлом [8]. Рядом интересных свойств обладают цилиндрические таммовские плазмоны [9].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возможности создания цилиндрических и спиральных структур с ТП путем самопроизвольного сворачивания напряженных плоских многослойных

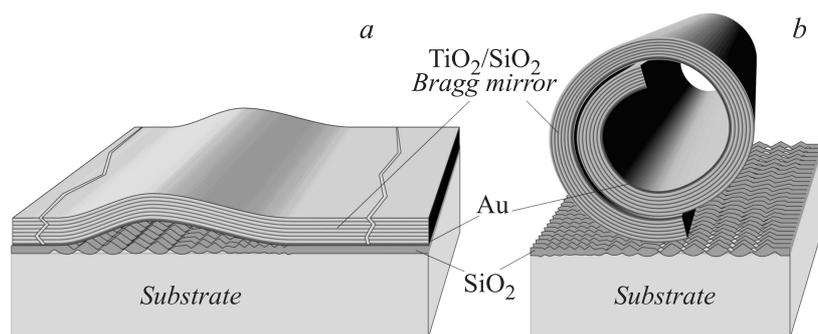


Рис. 1. Схема структуры (а) и самопроизвольного формирования трубки (б).

металлодиэлектрических структур в трубки субмикронного размера, вследствие релаксации упругих напряжений в них. Такой метод является аналогом метода получения нанотрубок путем самопроизвольного отслоения от подложки напряженных эпитаксиальных структур, состоящих из нескольких монослоев, с последующим сворачиванием в нанотрубку (принц-технология) [10,11].

Изготовление образца осуществлялось на установке магнетронного распыления BAS 450. На кварцевую подложку наносился буферный слой оксида кремния толщиной 250 nm, а затем слой золота толщиной 40 nm. Поверх слоя золота выращивался 7-периодный брэгговский отражатель, состоящий из слоев оксида титана (толщина 66 nm) и оксида кремния (толщина 118 nm). Первый слой оксида титана, примыкающий к золоту, имел толщину 50 nm, отличающуюся от других слоев, для того чтобы обеспечить настройку частоты ТП на центр запрещенной зоны брэгговского отражателя [1,2,9]. В процессе роста поддерживалась температура подложки 65°C.

Исследование микроструктуры цилиндрических структур было выполнено на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM 7001F (JEOL, Япония), оснащенный системой рентгеноспектрального микроанализа Oxford Instruments INCA PentaFETx.

После охлаждения образца до комнатной температуры в структуре возникали механические напряжения, связанные с различием коэффициентов теплового расширения оксида титана ($9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), оксида кремния $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и золота ($14 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Максимальные

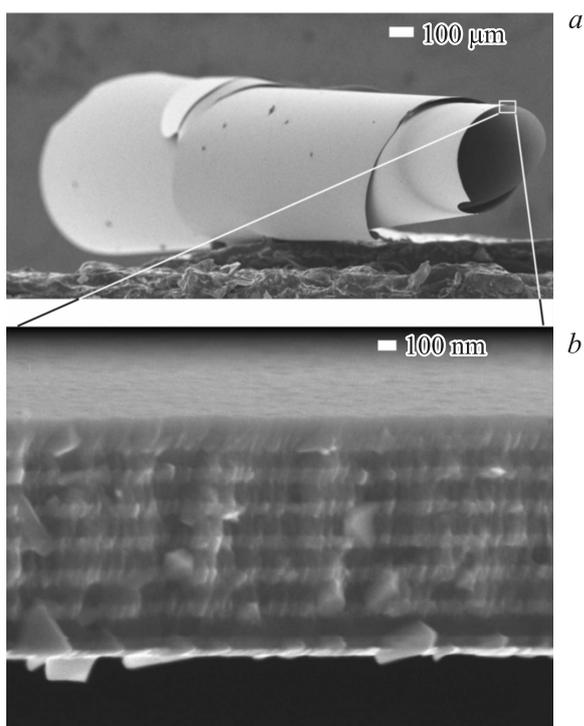


Рис. 2. *a* — изображение самопроизвольно образовавшейся цилиндрической структуры, сделанное на сканирующем электронном микроскопе. *b* — СЭМ-изображение торца стенки цилиндрической структуры, показанной на рис. 1, *a*, сделанное при большем увеличении.

напряжения возникают на границе золота и оксида кремния вследствие наибольшего рассогласования коэффициентов теплового расширения. В слое оксида кремния, граничащем с золотом, возникали нанотрещины (рис. 1, *a*), и слой золота вместе с выращенным над ним брэгговским отражателем отделялся от подложки (рис. 1, *b*). Механические напряжения, возникшие в брэгговском отражателе со слоем золота, приводили к сворачиванию отделившихся от подложки фрагментов неправильной формы в многослойные трубки с субмиллиметровым радиусом кривиз-

ны, как показано на рис. 2, *a*. Самопроизвольное формирование трубок занимало несколько дней. Установлено, что многослойная структура брэгговского отражателя со слоем золота, отслоившаяся от подложки и свернувшаяся в трубку, не повреждена (рис. 2, *b*). Яркий светлый слой на поверхности структуры соответствует золоту, более темные слои — оксиду кремния, более светлые — оксиду титана.

Из анализа СЭМ изображений и спектров элементного состава в различных областях многослойной пленки следует, что цилиндр образуется при сворачивании, когда внутренним слоем является золото, а внешним — слой SiO_2 (рис. 2, *b*).

Поскольку возникновение напряжений в многослойной структуре обусловлено разностью коэффициентов теплового расширения материалов, ее составляющих, то радиусом кривизны структуры можно управлять путем изменения температуры роста и параметров слоев структуры. При самопроизвольном, неконтролируемом отделении напряженных слоев от подложки отделившиеся фрагменты имеют неправильную форму. Однако формой фрагментов можно управлять, если наносить затравочные трещины на поверхность структуры после роста.

Таким образом, в работе описан метод изготовления многослойных металлodieлектрических цилиндрических структур субмиллиметрового радиуса (в частности, цилиндрических структур с таммовскими плазмонами), которые могут использоваться для создания новых оптоэлектронных устройств.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 14-02-00679, FP7 IRSES project 612564 НуМеСав и FP7 ITN Project 607521 NOTEDEV.

Изображения сканирующей электронной микроскопии были получены с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург).

Список литературы

- [1] Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Kavokin A.V., Shelykh I.A. // *Phys. Rev. B*. 2007. V. 76. P. 165 415.
- [2] Sasin M.E., Seisyan R.P., Kaliteevski M.A., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Egorov A.Y., Vasil'ev A.P., Mikhrin V.S., Kavokin A.V. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 251 112.

- [3] *Symonds C., Lheureux G., Hugonin J. et al.* // Nano Lett. 2013. V. 13. P. 3179.
- [4] *Gazzano O., Michaelis de Vasconcellos S., Gauthron K., Lemaitre A., Senellart P. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 232 111.
- [5] *Lee K.J., Wu J.W., Kihong K.* // Opt. Express. 2013. V. 21. P. 28 817.
- [6] *Liu H., Sun X., Yao F., Pei Y., Yuan H., Zhao H.* // Plasmonics. 2012. V. 7. P. 749.
- [7] *Bruckner R., Sudzius M., Hintschich S.I., Frob H., Scholz R., Lyssenko V.G., Kaliteevski M.A., Iorsh I., Abram R.A., Kavokin A.V., Leo K.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 062 101.
- [8] *Kaliteevski M.A., Lazarenko A.A., Il'inskaya D.N., Zadiranov Yu.M., Sasin M.E., Zaitsev D., Mazlin V.A., Brunkov P.N., Pavlov S.I., Egorov A.Yu.* // Plasmonics. 2015. V. 10(2). P. 281–284.
- [9] *Little C.E., Anufriev R., Iorsh I., Kaliteevski M.A., Abram R.A., Brand S.* // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 235 425.
- [10] *Prinz V.Ya., Seleznev V.A., Gutakovsky A.K., Chehovskiy A.V., Preobrazhenskii V.V., Putyato M.A., Gavrilova T.A.* // Physica E. 2000. V. 6. P. 828–831.
- [11] *Golod S.V., Prinz V.Ya., Mashanov V.I., Gutakovsky A.K.* // Sci. Technol. 2001. V. 16. P. 181–185.