

МАТЕРИАЛЫ СЕМИНАРА

X Международный
семинар
по волоконным
лазерам

НОВОСИБИРСК,
АКАДЕМГОРОДОК

2022

Russian Fiber Lasers

Оптическая запись двумерных температурных профилей в массивах TiON наноструктур

А.В. Харитонов*, С.С. Харинцев

Кафедра оптики и нанофотоники, Институт физики,
Казанский (Приволжский) федеральный университет

* E-mail: antvharitonov@kpfu.ru

DOI:10.31868/RFL.2022.233-234

Создание наноразмерных источников тепла и управление тепловыми потоками посредством света являются одними из ключевых задач термофотоники [1,2]. Методы термофотоники находят практические применения во многих областях, например: фототермическая терапия, фотокатализ, термофотовольтаика, термотика, сенсинг и др. Оптический нагрев наноструктуры определяется следующими факторами: интенсивность падающего излучения, сечение поглощения, теплоемкость и скорость теплообмена с окружающей средой. Управление температурой фотонагрева достаточно легко достигается путем изменения мощности падающего излучения. Однако, точная настройка температуры нагрева при фиксированной интенсивности накачки до сих пор остается нерешенной задачей.

В настоящей работе предложен механизм управляемого оптического нагрева наноструктур, освещаемых непрерывным лазерным излучением с фиксированной интенсивностью. Разработанная наноструктура представляет собой тепловой воксель – трехмерный аналог пикселя – состоящий из плазмонной TiN наночастицы на вершине Si цилиндра (Рис. 1а). Наночастица из TiN играет роль плазмонной антенны, которая усиленным образом поглощает падающий свет. Цилиндр из Si служит теплопроводом между разогреваемой наноантенной и термостатом (подложкой).

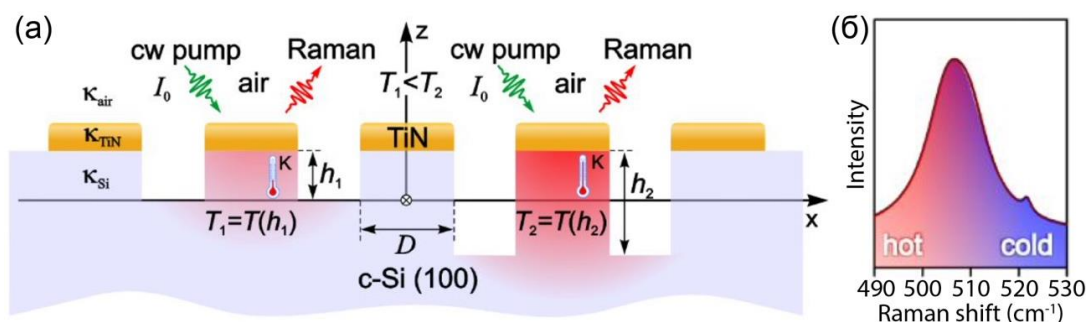


Рис. 1. (а) Схематическое изображение TiN:Si вокселей, представляющих собой TiN наноструктуры на вершине Si цилиндров с диаметром D и высотой h . Параметр k обозначает теплопроводность материала. Градацией красного цвета отображается температура нагрева. (б) Спектр комбинационного рассеяния, зарегистрированный в TiN:Si вокселе с параметрами $D=200$ нм и $h=820$ нм; длина волны падающего излучения 633 нм, интенсивность 5 МВт/см².

В работе показано, что в зависимости от высоты Si цилиндра температура нагрева вокселя может варьироваться в диапазоне 25-900 °С. Для этих целей были изготовлены TiN:Si наноструктуры путем магнетронного напыления тонкой пленки TiN (толщина 50 нм) на Si подложку и последующей ионно-лучевой литографии. Температура нагрева определялась с помощью метода рамановской термометрии. На рисунке 1б показан спектр комбинационного рассеяния света, зарегистрированный в TiN:Si наноструктуре с диаметром $D=200$ нм и высотой

$h=820$ нм. Как видно, в спектре присутствует две линии. Линия 521 см^{-1} соответствует холодному кремнию, сигнал от которого попадает в объектив от подложки с краев фокального пятна. Второй широкий пик соответствует горячему кремнию. Важно отметить, что при отсутствии Si тепловода ($h=0$ нм) в спектре присутствует только линия 521 см^{-1} , что говорит о пренебрежимо малом нагреве TiN. Таким образом, при достаточно малой интенсивности накачки (5 МВт/см^2) сдвиг линии кремния составил $\sim 18\text{ см}^{-1}$, что соответствует температуре нагрева порядка $700\text{ }^\circ\text{C}$. В работе измерена зависимость температуры нагрева от высоты Si цилиндра. Изменяя высоту, можно управлять температурой нагрева вокселя при заданной интенсивности возбуждающего излучения. В этом случае настройка температуры осуществляется на этапе изготовления. Увеличение эффективности фотонагрева с ростом высоты Si цилиндра обусловлено уменьшением эффективной теплопроводности подложки за счет пространственного ограничения теплоотода в Si наноцилиндре.

Использование TiN в качестве плазмонного материала позволило настраивать температуру нагрева разработанных вокселей в режиме реального времени. Измерения диэлектрической функции пленок TiN в спектральном диапазоне 250-2500 нм при внешнем нагреве от 25 до $600\text{ }^\circ\text{C}$ на воздухе показали, что при температурах выше $400\text{ }^\circ\text{C}$ происходит необратимое изменение оптических свойств TiN. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния показано, что это происходит в результате окисления TiN и формирования TiON. Данный эффект был использован для управления температурой нагрева при фиксированной интенсивности падающего излучения. При использовании TiN:Si наноструктуры с достаточно большой высотой h может происходить фотонагрев выше пороговой температуры 400°C . При этих условиях TiN постепенно окисляется, что приводит к снижению температуры нагрева. Это объясняется уменьшением сечения поглощения TiN нанопленки. В работе также измерены зависимости температуры нагрева от времени оптического отжига.

Полученные результаты позволили создать программируемые двумерные температурные профили. В предложенном концепте двумерная поверхность представляет собой гексагональный массив, состоящий из идентичных TiN:Si вокселей. При равномерной засветке все воксели нагреваются на одинаковую температуру. Для того, чтобы создать неоднородный профиль температуры, к каждому вокселю применялась описанная выше процедура оптического отжига. Записанные тепловые поверхности остаются стабильными вплоть до температур $350\text{-}400\text{ }^\circ\text{C}$. Результаты данного исследования открывают новые возможности в фотокатализе, термотике и сенсинге. В частности, разработанные TiN:Si наноструктуры были использованы в недавних наших работах при создании оптических сенсоров для измерения температуры фазовых переходов наноразмерных материалов [3,4].

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

Литература

- [1] G.P. Zograf, M.I. Petrov et al, *Adv. Opt. Photonics* **13**, 643-702 (2021)
- [2] G. Baffou, F. Cichos et al, *Nat. Mater.* **19**, 946-958 (2020)
- [3] S.S. Kharintsev, S.G. Kazarian, *J. Phys. Chem. Lett.* **13**, 5351-5357 (2022)
- [4] S.S. Kharintsev, E.A. Chernykh et al, *ACS Photonics* **8**, 1477-1488 (2021)