

УДК 621.382.021.14

Усманов Жафар Исройлович  
Научный исследователь

Бухарского филиала Ташкентского института инженеров ирригации и  
механизации сельского хозяйства

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЯ ФЕРМИ НА  
ФОТОПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО  
КРЕМНИЯ  $Si< B, Mn> c$**

**Аннотация.** Данная работа посвящена изучению спектральной зависимости фотопроводимости монокристаллического кремния  $Si< B, Mn> c$  различной концентрацией бора и фосфора, легированного атомами марганца, от положения уровня Ферми. Исследование является продолжением изучения влияния многократно заряженных центров на время жизни носителей заряда в кремнии с многозарядными центрами, проведённым автором статьи.

**Ключевые слова:** нанокластер, наноструктур, фотогенерации, термолизации, фоточувствительность, наноразмер.

**USMONOV JAFAR ISROILOVICH**  
Scientific researcher  
**Bukhara branch of the Tashkent Institute of Irrigation and  
Agricultural Mechanization Engineers**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF THE POSITION OF THE  
FERMI LEVEL ON THE PHOTOCONDUCTIVITY OF SINGLE  
CRYSTALLINE SILICON  $Si< B, Mn> c$**

**Annotation.** This work is devoted to the study of the spectral dependence of the photoconductivity of single-crystal silicon  $Si < B, Mn >$  with different concentrations of boron and phosphorus doped with manganese atoms on the position of the Fermi level. The study is a continuation of the study of the influence of multiply charged centers on the lifetime of charge carriers in silicon with multiply charged centers, carried out by the author of the article.

**Key words:** nanocluster, nanostructures, photogeneration, thermolization, photosensitivity, nanosize.

Использование методов ЭПР и АСМ показало, что при определенных термодинамических условиях можно формировать нанокластеры атомов марганца в решетке кремния, состоящего из четырех атомов марганца, находящихся в эквивалентных соседних междуузлиях, вокруг отрицательно заряженного атома бора. Нами были установлены основные условия формирования таких кластеров, где атомы марганца находятся в ионизированном состоянии ( $Mn^+$ ,  $Mn^{++}$ ). Показано, что в зависимости от зарядового состояния атомов марганца структура таких кластеров  $[(Mn)_4^{+n}(B)^{-1}]^{+(n-1)}$  (значение  $n$  меняется от 4 до 8), и их размер составляет от 1,5 до 3 нм. Такие кластеры не только являютсяnanoструктурой в решетке кремния, но и могут действовать как многозарядные центры, заряд которых меняется от  $[(Mn)^{+4}(B)^{-1}]^{+3}$  до  $[(Mn)_4^{+8}(B)]^{+7}$ .

На основе монокристаллического кремния  $p$ -типа с  $\rho \sim 5$  Ом·см, управляя условиями диффузии, были изготовлены образцы с удельными сопротивлениями  $\rho = 10^2 \div 10^5$  Ом·см, как компенсированные  $p$ - так и перекомпенсированные  $n$ -типа.

Методом эффекта Холла определены основные электрофизические параметры полученных образцов, а также положения уровня Ферми при  $T=300$  К (таблица 1).

Таблица 1- Основные электрофизические параметры  $Si<B,Mn>$  с нанокластерами атомов марганца.

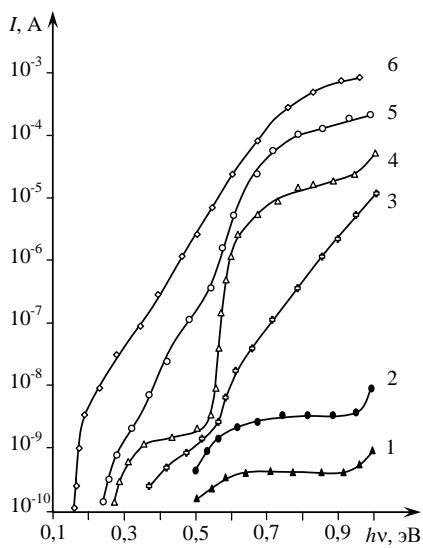
№	Тип	$\rho$ , Ом·см	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	$N_{n, p}$ , см <sup>-3</sup>	$F$ , эВ
1	$p$	$2 \cdot 10^2$	213	$1,46 \cdot 10^{14}$	$E_V + 0,300$
2	$p$	$8 \cdot 10^2$	90	$8,68 \cdot 10^{13}$	$E_V + 0,314$
3	$p$	$8 \cdot 10^3$	63	$1,24 \cdot 10^{13}$	$E_V + 0,364$
4	$p$	$2 \cdot 10^4$	80	$3,9 \cdot 10^{12}$	$E_V + 0,394$
5	$p$	$4 \cdot 10^4$	75	$1,98 \cdot 10^{12}$	$E_V + 0,412$
6	$p$	$2 \cdot 10^5$	188	$1,66 \cdot 10^{11}$	$E_V + 0,476$
7	$n$	$10^4$	1218	$5,13 \cdot 10^{11}$	$E_C - 0,451$
8	$n$	$4 \cdot 10^4$	1012	$2,47 \cdot 10^{11}$	$E_C - 0,470$

В результате исследования состояния атомов марганца в решетке методом ЭПР установлено, что в образцах  $p$ -типа с положением уровня Ферми  $F = E_V + 0,3$  наблюдаются спектры, связанные с нанокластерами

атомов марганца. В перекомпенсированных образцах *n*-типа, легированных марганцем, независимо от положения уровня Ферми такие спектры не были обнаружены, что свидетельствует об отсутствии или очень небольшой концентрации нанокластеров.

Фотоэлектрические свойства полученных образцов были исследованы с помощью ИКС-21 в интервале  $T=77\div300$  К, при одинаковых условиях. Чтобы избежать попадания фоновых освещений, перед окошком криостата были поставлены фильтры из полированного монокристаллического кремния толщиной 300 мкм.

На рисунке 1 представлены спектральные зависимости фотопроводимости (ФП) образцов с различными значениями положения уровня Ферми как *n*- так и *p*-типа. Как видно из рисунка, в образцах *p*-типа с  $\rho=(6\div8)\cdot10^3$  Ом·см, в которых были обнаружены нанокластеры с максимальной концентрацией ( $N\sim7\cdot10^{14}$  см<sup>-3</sup>), фото ответ начинается с  $h\nu=0,16$  эВ и с ростом энергии падающих фотонов фототок непрерывно и скачкообразно увеличивается, и имеет максимальное значение при  $h\nu=0,75\div0,8$  эВ, т.е. в таких образцах наблюдается очень высокая примесная ФП в области  $h\nu=0,16\div0,8$  эВ ( $\lambda=1,55\div8$  мкм) (кривая- 6). При смещении положения уровня Ферми вверх, т.е. с увеличением удельного сопротивления, начало фото ответа смещается в сторону высоких энергий фотонов, а в образцах практически сохраняется высокий уровень фоточувствительности в исследуемой области спектра (кривые- 3÷5). Таким образом, установлено, что меняя положение уровня Ферми в образцах *p*-типа можно управлять началом фото ответа в интервале  $h\nu=0,16\div0,4$  эВ. Следует отметить, что обнаруженный фото ответ в образцах при  $h\nu=0,16$  эВ (8 мкм), с одной стороны, показывает существенное расширение спектральной области фоточувствительности в кремнии, которое практически невозможно получить в области  $T>100$  К с другими примесными атомами. Это позволяет создать высокочувствительные фотоприемники для работы в области  $\lambda=0,55\div8$  мкм. С другой стороны, аномально максимальная фоточувствительность таких образцов в области  $\lambda=1,55$  мкм ( $h\nu=0,8$  эВ), позволяет создать очень чувствительные фотоприемники необходимые для волоконно-оптических линий связи и оптоэлектронных систем, в которых обычно используются лавинно-пролетные диоды на основе соединений  $A^{IV}B^V$  со сложной структурой.



1-  $\rho=10^4$  Ом·см *n*-тип, 2-  $\rho=4 \cdot 10^4$  Ом·см *n*-тип,  
 3-  $\rho=2 \cdot 10^5$  Ом·см *p*-тип,  
 4-  $\rho=4 \cdot 10^4$  Ом·см *p*-тип, 5-  $\rho=2 \cdot 10^4$  Ом·см *p*-  
 тип, 6-  $\rho=8 \cdot 10^3$  Ом·см *p*-тип.

Рисунок 1- Спектральная зависимость фотопроводимости в  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  от положения уровня Ферми.

Также следует отметить тот факт, что атомы марганца в кремнии создают донорные уровни с энергией ионизации  $E_1 = E_C - 0,27$  и  $E_2 = E_C - 0,5$  эВ. Поскольку исследуемые образцы являются *p*-типа, они не могут участвовать в области  $h\nu = 0,16 \div 0,4$  эВ. Тогда возникает вопрос – какова природа энергетических уровней, обеспечивающих высокую фоточувствительность в области  $h\nu = 0,16 \div 0,8$  эВ? Нам кажется, что формирование нанокластеров существенно меняет энергетические структуры электронов в зависимости от зарядового состояния таких кластеров. Зависимость начала фотоответа от положения уровня Ферми в образцах кремния с многозарядными центрами представлена на рисунке 1; также здесь представлена спектральная область чувствительности в зависимости от положения уровня Ферми и относительной чувствительности при наличии фото ответа с  $h\nu = 0,8$  эВ. Эти данные позволяют нам определить функциональные возможности образцов с центрами с различной кратностью заряда для создания фотоприемников, а также оценить роль зарядовых состояний центров.

В образцах *n*-типа фото ответ начинается при  $h\nu = 0,5$  эВ, в таких образцах независимо от удельного сопротивления примесная ФП в исследуемой области спектра существенно меньше, чем в образцах *p*-типа и она очень слабо зависит от энергии фотонов в области  $h\nu = 0,16 \div 0,8$  эВ. Эти результаты еще раз показывают, что формирование нанокластеров многозарядных центров позволяет существенно увеличить спектральную область и фото чувствительности кремния в диапазоне  $h\nu = 0,16 \div 0,8$  эВ.

Таким образом, формирование многозарядных нанокластеров существенно изменяет структуру энергетических состояний атома марганца в кремнии. Вследствие этого вместо двух донорных

энергетических уровней  $E_1=E_C-0,27$ ,  $E_2=E_C-0,5$  эВ, которые обычно образуются, появляются более глубокие спектры донорных энергетических уровней атомов марганца в интервале  $E=E_V+(0,16\div0,4)$  эВ. Поэтому, в зависимости от концентрации и зарядового состояния кластеров, можно изменить начало фото отвeta  $h\nu=0,16\div0,5$  эВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., and Zikrillaev N.F. Current–Voltage Behavior of Silicon Containing Nanoclusters of Manganese Atoms // Inorganic Materials, 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 325–329.
2. Илиев Х., Усманов Ж. Разработка перспективных солнечных элементов на основе полупроводниковых материалов. Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве. 25-26 сентября 2020 года. 434 ст. ISBN 978-9943-6708-9-1.
3. Усмонов Ж.И. Комплексная автоматизация водоканалов – путь к ресурсосбережению. ISSN 2311-2158. The Way of Science.2019.№ 5 (63).Vol.II.
4. Усманов Ж.И. Повышения эффективности кремниевых солнечных элементов на основе формирования кластеров атомов никеля. юность и знания – гарантия успеха -2018. 5-й Международной молодежной научной конференции (20 – 21 сентября 2018 года) ISBN 978-5-9907371-2-9.
5. Усманов Ж.И. Разработка фотоэлементов на основе кремния с нанокластерами атомов марганца. современные материалы, техника и технологии. ISSN 2411-9792. №5 (13) 2017 год.
6. Бахадирханов М.К., Исамов С.Б, Усмонов Ж.И. Аномальные фотоэлектрические явления в кремнии с многозарядными нанокластерами. Оптическим и фотоэлектрическим явлени- ям в полупроводниковых микро- и нано- структурах. 2020 год.
7. Ж.И.Усманов. Новые пути повышения эффективности солнечных элементов на основе кремния. Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. 239-242 ст. 2017 г
8. Ж.И.Усмонов Изучение влияния многократно заряженных центров на время жизни носителей заряда в кремнии с многозарядными центрами. issn 2311-2158. The Way of Science. 2020. № 2 (72).