

Реактивные методы осаждения пленок оксидов титана (обзор)

Д. Б. Золотухин, В. А. Бурдовицин, А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков, Е. М. Окс,
Д. А. Голосов, С. М. Завадский

Обзор посвящен анализу преимуществ и недостатков существующих реактивных методов осаждения пленок оксида титана. Особое внимание уделено традиционным методам – магнетронному распылению в атмосфере активных газов и вакуумно-дуговому осаждению, а также обсуждаются возможности реактивного электронно-лучевого испарения, в том числе альтернативного электронно-лучевого испарения титана в форвакууме (1–15 Па) в атмосфере кислорода с последующим осаждением паров на подложку. Показано, что к преимуществам электронно-лучевого испарения в форвакууме следует отнести простоту реализации и возможность получения стехиометрических пленок TiO₂, причем при более высокой скорости осаждения и меньшем энергопотреблении.

Ключевые слова: реактивное осаждение, тонкие пленки оксида титана, магнетронное распыление, вакуумно-дуговое осаждение, реактивное электронно-лучевое испарение.

Золотухин Денис Борисович¹, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
Бурдовицин Виктор Алексеевич¹, профессор, д.т.н.
Тюньков Андрей Владимирович¹, доцент, к.т.н.
Юшков Юрий Георгиевич¹, доцент, к.т.н.
Окс Ефим Михайлович¹, заведующий кафедрой, профессор, д.т.н.
Голосов Дмитрий Анатольевич², доцент, к.т.н.
Завадский Сергей Михайлович², доцент, к.т.н.
¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ZolotukhinDen@gmail.com; burdov@fet.tusur.ru; andrew71@sibmail.com; yushkovyu@mail.ru; oks@fet.tusur.tu
²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6. E-mail: svad@bsuir.by

Статья поступила в редакцию 15 августа 2017 г.

© Золотухин Д. Б., Бурдовицин В. А., Тюньков А. В., Юшков Ю. Г., Окс Е. Ф., Голосов Д. А., Завадский С. М., 2017

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee W. G., Woo S. I., Kim J. C., Choi S. H., Oh K. H. // Thin Solid Films. 1994. Vol. 237. P. 105.
2. Yeung K. S., Lamb Y. W. // Thin Solid Films. 1993. Vol. 109. P. 242.
3. Sawada Y., Taga Y. // Thin Solid Films. 1984. Vol. 116. P. 155.
4. Bange K., Ottermann C. R., Anderson O., Jeschkowski U., Laube M., Feile R. // Thin Solid Films. 1991. Vol. 197. P. 279.
5. Sieferting K. L., Griffin G. L. // J. Electrochem. Soc. 1990. Vol. 137. P. 1206.
6. Rausch N., Burte E. P. // J. Electrochem. Soc. 1993.

- Vol. 140. P. 145.
7. Abe Y., Fukuda T. // Jpn. J. Appl. Phys. 1994. Vol. 33. P. 1248.
8. Lee Y. H., Chan K. K., Brady M. J. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1995. Vol. 13. P. 596.
9. Jimmy C. Yu., Yu Jianguo, Zhao Jincai // Applied catalysis B. 2002. Vol. 36. P. 31.
10. Lu J. P., Wang J., Raj R. // Thin Solid Films. 1991. Vol. 204. P. L13.
11. Miyaki S., Kobayashi T., Satou M., Fijimoto F. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. Vol. 9. P. 3036.
12. Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Laser Part. Beams. 2008. Vol. 26. No. 4. P. 619.
13. Dannenberg R., Greene P. // Thin Solid Films. 2000. Vol. 360. P. 122.
14. Guerin D., Ismat Shah S. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1997. Vol. 15. P. 3.
15. Shyjumon I., Gopinadhan M., Helm C. A., Smirnov B. M., Hippler R. // Thin Solid Films. 2006. Vol. 500. P. 41.
16. Kubart T., Depla D., Martin D. M., Nyberg T., Berg S. // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. P. 221501.
17. Yordanov R., Boyadjiev S., Georgieva V. // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. 2014. Vol. 9. No. 2. P. 467.
18. Golosov D. A., Zavadski S. M., Svadkovski I. V. // Изв. Вуз. Физика. 2006. № 8. Приложение. С. 484.
19. Bendavid A., Martin P. J. // Thin Solid Films. 2001. Vol. 394. P. 1.
20. Bendavid A., Martin P. J. // Journal of the Australian Ceramics Society. 2014. Vol. 50. P. 86.
21. Bendavid A., Martin P. J., Takikawa H. // Thin Solid Films. 2000. Vol. 360. P. 241.
22. Bendavid A., Martin P. J., Jamting A., Takikawa H. // Thin Solid Films. 1999. Vol. 355–356. P. 6.
23. Tsyganov I., Maitz M. F., Wieser E., Prokert F., Richter E., Rogozin A. // Surface and Coatings Technology. 2003. Vol. 174–175. P. 591.
24. Leng Y. X., Huang N., Yang P., Chen J. Y., Sun H., Wang J., Wan G. J., Leng Y., Chu P. K. // Thin Solid Films. 2002. Vol. 420–

421. P. 408.

25. Metzner Chr., Goedicke K., Hoetzsch G., Scheffel B., Heinss J.-P. // Surf. Coat. Technol. 1997. Vol. 94–95. P. 663.

26. Брус В. В., Ковалюк З. Д., Марьянчук П. Д. // Журнал технической физики. 2012. Т. 8. С. 110.

27. Modes T., Scheffel B., Metzner Chr., Zywitzki O., Reinhold T. E. // Surface & Coatings Technology. 2005. Vol. 200. P. 306.

28. Bockut K., Laukaitis G., Virbukas D., Milcius D. // Materials Science. 2013. Vol. 19. No. 3. P. 245.

29. Rodgers T. M., Zhao H., H. Wadley N. G. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2015. Vol. 33. No 5. P. 05E118-1-24.

30. Hassa D. D., Marciano Y., Wadley H. N. G. // Surface & Coatings Technology. 2004. Vol. 185. P. 283.

31. Queheillalt D. T., Hass D. D., Sypeck D. J., Wadley H. N. G. // J. Mater. Res. 2001. Vol. 16. No. 4. P. 1028.

32. Rodgers T. M., Zhao H., Wadley H. N. G. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2013. Vol. 31. No. 6. P. 061509-1-14.

33. Tyunkov A. V., Yushkov Yu. G., Zolotukhin D. B., Savkin K. P., Klimov A. S. // Physics of Plasmas. 2014. Vol. 21. P. 123115.

34. Yushkov Yu. G., Tyunkov A. V., Oks E. M., Zolotukhin D. B. // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 120. P. 233302.

35. Zolotukhin D. B., Oks E. M., Tyunkov A. V., Yushkov Yu. G. // Review of Scientific Instruments. 2016. Vol. 87. P. 063302.

36. Oks E. M., Tyunkov A. V., Yushkov Yu. G., Zolotukhin D. B. // Surface & Coatings Technology. 2017. Vol. 325. P. 1.

PACS: 52.50.Dg

Reactive methods for titanium oxides thin films deposition (a review)

D. B. Zolotukhin¹, V. A. Burdovitsin¹, A. V. Tyunkov¹, Yu. G. Yushkov¹,
E. M. Oks¹, D. A. Golosov², and S. M. Zavadskiy²

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: ZolotukhinDen@gmail.com; burdov@fet.tusur.ru;
andrew71@sibmail.com; yushkovyu@mail.ru; oks@fet.tusur.tu

² Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics
6 P. Brovki str., Minsk, 220013, Belarus
E-mail: svad@bsuir.by

Received August 15, 2017

This review article is dedicated to analysis of advantages and disadvantages of reactive methods for deposition of titanium oxide thin films. Special attention is paid to such traditional methods as magnetron sputtering in the atmosphere of reactive gases and vacuum arc deposition. We also discuss the feasibility of such alternative method as reactive electron beam evaporation of Ti target, at fore-vacuum pressures (1–15 Pa) of oxygen, with deposition of evaporated material on a sample. We show that last method has several advantages such as simplicity, stoichiometry of deposited films of TiO₂, with higher deposition rates and lower energy consumption.

Keywords: reactive deposition, thin films of titanium oxide, magnetron sputtering, vacuum arc deposition, reactive electron-beam evaporation.

REFERENCES

1. W. G. Lee, S. I. Woo, J. C. Kim, S. H. Choi, and K. H. Oh, Thin Solid Films **237**, 105 (1994).

2. K. S. Yeung and Y. W. Lamb, Thin Solid Films **109**, 242 (1993).

3. Y. Sawada and Y. Taga, Thin Solid Films **116**, 155 (1984).

4. K. Bange, C. R. Ottermann, O. Anderson, U. Jeschkowski, M. Laube, and R. Feile, Thin Solid Films **197**, 279 (1991).

5. K. L. Siefert and G. L. Griffin, J. Electrochem. Soc. **137**, 1206 (1990).

6. N. Rausch and E. P. Burte, J. Electrochem. Soc. **140**, 145 (1993).

7. Y. Abe and T. Fukuda, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 1248 (1994).

8. Y. H. Lee, K. K. Chan, and M. J. Brady, J. Vac. Sci. Technol. A. **13**, 596 (1995).

9. C. Yu. Jimmy, Jianguo Yu, and Jincui Zhao, Applied catalysis B. **36**, 31 (2002).

10. J. P. Lu, J. Wang, and R. Raj, Thin Solid Films. **204**, L13 (1991).

11. S. Miyaki, T. Kobayashi, M. Satou, and F. Fijimoto, J. Vac. Sci. Technol. A. **9**, 3036 (1991).

12. V. A. Burdovitsin and E. M. Oks, Laser Part. Beams. **26**

- (4), 619 (2008).
13. R. Dannenberg and P. Greene, *Thin Solid Films*. **360**, 122 (2000).
14. D. Guerin and S. Ismat Shah, *J. Vac. Sci. Technol. A*. **15**, 3 (1997).
15. I. Shyjumon, M. Gopinadhan, C. A. Helm, B. M. Smirnov, and R. Hippler, *Thin Solid Films*. **500**, 41 (2006).
16. T. Kubart, D. Depla, D. M. Martin, T. Nyberg, and S. Berg, *Applied Physics Letters*. **92**, 221501 (2008).
17. R. Yordanov, S. Boyadjiev, and V. Georgieva, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. **9** (2), 467 (2014).
18. D. A. Golosov, S. M. Zavadski, and I. V. Svadkovski, *Izv. vuzov. Fizika. No. 8. Application*. P. 484 (2006).
19. A. Bendavid and P. J. Martin, *Thin Solid Films*. **394**, 1 (2001).
20. A. Bendavid and P. J. Martin, *Journal of the Australian Ceramics Society*. **50**, 86 (2014).
21. A. Bendavid, P. J. Martin, and H. Takikawa, *Thin Solid Films* **360**, 241 (2000).
22. A. Bendavid, P. J. Martin, A. Jamting, and H. Takikawa, *Thin Solid Films* **355–356**, 6 (1999).
23. I. Tsyganov, M. F. Maitz, E. Wieser, F. Prokert, E. Richter, and A. Rogozin, *Surface and Coatings Technology* **174–175**, 591 (2003).
24. Y. X. Leng, N. Huang, P. Yang, J. Y. Chen, H. Sun, J. Wang, G. J. Wan, Y. Leng, and P. K. Chu, *Thin Solid Films* **420–421**, 408 (2002).
25. Chr. Metzner, K. Goedicke, G. Hoetzsch, B. Scheffel, and J.-P. Heinss, *Surf. Coat. Technol.* **94–95**, 663 (1997).
26. V. V. Brus, Z. D. Kovalyuk, and P. D. Maryanchuk, *Technical Physics* **8**, 110 (2012).
27. T. Modes, B. Scheffel, Chr. Metzner, O. Zywitzki, and T. E. Reinhold, *Surface & Coatings Technology*. **200**, 306 (2005).
28. K. Bockut, G. Laukaitis, D. Virbukas, and D. Milcius, *Materials Science*. **19** (3), 245 (2013).
29. T. M. Rodgers, H. Zhao, and H. N. G. Wadley, *J. Vac. Sci. Technol. A*. **33** (5), 05E118-1-24 (2015).
30. D. D. Hassa, Y. Marciano, and H. N. G. Wadley, *Surface & Coatings Technology* **185**, 283 (2004).
31. D. T. Queheillalt, D. D. Hass, D. J. Sypeck, and H. N. G. Wadley, *J. Mater. Res.* **16** (4), 1028 (2001).
32. T. M. Rodgers, H. Zhao, and H. N. G. Wadley, *J. Vac. Sci. Technol. A*. **31** (6), 061509-1-14 (2013).
33. A. V. Tyunkov, Yu. G. Yushkov, D. B. Zolotukhin, K. P. Savkin, and A. S. Klimov, *Physics of Plasmas*. **21**, 123115 (2014).
34. Yu. G. Yushkov, A. V. Tyunkov, E. M. Oks, and D. B. Zolotukhin, *Journal of Applied Physics* **120**, 233302 (2016).
35. D. B. Zolotukhin, E. M. Oks, A. V. Tyunkov, and Yu. G. Yushkov, *Review of Scientific Instruments* **87**, 063302 (2016).
36. E. M. Oks, A. V. Tyunkov, Yu. G. Yushkov, and D. B. Zolotukhin, *Surface & Coatings Technology* **325**, 1 (2017).