Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i2.427

Эмиссионные свойства и электронная структура трехкомпонентных нанопленок, сформированных на поверхности GaP при низкоэнергетической ионной имплантации и последующем отжиге

Г.М. Ширинов[1], С.Б. Донаев[*1], Б.Е. Умирзаков[1,2]

[1]Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова, Университетская 2, 100174, Ташкент, Узбекистан
[2]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У. Арифова Академии наук РУз, ул. Дурмон йули, 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

Получена .06.05.2023, revised 17.06.2023

* Corresponding author: e-mail sardor.donaev@gmail.com, Phone: +998 93 575 42 22

Методом имплантации ионов Al^+ и In^+ и последующего отжига на поверхности GaP получены тонкие монокристаллические пленки GaAlP и GaInP. С использованием методов оже-электронной спектроскопии, ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии, поглощения света и снятием энергетических и угловых зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии впервые определены основные параметры энергетических зон и эмиссионные параметры нанопленок $Ga_{0,6}Al_{0,4}P/GaP(111)$ и $Ga_{0,6}In_{0,4}P/GaP(111)$ с толщиной ≤50 Å. В частности, показано, что ширина запрещенной зоны E_g пленки $Ga_{0,6}In_{0,4}P/GaP$ заметно меньше, чем E_g подложки, следовательно, значения σ_m и K системы несколько уменьшаются относительно чистого GaP.

Ключевые слова: низкоэнергетический ионная имплантация, отжиг, поверхность,наноструктура, концентрация, трехкомпонентная нанопленка, тонкая пленка.

By implantation of Al^+ and In^+ ions and subsequent annealing on the GaP surface, thin single-crystal GaAlP and GaInP films were obtained. For the first time using the methods of Auger electron spectroscopy, ultraviolet photoelectron spectroscopy, light absorption and taking the energy and angular dependences of the secondary electron emission coefficients, the main parameters of the energy bands and the emission parameters of the $Ga_{0.6}Al_{0.4}P/GaP(111)$ and $Ga_{0.6}In_{0.4}P/GaP(111)$ with thickness ≤50 Å nanofilms were determined. In particular, it is shown that the band gap E_g of the $Ga_{0.6}In_{0.4}P/GaP$ film is noticeably smaller than the E_g of the substrate; therefore, the values of σ_m and K of the system somewhat decrease relative to pure GaP.

Keywords:low-energy ion implantation, annealing, surface, nanostructure, concentration, three-component nanofilm, thin film

I. Введение

Бинарные полупроводники $A^{III}B^{V}$ и многокомпонентные гетероструктуры на их основе широко применяются в создании различных приборов опто-, микро- и наноэлектроники. В частности, многослойные структуры со слоями GaP, GaInP, AlGaInP перспективны для изготовления лазерных диодов, солнечных элементов, фотоэлектрических и оптоэлектронных устройств. Особый интерес представляет получение тройных твердых растворов типа $Ga_{1-x}Al_xAs$, $Ga_xIn_{1-x}P$ с регулируемой

шириной запрещенной зоны [1-4]. В настоящее время хорошо изучены состав, структура, оптические и электронные свойства многослойных структур $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$, полученных различными методами эпитаксии, что связано с широким использованием их в различных приборах микро- и оптоэлектроники [5-10].

Несмотря на проблемы ограничения носителей для сплавов $Ga_xIn_{1-x}P$ с большой шириной запрещенной зоны [11, 12], был разработан упрощенный подход для моделирования деградации интенсивности люминесценции в зависимости от энергетиче-ского разделения между прямыми и непрямыми полосами [13].

В работе [14] пленки $Ga_xIn_{1-x}P$ легировали ионами Te с концентрацией от 7×10^{16} $см^{-2}$ до 2×10^{18} $см^{-2}$. Изучение их спектров фотолюминесценции показало, что переход непрямой полосы в прямую происходит между 40 и 100 К, а прямое излучение полосы доминирует в спектрах ФЛ при комнатной температуре.

В последние годы для получения нанопленок на поверхности полупроводников и диэлектрических пленок наиболее часто используется метод низкоэнергетический ионной имплантации в сочетании с отжигом [15-19]. В частности, установлено, что при бомбардировке ионами Ar^+ высокой дозы поверхность обогащается атомами Ga, а при бомбардировке ионами Me (Ba и Na) – атомами Ga и Me. Однако такие исследования в случае GaP, имплантированного низкоэнергетическими ионами In^+ и Al^+, практически не проводились.

Данная работа посвящена получению нанопленок GaInP и GaAlP имплантацией ионов In^+ и Al^+ в GaP и изучению их физических свойств.

II. Методика эксперимента

В качестве объектов исследования выбраны монокристаллические образцы GaP(111). Перед ионной имплантацией GaP(111) обезвожи-вали в условиях сверхвысокого вакуума (P= 10^{-7} Па) при T=900 К в течение ~4 час. Имплантацию проводили ионами In^+ (и Al^+) с энергией E_0=1 кэВ при дозе насыщения $D_н$ 10^{17} $см^{-2}$. При этом ионно-имплантированные слои GaP полностью разупорядочивались, и в этих слоях концентрации C_{Al} и C_{In} составляли ~ 30–35 ат.%. Часть атомов In и Al образует химическую связь с атомами матрицы. После прогрева GaP, имплантированного ионами Al^+ при T=900 К, на поверхности образуется монокристаллическая пленка типа $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$, а в случае имплантации ионов In^+ после прогрева при T=950 К – типа $Ga_{0.6}In_{0.4}P$. Исследования проводили с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), дифракции быстрых элект-ронов (ДБЭ), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и снятием энергетических и угловых зависимостей коэффициентов вторично-электронной эмиссии (КВЭЭ). Ультрафиолетовые фотоэлектронные спектры снимали при энергии фотонов $h\nu$≈10.8 эВ. Источником фотонов служила стандартная газоразрядная водородная лампа.

III. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены начальные части оже-спектров GaP и GaP с поверхностными пленками $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$ и $Ga_{0.6}In_{0.4}P$. Видно, что при образовании нового соединения вместо оже-пиков Ga (E=54 и 79 эВ) появляются новые пики, характерные для трехкомпонентных пленок. В случае $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$ появляются пики с E ≈ 50, 62, 71, 81 эВ, а в случае $Ga_{0.6}In_{0.4}P$ с E ≈ 48, 80 и 105 эВ. Положение пика E=121 эВ (P) заметно не меняется.

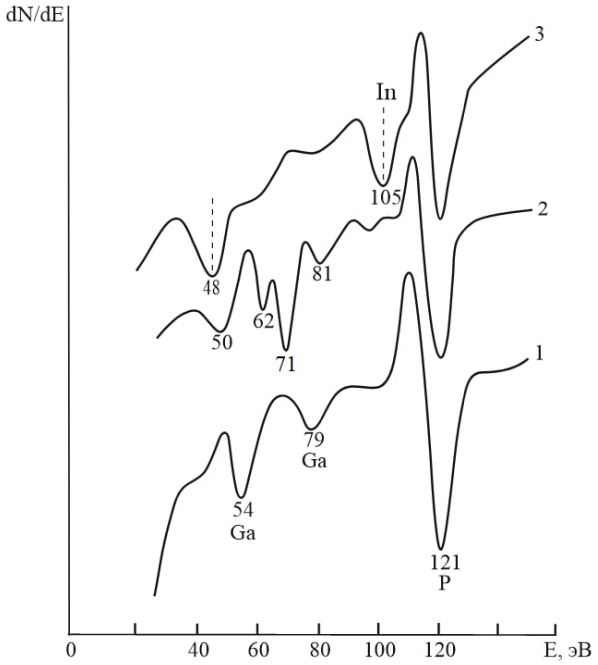


Рисунок 1. Оже-спектры для: 1 – GaP(111); 2 – $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$/GaP(111); 3 – $Ga_{0,6}In_{0,4}P$/GaP(111). Оже-спектры снимали при E_0=2000 эВ.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Интенсивности указанных пиков практически не меняются до определенной глубины. Анализ полного спектра оже-электронов показал, что толщина пленки $Ga_{0.6}In_{0.4}P$ составляет 40–50 Å, а $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$ составляет 30–35 Å; между пленкой и подложкой образуется переходный слой толщиной 50–60 Å (рис. 2).

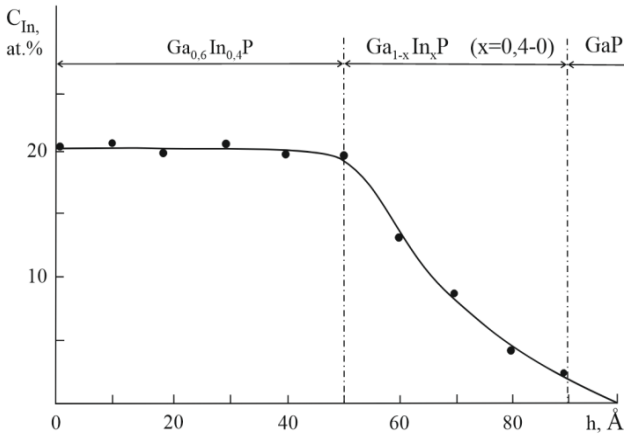


Рисунок 2. Зависимость концентрации атомов In, измеренной после прогрева (T = 950 K) образца GaP, имплантированного ионами In^+ с E_0=1 кэВ дозой D = 10^{17} см$^{-2}$.

На рис. 3 приведены спектры фотоэлектронов GaP(111) и GaP(111) с пленками $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$ и $Ga_{0.6}In_{0.4}P$, снятых при $h\nu$=10.8 эВ. Толщины пленок составляют ~35–40 Å и ~40–50 Å соответственно. На кривой энергетического распределения фотоэлектронов чистого GaP(111) имеются пики при энергиях связи $E_{св} \approx$ –0.8; –2.2 и –4 эВ. Плотности состояний электронов и энергетические параметры тонких трехкомпонентных пленок существенно отличаются от таковых для GaP. В частности, в случае пленки GaInP имеются пики при $E_{св} \approx$ –1.2; –3.3 и –5.6; Можно предположить, что пик при –1.2 эВ связан гибридизацией 4s валентных электронов Ga с 5p валентными электронами In.

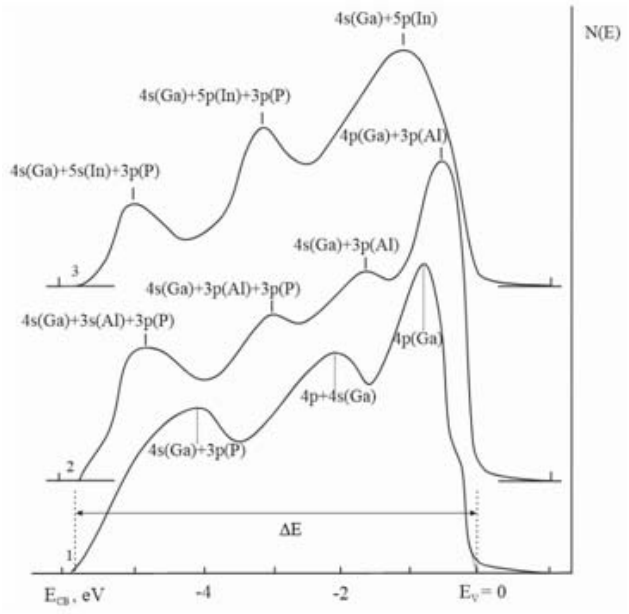


Рисунок 3. Спектры фотоэлектронов, снятые при $h\nu$ ≈10.8 эВ: 1 – GaP(111); 2 – $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$/GaP(111); 3 – $Ga_{0,6}In_{0,4}P$/(GaP(111)).

В таблице приведены данные об основных пиках, наблюдаемых в спектрах GaP(111) и пленках GaAlP и GaInP, параметры их энергетических зон, эмиссионные и оптические характеристики, а также возможные причины (интерпретация) образования пиков в спектрах исследуемых образцов и их параметры зон.

Таблица. Положение пиков электронов и их интерпретация, зонно-энергетические и эмиссионные параметры.

Объект	Толщина пленок, Å	$E_{св}$, эВ	Интерпретация	Φ, эВ	κ, эВ	E_g, эВ	σ_{max}	K ($h\nu$ = 10.8 эВ)
GaP(111)		–0.8	4p(Ga)					
		–2.2	4p+4s(Ga)	6.1	3.74	2.36	2.36	6×10^{-3}
		–4.1	4s(Ga)+3p(P)					
		–0.6	4p(Ga)+3p(Al)					
GaAlP/GaP(111)	35–40	–1.7	4s(Ga)+3p(Al)	6.1	3.72	2.38	2.38	4.8×10^{-3}
		–3.1	4s(Ga)+3p(Al)+3p(P)					
		–4.8	4s(Ga)+3s(Al)+3p(P)					
		–1.2	4s(Ga)+5p(In)					
GaInP/GaP	40–50	–3.3	4s(Ga)+5p(In)+3p(P)	5.5	3.65	1.85	1.85	4×10^{-3}
		-5.6	4s(Ga)+5s(In)+3p(P)					

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

где Φ – фотоэлектронная работа выхода, которая определяется по формуле: $\Phi = h\nu - \Delta E$, ΔE – ширина спектра фотоэлектронов. к – сродство к электрону: $к = \Phi - E_g$, σ_{max} – максимальное значение коэффициента ВЭЭ, K – квантовый выход фотоэлектронов, измеренный при $h\nu = 10.8$ эВ.

III. Заключение

В работе приведены данные о плотности состояния валентных электронов и определены параметры энергетических зон нанопленок ($d \approx$ 30–50 Å) $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$ и $Ga_{0.6}In_{0.4}P$, полученных методом имплантации Al^+ и In^+ в GaP с последующим отжигом. Установлено, что при этом происходит строгий эпитаксиальный рост пленки и кристаллографические ориентации GaAlP и GaInP и GaP на границе раздела полностью совпадают. Показано, что E_g нанопленки GaInP (~1.85 эВ) заметно меньше, чем GaP (~2.36 эВ).

Метаданные

Emission Properties and Electronic Structure of Three-Component Nanofilms Formed on a GaP Surface during Low-Energy Ion Implantation and Subsequent Annealing

G.M. Shirinov[1], S.B. Donaev[*1], B.E. Umirzakov[1,2]

[1]Tashkent State Technical University named after I. Karimova, Universitetskaya 2, 100174, Tashkent, Uzbekistan
[2]Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies U. Arifova of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, st. Durmon yuli, 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

By implantation of Al^+ and In^+ ions and subsequent annealing on the GaP surface, thin single-crystal GaAlP and GaInP films were obtained. For the first time using the methods of Auger electron spectroscopy, ultraviolet photoelectron spectroscopy, light absorption and taking the energy and angular dependences of the secondary electron emission coefficients, the main parameters of the energy bands and the emission parameters of the $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$/GaP(111) and $Ga_{0.6}In_{0.4}P$/GaP(111) with thickness ≤50 Å nanofilms were determined. In particular, it is shown that the band gap E_g of the $Ga_{0.6}In_{0.4}P$/GaP film is noticeably smaller than the E_g of the substrate; therefore, the values of σ_m and K of the system somewhat decrease relative to pure GaP.

Keywords: low-energy ion implantation, annealing, surface, nanostructure, concentration, three-component nanofilm, thin film.

Литература (References)

[1] I.V. Fedorchenko, A.R. Kushkov, D.S. Gaev, O.I. Rabinovich, S.F. Marenkin, S.I. Didenko, S.A. Legotin, M.N. Orlova, A.A. Krasnov. Journal of Crystal Growth **483**, 245-250 (2018)..
[2] A.A. Spirina, A.G. Nastovyak, S.V. Usenkov, N.L. Shvars. Vichislitelnie Texnologii **23**, No.6, 81-94 (2018).
[3] E.Ye. Bloxin. Fundamentalnie Issledovaniya № 11, 39-43 (2015).
[4] L.M. Krasilnikova, I.V. Ivonin, M.P. Yakubenya, I.K. Maksimova, G.K. Arbuzova. Izv. Vuzov. Fizika **32**, № 3, 60-65 (1989).
[5] Zh.I. Alferova, Yu.V. Shmartsev. Epitaxy and Heterostructures. Per. from English (Moscow, Mir, 1989).
[6] S.Laref, S. Mecabih, B. Abbar, B. Bouhafs, A. Laref. Physica B **396**, 169 (2007).
[7] V.V. Zolotarev, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskii, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhtin, A.A. Podoskin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, V.V. Shamakhov, I.N. Arsent'ev, L.S. Vavilova, K.V. Bakhvalov, I.S. Tarasov. Semiconductors **47**, 122-126 (2013).
[8] P.V. Seredin, P. Domashevskaya, I.N. Arsent′ev, D.A. Vinokurov, A.L. Stankevich, T. Prutskij. Semiconductors **47**, 1-6 (2013).
[9] V.V. Chaldyshev, A.S. Shkol'nik, V.P. Evtikhiev, T. Holden. Semiconductors **40**, 142-143 (2006).
[10] P.V. Seredin, A.V. Glotov, E.P. Domashevskaya, I.N. Arsent′ev, D.A. Vinokurov, A.L. Stankevich, I.S. Tarasov. Semiconductors **43**, 1610-1616 (2009).
[11] M.J. Mori. Lattice mismatched epitaxy of heterostructures for nonnitride green light emitting devices. Ph.D. Thesis (Massachusetts Institute of Technology, 2008).
[12] S.J. Chang, C.S. Chang, Y.K. Su, P.T. Chang, Y.R. Wu, K.H. Huang, and T.P. Chen. IEEE Photon. Technol. Lett. **9**, 1199-1201 (1997).
[13] G. Oelgart, R. Schwabe, M. Heider, and B. Jacobs. Semicond. Sci. Technol.**2**, 468-474 (1997).
[14] Cong Wang., Bing Wang, Riko I. Made, Soon-Fatt Yoon and Jurgen Michel. Photonics Research **5**, No.3, 239-224 (2017).
[15] B.E. Umirzakov, S.B. Donaev. Journal of Surface 746-748 (2017).
[16] B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, D.M. Muradkabilov, K.K. Boltaev. Technical Physics **58**, No.6, 841-844 (2013).
[17] B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, D.A. Ruzibaeva, F.G. Djurabekova, S.B. Danaev. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **326**, 322-325 (2014).
[18] Y.S. Ergashov, D.A. Tashmukhamedova, B.E. Umirzakov. Journal of Surface Investigation **11**, No.2, 480-484 (2017).
[19] S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova. Technical Physics **60**, No.10, 1563-1566 (2015).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Кичик энергияли ион имплантация ва қиздириш жараёнида GaP юзасида ҳосил бўлган уч компонентли наноплёнкаларнинг эмиссия хусусиятлари ва электрон тузилиши

Г.М.Ширинов[1], С.Б.Донаев[1], Б.Е. Умирзаков[1,2]

[1]I.Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Universitet 2, 100174, Toshkent, O‘zbekiston
[2]U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Do‘rmon yuli, 33, 100125, Toshkent, O‘zbekiston

Al^+ ва In^+ ионларини имплантawия қилиш ва GaP юзасида қиздириш орқали юпқа монокристалл GaAlP ва GaInP плёнкалари олинди. Оже-электрон спектроскопияси, ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопияси, ёруғлик ютилиши ва иккиламчи электрон эмиссия коеффициентларининг энергия ва бурчак боғлиқликларини олиш усулларидан фойдаланиш натижасида қалинлиги ≤50 Å бўлган $Ga_{0,6}Al_{0,4}P/GaP(111)$ ва $Ga_{0,6}In_{0,4}P/GaP(111)$ наноплёнкаларинингэнергия диапазонларининг асосий параметрлари ва эмиссия параметрлари илк марта аниқланди. Хусусан, $Ga_{0,6}In_{0,4}P/GaP(111)$ плёнкасининг таъқиқланган зонасиE_g субстратнингE_gдан сезиларли даражада кичик эканлиги кўрсатилган, шунинг учун тизимнинг σ_m ва K қийматлари соф GaP га нисбатан бирмунча камаяди. .

Калит сўзлар: кичик энергияли ион имплантацияси, қиздириш, сирт, наноструктура, консентратсия, уч компонентли наноплёнка, юпқа плёнка.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.