

Совместная диффузия атомов галлия и фосфора в кремнии

Н. Ф. Зикриллаев^а, С. Б. Исамов^а, С. В. Ковешников^а,
З. Т. Кенжаев^б, Х. С. Турекеев^{а*}

^аТашкентский государственный технический университет,
г. Ташкент, 100095, Узбекистан

^бКаракалпакский государственный университет,
г. Нукус, 230112, Узбекистан

*e-mail: axmet-8686@mail.ru

Поступила в редакцию 26.11.2021

После доработки 14.04.2022

Принята к публикации 19.04.2022

Установлено, что диффузия атомов галлия и фосфора из газовой фазы в кремний обеспечивает не только компенсацию, но и частичное взаимодействие элементов между собой. Анализ на сканирующем электронном микроскопе показал, что атомы галлия и фосфора присутствуют на поверхности кремния после диффузии и обработки поверхности с близкой концентрацией. Исследование концентрационного распределения носителей заряда по глубине показывает, что при совместной диффузии растворимость галлия увеличивается на один порядок. При этом подвижность носителей заряда уменьшалась в 3÷4 раза. На основе полученных данных рассчитаны концентрация ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) нейтральных комплексов $[\text{GaP}^+]$ и их энергия образования ($\sim 0,62 \text{ eV}$). Полученные результаты могут быть связаны с электростатическим взаимодействием ионов галлия и фосфора при диффузии, из-за которого изменяется концентрационное распределение примесей, а также образуются квазинейтральные комплексы типа $[\text{GaP}^+]$ в решетке кремния.

Ключевые слова: кремний, диффузия, бинарные соединения, подвижность, галлий, фосфор, кристалл, прибор, технология, температура

УДК 538.911; 538.971

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.4.29>

ВВЕДЕНИЕ

Формирование бинарных элементарных ячеек с участием атомов III и V групп в решетке кремния представляет большой научный и практический интерес [1–6], так как диффузия двух различных примесей в решетке кремния позволяет изменить его фундаментальные параметры и приводит к расширению возможности применения кремниевых кристаллов в нанoeлектронике. При этом выбор примесных атомов, имеющих большую растворимость, с одной стороны, технологически удобен, а с другой – обеспечивает большую вероятность образования бинарных соединений на их основе [7–12]. Примесные атомы галлия и фосфора соответствуют указанным критериям.

Цель данной работы – изучение взаимодействия атомов фосфора (P) и галлия (Ga) в решетке кремнии при совместной диффузии этих примесей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В эксперименте в качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний марки КДБ-10

($N_B \sim 2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) с содержанием кислорода $N_{O_2} \approx (5 \div 7) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и плотностью дислокаций $N_D \sim 10^3 \text{ см}^{-2}$. Размер образцов составлял $V \sim 1 \times 5 \times 10 \text{ мм}^3$.

Для диффузии был использован порошок, полученный путем измельчения кристалла фосфида галлия. После необходимых механических и химических обработок образцов кремния проводилась диффузия из газовой фазы порошка фосфида галлия при $T = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов.

При этом одновременно фосфор диффундировал из нанесенного слоя фосфорнокислого аммония на воздухе при $T = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов. Диффузия галлия (КДБ-10) проводилась из газовой фазы при $T = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов. Такой выбор диффузии галлия диктовался тем, чтобы получить максимальную концентрацию на поверхности и в объеме кремния. Это позволило следить за изменением концентрационного распределения фосфора и галлия в кремнии по отдельности. После диффузии с поверхности образцов кремния снималось фосфоросиликатное стекло методом травления в HF и NH_4F .

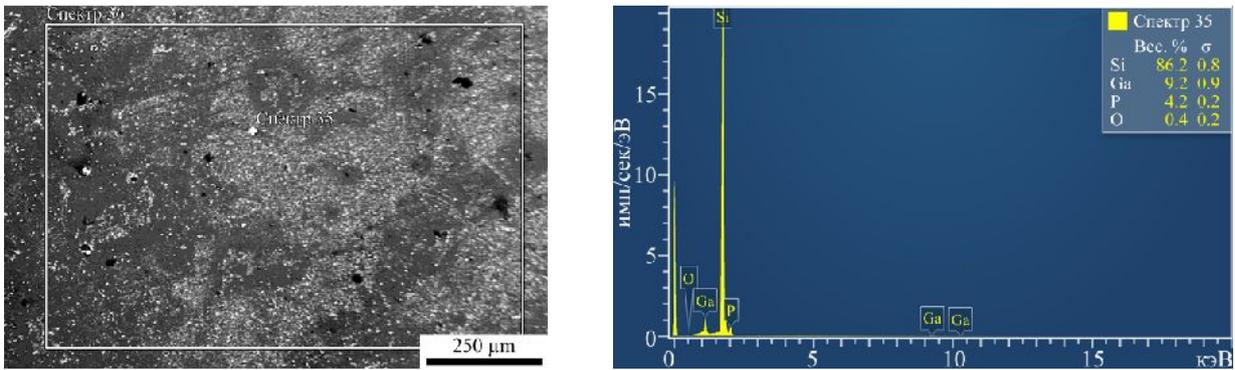


Рис. 1. Морфология и состав поверхности образца кремния после диффузии из порошка фосфида галлия.

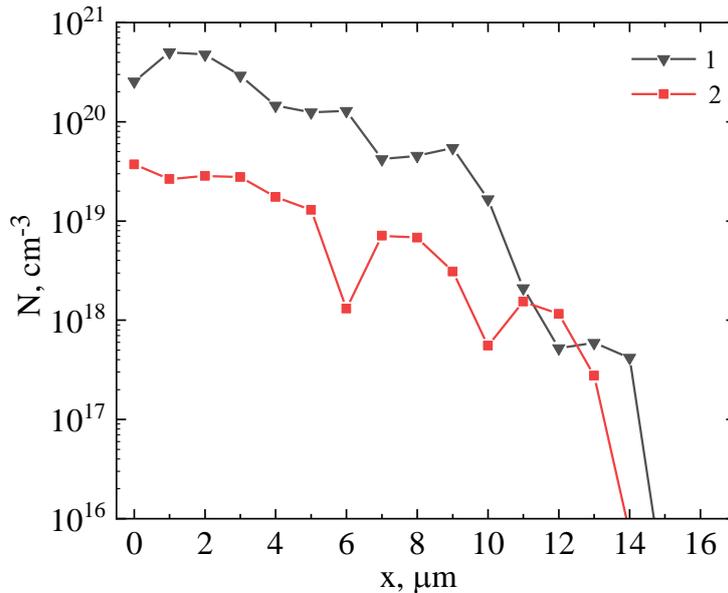


Рис. 2. Концентрационное распределение атомов фосфора и галлия в кремнии: распределение фосфора (кривая 1) при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2$ часа; распределение галлия (кривая 2) при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2$ часа.

Таким образом, были получены три разные партии образцов. Первая партия была получена при совместном легировании примесными атомами галлия и фосфора при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов. Вторая – легированием примесными атомами фосфора при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов. Третья партия образцов получена легированием примесными атомами галлия при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов в кремнии.

Концентрационное распределение выявляли с помощью метода Ван дер Пау снятием слоев по 1 мкм методом химического травления. При этом предполагалось, что все введенные примесные атомы фосфора и галлия находятся в электроактивном состоянии. При расчете концентрации фосфора и галлия (электронов и дырок) учитывалось изменение подвижности носителей заряда в зависимости от концентрации примесных атомов. При этом ошибка измерения не превышала 10%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены результаты измерения образцов кремния, которые были получены

после диффузии примесных атомов галлия и фосфора, с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 (СЭМ), чтобы определить поверхностный элементный состав кремния [13].

Эксперимент проводился несколько раз с образцами, полученными при разных температурах и в разное время. После диффузии проверили элементный состав образцов Si<GaP> с помощью СЭМ. Результаты, полученные на сканирующем электронном микроскопе для образцов кремния, легированного галлием и фосфором, показали, что при диффузии из порошка фосфида галлия на поверхности кремния будут осаждаться примесные атомы галлия и фосфора в количестве от 5 до 10%.

На рис. 2 представлено концентрационное распределение атомов фосфора в кремнии после диффузии при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2$ часа. Также представлено концентрационное распределение галлия после диффузии при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2$ часа [14–21]. Как видно из экспериментальных результатов, концентрация фосфора на поверхности составляет $N_P = 2,5 \times 10^{20}\text{ см}^{-3}$; при этом на глубине 15 мкм его концентрация

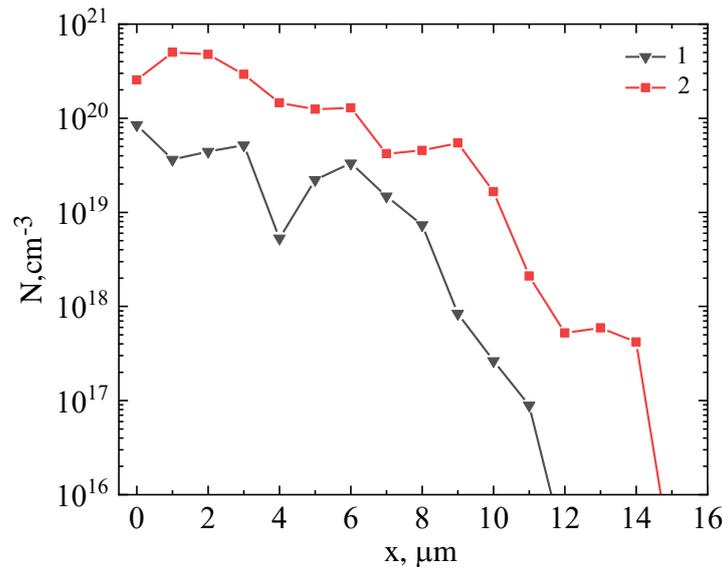


Рис. 3. Концентрационное распределение примесных атомов фосфора (кривая 2) и совместная диффузия атомов галлия и фосфора при $T = 1250$ °С, $t = 2$ часа (кривая 1).

уменьшается до $\sim 10^{16}$ cm^{-3} (кривая 1), а образцы все время остаются n -типа проводимости.

В этих образцах кремния поверхностная концентрация галлия после диффузии при $T = 1250$ °С, $t = 2$ часа достигает $N_{\text{Ga}} = 3,7 \times 10^{19}$ cm^{-3} и уменьшается по глубине образцов, при $x = 14$ мкм она составляет $\sim 10^{16}$ cm^{-3} (кривая 2), при этом образцы все время остаются p -типа проводимости. Таким образом, концентрационные распределения фосфора и галлия при их диффузии по отдельности существенно отличаются друг от друга.

На рис. 3 представлено концентрационное распределение при совместной диффузии атомов галлия и фосфора в кремний при $T = 1250$ °С в течение 2 часов (кривая 1). После диффузии поверхностная концентрация молекул галлия и фосфора достигает $N_{\text{GaP}} = 8,4 \times 10^{19}$ cm^{-3} , глубина залегания составляла 12 мкм. После совместной диффузии атомов галлия и фосфора в кремнии тип проводимости был везде n -типа. Также на рис. 3 показано концентрационное распределение носителей заряда в образцах кремния, легированного только фосфором при $T = 1250$ °С в течение 2 часов (кривая 2). Поверхностная концентрация фосфора достигает $N_p = 2,5 \times 10^{20}$ cm^{-3} , глубина залегания составляла 15 мкм.

Полученные результаты показывают, что поверхностная концентрация после совместной диффузии примесных атомов галлия и фосфора меньше на порядок по сравнению с контрольными образцами, легированными только атомами фосфора. Кроме того, глубина залегания галлия и фосфора меньше, чем контрольного фосфора в кремнии при одинаковых условиях диффузии.

На основе полученных результатов (рис. 3, 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 $x = 0-15$ мкм, где n_0 – концентрация электронов в образцах, легированных только фосфором при $T = 1250$ °С, $t = 2$ часа, n_1 – концентрация электронов в образцах, легированных совместно атомами галлия и фосфора.

На рис. 4 представлено концентрационное распределение атомов галлия при диффузии $T = 1250$ °С, $t = 2$ часа, а также расчетное концентрационное распределение при совместной диффузии атомов галлия и фосфора при таких же условиях диффузии $T = 1250$ °С, $t = 2$ часа.

Эти результаты показывают, что, независимо от одинаковых условий диффузионного легирования, во всех материалах концентрационное распределение атомов галлия и фосфора в 4÷6 раз больше, чем в образцах без фосфора. Это означает, что наличие достаточно высокой концентрации фосфора существенно увеличивает растворимость атомов галлия. Полученные экспериментальные данные частично подтверждают результаты [17], хотя там исследовалось взаимодействие фосфора с бором.

Результаты исследования подвижности носителей заряда в кремнии, легированном совместно галлием и фосфором и легированном только фосфором, показанные на рис. 5, получены методом Ван дер Пау. При этом предполагалось, что все введенные примесные атомы фосфора и галлия находятся в электроактивном состоянии, то есть

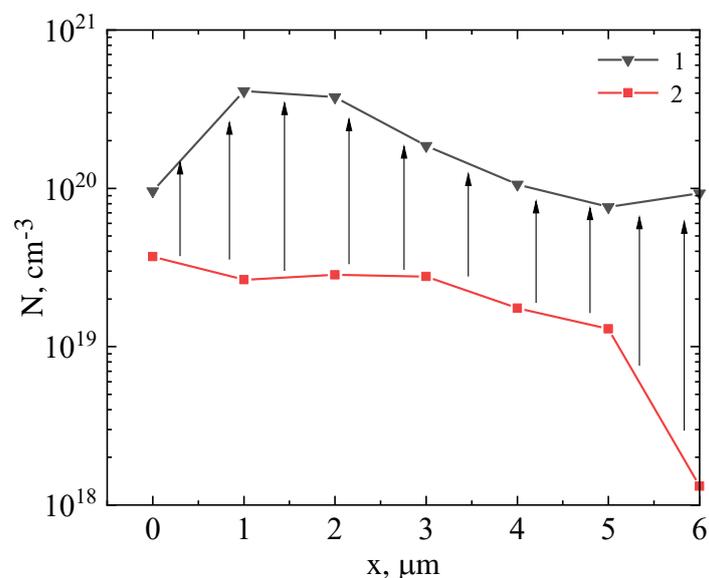


Рис. 4. Распределение примесных атомов галлия (кривая 2) в контрольных образцах и при совместной диффузии примесных атомов галлия и фосфора (кривая 1).

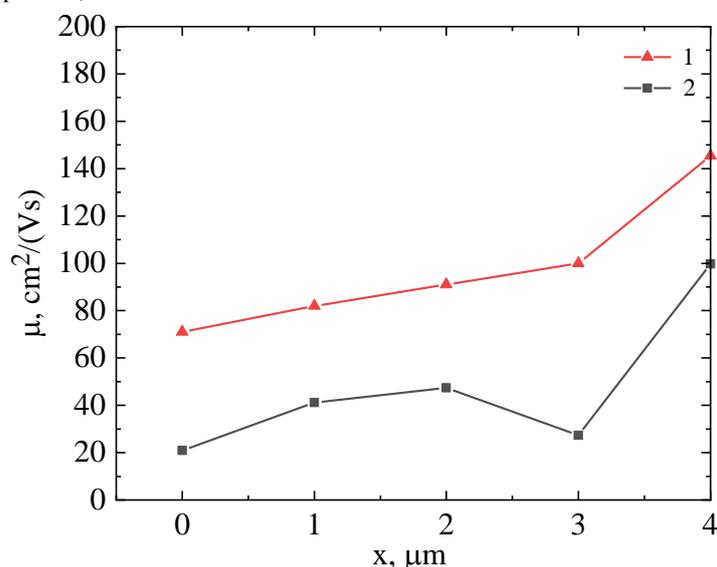


Рис. 5. Изменение подвижности электронов в кремнии, легированном примесными атомами фосфора (кривая 1) и легированном совместно примесными атомами галлия и фосфора (кривая 2).

концентрация электронов – это концентрация фосфора, а концентрация дырок – это концентрация галлия. При расчете концентрации фосфора и галлия (электронов и дырок) учитывалось изменение подвижности носителей заряда в зависимости от концентрации примесных атомов. Как видно из рис. 5, до 4 мкм образцы кремния, легированного совместно фосфором и галлием и легированные фосфором без галлия, имеют *n*-тип проводимости, но подвижность электронов в кремнии с комплексами [GaP] в 2–3 раза меньше, чем подвижность электронов в образцах, легированных только фосфором. Также следует отметить, что концентрация электронов в образцах, легированных только фосфором, почти на порядок больше, чем концентрация электронов в образцах, легированных совместно атомами галлия и фосфора [22–24].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные результаты невозможно объяснить взаимной компенсацией донорных (фосфор) и акцепторных (галлий) примесных атомов в кремнии, так как при этом атомы фосфора и галлия в решетке кремния распределены хаотически, и эти атомы пространственно разделены. Это не должно привести к повышению концентрации атомов галлия при совместной диффузии атомов галлия и фосфора. Поэтому можно предполагать, что это явление связано с взаимодействием атомов фосфора и галлия, поскольку атомы фосфора в кремнии находятся в узлах кристаллической решетки в виде положительно заряженного иона P^+ , создавая дополнительные электроны в зоне проводимости, концентрация которых равна $N_{p^+} = n$. Наличие достаточно большой

концентрации положительно заряженных атомов фосфора (P^+) формирует электрический потенциал, распределенный от поверхности кристалла по глубине образца в кремнии, что стимулирует повышение концентрации атомов галлия в процессе диффузии, которые в кремнии действуют как акцепторная примесь в виде отрицательного иона Ga^- .

Поэтому можно предполагать, что в результате таких взаимодействий в решетке кремния появляются донорно-акцепторные комплексы, то есть квазимолекулы в виде $[GaP^+]$. В этом случае обнаружено существенное уменьшение подвижности электронов в кремнии, легированном совместно галлием и фосфором, относительно легированного только атомами фосфора, хотя оба образца имеют n -тип проводимости, а концентрация электронов в образцах кремния, легированного только фосфором, на порядок выше, чем в кремнии, легированном совместно примесными атомами галлия и фосфора (рис. 6).

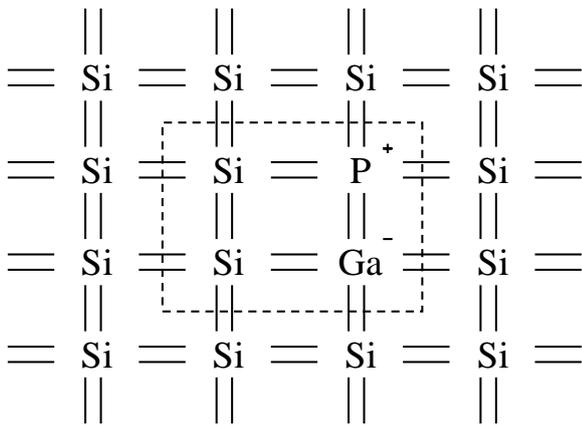


Рис. 6. Электронейтральные решетки типа $Si_2 GaP^+$ в кремнии.

Образование таких электронейтральных комплексов $[GaP^+]$ приводит систему к более выгодному термодинамическому состоянию, чем состояние, когда атомы этих примесей удалены друг от друга, так как при образовании комплексов, во-первых, существенно уменьшается концентрация носителей заряда как в зоне проводимости, так и в валентной зоне, то есть степень дефектности кристалла уменьшается. Во-вторых, при этом электрические потенциалы, создаваемые вокруг каждого иона, экранируются между собой, что опять приводит к понижению степени дефектности кристалла.

Эти факторы стимулируют образование комплексов $[GaP^+]$, поскольку наличие достаточно высокой концентрации фосфора в кремнии создает более благоприятные условия для повышения концентрации вновь

диффундирующих атомов галлия. В результате исследования было установлено, что заметное повышение растворимости галлия происходит только тогда, когда концентрация атомов фосфора $N_p \geq N_{Ga}$.

На основе полученных экспериментальных данных (рис. 2 и 3), используя уравнение электронейтральности, вычисляли концентрацию комплексов галлия с фосфором $[GaP^+]$. Получено, что концентрация комплексов на поверхности образцов составляла $\sim (8 \div 9) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Мы знаем [25], что в сильно разбавленных растворах (концентрация $[P]$, $[Ga]$ и $[GaP^+]$ много меньше, чем число узлов решетки N) в приближении локального равновесия концентрация пар должна соответствовать закону действующих масс:

$$\frac{C_{GaP}}{C_{Ga} C_P} = K(T), \quad (1)$$

где $K(T)$ – константа равновесия квазихимической реакции; C_P – концентрация атомов фосфора; C_{Ga} – концентрация атомов галлия; $C_{[GaP]}$ – концентрация пар. Явный вид константы квазихимической реакции (1) можно найти, минимизируя термодинамический потенциал Гиббса с учетом изменения конфигурационной энтропии при образовании пар:

$$K(T) \approx \frac{4}{N} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (2)$$

где: $\Delta E = E_P + E_{Ga} - E_{[GaP]}$ – энергия образования пары $[GaP^+]$, а $E_{[GaP]}$ – изменение энергии кристалла при замещении двух соседних атомов кремния парой $[GaP^+]$, E_P и E_{Ga} – изменения энергии кристалла при замещении атомов кремния атомами P и Ga соответственно [26].

Из (1) и (2) была определена энергия образования электронейтральных комплексов $[GaP^+]$:

$$\Delta E = kT \ln\left(\frac{N}{4} \frac{C_{GaP}}{C_P C_{Ga}}\right) \quad (3)$$

при этом $N = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $T = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Полученная теоретическими расчетами энергия связи комплекса $[GaP^+]$ составила $E = 0,62 \text{ эВ}$ для температуры $T = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$.

ВЫВОДЫ

Анализ исследований показал, что появляется очень важная и интересная задача перед исследователями – определить оптимальные режимы технологии формирования бинарных

элементарных ячеек типа Si_2GaP с максимальной концентрацией распределения, позволяющей управлять их толщиной в монокристаллическом кремнии; определить более современными методами изменение ширины запрещенной зоны E_g в зависимости от распределения бинарных элементарных ячеек типа Si_2GaP в решетке кремния. Также требуется теоретическое и экспериментальное исследование зонной структуры области кремния, обогащенной ячейками типа Si_2GaP , и подвижности носителей зарядов в этих слоях.

При этом также следует отметить следующие очень интересные факты, связанные с образованием комплексов $[\text{Ga}^+\text{P}^-]$, которые находятся в соседних узлах решетки кремния. При образовании таких комплексов в решетке формируются новые бинарные электронейтральные решетки типа $\text{Si}_2\text{Ga}^+\text{P}^-$ (рис. 6). Такие бинарные элементарные ячейки в отличие от элементарной ячейки кремния обладают частично ионной ковалентной связью и соответствующими энергетическими структурами.

При достаточно больших концентрациях таких бинарных элементарных ячеек они должны оказывать существенное влияние на электрофизические, оптические и фотоэлектрические свойства кремния, то есть привести к существенному изменению электрофизических параметров кремния, что позволяет получить новый материал на основе кремния. Этот вопрос требует более комплексного исследования в образцах с достаточно высокой концентрацией комплексов $[\text{Ga}^+\text{P}^-]$ в решетке кремния.

Таким образом, был разработан диффузионный способ формирования элементарных ячеек типа $\text{Si}_2\text{Ga}^+\text{P}^-$, что дает начало созданию нового класса полупроводниковых материалов с уникальными физическими свойствами и функциональными возможностями для оптоэлектроники.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бахадирханов, М.К., Исамов, С.Б., Физические основы формирования гетероэпитаксиальной структуры на основе кремния, *Журнал технической физики*, 2021, т. 91, № 11, с. 1678.
- Бахадирханов, М.К., Зикриллаев, Н.Ф., Наркулов, Н., Садыков, У.Х., и др., О концентрации электроактивных атомов элементов переходных групп в кремнии, *Электронная обработка материалов*, 2005, № 2, с. 90.
- Chen, K., Kapadia, R., Harker, A., Desai, S., et al., Direct growth of single-crystalline III–V semiconductors on amorphous substrates, *Nature communications*, 2016, vol. 7, 10502. doi: 10.1038/ncomms10502.
- Бахадирханов, М.К., Исамов, С.Б., Зикриллаев, Н.Ф., Илиев, Х.М., и др., Функциональные возможности кремния с нанокластерами атомов марганца, *Электронная обработка материалов*, 2020, № 2, с. 14.
- Adachi, S., *Properties of Group–IV, III–V and II–VI Semiconductors*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- Бахадирханов, М.К., Исамов, С.Б., Зикриллаев, Н.Ф., Арзикулов, Э.У., Инфракрасное гашение фотопроводимости в кремнии с многозарядными кластерами марганца, *Электронная обработка материалов*, 2013, № 4, с. 43.
- Бахадирханов, М.К., Мавлянов, А.Ш., Содиков, У.Х., Хакулов, М.К., Кремний с бинарными элементарными ячейками как новый класс материалов для будущей фотоэнергетики, *Гелиотехника*, 2015, № 4, с. 28.
- Уваров, А.В., Баранов, А.И., Вячеславова, Е.А., Калужный, Н.А., и др., Формирование гетероструктур GaP/Si-фотопреобразователей с помощью комбинации методов МОС-гидридной эпитаксии и атомно-слоевого плазмохимического осаждения, *Письма в ЖТФ*, 2021, т. 47, № 14, с. 51. doi: 10.21883/PJTF.2021.14.51189.18781
- Bakhadyrhanov, M.K., Sodikov, U.X., Iliev, Kh.M., Tachilin, S.A., et al., Perspective material for photoenergetics on the basis of silicon with binary elementary cells, *Mater. Phys.Chem.*, 2019, vol. 1, p. 89. doi:10.63019/mpc.v1i2.493
- Bakhadirhanov, M.K., Isamov, S.B. and Kenzhaev, Z.T., New materials for photovoltaics and optoelectronics based on silicon with binary nanoclusters of impurity atoms with controllable parameters, *Euroasian J. Semicond. Sci. Engineering*, 2020, vol. 2, no. 5, p. 9.
- Болтакс, Б.И., *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках*, Ленинград: Наука, 1972. 386 с.
- Бахадирханов, М.К., Абдурахманов, Б.А., Зикриллаев, Х.Ф., О состоянии германия в кремнии в условиях низкотемпературной диффузии, *Приборы*, 2018, № 5, с. 39.
- Bakhadyrhanov, M.K., Iliev, Kh.M., Mavlonov, G.Kh., Ayupov K.S., et al., Silicon with magnetic nanoclusters of manganese atoms as a new ferromagnetic material, *Techn. Phys.*, 2019, no. 64, p. 385.
- Зеер, Г.М., Фоменко, О.Ю., Ледяева, О.Н., Применение сканирующей электронной микроскопии решения актуальных проблем материаловедения, *Журнал Сибирского*

- федерального университета, *Химия*, 2009, т. 4, № 2, с. 287.
15. Nakano, S., Liu, X., Han, X.F. and Kakimoto K., Numerical analysis of phosphorus concentration distribution in a silicon crystal during directional solidification process, *Crystals*, 2021, vol. 11, no. 27, p. 1. <https://doi.org/10.3390/cryst11010027>.
 16. Александров, О.В., Афонин, Н.Н., Особенности сегрегационного перераспределения фосфора при термическом окислении сильно легированных слоев кремния, *Физика и техника полупроводников*, 2005, т. 39, № 6, с. 647.
 17. Зайнабидинов, С., Назыров, Д.Э., Базарбаев, М.И., Диффузия, растворимость и электрические свойства самария и иттербия в кремнии, *Электронная обработка материалов*, 2006, № 4, с. 90.
 18. Александров, О.В., Модель высоко- и низкотемпературной диффузии фосфора в кремнии по дуальному парному механизму, *Физика и техника полупроводников*, 2001, т. 35, № 11, с. 1289.
 19. Гадияк, Г.В., Диффузия бора и фосфора в кремнии при высокотемпературной ионной имплантации, *Физика и техника полупроводников*, 1997, т. 31, № 4, с. 385.
 20. Wittel, F., Dunham, S., Diffusion of phosphorus in arsenic and boron doped silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1995, vol. 66, no. 11, p. 1415. <https://doi.org/10.10631.113219>
 21. Ардышев, В.М., Ардышев, М.В., Активация и распределение кремния, имплантированного в арсенид галлия, при изотермическом радиационном отжиге, *Физика и техника полупроводников*, 1998, т. 32, № 10, с. 1153.
 22. Тишковский, Е.Г., Ободников, В.И., Таскин, А.А., Феклистов, К.В., и др., Перераспределение атомов фосфора, имплантированных в сильно легированный бором кремний, *Физика и техника полупроводников*, 2000, т. 34, № 6, с. 655.
 23. Аверкиев, Н.С., Казакова, Л.П., Лебедев, Э.А., Смирнова, Н.Н., Дрейфовая подвижность носителей заряда в пористом кремнии, *Физика и техника полупроводников*, 2001, т. 35, № 5, с. 609.
 24. Chkhartishvili, L., Pagava, T., Apparent Hall mobility of charge carriers in silicon with nano-sized “metallic” inclusions, *Nano Studies*, 2013, vol. 8, p. 85.
 25. Поморцева, Л.И., Подвижность неосновных носителей заряда при низком уровне инжекции в полупроводниках, *Физика и техника полупроводников*, 2011, т. 45, № 4, с. 446.
 26. Ковтуненко, П.В., *Физическая химия твердого тела. Кристаллы с дефектами*, Москва: Высшая школа, 1993. 352 с.

Summary

It was found that the diffusion of gallium and phosphorus atoms from the gas phase into silicon not only compensates, but also a particular interaction with each other. Elemental analysis on a scanning electron microscope showed that gallium and phosphorus atoms are present on the silicon surface after diffusion and processing in similar concentrations. Investigation of the concentration distribution of charge carriers over depth shows that, upon joint diffusion, the solubility of gallium increases by one order of magnitude. In this case, the mobility of charge carriers decreased 3–4 times. Based on the data obtained, the concentration ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) of neutral complexes $[\text{Ga}^+\text{P}^-]$ and their formation energy ($\sim 0.62 \text{ eV}$) were calculated. The results obtained can be associated with the electrostatic interaction of gallium and phosphorus ions during diffusion, as a result of which, the concentration distribution of impurities changes, as well as the formation of quasineutral complexes of the $[\text{Ga}^+\text{P}^-]$ type in the silicon lattice.

Keywords: silicon, diffusion, binary compounds, mobility, gallium, phosphorus, crystal, device, technology, temperature