УДК 621.315.592

Х.М.ИЛИЕВ, д.ф.-м.н., профессор, (ТГТУ)
М.О.ТУРСУНОВ, преподаватель (ТерГУ)
С.В.КОВЕШНИКОВ, старший преподаватель (ТГТУ)
г. Ташкент, г. Термез, Узбекистан.

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОТО-ЭНЕРГЕТИКЕ НА ОСНОВЕ КРЕМНИИ

Управление состоянием примесных атомов в решетке кремния представляет большой научный и практический интерес. Изменяя состояние примесных атомов в решетке можно не только существенно изменять электрофизические и рекомбинационные параметры основного материала, но и формировать различные примесные кластеры, приводящие к изменению фундаментальных параметров материала.

В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний *p*-типа с ρ=5 Ом·см ($N_B=5\cdot10^{15}$ cm^{-3}) с концентрацией кислорода ($N_{O2}=7\cdot10^{17}$ см$^{-3}$). Образцы вырезались в виде параллелепипедов размерами 8×4×0,4 mm^{-3}, после чего подвергались шлифовке микропорошками М-14 и М-3 в условиях, обеспечивающих получение толщины и плоскопараллельности образцов с точностью ±10 мкм. Травление нарушенного слоя образцов производилось в растворе $HF:HNO_3$ (1:3). Для диффузии использовалась вакуумно-трубчатая печь (1700 °С). Температура диффузионного отжига измерялась с помощью термопары платина-платинородий. Диффузия всех примесей проводилась из газовой фазы (остаточное давление воздуха в кварцевой ампуле не более 10^{-4} мм рт. ст.).

В образцы с примесями элементов VI группы проводилась диффузия марганца из газовой фазы при T=1160 ˚С в течение 30 минут. За это время марганец практически однородно легирует объем образцов кремния, а профили легирования примесями VI группы практически не изменяются из-за малого времени легирования [1].

Для активации процесса комплексообразования использовался отжиг при оптимальных температурах комплексообразования T_{Se}=820˚С, T_{Te}=650˚С в течение 15 минут.

Резюмируя известные результаты по исследованию межпримесного взаимодействия элементов VI группы с марганцем T_O=1300˚С, T_S=1100˚С, T_{Se}=820˚С, T_{Te}=650˚С [2] можно отметить, что для каждой пары элементов характерно определенное значение температуры, при котором имеет место наиболее интенсивное комплексообразование. Значения температур наиболее интенсивного комплексообразования приведены в таблице 1. В таблице

1 также приведены значения энергии Гиббса соответствующих индивидуальных соединений.

Таблица 1

Температуры наиболее интенсивного комплексообразования и значения энергии Гиббса соответствующих соединений.

Бинарные комплексы	$T_{эфф}$ ˚C	ΔG^0_{298} *кДж/мол*	ΔG^0_{298}, *эв*	*k*
MnO	1300	-363.3	3.7	-0.279
MnS	1100	-220	2.3	-0.2
MnSe	820	-163	1.7	-0.2
MnTe	650	-128	1.3	-0.2

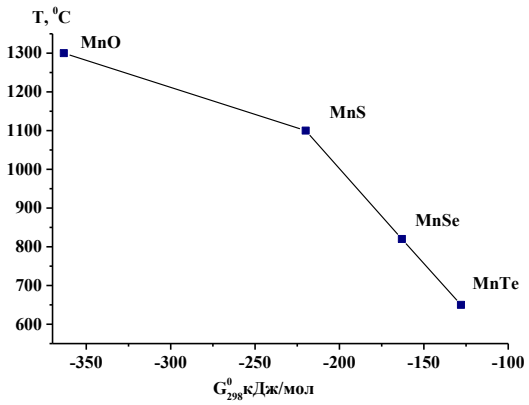

Рис.1. Зависимость оптимальной температуры комплексообразования от энергии Гиббса

Анализируя данные, приведённые в таблице 2 можно указать на наличие чёткой корреляции между температурой наиболее эффективного образования комплексов ($T_{эфф}$˚C) с термодинамической энергией Гиббса (ΔG^0_{298}) [3] соответствующих химических соединений (рис. 1).

$$\frac{\Delta G^0_{298} < MnO >}{T_{effMnO}} = \frac{\Delta G^0_{298} < MnS >}{T_{effMnS}} = \frac{\Delta G^0_{298} < MnSe >}{T_{effMnSe}} = \frac{\Delta G^0_{298} < MnTe >}{T_{effMnTe}} = k \quad (1)$$

Отношения энергии Гиббса соединений к оптимальной температуре комплексообразования остаются примерно постоянными. Величину k=-(2÷3) 10^{-1} кДж/мол град можно характеризовать как коэффициент комплексообразования.

Контроль наличия межпримесного взаимодействия осуществлялся путём сравнения средних по профилю легирования электрофизических параметров в образцах с марганцем и без марганца.

В таблице 2 приведены средние по профилю легирования значения ρ и μ (измеренные методом Ван-дер-Пау) в образцах Si <B, O, Mn>, Si <B, S, Mn>.

Таблица 2

Электрические параметры образцов, дополнительно легированных марганцем

Образцы	Тип проводимости	ρ, Ом·см	μ, В·с/см^2	n, см$^{-3}$
Si<B,O,Mn>	p	5÷7	231	$3.8\cdot10^{15}$
Si<B,S,Mn >	p	6÷7	257	$3.4\cdot10^{15}$

Данные таблицы 2. показывают, что после легирования марганцем заметно изменяются средние по профилю легирования электрические параметры образцов - удельного сопротивление, подвижность. Расчетная концентрация носителей заряда уменьшается [4].

Изменение профиля концентрации электронов в образцах после диффузии марганца может быть объяснено только наличием комплексообразования, так как марганец, как и элементы VI группы – примесь донорного типа. Нейтрализация примесей VI группы в процессе взаимодействия с марганцем связана с образованием электронейтральных, химически связанных комплексов между центрами замещения элементов VI группы и марганцем.

Для каждого наблюдаемого комплекса O, S, Se, Te с марганцем выявлена чёткая корреляция между $T_{эфф}$ с термодинамической энергией Гиббса (ΔG^0_{298}) соответствующих индивидуальных соединений.

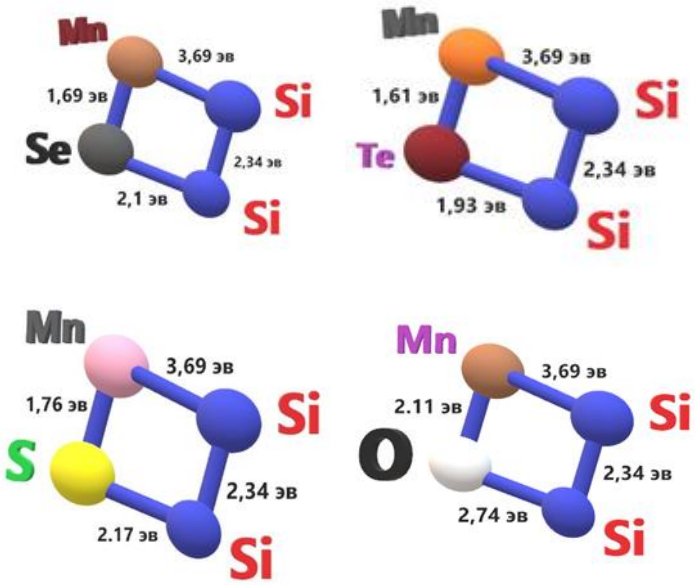

Рис.2 Структура комплексов энергия связ между атомов Mn с элементами VI группы в атомарном состояния.

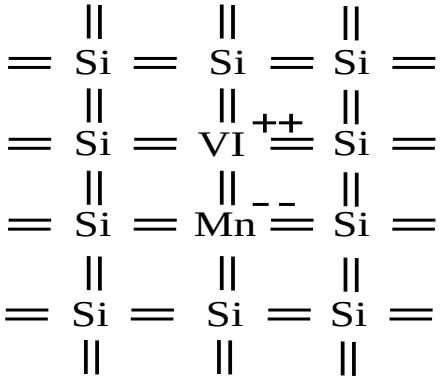

Рис. 3. Структура комплексов атомов Mn с элементами VI группы в решетке кремния [5].

Показано, что после легирования марганцем заметно изменяются электрические параметры - удельного сопротивление, подвижность и концентрация носители заряда. Изменение концентрации носителей заряда после легирования марганцем объяснено взаимодействием марганца с элементов VI группы в решетке кремния [6,7]. Показано что наблюдаемая нейтрализация примесей в процессе взаимодействия связана с образованием электронейтральных, химически связанных комплексов между центрами замещения элементов VI группы и марганцем.

Список литературы:

1. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., Isamov S.B., Iliev Kh.M., Ayupov K.S., Saparniyazova Z.M., and Tachilin S.A. Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low Temperature Diffusion // Inorganic Materials. 2011. Vol. 47, No. 5, pp. 479-483.

2. Bakhadyrkhanov M.K., Askarov Sh.I, and Norkulov N. Some Features of Chemical Interaction between a Fast Diffusing Impurity and a Group VI Element in Silicon. // Physics state solid. 1994. No. 142. pp 339-346.

3. Glushko V.P. Thermodynamic Constant for Materials // 1974. Issue. 7 Pt 1, Nauka, Moscow (in Russian).

4. Iliev Kh.M, Tursunov M.O., Koveshnikov S.V., Khudaynazarov Z.B. Research of properties of silicon with binary nanoclusters with participation of Mn and Se atoms // Semiconductor Physics and Microelectronics. 2020, Vol. 2, Issue 2. pp. 59–62.

5. Bakhadyrkhanov M.K., Iliev Kh.M, Tursunov M.O., Isamov S.B., Koveshnikov S.V., Madjitov M. Kh. Electrical Properties of Silicon Doped with Manganese via High-Temperature Diffusion // Inorganic Materials. 2021. Vol. 57, No. 7, pp. 655-662.

6. Iliev Kh.M.**,** Tursunov M.O.**,** Ismailov K.A., Ismaylov B.K. Formation of complexes consisting of impurity Mn atoms and group VI elements in the crystal lattice of silicon // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics – Ukraine, 2021. – Vol. 24. – No 3. – Pp. 255-260.

7. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Zikrillaev N.F., Tursunov M.O. Anomalous Photoelectric Phenomena in Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Semiconductors, 2021, Vol. 55, No. 6, pp. 636–639

Информация об авторах:

Илиев Халмурат Миджитович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой Ташкентского государственного технического университета, ул. Университет-2, г. Ташкент, Узбекистан, E-mail: xolmurodov.iliev@tdtu.uz

Турсунов Мамасобир Очилдиевич, преподаватель, Термезский государственной университет, ул. Баркамол авлод-43, г. Термез, Узбекистан. E-mail: mtursunov@tersu.uz

Ковешников Сергей Владимирович, Старший преподаватель, Ташкентского государственного технического университета, г. Ташкент, Узбекистан, E-mail: sergey.koveshnikov@tdtu.uz