Раззоков Алижон Шоназарович (д.ф.-м.н., проф.), Кошчанова Дурдона Эрматовна (предподователь), Аминбоев Жахонгир, Отажонова Рузика, Сотимова Махбуба, Бозорбоев Мурод, Ражабова Камола (Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, г.Ургенч, ул. Х.Алимджана, 14, Узбекистан; e-mail: a.razzokov777@gmail.com, dona2525@mail.ru)

ПОЛУЧЕНИЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $SI_{1-X-Y}GE_X\,SN_Y$ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Аннотация. *Выращены монокристаллические пленки варизонного твердого раствора $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ на подложках Si<111>методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного оловянного раствора-расплава в температурном интервале $1100^0C–500^0C$. Определен химический состав выращенных эпитаксиальных пленок на сканирующем электронном микроскопе. Фоточувствительность $pSi-nSi_{1-x-y}Ge_xSn_y$ гетероструктур охватывала 0.51 эВ до 1.51 эВ энергии область спектра.*

Ключевые слова: *эпитаксия, кристаллизация, раствор-расплав, твердый раствор*

Razzokov Alijon Shonazarovich (f.-m.f.d., prof.), Koshchanova Durdona Ermatovna (o'qituvchi), Aminboyev Jahongir, Otajonova Ruzika Maqsudbek qizi, Sotimova Maxbuba, Bozorboyev Murod, Rajabova Kamola (Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti, H.Olimjon, 14, Urganch, 220100, O'zbekistan; e-mail: a.razzokov777@gmail.com, dona2525@mail.ru),

SUYUQ FAZADAN $SI_{1-X-Y}GE_X\,SN_Y$ NING QATTIQ ERITMASINI OLISH

Annotatsiya. *$Si_{1-x-y}Ge_x\,Sn_y$ qattiq aralashma monokristallari Si<111>tagliklarga chegaralangan hajmdagi qalayli eritmadan suyuq fazali epitaksiya ususli yordamida $1100^0C–500^0C$ harorat oralig'ida o'stirildi. O'stirilgan epitaxial qatlam kimyoviy tarkibi skanerlovchi electron mikroskop yordamida aniqlandi. $pSi-nSi_{1-x-y}Ge_xSn_y$ geterostrukturaning fotosezgirliigi 0.51 эВ до 1.51 эВ yorug'likning energiya sohasini qamrab oldi.*

Kalit so'zlar: *epitaksiya, crystallizatsiya, eritma, qattiq aralashma.*

Razzokov Alijon Shonazarovich (f.-m.f.d., prof.), Koshchanova Durdona Ermatovna (o'qituvchi), Aminboyev Jahongir, Otajonova Ruzika Maqsudbek qizi, Sotimova Maxbuba, Bozorboyev Murod, Rajabova Kamola (Urgench State University named after Abu Raykhan Beruni, Kh.Alimdjan, 14 .Urgench, 220100, Uzbekistan e-mail: a.razzokov777@gmail.com, dona2525@mail.ru)

OBTAINING A SOLID SOLUTION OF $SI_{1-X-Y}GE_X\,SN_Y$ FROM THE LIQUID PHASE

Annotation. *Monocrystal films of a graded-gap solid solution $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ on Si <111> substrates were grown by liquid-phase epitaxy from a limited tin solution-melt in the temperature range* 1100^0C - 500^0C. *The chemical composition of the grown epitaxial films was determined using a scanning electron microscope. The photosensitivity of pSi-nSi1-x-yGexSny heterostructures covered the energy range of the spectrum from 0.51 eV to 1.51 eV.*

Key words: *epitaxy, crystallization, solution-melt, solid solution.*

Введение. На базе кремния получить фотоприёмник, работающий в инфракрасном диапазоне (ИК), является весьма актуальным [1,2]. Для этой цели другими авторами [3–5] для формирования тройных соединений SiGeSn проведено много экспериментальных работ и получены приборные структуры на его основе. Но разность параметров решетки и коэффициент термического расширения дискретных структур не дает возможности получить кристаллически совершенные гетероструктуры, которые обуславливают электрические и фотоэлектрические характеристики твердого раствора и структур на их основе [6–8].

В связи с этим метод жидкостной эпитаксии из ограниченного раствора-расплава для получения кристаллически совершенных эпитаксиальных слоев на подложке кремния с переменными химическими составами вдоль направления роста является успешным.

Материалы и методы. В этой работе показано получение монокристаллических пленок варизонного твердого раствора $Si_{1-x-y}Ge_x\,Sn_y$ на подложках Si <111> методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного оловянного раствора-расплава в температурном интервале $1100^0C–500^0C$.

Использованы апробированные экспериментальные научные методы. Обычно используются подложки с определенными наименьшими уклонами во время роста пленок из жидкой фазы, которые способствуют образованию эпитаксиальных слоев на поверхности (в нашем случае в качестве подложек были использованы монокристаллические *Si* (111) с отклонением $-(0^015–0^030')$ n и p-типа проводимости) подложки. Любая поверхность твердого тела имеет определенную шероховатость, поэтому поверхностная энергия распределяется неравномерно и влияет на выращивание твердого раствора на подложке, а также на образование дислокаций, которые связаны с технологическими параметрами, как температура начала кристаллизации (T_{NC}), скорость роста (υ), зазор между подложками (δ), состав компонентов в растворе-расплаве с ориентациями подложек и т.д.

Для выращивания варизонного твердого раствора $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ нами был использован кварцевый реактор вертикального типа с горизонтально расположенными подложками на установке типа ЭПОС. Рост эпитаксиального слоя осуществлялся из малого объема оловянного раствора-расплава, ограниченного двумя подложками в атмосфере, которые очищены палладием водорода, что дало возможность минимизировать количество расходуемого раствора-расплава. Сначала в реакторе создавался вакуум до остаточного давления 10^{-2} Pa, затем в течении 30 min через реактор пропускался очищенный водород, а после этого начинался процесс нагревания. Когда температура доходила до необходимого значения, система переключалась в автоматический режим. В течение 40-50 min производилась гомогенизация раствора-расплава. Потом подложки на графитовом держателе приводились в контакт с раствором-расплавом и после заполнения зазоров между подложками раствором-расплавом поднимались на 1см. выше уровня раствора. Рост эпитаксиальных слоев $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ в нужный момент прекращался сливом раствора-расплава с подложек при помощи центрифуги. Состав раствора-расплава, состоящий из *Si*, *Ge* и *Sn*, определялся из диаграммы состояния двойного сплава *Sn– Si*, *Sn–Ge*. Для приготовления жидкого раствора-расплава была изучена растворимость *Si* и *Ge* в *Sn* в интервале температур 450-1100 ^{0}C. Эпитаксиальные пленки $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ выращивались при температуре начала (T_{NC}) и окончания кристаллизации (T_{OC}) соответственно в интервале 1050-500 ^{0}C.

Изучение морфологии поверхности выращенных пленок проводилось с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM EVO MA 10 (Zeiss) и атомно-силовой микроскопии (Core AFM). Электрофизические параметры (удельные сопротивления, подвижность и концентрация основных носителей заряда) определялись на установке HMS-7000. Спектральные характеристики образцов измерялись с помощью монохроматора при диаметре щели 0.2 мм.

Оптические свойства пленок изучали с помощью спектрометра Lambda 35 UV/VIS (Perkin Elmer).

Анализ и результаты. Для исследования монокристалличности выращиваемого эпитаксиального слоя $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ на подложке *Si* (111), не заканчивая процесс выращивания плёнок прервали и отсканировали поверхность начала роста с помощью электронного микроскопа для изучения образования зародыша направления (рис.1а).

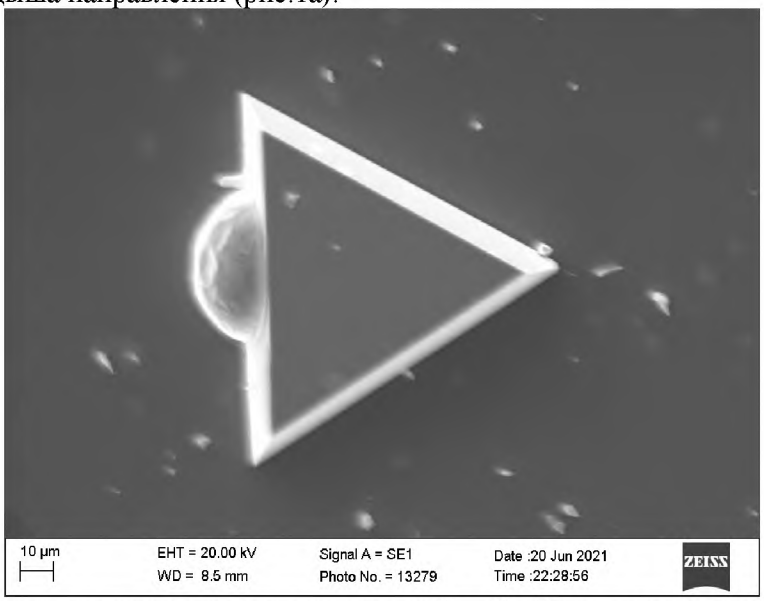

Рис.1а. Снимок начала роста твердого раствора $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ на подложке кремния<111>.

В начале роста образовавшиеся треугольники на подложке показывают, что эпитаксиальные слои начали расти по направлению подложки *Si* (111). После этого, образцы выращивались при различных значениях технологических параметров жидкостной эпитаксии и был найден оптимальный режим роста (T_{NC} и T_{OC} соответственно будет в температурном интервале 950-500 ^{0}C) эпитаксиальных слоев $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$, который дает возможность получить монокристалл с зеркально гладкими поверхностями (рис.1б).

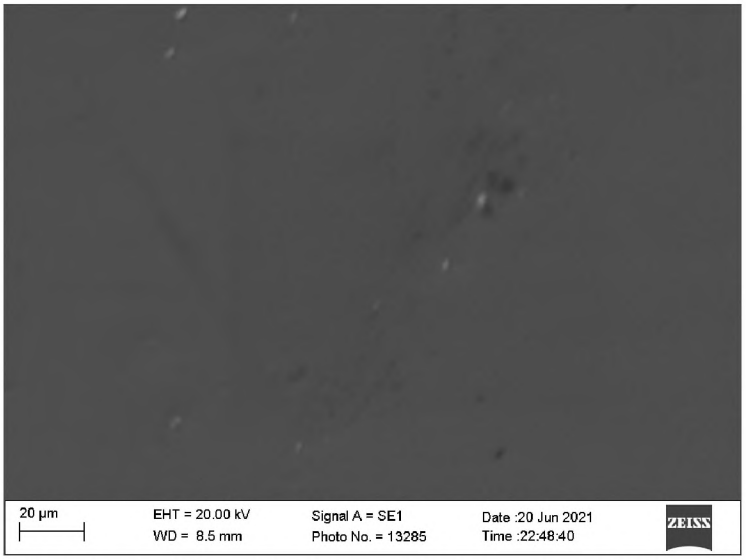

Рис.1б. Снимок зеркальногладкой поверхности выращенных эпитаксиальных слоев $Si_{1-x-y}Ge_x Sn_y$ на подложке кремния<111>.

Определен химический состав поверхности выращенных эпитаксиальных пленок с помощью сканирующего электронного микроскопа, который составляет следующие доли процентных соотношений компонентов твердого раствора $Si_{0.80}Ge_{0.19}Sn_{0.01}$ (рис. 2).

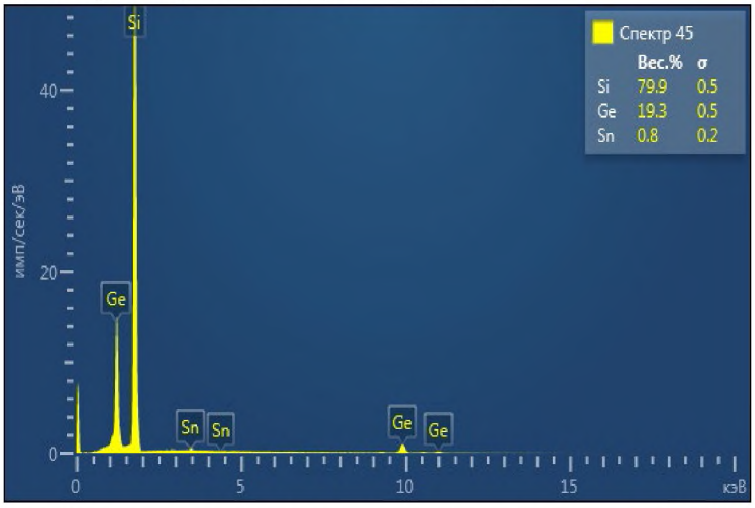

Рис.2. Количественный анализ состава поверхности эпитаксиальных слоев $Si_{1-x-y}Ge_x Sn_y$, полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Проведя эксперименты, было выяснено: изменяя зазор между подложками "δ" (т.е. изменяя объем раствора-расплава между подложками), при одинаковом режиме роста выращенные эпитаксиальные слои на нижних и верхних подложках, не отличались друг от друга с кристаллическими совершенностями на поверхности и на границе подложки-пленки до δ=1,4 mm. В условиях δ>1,4 mm всегда на верхних подложках образуются толстые и более низкокачественные слои, чем на нижней, которые связаны с диффузионным и конвекционным потоком компонентов в ограниченном растворе (если плотность растворяемых компонентов меньше плотности растворителя).

В литературе [9] это объясняется масса-подводом, конвекционным потоком раствора между подложками в поле силы тяготения. Мы считаем, что в поле взаимодействует сила Архимеда и тяготение, а также диффузии с большой концентрацией Si и Ge накапливаются вблизи на поверхности верхней подложки, чем на нижней, который ускоряет скорость роста эпитаксиальных слоев $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$.

Исследованы некоторые электрофизические свойства полученных пленок. Определено удельное сопротивление, холловская подвижность и концентрация носителей заряда при температуре 300К: ρ= 0.5-12 Ω·cm, μ_n= 600–1100 $cm^2/V{\cdot}s$, n=$2{\cdot}10^{16}$ - $5{\cdot}10^{17}$ cm^{-3}. Пленки имели донорный тип проводимости.

К эпитаксиальным слоям $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ и структурам pSi - $n$$Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ вакуумным напылением наносились золотые омические контакты и затем были проведены измерения их фотоэлектрических свойств. Фоточувствительность структуры pSi-$n$$Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ измерялась в фотодиодном режиме при температуре 300 К (рис. 3).

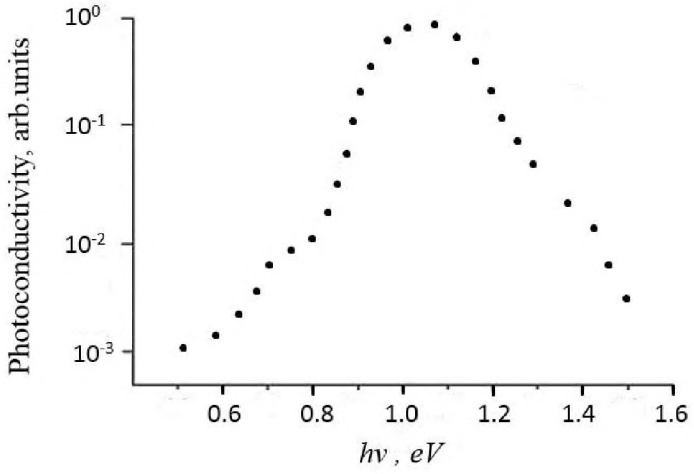

Рис.3. Фоточувствительность структуры pSi-$n$$Si_{1-x-y}Ge_x$ Sn_y в фотодиодном режиме при температуре 300 К.

Фоточувствительность гетероструктур охватывала достаточно широкую область спектра: от 0.51 эВ до 1.51 эВ, которые связаны с шириной запрещенной зоны твердого раствора $Ge_{1-x}Sn_x$ и контактной областью p-n перехода структур pSi - $n$$Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$. Коротковолновые кванты частично поглощаются в верхних слоях пленки. Фотоны, преодолевшие внешние слои твердого раствора, поглощаются уже в контактной области, достигая до p-n перехода структур pSi-$n$$Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$. Смещение диапазона фото-чувствительности структур в более длинноволновую область спектра (0.51 эВ), связано, вероятно, с присутсвием Sn составе пленок $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$.

Заключение. Таким образом, в данной работе показана возможность получения кристаллически совершенных эпитаксиальных слоев $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ путём сглаживания разниц параметров решетки подложки-пленки (варьированием химического состава пленки) вдоль его направления роста, который является перспективным полупроводниковым материалом в приборостроении, в области ИК спектра.Определены оптимальные режимы роста для выращивания кристаллических совершенных $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ эпитаксиальных слоев из ограниченного оловянного раствора-расплава на монокристаллических подложках Si с ориентацией (111), которыми являются следующие технологические параметры:

– T_{NC} варьировалась в интервале от T_{NC} =800 ^{0}C до T_{NC} =950 ^{0}C;

– принудительное охлаждение раствора-расплава со скоростью 0,5-1,5 град/минут.

– зазор между подложками (соответствуя высоте раствора-расплава) в интервале 0,5-1,4 mm.

Фоточувствительность гетероструктур охватывала широкую область спектра: от 0.51 эВ до 1.51 эВ.

Список использованной литературы:

[1]. Fadaly E.M.T., Dijkstra A., Suckert J.R., Ziss D., Tilburg M.A., Mao C., Ren Y., Lange V.T., Kölling S., Verheijen M.A., Busse D., Rödl C., Furthmüller J., Bechstedt F., Stangl J., Finley J.J., Botti S., Haverkort J.E., Bakkers E.P. Direct-bandgap emission from hexagonal Ge and SiGe alloys. Nature, 580, (2020), p. 205–209.

[2]. T.Tsukamoto, Y.Aoyagi, Sh.Nozaki, N.Hirose, A.Kasamatsu, T. Matsui, Y.Suda. Increasing the critical thickness of SiGe layers on Si substrates using sputter epitaxy method. Journal of Crystal Growth. Vol. 600, 2022, 126900. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2022.126900

[3]. M.Oehme, D.Buca, K.Kostecki, S.Wirths, B.Holl¨ander, E.Kasper, J.Schulze. J.Cryst. Growth, 384, 71 (2013).

[4]. R.R.Lieten, J.W.Seo, S.Decoster, A.Vantomme, S.Peters, K.C.Bustillo, E.E.Haller, M.Menghini, J.P. Locquet. Appl. Phys. Lett., 102, 052106 (2013).

[5]. A.A.Bloshkin, A.I.Yakimov, V.A.Timofeev, A.R.Tuktamyshev, A.I.Nikiforov, V.V.Murashov. Physics and technology of semiconductors, vol. 51, № 3. (2017) DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44205.8343.

[6]. A.I.Nikiforov, V.A.Timofeev, A.R.Tuktamyshev, A.I.Yakimov, V.I.Mashanov, A.K.Gutakovskii. J. Cryst. Growth (2016). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2016.02.024.

[7]. Razzakov A.Sh. Growing of $Ge_{1-x}Sn_x$ solid solutions from the liquid phase. Doklady Akademii Nauk (Rossiya). Vol. 379, № 5, 2001, p. 617–619.

[8]. Saidov A.S., Razzokov A. Sh. Obtaining and morphological studies of epitaxial layers of the $Si_{1-x}Ge_x$ solid solutionю Siberian Physical Journal. 2020б Vol. 15, № 2, p. 84–91. https://doi.org/10.25205/2541-9447-2020-15-2-84–91 .

[9]. С.П.Боцелев, И.Е.Марончук, Ю.Е.Марончук и др. Кристаллизация эпитаксиальных слоев AlGaAs из ограниченного объема раствора-расплава. Неор.материалы., 1977, 13, № 5, с. 769–772.

Турсунова Зулайхо Омонуллаевна (преподаватель, Ташкентский государственный педагогический университет имени Низами, Ташкент, Узбекистан; e-mail: tursunova zulya@mail.ru),
Жабборов Мухаммади Мусурмон угли (преподаватель, Ташкентский государственный педагогический университета имени Низами, Ташкент, Узбекистан; e-mail: Muxammadijm@mail.ru),
Жураев Турсунбой Файзиевич (профессор кафедры «Общей математики» Ташкентского государственного педагогического университета имени Низами, доктор физико-математических наук, Ташкент, Узбекистан; e-mail: tursunzhuraev@mail.ru)

О ШЕЙПОВЫХ СВОЙСТВАХ НЕКОТОРЫХ ПОДПРОСТРАНСТВ ПРОСТРАНСТВА $P(X)$

Аннотация. *В данной статье рассматриваются ковариантные подфункторы функтора $P:Comp\to Comp$–вероятностных мер действующие в категории компактов и непрерывных отображений в себя, сохраняющие шейпы бесконечных компактов, шейпы компонент связности и шейповую эквивалентность.*

Ключевые слова: *функтор вероятностных мер, шейп компакта, компонента связности.*

$P(X)$ FAZONING AYRIM QISM FAZOLARINING SHEYP XOSSALARI HAQIDA

Annotatsiya. *Ushbu maqolada biz kompaktlar kategoriyasida harakat qiluvchi va cheksiz kompaktlar sheyplarini, bog'lanish komponentlari sheyplarini va sheyp ekvivalentini saqlaydigan o'z-o'ziga uzluksiz akslantirishlar kategoriyasida ishlaydigan Comp–ehtimollik o'chovlarining kovariant subfunktorlarini ko'rib chiqamiz.*

Kalit so'zlar: *ehtimollik o'lchovi funktor, ixcham shakl, bog'langan komponent.*

ABOUT THE SHAPE PROPERTIES OF SOME SUBSPACES OF THE SPACE $P(X)$

Annotation. *In this note, we consider covariant subfunctors of the functor $P:Comp\to Comp$ of probability measures acting in the category of compacta and continuous mappings into itself, preserving the shapes of infinite compacta, shapes of connected components, and shape equivalence.*

Keywords: *functor, probability measures, sheyp compacta, component connected.*
AMS subject classification: 54B15, 54B30, 54B35, 54C05, 54C15, 54C60, 54O30.

Введение. Для компактов X через $P(X)$ обозначаются пространства вероятностных мер [1,2]. Известно, что в бесконечном компакте X, это пространство $P(X)$ гомеоморфно гильбертовому кубу Q [1]. Для натурального числа $n\in N$ через $P_n(X)$ обозначается множество всех вероятностных мер не более чем с n носителями т.е. $P_n(X)=\{\mu\in P(X):|supp\mu|\le n\}$. Компакт $P_n(X)$ является выпуклыми линейными комбинациями мер Дирака вида: $\mu=m_1\delta_{x_1}+m_2\delta_{x_2}+\ldots+m_n\delta_{x_n}$, $\sum_{i=1}^{n}m_i=1, m_i\ge 0, x_i\in X, \delta_{x_i}-$ мера Дирака в точке x_i. Через $\delta(X)$ обозначается множество всех мер Дирака. Напомним, что пространство $P_f(X)\subset P(X)$, состоит из всех вероятностных мер вида $\mu=m_1\delta_{x_1}+m_2\delta_{x_2}+\ldots+m_k\delta_{x_k}$ с конечными носителями, для каждой из которых $m_i\ge\frac{k}{k+1}$ при некотором i [2-3]. Для натурального числа n положим $P_{f,n}\equiv P_f\cap P_n$. Для компакта X имеет место