

УДК 538.911538.971

ОБРАЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ ФОСФОРА И БОРА В КРЕМНИИ

© 2022 г. М. К. Бахадырханов¹, З. Т. Кенжаев^{2, *}, С. В. Ковешников¹,
А. А. Усмонов¹, Г. Х. Мавлонов¹

¹Ташкентский государственный технический университет, ул. Университетская, 2, Ташкент, 100095 Узбекистан

²Каракалпакский государственный университет, ул. Ч. Абдирова, 1, Нукус, 230112 Узбекистан

*e-mail: zoir1991@bk.ru

Поступила в редакцию 10.07.2021 г.

После доработки 11.10.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Исследовано влияние высокой концентрации фосфора на диффузию примесных атомов бора в кремнии и, наоборот, бора на диффузию фосфора в решетке кремния. Установлено, что в кремнии, предварительно легированном фосфором с высокой концентрацией, при диффузии бора происходит существенное увеличение концентрации электроактивного бора. Также показано, что в образцах кремния, предварительно легированных бором с высокой концентрацией, при диффузии фосфора происходит перераспределение атомов бора. Полученные результаты могут быть связаны с электростатическим взаимодействием ионов бора и фосфора при диффузии, в результате которого изменяется концентрационное распределение примесей, а также образуются квазинейтральные комплексы типа $[P^+B^-]$ в решетке кремния. На основе полученных данных рассчитаны концентрация ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) нейтральных комплексов $[P^+B^-]$ и их энергия образования ($\sim 0.59 \text{ эВ}$). Показано, что при образовании комплексов возрастает подвижность носителей заряда.

Ключевые слова: фосфор, бор, диффузия, подвижность, квазинейтральные комплексы

DOI: 10.31857/S0002337X22010031

ВВЕДЕНИЕ

Исследование образования комплексов примесных атомов в решетке полупроводников, особенно в кремнии, представляет большой научный и практический интерес с точки зрения создания новых полупроводниковых материалов с уникальными электрическими, фотоэлектрическими параметрами и функциональными возможностями [1–4].

Влияние образования комплексов примесных атомов на электрические и другие параметры полупроводника (кремния) будет велик только при больших концентрациях взаимодействующих примесных атомов. В этом плане представляет интерес исследование взаимодействия примесных атомов III и V групп в кремнии [4–6]. Это связано с достаточно высокой растворимостью ($N \geq 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$) этих примесей, образованием преимущественно растворов замещения, что и позволяют получать слои, высоко обогащенные этими примесями [7–9].

Целью данной работы являлось исследование влияния высокой концентрации фосфора на диффузию в кремнии примесных атомов бора и,

наоборот, бора на диффузию фосфора в решетке кремния. На основе полученных данных можно установить закономерности взаимодействия этих примесных атомов между собой и природу образующихся комплексов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний КЭФ-4.5 ($N_p \sim 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) с содержанием кислорода $N_{O_2} \approx (5-6) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и плотностью дислокаций $N_d \sim 10^3 \text{ см}^{-2}$. Размер образцов составлял $0.38 \times 5 \times 10 \text{ мм}$.

Диффузия фосфора проводилась из нанесенного слоя фосфорнокислого аммония при $t = 1200^\circ\text{C}$ в течение 2 ч на воздухе.

Диффузия бора проводилась также при $t = 1200^\circ\text{C}$ в течение 2 ч на воздухе с использованием в качестве источника пластинки нитрида бора, расположенной горизонтально над образцом на расстоянии 0.38 мм. Такой выбор условий диффузии определялся требованием получения максимальной концентрации бора [10–12].

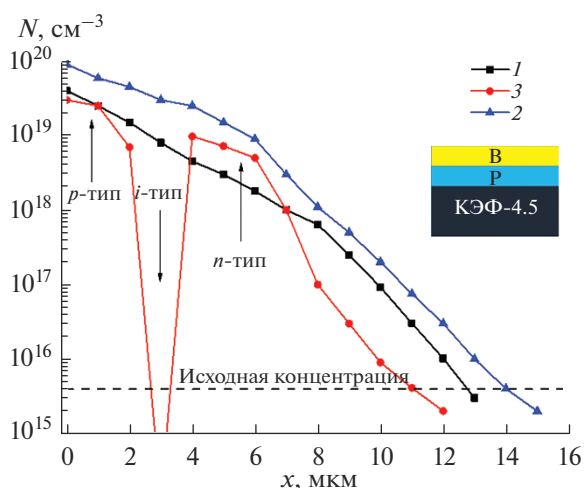


Рис. 1. Концентрационное распределение дырок (бора) в образцах I группы (1), электронов (фосфора) в образцах II группы (2), носителей заряда в образцах III группы (3).

После диффузии с поверхности снималось фосфоросиликатное и боросиликатное стекло с помощью травления в 20%-ной HF.

Концентрационное распределение примесей изучалось методом послойного шлифования с измерением поверхностного сопротивления методом Ван-дер-Пау. При этом предполагалось, что все введенные примесные атомы фосфора и бора находятся в электроактивном состоянии, т.е. концентрация электронов — это концентрация фосфора, а концентрация дырок — концентрация бора. При расчете концентрации фосфора и бора (электронов и дырок) учитывалась зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примесных атомов [13]. Тип проводимости определялся методом термозонда.

После диффузии бора при $t = 1200^\circ\text{C}$ в течение 2 ч его поверхностная концентрация достигала $4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а на глубине $x = 13 \text{ мкм}$ — $\sim 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Эти данные подтверждают результаты работ [10–12].

После диффузии фосфора при $t = 1200^\circ\text{C}$ в течение 2 ч его концентрация на поверхности образцов составляет $N_p = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а на глубине $x = 10 \text{ мкм}$ она уменьшается до $\sim 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Это полностью соответствует данным [14–16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Влияние высокой концентрации фосфора на концентрационное распределение бора при диффузии. Для исследования были изготовлены 3 группы образцов: образцы I группы легировались только бором (контроль профиля бора). Образцы II группы

легировались только фосфором, а затем подвергались термоотжигу в условиях диффузии бора (контроль профиля фосфора). Образцы III группы легировались сначала фосфором, а затем бором.

Как видно из рис. 1, в результате второй термообработки поверхностная концентрация фосфора незначительно уменьшается (до $9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, при этом концентрация электронов (фосфора) достигает $n = 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ на глубине $x = 14 \text{ мкм}$). Концентрация атомов фосфора в образцах II группы (кривая 2) в исследуемой области существенно больше, чем концентрация бора в образцах I группы (кривая 1). Поэтому можно ожидать, что в образцах III группы во всей исследуемой области будет наблюдаться n-тип проводимости. Однако, как показали результаты эксперимента, в образцах III группы, легированных фосфором, а затем бором, наблюдается иная картина (кривая 3). В этих образцах до $x = 3 \text{ мкм}$ наблюдается p-тип проводимости с достаточно высокой концентрацией дырок (бора) $p = 3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В области $x > 3 \text{ мкм}$ наблюдается n-тип. Следует отметить, что в области $x = 7–11 \text{ мкм}$ концентрация электронов (фосфора) в этих образцах становится существенно меньше, чем в образцах II группы.

Также следует отметить, что в этих образцах (кривая 3) концентрация фосфора $n = 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ достигается на глубине почти на 3 мкм меньше, чем в образцах II группы.

По полученным результатам была вычислена концентрация бора по глубине образца (при наличии фосфора) на основе решения уравнения нейтральности:

1) в области $x = 0–3 \text{ мкм}$ концентрация бора вычислялась как $N_B = n_0 + p$, где n_0 — концентрация электронов в образцах, легированных фосфором и отожженных дополнительно (рис. 1, кривая 2), p — концентрация дырок в образцах, легированных бором при наличии фосфора (рис. 1, кривая 3);

2) в области $x > 3 \text{ мкм}$ концентрация бора вычислялась как $N_B = n_0 - n_1$, где n_1 — концентрация электронов (фосфора) в образцах, легированных бором при наличии фосфора (рис. 1, кривая 3).

На рис. 2 представлены концентрационное распределение атомов бора после диффузии (в отсутствие фосфора), а также вычисленное на основе эксперимента концентрационное распределение атомов бора в образцах, предварительно легированных фосфором. Можно утверждать, что наличие достаточно высокой концентрации фосфора в кремнии стимулирует повышение концентрации бора в области до 8 мкм при диффузии.

Влияние бора на концентрационное распределение фосфора при диффузии. Для исследования также использовались 3 группы образцов: образцы

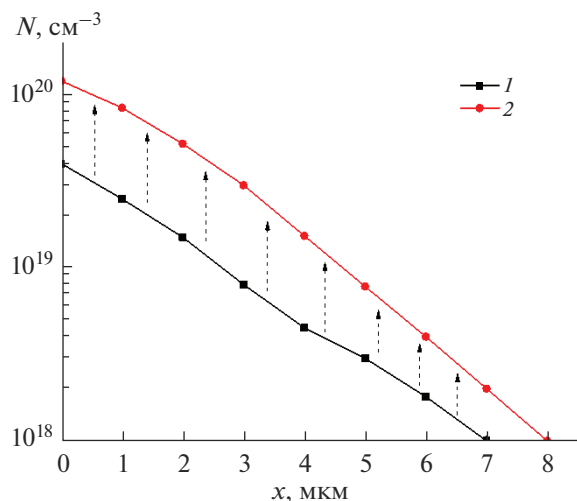


Рис. 2. Концентрационное распределение дырок (бора) при отсутствии фосфора (1) и расчетное концентрационное распределение дырок при наличии фосфора (2).

I группы легировались только фосфором (контроль профиля фосфора). Образцы II группы после диффузии бора отжигались в условиях, соответствующих диффузии фосфора (контроль профиля бора). Образцы III группы легировались сначала бором, а затем фосфором.

Как видно из рис. 3, в результате повторного термоотжига поверхностная концентрация бора незначительно уменьшается (от 4×10^{19} до 2.3×10^{19} см^{-3}). При этом глубина проникновения бора (до $p = 4 \times 10^{15}$ см^{-3}) возрастает до $x = 15$ мкм, т.е. повторный отжиг увеличивает глубину диффузии бора от 13 до 15 мкм. Сравнение кривых 1 и 2 позволяет предположить, что при диффузии фосфора в образцах, предварительно легированных бором, до $x = 6$ мкм материал должен иметь *n*-тип проводимости, а поверхностная концентрация электронов (фосфора) должна уменьшиться с 1.7×10^{20} до 1.47×10^{20} см^{-3} (около 10%), при этом в области $x > 6$ мкм образцы должны иметь *p*-тип проводимости.

Однако результаты эксперимента (кривая 3) выявили иную картину. Во-первых, наблюдается уменьшение поверхностной концентрации фосфора с 1.7×10^{20} до 5.3×10^{19} см^{-3} , т.е. в 3.2 раза, но не на 10%. Во-вторых, в области $x = 6-10$ мкм концентрации электронов (фосфора) в образцах I и III групп практически совпадают.

Это означает, что концентрация дырок (бора) в области $x = 6-10$ мкм в образцах III группы существенно уменьшается по сравнению с контрольными (II группа).

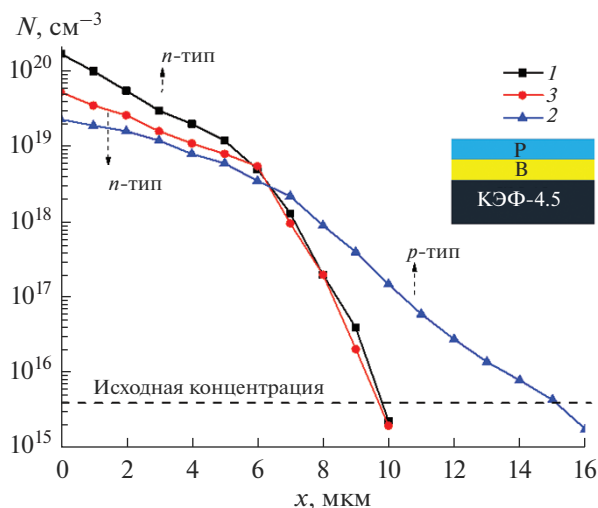


Рис. 3. Концентрационное распределение электронов (фосфора) в образцах I группы (1), дырок (бора) в образцах II группы (2), носителей заряда в образцах III группы (3).

По результатам рис. 3 была вычислена концентрация электронов (фосфора) по глубине в образцах III группы на основе решения уравнения нейтральности:

в области $x = 0-6$ мкм $N_B = n_0 - n_1$, где n_0 — концентрация электронов в образцах, легированных фосфором (рис. 3, кривая 1), n_1 — концентрация электронов в образцах, легированных фосфором при наличии бора (рис. 3, кривая 3).

На рис. 4 представлено концентрационное распределение атомов фосфора после диффузии в отсутствие бора (кривая 1), а также расчетное концентрационное распределение атомов фосфора (кривая 2) для III группы образцов. Можно утверждать, что наличие достаточно высокой концентрации атомов бора в кремнии приводит к существенному уменьшению концентрации фосфора (или увеличению концентрации атомов бора) на поверхности. Это может быть связано с достаточно сильным электростатическим взаимодействием потоков диффундирующих ионов противоположного знака, что и приводит к уменьшению электроактивной концентрации фосфора (или увеличению электроактивной концентрации бора) при наличии бора (или фосфора).

Уменьшение концентрации дырок (бора) в области $x = 10-15$ мкм (рис. 3, кривая 3) также может быть связано с вытягиванием атомов бора на поверхность электростатическим взаимодействием с ионами фосфора, находящимися на поверхности в высокой концентрации.

Для подтверждения изменения концентрации ионов примеси при наличии ионов примеси про-

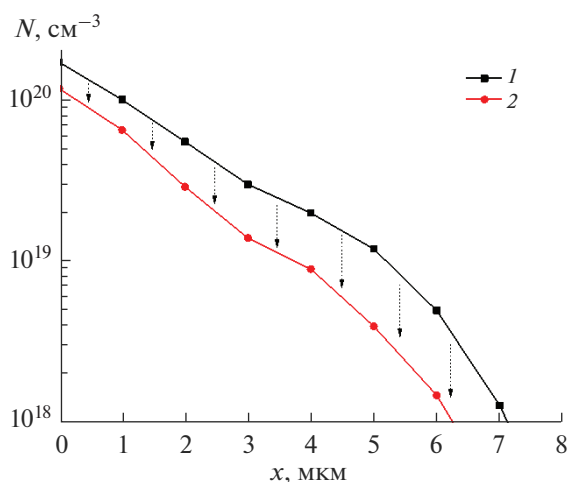


Рис. 4. Экспериментальное концентрационное распределение электронов (фосфора) при отсутствии атомов бора (1) и расчетное концентрационное распределение электронов в образцах, предварительно легированных бором (2).

тивоположного знака проводились дополнительные эксперименты.

1. Была проведена диффузия бора и фосфора в кремнии аналогично вышеприведенным экспериментам, но с большими временами диффузии: 4 и 10 ч. Полученные данные также подтверждают эффект изменения концентрации примесей.

2. Была проведена диффузия бора и фосфора в кремнии аналогично вышеприведенным экспериментам, но при пониженной температуре: $t = 1100^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ и 4 ч. Получены аналогичные результаты — увеличение концентрации бора при наличии фосфора. Следует отметить, что увеличение концентрации было менее выражено.

3. Была проведена диффузия бора в кремний при $t = 1200^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ ч, но с поверхностной концентрацией фосфора $N_p \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, т.е. значительно меньшей, чем растворимость бора при данной температуре. Такие образцы были получены шлифовкой поверхностного слоя образца, легированного фосфором до предельной концентрации при $t = 1200^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ ч. В этом случае повышение растворимости атомов бора не обнаружено.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные результаты невозможно объяснить только взаимной компенсацией электронов (фосфор) и дырок (бор) примесных атомов. Следовательно, в приповерхностной области происходят другие процессы, изменяющие концентрацию примесей и приводящие к увеличению концентрации электроактивного бо-

ра или уменьшению концентрации электроактивного фосфора.

1). Выталкивание ионов фосфора в объем кристалла диффундирующими ионами бора за счет сжатия решетки кремния (радиус иона бора меньше радиуса атомов кремния) приводит к уменьшению концентрации фосфора вблизи области с высокой концентрацией бора [12, 17].

2). Кулоновское притяжение ионами фосфора ионов бора (и наоборот), что приводит к уменьшению глубины проникновения обеих примесей и выравниванию их коэффициентов диффузии. Кроме того, этот эффект приводит к увеличению их концентрации, уменьшению среднего расстояния между примесными ионами разных знаков и, следовательно, росту вероятности образования комплексов типа $[\text{P}^+\text{B}^-]$.

3). Образование нейтральных комплексов бор–фосфор в узлах решетки кремния в процессе диффузии — приводит к заметному уменьшению коэффициента диффузии обеих примесей за счет образования неподвижных пар бор–фосфор [18–22], а также уменьшению концентрации центров, рассеивающих носители заряда, и росту подвижности носителей заряда.

Экспериментальные результаты дают возможность утверждать, что наличие значительной концентрации фосфора в кремнии приводит к повышению концентрации электроактивной части бора. Поэтому можно предполагать, что это явление связано с взаимодействием потоков ионов фосфора и бора в процессе диффузии.

Фосфор в решетке кремния находится в узлах кристаллической решетки в виде положительно заряженного иона P^+ , создавая дополнительные электроны в зоне проводимости ($N_{p^+} = n$). Положительно заряженные ионы фосфора (P^+) создают электрические потенциалы, распределенные от поверхности кристалла в глубину образца. Тем самым образуется электрическое поле, изменяющее чисто диффузионное движение бора в виде отрицательных ионов B^- . При этом концентрации бора и фосфора стремятся выровняться. Рост концентрации примесей сильно увеличивает вероятность образования донорно-акцепторных комплексов, т.е. квазимолекул типа $[\text{P}^+\text{B}^-]$. Такие комплексы могут существовать, только если атомы фосфора и бора находятся рядом, т.е. занимают два соседних узла в решетке кремния.

В отличие от других видов комплексов образование $[\text{P}^+\text{B}^-]$ приводит систему к более выгодному термодинамическому состоянию, чем в случае, когда атомы этих примесей удалены друг от друга, т. к.:

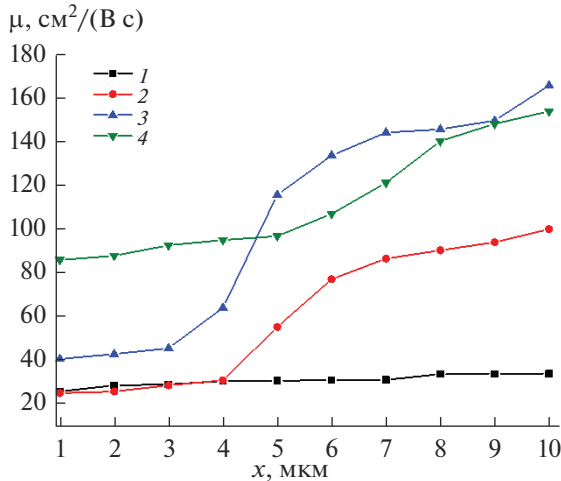


Рис. 5. Изменение подвижности электронов и дырок по глубине образцов кремния, легированных только бором (1), только фосфором (2), фосфором, а затем бором (3), легированных бором, а затем фосфором (4).

при образовании комплексов существенно уменьшается концентрация носителей заряда как в зоне проводимости, так и в валентной зоне; электрические потенциалы, присутствующие вблизи каждого иона, частично компенсируются, что приводит к ослаблению искажений потенциала решетки.

Эти факторы стимулируют образование именно электронейтральных комплексов $[P^+B^-]$.

Как показано выше, наличие достаточно высокой концентрации фосфора в кремнии создает благоприятные условия для повышения концентрации диффундирующих атомов бора, стимулируя образование комплексов уже в процессе диффузии.

На основе полученных экспериментальных данных (рис. 2 и 4) с использованием уравнения электронейтральности была рассчитана концентрация комплексов бора с фосфором $[P^+B^-]$. Получено, что концентрация комплексов на поверхности образцов не зависит от последовательности операций диффузии бора и фосфора и составляет $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Как известно [21], для сильно разбавленных растворов (концентрация P, B и $[P^+B^-]$ много меньше числа узлов решетки N) в приближении локального равновесия концентрация пар должна соответствовать закону действующих масс:

$$\frac{C_{BP}}{C_B C_P} = K(T), \quad (1)$$

где $K(T)$ — константа равновесия квазихимической реакции, C_P — концентрация атомов фосфора, C_B — концентрация атомов бора, C_{BP} — кон-

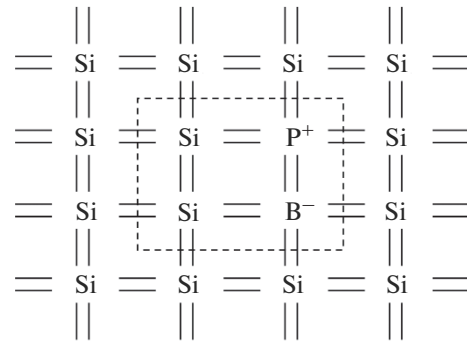


Рис. 6. Бинарные электронейтральные ячейки типа $Si_2P^+B^-$ в кремнии.

центрация 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 $\Delta E = E_P + E_B - E_{PB}$ — энергия образования пары $[P^+B^-]$, E_{PB} — изменение энергии кристалла при замещении двух соседних атомов кремния парой $[P^+B^-]$, E_P и E_B — изменения энергии кристалла при замещении атомов кремния атомами P и B соответственно.

Из уравнений (1) и (2) получим энергию образования электронейтральных комплексов $[P^+B^-]$:

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

При этом $N = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $T = 1473 \text{ К}$.

Рассчитанная энергия связи комплекса $[P^+B^-]$ составила 0.59 эВ для температуры 1200°C. Это достаточно хорошо соответствует результатам работы [18].

Нами также исследовано изменение подвижности носителей заряда по глубине в исследуемых образцах (рис. 5). Видно, что подвижности дырок и электронов в образцах, содержащих бор и фосфор, выше, чем в образцах, легированных только бором или фосфором. Эти результаты также подтверждают, что образование нейтральных комплексов $[P^+B^-]$ существенно снижает степень дефектности кристалла.

Также следует отметить, что квазинейтральные комплексы $[P^+B^-]$ могут образовываться только тогда, когда атомы бора и фосфора занимают два соседних узла в решетке кремния. Образование таких комплексов стимулирует формирование бинарных элементарных ячеек типа $Si_2 P^+B^-$ в решетке кремния (рис. 6).

В отличие от элементарной ячейки кремния они обладают частичной ионной и ковалентной связью, а также отличаются энергетической структурой. При достаточно больших концентрациях бинарные комплексы могут образовывать нанокристаллы новой фазы и должны оказать влияние на фундаментальные параметры самого кремния, что может привести к расширению спектральной области поглощения (как в УФ-, так и в ИК-области спектра). Это позволяет говорить о возможности получения новых материалов на основе кремния для солнечных элементов с повышенным коэффициентом поглощения и расширенной областью спектра поглощения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в кремнии, предварительно легированном фосфором с высокой концентрацией, при диффузии бора происходит существенное увеличение концентрации электроактивного бора.

Для кремния, предварительно легированного бором с высокой концентрацией, при диффузии фосфора наблюдается существенное уменьшение электроактивной концентрации фосфора на поверхности образцов, что, возможно, связано с обратным потоком атомов бора (за счет кулоновского притяжения к ионам фосфора).

Показано, что в образцах кремния, легированных бором и фосфором, независимо от порядка легирования, подвижности носителей заряда возрастают.

Полученные результаты могут быть связаны с электростатическим взаимодействием потоков ионов бора и фосфора при диффузии, в результате которого изменяется концентрационное распределение примесей, а также образуются квазинейтральные комплексы типа $[P^+B^-]$, ионы которых находятся в соседних узлах решетки кремния.

На основе полученных данных рассчитаны концентрация и энергия образования комплексов $[P^+B^-]$.

Предполагается, что образование квазинейтральных комплексов может привести к формированию новых бинарных элементарных ячеек $Si_2P^+B^-$ и возможности формирования нанокристаллов новой фазы в решетке кремния. Достаточно большая концентрация таких нанокристаллов может привести к существенному изменению электрофизических параметров кремния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wagner H., Ohrdes T., Dastgheib-Shirazi A., Puthen-Veetil B., König D., Altermatt P.P. A Numerical Simulation Study of Galliumphosphide/Silicon Heterojunc-

tion Passivated Emitter and Rear Solar Cells // J. Appl. Phys. Jpn. 2014. V. 115. № 4. P. 044508. <https://doi.org/10.1063/1.4863464>

2. Shestakov V.A., Kosyakov V.I. Transformation of the Phase Diagram of a Ternary System with Stoichiometric Compounds with Varying Its State Parameters // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 401–404. <https://doi.org/10.1134/S0036023621030165>
3. Мильвидский М.Г., Чалдыше В.В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов // ФТП. 1998. Т. 32. № 5. С. 513–522.
4. Gudovskikh A.S., Kudryashov D.A., Baranov A.I. et al. A Selective BP/Si Contact Formed by Low-Temperature Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition // Tech. Phys. Lett. 2021. V. 47. № 1. P. 96–98. <https://doi.org/10.1134/S1063785021010211>
5. Лунин Л.С., Лунина М.Л., Пащенко А.С., Алфимова Д.Л., Арустамян Д.А., Казакова А.Е. Каскадные солнечные элементы на основе наногетероструктур GaP/Si/Ge // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 6. С. 7–9. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.06.47489.17635>
6. Миличко В.А., Шалин А.С., Мухина И.С., Ковров А.Э., Красилин А.А., Виноградов А.В., Белов П.А., Симовский К.Р. Успехи физ. наук. 2016. Т. 186. № 8. С. 801–852. <https://doi.org/10.3367/UFN.2016.02.037703>
7. Bakhadyrhanov M.K., Sodikov U.X., Iliiev Kh.M., Tachilin S.A., Tuerdi Wumaier. Perspective Material for Photoenergetics on the Basis of Silicon with Binary Elementary Cells // Mater. Phys. Chem. 2019. V. 1. № 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.18282/mpc.v1i1.569>
8. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlyanov A.Sh., Sodikov U.Kh., Khakkulov M.K. Silicon with Binary Elementary Cells as a Novel Class of Materials for Future Photoenergetics // Appl. Solar Energy. 2015. V. 51. № 4. P. 258–261.
9. Гречихин Л.И., Латушкина С.Д., Комаровская В.М., Шмермбекк Ю. Кластерная структура кремния и конструкция его поверхности // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 9. С. 5–10.
10. Wittel F., Dunham S. Diffusion of Phosphorus in Arsenic and Boron Doped Silicon // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 11. P. 1415–1471. <https://doi.org/10.1063/1.113219>
11. Ободников В.И., Тишковский Е.Г. Влияние исходного уровня легирования бором на его распределение, возникающее при термообработке в облученном ионами бора кремнии // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. С. 417–420.
12. Александров О.В. Моделирование концентрационной зависимости диффузии бора в кремнии // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 3. С. 270–273.
13. Поморцева Л.И. Подвижность неосновных носителей заряда при низком уровне инжекции в полупроводниках // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 4. С. 446–452.
14. Florakis A., Janssens T., Posthuma N., Delmotte J., Douchard B., Poortmans J., Vandervorst W. Simulation of the Phosphorus Profiles in a c-Si Solar Cell fabricated Using POCl₃ Diffusion or Ion Implantation and Anneal-

- ing // Energy Procedia. 2013. V. 38. P. 263–269.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.276>
15. Александров О.В. Модель высоко- и низкотемпературной диффузии фосфора в кремнии по дуально-парному механизму // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 11. С. 1289–1298.
 16. Fisher D.J. Diffusion in Silicon 10 Years of Research // Scitec publications. 2010. 553 p.
 17. Гадияк Г.В. Диффузия бора и фосфора в кремнии при высокотемпературной ионной имплантации // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 4. С. 385–389.
 18. Тишковский Е.Г., Ободников В.И., Таскин А.А., Феклистов К.В., Серяпин В.Г. Перераспределение атомов фосфора, имплантированных в сильно легированный бором кремний // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 6. С. 655–659.
 19. Александров О.В., Афонин Н.Н. Модель ослабления диффузии, ускоренной окислением, в сильно легированных слоях кремния // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 6. С. 649–656.
 20. Самарский А.А. Теория разностных схем. Гл. 3. М.: Наука, 1983. С. 141.
 21. Ковтуненко П.В. Физическая химия твердого тела. Кристаллы с дефектами. М.: Высш. шк., 1993. 352 с.
 22. Заводинский В.Г. Компьютерное излучение механизмов сегрегации фосфора на границе SiO₂/Si (100) // ФТП. Т. 34. Вып. 3. С. 302–305.