



3. В. Л. Дубов, Д. В. Фомин. BaSi2 — перспективный материал для фотоэлектрических преобразователей // Успехи прикладной физики, 2016, том 4, № 6. ст. 599-605.
4. Kohsuke Hashimoto, Ken Kurosaki, Hiroaki Muta and Shinsuke Yamanaka. Thermoelectric Properties of La-Doped BaSi2 // Materials Transactions, Vol. 49, No. 8 (2008) pp. 1737 to 1740.
5. L. Yang, Z. G. Chen, M. S. Dargusch, and J. Zou, Adv. Energy Mater. 8, 1701797 (2018).

## **ОСОБЕННОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕМНИЯ С НАНОКЛАСТЕРАМИ АТОМОВ МАРГАНЦА**

**Х.М.Илиев<sup>1</sup>, С.Б.Исамов<sup>1</sup>, Г.Х. Мавлонов<sup>1</sup>, Й.А.Абдуганиев<sup>1</sup>, С.О.  
Сайдов<sup>2,\*</sup>, М. Шарифова<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет, ул.*

*Университетская, Ташкент, 100095 Узбекистан.*

*<sup>2</sup>Бухарский государственный университет, Бухара, 200118 Узбекистан.*

*[giyosiddin-m@yandex.ru](mailto:giyosiddin-m@yandex.ru)*

Ушбу ишда кремний кристалл панжарасида марганец атомлари кластерларини шакллантириш билан кремнийнинг фотоэлектрик хоссаларини тубдан ўзгариши мумкинлиги кўрсатилган. Бундай материалларда ёруғлик спектрини сезиш катта тўлқин узунлик томонга силжиши ва 1,5 – 10 мкм соҳада гигант фотоўказувчаник кузатилди. Шундай қилиб, кўпзарядли нанокластерлари мавжуд кремний замонавий фотоника ва оптоспинтроника учун янги синф материали ҳисобланади.

В данной работе показано, что формированием нанокластеров атомов марганца в решетке кремния можно существенно менять фотоэлектрические свойства кремния. В таких материалах обнаружено существенное расширение спектральной области чувствительности в сторону больших длин волн, обнаружены гигантское фотопроводимость в области 1,5 – 10 мкм. Таким образом установлено, что кремний с многозарядными нанокластерами



является новым классом материалом для современной фотонике и оптоэлектроники.

The present article reports that by forming nanoclusters in the crystal lattice of silicon one can vary photoelectric properties of silicon. Significant widening of spectral sensitivity area is revealed in such samples towards higher wavelengths and giant photoconductivity in the range of 1,5 – 10. Thus, it was established that silicon with multicharge clusters is a new material for modern photonics and optoelectronics.

Ранее в работах [1,2] методом ЭПР было показано образование нанокластеров, состоящих из 4 атомов марганца в решетке кремния. Однако в этих работах не были указаны условия формирования, состояния и возможности управления такими кластерами, а также их влияние на электрофизические свойства материала. Исследование таких вопросов представляет интерес с точки зрения получения кремния сnanoструктурами, а также позволяет выявить функциональные возможности как нового класса материалов для современной оптоэлектроники, так и микро- и наноэлектроники.

В связи с этим целью данной работы являлось определение оптимальных термодинамических условий формирования и состояния нанокластеров атомов марганца в решетке и исследование особенности фотоэлектрических и магнитных свойств кремния с максимальной концентрацией таких кластеров.

1. В ходе исследований было установлено, что на основе существующего способа - высокотемпературной диффузии, не происходит формирование кластеров атомов марганца. Также были показаны, что при этом существенную роль играют параметры исходного кремния, т.е. тип проводимости, а также концентрация мелких примесных атомов. Разработан новый способ легирования – так называемой многоэтапной



низкотемпературной диффузии [3,4], который практически обеспечивает максимальное участие введенных атомов марганца в формирование кластеров. На основе многочисленных экспериментальных исследований были показаны, что кластеры атомов марганца формируются только в кремнии с дырочной проводимостью при выполнении условия  $N_{\text{Mn}} \leq 2N_{\text{B}}$ ,  $N_{\text{Mn}}, N_{\text{B}} \gg p_0-p$ , где  $N_{\text{Mn}}$  – концентрация электроактивных атомов марганца при данной температуре диффузии,  $N_{\text{B}}$  – концентрация бора,  $p_0-p$  – концентрация некомпенсированных дырок после легирования материала марганцем. Методом атомно-силового микроскопа (АСМ), а также методом электронно парамагнитного резонанса (ЭПР) были исследованы состояния атомов марганца в кремнии, введенных по разработанной технологии.

Установлено, что действительно кластеры состоит из четырех атомов марганца находящихся ближайших эквивалентных междоузельных состояниях вокруг отрицательно заряженного атома бора (Рис. 1). А также кластеры в зависимости от состояния и концентрации  $N_{\text{Mn}}$  и  $N_{\text{B}}$ , могут находятся в многозарядном состоянии  $[(\text{Mn})_4^+ \text{B}^{-1}]^{+3} \div [(\text{Mn})_4^{++} \text{B}^{-1}]^{+7}$  и создают вокруг себя достаточно сильный электрический потенциал (Рис. 2).

Впервые показана возможность формирования нового класса многозарядных нанокластеров - т.е. квантовых точек, создающих вокруг себя достаточно сильные электрические и магнитные поля и возможность создания кремния с многозарядными центрами как нового класса материала, а также материала с управляемыми магнитными, фотоэлектрическими свойствами, которые практически невозможно получить на основе существующей технологии легирования на основе современных способов создания наноструктур методом МЛЭ.

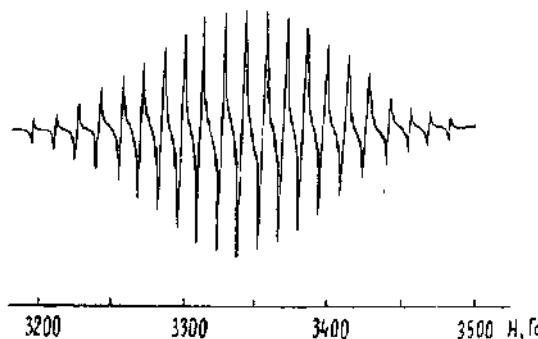


Рис. 1. Спектр ЭПР  $[\text{Mn}]_4$  в кремнии.

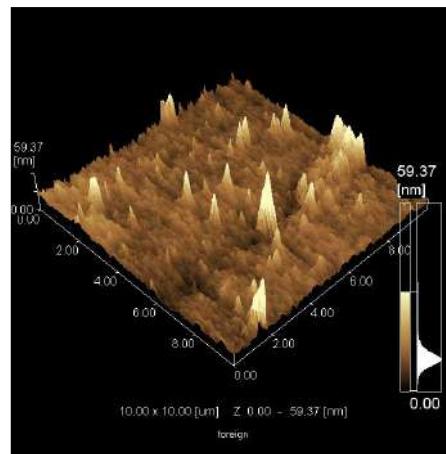


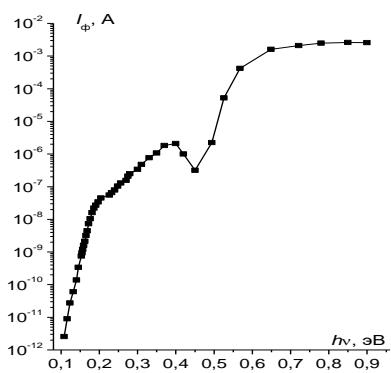
Рис. 2. Изображения нанокластеров примесных атомов марганца в кремнии

2. Как известно из [5] атомы марганца в кремнии создают донорные уровни с энергией ионизации  $E_I = E_C - 0,30$  эВ, а также  $E_2 = E_C - 0,5$  эВ. При этом возникает ряд вопросов: меняется ли энергетический спектр атомов марганца при формировании многозарядных кластеров? И если да, то как это отражается на фотоэлектрических свойствах кремния с нанокластерами атомов марганца? При легировании кремния  $p$ -типа с  $\rho \sim 3 \Omega \cdot \text{см}$ , ( $p = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) по новой технологии, образцы оставались  $p$  типа с  $\rho \sim (2 \div 6) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{см}$  ( $p = (2 \div 4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), т.е. при этом практически все атомы марганца, участвующие в формировании нанокластеров, находятся в состоянии  $\text{Mn}^{++}$  и, соответственно, кластеры будут обладать максимальным зарядовым состоянием. Исследование спектральной зависимости фотопроводимости позволило установить ряд новых фотоэлектрических явлений в таких материалах (Рис. 3). Первый из них - заметный фотоответ начинается при  $h\nu = 0,12$  эВ ( $\lambda = 10 \text{ мкм}$ ), а фототок непрерывно увеличивается с ростом энергии фотонов в области  $h\nu = 0,15 \div 0,4$  эВ. В области  $h\nu = 0,4 \div 0,45$  эВ имеет место самогашение фотопроводимости, хотя образцы освещались только примесным светом ( $h\nu = 0,4 \div 0,45$  эВ) без фонового освещения. Дальнейший рост энергии падающего фотона  $h\nu > 0,45$  эВ приводит к многократному скачкообразному увеличению фототока при  $h\nu = 0,5$

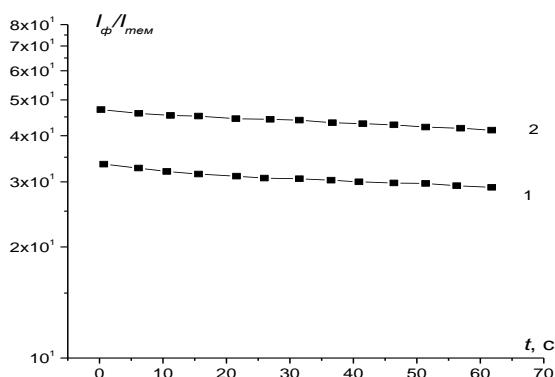


эВ,  $h\nu=0,53$  эВ,  $h\nu=0,62$  эВ,  $h\nu=0,65$  эВ и значение фототока достигает своего максимального значения при  $h\nu=0,8$  эВ ( $\lambda=1,55$  мкм). Эти результаты показывают, что формирование нанокластеров атомов марганца в решетке кремния приводит не только к существенному расширению спектральной чувствительности, но и также к гигантской примесной фотопроводимости, которую практически невозможно получить в кремнии, легированном другими примесными атомами. Следующим интересным явлением, которое мы обнаружили в таких материалах стала примесная остаточная проводимость с аномально высоким временем релаксации после освещения в области  $h\nu=0,12\div0,4$  эВ (Рис. 4.).

3. Установлено, что такое поведение фотоэлектрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца, сохраняется в достаточно широком интервале температур  $T=77\div300$  К.
4. Эти результаты показывают возможность создания на основе кремния высокочувствительных фотоприемников в области  $\lambda=1,5\div10$  мкм, которые практически невозможно создать на основе не только кремния, но и многих других полупроводниковых материалов.



*Рис. 3. Спектральной зависимости ФП в образцах кремния с многозарядными нанокластерами*



*Рис. 4. Кинетика релаксации ОП в образцах кремния с многозарядными нанокластерами: 1 - 0,12 эВ, 2 - 0,16 эВ.*



5. Разработка и создание магнитных полупроводниковых материалов представляет интерес не только для спинtronики, но и для создания нового класса фотомагнитных приборов и многофункциональных чувствительных датчиков.

Таким образом, нами впервые была показана не только возможность формирования многозарядных квантовых точек на основе нанокластеров атомов марганца, но и продемонстрировано, что кремний с такими квантовыми точками обладает уникальными свойствами и в них наблюдается ряд абсолютно новых физических явлений – эффектов, которые не имеют места не только в обычных полупроводниковых материалах, но и в полупроводниковых материалах с обычными квантовыми точками.

Исследование зонной структуры вокруг нанокластеров атомов марганца в кремнии показали, что формируется локальная наноразмерная варизонная структура с управляемой шириной запрещенной зоны.

### **Литература**

1. Ludwig G.W., Woodbury H.H., Carlson R.O. // J.Phys.Chem. Sol., 1959. V.8. P.490.
2. Kreissl J., Gehlhoff W. // phys.stat.sol. 1988.– V.145 (b).– P. 609-616.
3. Бахадырханов М. К., Мавлонов Г.Х., Исамов С.Б., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Сапарниязова З.М., Тачили С.А. //неорганические материалы 2011.- Т.47- В.5.-С. 545-550.
4. Bakhadyrkhanov M. K., Mavlonov G. Kh., and Iliev Kh. M. // Technical Physics, 2014, Vol. 59, No. 10, pp. 1556–1558.
5. Абдурахманов К.П, Лебедев А.А, Крейсл Й, Утамурадова Ш.Б. Глубокие уровни в кремнии связанные с марганцем // ФТП 1985.– Т. 19. В. 2.– С. 213-216.