

УДК 621.315.592

**ТЕНЗОСВОЙСТВА КРЕМНИЯ С НАНОКЛАСТЕРАМИ**

*Турсынбаев Сабирбай Аўесбай угли\**, докторант Нукусского государственного педагогического института, г. Нукус, ул. П. Сейтова, e-mail: [sabirbay\\_fizika@mail.ru](mailto:sabirbay_fizika@mail.ru)

*Камалов Амангелди Базарбаевич*, д.ф.-м.н., доцент, декан факультета «Физика-математика» Нукусского государственного педагогического института, г. Нукус, ул. П. Сейтова. e-mail: [akamalov@mail.ru](mailto:akamalov@mail.ru)

*Илиев Халмурат Миджитович*, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой Ташкентского государственного технического университета, г. Ташкент, Узбекистан, e-mail: [xolmurod.iliev@tdtu.uz](mailto:xolmurod.iliev@tdtu.uz)

*Тачилин Станислав Анатольевич*, к.т.н., доцент Ташкентского государственного технического университета, г. Ташкент, Узбекистан, e-mail: [tachilin-s@yandex.ru](mailto:tachilin-s@yandex.ru)

*Кушиев Гиёсиддин Абдивахоб угли*, ассистент преподаватель Ташкентского государственного технического университета, г. Ташкент, Узбекистан, e-mail: [gkushiyev@inbox.ru](mailto:gkushiyev@inbox.ru)

*Аннотация.* В работе приведены результаты исследования тензoeлектрических свойств кремния в объеме, которого были сформированы нанокластеры примесных атомов марганца. Для увеличения величины деформации была разработана специальная геометрическая форма кристалла. Для исследования тензoeлектрических свойств образцов была сконструирована и собрана специальная установка, которая позволяет проводить измерения, как в темноте, так и при освещении.

*Ключевые слова:* Полупроводник, монокристаллический кремний, давление, нанокластер, тензодатчик, марганец, диффузия, темновой ток, температура.

**TENSE PROPERTIES OF SILICON WITH NANOCCLUSERS**

*Tursinbaev Sabirbay Awesbay ugli\**, Doctoral Student of Nukus State Pedagogical Institute, Nukus. e-mail: [sabirbay\\_fizika@mail.ru](mailto:sabirbay_fizika@mail.ru)

*Kamalov Amangeldi Bazarbaevich*, Dr. of Phys. and Math.Sc., Ass. Prof., Dean of the Faculty of Physics and Mathematics, Nukus State Pedagogical Institute, Nukus. e-mail: [akamalov@mail.ru](mailto:akamalov@mail.ru)

*Iliev Halmurat Mijitovich*, Dr. of Phys. and Math.Sc., Professor, Head of the Department of Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: [xolmurod.iliev@tdtu.uz](mailto:xolmurod.iliev@tdtu.uz)

*Tachilin Stanislav Anatolevich*, Ph.D., Ass. Prof. of Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan, e-mail: [tachilin-s@yandex.ru](mailto:tachilin-s@yandex.ru)

*Kushiyev Giyosiddin Abdivaxob ugli*, Assistant teacher of Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan, e-mail: [gkushiyev@inbox.ru](mailto:gkushiyev@inbox.ru)

*Annotation.* The paper presents studies of the tensoelectric properties of silicon in the volume of which nanoclusters of impurity manganese atoms were formed. To increase the strain, a special geometric shape of the crystal was developed. To study the tensoelectric properties of the samples, a special installation was designed and assembled, which allows measurements to be made both in the dark and under lighting.

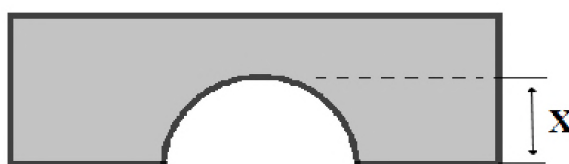
**Key words:** *Semiconductor, monocrystalline silicon, pressure, nanocluster, load cell, manganese, diffusion, dark current, temperature.*

### 1. Введение

Тензоэлектрические свойства полупроводников, легированных различными примесными атомами, были достаточно хорошо изучены во многих работах. Однако тензоэлектрические свойства кремния с нанокластерами примесных атомов марганца ещё практически не исследовались. Такие исследования представляют большой интерес для определения влияния давления на состояние и стабильность кластеров примесных атомов марганца, что позволит создать более чувствительные датчики на основе таких материалов, так как примеси с нанокластерами марганца обладают рядом уникальных физических свойств, которыми не обладает исходный материал [1-3]. В данной работе приведены результаты исследования давления на электрические свойства кремния с нанокластерами атомов марганца.

### 2. Методика эксперимента

В отличие от существующих методов исследования тензосвойств различных полупроводниковых материалов, в нашей работе были разработаны и подготовлены образцы специальной формы показанной на рисунке 1. Такая форма изготовления образцов позволяет исследовать не только особенности тензосвойств при изгибе, но и также установить тензочувствительность образцов в зависимости от расположения и распределения кластеров атомов марганца [4].



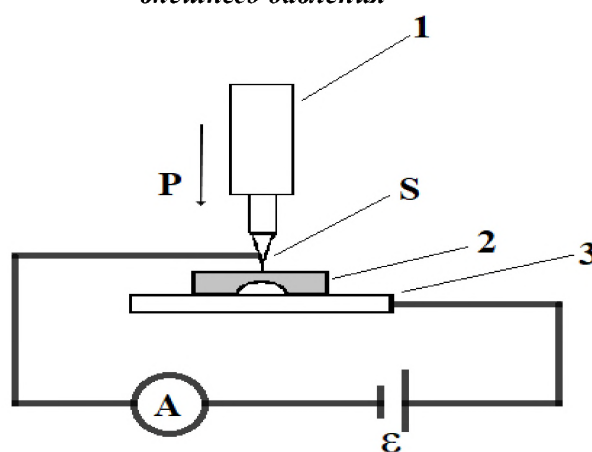
**Рис. 1** Разработанный образец специальной формы

Как известно нанокластеры атомов марганца состоят из четырёх ионов атомов марганца  $Mn^{++}$  расположенных вокруг атома бора, поэтому его влияние на электрические, фотоэлектрические и магнитные свойства существенно зависят от расстояния между ионами  $Mn^{++}$ , а также нанокластерами  $Mn^{++}B^-$  [5-6]. Этим расстоянием можно управлять именно локальным давлением в область, где находятся нанокластеры.

Для получения достоверных и воспроизводимых результатов при измерении параметров кремния с наноструктурами примесных атомов марганца под влиянием внешнего механического давления была разработана изготовлена специальная оригинальная установка, позволяющая синхронно (плавно) изменять значение давления как при отсутствии так при наличии света, внешний вид которой показан на рисунке 2. Созданная установка позволяет изменять давление от  $10^5$  Па до  $10^8$  Па. Исследование тензосвойств образцов проводилось с использованием электрической схемы, показанной на рис. 3 [7]. Здесь: 1- тонкий остроконечный зонд, 2- исследуемый образец, 3- плоская поверхность для токопроводящего материала. (S- площадь тонкого остроконечного зонда, P- величина давления на образец).



*Рис. 2. Внешний вид установки для измерения параметров образцов при воздействии внешнего давления*



*Рис. 3. Конструкция и электрическая схема изготовленной установки для измерения параметров кремния с наноструктурами примесных атомов марганца при воздействии внешнего механического давления.*

### 3. Экспериментальные результаты

В качестве исходного материала для диффузии атомов марганца был выбран монокристаллический кремний р-типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , с концентрацией бора  $N_B \sim 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Диффузия проводилась в запаянных ампулах в интервале температур  $T = 1150\text{--}1170 \text{ }^\circ\text{C}$  в течении  $t = 5\text{--}20$  минут. После диффузии пластины резко охлаждались в масле со скоростью  $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ . Далее пластины очищались механической и химической обработкой и шлифовались до толщины  $x \sim 300 \text{ мкм}$ , как показано на рисунке 1. Формирование нанокластеров атомов марганца в решётке кремния было исследовано методом ЭПР. Размер образцов был  $1 \times 4 \times 8 \text{ мм}$  [5-6,8].

Зависимость изменения темнового тока от внешнего давления исследовалась при подаче от источника питания постоянного напряжения  $5 \text{ В}$ , с увеличением значения величины давления измерялось значение тока, изменение параметров показано в таблице 1 и на рисунке 4. Было определено, что при внешнем воздействии давления увеличивается значение тока протекающего через образец. Исследования были проведены при комнатной температуре [9-10].

Таблица 1

Зависимость изменения значения тока, протекающего через образец  
от величины внешнего давления

№	Давление $P$ , [ $\times 10^7 \cdot \text{Pa}$ ]	Темновой ток $I_T$ , [ $\mu\text{A}$ ]	Ток при освещении $I_{oc}$ , [ $\mu\text{A}$ ]
1	0,14	1,29	3,21
2	0,27	1,38	3,38
3	0,53	1,41	3,55
4	1,02	1,54	3,81
5	1,48	1,61	3,98
6	3,10	1,81	4,52
7	5,37	1,99	5,2
8	6,27	2,07	5,44
9	7,98	2,24	5,92

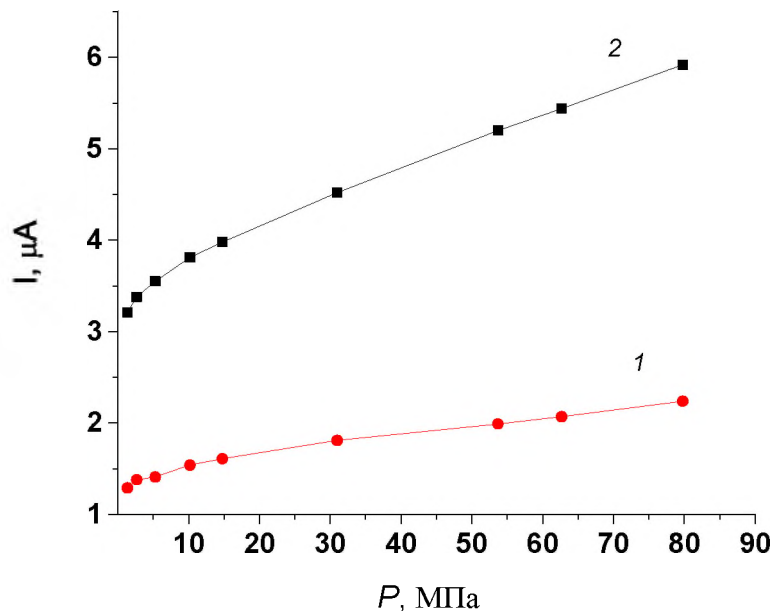


Рис. 4. Увеличение тока протекающего через образец от величины внешнего давления (1- образец, находящийся в темноте, 2-образец освещённый светом)

#### 4. Обсуждение результатов

В таблице 1 также приведено относительное изменение значения тока протекающего через образец в зависимости от величины внешнего давления. Изменение тока при изменении давления в интервале от  $1,4 \cdot 10^6$  Па до  $8 \cdot 10^7$  Па составляет почти в 2 раза. Как видно из полученных результатов образцы с нанокластерами примесных атомов марганца действительно обладают высокой тензочувствительностью. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что кремний с нанокластерами примесных атомов марганца является перспективным материалом для создания высокочувствительных тензодатчиков.

## 5. Заключение

Установлено, что в отличие от обычных полупроводниковых материалов, в кремнии с нанокластерами атомов марганца наблюдается достаточно высокая тензочувствительность при комнатной температуре которую трудно объяснить существующей теорией. Полученные данные позволяют предполагать, что такая высокая тензочувствительность в полученном материале связана с изменением состояния нанокластеров атомов марганца при наличии давления. Эти данные показывают, что кремний с нанокластерами атомов марганца может служить перспективным материалом для создания нового класса тензодатчиков. Управляя концентрацией и зарядовым состоянием нанокластеров атомов марганца можно существенно увеличить тензочувствительность таких материалов.

Авторы выражают благодарность академику М.К. Бахадирханову за обсуждение полученных результатов.

## Литература

1. Полякова А.А. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. // Москва, Энергия. 1979. С. 168.
2. Ильинская Л.С., Подмарьков А. Полупроводниковые тензодатчики. //Москва, Энергия. 1966. Вып. 189. С. 120.
3. Абдураимов А., Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г., Химматкулов О. Динамическая проводимость компенсированного кремния при всестороннем гидростатическом сжатии // Физика и техника полупроводников. Россия, 1993. Т. 27. Вып. 3. С. 516-519.
4. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Мавлянов Г.Х., Илиев Х.М., Исамов С.Б. Фотопроводимость кремния с нанокластерами атомов марганца // Микроэлектроника. Москва, 2010. Т. 39. Вып. 6. С. 426-429.
5. Bakhadyrkanov 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. Russia. 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479–483.
6. Yunusov Z. A., Yuldashev Sh. U., Igamberdiev Kh. T., Kwon Y. H., Kang T. W., Bakhadyrkanov M. K., Isamov S. B. and. Zikrillayev N. F. Ferromagnetic States of p-type Silicon Doped with Mn // Journal of the Korean Physical Society. Korea. 2014. Vol. 64, No. 10, pp. 1461-1465.
7. Моллаев А. Ю., Арсланов Р. К., Камилов И. К., Арсланов Т. Р., Залибеков У. З., Федорченко И. В. Влияние высокого давления на электросопротивление и изменение объема в ферромагнитных полупроводниках  $A^{II}B^{IV}CV: Mn$  // Журнал Неорганической химии. Москва, 2015. Т. 60. Вып. 8, С. 1095-1099.
8. Баринов И.Н. Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления на основе КНД\_структуры // Компоненты и технологии. Москва, 2009. № 5, С. 12-15.
9. Прокудин С.В., Усеинов А.С. Наблюдение особенностей фазовых переходов в кремнии при высоком локальном давлении в условиях индентирования. // Материалы электронной техники. Москва, 2012. № 1. С. 17-21.
10. Илюхин А.В., Марсов В.И., Колбасин А.М., Беляков А.Б. Полупроводниковые датчики давления на кремниевой основе// Институт Государственного управления, права и

инновационных технологий (ИГУПИТ). Интернет-журнал «Науковедение» 2013. №4  
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluprovodnikovye-datchiki-davleniya-na-kremnievoy-osnove>

### References

1. *Poljakova A.A.* Deformacija poluprovodnikov i poluprovodnikovyh priborov [Deformation of semiconductors and semiconductor devices]. Moskva, Jenergija [Energy]. 1979. S. 168. (In Russian).
2. *Il'inskaja L.S., Podmar'kov A.* Poluprovodnikovye tenzodatchiki [Semiconductor load cells]. Moskva, Jenergija [Energy]. 1966. Vyp. 189. S. 120. (In Russian).
3. *Abduraimov A., Zajnabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Tursunov I.G., Himmatkulov O.* Dinamicheskaja provodimost' kompensirovannogo kremnija pri vsestoronnem gidrostaticheskom szhatii [Compensated Silicon Dynamic Conductivity under Full Hydrostatic Compression]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Semiconductor Physics and Technology]. Rossiya, 1993. T. 27. Vyp. 3. S. 516-519. (In Russian).
4. *Bahadyrhanov M.K., Ajupov K.S., Mavljanov G.H., Iliev H.M., Isamov S.B.* Fotoprovodimost' kremnija s nanoklasterami atomov marganca [Photoconductivity of silicon with nanoclusters of manganese atoms]. Mikroelektronika [Microelectronics]. Moskva, 2010. T. 39. Vyp. 6. S. 426-429. (In Russian).
5. *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. Russia. 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479–483. (In English).
6. *Yumusov Z. A., Yuldashev Sh. U., Igamberdiev Kh. T., Kwon Y. H., Kang T. W., Bakhadyrkhanov M. K., Isamov S. B. and. Zikrillaev N. F.* Ferromagnetic States of p-type Silicon Doped with Mn. Journal of the Korean Physical Society. Korea. 2014. Vol. 64, No. 10, pp. 1461-1465. (In English).
7. *Mollaev A. Ju., Arslanov R. K., Kamilov I. K., Arslanov T. R., Zalibekov U. Z., Fedorchenko I. V.* Vlijanie vysokogo davlenija na jelektrosoprotivlenie i izmenenie obema v ferromagnitnyh poluprovodnikah AIBIV CV:Mn [Effect of high pressure on electrical resistance and volume change in AIBIV CV: Mn ferromagnetic semiconductors]. Zhurnal Neorganicheskoj himii [Inorganic chemistry]. Moskva, 2015. T. 60. Vyp. 8, S. 1095-1099. (In Russian).
8. *Barinov I.N.* Poluprovodnikovye tenzorezistivnye datchiki davlenija na osnove KND\_struktury [Semiconductor strain gauge pressure sensors based on KND\_structure]. Komponenty i tehnologii [Components and Technology]. Moskva, 2009. № 5, S. 12-15. (In Russian).
9. *Prokudin S.V., Useinov A.S.* Nabljudenie osobennostej fazovyh perehodov v kremnii pri vysokom lokal'nom davlenii v uslovijah indentirovanija [Observation of the features of phase transitions in silicon at high local pressure under indentation conditions]. Materialy jelektronnoj tehniki [Electronic Materials]. Moskva, 2012. № 1. S. 17-21. (In Russian).
10. *Iljuhin A.V., Marsov V.I., Kolbasin A.M., Beljakov A.B.* Poluprovodnikovye datchiki davlenija na kremnievoj osnove [Silicon-based semiconductor pressure sensors]. Institut Gosudarstvennogo upravlenija, prava i innovacionnyh tehnologij (IGUPIT). Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2013. №4 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluprovodnikovye-datchiki-davleniya-na-kremnievoy-osnove> (In Russian).

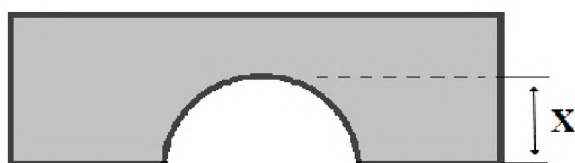
*The text of the article was translated by Editorial Team of journal of “Semiconductor Physics and Microelectronics”. For more information contact: ispm\_uz@mail.ru*

## 1. Introduction

The piezoelectric properties of semiconductors doped with various impurity atoms have been fairly well studied in many works. However, the piezoelectric properties of silicon with nanoclusters of impurity manganese atoms have not yet been practically studied. Such studies are of great interest for determining the effect of pressure on the state and stability of clusters of impurity manganese atoms, which will make it possible to create more sensitive sensors based on such materials, since impurities with manganese nanoclusters possess a number of unique physical properties that the starting material does not possess [1-3]. This paper presents the results of a study of the pressure on the electrical properties of silicon with nanoclusters of manganese atoms.

## 2. Experimental technique

In contrast to the existing methods for studying the tensile properties of various semiconductor materials, in our work we developed and prepared samples of a special form shown in Figure 1. This form of manufacturing samples allows us to study not only the features of tensile properties during bending, but also to establish the strain sensitivity of the samples depending on the location and distribution of clusters of manganese atoms [4].



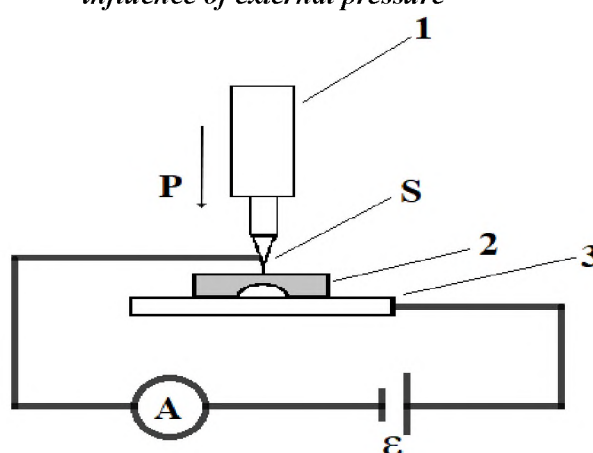
*Fig. 1 Designed sample of special shape*

As is known, manganese atom nanoclusters consist of four ions of  $Mn^{++}$  manganese atoms located around a boron atom; therefore, its effect on electrical, photoelectric and magnetic properties substantially depends on the distance between  $Mn^{++}$  ions and  $Mn^{++}$  B- nanoclusters [5-6]. This distance can be controlled precisely by the local pressure in the region where the nanoclusters are located.

To obtain reliable and reproducible results when measuring the parameters of silicon with nanostructures of impurity manganese atoms under the influence of external mechanical pressure, a special original setup was developed. It allows synchronously (smoothly) changing the pressure value as in the absence of light, the appearance of which is shown in Figure 2 The created installation allows you to change the pressure from  $10^5$  Pa to  $10^8$  Pa. The study of the tensile properties of the samples was carried out using the electrical circuit shown in pic. 3 [7]. Here: 1- a thin pointed probe, 2- an investigated sample, 3- a flat surface for a conductive material. (S - the area of the thin pointed probe, P - the pressure on the sample).



*Fig. 2. Appearance of the installation for measuring the parameters of samples under the influence of external pressure*



*Fig. 3. The design and electrical circuit of the manufactured installation for measuring the parameters of silicon with nanostructures of impurity manganese atoms under the influence of external mechanical pressure.*

### 3. Results and discussion

Single-crystal p-type silicon with a specific resistance of  $\rho = 3 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$  and a boron concentration of  $N_B \sim 7 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  was chosen as the starting material for the diffusion of manganese atoms. Diffusion was carried out in sealed ampoules in the temperature range  $T = 1150\text{-}1170^\circ \text{ C}$  for  $t = 5\text{-}20$  minutes. After diffusion, the plates were rapidly cooled in oil at a rate of  $200^\circ \text{ C/s}$ . Further, the plates were cleaned by mechanical and chemical treatment and polished to a thickness of  $x \sim 300 \mu\text{m}$ , as shown in fig 1. The formation of manganese atom nanoclusters in a silicon lattice was studied by EPR. The size of the samples was  $1 \times 4 \times 8 \text{ mm}$  [5-6.8].

The dependence of the dark current on external pressure was studied when a constant voltage of  $5 \text{ V}$  was applied from the power source, the current was measured with increasing pressure, the parameters are shown in Table 1 and Figure 4. It was determined that the current flow increases with external pressure through the sample. Studies were carried out at room temperature [9-10].



Table 1

The dependence of the change in the value of the current flowing through the sample on the value of external pressure

№	Pressure P, [x10 <sup>7</sup> ·Pa]	Dark current I <sub>D</sub> , [μA]	Lighting Current I <sub>L</sub> , [μA]
1	0,14	1,29	3,21
2	0,27	1,38	3,38
3	0,53	1,41	3,55
4	1,02	1,54	3,81
5	1,48	1,61	3,98
6	3,10	1,81	4,52
7	5,37	1,99	5,2
8	6,27	2,07	5,44
9	7,98	2,24	5,92

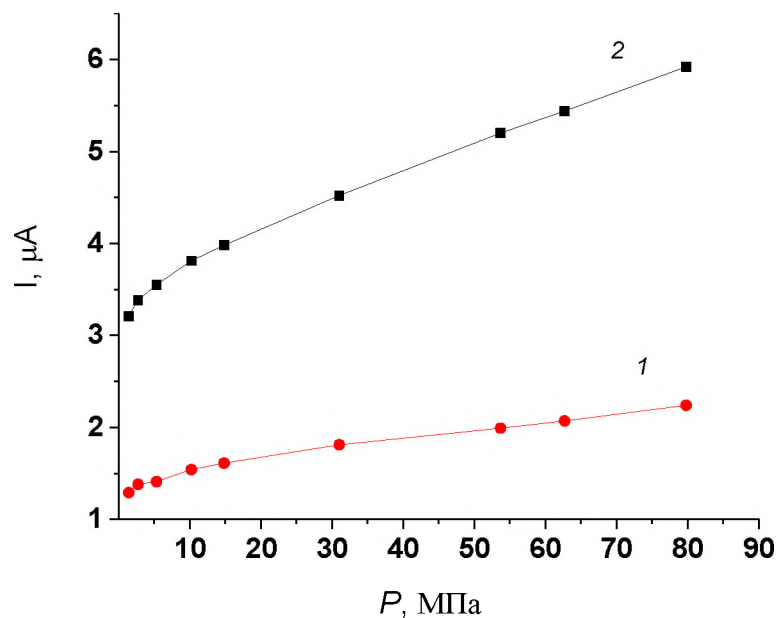


Fig. 4. The increase in the current flowing through the sample from the magnitude of the external pressure (1- sample in the dark, 2- sample illuminated by light)

#### 4. Discussion of results

Table 1 also shows the relative change in the value of the current flowing through the sample, depending on the magnitude of the external pressure. The change in current with a change in pressure in the range from  $1.4 \cdot 10^6$  Pa to  $8 \cdot 10^7$  Pa is almost 2 times. As can be seen from the results obtained, the samples with nanoclusters of impurity manganese atoms really have a high sensitivity. Based on the results obtained, it can be concluded that silicon with nanoclusters of impurity manganese atoms is a promising material for creating highly sensitive strain gauges.

#### 5. Conclusion

It was found that, in contrast to conventional semiconductor materials, in silicon with nanoclusters of manganese atoms, a rather high strain sensitivity at room temperature is observed, which is difficult to explain with the existing theory. The data obtained suggest that such a high

strain sensitivity in the obtained material is associated with a change in the state of nanoclusters of manganese atoms in the presence of pressure. These data show that silicon with nanoclusters of manganese atoms can serve as a promising material for creating a new class of strain gauges. By controlling the concentration and charge state of manganese atom nanoclusters, one can significantly increase the sensitivity of such materials.

The authors are grateful to Academic M.K. Bahadirkhanov for discussing the results.