

В качестве примера на рисунке 2 представлены зависимости коэффициента трения от времени, полученные в процессе испытаний двух новых типов покрытия: многослойного (16 слоев) с периодом Ti/TiN (кривая 2) и покрытия Ti–Al–N/Ti–Al (кривая 3), служащего эффективным барьером для диффузии водорода в атомной энергетике. Показано, что при нанесении покрытий снижение коэффициента трения скольжения может составлять от 30 до 40 %.

На трибограмме исходного состояния заметны выбросы, свидетельствующие о когезионных процессах, в то время как защищенный покрытием материал не склонен к налипанию. Отметим, что при неизменных условиях испытаний вслед за измерением коэффициента трения может быть определена износостойкость трибосопряжения путем измерения протяженности сформировавшегося трека износа. Как показали микроскопические исследования, трек износа исходного образца содержит ярко выраженные следы когезионных процессов и имеет большую протяженность. Для образцов, защищенных покрытиями поверхность трека износа близка к зеркальной, а длина трека существенно сократилась. Подавление когезионных процессов сопровождалось существенным увеличением износостойкости трибосопряжений, наиболее выра-

женным для случая многослойного покрытия. Увеличение износостойкости при нанесении защитных слоев составило от 150 до 200 % для слоев 2 и 3, соответственно.

Литература

1. Borets A.A. Structure and phase transformations in chemical active ions bombarded thin Al films / A.A. Borets, F.F. Komarov, V.V. Pilko, S.J. Shiryajev // *Radiation Effects Letters.* – 1986, v. 87, № 4. – Pp. 163–168.
2. Katsapov A.N. Metals and alloys surface hardening method / A.N. Katsapov, F.F. Komarov, V.V. Pilko, A.A. Pugatshov // *USSR Patent.* №166395, 30.11.1988.
3. Klimovich I.M. Influence of Parameters of Reactive Magnetron Sputtering on Tribomechanical Properties of Protective Nanostructured Ti-Al-C-N coatings / I.M. Klimovich, F.F. Komarov, V.A. Zaikov, A.R. Kuleshov, V.V. Pilko // *Journal of Friction and Wear.* – 2018. – Vol. 39, No. 2. – P. 92–98.
4. Комаров Ф.Ф. Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости» Ф.Ф. Комаров, В.В. Пилько, В.Н. Кулешов // *Приборы и методы измерений.* – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 122–128.
5. Пилько В.В. Устройство для измерения коэффициента трения поверхностных слоев / Пилько В.В., Пилько В.В.(мл.) // Положительное решение на выдачу патента РБ №20190292 от 27.03.2020 г. – С. 1–6.

УДК 535.421

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ Полещук Н.Н., Рудницкий А.С.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

В дифракционных полях изолированных диэлектрических частиц с размерами порядка длины волны формируются вблизи их поверхности области повышенной интенсивности волнового поля, получившие название фотонных наноструй (ФНС). Особенность ФНС заключается в высокой пространственной локализации светового поля в поперечном к направлению падающего излучения сечении, что приводит к субволновым размерам фотонного потока. Эта особенность ФНС и представляет интерес для практического применения их в нанопотонике, биологии, медицине, нанoeлектронике, системах хранения данных. Сообщается о возможности разработки устройств хранения данных с ультравысокой плотностью записи информации и технологии безмасочного (прямого) нанесения шаблонов на поверхность фотосенсоров [1]. На эффект формирования фотонных наноструй (ФНС) впервые было обращено внимание в работе [2] при изучении пространственной структуры ближнего поля рассеяния светового пучка на прозрачном квар-

цевом цилиндре микронных размеров. Большинство известных теоретических результатов относятся к цилиндрическим и сферическим частицам и получены на основе соответствующих аналитических решений дифракционных задач. В работе [3] на их основе показано, что, варьируя оптический контраст оболочек сферической частицы, можно управлять параметрами ФНС. При исследовании фотонных наноструй на частицах более сложной формы используются численные методы. В работе [4] приведены примеры численного моделирования фотонных наноструй на частицах в виде осесимметричного конуса, пирамиды, бруска с треугольным профилем. Моделирование проводилось на коммерческом программном продукте CST Microwave Studio.

В работе [5] исследованы фотонные наноструи, сформированные квадратными микроступеньками на кварцевой подложке. Достаточно полный обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям эффектов ФНС, можно найти в работе [6–8].

В данной работе рассматривается пошаговое улучшение параметров ФНС не только посредством изменения физических свойств частицы, но и свойств экспонирующего поля на примере двумерной задачи дифракции волнового поля на диэлектрическом цилиндре квадратного сечения. Диэлектрическая проницаемость материала цилиндра равна 2, а для окружающей среды 1. Размеры сечения в длинах волн равны $1 \leq x \leq 2, 1 \leq z \leq 2$. Исходное интегральное уравнение представим в виде:

$$u(r) = u_0(r) + \int_S u(r') K(r, r') dr', \quad (1)$$

$$K(r, r') = -0,25k^2(\varepsilon - 1) i H_0^{(2)}(k|r - r'|).$$

Приближенное решение ищем в виде линейной комбинации базисных функций:

$$u(r') = \sum_{n=1}^N c_n \psi_n(r'). \quad (2)$$

В качестве базисных функций выбирается система характеристических функций Хаара. Чтобы ввести их, разобьем область поперечного сечения S на N непересекающихся множеств S_n . Тогда базисная функция полагается равной единице, если переменная интегрирования принадлежит области S_n , и равной нулю, если не принадлежит. Система уравнений для определения коэффициентов C_n принимает в этом случае вид:

$$\sum_{n=1}^N c_n A_{mn} = u_{0m}, \quad (3)$$

$$A_{mn} = \delta_{mn} + \int_{S_n} K(r, r') dr' \quad (4)$$

На основе строгого решения двумерной задачи дифракции плоской волны на диэлектрическом цилиндре исследована зависимость распределения интенсивности дифракционного волнового поля в ближней зоне дифракции от направления распространения падающей волны, формы поперечного сечения и показателя преломления цилиндра. Установлено, что при распространении экспонирующей плоской волны по диагонали квадратной частицы с диэлектрической проницаемостью равной 2 и с размерами порядка длины волны область повышенной интенсивности волнового поля формируется вблизи вершины угла с внешней стороны поверхности, то есть на острие поверхности. Такая локализация фотонных наноструй может быть желательной, например, при использовании их в сенсорных устройствах ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (БСОМ). Максимальное превышение интенсивности падающей волны равно примерно четырем. Рассмотрены различные способы оптимизации такого типа устройств. Показано, что при неболь-

шом отклонении формы частицы от правильной наблюдается уменьшение поперечного размера фотонных наноструй (ФНС). Дополнительные возможности для улучшения параметров ФНС появляются при экспонировании диэлектрических частиц не плоской волной, а суперпозицией плоских волн:

$$u_0(x, z) = A_1 u_1(x, z) + A_2 u_2(x, z),$$

$$u_1(x, z) = \exp[-ikx(\cos(\theta - \gamma) + z \sin(\theta - \gamma))], \quad (5)$$

$$u_2(x, z) = \exp[-ikx(\cos(\theta + \gamma) + z \sin(\theta + \gamma))].$$

В случае равенства амплитуд суперпозиция волн принимает вид бегущей под углом θ к оси x волны с периодически изменяющейся в ортогональном направлении амплитудой.

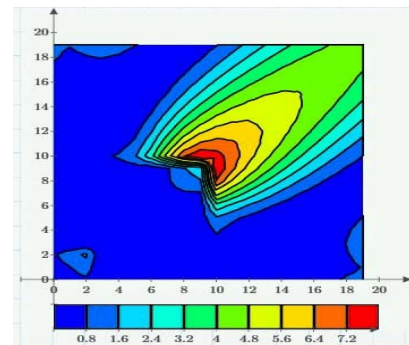
Взаимосвязь между угловым параметром γ и нормированной на длину волны шириной интерференционных полос d определяется соотношением

$$d = 1/2 \sin \gamma. \quad (6)$$

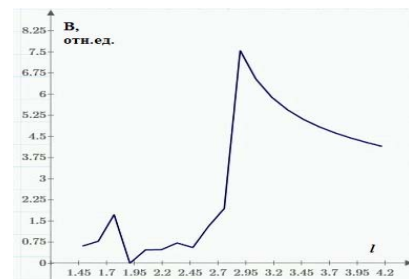
На рисунке 1 представлены двумерные распределения относительной интенсивности дифракционного волнового поля

$$B(x, z) = |u(x, z)|^2 / |u_0(0, 0)|^2 \quad (7)$$

внутри частицы и вне на расстоянии длины волны от поверхности, а также на нормированной на длину волны диагонали l при $\theta = \pi/4, \gamma = \pi/8$.



а



б

Рисунок 1 – Двумерное (а) и диагональное (б) распределения нормированной интенсивности дифракционного волнового поля внутри и в ближней зоне частицы

Как показано на рисунке 1, пиковая интенсивность ФНС превышает интенсивность падающего поля более чем в семь раз.

Таким образом, посредством выбора структуры экспонирующего волнового поля достигается улучшение параметров ФНС.

Литература

1. Соифер В.А. Дифракционная нанофотоника и перспективные информационные технологии / В.А. Соифер // Вестн. РАН. – 2014. – Т. 84, № 1. – С. 11–22.

2. Chen Z. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – № 12(7). – P. 1214–1220.

3. Гейнц Ю.Э. Эффект фотонных наноструй в многослойных микронных сферических частицах / Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, Е.К. Панина // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 6. – С. 520–525.

4. Минин И.В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий / И.В. Минин, О.В. Минин // Вестник Новосибир. гос. ун-та. – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.

5. Котляр В.В. Фотонные струи, сформированные квадратными микроступеньками / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Ю. Фельдман // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 72–80.

6. Heifetz A. Photonic Nanojets / A. Heifetz, S.-C. Kong, A.V. Sahakiana, A. Taflove, V. Backman // J. Comput. Theor. Nanosci. – 2009. – V.6, № 9. – P. 1979–1992.

7. Chen Z. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2005. – № 13(2). – P. 526–533.

8. Kong S.-C. Robust detection of deeply subwavelength pits in simulated optical data-storage disks using photonic jets / S.-C. Kong, A. Sahakian, A. Heifetz, A. Taflove, V. Backman // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 92. – P. 211102.

УДК 673.2.082

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ НИЗКОЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ СЕНСОРОВ С ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ СЛОЯМИ $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$

Реутская О.Г.¹, Таратын И.А.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»
Минск, Республика Беларусь

Физико-химические процессы, происходящие в полупроводниковых сенсорах обусловлены конструктивными особенностями и составом газочувствительных слоев на их поверхности. Выбор такого слоя обеспечивает стабильный и избирательный сигнал при определении горючих и токсичных газов. Для обеспечения развитой сенсорной поверхности широко используются полупроводниковые нанодисперсные материалы, полученные золь-гель методом. Высокую чувствительность к NO_2 позволяют достигать слои на основе оксида олова. Ввиду свойств полупроводниковых материалов в газовых сенсорах наблюдается эффект фотопроводимости, который обеспечивается механизмами рекомбинации зарядов в приповерхностных слоях при воздействии светового излучения [1].

В данной работе представлены результаты изучения фотопроводимости сенсорных устройств при энергопотреблении от 1 до 10 мВт. Также проведено исследование температуры поверхности сенсора и установлена высокая чувствительность газочувствительного слоя $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$.

Для проведения экспериментов был выбран сенсор на подложке из пористого оксида алюминия толщиной 55–60 мкм. Фотографическое изображение сенсора в корпусе без газопроницаемого колпака представлено на рисунке 1.

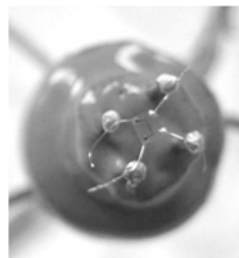


Рисунок 1 – Изображение сенсора без газопроницаемого колпака

Размер чувствительного элемента – $1,25 \times 1,25 \text{ мм}^2$. Нагреватель и информационные электроды располагаются на разных сторонах подложки. Формирование топологии сенсорного устройства осуществлялось с использованием технологических процессов фотолитографии, что позволило получить нагреватель шириной 7 мкм. Применение пористой алюмооксидной подложки предназначено для снижения энергопотребления сенсорного устройства до 10 мВт.

В качестве газочувствительного слоя был выбран золь-гель на основе оксидов индия и олова. На поверхность сформированного слоя наносилась капля содержащая углеродные нанотрубки. Было установлено, что при воздействии светового потока от лампы дневного света наблюдается изменение электросопротивления сенсора.