

Л. Жадуаль<sup>1</sup>, А. Афір<sup>1</sup>, А. Ель Бужлайді<sup>1</sup>, М. Айт Ель Фкіх<sup>2\*</sup>, Р. Журдані<sup>1</sup>, А. Каддурі<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Лабораторія матеріалів, енергії та навколишнього середовища, Університет Каді Аїяд, Марракеш, Марокко

<sup>2</sup>Лабораторія штучного інтелекту та інженерії складних систем,  
Університет Хасана II Касабланки, Касабланка, Марокко

\*Відповідальний автор: m.aitelfqih@gmail.com

## ІОННО-ФОТОННЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД ТИТАНОВОЇ МІШЕНІ ПІД ПУЧКОМ ІОНІВ

Експериментально досліджено випромінювання фотонів у діапазоні довжин хвиль 280 - 420 нм у результаті розпилення іонного пучка  $5 \text{ Kr}^+$  з титану в присутності та відсутності кисню. Спостережені спектри складаються із серії дискретних ліній, накладених на широкосмуговий континуум. Дискретні лінії відносяться до збудженого нейтрального Ті I і збуджених іонів Ті II. Відмінності спостережених інтенсивностей спектральних ліній розглядаються з точки зору процесів перенесення електронів між збудженим розпиленим атомом і електронними рівнями твердого тіла. Процес радіаційної дисоціації та розрив хімічних зв'язків, по всій імовірності, сприяють посиленню інтенсивності випромінюваних фотонів. Спостерігається неперервне випромінювання, що, дуже ймовірно, пов'язане з електронною структурою титану. Колективна деактивація електронів 3d-оболонки відіграє певну роль в емісії цього випромінювання.

*Ключові слова:* розпилення, титан, світловипромінювання, модель переносу електронів, неперервне випромінювання.

L. Jadoual<sup>1</sup>, A. Afkir<sup>1</sup>, A. El Boujlaidi<sup>1</sup>, M. Ait El Fqih<sup>2\*</sup>, R. Jourdani<sup>1</sup>, A. Kaddouri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Materials, Energy, and Environment, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco

<sup>2</sup>Laboratory of Artificial Intelligence & Complex Systems Engineering, ENSAM,  
Hassan II University of Casablanca, Casablanca, Morocco

\*Corresponding author: m.aitelfqih@gmail.com

## ION-PHOTON EMISSION FROM TITANIUM TARGET UNDER ION BEAM SPUTTERING

Ion photon emission in the wavelength range of 280 - 420 nm resulting from  $5 \text{ Kr}^+$  ion beam sputtering from titanium in the presence and the absence of oxygen was studied experimentally. The observed spectra consist of a series of discrete lines superimposed with a broadband continuum. Discrete lines are attributed to excited neutral Ti I and excited ions Ti II. The differences in the observed intensities of spectral lines are discussed in terms of the electron-transfer processes between the excited sputtered atom and electronic levels of the solid. The radiative dissociation process and breaking of chemical bonds seem to contribute to the enhancement of emitted photons intensity. Continuum radiation was observed and is very probably related to the electronic structure of titanium. The collective deactivation of 3d-shell electrons appears to play a role in the emission of this radiation.

*Keywords:* sputtering, titanium, light emission, electron-transfer model, continuum radiation.

## REFERENCES

1. R. Kelly. Towards a unified model for the formation of sputtered excited states. In: *Inelastic Particle Surface Collisions*. Eds. E. Taglauer, W. Heiland (Berlin: Springer-Verlag, 1981) p. 84.
2. M. Suchanska. Ion-induced photon emission of metals. *Prog. Surf. Sci.* 54(2) (1997) 165.
3. J.M. Hollas. *Modern Spectroscopy*. (Chichester: Wiley, 2004).
4. H. Gnaser. Energy and Angular Distributions of Sputtered Species. In: *Sputtering by Particle Bombardment*. Eds. R. Behrisch, W. Eckstein. *Topics Appl. Phys.* 110 (2007) 231.
5. V.V. Bobkov et al. Mechanisms of formation of sputtered particles in excited states at  $\text{Ar}^+$  ion bombardment of oxide targets. *Nucl. Instrum. Methods B* 256(1) (2007) 501.
6. N.A. Azarenkov et al. Ion-photon emission under ion bombardment of garnet structures of different composition. *Vacuum* 105 (2014) 91.
7. P. Agarwal, S. R. Bhattacharyya, D. Ghose. Transient effect in light emission during oxygen ion bombardment of a beryllium-copper target. *Appl. Surf. Sci.* 133(3) (1998) 166.
8. M.L. Yu. Charged and excited states of sputtered atoms. In: *Sputtering by Particle Bombardment*. III. Eds. R. Behrisch, K. Wittmaack. *Topics Appl. Phys.* 64 (1991) 91.
9. A.H. Dogar, A. Qayyum. Atomic excitations during ion beam sputtering of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  targets. *Nucl. Instrum. Methods B* 247(2) (2006) 290.

10. J. Fournier et al. Optical spectroscopy analysis of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  at room temperature and at 10 K. *J. Appl. Phys.* **69** (1991) 2382.
11. M. Ait El Fqih et al. Bombardment-induced light emission of clean and oxygen-covered Al, Cu, and  $\text{Cu}_x\text{Al}_{1-x}$  targets. *Surf. Interface Anal.* **50**(10) (2018) 969.
12. A. Kaddouri et al. Photon emission from clean and oxygenated Si and  $\text{SiO}_2$  surfaces bombarded by 5 keV krypton ions. *Appl. Surf. Sci.* **256** (2009) 116.
13. M. Ait El Fqih et al. On the validity of the electron transfer model in photon emission from ion bombarded vanadium surfaces. *Eur. Phys. J. D* **63** (2011) 97.
14. L. Jadoual et al. Optical Emission from Ion-Bombarded Nickel and Nickel Oxide. *Spectr. Lett.* **47**(5) (2014) 363.
15. A. El Boujlaidi et al. Photon emission produced by  $\text{Kr}^+$  ions bombardment of Cr and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  targets. *Nucl. Instrum. Methods B* **343** (2015) 158.
16. A. Afkir et al. Angular distribution of particles sputtered from a copper target by 5-keV Kr ions: Experiment and simulation study. *Surf. Interface Anal.* **53**(9) (2021) 792.
17. R. Jourdani et al. Effects of lithium insertion and deinsertion into  $\text{V}_2\text{O}_5$  thin films: Optical, structural, and absorption properties. *Surf. Interface Anal.* **50**(1) (2018) 52.
18. P.-G. Fournier et al. Angular distribution of sputtered particles and surface morphology: the case of beryllium under a krypton beam at various incidences. *Nucl. Instrum. Methods B* **230** (2005) 577.
19. M. Ait El Fqih, P.-G. Fournier. Optical emission from Be, Cu and CuBe targets during ion beam sputtering. *Nucl. Instrum. Methods B* **267** (2009) 1206.
20. C.B. Kerkdijk, R. Kelly. Oxygen-dependent photon emission from  $\text{Ne}^+$ -bombarded Mg. *Rad. Effects* **38**(1-2) (1978) 73.
21. P.G. Fournier et al. Light emission from Be and BeO surfaces bombarded by 5 keV  $\text{Kr}^+$  ions. *Nucl. Instrum. Methods B* **249** (2006) 153.
22. A. Lawicki, A. Lawicka, K. Kreft. Luminescence in collisions of low-energy ions with graphite and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **144** (2007) 161.
23. A. El Boujlaidi et al. Continuum radiation emitted from transition metals under ion bombardment. *Eur. Phys. J. D* **66** (2012) 273.
24. A.A. Radzig, B.M. Smirnov. *Reference Data on Atoms, Molecules, and Ions* (Berlin, Heidelberg: Springer, 1985) 466 p.; *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. D.R. Lide (ed.). 83rd ed. (Washington DC: CRC Press, 2002) 2664 p.
25. C.W. White, N.H. Tolk. Optical Radiation from Low-Energy Ion-Surface Collisions. *Phys. Rev. Lett.* **26** (1971) 486.
26. I. Terzić, B. Perović. Spectral analysis of light emitted from metallic targets bombarded by high energy ions. *Surf. Sci.* **21** (1970) 86.
27. A. Imanishi, E. Tsuji, Y. Nakato. Dependence of the Work Function of  $\text{TiO}_2$  (Rutile) on Crystal Faces, Studied by a Scanning Auger Microprobe. *J. Phys. Chem. C* **111**(5) (2007) 2128.
28. H. Wu, L.-S. Wang. Electronic structure of titanium oxide clusters:  $\text{TiO}_y$  ( $y = 1-3$ ) and  $(\text{TiO}_2)_n$  ( $n = 1-4$ ). *J. Chem. Phys.* **107**(20) (1997) 8221.
29. C.W. White et al. Continuum optical radiation produced by low-energy heavy particle bombardment of metal targets. *Nucl. Instrum. Methods* **132** (1976) 419.
30. D.J. Mowbray et al. Stability and Electronic Properties of  $\text{TiO}_2$  Nanostructures with and without B and N Doping. *J. Phys. Chem. C* **113**(28) (2009) 12301.
31. A. Afanasieva et al. Comparison of the main parameters of the ion-photon emission of titanium atoms and singly charged ions. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **11**(1) (2017) 146.
32. G. Blaise, G. Slodzian. Processus de formation d'ions à partir d'atomes éjectés dans des états électroniques surexcités lors du bombardement ionique des métaux de transition. *J. Phys. France* **31**(1) (1970) 93.
33. C. Coudray, G. Slodzian. Contribution of the Landau-Zener-Stueckelberg model to the understanding of positive secondary-ion emission. *Phys. Rev. B* **49**(14) (1994) 9344.
34. E.O. Rausch, A.I. Bazhin, E.W. Thomas. On the origin of broad band optical emission from Mo, Nb, and W bombarded by heavy ions. *J. Chem. Phys.* **65**(11) (1976) 4447.
35. T. Kiyani, V.V. Gritsyna, Y. Fogel. On the continuous spectrum emitted by particles ejected from the surface of solid targets by an ion beam. *Nucl. Instrum. Methods* **132** (1976) 415.
36. A. Qayyum, M.N. Akhtar. Continuum light emission from sputtered species of graphite during ion beam irradiation. *Eur. Phys. J. D* **12** (2000) 181.