

DIFFUSION PARAMETERS OF ATOMS 3d TRANSITIVE ELEMENTS IN SILICON

Zh. R. Alieva

ДИФФУЗИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ АТОМОВ 3D ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КРЕМНИИ

Ж.Р.Алиева

Ишда 3d ўтиш элементлари атомларининг кремнийда экспериментал аниқланган диффузия параметрларининг атомларнинг физик параметрларига боғлиниши бўйича маълумотлар дифференциал таҳлил этилган ва яримэмпирик тенгламалар олинган. 3d даврга мансуб аксарият элементлар Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni атомларининг $D_0(x)$ ва $E(x)$ каби параметрлари уларнинг тартиб номери ва атом массаси ортиб бориши билан камайган. Си ва Zn атомлари учун аниқланган қонуниятдан бир мунча оғиши кузатилган.

Калит сўзлар: атомлар диффузияси, кремний, ўтиш элементлари, фаоллашиш энергияси, диффузия коэффициенти.

В работе выполнен дифференциальный анализ известных экспериментальных зависимостей диффузионных параметров от физических параметров примесного атома в кремнии и разработаны полуэмпирические уравнения для целого ряда 3d переходных элементов. Значения $D_0(x)$ и $E(x)$ уменьшаются с ростом порядкового номера и массы преимущественных (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co и Ni) атомов 3d переходных элементов в кремнии. Некоторое отклонение от проявленной закономерности наблюдается для атомов Си и Zn.

Ключевые слова: диффузия атомов, кремний, переходные элементы, энергия активации, коэффициент диффузии.

Внедрение автоматизированной и энерго-ресурсо-сберегающей техники в различные отрасли народного хозяйства способствует существенному развитию микроэлектронных и оптоэлектронных приборостроений, которое сопровождается расширением функциональных возможностей приборов, изготавливаемых на основе различных видов полупроводниковых материалов и их многокомпонентных соединений. При этом неизбежно расширяется номенклатура легирующих примесей, диффундируемых в объем материала с использованием нетрадиционных технологических способов.

Современные технологии полупроводникового приборостроения и разработка инновационных функциональных структур нанозлектроники нуждаются в более точных измерениях диффузионных параметров и новых физических моделях описания процесса. Изучение диффузионных процессов в полупроводниковых структурах с различными наноразмерными включениями находятся на стадии интенсивного развития [1, 2].

Анализ процессов диффузии развивается в направлении разработки более точных моделей, позволяющих реально оценивать механизм диффузионного процесса. Спектрометры способствуют достижению необходимой точности измерения профилей распределения внедренных в полупроводник примесей. Известно, что, используя экспериментальные данные распределения примесных атомов в кристалле и соответствующие кинетические кривые, можно определить коэффициенты диффузии примесных атомов в данном материале [1].

Традиционно для анализа диффузионных параметров примесного атома в кремнии используются различные модификации метода наименьших квадратов [1÷4]. Используются эмпирические данные, измеренные для определенного атома и условия выполнения эксперимента. Физический синтез экспериментальных данных для одной группы или периода системы химических элементов позволил построить обобщенные логические представления о процессах диффузии рассмотренных атомов в кремнии.

В работе выполнен анализ параметров диффузии примесных атомов 3d переходных элементов в кремнии. На основе дифференциального анализа известных экспериментальных зависимостей диффузионных параметров от физических параметров примесного атома в кремнии построены эмпирические уравнения для полного ряда 3d переходных элементов [4÷6].

При этом предполагалось, что такой подход прояснит физическое содержание процесса диффузии атомов. Необходимо выяснить основную роль известных физических параметров примесных атомов таких, как масса, порядковый номер, орбитальный радиус, валентность и электронная конфигурация внешних оболочек в определении их основных диффузионных параметров в кремнии.

Функциональный анализ экспериментальных данных позволял получить уравнение для определения коэффициента диффузии:

$$D_o = A_d Z^3 + B_d Z^2 + C_d Z + D_d, \quad (1)$$

и уравнение для определения энергии активации:

$$E = A_e Z^2 + B_e Z + C_e, \quad (2)$$

где Z - порядковый номер атома.

Выполнив расчет методом наименьших квадратов, определены истинные значения коэффициентов для уравнения (1):

$$A_d = 5,078E-04; B_d = -3,38E-02; C_d = 0,72; D_d = -4,89;$$

и также для уравнения (2):

$$A_e = 8,45E-02; B_e = -4,48; C_e = 59,94.$$

Также вычислены значения погрешности для расчета по уравнению (1): $\chi^2 = 2,79 \cdot 10^{-2}$ и по уравнению (2): $\chi^2 = 3,90E-02$. Указанные значения погрешности свидетельствуют о достаточно высокой точности использованного метода расчета.

Расчетные результаты приведены на графиках рис. 1. На рис. 1 наряду с графическими линиями зависимости основных диффузионных параметров – коэффициента диффузии D_o (Рис. 1а) и энергии активации E (Рис. 1б) атомов 3d переходных элементов в кремнии от их порядкового номера, также показаны экспериментальные точки для сопоставления.

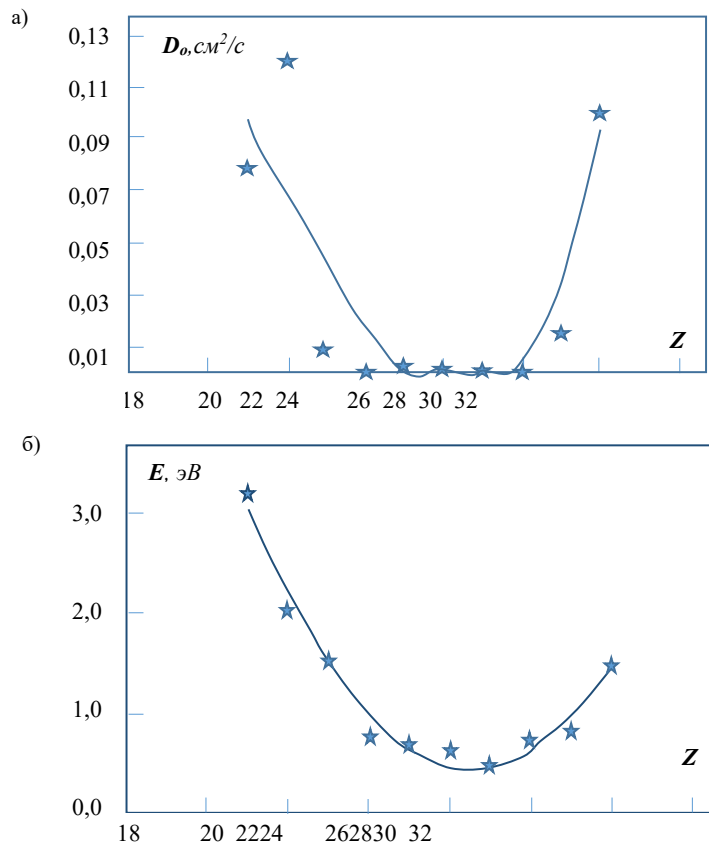


Рис. 1. Зависимости основных диффузионных параметров – коэффициента диффузии D_o (а) и энергии активации E (б) атомов 3d переходных элементов в кремнии от их порядкового номера: точки – эксперимент, линия – расчет.

Из графика видно, что значения $D_o(x)$ и $E(x)$ уменьшаются с ростом порядкового номера и массы атомов 3d переходных элементов (*Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co* и *Ni*) в кремнии. Некоторое отклонение от проявленной закономерности уменьшения $D_o(x)$ и $E(x)$ с ростом порядкового номера наблюдается для атомов *Cu* и *Zn*.

ФИЗИКА

Это означает, что в процессах диффузии порядковый номер и масса атомов не оказывают существенного влияния на параметры диффузии примесных атомов 3d-переходных элементов в кремнии. Обнаруженные отклонения от проявленной закономерности по уравнениям (1) и (2) наблюдаются для атомов *Cu* и *Zn*, и, по-видимому, связаны с отличающейся величиной их орбитального радиуса и валентностью.

С целью определения влияния значений орбитального радиуса примесных атомов 3d-переходных элементов на их диффузионные параметры в кремнии необходимо построить зависимость $D_o(x)$ и $E(x)$ в виде уравнений (3) и (4), где $x = r/M$; r – орбитальный радиус и M – масса атома[7].

$$D_o = A_d + B_d x + C_d/x, \quad (3)$$

$$E = A_e x^2 + B_e x + C_e. \quad (4)$$

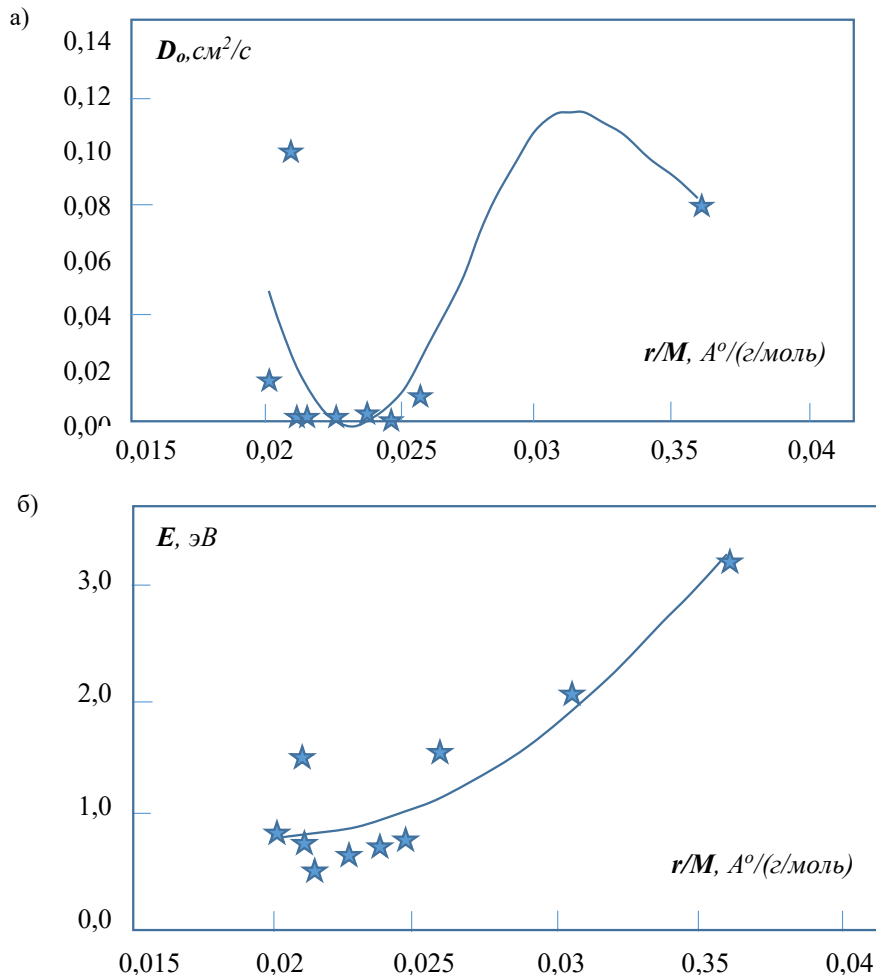


Рис. 2. Зависимости основных диффузионных параметров – коэффициента диффузии D_o (а) и энергии активации E (б) атомов 3d-переходных элементов в кремнии от $x = r/M$: точки – эксперимент, линия – расчет.

Используя метод наименьших квадратов, можно определить значения коэффициентов для уравнения (3):

$$A_d = -299350,96; B_d = 25186,65; C_d = -685,48; D_d = 6,08 (\chi^2 = 8,78E-03).$$

и для уравнения (4):

$$A_e = 9194,27; B_e = -361,65; C_e = 4,38; (\chi^2 = 9,69E-02).$$

Расчетные результаты зависимости основных диффузионных параметров – коэффициента диффузии D_o (а) и энергии активации E (б) атомов 3d-переходных элементов в кремнии от $x = r/M$ приведены в графическом виде на рис. 2.

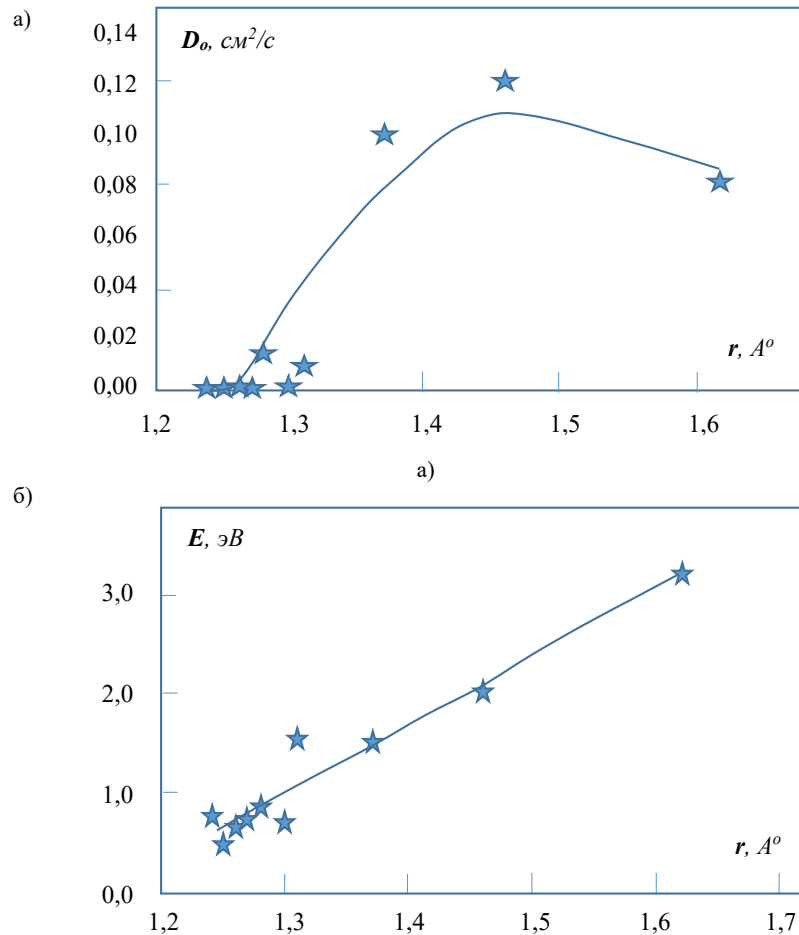


Рис. 3. Зависимости основных диффузионных параметров – коэффициента диффузии D_0 (а) и энергии активации E (б) атомов 3d переходных элементов в кремнии от атомного радиуса (r): точки – эксперимент, линия – расчет.

Исходя из графиков (рис. 2) можно отметить, что значение условно принятого параметра $x = r/M$ для атомов 3d переходных элементов в кремнии принимает значения от 0,37 до 0,02 $\text{A}^\circ/(\text{г/моль})$. При этом уравнение (4) достаточно удовлетворительно описывает экспериментальную зависимость $E(x)$. В то же время для зависимости $D_0(x)$ характерны наиболее высокие отклонения для атомов Cu и Zn .

Из графических данных на рис. 3 следует, что наблюдается непосредственное влияние значений радиусов атомов 3d переходных элементов на их основные диффузионные параметры – коэффициента диффузии D_0 (а) и энергии активации E (б) в кремнии.

Таблица 1.

Основные физико-химические показатели и диффузионные параметры атомов 3d переходных элементов в кремнии

	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
№	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Группа	<i>IIIa</i>	<i>IVa</i>	<i>Va</i>	<i>VIa</i>	<i>VIIa</i>	<i>VIIIa</i>	<i>VIIIa</i>	<i>VIIIa</i>	<i>Ib</i>	<i>IIb</i>
Валент-ность	3	4	5	6	7	8	8	8	1	2
Радиус атома r_a , A°	1,62	1,46	1,31	1,27	1,30	1,26	1,25	1,24	1,28	1,37
Ионный радиус r_p , A°	0,81 (+3)	0,68 (+4)	0,59 (+5)	0,52 (+6) 0,69 (+3)	0,80(+2) 0,66(+3)	0,76(+2) 0,64(+3)	0,74(+2)	0,72(+2)	0,96 (+1)	0,74 (+2)

ФИЗИКА

E_p , эВ		6,82	6,74	6,766	7,434	7,902	7,86	7,637	7,726																									
E , эВ	3,17	2,15	1,36	0,93	0,71	0,58	0,56	0,73	0,86																									
D_o , см ² /с		0,093	0,038	0,005	0,009	0,005	0,006	0,004	0,016	0,09																								
Элек-тронная формула	$3d^1 4s^2$	$3d^2 4s^2$	$3d^3 4s^2$	$3d^5 4s^1$	$3d^5 4s^2$	$3d^6 4s^2$	$3d^7 4s^2$	$3d^8 4s^2$	$3d^{10} 4s^1$	$3d^{10} 4s^1$																								
Кванто-вое число	2								0																									
Форма элек-тронной орбиты	Параметры для диффузии атомов Si, B u P в кремнии <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Si</th> <th>B</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>r_a, А°</td> <td>1,18</td> <td>0,97</td> <td>1,3</td> </tr> <tr> <td>r_p, А°</td> <td>0,41 (+4)</td> <td>0,2 (+3)</td> <td>0,34 (+5)</td> </tr> <tr> <td>E_p, эВ</td> <td>8,151</td> <td>8,298</td> <td>10,486</td> </tr> <tr> <td>E, эВ</td> <td>0,27</td> <td>3,43</td> <td>3,3</td> </tr> <tr> <td>D_o, см²/B×с</td> <td>0,0004</td> <td>0,9</td> <td>1,9</td> </tr> </tbody> </table>									Si	B	P	r_a , А°	1,18	0,97	1,3	r_p , А°	0,41 (+4)	0,2 (+3)	0,34 (+5)	E_p , эВ	8,151	8,298	10,486	E , эВ	0,27	3,43	3,3	D_o , см ² /B×с	0,0004	0,9	1,9		
	Si	B	P																															
r_a , А°	1,18	0,97	1,3																															
r_p , А°	0,41 (+4)	0,2 (+3)	0,34 (+5)																															
E_p , эВ	8,151	8,298	10,486																															
E , эВ	0,27	3,43	3,3																															
D_o , см ² /B×с	0,0004	0,9	1,9																															

Если обратить внимание на механизм диффузии указанных атомов в кремнии, надо учитывать, что традиционно атомы III и V групп элементов диффундируются по вакансионному механизму. Атомы II, VI, VII, VIII групп элементов диффундируют по междоузельному механизму.

Для выполнения анализа механизма диффузии атомов 3d переходных элементов приведем их физико-химические показатели и определенные основные диффузионные параметры в следующей таблице. В таблице 1 дополнительно приведены внутренняя таблица (традиционных легирующих элементов) для сравнения, формы электронных орбиталей, а также на 10-строке таблицы 1 электронная формула для внешней орбиты (а для внутренних оболочек этих элементов имеет место: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$).

Известно, что 3d переходные элементы металлов – это элементы с порядковым номером в таблице Д.И.Менделеева с 21 до 30: *Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn*. В отличие от других, им характерны переменная валентность и ковалентная связь.

Анализ физико-химических показателей атомов 3d переходных элементов в сравнении с традиционными элементами позволяет заключить нижеследующее:

- внешняя электронная оболочка состоит из двух 4s ва 3d подуровней;
- 3d подуровень с орбитальным числом 5 и квантовым числом 2 имеет электроны, вращающиеся по эллиптической орбите, представляющей собой электронное облако в форме взаимоперпендикулярно расположенных гантелей (12-строчка таблицы 1);
- 4s подуровень с орбитальным числом 1 и квантовым числом 0 имеет электронную орбиталь в форме сферы;
- 3d подуровень расположен выше 4s подуровня, валентность проявляет электроны 3d подуровня (10-строчка таблицы 1);
- валентность атомов для *Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni* проявляет электроны 3d подуровня, а для атомов *Cu, Zn* проявляет электроны 4s подуровня;
- атомы группы железа *Fe, Co, Ni*, расположенные в VIII группе элементов, имеют сходные свойства, их атомные радиусы близки атомному радиусу кремния по значению.

Когда речь идёт об атомном или ионном радиусе атома, надо учитывать, что с квантово-механической точки зрения электронная оболочка не имеет точного значения. Если представить атом в форме шара, то половина расстояния между двумя соседними ядрами принимается за атомный радиус.

С ростом порядкового номера атомов, периодически возрастает радиус атома. В пределах одного периода радиус уменьшается, в пределах группы атомов он возрастает.

Когда атом теряет один электрон, он превращается в положительный ион и при этом радиус уменьшается. Атом, привлёкший один электрон, превращается в отрицательный ион и при этом его радиус увеличивается.

Радиусы ионизованных атомов *Fe, Co, Ni* до 40 % уменьшаются, и при этом ускоряются диффузи-

онные процессы. Другими словами, диффузия атомов происходит быстрее на порядок, чем самодиффузия атомов кремния. При этом наблюдается междоузельная диффузия атомов.

Вытекающие из последних графиков отклонения основных диффузионных параметров (особенно коэффициента диффузии) атомов 3d переходных элементов в кремнии от вышепроявленных закономерностей можно связать с различием проявления их валентности. Если обратить внимание на электронную формулу атомов (10-строка таблицы 1), можно заметить, что для атомов *Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co* и *Ni* валентность проявляется за счет электронов 3d оболочки с орбитальным квантовым числом 2, а для атомов *Cu* и *Zn* за счет электронов 4s оболочки с орбитальным квантовым числом 0. Указанные электронные оболочки различаются как энергией, так и формой орбиты.

Таким образом, для определения более точных закономерностей зависимости основных диффузионных параметров примесных атомов 3d переходных элементов в кремнии от их физических показателей необходимо учитывать квантово-химическую природу взаимодействия между примесными и кремниевыми атомами.

Выполненное автором исследование процессов диффузии 3d элементов в кремнии, полученные в настоящей и [4, 7] работах, а также их сопоставление с результатами исследования диффузии примесей ряда групп элементов [6, 8-10] позволяли формировать важные научные заключения.

Во-первых, атомы малого периода 3d элементов одновременно расположены в (вертикальных) группах I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII периодической системы Д.И. Менделеева. В опубликованных работах [8, 6, 11, 12] разработаны полуэмпирические уравнения для определения основных диффузионных параметров атомов I, III –V групп элементов. Результаты расчета настоящей работы, выполненные при помощи уравнений (1) – (4), полученных для 3d элементов, близки значениям расчетных данных, полученных для основных диффузионных параметров соответствующих элементов при помощи уравнений для атомов I, III –V групп элементов [8, 6, 11, 12].

Во-вторых, уравнения для атомов I, III –V групп элементов позволяли определить оценочные диффузионные параметры атомов других нетрадиционных элементов периодической системы. Результаты такой оценки приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты расчета основных диффузионных параметров в кремнии атомов других нетрадиционных элементов (II, III, IV и V) периодической системы

Группа	Элемент	Z	$D_0, \text{см}^2/\text{В} \times \text{с}$	E, эВ
I	Rb	37	0,314	0,97
I	Cs	55	0,69	1,3
I	Fr	87	0,2	1,6
IV	Zr	40	1,47E+05	16,56
IV	Hf	72	-1,60E+06	115
IV	Pb	82	-3,51E+06	122
V	Nb	41	410	4,27
V	Ta	73	0,003	0,714
V	Db	105	2910	44,6
III	Cd	39	5,300	3,400
III	La	57	29,000	4,570
III	Ac	89	0,004	19,900

Предполагаем, что, используя приведенные в таблице 2 результаты расчета основных диффузионных параметров в кремнии различных нетрадиционных примесей, можно проектировать новые функциональные приборные структуры.

Аналогичная статистическая обработка результатов подобных экспериментальных или расчетных данных может также определить степень растворимости примесей [13]. Экспериментальное подтверждение в будущем приведенных в таблице 2 численных значений основных диффузионных параметров различных примесей в кремнии может служить инструментом выявления более точных механизмов их диффузии.

Литература

1. Люев В.К., Кармоков А.М. Коэффициент диффузии и энергии активации диффузии легирующих элементов в поверхностном слое монокристалла кремния // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. – № 5. Часть 2. – С. 262 – 265.
2. Матвеев А.В. Моделирование поверхностной сегрегации атомов в бинарных системах // *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2012. – Т. 14. – № 3. – С. 358 – 376.
3. Эрвье Ю.Ю. О накоплении примеси в адсорбционном слое в процессе легирования при молекулярно-лучевой эпитаксии // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2013. – № 2. – С. 4 – 10.
4. Зайнабидинов С., Носиров М., Алиева Ж. О коэффициентах диффузии 3d элементов в кремнии // *Узбекский физический журнал*, 2003. – №1. – С. 69 – 71.
5. Fisher D.J. Diffusion in Silicon: 10 years of research (1998) [Электронная ресурс] URL: <https://www.worldcat.org/title/diffusion-in-silicon-10-years-of-research/oclc/827009415> (Дата тоступа: 01.02.2019).
6. Алиева Ж.Р., Носиров М., Абдукаххорова М.А., Аббосова Н. О коэффициентах диффузии 3d элементов в кремнии // *Молодой ученый*, 2018. – №51 (237). – С. 1 – 3.
7. Алиева Ж.Р., Носиров М. Полуэмпирические диффузионные параметры атомов 3d переходных элементов в кремнии // *Инженерные решения: электронный научный журнал*, 2019 – №2(3). – С.4 – 7.
8. Alieva J., Parpieva O., Nosirov M. Kremniyda I guruh elementlari diffuziyasi // *ЎзМУ хабарлари*, 2013. – №2/1. – Б. 198 – 199.
9. Алиева Ж.Р. Метод наименьших квадратов на основе “MS Excell” для обработки экспериментальных данных // *Science and World*, 2016. – №2. – С. 43 – 47.
10. Алиева Ж. Математические модели диффузии примесей в полупроводнике и их роль в электронной технологии // *Илмий хабарнома – Научный вестник*, 2013. – №1. – С. 10 – 16.
11. Nosirov M., Alieva J., Pozilova S., Anorboev I. Kremniyda III guruh elementlari diffuziyasi // *Kondensatlangan muhitlar fizikasi va fizika o'qitishniq dolzarb muammolari. Konferensiya materiallari. Namangan*, 2015. – Б. 130 – 132.
12. Zaynobidinov S., Nosirov M., Alieva J. Kremniyda IV guruh elementlari diffuziyasi // *Физиканинг фундаментал ва амалий масалалари. Конференция материаллари. Тошкент, ФТИ АН РУз*, 2014. – Б. 52 – 53.
13. Рахимбаева М. Исследование закономерностей распределения примесей в кристаллах кремния методом математической статистики // *Дисс. на соиск. ... канд. физ.-мат. наук. УрГУ им. Аль-Хорезми, Ургенч*, 2002. – 140 с.

DIFFUSION PARAMETERS OF ATOMS 3d TRANSITIVE ELEMENTS IN SILICON

Zh. R. Alieva^a

Ilmiy xabarnoma. Fizika-matematika tadqiqotlari – Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2019. 1(42). 44–51.

^aAndijan State University, Andijan, 170100, str. University, 129 (Uzbekistan). E-mail: agsu_info@edu.uz

Key words: diffusion of atoms, silicon, transitive elements, energy of activation, diffusion factor.

Differential analysis of known experimental dependences of diffusion parameters from physical parameters of impurity atoms in silicon is made in this work and the semi empirical equations are developed for variety 3d transitive elements. It was supposed that such approach will provide revealing of the physical nature of process of diffusion of atoms. It was necessary to learn a dominating role of known physical parameters of impurity atoms such, as weight, serial number in the table of chemical elements, orbital radius, valence and an electronic configuration of external covers in their definition of the basic diffusion parameters in silicon. 4 new empirical equations and results of calculation in the form of 6 graphic dependences and 2 tables are presented.

Values $D_0(x)$ and $E(x)$ decrease with growth of serial number and weights primary (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co and Ni) atoms 3d transitive elements in silicon. Some deviation from the shown law is observed for atoms Cu and Zn.

The analysis of physical and chemical indicators of atoms 3d transitive elements in comparison with traditional elements allows to conclude that: the external electronic cover consists of two 4s va 3d subtotals; 3d the subtotal with orbital number 5 and quantum number 2 has electrons, rotating on the elliptic orbit representing an electronic cloud in shape mutually perpendicularly of located dumbbells; 4s the subtotal with orbital number 1 and quantum number 0 has electronic orbital in the form of sphere; 3d the subtotal is located highly 4s a subtotal, valence shows electrons 3d a subtotal; valence of atoms for Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni shows electrons 3d a subtotal, and for atoms Cu, Zn shows electrons 4s a subtotal; atoms of group of iron Fe, Co, Ni, located in VIII group of elements have similar properties, their atom radiuses are close to the atom radius of silicon on value.

3d elements in silicon, and also their comparison to the results of the research of diffusion of impurity of some groups of elements the important scientific conclusions allowed to form the research of processes of diffusion executed by the author. First, atoms of the small period 3d elements are simultaneously located in (vertical) groups I, II, III, IV, V, VI, VII,

VIII D.I.Mendeleeva's periodic system. In other works published by the author the semi empirical equations are developed for definition of the basic diffusion parameters of atoms I, III - V groups of elements. Results of calculation of the present work, executed by means of the equations (1) - (4), received for 3d elements, are close to values of the settlement data received for the cores diffusion parameters of corresponding elements by means of the equations for atoms I, III - V groups of elements. Secondly, the equations for atoms I, III - V groups of elements allowed to define estimated diffusion parameters of atoms of other nonconventional elements of periodic system.

References

1. Lyuev, V.K., Karmokov, A.M. (2016) Koeffitsient diffuzii legiruyushih elementov v poverhnosti monocrystalla kremniya [Factor of diffusion and energy of activation of of doping elements in a surface of a crystalline of silicon]. *Sovremennye vysokie tehnologii*. Issue 5. Part 2. pp. 262 – 265.
2. Matveev, A.V. (2012) Modelirovaniye poverhnostnoy segregatsii atomov v binarnykh systemakh [Modelling of a surface segregation of atoms in binary systems]. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granicy*. Vol. 14. Issue 3, pp. 358 – 376.
3. Ervye, Y.Y. (2013) O accumulatsii primesi v adsorbentnom sloe v processe legirovaniya moleculyarno-luchevoiy epitatsii [About impurity accumulation in adsorb a layer in process of doping at molecule beam epitaxy]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij*. Materials of electronic technics. Issue 2. pp. 4-10.
4. Zaynabidinov, S., Nosirov, M., Alieva, Zh.R. (2003) O koeffitsientah diffuzii 3d elementov v kremnii [On diffusion factors 3d elements in silicon]. *Uzbekskiy fizicheskij zhurnal*. Issue 1. pp. 69 – 71.
5. Fisher, D.J. (1998) *Diffusion in Silicon: 10 years of research*. [Online] URL: <https://www.worldcat.org/title/diffusion-in-silicon-10-years-of-research/oclc/827009415>. (Date of Access: 01.02.2019).
6. Alieva, Zh.R., Nosirov, M., Abdukahhorova, M.A., Abbosova, H. (2018) O diffuzionnykh parametrah atomov V gruppy elementov v kremnii [About diffusion parameters of atoms of V group of elements in silicon]. *Molodoy ucheniy*. Issue 51 (237). pp. 1 – 3.
7. Alieva, Zh.R., Nosirov, M. (2019) Poluempiricheskiye diffuzionniye prametry atomov 3d perehodnyhelementov v kremnii [Semiempiric diffusion parameters of 3d transient elements in silicon]. *Ingenernyye resheniya*. Issue 2 (3). C. 4 – 7.
8. Alieva, J., Parpieva, O., Nosirov, M. (2013) *Kremniyda I guruh elementlari diffuziyasi* [Diffusion of I group elements in Silicon]. *UzMU xabarlari*. Issue 2/1. pp. 198 – 199.
9. Alieva, Zh.R. (2016) Metod naimenshih kvadratov na osnove "MS Exell" dlya eksperimentalnih dannyh [A method of the least squares on a basis "MS Excell" for processing of experimental data]. *Science and World*. Issue 2. pp. 43 – 47.
10. Alieva, Zh. (2013) Matematicheskie modeli diffuzii primesey v poluprovodnikah i ih rol v elektronnoy tehnologii [Mathematical models of diffusion of impurity in the semiconductor and their role in electronic technology] *Ilmij xabarnoma – Nauchniy vestnik*. Issue 1. pp. 10 – 16.
11. Nosirov, M., Alieva, J., Pozilova, S., Anorboev, I. (2015) Kremniyda III guruh elementlari diffuziyasi [Diffusion of III group elements in Silicon]. In book: *Kondensatsionnaya muhitlar fizikasi va fizika uqitishning dolzarb muammolari*. [Actual problems of condensed environment physics and teaching physics]. Conference materials. Namangan. pp. 130 – 132.
12. Zaynabidinov, S., Nosirov, M., Alieva J. (2014) Kremniyda IV guruh elementlari diffuziyasi [Diffusion of IV group elements in Silicon]. In book: *Fizikaning fundamental va amaliy masalalari* [Fundamental and practical issues of physics]. Conference materials. Toshkent. pp. 52 – 53.
13. Rahimbaeva, M. (2002) *Issledovanie zakonomernostey raspredeleniya primesey v kristallah metodom matematicheskoy statistiki* [Research of laws of distribution of impurity in crystals of silicon a method of mathematical statistics]. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. (by the UrSU) named after Al-Horezmi, Urgench.

Сведения об авторе

Алиева Жамила Райимжоновна – старший преподаватель кафедры математики Андижанского государственного университета. E-mail: zhralieva@mail.ru

2019 йил 19 январда қабул қилинган