

Фото- и наноэлектроника на основе двумерных 2D-материалов (обзор)

(Часть III. Фотосенсоры на основе графена, графеноподобных и родственных моноатомных 2D-наноматериалов)

В. С. Попов, В. П. Пономаренко, С. В. Попов

Описаны механизмы возникновения фотосигналов, архитектура и основные параметры фотосенсоров на основе моноатомных 2D-материалов элементов III, IV, V и VI групп главных подгрупп таблицы Менделеева, таких как графен и графеноподобные материалы, силицен, германен, черный фосфор, твердые растворы черный фосфор-мышьяк, антимонен, висмутен, теллулен, борофен и гетероструктуры, содержащие 2D-материалы, в том числе совместно с другими материалами пониженной размерности, а также фотосенсоры с использованием плазмонных наноплазмонных антенн.

Ключевые слова: 2D-наноструктура, графен, силицен, черный фосфор, фосфорен, антимонен, висмутен, теллулен, борофен, фторографен, Ван дер Ваальсовы гетероструктуры, гетероструктура, плазмонные антенны.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-144-169

Попов Виктор Сергеевич^{1,2}, нач. специального конструкторско-технологического центра, в.н.с., доцент, к.х.н.

E-mail: popov.vs@mipt.ru

Пономаренко Владимир Павлович^{1,2}, главный конструктор, зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор.

Попов Сергей Викторович³, зам. ген. директора, д.т.н., доцент.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³ АО «Швабе».

Россия, 129366, Москва, Проспект Мира, 176.

Статья поступила в редакцию 09 марта 2022 г.

© Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В., 2022

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-20080.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ponomarenko V. P., *Kvantovaya fotosensorika* (Orion R&P Association, Moscow, 2018) [in Russian].
2. Ponomarenko V. P., Burlakov I. D., Popov V. S., and Popov S. V., *Successes of infrared photosensory* (Orion R&P Association, Moscow, 2021) [in Russian].
3. Xia F. et al., *Nat. Photonics* **8** (12), 899 (2014).
4. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Popov S. V., and Cherpurnov E. L., *J. Commun. Technol. Electron.* **65** (9), 1062 (2020).
5. Ponomarenko V. P., Popov V. S., and Popov S. V., *J. Commun. Technol. Electron.* **66** (9), 1108 (2021).
6. Glavin N. R., Rao R., Varshney V., Bianco E., Apte A., Roy A., Ringe E., and Ajayan P. M., *Adv. Mater.* **32** (7), 1904302 (2020).
7. Huang Z., Qi X., and Zhong J. *2D Monoelemental Materials (Xenes) and Related Technologies* (Boca Raton: CRC Press, 2022).
8. Gubin S. P. and Tkachev S. V., *Graphene and related carbon materials* (URSS, Moscow, 2019) [in Russian].
9. Xia F., Wang H., and Jia Ys., *Nat. Commun.* **5** (1), 4458 (2014).
10. Youngblood N., Chen C., Koester S. J., and Li M., *Nat. Photonics* **9** (4), 247 (2015).
11. Yuan S., Shen C., Deng B., Chen X., Guo Q., Ma Y., Abbas A., Liu B., Haiges R., Ott C., Nilges T., Watanabe K., Taniguchi T., Sinai O., Naveh D., Zhou C., and Xia F., *Nano Lett.* **18** (5), 3172 (2018).

12. Long M., Gao A., Wang P., Xia H., Ott C., Pan C., Fu Y., Liu E., Chen X., Lu W., Nilges T., Xu J., Wang X., Hu W., and Miao F., *Sci. Adv.* **3** (6), e1700589 (2017).
13. Du J., Yu H., Liu B., Hong M., Liao Q., Zhang Z., and Zhang Y., *Small Methods* **5** (1), 2000919 (2021).
14. Guan X., Yu X., Periyangounder D., Benzigar M. R., Huang J., Lin C., Kim J., Singh S., Hu L., Liu G., Li D., He J., Yan F., Wang Q. J., and Wu T., *Adv. Opt. Mater.* **9** (4), 2001708 (2021).
15. Fang Y. et al., *Nat. Photonics* **13** (1), 1 (2019).
16. Kufer D. and Konstantatos G., *ACS Photonics* **3** (12), 2197 (2016).
17. Geim A. K. and Novoselov K. S., *Nat. Mater.* **6** (3), 183 (2007).
18. Wang F. et al., *Science* **320** (5873), 206 (2008).
19. Xia F. et al., *Nat. Nanotechnol.* **4** (12), 839 (2009).
20. Xia F., Wang H., and Jia Y., *Nat. Commun.* **5**, 4458 (2014).
21. Low T. et al., *Phys. Rev. B* **90** (8), 081408 (2014).
22. Park J. et al., *Nano Converg.* **6** (1), 32 (2019).
23. Li S.-L. et al., *ACS Nano* **13**, 2654 (2019).
24. Zhong F. et al., *Nano Res.* **14**, 1840 (2021).
25. Geim A. K. and Grigorieva I. V., *Nature* **499** (7459), 419 (2013).
26. Jariwala D., Marks T. J., and Hersam M. C., *Nat. Mater.* **16** (2), 170 (2017).
27. Bediako D. K. et al., *Nature* **558** (7710), 425 (2018).
28. Novoselov K. S. et al., *Science* **353** (6298), aac9439 (2016).
29. Nair R. R. et al., *Science* **320** (5881), 1308 (2008).
30. Lee E. J. H. et al., *Nat. Nanotechnol.* **3** (8), 486 (2008).
31. Mueller T. et al., *Phys. Rev. B* **79** (24), 245430 (2009).
32. Giovannetti G. et al., *Phys. Rev. Lett.* **101** (2), 4 (2008).
33. Xu X. et al., *Nano Lett.* **10** (2), 562 (2010).
34. Mueller T., Xia F., and Avouris P., *Nat. Photonics* **4** (5), 297 (2010).
35. Xia F. et al., *Nano Lett.* **10** (2), 715 (2010).
36. Lemme M. C. et al., *Nano Lett.* **11** (10), 4134 (2011).
37. Peters E. C. et al., *Appl. Phys. Lett.* **97** (19), 193102 (2010).
38. Du S. et al., *Adv. Mater.* **29** (22), 1700463 (2017).
39. Bistrizter R. and MacDonald A. H., *Phys. Rev. Lett.* **102** (20), 206410 (2009).
40. Liu Y. et al., *Nat. Commun.* **2** (1), 579 (2011).
41. Sun D. et al., *Nat. Nanotechnol.* **7** (2), 114 (2012).
42. Obraztsov P. A. et al., *Sci. Rep.* **4** (1), 4007 (2015).
43. Obraztsov P. A. et al., *ACS Photonics* **6** (7), 1780 (2019).
44. Fang Z. et al., *Nano Lett.* **12** (7), 3808 (2012).
45. Lee J. et al., *Nat. Nanotechnol.* **6** (6), 348 (2011).
46. Konstantatos G. et al., *Nat. Nanotechnol.* **7** (6), 363 (2012).
47. Ni Z. et al., *ACS Nano* **11** (10), 9854 (2017).
48. Yu X. et al., *Nat. Commun. Springer US* **9** (1), 4299 (2018).
49. Murali K. et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces. American Chemical Society* **11** (33), 30010 (2019).
50. Alamri M. et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **11** (36), 33390 (2019).
51. Chen Z. et al., *Nano Res.* **12** (8), 1888 (2019).
52. Casalino M. et al., *ACS Nano* **11** (11), 10955 (2017).
53. Yeh C. H. et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **9** (41), 36181 (2017).
54. Chang R. J. et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **10** (15), 13002 (2018).
55. Lu Q. et al., *Materials (Basel)* **12** (16), 2532 (2019).
56. Kim J. et al., *ACS Photonics.* **4** (3), 482 (2017).
57. He Z. et al., *Appl. Phys. Lett. AIP Publishing LLC* **119** (23), 232104 (2021).
58. Xu H. et al., *Small.* **10** (11), 2300 (2014).
59. Liu Y. et al., *Sci. Rep. Springer US* **8** (1), 12840 (2018).
60. Guo W. et al., *Small* **9** (18), 3031 (2013).
61. Lee C. et al., *Sci. Rep.* **5** (1), 10013 (2015).
62. Zhang B. Y. et al., *Nat. Commun.* **4** (1), 1811 (2013).
63. Nikitskiy I. et al., *Nat. Commun.* **7** (1), 11954 (2016).
64. Sun Z. et al., *Adv. Mater.* **24** (43), 5878 (2012).
65. Lloyd S. *Advances in Detectors: Graphene photodetectors advance with help from collective EU Flagship // Laser Focus World.* 2017.07.10 URL: <https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/16548220/advances-in-detectors-graphene-photodetectors-advance-with-help-from-collective-eu-flagship>.
66. Goossens S. et al., *Nat. Photonics. Nature Publishing Group* **11** (6), 366 (2017).
67. Emberion – company [Electronic resource]. 2022. URL: <https://www.emberion.com/company/>.
68. Allen M., Bessonov A., and Ryhänen T., *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **52** (1), 987 (2021).
69. Lee C. et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** (6S1), 06FF08 (2015).
70. Prakash N. et al., *Appl. Phys. Lett.* **109** (24), 242102 (2016).
71. Tian H. et al., *Appl. Phys. Lett.* **113** (12), 121109 (2018).
72. Roy K. et al., *Nat. Nanotechnol.* **8** (11), 826 (2013).
73. Yu W. J. et al., *Nat. Nanotechnol.* **8** (12), 952 (2013).
74. Lee K. H. et al., *Adv. Mater.* **28** (9), 1793 (2016).
75. Massicotte M. et al., *Nat. Nanotechnol.* **11** (1), 42 (2016).
76. Parbatani A. et al., *Nanotechnology* **30** (16), 165201 (2019).
77. Vogt P. et al., *Phys. Rev. Lett.* **108** (15), 155501 (2012).
78. Kharadi M. A. et al., *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **9** (11), 115031 (2020).
79. Kharadi M. A. et al., *Int. J. Numer. Model. Electron. Networks, Devices Fields.* **34** (1), 1 (2021).
80. Kharadi M. A. et al., *IEEE Trans. Electron Devices* **68** (1), 138 (2021).
81. Gonzalez-Rodriguez R. et al., *ACS Appl. Nano Mater.* **5** (3), 4325 (2022), doi: 10.1021/acsnm.2c00337

82. Bianco E. et al., ACS Nano. **7** (5), 4414 (2013).
83. Liu N. et al., Small **16** (23), 2000283 (2020).
84. Li C. et al., J. Mater. Chem. C. **8** (46), 16318 (2020).
85. Tai G. et al., Nanotechnology **32** (50), 505606 (2021).
86. Wu Z. et al., ACS Appl. Mater. Interfaces. **13** (27), 31808 (2021).
87. Suess R. J. et al., 2D Mater. **3** (4), 041006 (2016).
88. Huang L. et al., ACS Appl. Mater. Interfaces. **9** (41), 36130 (2017).
89. Gong F. et al., Phys. status solidi – Rapid Res. Lett. **12** (12), 1800310 (2018).
90. Bullock J. et al., Nat. Photonics **12** (10), 601 (2018).
91. Dang Z. et al., 2D Mater. **8** (3), 035002 (2021).
92. Tong L. et al., Nat. Commun. **11** (1), 2308 (2020).
93. Ling X. et al., Proc. Natl. Acad. Sci. **112** (15), 4523 (2015).
94. Castellanos-Gomez A., J. Phys. Chem. Lett. **6** (21), 4280 (2015).
95. Amani M. et al., ACS Nano **11** (11), 11724 (2017).
96. Yin J. et al., Nat. Commun. **9** (1), 3311 (2018).
97. Huang S. and Ling X., Small **13** (38), 1700823 (2017).
98. Debnath P. C., Park K., and Song Y.-W., Small Methods **2** (4), 1700315 (2018).
99. Lu J. et al., Acc. Chem. Res. **49** (9), 1806 (2016).
100. Engel M., Steiner M., and Avouris P., Nano Lett. **14** (11), 6414 (2014).
101. Buscema M. et al., Nano Lett. **14** (6), 3347 (2014).
102. Huang M. et al., Adv. Mater. **28** (18), 3481 (2016).
103. Kang D.-H. et al., ACS Photonics. **4** (7), 1822 (2017).
104. Su B. W. et al., ACS Appl. Mater. Interfaces **10** (41), 35615 (2018).
105. Buscema M. et al., Nat. Commun. **5**, 1 (2014).
106. Miao J. et al., Small. **14** (2), 1702082 (2018).
107. Miao J. et al., ACS Nano. **11** (6), 6048 (2017).
108. Guo Q. et al., Nano Lett. **16** (7), 4648 (2016).
109. Deckoff-Jones S. et al., J. Opt. **20** (4), 044004 (2018).
110. Huang L. et al., ACS Nano **13** (1), 913 (2019).
111. Chen X. et al., Nat. Commun. **8** (1), 1672 (2017).
112. Wood J. D. et al., Nano Lett. **14** (12), 6964 (2014).
113. Low T. et al., Phys. Rev. B. **90** (8), 081408 (2014).
114. Zeng H. et al., Nanotechnology **29** (7), 075201 (2018).
115. Kansara S., Sonvane Y., and Gupta S. K., Appl. Nanosci. **10** (1), 107 (2020).
116. Liu B. et al., Adv. Mater. **27** (30), 4423 (2015).
117. Gibaja C. et al., Angew. Chemie Int. Ed. **55** (46), 14345 (2016).
118. Wang X. et al., Chem. Eng. J. **406**, 126876 (2021).
119. Abellán G. et al., Angew. Chemie Int. Ed. **56** (46), 14389 (2017).
120. Chu F. et al., J. Mater. Chem. C. **6** (10), 2509 (2018).
121. Xiao Q. et al., Nanoscale Horizons. **5** (1), 124 (2020).
122. Niu T. et al., Adv. Mater. **32** (4), 1906873 (2020).
123. Xing C. et al., ACS Photonics **5** (2), 621 (2018).
124. Tong T. et al., Adv. Funct. Mater. **29** (50), 1905806 (2019).
125. Shen L. et al., Chem. Mater. **32** (24), 10476 (2020).
126. Bai Z. et al., ACS Appl. Nano Mater. **3** (11), 10749 (2020).
127. Yan F. et al., Mater. Res. Bull. **150**, 111765 (2022).
128. Min J. et al., Phys. Rev. B. **100** (8), 85402 (2019).
129. Amani M. et al., ACS Nano **12** (7), 7253 (2018).
130. Shen C. et al., ACS Nano **14** (1), 303 (2020).
131. Rogalski A., *Infrared and Terahertz Detectors*, Third Edition (CRC Press, 2019).
132. Petrov M., Bekaert J., and Milošević M. V., 2D Mater. **8** (3), 035056 (2021).
133. Kutana A. et al., Nanoscale Adv. **4** (5), 1408 (2022).
134. Singh D. et al., RSC Adv. **6** (10), 8006 (2016).
135. Singh D. et al., Sci. Rep. **9** (1), 17300 (2019).
136. Tao M.-L. et al., 2D Mater. **5** (3), 035009 (2018).
137. Pandey D. et al., Appl. Surf. Sci. **531**, 147364 (2020).
138. Pandey D. et al., Comput. Mater. Sci. **185**, 109952 (2020).
139. Lukačević I. et al., J. Mater. Chem. C. **7** (9), 2666 (2019).
140. Wang X. et al., Angew. Chemie Int. Ed. **59** (52), 23559 (2020).

Photo- and nanoelectronics based on two-dimensional 2D-materials (a review)

(Part III. Photosensors based on graphene, graphene-like
and related monoatomic 2D nanomaterials)

V. S. Popov^{1,2}, V. P. Ponomarenko^{1,2}, and S. V. Popov³

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: popov.vs@mipt.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³ Shvabe Holding
176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia

Received March 09, 2022

The mechanisms of photosignals formation, the architecture and main parameters of photosensors are described for monoatomic 2D-materials of elements of groups IIIa, IVa, Va and VIa of the periodic table, such as graphene and graphene-like materials, silicene, germanene, black phosphorus, black phosphorus-arsenic solid solutions, antimonene, bismuthene, tellurene, borophene and heterostructures containing 2D-materials, including together with other low-dimensional materials, as well as photosensors using plasmonic resonators.

Keywords: 2D nanostructure, graphene, silicene, black phosphorus, phosphorene, antimonene, bismuthene, tellurene, borophene, fluorographene, van der Waals heterostructures, heterostructure, plasmonic resonators.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-144-169