

# Влияние освещенности и температуры на тензосвойства кремния с нанокластерами атомов марганца

© С.А. Турсынбаев

Нукусский государственный педагогический институт,  
230100 Нукус, Узбекистан

E-mail: sabirbay\_fizika@mail.ru

Поступила в Редакцию 3 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 14 февраля 2022 г.

Принята к публикации 14 февраля 2022 г.

Показано, что тензосвойства кремния с нанокластерами атомов марганца существенно отличаются от тензосвойств обычных полупроводников. Обнаружено, что повышение температуры и освещения существенно увеличивает тензочувствительность материала. Полученные результаты объясняются изменением энергетического спектра электронов как в нанокластерах атомов марганца, так и в сформированных нанокластерами мини-зонах в таком материале.

**Ключевые слова:** давление, тензосвойства, кремний, температура, освещенность.

DOI: 10.21883/FTP.2022.06.52590.9810

## 1. Введение

Тензоэлектрические свойства твердотельных материалов в основном зависят от кристаллической структуры и вида связи между атомами [1–4]. При этом также необходимо учесть влияние внешних воздействий — температуры, магнитного и электрического поля во время измерения [5–7]. Большой интерес представляет изучение влияния давления в несовершенных кристаллах, у которых в объеме специально были сформированы кластеры чужеродных атомов. С другой стороны, такие исследования могут выявлять механизмы формирования кластеров и их устойчивость.

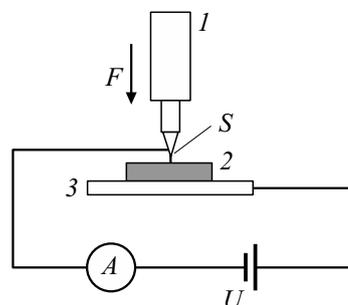
В данной работе в качестве объекта исследования был выбран монокристаллический кремний, который является основным материалом современной микро- и наноэлектроники. Авторами работ [8,9] была разработана низкотемпературная технология получения нанокластеров примесных атомов диффузионным способом [10,11] в объеме кремния. Наличие кластеров примесных атомов в решетке кремния было подтверждено методами ЭПР и АСМ [12–14].

К настоящему времени разработаны различные тензодатчики с широкими функциональными возможностями. И можно утверждать, что разработчиками были использованы все возможные свойства полупроводниковых материалов, легированных различными примесными атомами. Для создания высокочувствительных тензодатчиков необходимы новые полупроводниковые материалы [15] или новые физические явления [16]. Для этих материалов представляет большой научный и практический интерес исследование комплексного влияния давления, температуры и освещения на изменение их параметров, в первую очередь на проводимость [17,18].

## 2. Методика эксперимента

В качестве исходного материала был выбран кремний *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (КДБ-3), с концентрацией кислорода  $N \sim 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Диффузия марганца проводилась в запаянных ампулах в интервале температур  $T = 1050\text{--}1100^\circ\text{C}$  в течение  $t = 5\text{--}20$  мин. После диффузии пластины охлаждались в масле со скоростью  $200^\circ\text{C}/\text{с}$ . Далее пластины подвергались шлифовке для удаления силицидов и травились в травителе  $\text{HF} + \text{HNO}_3$  [19].

Для исследования влияния давления на параметры полученных образцов была создана специальная установка [20], позволяющая осуществлять давление в локальной области образца для изучения его электрофизических свойств при различных температурах (рис. 1). Данный прибор позволяет получить результаты в области



**Рис. 1.** Конструкция и электрическая схема установки для измерения радиально-точечного давления на поверхность кремния: 1 — тонкий остроконечный зонд, 2 — исследуемый образец, 3 — плоская поверхность из токопроводящего материала.  $U$  — напряжение,  $S$  — площадь тонкого остроконечного зонда,  $F$  — сила давления ( $P = F/S$ ,  $P$  — величина давления на образец).

температур от комнатной до 100°C. Давление создается механическим способом — нажатием металлическим острием зонда. Установка позволяет получить сжатие в одноосном режиме на локальной области поверхности кремния с нанокластерами. При этом учитывается площадь кончика иглообразного зонда и сила, действующая на него. В качестве датчика освещения был использован фоторезистор. Это позволило получать люкс-паскальные характеристики.

### 3. Результаты и обсуждение

Было изучено влияние давления от  $5.16 \cdot 10^5$  до  $7.74 \cdot 10^7$  Па при 30, 40, 50, 70°C. Во время измерения падение напряжения на образцах было равно  $U = 10$  В.

В табл. 1 приведено относительное изменение тока в зависимости от приложенного значения давления при различных температурах, при отсутствии освещения. При этом результаты исследования показывают, что при повышении температуры в 2.3 раза коэффициент тензочувствительности  $\alpha$  увеличивается почти в 15 раз.

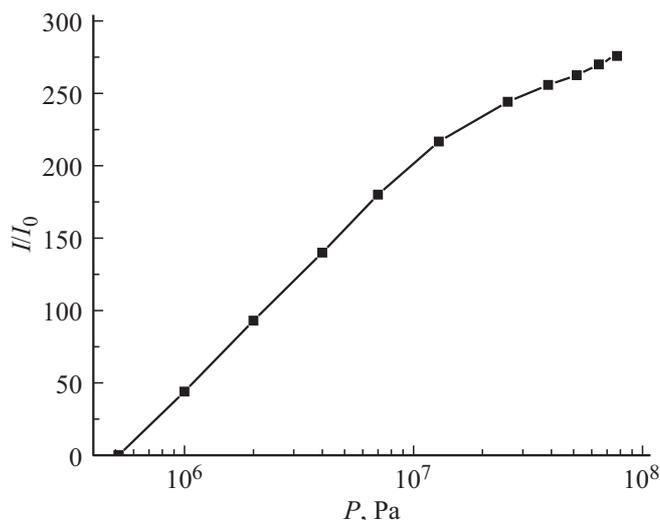
На рис. 2 представлено относительное изменение  $I/I_0$  в зависимости от давления. Установлено, что в зависимости относительного изменения тока  $I/I_0$  от давления  $P$  есть два ярко выраженных участка с различным коэффициентом тензочувствительности  $\alpha_1$ . На участке,

**Таблица 1.** Относительное изменение тока при воздействии давления при различных температурах в темноте

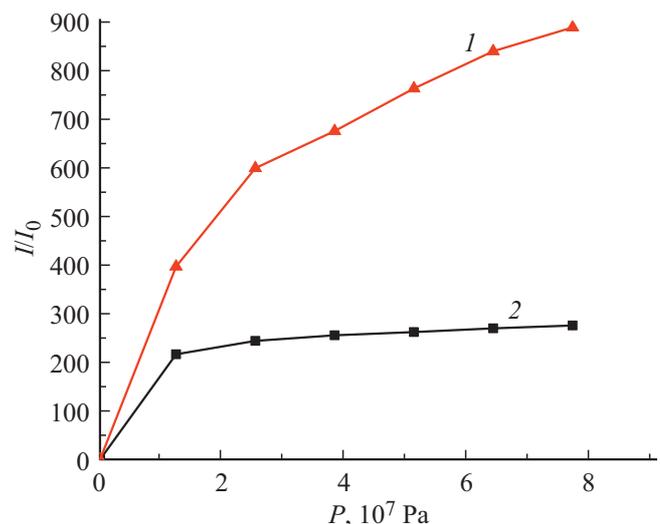
$P$ , Па	$I/I_0$ , ( $T = 30^\circ\text{C}$ )	$I/I_0$ , ( $T = 40^\circ\text{C}$ )	$I/I_0$ , ( $T = 50^\circ\text{C}$ )	$I/I_0$ , ( $T = 70^\circ$ )
$5.16 \cdot 10^5$	1	1	1	1
$1.29 \cdot 10^7$	3.16	4.06	6.56	8
$2.58 \cdot 10^7$	3.44	4.8	8.33	10.16
$3.87 \cdot 10^7$	3.55	5.14	9.21	11.33
$5.16 \cdot 10^7$	3.62	5.39	9.83	12.62
$6.45 \cdot 10^7$	3.7	5.59	10.53	13.7
$7.74 \cdot 10^7$	3.75	5.75	11.13	14.62

**Таблица 2.** Относительное изменение тока при воздействии давления при различных температурах при освещении 3000 люкс

$P$ , Па	$I/I_0$ , ( $T = 30^\circ\text{C}$ )	$I/I_0$ , ( $T = 40^\circ\text{C}$ )	$I/I_0$ , ( $T = 50^\circ\text{C}$ )	$I/I_0$ , ( $T = 70^\circ\text{C}$ )
$5.16 \cdot 10^5$	1	1	1	1
$1.29 \cdot 10^7$	4.97	5.35	6.61	8.25
$2.58 \cdot 10^7$	6.99	7.88	8.83	10.59
$3.87 \cdot 10^7$	7.75	8.95	10.01	11.86
$5.16 \cdot 10^7$	8.63	9.8	10.88	13.25
$6.45 \cdot 10^7$	9.39	10.69	12.03	14.44
$7.74 \cdot 10^7$	9.89	11.34	12.7	15.43



**Рис. 2.** Зависимость относительного изменения тока от давления при комнатной температуре (без освещения, при  $U = 10$  В).



**Рис. 3.** Зависимость отношения токов тензорезистора от давления при  $U = 10$  В (1 — при освещении 3000 люкс, 2 — без освещения), при  $T = 30^\circ$ .

где  $P$  изменяется от  $5 \cdot 10^5$  до  $7 \cdot 10^7$  Па, наблюдается очень высокая тензочувствительность ( $\alpha_1 = 11.79$ ). Во второй области давления  $P = 2 \cdot 10^7 - 10^8$  Па тензочувствительность меньше ( $\alpha_2 = 2.8$ ).

Очень интересные результаты были получены при освещении образцов. Установлено, что при освещении тензочувствительность растет, достигая 15.43 (табл. 2 и рис. 3). Однако известно [21,22], что в обычных полупроводниковых материалах наблюдается обратный эффект, т.е. освещение приводит к уменьшению тензочувствительности. Эта особенность исследуемых образцов показывает, что создан новый класс тензодатчиков с высокой чувствительностью.

**Таблица 3.** Коэффициент тензочувствительности при различных температурах в темноте и при освещенности 3000 люкс

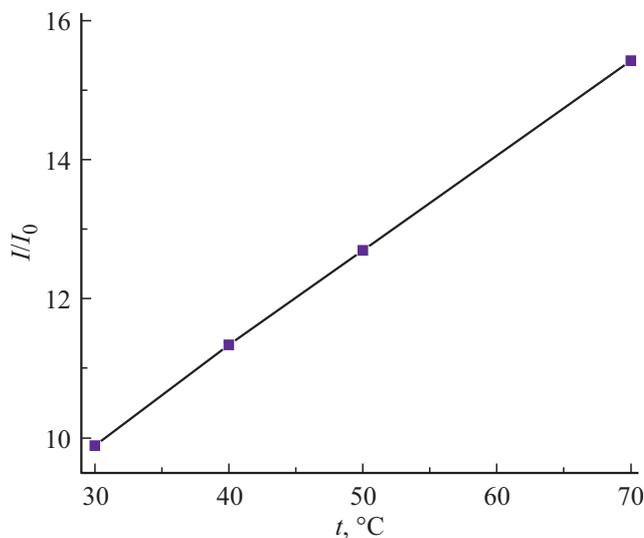
Температура	30°C	40°C	50°C	70°C
Без освещения				
$\alpha_1$ , мкА/МПа	2.02	3.36	6.97	10.8
$\alpha_2$ , мкА/МПа	0.11	0.36	1.14	2.46
При освещении				
$\alpha'_1$ , мкА/МПа	5.6	6.72	9	11.79
$\alpha'_2$ , мкА/МПа	1.39	1.86	1.99	2.8

Тензочувствительность  $\alpha$  изменяется от 2.02 до 10.8 в диапазоне температур 30–70°C в темноте и от 5.6 до 11.79 в диапазоне температур 30–70°C при освещении 3000 люкс.

В табл. 3 и на рис. 4 приведены коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  тензодатчиков как в темноте, так и при освещении при различных температурах.

Особенность тензосвойств полученных образцов — это существенное влияние температуры на тензочувствительность. В отличие от результатов работ [23,24] при повышении температуры тензочувствительность не уменьшается, а, наоборот, существенно увеличивается. Так, из табл. 3 видно, что тензочувствительность при повышении температуры от 30 до 70°C увеличивается в  $\sim 2.1$  раза в первой области и в 2.01 раза во второй.

Полученные результаты показывают, что кремний с нанокластерами действительно является принципиально новым материалом для создания высокочувствительных тензодатчиков. Такие свойства кремния с нанокластерами атомов марганца объясняются тем, что нанокластеры действуют как многозарядные квантовые точки, которые

**Рис. 4.** Зависимость отношения токов тензорезистора от температуры при  $U = 10$  В и давлении  $P = 7.74 \cdot 10^7$  Па (при освещении 3000 люкс).

создают вокруг себя не только достаточно сильное электрическое поле [25,26], но и существенно влияют на квантование энергетического спектра электронов в кластерах [27–29]. Сильные электрические поля, генерируемые многозарядными кластерами, приводят к пространственной локализации дырок проводимости и, соответственно, появлению энергетических мини-зон в запрещенной зоне кремния. Это приводит к существенному расширению спектра энергетических состояний в таких кристаллах [30].

Поэтому в отличие от обычных полупроводниковых материалов, в которых тензочувствительность напрямую связана с уменьшением ширины запрещенной зоны, и, соответственно, имеющих достаточно низкий тензочкоэффициент, в нашем материале под давлением существенно меняется весь спектр энергетических уровней. При этом вклад изменения энергии ионизации примесных уровней в нанокластерах и в мини-зонах может быть существенно больше [31,32], чем вклад, определяемый изменением  $E_g$ . Также следует отметить, что, изменяя уровень кратности заряда нанокластеров и концентрацию нанокластеров атомов марганца в решетке, можно управлять тензосвойствами материала.

## 4. Заключение

Тензосвойства кремния с нанокластерами атомов марганца существенно отличаются от тензосвойств обычных полупроводников. Установлено, что повышение температуры и освещения существенно увеличивает тензочувствительность материала. Данные результаты объясняются изменением энергетического спектра электронов как в нанокластерах атомов марганца, так и в сформированных нанокластерами мини-зонах в таком материале.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов, И.Г. Турсунов. ФТТ, **63** (5), 602 (2021).
- [2] М.К. Бахадырханов, Х.М. Илийев, Х.Ф. Зикриллаев. Письма ЖТФ, **24** (22), 23 (1998).
- [3] О.О. Маматкаримов, Р.Х. Хамидов. Письма ЖТФ, **29** (3), 24 (2003).
- [4] М.К. Бахадырханов, Х.Ф. Зикриллаев, Х.М. Илийев, А. Хамидов. Письма ЖТФ, **22** (12), 1 (1996).
- [5] А.А. Дружинин, А.П. Кутраков, Н.С. Лях-Кагуй, А.М. Вуйчик. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, **14** (4), 23 (2013).
- [6] В.И. Николаев, В.В. Шпейзман, М.В. Суханова. ФТТ, **50** (3), 417 (2008).
- [7] Г.А. Малыгин, В.И. Николаев, В.М. Крымков, А.В. Солдатов. Письма ЖТФ, **46** (6), 7 (2020).

- [8] M.K. Bakhadyrkhanov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov, Kh.M. Iliev, K.S. Ayupov, Z.M. Saparniyazova, S.A. Tachilin. *Inorg. Mater.*, **47** (5), 479 (2011).
- [9] Z.A. Yunusov, Sh.U. Yuldashev, Kh.T. Igamberdiev, Y.H. Kwon, T.W. Kang, M.K. Bakhadyrkhanov, S.B. Isamov, N.F. Zikrillaev. *J. Korean Phys. Soc.*, **64** (10), 1461 (2014).
- [10] M.K. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Иса-мов. *ФТП*, **44** (9), 1181 (2010).
- [11] M.K. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Г.Х. Мавлянов, Х.М. Илиев, С.Б. Исамов. *Микроэлектроника*, **39** (6), 426 (2010).
- [12] I.G. Tursunov. *Ukr. J. Phys.*, **62** (12), 1041 (2017).
- [13] И.Н. Баринов. *Компоненты и технологии*, **5**, 12 (2009).
- [14] А.Ю. Моллаев, Р.К. Арсланов, И.К. Камилов, Т.Р. Арсланов, У.З. Залибеков, И.В. Федорченко. *Журн. неорг. химии*, **60** (8), 1095 (2015).
- [15] М.М. Гаджиалиев, З.Ш. Пирмагомедов, Т.Н. Эфендиева. *ФТП*, **50** (8), 1075 (2016).
- [16] Г. Гулямов, А.Г. Гулямов. *ФТП*, **49** (6), 839 (2015).
- [17] О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов, И.Г. Турсунов. *ФТП*, **54** (5), 466 (2020).
- [18] В.В. Цыпленков, В.Н. Шагин. *ФТП*, **54** (9), 918 (2020).
- [19] M.K. Бахадырханов, А.А. Турсунов, Ш.И. Аскараров, Н.Ф. Зикриллаев, А. Абдураимов, Х.М. Илиев. *ФТП*, **20** (9), 1561 (1986).
- [20] С.А. Турсынбаев, А.Б. Камалов, Х.М. Илиев, С.А. Тачилин, Г.А. Кушиев. *Физика полупроводников и микроэлектроника*, **1** (4), 62 (2019).
- [21] С.А. Турсынбаев, А.Б. Камалов, С.Б. Исамов, С.А. Тачилин. *Приборы*, **259** (1), 19 (2022).
- [22] A.V. Kamalov, S.A. Tursinbaev, Kh.M. Piyevev, M.M. Shoabdurakhimova. *Scientific-technical J.*, **3** (5), 45 (2020).
- [23] А. Абдураимов, М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, А.А. Турсунов. *ФТП*, **19** (11), 2052 (1985).
- [24] Л.Г. Байкова, Т.И. Песина, Э.И. Мансырев, М.Ф. Киреевко, Л.В. Тихонова. *ЖТФ*, **87** (1), 39 (2017).
- [25] A.S. Muratov, A.V. Kamalov, S.A. Tursinbaev. *Science and Education in Karakalpakstan*, **17** (2), 4 (2021).
- [26] S. Zainabidinov, O. Mamatkarimov, I.G. Tursunov, O. Khimmatkulov. *Ukr. J. Phys.*, **62** (11), 957 (2017).
- [27] С.А. Турсынбаев, А.Б. Камалов, Х.М. Илиев, С.Б. Исамов, С.А. Тачилин. *Приборы*, **252** (6), 51, (2021).
- [28] М.М. Гаджиалиев, З.Ш. Пирмагомедов, Т.Н. Эфендиева. *ФТП*, **50** (8), 1075 (2016).
- [28] M.K. Bakhadir Khanov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov, K.S. Ayupov, Kh.V. Piiev, O.E. Sattorov, S.A. Tachilin. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **46** (3), 276 (2010).
- [30] M.K. Bakhadir Khanov, S.B. Isamov, Sh.N. Ibodullaev, S.V. Kovesnikov, N. Norkulov. *Techn. Phys. Lett.*, **46** (12), 1192 (2020).
- [31] И.Г. Проценко, Ю.А. Брусенцов. *Вопр. соврем. науки и практики*, **50** (1), 272 (2014).
- [32] В.В. Каминский, А.А. Молодых, Н.Н. Степанов, С.М. Соловьев, Н.М. Володин, В.А. Иванов. *Науч. приборостроение*, **21** (2), 53 (2011).

Редактор А.Н. Смирнов

## Influence of Illumination and Temperature on Tensoproperties of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms

S.A. Tursinbaev

Nukus State Pedagogical Institute,  
230100 Nukus, Uzbekistan

**Abstract** It is shown that the tensoproperties of silicon with nanoclusters of manganese atoms differ significantly from the tensoproperties of conventional semiconductors. Discovered has been found that an increase in temperature and illumination significantly increases the tensosensitivity of the material. The results obtained are explained by the change in the energy spectrum of electrons both in nanoclusters of manganese atoms and in mini-zones formed by nanoclusters in such a material.