

СРЕДНЯЯ МОЩНОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ПРОТЕКАНИЯ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ПЕРХЛОРАТА БАРИЯ*

А. А. Карпова¹, И. М. Воробьев², В. М. Фрейман³, А. Г. Зегря⁴, В. В. Забродский⁵,
М. В. Томкович⁶, Ю. А. Кукушкина⁷, Г. Г. Савенков⁸, Г. Г. Зегря⁹

Аннотация: Исследовано протекание взрывчатого превращения (ВП) энергонасыщенных композитов (ЭНК) на основе пористого кремния (ПК) и перхлората бария. Зарегистрирован оптический сигнал, сопровождающий ВП пяти серий образцов, каждая из которых характеризуется индивидуальным значением степени пористости кремния, на основе которого была подготовлена. Степень пористости кремния варьировалась в диапазоне от 29%–35% до 61%–69%. Показано, что увеличение степени пористости кремния, уплотняемого в контейнере при неизменной нагрузке, приводит к увеличению степени пористости и уменьшению плотности горючей составляющей ЭНК, а также к возрастанию средней мощности регистрируемого оптического сигнала. Последний результат был объяснен увеличением скорости протекания реакции ВП.

Ключевые слова: энергонасыщенный композит; пористый кремний; перхлорат бария; взрывчатое превращение; реакция взрывчатого превращения; средняя мощность оптического сигнала

DOI: 10.30826/CE25180412

EDN: RQNCIV

Литература

1. Kovalev D., Timoshenko V. Yu., Künzner N., Gross E., and Koch F. Strong explosive interaction of hydrogenated porous silicon with oxygen at cryogenic temperatures // *Phys. Rev. Lett.*, 2001. Vol. 87. No. 6. P. 068301-1–068301-4. doi: 10.1103/PhysRevLett.87.068301.
2. Clément D., Diener J., Gross E., Künzner N., Timoshenko V. Yu., Kovalev D. Highly explosive nanosilicon-based composite materials // *Phys. Status Solidi A*, 2005. Vol. 202. No. 8. P. 1357–1364. doi: 10.1002/pssa.200461102.
3. Du Plessis M., Conradie C. Nano-explosions in porous silicon // *Proc. SPIE*, 2005. Vol. 6037. P. 60370X-1–60370X-10. doi: 10.1117/12.637967.
4. Лазарук С. К., Долбик А. В., Лабунов В. А., Борисенко В. Е. Шарообразные плазмиды, образующиеся при горении и взрыве наноструктурированного гидрогенизированного кремния // *Письма в ЖЭТФ*, 2006. Т. 84. № 11. С. 695–699.
5. Plummer A., Cao H., Dawson R., Lowe R., Shapter J., Voelcker N. H. The influence of pore size and oxidizing agent on the energetic properties of porous silicon // *Proc. SPIE*, 2008. Vol. 7267. P. 72670P-1–72670P-10. doi: 10.1117/12.810453.
6. Handbook of porous silicon / Ed. L. Canham. — Cham, Switzerland: Springer, 2018. 1639 p.
7. Thiruvengadathan R., Belarde G. M., Bezmelnitsyn A., Shub M., Balas-Hummers W., Gangopadhyay K., Gangopadhyay S. Combustion characteristics of silicon-based nanoenergetic formulations with reduced electrostatic discharge sensitivity // *Propell. Explos. Pyrot.*, 2012. Vol. 37. No. 3. P. 359–372. doi: 10.1002/prep.201100129.
8. Mason B. A., Groven L. J., Son S. F., Yetter R. A. Combustion performance of several nanosilicon-based nanoenergetics // *J. Propul. Power*, 2013. 29(6):1435–1444. doi: 10.2514/1.B34902.
9. Huang S., Parimi V. S., Deng S., Lingamneni S., Zheng X. Facile thermal and optical ignition of silicon nanoparticles and micron particles // *Nano Lett.*, 2017. Vol. 17. No. 10. P. 5925–5930. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b01754.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00426, <https://rscf.ru/project/24-12-00426/>.

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, a.a.karpova@mail.ioffe.ru

²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, vorobevim@mail.ioffe.ru

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, vmax@mail.ioffe.ru

⁴Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, zegrya@bk.ru

⁵Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, sildet@mail.ioffe.ru

⁶Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, mariya.tom83@gmail.com

⁷Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, kukujulia@gmail.com

⁸Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), sav-georgij@yandex.ru

⁹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук; zegrya@theory.ioffe.ru

10. Xu F., Nava G., Biswas P., Dulalia I., Wang H., Alibay Z., Gale M., Kline D.J., Wagner B., Mangolini L., Zachariah M. R. Energetic characteristics of hydrogenated amorphous silicon nanoparticles // Chem. Eng. J., 2022. Vol. 430. P. 133140. doi: 10.1016/j.cej.2021.133140.
11. Adams S. K., Piekiet N. W., Ervin M. H., Morris C. J. Silicon quantum dots for energetic material applications // Appl. Phys. Lett., 2018. Vol. 112. No. 23. P. 233108-1–233108-5. doi: 10.1063/1.5022587.
12. Becker C. R., Apperson S., Morris C. J., Gangopadhyay S., Currano L. J., Churaman W. A., Stoldt C. R. Galvanic porous silicon composites for high-velocity nanoenergetics // Nano Lett., 2011. Vol. 11. No. 2. P. 803–807. doi: 10.1021/nl104115u.
13. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях / Пер. с франц. — М.: Мир, 1983. Т. 1. 312 с. (*Max J. Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Tome 1: Principes généraux et méthodes classiques.* — 3rd ed. — Paris, France: Masson, 1981. Vol. 1. 302 p.)
14. Currano L., Churaman W., Becker C. Nanoporous silicon as a bulk energetic material // Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (International) Proceedings. — Denver, CO, USA, 2009. P. 2172–2175. doi: 10.1109/sensor.2009.5285607.
15. Porous silicon: From formation to application: Formation and properties / Ed. G. Korotcenkov. — Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016. Vol. 1. 439 p.
16. Petrova E. A., Bogoslovskaya K. N., Balagurov L. A., Kochoradze G. I. Room temperature oxidation of porous silicon in air // Materials Science Engineering B, 2000. Vol. 69. P. 152–156. doi: 10.1016/s0921-5107(99)00240-8.
17. Рябин В. А., Остроумов М. А., Свист Т. Ф. Термодинамические свойства веществ. Справочник. — Л.: Химия, 1977. 392 с.
18. Schilt A. A. Perchloric acid and perchlorates. — Columbus, OH, USA: G. Frederick Smith Chemical Co., 1979. 198 p.
19. Piekiet N. W., Morris C. J., Churaman W. A., Cunningham M. E., Lunking D. M., Currano L. J. Combustion and material characterization of highly tunable on-chip energetic porous silicon // Propell. Explos. Pyrot., 2015. Vol. 40. No. 1. P. 16–26. doi: 10.1002/prep.201400140.
20. Кривошеев П. Н., Миронов В. Н., Пенязьков О. Г., Футько С. И. О механизме детонационного горения наноструктурированного кремния с твердофазным окислителем // ИФЖ, 2020. Т. 93. № 6. С. 1492–1501.
21. Acheson R. J., Jacobs P. W. M. Thermal decomposition of barium perchlorate // Can. J. Chem., 1969. Vol. 47. No. 16. P. 3031–3039. doi: 10.1139/v69-501.

Поступила в редакцию 01.12.2024

После доработки 13.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025