

СЕКЦИЯ 6. Полупроводниковая микро- и наноэлектроника в решении проблем информационных технологий и автоматизации

построения, модели и конструкции // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015, №2 (12).- с. 57-62.

5. Бахадирханов, Н.Ф.Зикриллаев, Х.М.Илиев “Yarim o'tkazgichlar fizikasi” ISBN: 978-9943-24-215-9 @ “Tafakkur” nashriyoti 2022 y. 480 bet.

6. Bakhadyrkhanov M.K., Piiev Kh.M., Mavlonov G.Kh., Ayupov K.S., Isamov S.B., Tachilin S.A. Silicon with Magnetic Nanoclusters of Manganese Atoms as a New Ferromagnetic Material. Technical Physics, 2019, Vol. 64, No. 3, pp. 385–388.

РАСЧЕТ ИОНОВ КЛАСТЕРОВ МАРГАНЦА В КРЕМНИИ

К.С. Аюпов, С.А. Валиев, Д.М. Мусаева, Б.Н. Хакимов

Ташкентский государственный технический университет

E-mail: siroj2@yandex.ru

Кинетика процесса образования ионных пар может быть охарактеризована временем релаксации. В работе [1] на основе общего рассмотрения процесса образования ионных пар были даны основы его кинетики. Ниже кратко остановимся на результатах этой работы. Процесс образования ионных пар в первом приближении можно представить себе как захват подвижных ионов донора неподвижными ловушками — ионами акцептора, которые создают вокруг себя сферическое силовое поле радиусом R , за пределами которого действие поля можно считать несущественным. Можно также считать, что если положительный ион попадает в пределы этой сферы, то он оказывается «захваченным» ловушкой. Вероятность захвата пропорциональна произведению объемных концентраций, или плотностей, доноров и акцепторов, которые предполагаются одинаковыми.

Если эти концентрации обозначить через n , то скорость процесса можно охарактеризовать следующим выражением:

$$-dn/dt = Kn^2 \text{ где } K \text{ — константа, } t \text{ — время.}$$

Этот закон должен быть справедливым, если средний свободный путь подвижного положительного иона велик по сравнению с расстоянием между ионами и если возможность захвата его ловушкой — акцептором — при первом столкновении мала. Однако в нашем случае не только средний свободный путь положительного иона намного меньше, чем расстояния между ионами, но и вероятность его захвата при первом столкновении очень велика. Следовательно, положительный ион должен диффундировать или совершать беспорядочные перескоки, а при столкновении с акцептором — захватываться и образовывать ионную пару.

СЕКЦИЯ 6. Полупроводниковая микро- и наноэлектроника в решении проблем информационных технологий и автоматизации

В качестве основных предпосылок сохраняются представления о сферах объемом $1/N$ в системе, содержащей N доноров. Однако уравнение движения этих доноров записывается с учетом того фактора, что диффузия происходит в поле точечного источника заряда, которым является ион акцептора.

Для зависимости проводимости от времени изотермической выдержки в процессе образования ионных пар можно записать:

$$\sigma = \sigma_{(\infty)} - \varphi \exp(-t/\tau),$$

где σ — электропроводность в момент времени t , $\sigma_{(\infty)}$ — электропроводность после достижения равновесия, τ — время релаксации, φ — константа, зависящая, между прочим, от первоначального состояния системы.

Процесс образования ионных пар сопровождается уменьшением числа заряженных рассеивающих центров; этими центрами являются отдельные ионы легирующих элементов, поскольку образующиеся ионные пары электронейтральны. Поэтому добавка доноров к образцу полупроводника типа германия или кремния, легированному акцептором, должна приводить к повышению, а не к понижению подвижности носителей заряда. В связи с этим измерение подвижности может служить хорошим методом контроля за процессом образования ионных пар. В работе [2,3] предложили метод определения температуры, при которой процесс образования ионных пар прошел на 50%. Для этой цели они предлагают исследовать температурную зависимость подвижности в двух образцах, из которых один легирован только акцептором с концентрацией N_a , а второй помимо атомов акцептора N_a содержит такое же количество атомов донора (т. е. $N_d - N_a$).

Метод основывается на том, что при одинаковом числе заряженных рассеивающих центров подвижность носителей заряда должна быть одинаковой. Во втором образце происходит образование ионных пар, в результате чего число рассеивающих ионов при каждой температуре будет различным. В общем виде число рассеивающих центров во втором образце, очевидно, определится выражением

$$N^* = N_a + N_d - 2P,$$

так как при образовании каждой пары из твердого раствора уходят два иона.

При исследовании температурной зависимости подвижности последняя должна более интенсивно понижаться при повышении температуры второго образца. Температура, при которой произойдет пересечение этих зависимостей, и будет соответствовать равенству числа

СЕКЦИЯ 6. Полупроводниковая микро- и наноэлектроника в решении проблем информационных технологий и автоматизации

рассеивающих центров в обоих образцах. Таким образом, исследование подвижности в образцах полупроводника, легированных одним, и двумя легирующими элементами, позволяет следить за процессом образования ионных пар и определять степень развития этого процесса при различных температурах.

Следует также упомянуть о том, что образование ионных пар должно сопровождаться изменением энергии донорных и акцепторных уровней.

Близость отрицательного заряда акцептора должна способствовать увеличению трудности возвращения электрона на донорный уровень; и, наоборот, удаление электрона с акцепторного уровня будет затруднено в присутствии положительно заряженного иона донора.

В связи с этим процесс образования ионных пар должен способствовать повышению энергии донорных и акцепторных уровней. Расчет произведенный, показал, что для помещения электрона на донорный уровень, связанный с ионной парой, необходимо затратить около 0,5 эв.

В работе [4] было показано, что коэффициент диффузии подвижного донора в полупроводниках зависит от концентрации в процессе образования ионных пар с неподвижным акцептором, располагающимся в узлах решетки. Кратко остановимся на рассмотрении этой зависимости.

На основании всего изложенного можно заключить, что путем легирования полупроводника возможно изменять его электрофизические свойства в широком диапазоне в соответствии с предъявляемыми требованиями. В частности, у кремния путем легирования можно изменить электросопротивление соответственно в миллион и в миллиард раз. Характер зависимости электрических свойств легированного материала подчиняется вполне определенным закономерностям, связанным с процессами растворимости, ионизации и взаимодействия между легирующими элементами. Это необходимо учитывать при постановке экспериментальных работ и анализе опытных данных.

Анализ полученных спектров ЭПР исследованных в образцах с примесными атомами марганца в кремнии показало, что в таких материалах марганец может находиться в различных состояниях (Mn^0) (Mn^+) (Mn^{++}) (Mn^+-Mn^+) (Mn^+)₄ и других состояниях [5]. Например спектр состояния марганца и бора в кремнии показала, что изолированный атом марганца имеет спектр на рис. 1 а нейтральный атом Mn^0 имеет спектр как на рис 2 а кластеры марганца имеют спектр как на рис.3

Для того чтобы выяснить насколько сильно взаимосвязь между этими комплексами а также еще раз удостоверится насколько стабильны

СЕКЦИЯ 6. Полупроводниковая микро- и наноэлектроника в решении проблем информационных технологий и автоматизации

эти комплексы, нам было сделана приближённый расчет энергию взаимодействия этих комплексов.

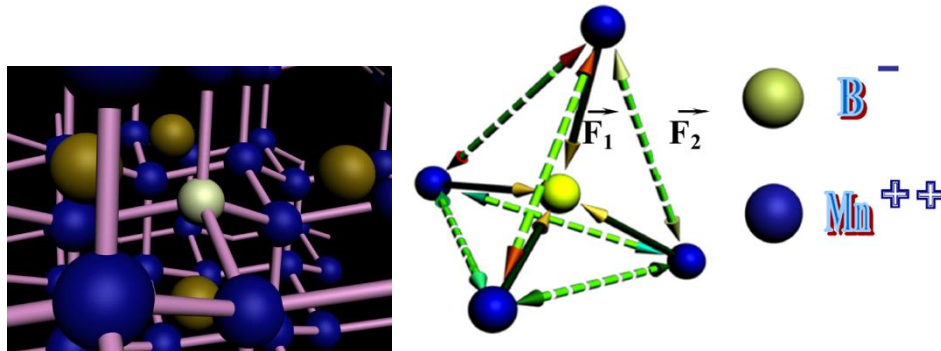


Рисунок Структура Mn_4B в решетке кремния.

Например для определения энергии взаимодействия отрицательно заряженного иона бора $Z(B^-)_1$ с расположенным рядом двукратно положительно заряженным ионом марганца $Z(Mn^{++})_2$ как нам известно $E=F_1/e$ расстояния между ионами и применяя соответствующие уравнения вычисляем F_1 . Для определения силы взаимодействия отрицательно заряженного иона бора Z_1 с расположенным рядом двукратно положительно заряженным ионом марганца Z_2 как нам известно расстояния между ионами $r_1=2,45\text{\AA}$, и применяя соответствующие уравнения вычисляем F_1

$$F_1 = k \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r_1^2}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ кл} \quad k = 9 \cdot 10^{18} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}^2,$$

$$r_1 = 2,45 \text{\AA} = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ см}, \quad Z_1 = (+2)q, \quad Z_2 = (-1)q,$$

$$F_1 = k \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r_1^2} = 9 \cdot 10^{18} \cdot \frac{(+2) \cdot (-1) \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(2,45 \cdot 10^{-8})^2} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}$$

$$F_1 = 9 \cdot 10^{18} \cdot \frac{(+2) \cdot (-1) \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(2,45 \cdot 10^{-8})^2} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}$$

$$F_1 = 9 \cdot 10^{18} \cdot \frac{(-2) \cdot 2,56 \cdot 10^{-38}}{6,0025 \cdot 10^{-16}} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}$$

$$F_1 = -9 \cdot 10^{18} \cdot \frac{5,12 \cdot 10^{-38}}{6,0025 \cdot 10^{-16}} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}$$

**СЕКЦИЯ 6. Полупроводниковая микро- и наноэлектроника в
решении проблем информационных технологий и автоматизации**

$$F_1 = -7,55 \cdot 10^{18} \cdot \frac{5,12 \cdot 10^{-38}}{6,0025 \cdot 10^{-16}} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}$$

$$F_1 = -7,55 \cdot 10^{18} \cdot 10^{-22} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}$$

$$F_1 = -7,55 \cdot 10^{-4} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}$$

$$F_1 = -7,55 \cdot 10^{-4} \text{ дин}$$

$$E_1 = F_1 / e = \frac{-7,55 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,72 \cdot 10^{15} \text{ дин/кл}$$

Также будем определять энергии взаимодействия отрицательно заряженного двукратно положительно заряженным ионом марганца $Z(\text{Mn}^{++})_2$ с расположенным рядом таким же ионом марганца $Z(\text{Mn}^{++})_3$ определяем по формуле $E = F_1 / e$ силу взаимодействия двукратно положительно заряженных ионов марганца $Z(\text{Mn}^{++})_2$ с расположенным рядом таким же ионом марганца $Z(\text{Mn}^{++})_3$ как нам известно расстояние между ионами $r_2 = 5,4 \text{ \AA}$, и применяя соответствующие уравнения вычисляем F_2

$$F_2 = k \frac{Z_3 \cdot Z_4}{r_2^2}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ кл} \quad k = 9 \cdot 10^{18} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{кл}^2, \quad r_2 = 5,4 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см},$$

$$Z_3 = (+2)q, \quad Z_4 = (+2)q$$

$$F_2 = k \frac{Z_3 \cdot Z_4}{r_2^2}$$

$$F_2 = k \frac{Z_3 \cdot Z_4}{r_2^2} = 9 \cdot 10^{18} \cdot \frac{(+2) \cdot (+2) \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(5,4 \cdot 10^{-8})^2} \text{ дин/кл}$$

$$F_2 = 9 \cdot 10^{18} \cdot \frac{(+4) \cdot (1,6 \cdot 10^{-38})}{(29,16 \cdot 10^{-16})} \text{ дин/кл}$$

$$F_2 = 36 \cdot 10^{18} \cdot \frac{(2,56 \cdot 10^{-38})}{(29,16 \cdot 10^{-16})} \text{ дин/кл}$$

$$F_2 = 3,16 \cdot 10^{34} \cdot 10^{-38} \text{ дин/кл}$$

$$F_2 = 3,16 \cdot 10^{-4} \text{ дин}$$

СЕКЦИЯ 6. Полупроводниковая микро- и наноэлектроника в решении проблем информационных технологий и автоматизации

$$E_2 = F_2/e = \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,97 \cdot 10^{15} \text{дин/кл}$$

Таким образом приближенный расчет энергии взаимодействия иона бора на двухкратно положительно заряженный ион марганца показывает, что если допустим, что атомы кремния на ионы бора и марганца действуют равнозначно тогда мы можем сравнивать силу отталкивания двух заряженных ионов марганца E_2 с энергией связи иона бора и положительно заряженного иона марганца E_1 , как видим из выше изложенного расчета E_1 энергия связи кластеров с бором намного превосходит силу E_2 отталкивания между ионами атомов марганца $E_1 > E_2$ таким образом можно утверждать вокруг бора в ближлежащем междоузлии в тетраэдрадрической решетке находится кластеры марганца в более стабильном состоянии, чем другие состояния.

Использованная литература

1. Бахадырханов М.К., Болтакс Б.И., Куликов Г.С. Диффузия, электроперенос и растворимость примеси марганца в кремнии // Физика твердого тела.– Санкт–Петербург, 1972. –Т. 14.– С. 1671-1676.
2. Бахадирханов М.К., Аскарлов Ш.И., Норкулов Н., Сражов С.Н., Тошбоев Т.У. «Исследование влияния ТЗД на кинетику генерации термодоноров в кремнии 450 °С». Письма ЖТФ, РАН, 1996, В. 24, С. 23-25.
3. Аюпов К.С., Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Илиев Х.М. Физические явления в кремнии в крайне неравновесном состоянии. Монография, Т.: ФАН. 2008. – 341 с.
4. М.К.Бахадырханов, Н.Ф.Зикриллаев, К.С.Аюпов, Д.Т.Бобонов Г.Хайдаров, С.Валиев. Фотопроводимость кремния с наноразмерными кластерными структурами Труды материалов Российской конференции «ПДММ- 2007» Владивосток.
5. М.К.Бахадырханов, Х.М.Илиев, Г.Мавланов, О.Э.Саттаров, К.С.Аюпов. Управление концентрацией и зарядовыми состояниями наноразмерных кластеров атомов марганца в решетке кремния. Труды материалов Четвертой Российской конференции с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе. «Кремний 2007» Москва.