



УДК 546.571 (621.793.79)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА С НАНОЧАСТИЦАМИ НАТРИЯ

Е.С. Бочкарёва^а, А.И. Сидоров^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: b.elizaveta.s@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 07.12.15, принята к печати 23.12.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-85-89

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бочкарёва Е.С., Сидоров А.И. Моделирование чувствительного элемента датчика температуры на основе силикатного стекла с наночастицами натрия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 85–89.

Аннотация

Методами численного моделирования показано, что силикатные стекла с наночастицами натрия, обладающими плазмонным резонансом на длине волны 405 нм, могут быть использованы в качестве чувствительных элементов датчиков температуры. Моделирование проводилось в дипольном квазистатическом приближении с учетом дисперсии оптических констант натрия в твердой и жидкой фазах, а также с учетом температурной зависимости материальной плотности натрия в жидкой фазе. Показано, что при температуре менее 373 К стекла с наночастицами натрия могут быть использованы при создании сигнализаторов аварийных ситуаций с пороговым срабатыванием при переходе наночастиц натрия из твердого в жидкое состояние. Регистрация температуры при более высоких температурах может производиться либо по спектральному сдвигу плазмонной полосы поглощения наночастиц натрия, либо по изменению амплитуды этой полосы. Расчет показал, что температурная чувствительность спектрального положения плазмонной полосы поглощения наночастиц натрия в стекле составляет 0,017 нм/К для температурного интервала 373–973 К, а температурная чувствительность изменения амплитуды плазмонной полосы поглощения составляет 0,3 %/К.

Ключевые слова

моделирование тепловых процессов в стеклах с наночастицами, датчик температуры, наночастица натрия, плазмонный резонанс в наночастицах

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию №11.1227.2014/К.

SIMULATION OF SENSING ELEMENT OF TEMPERATURE SENSOR BASED ON SILICATE GLASS WITH SODIUM NANOPARTICLES

E.S. Bochkareva^а, A.I. Sidorov^а^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: b.elizaveta.s@gmail.com

Article info

Received 07.12.15, accepted 23.12.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-85-89

Article in Russian

For citation: Bochkareva E.S., Sidorov A.I. Simulation of sensing element of temperature sensor based on silicate glass with sodium nanoparticles. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 85–89.

Abstract

Computational simulation methods were used to show that silicate glasses with sodium nanoparticles, which possess plasmon resonance at 405 nm wavelength, can be used as sensing elements in temperature sensors. The modeling was performed in a dipole quasistatic approximation taking into account the dispersion of sodium optical constants in solid and liquid states, and also the temperature dependence of sodium material density in a liquid phase. It was shown that for the temperature less than 373 K the glasses with sodium nanoparticles can be used for creation of temperature sensors of emergency situations with the threshold switching during the transition of sodium from solid to liquid state. The temperature measurement at higher temperatures can be performed either on the spectral shift of the plasmon absorption band, or on the change of its amplitude. The calculations have shown that the temperature sensitivity of spectral position of the plasmon absorption band of sodium

nanoparticles in glass is 0.017 nm/K for the temperature region equal to 373-973K; and the temperature sensitivity of the plasmon absorption band amplitude is 0.3 %/K.

Keywords

modeling of thermal processes in glasses with nanoparticles, temperature sensor, sodium nanoparticle, plasmon resonance in nanoparticles

Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation during the scientific-research work in the frame of the project part of the Government task in the scientific work area according the task # 11.1227.2014/K.

Введение

Волоконные датчики температуры на основе неорганических стекол представляют интерес для измерения температуры в условиях повышенных электромагнитных помех, в установках высокого напряжения и в агрессивных средах [1, 2]. Электронно-лучевая обработка и последующая термообработка позволяют синтезировать в приповерхностных слоях серебро- и медьсодержащих стекол наночастицы соответствующих металлов, обладающих плазмонным резонансом [3–8]. В работе [9] было показано, что при электронно-лучевой обработке и последующей термообработке при $T = 953$ К натриево-силикатных стекол в них формируются сферические наночастицы натрия диаметром 5–10 нм, окруженные вакуумной или газовой оболочкой (рис. 1). Такие наночастицы обладают плазмонным резонансом, а низкая температура плавления натрия (370 К) делает такие композитные среды привлекательными для температурных измерений. Дополнительным достоинством является то, что наночастицы натрия могут быть сформированы в оптическом волокне из натриево-силикатного стекла, что дает возможность использовать такие волокна в волоконных датчиках температуры.

Целью настоящей работы является численное моделирование тепловых процессов в стекле с наночастицами натрия и исследование температурной зависимости оптических свойств стекла с наночастицами натрия в спектральной области плазмонной полосы поглощения.

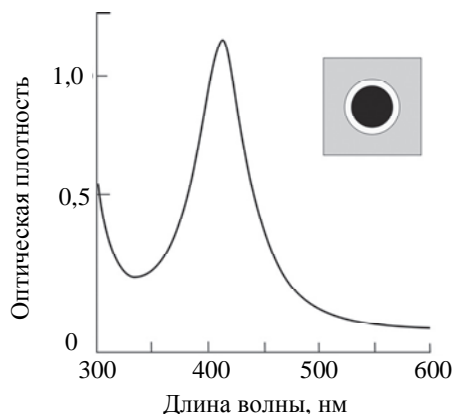


Рис. 1. Спектр оптической плотности силикатного стекла с наночастицами натрия. На вставке – геометрия наночастицы

Методика численного моделирования

Моделирование тепловых процессов в стекле с наночастицами натрия проводилось в дипольном квазистатическом приближении [10–12] для сферических наночастиц с диэлектрической оболочкой в матрице из силикатного стекла. При моделировании учитывалась дисперсия оптических констант натрия в твердой и жидкой фазе, а также изменение плотности натрия и возникающее при этом уменьшение показателя преломления при изменении температуры (рис. 2) [13, 14]¹.

Сечение поглощения сферических наночастиц натрия с оболочкой в силикатном стекле вычислялось по формуле [10,11]

$$\sigma_a = k \cdot \ln(\delta),$$

где k – волновое число, δ – поляризуемость наночастицы:

$$\delta = 4\pi r_s^3 \frac{\epsilon_s \epsilon_a - \epsilon_h \epsilon_b}{\epsilon_s \epsilon_a + 2 \epsilon_h \epsilon_b}, \quad \epsilon_a = \epsilon_c(T)(3-2P) + 2\epsilon_s P, \quad \epsilon_b = \epsilon_c(T) + \epsilon_s(3-P), \quad P = 1 - \left(\frac{r_c(T)}{r_s(T)} \right)^3.$$

¹ Инженерный справочник. Перевод единиц измерения [Электронный ресурс] www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsDensity/DensityOfLiquidMetals

Здесь ϵ_h , $\epsilon_c(T)$, ϵ_s – диэлектрические проницаемости среды, ядра и оболочки наночастицы соответственно; $r_c(T)$ – радиус ядра; $r_s(T)$ – радиус оболочки, T – температура. Температурная зависимость дисперсии диэлектрической проницаемости и температурное изменение радиуса ядра и оболочки (исходя из изменения плотности натрия) определялись по экспериментальным данным [13, 14]¹. Показатель преломления оболочки был выбран равным 1 (газ или вакуум). Показатель преломления стекла – 1,51. Условием возникновения плазмонного резонанса является обращение в ноль действительной части знаменателя поляризуемости наночастицы.

Результаты численного моделирования

На рис. 2 показаны расчетные спектры сечения поглощения наночастиц натрия в стекле в твердой ($T = 293$ К) и жидкой ($T = 373$ К) фазах. Из рисунка видно, что плавление наночастиц слабо влияет на амплитуду плазмонной полосы поглощения, но приводит к скачкообразному длинноволновому спектральному сдвигу полосы на 30 нм. Малое изменение амплитуды полосы вызвано тем, что при плавлении натрия его коэффициент поглощения и объем изменяются мало. В то же время показатель преломления изменяется на 25% для длины волны 400 нм. Это приводит к изменению условия возникновения плазмонного резонанса и к существенному спектральному сдвигу плазмонной полосы поглощения. Данный эффект может быть использован при разработке сигнализаторов перегрева с пороговым срабатыванием.

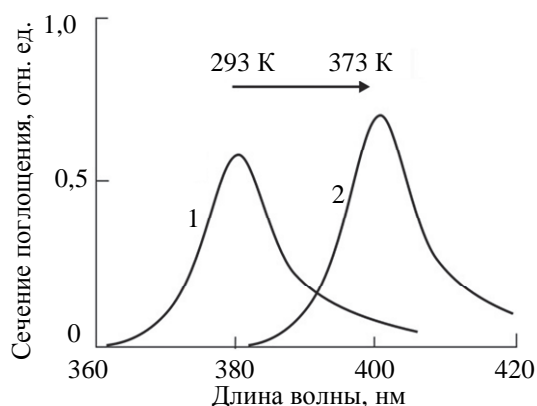


Рис. 2. Расчетные спектры сечения поглощения наночастиц натрия в стекле в твердой (1) и жидкой (2) фазах

На рис. 3 показаны расчетные спектры сечения поглощения наночастиц натрия в стекле в жидкой фазе в температурном интервале 373–973 К. На рис. 4 показаны температурные зависимости спектрального сдвига и амплитуды максимума плазмонной полосы поглощения наночастиц натрия в жидкой фазе.

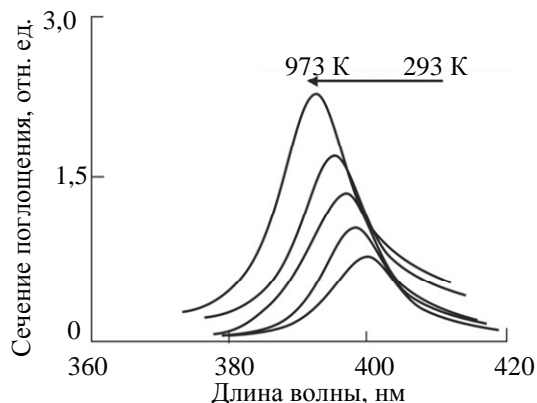


Рис. 3. Расчетные спектры сечения поглощения наночастиц натрия в стекле в жидкой фазе в температурном интервале 373–973 К

Из рисунков видно, что при изменении температуры от 370 до 970 К происходит коротковолновый сдвиг плазмонной полосы поглощения на 10 нм. Смещение плазмонной полосы сопровождается увеличением ее амплитуды в 2,8 раза. Таким образом, температурная чувствительность спектрального положения плазмонной полосы поглощения наночастиц натрия в стекле составляет 0,017 нм/К для температурного интервала 370–970 К, а температурная чувствительность изменения амплитуды плазмонной полосы

¹ Инженерный справочник. Перевод единиц измерения [Электронный ресурс] www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsDensity/DensityOfLiquidMetals

поглощения составляет 0,3%/К. Данная температурная чувствительность не уступает температурной чувствительности волокон, легированных ионами редкоземельных металлов, для аналогичного температурного интервала (например, [15, 16]).

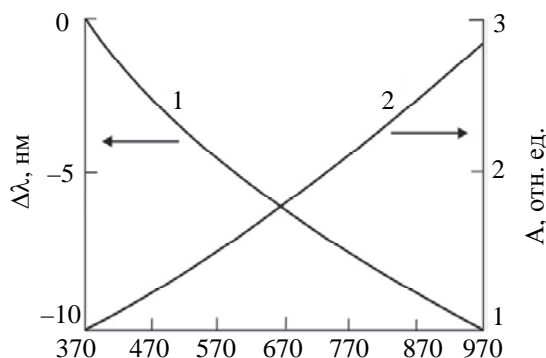


Рис. 4. Температурные зависимости спектрального сдвига ($\Delta\lambda$) и амплитуды (A) максимума плазмонной полосы поглощения наночастиц натрия в жидкой фазе

Заключение

Методами численного моделирования в рамках дипольного квазистатического приближения показано, что стекла с наночастицами натрия могут быть использованы в качестве чувствительных элементов датчиков температуры. При температуре менее 373 К стекла с наночастицами натрия могут быть использованы при разработке температурных датчиков аварийных ситуаций с пороговым срабатыванием при переходе наночастиц натрия из твердого в жидкое состояние.

Регистрация температуры при более высоких температурах может производиться либо по спектральному сдвигу плазмонной полосы поглощения наночастиц натрия, либо по изменению ее амплитуды. Температурная чувствительность спектрального положения плазмонной полосы поглощения наночастиц натрия в стекле составляет 0,017 нм/К для температурного интервала 373 К, а температурная чувствительность изменения амплитуды плазмонной полосы поглощения составляет 0,3%/К.

Литература

1. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Ed. E. Udd. NY, John Wiley & Sons, 2011, 512 p. doi: 10.1002/9781118014103
2. Agafonova D.S., Kolobkova E.V., Sidorov A.I. Temperature dependence of the luminescence intensity in optical fibers of oxyfluoride glass with CdS and CdS_xSe_{1-x} quantum dots. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no. 14, pp. 629–631. doi: 10.1134/S1063785013070158
3. Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomsky V.A., Nashchekin A.V., Usov O.A., Podsvirov O.A., Poplevkin S.V. Electron-beam modification of the near-surface layers of photosensitive glasses. *Technical Physics Letters*, 2009, vol. 35, no. 4, pp. 309–311. doi: 10.1134/S1063785009040063
4. Vostokov A.V., Ignat'ev A.I., Nikonorov N.V., Podsvirov O.A., Sidorov A.I., Nashchekin A.V., Sokolov R.V., Usov O.A., Tsekhomskii V.A. Effect of electron irradiation on the formation of silver nanoclusters in photothermorefractive glasses. *Technical Physics Letters*, 2009, vol. 35, no. 9, pp. 812–814. doi: 10.1134/S1063785009090089
5. Usov O.A., Sidorov A.I., Nashchekin A.V., Podsvirov O.A., Kurbatova N.V., Tsekhomsky V.A., Vostokov A.V. SPR of Ag nanoparticles in a photothermochromic glasses. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7394, pp. 73942J-1-6. doi: 10.1117/12.825988
6. Podsvirov O.A., Ignatiev A.I., Nashchekin A.V., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomsky V.A., Usov O.A., Vostokov A.V. Modification of Ag containing photo-thermorefractive glasses induced by electron-beam irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2010, vol. 268, no. 19, pp. 3103–3106. doi: 10.1016/j.nimb.2010.05.061
7. Podsvirov O.A., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A., Vostokov A.V. Formation of copper nanocrystals in photochromic glasses under electron irradiation and heat treatment. *Physics of Solid State*, 2010, vol. 52, no. 9, pp. 1906–1909. doi: 10.1134/S1063783410090192
8. Ignat'ev A.I., Nashchekin A.V., Nevedomskii V.M., Podsvirov O.A., Sidorov A.I., Solov'ev A.P., Usov O.A. Formation of silver nanoparticles in photothermorefractive glasses during electron irradiation. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 5, pp. 662–667. doi: 10.1134/S1063784211050148
9. Bochkareva E.S., Nikonorov N.V., Podsvirov O.A., Prosnikov M.A., Sidorov A.I. The formation of sodium nanoparticles in alkali-silicate glass under the action of the electron beam and thermal treatments. *Plasmonics*, 2016, vol. 11, no. 1. doi: 10.1007/s11468-015-0046-8)
10. Klimov V.V. *Nanoplasmonika* [Nanoplasmonics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 480 p.

11. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. NY, John Wiley & Sons, 1983, 570 p.
12. Kriebig U., Vollmer M. *Optical Properties of Metal Clusters*. Berlin, Springer-Verlag, 1995, 535 p. doi: 10.1007/978-3-662-09109-8
13. Inagaki T., Arakawa E.T., Birkhoff R.D., Williams M.W. Optical properties of liquid Na between 0.6 and 3.8 eV. *Physical Review B*, 1976, vol. 13, no. 12, pp. 5610–5612. doi: 10.1103/PhysRevB.13.5610
14. Zolotarev V.M., Morozov V.N., Smirnova E.V. *Opticheskie Postoyannye Prirodnykh i Tekhnicheskikh Sred* [The Optical Constants of Natural and Technical Environments]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984, 216 p.
15. Zhang Z.Y, Grattan K.T.V., Palmer A.W., Meggitt B.T., Sun T. Fluorescence decay-time characteristics of erbium-doped optical fiber at elevated temperatures. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 7, pp. 2764–2766. doi: 10.1063/1.1148192

- Бочкарёва Елизавета Сергеевна* – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, b.elizaveta.s@gmail.com
- Сидоров Александр Иванович* – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Sidorov@oi.ifmo.ru
- Elizaveta S. Bochkareva* – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, b.elizaveta.s@gmail.com
- Alexander I. Sidorov* – D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Sidorov@oi.ifmo.ru