

**СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ
WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES**

Научная статья

УДК 539.219.3

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-50-57

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ****Назмиев Альберт Ильгамович*,
Михеев Игорь Дмитриевич**Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ

*для корреспонденции: albert.nazmiev@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

14 мая 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

25 июля 2024 г.

Принята к публикации:

29 августа 2024 г.

Опубликована:

26 сентября 2024 г.

Ключевые слова:диффузия, полупроводник,
подложка, взаимная
диффузия, металлы**Аннотация.**

Взаимная диффузия в двойной твердофазной системе металл-полупроводник представляет собой процесс диффузионного обмена атомами между двумя материалами, находящимися в контакте. В данной работе представлены теоретические сведения взаимной диффузии в бинарных твердофазных системах, а также особое внимание уделено обзору исследований, посвященных взаимной диффузии между полупроводниками (на основе кремния и его соединений) и различными технологическими металлами (Au, Cu, Ni, Pt, Mo, W и др). Основным параметром данного процесса является коэффициент взаимной диффузии, являющийся критерием интенсивности процесса перераспределения контактирующих элементов в бинарной системе. Выявлены различия диффузии благородных и тугоплавких металлов с полупроводниковой подложкой. Исследование диффузионных процессов в системах металл-полупроводник представляется перспективным и имеет практическое значение ввиду того, что данный процесс является главным фактором в создании новых материалов в сфере полупроводниковой электроники и термической обработки материалов, лежит в основе таких важных технологических процессов, как сварка, нанесение защитных покрытий, гомогенизация сплавов. По итогу исследования выявлены основные особенности процесса взаимной диффузии в бинарной системе металл-полупроводник: преимущество диффузии атомов полупроводника перед атомами металла, а также возникновение разупорядоченного слоя вблизи границы, включающей аморфные и упруго-деформированные области, параллельно формирующие слой интерметаллического соединения.

Для цитирования: Назмиев А.И., Михеев И.Д. Исследование процесса взаимной диффузии полупроводниковой подложки и технологических металлов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4 (164). С. 50-57. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-50-57, EDN: JXFKVE

Введение

Основным многофункциональным физическим элементом полупроводниковой электроники является контакт металл-полупроводник (КМП). Желаемые физические и электрические свойства электронных материалов

обычно достигаются путем обработки при повышенных температурах, и понимание изменений, происходящих в ходе этих процессов, основано на исследовании процесса диффузии. Изучение процесса диффузии не только приводит к разработке полезных

коммерческих процессов, но и дает фундаментальные знания о поведении как собственных дефектов, так и примесей в кристаллах. Диффузия представляет собой физико-химический процесс, вызванный тепловым движением, суть которого состоит в перемещении примесных атомов или атомов основного вещества [1]. Диффузия может наблюдаться в любом веществе, независимо от его агрегатного состояния.

Главную роль в системах типа металл-полупроводник в создании и термической обработке материалов при различных технологических процессах выполняют именно диффузионные процессы, определяющие различные характеристики этих материалов. Например, они проявляются при росте кристаллов из расплавов, фазовых превращениях, разделении твердых растворах, рекристаллизации и при других процессах. Высокая активность диффузионных процессов при повышенных температурах влияет на жаропрочность материалов [2]. Особый интерес представляют взаимные диффузионные процессы в бинарных и многокомпонентных системах с учетом пространственной неоднородности их химического состава. Изучение этих процессов имеет практическое значение, так как он лежит в основе таких важных технологических процессов, как сварка, нанесение защитных покрытий, гомогенизация сплавов и др. Под взаимной диффузией стоит понимать процесс диффузионного обмена атомами между двумя материалами, находящимися в контакте [3]. Рассмотрим подробнее процесс взаимной диффузии в бинарных твердофазных системах типа металл-полупроводник с теоретической точки зрения.

Теория взаимной диффузии в бинарных твердофазных системах

Диффузионный поток атомов i -го компонента J_i относительно плоскости границы раздела системы в простейшем случае, то есть тогда, когда градиент концентрацией N_i данного компонента является единственной движущей силой, определяется I-м законом Фика [4]:

$$J_i = -D_i \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x}, (i = 1, 2 \dots) \quad (1)$$

где x – координата, перпендикулярная плоскости границы раздела; D_i – коэффициент диффузии.

Подставив в уравнение (1):

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\frac{\partial J_i}{\partial x} \quad (2)$$

получим уравнение диффузии или II-й закон Фика:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} \quad (3)$$

Если включить в рассмотрение одномерной диффузии движущие силы различной

физической природы, то уравнение (1) примет следующий вид:

$$J_i = -D_i \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} + N_i \cdot v_{др}^i \quad (4)$$

где $v_{др}^i$ – скорость дрейфа атомом примеси, обусловленная совокупным действием движущих сил, может быть функцией концентрации, координат и градиентов концентраций компонентов.

Анализ литературных данных показывает, что из-за сложности и многообразия взаимных диффузионных процессов между полупроводниковой подложкой и технологическими металлами целесообразно проводить анализ экспериментальных данных, классифицированных по классам явлений, таких как реакционная диффузия, влияние механических примесей, диффузия в полупроводниках типа A_3B_5 .

Обзор научных работ исследования процесса взаимной диффузии в различных системах типа «металл-полупроводник»

За последние несколько лет особое внимание привлекает изучение взаимной диффузии золота (Au) в кремнии (Si). Данный интерес объясняется следующим: золото является быстродиффундирующей примесью, которая способна создавать глубокие акцепторные уровни в кремнии. Так, в работе [5] исследовалась высокотемпературная (600–1100°C) взаимная диффузия золота в кремний-подобной полупроводниковой подложке. Значение энергии активации диффузии 0,39 – 3,11 эВ, поскольку значение энергии активации междоузельной диффузии Au в Si лежит в диапазоне $0,28 \text{ эВ} \leq Q \leq 1,55 \text{ эВ}$. Повышенные значения энергии активации Q объяснены привлечением предэкспоненциального множителя, который составляет $2,44 \cdot 10^{-4} - 1,15 \text{ см}^2/\text{с}$.

В работе [6] авторами исследована миграция Si сквозь технологичный металл – золото. Было отмечено, что кремний является хорошо подвижным диффузантом, однако количественных оценок коэффициента диффузии кремния в золоте не приводится.

Авторами исследования [7] было изучено комплексобразование атомов золота с атомами фосфора P и меди Cu в процессе взаимной диффузии в кремниевом-подобном полупроводнике. Выявлено, что модель так называемого «вытеснения», согласно которой междоузельный атом способен переходить в узел решетки кремния, вытесняет атом в междоузлии. Были получены значения: $Q = 1,13 \text{ эВ}$, $D_0 = 1,78 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$.

Процесс ионно-лучевой модификации на границе металла и полупроводника включает использование протонов, которые являются самыми легкими ионами, способными вызывать

формирование элементарных радиационных повреждений, таких как вакансии и междоузлия. Эти повреждения не только изменяют структуру, но и способствуют перемещению атомов металла и полупроводника. В результате облучения эти атомы взаимно диффундируют, что сопровождается повышением температуры в зоне облучения.

Исследование, описанное в работе [8], посвящено изучению процесса диффузии протонами в системе Ni-SiC. В ходе экспериментов, проведенных при температуре от 700 до 750°C, было установлено, что облучение способствует асцендентной диффузии кремния из карбида кремния в никелевую пленку, что обусловлено дефектами в структуре пленки. Максимальное перемешивание системы металл-полупроводник достигается при соответствии толщины металла и пробега протона.

Перспективным материалом для контактных систем полупроводниковых и микроэлектронных устройств наряду с никелем, платиной, титаном является ниобий (Nb). В рамках исследования [9] был проведен анализ диффузионного поведения и механических характеристик в бинарной системе ZrC-NbC для разработки высокоэффективных сплавов на основе ZrC. Отмечено, что по мере увеличения концентрации Nb коэффициенты взаимной диффузии системы снижаются. Энергии взаимной диффузионной активации системы возрастают с увеличением концентрации Nb с наибольшим значением 395,3 кДж/моль при 55 ат. % концентрации ниобия.

В работе [5] изучена диффузия в системе Ni-Si, для которой значение энергии активации и предэкспоненциального множителя составило 1,4 эВ и $1,3 \cdot 10^{-2}$ см²/с соответственно. Кроме того, в работе [10] обнаружена высокая растворимость никеля в пограничной области кремния (10^{20} см⁻³).

Кобальт, палладий, платина охотно реагируют с аморфным кремнием, при этом образуется обогащенная фаза состава Me₂Si. Однако такие металлы, как хром, цирконий, титан при взаимодействии с полупроводниковой подложкой вначале формируют обедненную фазу состава MeSi₂, а вот конечный состав диффузионной зоны зависит от исходного количества металла. Авторы [11] выдвигают следующие закономерности:

- благородные металлы в контакте с полупроводниковой подложкой на основе кремния ведут себя подобно никелю и кобальту. Так, например, Pt₂Si начинает образовываться при 250°C, в то время как, PtSi – лишь при 350°C.

- тугоплавкие металлы, такие как W, Mo, Cr, Ta, склонны к образованию обедненных фаз, при этом температура образования лежит в диапазоне 500-700°C.

Карбид кремния (SiC), относящийся к семейству неоксидных керамических материалов, является широко используемым конструкционным материалом в машиностроении, атомной энергетике и микроэлектронике.

В работе [12] представлены результаты исследования структурно-фазового состояния системы «пленка Ti – подложка SiC-керамика», подвергнутого обработке интенсивным импульсным электронным пучком (пленка титана толщиной 0,5 мкм была нанесена на поверхность карбида кремния). В результате расплавления титановой пленки образуется капельная фракция, которая имеет многоэлементный состав (атомы титана, углерода и кремния), что подтверждает облучение данной системы, которое сопровождается взаимной диффузией керамических элементов в осаждаемое покрытие.

Технологии нанесения защитных и укрепляющих слоев на металлические поверхности основываются на процессах диффузии между различными компонентами. В случае многокомпонентных систем этот процесс может привести к формированию твердых растворов или же к появлению интерметаллических фаз в зависимости от химического состава компонентов.

Внутренние интерфейсы, такие как границы зерен и межфазные границы, являются эффективными каналами для ускоренной диффузии. Диффузия через эти границы происходит значительно быстрее по сравнению с объемом материала. Например, интерметаллиды системы Ni-Al используются для создания жаропрочных сплавов благодаря их высокой теплопроводности и коррозионной стойкости. В исследовании [13] был разработан метод взаимной диффузии алюминия и кремния. Глубина взаимной диффузии на кремнии – 14 мкм, на алюминии – 168 мкм. Таким образом, Si диффундирует в Al намного больше, чем Al в Si, что доказывает процесс взаимной диффузии.

Процессы взаимной диффузии между тонкими пленками металлов и полупроводниковой подложкой вызывают изменения в активном материале металла и, следовательно, в его электрохимических свойствах.

Авторами [14] рассматривается взаимодиффузия, происходящая между тонкой пленкой на основе LiMn₂O₄ (LMO) и гибкой полупроводниковой подложкой из нержавеющей стали. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показывает, что при температуре 600-700°C во время кристаллизации в пленке происходит истощение лития и марганца, в то время как элементы подложки (Fe, Cr, Al, Pt) диффундируют в шпинель LMO структуры.

Рассматривая медь в качестве технологичного металла, можно сделать вывод, что данный металл демонстрирует плохую адгезию к полупроводниковым подложкам, в частности подложкам на основе Si или SiO₂. Кроме того,

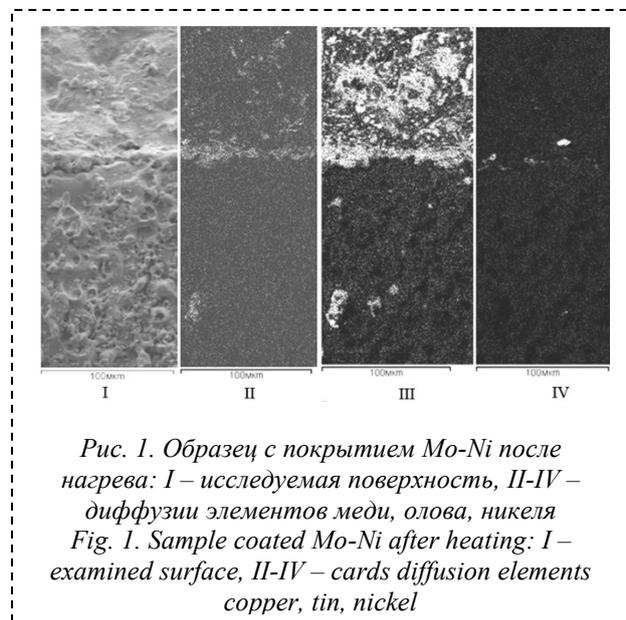


Рис. 1. Образец с покрытием Mo-Ni после нагрева: I – исследуемая поверхность, II-IV – диффузии элементов меди, олова, никеля
Fig. 1. Sample coated Mo-Ni after heating: I – examined surface, II-IV – cards diffusion elements copper, tin, nickel

высокое содержание меди на поверхности кремния отрицательно влияет на напряженность поля пробоя диэлектрика и значения заряда до пробоя. Что еще более важно, из-за своего высокого коэффициента диффузии в кремнии медь имеет тенденцию диффундировать в кремний и изоляционные слои на основе кремния, образуя высокоомные силициды меди при температурах до 200°C. В связи с этим в работе [15] продемонстрировано, что атомы меди могут легко диффундировать через дефекты кристаллов и вступать в реакцию с кремнием при использовании тонких кристаллических пленок (например, Mo-Co-B) в качестве диффузионных барьерных слоев.

Исследования процессов взаимной диффузии меди и олова в полупроводниковые подложки через защитное покрытие были проведены в работе [16]. На кристаллы твердого раствора

теллурида висмута с n-типом проводимости наносилось защитное покрытие Mo-Ni (толщина Mo-1 мкм, Ni-9 мкм) с использованием электродугового нанесения и с сепарацией потока плазмы. Степень концентрации светлых точек (II, III, Рис. 1) в материале отражает проникновение легирующей примеси в полупроводник, а также указывает на присутствие меди и олова. Светлая область (IV, Рис. 1) указывает на наличие никеля в исходном образце. Было отмечено, что медь и олово активно проникают сквозь защитное покрытие Mo-Ni из-за высокой подвижности атомов диффузентов.

Стоит также отметить широкое применение полупроводниковых структур для создания детекторов. Арсенид галлия (GaAs) выделяется как ключевой материал для полупроводниковых детекторов благодаря своим уникальным характеристикам: широкая запрещенная зона (1,43 эВ), возможность модификации свойств путем добавления легирующих элементов и высокая мобильность зарядов.

В любом полупроводниковом приборе необходим компонент в виде контакта металл-полупроводник. Этот контакт либо может быть непрямым омическим соединением, либо выполнять функцию выпрямляющего перехода, известного как барьер Шоттки [17]. Полупроводниковые структуры с переходом типа металл-полупроводник называются диодами с барьером Шоттки (DSB). Металл, контактируя с полупроводниковой подложкой, происходит взаимную диффузию носителей заряда через границу контакта. Данный процесс способствует образованию некоего тонкого слоя перехода, который обеспечивает электрическое соединение. В диодах с барьером Шоттки используются металлы с низким потенциалом, например платина или вольфрам. Когда металл контактирует с полупроводником, происходит взаимная диффузия, что приводит к образованию зоны, которая имеет повышенную концентрацию носителей заряда у поверхности полупроводника. Данный процесс создает

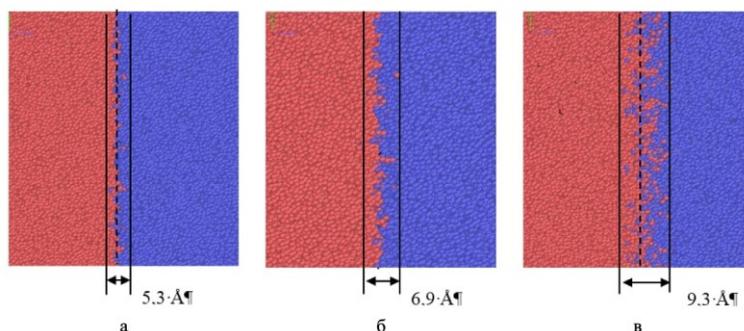


Рис. 2. Распределение атомов кремния (красный) и германия (синий) в диффузионном слое при температуре: а – 900 К, б – 1100 К, в – 1300 К
Fig. 2. The distribution of silicon atoms (red) and germanium (blue) in the diffusion layer at a temperature of: а – 900 K, б – 1100 K, в – 1300 K

барьерный потенциал, который в дальнейшем препятствует обратному току диода.

Сплавы кремний-германий ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) в основном известны своим применением в высокотемпературных термоэлектрических устройствах.

Таблица 1. Коэффициенты взаимной диффузии кремния и германия
Table 1. The coefficients of mutual diffusion of silicon and germanium

$T_{\text{сп}}, \text{K}$	$D_{\text{Si}} \cdot 10^{-10}, \text{cm}^2 \cdot \text{c}^{-1}$	$D_{\text{Ge}} \cdot 10^{-10}, \text{cm}^2 \cdot \text{c}^{-1}$
900	0,60	0,29
1000	0,73	0,48
1100	1,01	0,68
1200	1,36	0,89
1300	1,57	1,10

Автором [18] исследована взаимная объемная диффузия кремния и германия в процессе синтеза твердого раствора методом спекания порошков. В работе были рассчитаны коэффициенты взаимной диффузии – германия в кремний и кремния в германий, данной системы в зависимости от времени отжига. Результаты исследования представлены на Рис. 2 и в Таблице 1. Значения энергии активации для кремния и германия равны 0,25 эВ и 0,33 эВ соответственно.

Было отмечено, что с увеличением температуры происходит увеличение толщины взаимодиффузионного слоя, которое достигает 10 Å.

В последнее время особое внимание уделяется арсениду галлия (GaAs), являющемуся перспективным прямозонным полупроводником после кремния и германия.

В работе [19] исследовано гибридное склеивание пластин GaAs и Si при низкой температуре (300°C) методом активации Ar плазмой. Граница раздела пластин GaAs/Si плотная и бездефектная. С помощью рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии были определены характеристики элементов интерфейса, которые показали, что элементы на границе раздела подвергаются взаимной диффузии, что благоприятно сказывается на повышении прочности соединения на границе раздела. Авторами отмечено, что на границе склеивания имеется аморфный переходный слой толщиной около 5 нм. Получение гетеропереходов GaAs на основе Si позволяет обогатить материалы, необходимые для разработки интегральных схем, улучшить характеристики материалов и устройств микроэлектроники.

Выводы

Таким образом, на основании исследования процесса взаимной диффузии полупроводниковой подложки и различных технологических металлов можно сделать следующие выводы:

- анализ научных работ по данной теме позволил выявить высокий интерес изучения взаимной диффузии для разработки новых материалов и технологий;

- проведенный обзор выделил различные методы анализа взаимной диффузии системы металл-полупроводник, результаты которых указывают на прямое влияние взаимной диффузии между металлом и полупроводниковой подложкой на микроструктуру и свойства материалов, что является главным фактором в создании новых материалов в сфере полупроводниковой электроники и термической обработки материалов;

- основные особенности процесса взаимной диффузии в бинарной системе металл-полупроводник: преимущество диффузии атомов полупроводника перед атомами металла, а также возникновение разупорядоченного слоя вблизи границы, включающей аморфные и упругодеформированные области, параллельно формирующие слой интерметаллического соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1961. 462 с.
2. Боровский И. Б., Гуров К. П., Марчукова П. Д., Угасте Ю. Э. Процессы взаимной диффузии в сплавах. Монография под ред. К. П. Гурова. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.
3. Datta S. Elastomer Blends. The Science and Technology of Rubber. 2013. Pp. 547–589. DOI: 10.1016/b978-0-12-394584-6.00012-1.
4. Маннинг Д. Кинетика диффузии атомов в кристаллах. М.: Мир, 1971. 277 с.
5. Атомная диффузия в полупроводниках. Под редакцией Шоу Д. М.: Мир, 1973. 684 с.
6. Hiraki A., Lugujo E. (1972). Low-Temperature Migration of Silicon in Metal Films on Silicon Substrates Studied by Backscattering Techniques. Journal of Vacuum Science and Technology. 1972. №9(1). Pp. 155–158. DOI: 10.1116/1.1316540.
7. Antonova I. V., Kadyrakunov K. V., Nidaev E. V., Smornov L. S. Diffusion of iron and gold in silicon annealed with millisecond pulses. Phys. St. Sol. 1983. V. A76. 2. 213–215.
8. Козловский В. В., Иванов П. А., Румянцев Д. С. [и др.] ФТП. 2004. №38(7) С. 778.
9. Xiong M. [et al.] Evaluation of diffusion behavior and mechanical characteristics in the ZrC-NbC pseudo-binary system // International Journal of

Refractory Metals and Hard Materials. 2024. Т. 121. С. 106641.

10. Berning G. L. P., Yoon K. H., Lewis G., Sinharoy S., Levenson L. L. The observation of pseudodiffusion of nickel in single-crystal silicon by in-depth Auger electron spectroscopy // Thin Solid Films. 1977. №45(1). Pp. 141–145. doi:10.1016/0040-6090(77)90215-2.

11. Wittmer M., Ting C.-Y., Tu K. N. Atomic Motion of Dopant During Interfacial Silicide Formation // MRS Proceedings. 1982; 18. DOI: 10.1557/proc-18-191.

12. Леонов А. А., Кузичкин Е. Е., Шугуров В. В., Тересов А. Д., Калашников М. П., Петюкевич М. С., Иванов Ю. Ф. Структура и свойства поверхностного слоя системы «Ti/SiC-ceramic», облученного низкоэнергетическим импульсным электронным пучком. Физический журнал: серия конференций. 2018. № 1115. P. 032040. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032040.

13. Современная наука: эксперимент и научная дискуссия: Сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции, Анапа, 25 июля 2022 года. Анапа : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2022. 60 с.

14. Rumpel M., Machhaus M., Sastre J., Ziegler S., Chen X., Flegler A., Giffin G. A. How interdiffusion affects the electrochemical performance of LiMn2O4 thin films on stainless steel. Materials Advances. 2021. №2(7). С. 2289–2298. DOI: 10.1039/d0ma00893a.

15. Chenyang Wang, Zhifu Zhang, Chenhe Wang, Jing Feng, Xiaodong Wang, Shuangxi Song. Thermally

stable Mo-Co-B thin film metallic glass as a potential diffusion barrier in Cu/Si contact system // Intermetallics. 2024. №169. С. 108296. ISSN 0966-9795. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108296.

16. Беляева А. О., Нарайкин О. С., Рябинин Д. Г., Федотов А. А. Экспериментальное исследование процессов диффузии меди и олова через защитное покрытие в полупроводниковые ветви термоэлектрических модулей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2010. Спецвыпуск. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-protsessov-diffuzii-medi-i-olova-cherez-zaschitnoe-pokrytie-v-poluprovodnikovye-ventvi> (дата обращения: 27.04.2024).

17. Huang R. [et al.] Hybrid bonding of GaAs and Si wafers at low temperature by Ar plasma activation // Journal of Semiconductors. 2024. Т. 45. №4. С. 042701-1-042701-7.

18. Кеслер В. Г. Взаимная диффузия в Ge_xSi_{1-x}/Si гетероструктурах, выращенных методом МЛЭ: Дис... канд. физ.-мат. наук / Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН). Защищена 2005.06.30. УДК 537.311.322. 218 с.: 5 табл., 36 ил. Библиогр.: 201 назв. // Сборник рефератов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Серия 16: 29. Физика. 30. Механика. 41. Астрономия. 89. Космические исследования. 2007. № 1. С. 93.

19. Chubenko, E. B., Grevtsov, N. L., Bondarenko, V. P. [et al.] Raman Spectra of Silicon/Germanium Alloy Thin Films Based on Porous Silicon. J Appl Spectrosc. 2022. №89. С. 829–834. DOI: 10.1007/s10812-022-01432-3.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Назмиев Альберт Ильгамович, аспирант кафедры конструирования и технологии производства электронных средств КиТПЭС, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева КНИТУ-КАИ, (420124, Российская Федерация, г. Казань, ул. Мансура Хасанова, 13, 8(986)906-50-84.), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1986-2633>, albert.nazmiev@mail.ru.

Михеев Игорь Дмитриевич, доцент кафедры КиТПЭС, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева КНИТУ-КАИ, (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Мансура Хасанова, 13, 8 (917) 859-66-72), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1986-2633>, igor_mikheev@yahoo.com.

Заявленный вклад авторов:

Назмиев Альберт Ильгамович – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Михеев Игорь Дмитриевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF MUTUAL DIFFUSION OF A SEMICONDUCTOR SUBSTRATE AND PROCESS METALS

Albert I. Nazmiev*,
Igor D. Mikheev

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI

*for correspondence: albert.nazmiev@mail.ru

**Article info**

Received:

14 May 2024

Accepted for publication:

25 July 2024

Accepted:

29 August 2024

Published:

26 September 2024

Keywords: APM Joint, wheel mount, dump truck, stud joint.**Abstract.**

Mutual diffusion in a double solid-phase metal-semiconductor system is a process of diffusion exchange of atoms between two materials in contact. This paper presents theoretical information on mutual diffusion in binary solid-phase systems, and special attention is paid to a review of studies on mutual diffusion between semiconductors (based on silicon and its compounds) and various process metals (Au, Cu, Ni, Pt, Mo, W, etc.). The main parameter of this process is the coefficient of mutual diffusion, which is a criterion for the intensity of the process of redistribution of contacting elements in a binary system. The differences in the diffusion of noble and refractory metals with a semiconductor substrate are revealed. The study of diffusion processes in metal-semiconductor systems seems promising and has practical significance due to the fact that this process is the main factor in the creation of new materials in the field of semiconductor electronics and heat treatment of materials, underlies such important technological processes as welding, protective coatings, and alloy homogenization. As a result of the study, the main features of the mutual diffusion process in the metal-semiconductor binary system were revealed: the advantage of diffusion of semiconductor atoms over metal atoms, as well as the appearance of a disordered layer near the boundary, including amorphous and elastically deformed regions that form a layer of intermetallic compound in parallel.

For citation: Nazmiev A.I., Mikheev I.D. Investigation of the process of mutual diffusion of a semiconductor substrate and process metals. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 4(164):50-57. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-50-57, EDN: JXFKVE

REFERENCES

1. Boltaks B.I. Diffusion in semiconductors. M.: Fizmatgiz; 1961.
2. Borovsky I.B., Gurov K.P., Marchukova P.D., Ugaste Yu.E. Mutual diffusion processes in alloys. Monograph edited by Gurov K.P. Moscow: The main edition of the physical and mathematical literature of the publishing house "Nauka"; 1973.ю
3. Datta S. Elastomer Blends. The Science and Technology of Rubber. 2013. Pp. 547–589.doi:10.1016/b978-0-12-394584-6.00012-1.
4. Manning D. Kinetics of diffusion of atoms in crystals. M.: Mir; 1971.
5. Atomic diffusion in semiconductors. Edited by Shaw D. M.: Mir; 1973.
6. Hiraki A., Lugujo E. Low-Temperature Migration of Silicon in Metal Films on Silicon Substrates Studied by Backscattering Techniques. *Journal of Vacuum Science and Technology*. 1972; 9(1):155-158.doi:10.1116/1.1316540.
7. Antonova I.V., Kadyrakunov K.V., Nidaev E.V., Smornov L.S. Diffusion of iron and gold in silicon annealed with millisecond pulses. *Phys. St. Sol.* 1983; A76, N2:213–215.
8. Kozlovsky V.V., Ivanov P.A., Rummyantsev D.S. [et al.] FTP. 2004; 38 (7):778.
9. Xiong M. [et al.] Evaluation of diffusion behavior and mechanical characteristics in the ZrC-NbC pseudo-binary system. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2024; 121:106641.
10. Berning G.L.P., Yoon K.H., Lewis G., Sinharoy S., Levenson L.L. The observation of pseudodiffusion of nickel in single-crystal silicon by in-depth Auger electron spectroscopy. *Thin Solid Films*. 1977; 45(1):141–145. DOI: 10.1016/0040-6090(77)90215-2.
11. Wittmer M., Ting C.-Y., Tu K.N. (1982). Atomic Motion of Dopant During Interfacial Silicide Formation. MRS Proceedings. 1982; 18. DOI: 10.1557/proc-18-191.
12. Leonov A.A., Kuzichkin E.E., Shugurov V.V., Teresov A.D., Kalashnikov M.P., Petyukevich M.S.,

Ivanov Yu.F. Structure and properties of the surface layer of the Ti/SiC-ceramic system irradiated by a low-energy pulsed electron beam. *Physical Journal: Conference series*. 2018; 1115:032040. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032040.

13. Modern science: experiment and scientific discussion: Collection of scientific papers based on the materials of the V International Scientific and Practical Conference, Anapa, July 25, 2022. Anapa: Limited Liability Company "Scientific Research Center of Economic and Social Processes" in the Southern Federal District; 2022.

14. Rumpel M., Machhaus M., Sastre J., Ziegler S., Chen X., Flegler A., Giffin G.A. How interdiffusion affects the electrochemical performance of LiMn₂O₄ thin films on stainless steel. *Materials Advances*. 2021; 2(7):2289–2298. DOI: 10.1039/d0ma00893a.

15. Chenyang Wang, Zhifu Zhang, Chenhe Wang, Jing Feng, Xiaodong Wang, Shuangxi Song. Thermally stable Mo-Co-B thin film metallic glass as a potential diffusion barrier in Cu/Si contact system. *Intermetallics*. 2024; 169:108296. ISSN 0966-9795. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108296.

16. Belyaeva A.O., Naraykin O.S., Ryabinin D. G., Fedotov A.A. Experimental investigation of the diffusion of copper and tin through a protective coating

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Albert I. Nazmiev, Postgraduate student of the Department of Design and Production Technology of Electronic Devices KiTPES, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev KNITU-KAI, (420124, Russian Federation, Kazan, Mansura Khasanova str. 13, 8(986)906-50-84.), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1986-2633>, albert.nazmiev@mail.ru.

Mikheev Igor Dmitrievich, Associate Professor of the Department of Cites, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev KNITU-KAI, (420015, Russian Federation, Kazan, Mansura Khasanova str. 13, 8 (917) 859-66-72), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1986-2633>, igor_mikheev@yahoo.com.

Contribution of the authors:

Albert I. Nazmiev – scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, review of relevant literature, conclusions, writing a text.

Mikheev Igor Dmitrievich – formulation of a research task, scientific management, conceptualization of research, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

into semiconductor branches of thermoelectric modules. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The series "Instrumentation"*. 2010. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-protsessov-diffuzii-medi-i-olova-cherez-zaschitnoe-pokrytie-v-poluprovodnikovye-vetvi> (date of application: 04/27/2024).

17. Huang R. [et al.] Hybrid bonding of GaAs and Si wafers at low temperature by Ar plasma activation. *Journal of Semiconductors*. 2024; 45(4):042701-1-042701-7.

18. Kesler V.G. Mutual diffusion in HexSi_{1-x}/Si heterostructures grown by the MBE method: Dis... Candidate of Physical and Mathematical Sciences / Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IFP SB RAS). Protected 2005.06.30. UDC 537.311.322. 218 p.: 5 tables, 36 ill.- Bibliography: 201 titles. *Collection of research and development papers. Episode 16: 29. Physics. 30. Mechanics. 41. Astronomy. 89. Space research*. 2007; 1(93).

19. Chubenko E.B., Grevtsov N.L., Bondarenko V.P. [et al.] Raman Spectra of Silicon/Germanium Alloy Thin Films Based on Porous Silicon. *J Appl Spectrosc*. 2022. 89, 829–834. DOI: 10.1007/s10812-022-01432-3.

