



O'zbekiston
Fanlar akademiyasi

O'zbekiston Respublikasi
Fanlar akademiyasining
MA'RUZALARI

ДОКЛАДЫ
Академии наук
Республики Узбекистан

1-2026



УДК 621.315.592

Н.Ф.Зикриллаев¹, К.А.Исмаилов², Б.К.Исмайлов², Б.А.Абдурахманов¹,
 Х.Ф.Зикриллаев¹, Н.Норкулов³, Ф.Э.Уракова¹, Н.Абдуллаева¹

ОСОБЕННОСТИ КРЕМНИЯ С НАНОКЛАСТЕРАМИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ МАРГАНЦА

(Представлено академиком АН РУз Р.А.Муминовым)

Введение. Электрофизические, фотоэлектрические и магнитные свойства кремния с нанокластерами примесных атомов марганца были исследованы авторами [1-5]. В работах [6,7] исследовалось влияние примесных атомов марганца на электрофизические и фотоэлектрические свойства исходного кремния. Легирование примесными атомами марганца проводилась методом диффузии с учетом термодинамических условий, чтобы примесные атомы марганца образовывали нанокластеры в кристаллической решетке кремния.

В работах [8-10] при изучении диффузии изотопов марганца ^{61}Mn установлено, что растворимость примесных атомов марганца с повышением температуры увеличивается и достигает максимального значения в кремнии до $N_{\text{Mn}} \sim 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Такие условия диффузии позволяют обеспечить рост концентрации электроактивных примесных атомов марганца и существенно расширить функциональные возможности применения их в полупроводниковой электронике.

Экспериментальные результаты. В образцах кремния, диффузионно легированных примесными атомами марганца, установлено, что в определенных термодинамических условиях диффузии образуются нанокластеры, состоящие из четырёх атомов марганца. Заряд образованных нанокластеров достигает значения до +8 с учетом донорного характера примесных атомов марганца. При этом атомы марганца находятся в междоузлиях кристаллической решетки кремния и имеют донорный характер.

При исследовании образцов кремния p – типа проводимости с многозарядными нанокластерами примесных атомов марганца $(\text{Mn})_4^{+n}$ была обнаружена модуляция подвижности дырок в зависимости от изменения температуры окружающей среды. Установлено, что такое поведение подвижности дырок проявляется тем сильнее, чем будет больше кратность заряда образованных нанокластеров (рис. 1).

Обсуждение результатов. На основе результатов исследования показана возможность управления подвижностью носителей заряда (дырок) с изменением концентрации и степени зарядности образованных нанокластеров примесных атомов марганца.

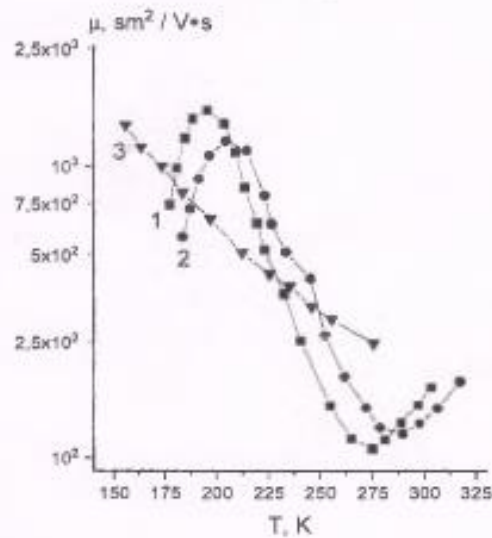


Рис. 1. Зависимость подвижности носителей заряда (дырок) от температуры в образцах кремния с нанокластерами и без нанокластеров примесных атомов марганца при $I - \rho = 7 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, p -тип с нанокластерами; $2 - \rho = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, p -тип с нанокластерами; $3 - \rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, p -тип без нанокластеров примесных атомов, $U=20 \text{ В}$.

В этих образцах в интервале температур ($T=240\text{--}350 \text{ К}$) также было обнаружено anomalно высокое относительно высоких температур отрицательное магнетосопротивление (ОМС). Из анализа результатов исследования установлено что, управляя концентрацией образованных нанокластеров, можно существенно изменить магнитные свойства кремния (рис. 2). При этом был обнаружен эффект двойной инверсии знака магнетосопротивления в образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца в зависимости от изменения температуры.

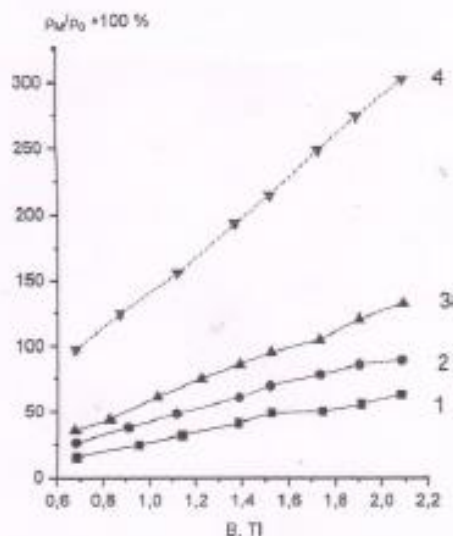


Рис. 2. Зависимость магнетосопротивления от величины магнитного поля в образцах кремния с различной концентрацией нанокластеров примесных атомов марганца N_{Mn}

$1 = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $2 = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $3 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $4 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; при $T = 300 \text{ K}$, $U = 20 \text{ В}$.

В отличие от других материалов, где ОМС монотонно растет с понижением температуры, в кремнии с нанокластерами примесных атомов марганца наблюдается максимальное значение ОМС в интервале температур $T_{cp} = 230 + 240 \text{ K}$. При дальнейшем понижении температуры, эффект ОМС ослабляется и происходит инверсия знака магнетосопротивления, т.е. наблюдается положительное магнетосопротивление (рис. 3).

На основе результатов исследования установлено, что в кремнии с нанокластерами примесных атомов марганца в интервале энергий падающих фотонов $h\nu = 0,4 + 0,8 \text{ эВ}$ наблюдается существенное увеличение значения фототока - то есть появляется гигантская примесная фотопроводимость в инфракрасной области спектра излучения, величина которой на 2-3 порядка больше, чем значение фотопроводимости в образцах кремния без нанокластеров примесных атомов марганца. Также установлено, что управляя зарядовым состоянием образованных нанокластеров примесных атомов марганца, можно существенно переместить край примесного фотоответа в сторону малых значений энергий падающих фотонов. Спектральная зависимость была измерена с использованием кремниевого фильтра, который не пропускает фотоны с энергией больше, чем $h\nu \geq E_g$ ($E_g = 1,12 \text{ эВ}$) и исключает попадание фонового освещения. Фильтр представляет собой полированную кремниевую пластину толщиной 380 мкм.

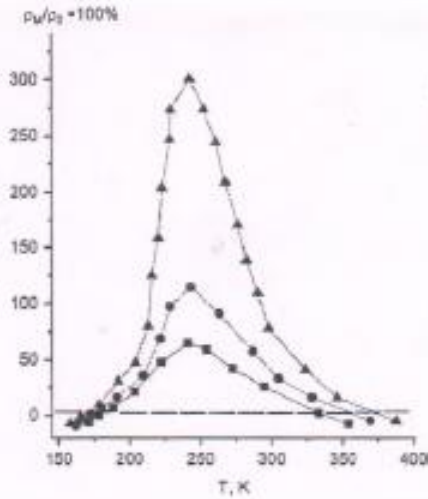


Рис. 3. Зависимость магнетосопротивления образцов кремния с нанокластерами примесных атомов марганца в зависимости от температуры при значениях В:
1 - В= 2 Тл; 2 - В= 1 Тл; 3 - В= 0,6 Тл, и при $U = 20$ В.

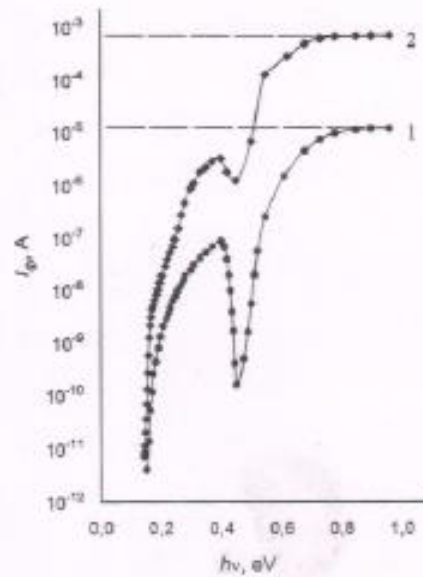


Рис. 4. Спектральная зависимость ИК гашения фотопроводимость кремния с нанокластерами примесных атомов марганца при $T=80$ К, $U = 20$ В:
1 - $\rho = 1 \cdot 10^4$ Ом·см; 2 - $\rho = 2 \cdot 10^3$ Ом·см.

Анализ результатов фотоэлектрических исследований показал, что многозарядные нанокластеры примесных атомов марганца формируют в запрещённой зоне кремния примесную энергетическую полосу электронных уровней с антисимметричными сечениями захвата электронов и дырок ($S_n \gg S_p$). Установлено, что величина примесного

тока, полученная с энергией падающих фотонов $h\nu=0,6$ эВ, до пунктирной линии (рис. равнима с током собственной фотопроводимости кремния. Это anomальное явление яняется многозарядностью образованных нанокластеров примесных атомов марганца. Обнаружено и исследовано anomально глубокое инфракрасное гашение (ИКГ) фотопроводимости в образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца (рис. при воздействии монохроматического излучения в интервале длин волн $\lambda = 1,77 \div 3$ мкм $h\nu = 0,42 \div 0,69$ эВ). Из анализа полученных результатов установлено, что в отличие от логичного эффекта, наблюдаемого в полупроводниковых соединениях типа $A^{III}B^V$ [1,12] или $A^{II}B^{VI}$ [13,14], глубина ИК гашения ($I_{\phi}/I_{ик}$) в исследуемых образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца намного больше (достигает 3–4 порядка). С помощью управления концентрацией нанокластеров и их зарядностью в кремнии можно варьировать глубину, а также спектральную область ИК гашения фотопроводимости. Характерной особенностью ИК гашения фотопроводимости (ФП) в кремнии с нанокластерами примесных атомов марганца является то, что при достаточно высоком уровне фоновой освещенности интегральным светом, и при низких интенсивностях монохроматического излучения ($W=10^{-7}+10^{-8}$ Вт/см²·с), можно наблюдать ИК- гашения ФП, что дает основу для создания чувствительных ИК-фотоприемников, работающих в широком спектральном диапазоне энергии падающих фотонов инфракрасного излучения.

В образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца обнаружен эффект управления кратностью и диапазоном спектральной области ИК - гашения фотопроводимости с помощью приложенной напряженности электрического поля. Изменяя значения напряженности электрического поля в 10 раз, можно изменять кратность ИК - гашения на 3-4 порядка (рис. 5).

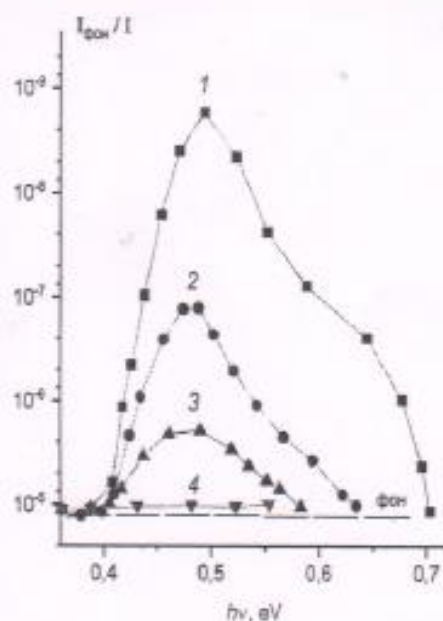


Рис. 5. Спектральная зависимость ИК - гашения фотопроводимости в кремнии, с нанокластерами примесных атомов марганца, при различных значениях напряженности электрического поля E : 1 – 5 В/см; 2 – 10 В/см; 3 – 5 В/см, 4 – 50 В/см, при $T = 80$ К.

Из анализа полученных результатов установлено, что в кремнии с нанокластерами примесных атомов марганца можно наблюдать ряд проявляющихся при этом физических явлений, которые позволят в перспективе создавать на их основе различные приборы и чувствительные датчики физических величин в полупроводниковой электронике.

Заключение. Проведённые комплексные исследования показали, что формирование многозарядных нанокластеров примесных атомов марганца в кремнии приводит к появлению ряда уникальных физических явлений. Установлено, что образование нанокластеров примесных атомов марганца приводит к значительному изменению подвижности носителей заряда за счёт изменения зарядового состояния нанокластеров. Были также обнаружены необычные магнитные явления, такие как высокотемпературное отрицательное магнетосопротивление и двойная инверсия его знака в интервале температур $T = 80+300$ К.

Выявлена гигантская примесная фотопроводимость и глубокое инфракрасное гашение фотопроводимости, причем глубину и спектральный диапазон ИК - гашения можно регулировать путем управления концентрацией нанокластеров и величиной напряженности электрического поля. Такие явления не наблюдаются в обычном кремнии, что свидетельствуют о роли примесных атомов марганца, которые формируют примесную

энергетическую полосу электронных уровней в запрещенной зоне, связанную с многозарядными нанокластерами примесных атомов марганца.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования кремния с нанокластерами примесных атомов марганца в электронике и спинтронике для создания приборов, фотоприемников и датчиков физических величин, обладающих высокой чувствительностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zikrillaev N.F., Koveshnikov S.V., Trabzon L., et al., Ferromagnetic Properties of Silicon Doped Manganese Atoms. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2025, Vol. 61, No. 1, pp. 75–80.
2. Zikrillaev N.F., Urakova F.E., Toshev A.R., et al., Physical and magnetic properties of silicon doped with impurity germanium atoms. // *East European Journal of Physics*, 2025, pp. 184–189,
3. Bakhadir Khanov M.K., Isamov S.B., Ibodullaev Sh.N., et al. **Electric Field-Stimulated Photoconductivity in Silicon with Manganese Atom Nanoclusters in the Range of 3–8 μm .** // *Technical Physics Letters*, 2020, Vol. 46, pp. 1192–1195.
4. Abdurakhmanov K.P., Daliev Kh.S., Utamuradova Sh.B., Ochilova N.Kh. On defect formation in silicon with impurities of manganese and zinc. // *Applied Solar Energy*, 1998, Vol. 34, No. 2, pp. 73–75.
5. Gilles D., Bergholz W., Schröter W. Diffusion of manganese in silicon studied by deep-level transient spectroscopy and tracer measurements. // *Journal of Applied Physics*, 1986, Vol. 59, 10, pp. 3590–3593.
6. Mamadalimov A.T., et al., Comparative Analysis of the Properties of Manganese Silicide. // *J. Nano- Electron. Phys.* 2025, Vol. 17, No. 5, P. 05011
7. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., Isamov S.B., et al., Photoconductivity of silicon with multicharged clusters of manganese atoms $[\text{Mn}]_4$. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2010.
8. Ottaviano L., Continenza A., Profeta G., et al. Room-temperature ferromagnetism in Mn-implanted amorphous Ge. // *Physical Review B*, 2011, Vol. 83, P. 134426. // Fang Z.Q., Look D.C., Infrared quenching and thermal recovery of thermally stimulated current spectra in GaAs. // *Applied Physics Letters*, 1991.