



УДК: 538.975

*Жасурбек ЖУМАЕВ,*  
Базовый докторант ТауГТУ  
E-mail: jumatayevjasurbek9999@gmail.com

На основании рецензии доктора физико-математических наук А.Абдувайитова

### ВЛИЯНИЕ МОНОСЛОЙНОЙ АДСОРБЦИИ АТОМОВ CS НА ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ, ЭМИССИОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА GaP (111)

Аннотация

В работе изучено влияние монослойного осаждения атомов Cs на электронную структуру (плотность состояния электронов, параметры зон и оптические свойства) монокристаллического GaP(111). Исследования проводились методами спектроскопии фотоэлектронов и упруго отраженных электронов. Показано, что работа выхода электронов уменьшается на 1,94 эВ, а квантовый выход электронов увеличивается в 5 и более раз.

**Ключевые слова:** Поверхность, толщина, работа выхода, монослой, структура, монокристалл, осаждение.

### EFFECTS OF MONOLAYER ADSORPTION OF CS ATOMS ON THE ELECTRONIC STRUCTURE, EMISSION AND OPTICAL PROPERTIES OF GaP (111)

Annotation

Using the methods of ultraviolet photoelectron spectroscopy, light absorption spectroscopy and true secondary electrons, the effect of deposition of Cs atoms with a thickness of 1 monolayer on the density of states of electrons in the valence and conduction bands, the parameters of the energy band, and the quantum yield of photoelectrons were studied. It was found that when cesium is deposited on the surface of GaP (111) single crystals with a thickness of 1 monolayer, the value of  $E_g$  and the position of the maxima of the density of states of valence electrons remain virtually unchanged, the work function of photoelectrons decreases to 1.94 eV, and the quantum yield of photoelectrons increases by 5 or more times. Key words: Surface, thickness, work function, monolayer, structure, single crystal, deposition.

**Key words:** Surface, thickness, work function, monolayer, structure, single crystal, deposition.

### GAP (111) NING ELEKTRON TUZILISHI, EMISSIYASI VA OPTIK XUSUSIYATLARIGA MONOQATLAMLI CS ATOMLARI ADSORBSIYASINING TA'SIRI

Annotatsiya

Ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi, yorug'lik yutilish spektroskopiyasi va haqiqiy ikkilamchi elektronlar spektroskopiyasi usullaridan foydalangan holda, 1 monoqatlam qalinligidagi Cs atomlarining changlatilishining valentlik va o'tkazuvchanlik zonalardagi elektronlar holat zichligiga, energiya zona parametrlariga va fotoelektronlarning kvant chiqishga ta'siri o'rganildi. Aniqlanishicha, seziiy 1 monoqatlamli GaP(111) monokristallari yuzasiga changlatilganda  $E_g$  ning qiymati va valent elektronlarining holat zichligi maksimumlarining o'rni amalda o'zgar olmaydi, ammo fotoelektronlarning chiqish ishi 1,94 eV gacha kamayadi va fotoelektronlarning kvant chiqishi 5 marta yoki undan ko'proq oshadi.

**Kalit so'zlar:** Sirt, qalinlik, chiqish ishi, monoqatlam, tuzilish, monokristall, changlatish.

**Введение.** В последние годы много работ посвящено получению кристаллических тонких пленок полупроводниковых материалов, особенно GaP, и изучению их состава, структуры и свойств [1-6]. Результаты этих исследований представляют большой интерес при разработке новых оптоэлектронных устройств, в частности солнечных элементов, а также связан с его широким использованием при создании [7-13]. При покрытии поверхности материалов различной природы происходит резкое изменение их состава и физико-химических свойств [14-17]. В частности, путем имплантации ионов In в GaP были сформированы нанопленки  $Ga_{0,6}In_{0,4}P/GaP$  (111) [15], определены их эмиссионные и оптические параметры, а также параметры энергетических зон. В данной работе впервые изучены влияние монослойной адсорбции атомов Cs на элементный химический состав и электронную структуру GaP (111).

**Методика эксперимента.** Эксперименты проводились на универсальной СВВ установке УСУ-2. Монокристаллы GaP(111) обезгаживались при вакууме  $P = 10^{-7}$  Па, температуре  $T = 900$  К примерно 4 часа. Перед напылением Cs на поверхность монокристаллов GaP(111) создавали однородные зародыши бомбардировкой ионами  $Ag^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ. Нами установлено, что при дозе  $D = 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> кристалличность поверхности заметно не меняется, образуются зародыши (дефектные центры) с поверхностными диаметрами 1-1,5 нм. Для получения атомов Cs использовали кристаллы соли хлорида цезия. После прогрева CsCl при  $T = 1000$  К атомы Cs выделялись из источника и попадали на поверхность GaP(111). Исследования проводились с использованием методов фотоэлектронной спектроскопии с  $h\nu=10,8$  эВ, спектроскопии Оже - электронов. Зависимость коэффициента пропускания света  $T$  от  $h\nu$  снималась на спектрофотометре UV-1280.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 приведены начальные части оже- спектров чистого GaP и GaP с пленкой Cs толщиной 1 монослой. Здесь за 1 монослой принята толщина Cs при котором фотоэлектронная работа выхода  $\Phi$

уменьшается до минимума. В оже спектре чистого GaP обнаруживаются пики Ga с энергиями 54 эВ ( $M_1M_3V$ ) и 79 эВ ( $M_3M_5V$ ), а также пик P с энергией 121 эВ ( $L_3M_{23}V$ ). После напыления Cs с  $\theta = 1$  мс амплитуда пиков Ga уменьшается и изменяются их положения. Положение пика фосфора при  $E=121$  эВ не меняется, однако его интенсивность резко уменьшается, появляется слабый пик Cs при  $E=49$  эВ. Опираясь на результаты работы [18] можно показать, что Cs в основном осажается на атомы Ga и образуются поверхностные квазимолекулы Cs+Ga, при этом атомы Cs отдают свои электроны атомам Ga, следовательно, на поверхности формируются диполи, которые облегчают выход электронов в вакуум.

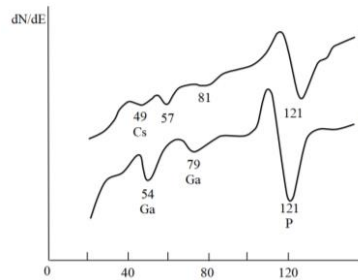


Рисунок 1. Начальные части оже-спектров: GaP (111) до (кривая 1) и после адсорбции Cs с  $\theta=1$  монослой (2)

На рис.2 приведены фотоэлектронные спектры чистого и покрытого монослоем цезия GaP(111), снятые при  $h\nu = 10,8$  эВ. На спектре GaP(111) имеются 3 максимума при  $E_{св} \approx 0,8; 2$  и  $4,1$  эВ. Их наличие объясняется возбуждением электронов из валентной зоны. Вследствие возбуждения поверхностных состояний ПС появляется особенность при  $0,3$  эВ. Адсорбция Cs с  $\theta = 1$  монослой приводит к заметному росту площади под кривой  $N(E)$ , увеличению квантового выхода фотоэлектронов, интенсивности пиков, некоторому изменению их энергетических положений и увеличению ширины спектра  $\Delta E$ . Все эти изменения объясняются образованием на поверхности соединения типа Cs+Ga и уменьшением работы выхода фотоэлектронов. В начальной части спектра появляется новая особенность, характерная для  $6s$  состояния Cs.

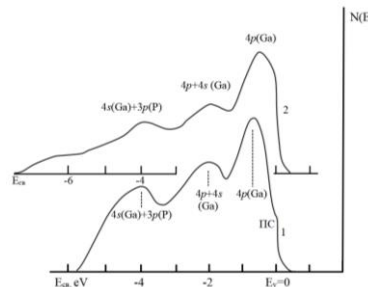


Рисунок 2. Фотоэлектронные спектры: 1- GaP (111); 2- GaP (111) с монослойным покрытием Cs.

На рис. 3 приведены спектры прохождения света через образец GaP(111), полученные до и после осаждения Cs с толщиной  $\theta=1$  монослой. Видно, что в обоих случаях значения коэффициентов прохождения света  $K$  в интервале  $h\nu \approx 0,5-1,8$  эВ. не меняются и составляют  $\sim 0,78$  для чистого GaP и  $0,74$  эВ для GaP с пленкой Cs. В этой области  $h\nu$  можно полагать, что коэффициент отражения  $R$  составляет  $0,22$  и  $0,26$ , соответственно. Начиная с  $h\nu \approx 2-2,1$  эВ  $K$  резко уменьшается, т.е. происходит интенсивное поглощение света и при  $h\nu \approx 2,3-2,4$  эВ  $K$  приближается к нулю. Экстраполяция кривой  $K(h\nu)$  к оси  $h\nu$  при  $h\nu \geq 2,1$  эВ дает значение  $E_g$  исследуемых образцов. Видно, что значение  $E_g$  для GaP (111) составляет  $\sim 2,36$  эВ и после напыления Cs с  $\theta=1$  монослой, практически, не изменяется. По зависимости  $K(h\nu)$  можно оценить значения  $K, R$  и  $T$  (коэффициент поглощения) при разных  $h\nu$  для исследуемых образцов. По данным рис.2 и 3 оценены зонно-энергетические параметры чистого и покрытого монослоем цезия GaP. В таблице приведены также значение  $\delta_m$  и  $Y$ .

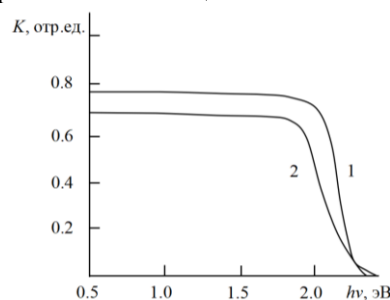


Рисунок 3. Зависимости  $K(h\nu)$  для пленки GaP (111) толщиной  $\theta$  (монослой): 1-  $\theta=0$  (чистый GaP (111)); 2-  $\theta=1$ .

Таблица

Параметры энергетических зон, значения  $\delta_m$  и  $Y$  пленки GaP(111) до и после осаждения Cs с  $\theta = 1$  монослой

Исследуемый объект	$\Phi$ , эВ	$E_g$ , эВ	$\chi$ , эВ	$\delta_m^*$	$Y^{**}(h\nu=10,8 \text{ эВ})$
GaP (111)	5,3	2,36	3,04	1,95	$6 \cdot 10^{-3}$
Cs- GaP(111)	3,36	2,36	1,1 эВ	11	$29 \cdot 10^{-3}$

\*-максимальное значение коэффициента вторичной эмиссии.

\*\* - квантовый выход фотоэлектронов.

Из таблицы видно, что при напылении Cs с  $\theta=1$  монослой значения фотоэлектронной работы выхода  $\Phi$  и сродство к электрону  $\chi$  уменьшаются на  $\sim 1,94$  эВ, значение  $E_g$  практически не меняется. При этом значения  $\delta_m$  и  $\Upsilon$  увеличиваются  $\sim 5$  и более раз.

**Заключение.** Изучено влияние адсорбции Cs толщиной 1 монослой на параметры энергетических зон и на значения коэффициента вторичной эмиссии  $\delta_m$  и квантового выхода фотоэлектронов монокристаллического GaP.

Показано, что адсорбция Cs с  $\theta=1$  монослой практически не приводит к изменению значения  $E_g$ , значения  $\Phi$  и  $\chi$  уменьшаются на 1,94 эВ. При этом происходит изменение плотности состояния валентных электронов и резкое увеличение значений  $\delta_m$  и  $\Upsilon$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mudar Ahmed Abdulsattar, Bahjat B. Kadhim and Huda M. Jawad. Electronic, Structural and Vibrational Properties of GaP Diamondoids and Nanocrystals: A Density Functional Theory Study. *Nanomater Nanotechnol*, 2015, 5:15 | doi: 10.5772/60577.
2. Lorenz M R, Pettit G D, Taylor R C (1968) Band Gap of Gallium Phosphide from 0 to 900K and Light Emission from Diodes at High Temperatures. *Phys. Rev.* 171:876.
3. Assali S, Zardo I, Plissard S, Kriegner D, Verheijen M A, Bauer G, Meijerink A, Belabbes A, Bechstedt F, Haverkort J E M, Bakkers E P A M (2013) Direct Band Gap Wurtzite Gallium Phosphide Nanowires. *Nano Lett.* 13:1559.
4. NSM Archive, Physical Properties of Semiconductors, Available: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>. Accessed 2014 June 1.
5. Fedorchenko I. V., Kushkov A. R., Gaev D. S., et al., Growth method for AIII BV and AIV BVI heterostructures, *J. Cryst. Growth.* 483 (1 February) (2018) 245–250.
6. Spirina A. A., Nastovjak A. G., Usenkov S. V., Shvarts N. L., Lattice Monte Carlo model of Langmuir evaporation of AIII BV semiconductors, *J. Comput. Technol.* 23 (6) (2018) 81–94.
7. Alexander S. Gudovskikh, Ivan A. Morozov, Alexander V. Uvarov, Dmitriy A. Kudryashov, Ekaterina V. Nikitina, and Anton S. Bukatin. Low temperature plasma enhanced deposition of GaP films on Si substrate. *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 36, No. 2, Mar/Apr 2018
8. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. (Wiley, New York, 1981).
9. H. Wagner, T. Ohrdes, A. Dastgheib-Shirazi, B. Puthen Veetil, D. K€onig, and P. P. Altermatt, *J. Appl. Phys.* 115, 044508 (2014).
10. 4 M. Feifel, T. Rachow, J. Benick, and J. Ohlmann, *IEEE J. Photovoltaics* 6, 384 (2016). 5 M. Sadeghi and S. Wang, *J. Cryst. Growth* 227–228, 279 (2001).
11. M. S. Sobolev, A. A. Lazarenko, E. V. Nikitina, E. V. Pirogov, A. S. Gudovskikh, and A. Yu. Egorov, *Semicond.* 49, 559 (2015).
12. J. F. Geisz, J. M. Olson, D. J. Friedman, K. M. Jones, R. C. Reedy, and M. J. Romero, 31th IEEE PVSC (2005), p. 695.
13. A. S. Gudovskikh, K. S. Zelentsov, A. I. Baranov, D. A. Kudryashov, I. A. Morozov, E. V. Nikitina, and J.-P. Kleider, *Energy Procedia* 102, 56 (2016).
14. B.E. Umirzakov, I.R. Bekpulatov, I.Kh. Turapov, B.D. Igamov. Effect of Deposition of Submonolayer Cs Coatings on the Density of Electronic States and Energy Band Parameters of CoSi<sub>2</sub>/Si(111). *J. NANO-ELECTRON. PHYS.* 14, 02026 (2022)
15. G. M. Shirinov, S. B. Donaev, B. Y. Umirzakov, V. V. Loboda. Emission, optical and electrical properties of GaInP/GaP nanofilms. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* 2023. Vol. 16. No. 2. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16208>.
16. Umirzakov B.E., Pugacheva T.S., Tashatov A.T., Tashmukhamedova D.A. Electronic structure and optical properties of CaF<sub>2</sub> films under low energy Ba<sup>+</sup> ion-implantation combined with annealing. // *Nuclear instruments & Methods in physics research section b-beam interactions with materials and atoms.* DOI: 10.1016/S0168-583X(99)01151-9 2000, Vol. 166, № 2, Page 572-576.
17. Donaev S. B., Tashatov A. K., Umirzakov B. E. Effect of Ar<sup>+</sup>- Ion Bombardment on the Composition and Structure of the Surface of CoSi<sub>2</sub>/Si(111) Nanofilms. // *Journal of surface investigation.* DOI: 10.1134/S1027451015020263. 2015, Vol. 9, № 2, Page 406-409.
18. Кораблев В.В., Кудинов Ю.А., Сысоев С.Н. Проявление зонной структуры твердого тела в спектрах вторичных электронов с угловым разрешением // *Физика твердого тела*, 1986, том 28, выпуск 9, с. 2648-2654.