

## ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Ge ПРИ АДСОРБЦИИ АТОМОВ Ba И ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Ba<sup>+</sup>

Д.А. Ташмухамедова<sup>1)</sup>, Б.Е. Умирзаков<sup>1)</sup>, Е.С. Эргашов<sup>1)</sup>,  
М.Б. Юсупжанова<sup>1)</sup>, А.Н. Ураков<sup>1)</sup>, Р.М. Еркулов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,  
100095 Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова Академии наук  
Республики Узбекистан, 100125 Ташкент, Узбекистан, [ftmet@mail.ru](mailto:ftmet@mail.ru)

Впервые исследовано влияние адсорбции атомов Ba с толщиной  $\theta \leq 3 - 4$  монослоя и имплантации ионов Ba<sup>+</sup> с энергией  $E_0 = 0.5 - 2$  кэВ на плотность состояний электронов валентной зоны, параметров энергетических зон, эмиссионных и оптических свойств Ge (111). Показано, что при адсорбции атомов Ba с  $\theta = 1$  монослой значение термоэлектрической работы выхода  $\phi$  уменьшается на  $\sim 1.9$  эВ, а значение коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\sigma_m$  и квантового выхода фотоэлектронов  $Y$  увеличивается в 1.5 – 2 раза. В случае имплантации ионов Ba<sup>+</sup> с  $E_0 = 0.5$  кэВ при дозе облучения  $D = 6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> плотность состояния валентных электронов и параметры энергетических зон резко изменяются; квантовый выход фотоэлектронов увеличивается в 2 и более раз.

**Ключевые слова:** ионная имплантация; эмиссионная эффективность; прогрев; аморфный слой.

## MODIFYING OF ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF Ge OF Ba ATOMS ADSORPTION AND IMPLANTATION OF Ba<sup>+</sup> IONS

D.A. Tashmukhamedova<sup>1)</sup>, B.E. Umirzakov<sup>1)</sup>, Y.S. Ergashov<sup>1)</sup>,  
M.B. Yusupjanova<sup>1)</sup>, A.N. Urakov<sup>1)</sup>, R.M. Yorkulov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Tashkent state technical university, 100095 Tashkent, Uzbekistan

<sup>2)</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifova Academy of Sciences  
of the Republic of Uzbekistan, 100125 Tashkent, Uzbekistan, [ftmet@mail.ru](mailto:ftmet@mail.ru)

The effect of the adsorption of Ba atoms with a thickness of  $\theta \leq 3 - 4$  monolayers and the implantation of Ba<sup>+</sup> ions with an energy of  $E_0 = 0.5 - 2$  keV on the density of states of electrons in the valence band, the parameters of the energy bands, and the emission and optical properties of Ge (111) has been studied for the first time. It is shown that, upon adsorption of Ba atoms with  $\theta = 1$  monolayer, the value of the thermoelectric work function  $\phi$  decreases by  $\sim 1.9$  eV, and the value of the secondary electron emission coefficient  $m$  and the quantum yield of photoelectrons  $Y$  increases by a factor of 1.5 - 2. In the case of implantation of Ba<sup>+</sup> ions with  $E_0 = 0.5$  keV at an irradiation dose  $D = 6 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>, the density of state of valence electrons and the parameters of the energy bands change sharply; the quantum yield of photoelectrons increases by a factor of 2 or more.

**Keywords:** ion implantation; emission efficiency; heating; amorphous layer.

### Введение

В настоящее время в различных приборах твердотельной электроники широко используются Si, Ge и наноструктуры на их основе. В частности, нанофазы и нанослои силицидов и германидов металлов имеют перспективы в создании СВЧ транзисторов и интегральных схем, а гетероструктуры Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si – в создании светодиодов, фотодетекторов, лазерных диодов, оптических и электронных при-

боров [1, 2]. В связи с этим в последние годы хорошо изучены состав, электронная и кристаллическая структура, эмиссионные и оптические свойства наноразмерных структур и слоев, созданных на основе элементарных и бинарных полупроводников. Эти гетеросистемы получены методами молекулярно-лучевой эпитаксии, газофазной эпитаксии и ионной имплантации [3-5].

Однако до настоящего времени не

имеется достоверных сведений и результатов экспериментальных и теоретических исследований, посвященных изучению физических свойств наноструктур германидов, полученных методом ионной имплантации.

Поэтому данная работа посвящена изучению состава и электронных свойств Ge (111), покрытого атомами Ва и имплантированного ионами  $Ba^+$  с энергией  $E_0 = 0.5-5$  кэВ.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены УФЭС для Ge (111) n-типа, покрытого пленкой Ва разной толщины. По оси абсцисс отложена энергия связи  $E_{св}$  электронов (энергия отсчитывается от уровня Ферми чистого Рд). Здесь и в дальнейшем на всех кривых энергетического распределения (КЭР) фотоэлектронов использован один и тот же масштаб по вертикали, выбранный таким образом, что площадь под кривой пропорциональна величине квантового выхода электронов из образцов. Из рис. 1 видно, что на спектре чистого р-тип Ge (111) обнаруживаются явно выраженные особенности при энергиях  $-0.8$ ;  $-1.6$ ;  $-3.5$  и  $-5.1$  эВ. Наличие этих особенностей связано с возбуждением электронов из поверхностных состояний (ПС), а также из  $4p$ ,  $4s$  и гибридных  $4p + 4s$  уровней Ge (см. рис. 1, кривая 1). Для наглядности кривые смещены по вертикали.

При малых толщинах покрытий бария ( $\theta = 0.5 - 0.6$ ), когда еще в основном эмиттируются электроны из германия, на КЭР с ростом  $\theta$  наблюдаются следующие изменения: более четко выделяются все особенности Ge; начало спектра и пики, связанные с максимумами плотности состояний электронов в валентной зоне, смещаются в сторону меньших энергий; появляется новый пик в области  $E_{св} = -6$  эВ характерный для Ge, увеличивается ширина КЭР и возрастает квантовый выход фотоэлектронов. Изменение положений низкоэнергетического конца КЭР, очевидно, соответствует уменьше-

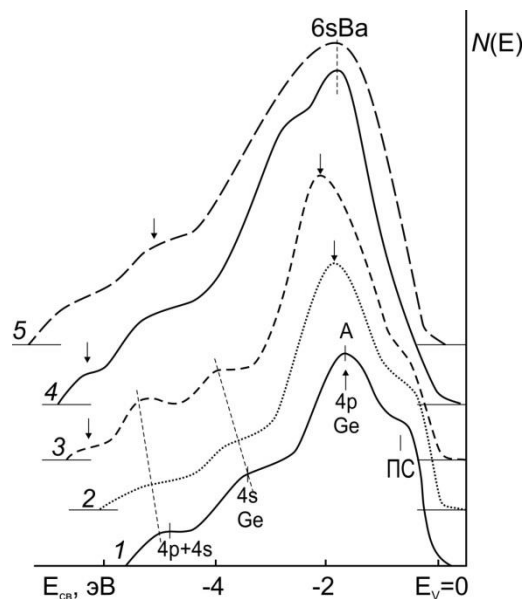


Рис. 1. УФЭС Ge (111) p-типа с пленкой бария толщиной  $\theta$ , монослой: 1 – 0; 2 – 0.2; 3 – 0.6; 4 – 1.0; 5 – 2.0.  $h\nu = 10.8$  эВ

Fig. 1. UVPES Ge (111) p-type with a barium film of thickness  $\theta$ , monolayer: 1 - 0; 2 - 0.2; 3 - 0.6; 4 - 1.0; 5 - 2.0.  $h\nu = 10.8$  eV

нию  $\phi$ , а величина смещения пика А равна изменению изгиба зон. Рост  $\gamma$  обусловлен, главным образом, уменьшением работы выхода и увеличением изгиба зон. При дальнейшем увеличении толщины слоя бария (рис. 1, кривые 4, 5) интенсивность германиевых пиков, монотонно уменьшается и начинает формироваться структура, характерная для бария.

На рис. 2 приведены зависимости термоэлектронной работы выхода  $\phi$ , квантового выхода  $\gamma$  и максимальное значение коэффициента ВЭЭ  $\sigma_m$  от времени напыления для системы барий-германий. При этом за 1 монослой условно принято значение  $\theta$ , при котором  $\phi = \phi_{мин}$ . Видно, что точка перегиба зависимости  $\sigma_m(t)$  и  $\gamma(t)$  приблизительно совпадает с толщиной  $\theta$ , равной одному монослою. При этом значения  $\sigma_m$  и  $\gamma$  системы Ва-Ge оказывается максимальным. С дальнейшим ростом  $\theta$  значения  $\gamma$  и  $\sigma_m$  монотонно уменьшается. Можно полагать, что эмиссионная эффективность слоев Ва, значительно меньше,

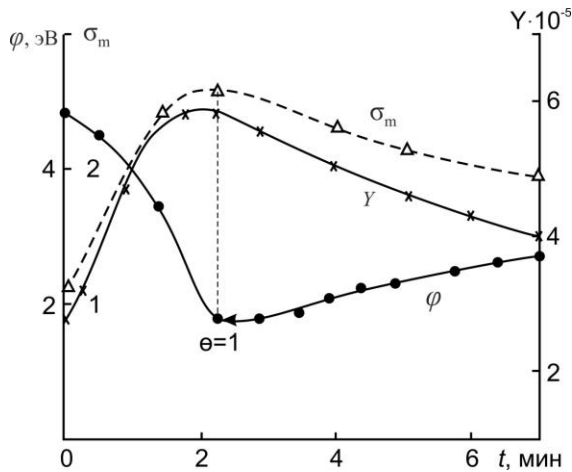


Рис. 2. Зависимости  $\varphi$ ,  $\sigma_m$  и  $Y$  от времени напыления для системы Ba-Ge (111)

Fig. 2. Dependences of  $\varphi$ ,  $\sigma_m$  and  $Y$  on the deposition time for the Ba - Ge (111) system

чем, слоев Ge.

### Заключение

В данной работе проведены сравнительные исследования влияния адсорбции атомов Ba и имплантации ионов  $Ba^+$  на состав, структуру и эмиссионные свойства монокристаллического Ge (111) n- и p-типа. В процессе адсорбции Ba с  $\theta \leq 0.6$  монослоев не происходит заметного изменения состава поверхностных слоев, поэтому изменение электронной структуры и увеличение коэффициентов  $\sigma_m$  и  $Y$  в этой области  $\theta$ , в основном, объясняется уменьшением работы выхода  $e\varphi$  и изменением величины изгиба зоны поверхности. Начиная с  $\theta = 1$  монослой на спектре появляются явно выраженные особенности, характерные для Ba, а при  $\theta = 2$  монослоя устанавливаются все особенности бария.

### Библиографические ссылки

1. Masini G., Colace L., Assanto G. Si based optoelectronics for communications. *Mat. Sci. Eng. B.* 2002; 89: 2–9.
2. Pavesi L. Will silicon be the photonic material of the third millenium? *J. Phys. Cond. Mat.* 2003; 15: R1169-R1196.
3. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Мустафоева Н.М. Электронные и оптические свойства нанопленок  $NiSi_2/Si$ . *Журнал технической физики* 2019; 89 (5): 759-761.
4. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Boltsev E.U., Dzhurakhalov A.A. Obtaining of epitaxial films of metal silicides by ion implantation and molecular beam epitaxy. *Materials Science and Engineering B.* 2003; 101: 124-127.
5. Zhuravlev A.S., Dickmann S., Kulik L.V., Kulkushkin I.V. Slow spin relaxation in a quantum Hall ferromagnet state. *Phys. Rev. B.* 2014; 89(16): 161301.

### References

1. Masini G., Colace L., Assanto G. Si based optoelectronics for communications. *Mat. Sci. Eng. B.* 2002; 89: 2–9.
2. Pavesi L. Will silicon be the photonic material of the third millenium? *J. Phys. Cond. Mat.* 2003; 15: R1169-R1196.
3. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Мустафоева Н.М. Electronic and optical properties of  $NiSi_2/Si$  nanofilms. *Technical Physics* 2019; 64 (5): 708-710.
4. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Boltsev E.U., Dzhurakhalov A.A. Obtaining of epitaxial films of metal silicides by ion implantation and molecular beam epitaxy. *Materials Science and Engineering B.* 2003; 101: 124-127.
5. Zhuravlev A.S., Dickmann S., Kulik L.V., Kulkushkin I.V. Slow spin relaxation in a quantum Hall ferromagnet state. *Phys. Rev. B.* 2014; 89(16): 161301.