

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Bakhadyrkhanov, M.K., Zikrillaev, N.F., Toshev, A.R. Photodetector on basis of strongly compensated silicon doped with manganese. // *Geliotekhnika*. – 2001. – 2. – P. 9.
2. Z. A. Yunusov, Sh. U. Yuldashev, Kh. T. Igamberdiev, Y. H. Kwon, T. W. Kang, M. K. Bakhadyrkhanov, S. B. Isamov, N. F. Zikrillaev. Ferromagnetic states of *p*-type silicon doped with Mn // *Journal of the Korean Physical Society*. – 2014. – 64(10). – P. 1461.
3. Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillaev, N.F. Current - voltage behavior of silicon containing nanoclusters of manganese atoms. // *Inorganic Materials*. - 2014. - 50(4). - P. 325.
4. Chen Zhaoyang, Ba Weizhen, Zhang Jian, Cong Xiuyun, Bakhadyrkhanov M. K. and Zikrillaev N. F. Current oscillation properties of manganese-doped-silicon materials. // *Pan Tao TI Hsueh Pao/Chinese Journal of Semiconductors*. – 2006. – 27 (9). – P. 1582.
5. Bakhodirkhonov, M.K., Zikrillaev, N.F., Egamberdiev, B.E. Self-sustained oscillation in Compensated Silicon. // *Journal of Communications Technology and Electronics Radiotekhnika i Elektronika*. – 1998. – 43(3). – P. 274.
6. Bakhadyrkhanov, M.K., Kurbanova, U.Kh., Zikrillaev, N.F. Correlation between the material parameters and conditions for the excitation of recombination waves in Si(S). // *Semiconductors*. - 1999. - 33(1). – P. 20.
7. Bakhadyrkhanov, M.K., Ayupov, K.S., Zikrillaev, N.F., Kadyrova, F.A. Thermodynamic conditions of excitation of stable and reproductive self-sustained oscillations of current with proposed parameters in compensated silicon. // *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. - 2004. - (3). - P. 84.
8. Germanova K.G., Marinova M. Experimental study concerning the velocity of high field domains in CdS single crystals. // *Phys. Stat. Sol.* 1970. (a).
9. Калашников С.Г., Падю Г.С., Пустойт В.И., Токаров Е.Ф. Температурно-электрическая неустойчивость в монокристаллах соли кадмия. // *ФТП*. - 1969. - Т. 3. – В. 7. - С. 1028.
10. Seri V., Endo S., Eric T. Low-frequency photocurrent oscillations in CdIn₂S₄ simple crystals. // *Japan Ion Appl. Phys.* - 1980. - V. 19. - No 9. - P. 1667.
11. Таскин, А.А., Тишковский, Е.Г. Образование квазимолекул Se₂ в кремнии легированном селеном. // *ФТП*. - 1998. - Т. 32. № 11. - С. 1306.
12. Bakhadyrkhanov, M., Boltaks, B.I., Kulikov, G. Diffusion electrotransport and solubility of manganese impurities in silicon. // *Sov. Phys. Solid State*. - 1972. - Vol. - 14(6). P. 1671.
13. Бахадирхонов, М.К., Зикриллаев, Н.Ф., Арзикулов, Э.У. Влияние упругости паров диффузанта на концентрацию электроактивных атомов и степень компенсации образцов Si<Zn>. // *Письма ЖТФ*. - 1991. - Т. 17. - В. 12. – С. 1.
14. Zikrillaev, N.F., Tursunov, O.B., Kushiev, G.A. Разработка и создание нового класса варизонных структур на основе кремния с участием атомов Zn и Se. // *ЭОМ*. – 2023. – 59(2). – С. 16.

ПОЛУЧЕНИЯ БИНАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АТОМОВ ФОСФОРА И ГАЛЛИЯ В КРЕМНИИ

Н. Ф. Зикриллаев, С. Б. Исамов, Ф. Э. Уракова, Н. Норкулов, Б. У. Алиев

*Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан, e-mail: feruzaxonurakova@gmail.com*

Исследования фотоэлектрических и оптических диффузионных свойств кремния, легированного примесными атомами фосфора и галлия, показали, что их фотоэлектрические и оптические параметры сильно отличаются от исходного кремния. Результаты исследования фотоэлектрических и оптических свойств полученных образцов кремния показали, что в кремнии образуются новые элементарные ячейки и нанокластеры на основе бинарных соединений атомов фосфора и галлия, которые не нарушают кристаллическую решетку исходного кремния. Образованные бинарные

соединения можно рассматривать как новый нанообъект в котором можно наблюдать размерное квантование.

Исследованием установлено, что образованные бинарные соединения фосфора и галлия в кремнии приводят к расширению спектрального диапазона чувствительности к видимой области солнечного излучения, который дает возможность создания фотоприёмников в широкой спектральной области и эффективных фотоэлементов.

Ключевые слова: кремний; соединения; диффузия; технология; галлий; фосфор; фотоэлемент.

OBTAINING BINARY COMPOUNDS OF PHOSPHORUS AND GALLIUM ATOMS IN SILICON

N.F. Zikrillayev, S.B. Isamov, F.E. Urakova, N.Norqulov, B.U.Aliyev

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

Corresponding author: F. E. Urakova (feruzaxonurakova@mail.com)

Studies of photoelectric and optical diffusion properties of silicon doped with impurity atoms of phosphorus and gallium have shown that their photoelectric and optical parameters differ greatly from those of the original silicon. The results of the study of photoelectric and optical properties of the obtained silicon samples have shown that new elemental cells and nanoclusters based on binary compounds of phosphorus and gallium atoms are formed in silicon, which do not violate the crystal lattice of the original silicon. The formed binary compounds can be considered as a new nano-object in which dimensional quantization can be observed.

The study found that the formed binary compounds of phosphorus and gallium in silicon lead to an expansion of the spectral range of sensitivity to the visible region of solar radiation, which makes it possible to create photodetectors in a wide spectral region and effective photocells.

Key words: silicon; compounds; diffusion; technology; gallium; phosphorus; photocell.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие электроники и микроэлектроники открывает широкие возможности создания быстродействующих приборов и устройств с малым энергопотреблением. В этом плане полупроводниковые материалы легированные примесными атомами элементов переходных групп железа, изовалентными и редкоземельными атомами были обнаружены рядом уникальных физических явлений, которые позволили на основе этих материалов создавать современные приборы и датчики физических величин. Многими авторами были исследованы фотоэлектрические, оптические, магнитные и тензосвойства полупроводниковых материалов и структур на их основе диффузионно легированных примесными атомами [1–4].

В данной работе приводятся результаты исследований фотоэлектрических и оптических свойств кремния с бинарными соединениями диффузионно-легированными примесными атомами фосфора и галлия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования был использован исходный монокристаллический кремний марки КДБ-10. Как известно максимальная концентрация примесных атомов в крем-

ний ограничивается пределом растворимости этих атомов, который зависит от температуры диффузии и от природы легирующего элемента [5–6]. В этом плане максимальная растворимость примесных атомов фосфора в кремнии составляет порядка $N_p > 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а для примесных атомов галлия достигает до $N_{\text{Ga}} \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Перед диффузией примесных атомов фосфора и галлия в кремний было теоретически рассчитано распределение концентрации атомов этих примесей с применением программы Mathcad.

Для одновременной диффузии примесных атомов галлия и фосфора в кремний был использован химически чистый монокристаллический фосфорид галлия (GaP). После необходимой механической и химической обработки образцов исходного кремния была проведена диффузия атомов порошкообразного монокристаллического GaP из газовой фазы при температуре $T = 1250^\circ\text{C}$ в течение $t = 2$ часов.

Концентрационное распределение атомов примесей определили с помощью метода послойного химического травления со снятием слоев толщиной ~ 1 мкм. Электрические параметры образцов измерялись методом Ван-дер-Пау на установке марки Есориа HMS-3000. При этом предполагалось, что все внедренные примесные атомы Ga и P находятся в электроактивном состоянии.

Элементный состав поверхности Si изучался с помощью сканирующего электронного микроскопа марки EVO MA 10. Результаты, полученные на СЭМ (сканирующий электронный микроскоп) для образцов кремния, легированного атомами Ga и P из порошка GaP, показали, что при диффузии на поверхности кремния будут осаждаться примеси атомов Ga и P до $\sim 10\%$.

После совместной диффузии атомов галлия и фосфора в кремнии тип проводимости был везде n -типа. Также на рис. 1 показано концентрационное распределение носителей заряда в образцах кремния, легированного только фосфором при $T = 1250^\circ\text{C}$ в течение 2 часов (кривая 2). Поверхностная концентрация фосфора достигает $N_p = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, глубина залегания p - n -перехода составляла 15 мкм.

Полученные результаты показывают, что поверхностная концентрация носителей после совместной диффузии примесных атомов галлия и фосфора на порядок меньше по сравнению с контрольными образцами, легированными только атомами фосфора. Кроме того, глубина залегания p - n -перехода после совместной диффузии примесных атомов галлия и фосфора меньше, чем контрольных образцов при одинаковых условиях диффузии.

На основе полученных результатов (рис. 1, кривые 1 и 2) вычислялась концентрация галлия по глубине при наличии фосфора на основе решения уравнения нейтральности $N_{\text{Ga}} = n_0 - n_1$ в области $x = 0\text{--}15$ мкм, где n_0 – концентрация электронов в образцах, легированных только фосфором при $T = 1250^\circ\text{C}$, $t = 2$ часа, n_1 – концентрация электронов в образцах, легированных совместно атомами галлия и фосфора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенодифракционный анализ образцов кремния, легированного примесными атомами фосфора и галлия дает информацию о расположении примесных атомов в кристаллической решетке и параметрах элементарной ячейки образованных бинарных соединений. Как видно из рис. 2, в дифракционном спектре наблюдается несколько отражений с различной интенсивностью.

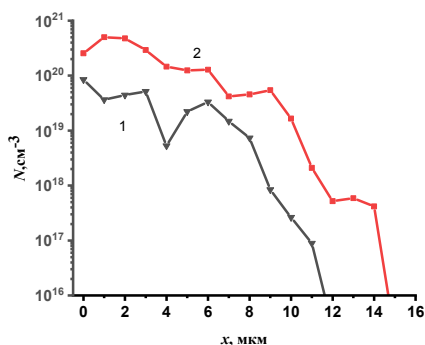


Рис. 1. Концентрационное распределение носителей заряда после диффузии: кривая 2 – только фосфора; кривая 1 – после совместной диффузии атомов галлия и фосфора при $T = 1250^\circ\text{C}$, $t = 2$ часа

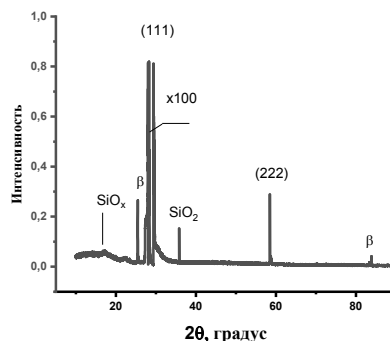


Рис. 2. Рентгенограмма кремния, легированного атомами фосфора и галлия

Из анализа экспериментальных результатов был определен параметр решетки кремния, легированного атомами фосфора и галлия, который был равен $a_{\text{Si}_2\text{GaP}} = 0,547$ нм [6].

Анализ полученных результатов показал, что в кремнии с бинарными элементарными ячейками GaP^+ для освобождения валентных электронов требуется четыре разных энергии. Фактически возникает случайная мелкомасштабная модуляция ширины запрещенной зоны, мало влияющая на параметры кристаллической структуры исходного кремния. Когда концентрация образованных бинарных соединений будет достаточно высока $N = 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$, это существенно влияет на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства исходного кремния.

Формирование большого количества бинарных соединений GaP в решетке кремния может изменить фундаментальные поглощения, исходного кремния. Эти исследования показали, что на поверхности исходного кремния есть возможность получения прямозонных нанокластеров GaP с большей шириной запрещенной зоны, чем у исходного кремния. Это расширяет область спектральной чувствительности полученных образцов кремния с бинарными соединениями GaP и fotocувствительность увеличивается за счет каскадных переходов через уровни минизон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная значимость полученных результатов заключается, в том, что выявлены механизмы переноса заряда гетероваризонной структуры, теоретически обоснованы и экспериментально установлены механизмы образования структур типа Si_2GaP в кремнии.

Практическая значимость полученных результатов заключается в определении оптимальных технологических режимов получения гетероваризонных структур GaP бинарных соединений на основе кремния для использования в производстве электронных приборов и устройств.

Из результатов исследования показано, что кремний с бинарными соединениями GaP является не только очень перспективным материалом для оптоэлектроники и фотоэнергетики, но и может быть использован для создания нового поколения нанoeлектронных приборов и устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Е. Георгия и др. Структура примесного центра Мп в антимолибдате галлия// ФТП. 1992. Т.26. Вып.1. С.89-91.
2. Г.С. Куликов Влияние Мп на диффузионные распределения Ni в Si//ФТП.1995. Т. 3. С. 469.
3. А.А. Таскин, Е.Г. Тишковский. Образование квазимолекул Se₂ в кремнии, легированном селеном //ФТП.1998. Т.32. № 11. С. 1306–1312.
4. M.K. Bakhdyrhanov, B.K. Ismaylov, S.A. Tachilin, K.A. Ismaylov, N.F. Zikrillayev. Influence of Electrically Neutral Atoms on Electrical and Recombination Parameters of Silicon. // Semiconductor Physics. Quantum Electronics Optoelectronics. 2020. Vol.23. Issue 4. pp. 361–365.
5. Б.И. Болтакс. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. // Наука. Ленинград.1972. С. 384.
6. М.К. Бахадырханов, З.Т. Кенжаев, С.В. Ковешников, А.А. Усмонов, Г.Х. Мавлонов. Образование комплексов примесных атомов фосфора и бора в кремнии. // Неорганические материалы. 2022. Том. 58. Вып.1. С. 3–9.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО ПОЛЯ НАНО-ГЕТЕРО-ПЕРЕХОДА <Si:PbX>

Э. З. Имамов¹, Р. А. Муминов², Х. Н. Каримов¹, А. Э. Имамов³, М. А. Аскарров⁴

¹⁾ *Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммеда аль-Хорезми (ТУИТ), Министерство цифровых технологий Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: erkinimatov@mail.ru*

²⁾ *Физико-технический институт, НПО “Физика-Солнце” Академии наук Узбекистана, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: detector@uzsci.net*

³⁾ *Академия МВД Республики Узбекистан – Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: imatovaziz@mail.ru*

⁴⁾ *Каракалпакский государственный университет имени Бердаха Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан, Нукус, Республика Каракалпакстан, Узбекистан, e-mail: asqarovm@list.ru*

В настоящей работе концепция многопереходности легла в основу построения модели принципиально новой контактной структуры: «нанообъект–полупроводник». Это не традиционный сплошной p – n -переход со сплошным контактом двух типов полупроводниковых материалов. Это контакт между нанесенным нанообъектом и однородной полупроводниковой подложкой. При соприкосновении нанообъекта с подложкой между ними устанавливается термодинамическое равновесие, сопровождающееся выравниванием уровней Ферми и возникновением контактного поля особой геометрии, поскольку возникает между точечным объектом (10–40 нм) и свободной подложкой. По аналогии с теорией полупроводникового тонкого p – n -перехода [1–11] рассчитано контактное поле нано-гетеро-перехода <Si:PbX>.

Ключевые слова: нано-гетеро-переход; контактное поле; нанокристал <Si:PbX>; область пространственного заряда.