

ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИИ ЭЛЕМЕНТОВ III И V ГРУПП В ГЕРМАНИИ И КРЕМНИИ**Саидов Сафо Олимович,**кандидат химических наук, доцент кафедры «Физика»
Бухарскогогосударственного университета, Бухара, Узбекистан, тел.:
+99890-711-31-20, E-mail: safo.saidov.64@mail.ru.**Шарифова Мадина,**магистрант 1-курса Бухарского государственного
университета, Бухара, Узбекистан, тел.: +99890-412-83-
65, E-mail: madinasharifova075@gmail.com.

АННОТАЦИЯ Изучение особенностей диффузии примесей элементов III и V групп в германии и кремнии, а также влияние их на электрофизические свойства полупроводниковых материалов не теряет актуальность и на сегодняшний день. Данная статья является продолжением серии публикаций теоретических и экспериментальных аспектов диффузии элементов III и V групп периодической системы в германии и кремнии.

Ключевые слова: германий, кремний, теория примесных состояний, примесные уровни, валентная зона, запрещенная зона, зона проводимости, донор, акцептор, трехвалентные, пятиявалентные примеси, энергия ионизации, расчетные значения донорных уровней, энергетические уровни примесей, коэффициент диффузии...

ABSTRACT The study of features of diffusion of impurities of elements of groups III and V in germanium and silicon, as well as their influence on the electrophysical properties of semiconductor materials is still relevant today. This article is a continuation of a series of publications of theoretical and experimental aspects of diffusion of elements of groups III and V of the periodic system in germanium and silicon.

Keywords: germanium, silicon, theory of impurity states, impurity levels, valence band, forbidden band, conduction band, donor, acceptor, trivalent,

pentavalent impurities, ionisation energy, calculated values of donor levels, energy levels of impurities, diffusion coefficient,...

Невозможно представить бурное развитие многих областей техники и технологий (радиосвязь, телевидение, автоматизация, IT, компьютерные технологии, оборонная техника, космическая связь и др.) без достижений физики полупроводников. В вышеупомянутых областях применение полупроводников вызвало коренное преобразование. Совершенствование полупроводниковой технологии помогло решить задачу микроминиатюризации и интеграции электронной аппаратуры.

Целью наших исследований является изучение особенностей диффузии примесей элементов III и V групп в германии и кремнии, а также влияние их на электрофизические свойства полупроводниковых материалов. Этот проект представляет собой продолжение исследований, посвященных теоретическим и экспериментальным аспектам диффузии элементов III и V групп периодической системы в германии и кремнии [1-16].

Как известно, ключевой характеристикой полупроводников является их способность изменять свои свойства под влиянием различных внешних воздействий (например, изменения температуры и освещенности, приложения электрического или магнитного поля, внешнего давления и т. д.). Свойства полупроводников также сильно зависят от содержания примесей. Введение примесей изменяет не только величину проводимости, но и ее температурную зависимость [17,18]. С точки зрения элементарной теории примесных состояний, взаимодействие относительно слабо связанных донорных электронов (P, As, Sb и др.) с соответствующими положительными примесными ионами в твердом теле с диэлектрической проницаемостью ϵ и решение уравнения Шредингера для водородоподобной модели дает значение уровня E_n :

$$E_n = E_c - \frac{me^4}{8h^2 \epsilon^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{m^*}{m} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (1)$$

При расчете принято, что величина m^* скалярная, начало отсчета энергии соответствует $E_\infty = E_c = 0$, такой подход позволяет снять влияние решетки и учесть взаимодействие электрона со своим ионным остатком, а также учесть среду диэлектрической проницаемостью ϵ [18]. При $n = 1$, т.е. для основного состояния, $E_1 = E_d$ и $\Delta E_d = E_c - E_d = 13.5/\epsilon^2 \left(\frac{m^*}{m}\right)$ эВ. Отсюда можно сделать вывод, что все пентавалентные примеси должны иметь одинаковую энергию ионизации в полупроводнике типа Ge, Si и т.д. Аналогичную задачу можно решать и для трехвалентных акцепторных примесей в германии.

На сегодняшний день наиболее полные данные о коэффициентах диффузии различных примесей получены для германия и кремния. Первоначально диффузионные исследования были направлены на определение коэффициентов диффузии тех примесей, которые существенно изменяют электрические свойства этих полупроводников и приводят к возникновению p-n- переходов. В основном это элементы IIIA и VA подгрупп таблицы Менделеева, которые, как правило, образуют твердые растворы с германием и кремнием, создавая "мелкие" водородоподобные энергетические уровни в запрещенных зонах. Эти примеси относительно легко ионизируются и поэтому являются основными источниками носителей тока в широком диапазоне температур. В то же время электропроводность Ge и Si варьируется в большом диапазоне (на несколько порядков).

Кроме того, особое внимание было уделено изучению диффузии Li, Cu, Au, Ag, Zn, Ni и Fe. Эти элементы, за исключением лития, в принципе также образуют твердые растворы замещения с германием и кремнием, но при этом они генерируют ряд глубоко лежащих многозарядных акцепторных уровней в запрещенной зоне, соответствующих разнице между числом валентных электронов германия (кремния) и примесных атомов [17]. Такие "глубокие"

уровни служат уровнями захвата или рекомбинации носителей тока и играют важную роль в неравновесных процессах, сокращая время жизни неосновных носителей тока в полупроводниках и ускоряя рекомбинацию. Литий, вместе с германием и кремнием, образует твердый раствор внедрения и является донором с одним уровнем.

В табл. 1 приведены данные исследований температурных зависимостей коэффициента диффузии D для различных примесей в Ge, которые практически все удовлетворительно описываются формулой

$$D = D_0 \exp(-E/kT) \quad (2)$$

Из таблицы видно сильное различие в значениях коэффициентов диффузии D и параметров D_0 и E у элементов IIIA–VA групп.

Первая группа примесей имеет D на несколько порядков меньше («медленно» диффундирующие примеси), чем вторая группа («быстро» диффундирующие примеси); энергии активации диффузии E у первой группы больше, чем у второй; D_0 тоже больше в первой группе, чем во второй. Однако из таблицы видно, что существует большой разброс в значениях D_0 и E в самих группах. Здесь следует иметь в виду, что интервал надежного определения параметров диффузии, особенно для примесей первой группы, довольно узок из-за их малых глубин проникновения в кристалл. Поэтому к приведенным значениям D_0 , полученным экстраполяцией, следует относиться как к оцененным с точностью до порядка. Тем не менее полученные данные позволяют сделать вывод о различных механизмах диффузии для этих двух групп примесей.

Таблица 1. Диффузионные параметры различных примесей в Ge [19].

Примесь	Группа	D_0 , см ² /с	E , эВ	T , °C	D , см ² /с
B	III	$6.0 \cdot 10^8$	45	760-850	$4.4 \cdot 10^{-13}$
Al	III	$1.0 \cdot 10^3$	3.45	554-905	$6.2 \cdot 10^{-14}$

Ga	III	10	30	650-900	$8.1 \cdot 10^{-14}$
In	III	$1.8 \cdot 10^4$	3.64	554-919	$1.6 \cdot 10^{-13}$
Tl	III	$1.7 \cdot 10^3$	3.4	800-920	$1.8 \cdot 10^{-13}$
P	V	1.2	24	650-900	$6.4 \cdot 10^{-12}$
As	V	3	2.43	750-900	$1.2 \cdot 10^{-11}$
Sb	V	3.5	2.45	750-850	$1.1 \cdot 10^{-11}$
Bi	V	3.3	2.5	750-850	$6.0 \cdot 10^{-12}$

Аналогичная ситуация наблюдается и при исследовании диффузии различных примесей в Si [20, 21]. Так как примеси первой группы образуют с германием твердые растворы замещения, то можно полагать, что и диффузия в них носит вакансионный характер. В этом случае E можно отождествить с соответствующей энергетической характеристикой $E_a + E_v$ (суммарная энергия активации диффузии по вакансионному механизму $E = E_a + E_v$, а частота перескоков $f = Zv \exp(-E_a/kT) \exp(-E_v/kT)$ (3), вакансионный механизм является основным механизмом самодиффузии и диффузии примесей замещения, по такому механизму, например, происходит диффузия In в Ge и Si [19]).

Диффузию примесей второй группы можно трактовать как междоузельную. С этим полностью согласуются экспериментальные данные по Li. Он образует с германием твердый раствор внедрения и в кристаллической решетке является донором, создающим электронные уровни, расположенные на 0.01 эВ ниже дна зоны проводимости. Действительно, Li имеет наименьший по сравнению с другими элементами ионный радиус $r_{Li^+} = 0.68 \text{ \AA}$, поэтому ионизованный атом Li^+ может свободно перемещаться по междоузлиям решетки Ge. Относительно других «глубоких» примесей второй группы (Cu, Ni, Fe, Au и т. д.) вопрос о междоузельном механизме диффузии не столь очевиден. Эти примеси являются, как правило, акцепторами в Ge, а такой характер их электрической активности возможен только в том случае,

когда эти примеси расположены в узлах решетки. Предположение о их междоузельной диффузии может быть подтверждено лишь в том случае, если будет экспериментально доказано, что диффундируют они не в виде ионизованных акцепторов A^- , а в виде ионизованных доноров D^+ . Для этого необходимо определить зарядовое состояние диффундирующих примесных ионов.

Таблица 2. Диффузионные параметры различных элементов в кремнии

Элемент	D при 1473 К, м ² /с	D ₀ , м ² /с	E _a · 10 ⁻¹⁹ , Дж	Тип проводимости
B	2,8 · 10 ⁻¹⁶	(5-10,5) · 10 ⁻⁴	5.6-5.92	p
Al	1,5 · 10 ⁻¹⁵	(4,8-8,0) · 10 ⁻⁴	5,28	p
Ga	(2,5-4,1) · 10 ⁻¹⁶	3,6 · 10 ⁻⁴	5.6-6.56	p
In	8,3 · 10 ⁻¹⁷	16,0 · 10 ⁻⁴	6,24	p
P	2,8 · 10 ⁻¹⁶	10,5 · 10 ⁻⁴	5,92	n
As	2,7 · 10 ⁻¹⁷	0,32 · 10 ⁻⁴	5,76	n
Sb	2,2 · 10 ⁻¹⁷	5,6 · 10 ⁻⁴	6,24	n

В [22] исследовали экспериментальные результаты параметров диффузии периодических элементов группы V в кремнии и получили унифицированное полуэмпирическое уравнение, определяющее зависящие от порядка предэкспоненциальный множитель и энергию активации. Полученные уравнения позволяют предсказать и легко рассчитать параметры диффузии элементов группы V, которые экспериментально не определены.

Показано, что диффузия взаимодействующих ионов фосфора и бора в структурах SiC/Si [23] существенно зависит от времени диффузионного отжига, так как характер распределения образующихся комплексов с примесью $P^+ B^-$ сильно зависит от времени диффузионного отжига, положение p-n- переходов в структуре может быть изменено путем варьирования времени

отжига, комплексообразование с увеличением времени отжига усиливается, а связывание примесей в комплексы приводит к подавлению диффузии и уменьшению глубины проникновения примесей в объем структуры.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: элементы IIIA и VA подгрупп являются основными источниками носителей тока в широком диапазоне температур, электропроводность Si варьируется в большом диапазоне, имеющиеся в открытом доступе экспериментальные данные позволяют сделать вывод о различных механизмах диффузии для этих двух групп примесей, вакансионный механизм и диффузия примесей замещения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

амдамов Ж.Ж., С.О. Саидов, Насуллаев Б.С.Ў. Исследование [влияния различных видов излучений на электрофизические свойства кремниевых структур, легированных переходными элементами. Актуальные проблемы современной физики. Материалы международной научной и научно-технической конференции. Бухарский государственный университет. 25-26-н](#)

[видов Сафо Олимович, Камолов Жўрабек Жалол ўғли. Технология получения тонкослойных гетероструктур n-CdS/p-CeF₃ и исследование их электрических свойств. // Miasto Przyszosci. 2022. – V. 29.- P. 72-78. -Режим доступа: \[URL:\]\(#\)](#)

[Б](#)
.О. Саидов, К.С. Ежкова. РОЛЬ ФИЗИКИ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. «ЎЗБЕКИСТОНДА МИЛЛИЙ ТАДҚИҚОТЛАР: ДАВРИЙ АНЖУМАНЛАР».

[2](#)

[2](#)

[Г](#)

[0](#)

[с](#)

:

4. S.O. Saidov, I.B. Raupova. <https://philpapers.org/go.pl?id=SAITRO-8&proxyId=&u=https%3A%2F%2Fscholarzest.com%2Findex.php%2Fesj%2Farticle%2Fview%2F2143>.

.О. Саидов, З.И. Туксанова. ҲОЗИРГИ ЗАМОН ФИЗИКАСИНИ ОЛИЙ
Т

6. Saidov S.O., Badriddinov Islombek Mustahkam o`g`li. HIGHER EDUCATION
AND TEACHING MODERN PHYSICS IN IT.
<https://gejournal.net/index.php/IJSSIR/article/view/388/>.

7. Saidov S.O., Atoyeva M.F., Fayziyeva KH.A. et. all. The Elements Of
Organization Of The Educational Process On The Basis Of New Pedagogical
Technologies. <https://inlibrary.uz/index.php/tajas/article/view/10356>.

Камолов Журабек Жалол угли, Саидов Сафо Олимович. РАЗРАБОТКА
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА
МАГНЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛАСТИНКИ С КЕРМЕТНЫМ
ПОКРЫТИЕМ. <https://scientists.uz/uploads/202206/A-109.pdf>

Ю. Саидов, М. Шарофова. Положение и роль современной физики в
Ф

И

Ш

Н

И

Н

Г

о

Сафо Олимович Саидов, Мадина Шарифова. СОВРЕМЕННАЯ
ФИЗИКА В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ

В

И

М

В

Д

Ф

. Zaynobiddinov, Sh. Yo`lchiyev, D. Nazirov, M. Nosirov.

Yarimo`tkazgichlarda atomlar diffuziyasi. O`quv qo`llanma.

“O`zbekiston faylasuflari milliy jamiyati. Toshkent. 2012. 176 b.

.Т. Орешкин. Физика полупроводников и диэлектриков. Учебное пособие.

М.: Высшая школа. 1977. 448 с.

лучинская И. А. Основы материаловедения и технологии полупроводников.

Учебник. М.: 2002. 377 с.

ехнология СБИС. Под ред. С. Зи. М., Мир, 1986.

. И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. М., Наука, 1961.

диффузионных параметрах примесных атомов V группы элементов в

кремнии / Ж. Р. Алиева, М. А. Абдукаххарова, Н. Б. Аббосова, М. З.

Насиров. // Молодой ученый. — 2018. — № 51 (237). — С. 1-3. — URL:

льдебенева, К. Н. Диффузия взаимодействующих ионов фосфора и бора в

структуре SiC/Si: закономерности распределения примесей в зависимости

от времени отжига // Молодой ученый. — 2018. — № 4 (190). — С. 7-10. —