

М.К. Бахадырханов, С.А. Валиев, С.С. Насриддинов, С.А. Тачилин

### ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ТЕРМОДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОКОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

*Ташкентский государственный технический университет,  
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Республика Узбекистан*

Без чувствительных и быстродействующих термодатчиков трудно представить успешное решение современных технических и экологических задач. При этом особый интерес представляет разработка термодатчиков, позволяющих дистанционно управлять и контролировать температуру объекта. Существующие термодатчики на основе полупроводниковых материалов практически исчерпали свои возможности по чувствительности и быстродействию [1]. Поэтому для создания нового поколения чувствительных датчиков следует использовать новые материалы или новые физические явления. В этом плане большой интерес представляют функциональные возможности сильнокомпенсированного полупроводника. В отличие от обычных полупроводников он обладает такой же концентрацией носителей заряда, как и собственный полупроводник (при  $T = 300$  К). В решетке таких полупроводников существует нелокальное экранирование ионов примесных атомов (в том числе двукратно и более ионизованных), концентрация которых в сотни или миллионы раз больше, чем концентрация равновесных носителей заряда ( $N_a^- \gg p_0$ ,  $N_d^{++} \gg n_0$ ). Эта разница существенно увеличивается при понижении температуры. В таких материалах отсутствует локальная электронейтральность и сама система находится в крайне неравновесном состоянии. Электрофизические и фотоэлектрические свойства таких материалов существенно отличаются от слабокомпенсированных материалов, в которых наблюдается ряд новых физических явлений [2–3].

Технология получения сильнокомпенсированного кремния с воспроизводимыми параметрами является достаточно тонкой и сложной задачей, требующей индивидуального подхода для каждой легирующей примеси и параметров исходного материала соответственно, так как в условиях сильной компенсации существенно меняется не только распределение носителей заряда на энергетических состояниях и электронной структуре дефектов, но и коэффициент диффузии, растворимость, энергетические уровни примесных атомов.

Сильнокомпенсированный кремний получался с помощью многоэтапного диффузионного легирования монокристаллического кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho = 1 \cdot 10$  Ом·см, примесями серы и марганца. Диффузия этих примесей осуществлялась из газовой фазы на основе разработанной нами технологии, позволяющей полностью исключить эрозию поверхности кремния в процессе диффузии этих примесей, а также получить сильнокомпенсированный кремний с воспроизводимыми параметрами. Выбор этих примесей диктовался тем, что они в отличие от остальных примесных атомов, создающих глубокие уровни, обладают большей концентрацией электроактивных атомов и стабильными состояниями в решетке в условиях сильной компенсации. В каждой партии при диффузии было использовано пять образцов. В табл. 1 приведены основные параметры сильнокомпенсированного кремния, легированного серой и марганцем.

Для изготовления термодатчиков полученный материал подвергался соответствующим механической и химической обработкам. На его поверхности химическим путем осаждался металлический никель толщиной  $d = 1$  мкм с последующим термоотжигом в вакууме при  $T = 450\text{--}470^\circ\text{C}$  в течение  $t = 12\text{--}15$  мин.

Далее полученные кремниевые пластины разрезались на специальной установке на квадраты с размерами  $1 \times 1 \times 0,5 \text{ мм}^3$ . После лужения и пайки внешних контактов производилась герметизация термодатчиков.

При выборе герметика основное внимание обращается на его прочность, водонепроницаемость, стойкость к различным кислотам и щелочам. Термостойкость и теплопроводность герметика обеспечивают высокое быстродействие и эксплуатационные параметры готовых термодатчиков. Исследование ВАХ показало, что контакты являются омическими во всей исследуемой области температур.

Таблица 1. Параметры сильнокомпенсированного кремния  $Si \langle S, Mn \rangle$

До диффузии		После диффузии				
Удельное сопротивление, Ом·см	Тип проводимости	Образцы	Удельное сопротивление, Ом·см	Концентрация носителей заряда, $\text{см}^{-3}$	Концентрация ионов бора, $\text{см}^{-3}$	Концентрация ионов $S^{++}$ , $Mn^{++}$ , $\text{см}^{-3}$
1	P	$Si \langle B, S \rangle$	$(1,5-1,7) \cdot 10^5$	$(3-3,5) \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{16}$	$10^{16}$
1	P	$Si \langle B, S \rangle$	$(2-2,5) \cdot 10^5$	$(2,5-3) \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{16}$	$10^{16}$
5	P	$Si \langle B, S \rangle$	$(1,3-1,6) \cdot 10^5$	$(3-3,5) \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$
5	P	$Si \langle B, S \rangle$	$(1,9-2,5) \cdot 10^5$	$(2,5-3,5) \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$
2	P	$Si \langle B, Mn \rangle$	$(1,4-1,7) \cdot 10^5$	$(3-3,5) \cdot 10^{10}$	$10^{16}$	$5 \cdot 10^{15}$
2	P	$Si \langle B, Mn \rangle$	$(2-2,4) \cdot 10^5$	$(2,5-3) \cdot 10^{10}$	$10^{16}$	$5 \cdot 10^{15}$
10	P	$Si \langle B, Mn \rangle$	$(1,5-1,7) \cdot 10^5$	$(3-3,5) \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{15}$	$10^{15}$
10	P	$Si \langle B, Mn \rangle$	$(2-2,3) \cdot 10^5$	$(2,5-3) \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{15}$	$10^{15}$

Основные параметры готовых термодатчиков определялись в одинаковых термодинамических условиях. В табл. 2 и 3 приведены параметры термодатчиков, изготовленных на основе сильнокомпенсированных материалов, приведенных в табл. 1.

Таблица 2. Параметры термодатчиков на основе сильнокомпенсированного  $Si \langle B, S \rangle$

Партия	Номинальное сопротивление, Ом·см	Коэффициент чувствительности В, К	Температурная область, К	Инерционность, с.		Размер, мм
				$\tau_1$	$\tau_2$	
1	$(3-5) \cdot 10^5$	6900–7000	200–450	12–15	20–25	$1 \times 1 \times 0,5$
2	$(8-10) \cdot 10^5$	7100–7200	200–450	12–15	20–25	$1 \times 1 \times 0,5$
3	$(3-5) \cdot 10^5$	7000–7100	200–450	12–15	20–25	$1 \times 1 \times 0,5$
4	$(8-5) \cdot 10^5$	7200–7400	200–450	12–15	20–25	$1 \times 1 \times 0,5$

Примечание: Концентрация серы: 1–2-я партии –  $N_S = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , 3–4-я партии –  $N_S = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $\tau_1$  – время установления при  $T = 25-100 \text{ К}$ ;  $\tau_2$  – время восстановления при  $T = 100-25 \text{ К}$  на воздухе.

Таблица 3. Параметры термодатчиков на основе сильнокомпенсированного  $Si \langle B, Mn \rangle$

Партия	Номинальное сопротивление, Ом·см	Коэффициент чувствительности В, К	Температурная область, К	Инерционность, с		Размер, мм
				$\tau_1$	$\tau_2$	
1	$(4-5) \cdot 10^5$	6700–6950	200–450	13–15	25–30	$1 \times 1 \times 0,5$
2	$(7-8) \cdot 10^5$	6900–7100	200–450	13–15	25–30	$1 \times 1 \times 0,5$
3	$(4-5) \cdot 10^5$	7100–7200	200–450	13–15	25–30	$1 \times 1 \times 0,5$
4	$(7-8) \cdot 10^5$	7200–7300	200–450	13–15	25–30	$1 \times 1 \times 0,5$

Примечание: Концентрация марганца: 1–2-я партии –  $N_{Mn} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , 3–4-я партии –  $N_{Mn} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $\tau_1$  – время установления при  $T = 25-100 \text{ К}$ ,  $\tau_2$  – время восстановления при  $T = 100-25 \text{ К}$  на воздухе.

Из этих таблиц видно, что термочувствительность представленных термодатчиков очень высокая, она в 25–50 раз больше, чем у существующих самых чувствительных. В результате теоретических расчетов и анализа параметров термодатчиков, изготовленных на основе некомпенсированного кремния с собственной проводимостью, полученного безтигельной зонной плавкой с  $\rho \sim 2 \cdot 10^4$  Ом·см, было установлено, что чувствительность этих термодатчиков также на 50–70% ниже, чем у разработанных нами термодатчиков.

Следующая особенность термодатчиков – это достаточно высокое быстродействие как при установлении, так и при восстановлении температуры объекта. При эксплуатации термодатчик потребляет очень мало энергии. Также следует отметить, что у одинаковых термодатчиков с различной концентрацией легирующих примесей термочувствительность существенно больше в случае высокоомного компенсированного кремния. Эти данные свидетельствуют об особенностях свойств термодатчиков, изготовленных на основе сильнокомпенсированного кремния, и об их больших функциональных возможностях. Основное преимущество данных термодатчиков – их использование для дистанционного контроля и управления температурой объекта.

Стабильность параметров разработанных термодатчиков исследовалась при различных экстремальных условиях и довольно длительно (в течение 3 лет). Как показали результаты, практически заметных изменений не происходило.

Также установлено, что термодатчики на основе сильнокомпенсированного кремния, легированного марганцем, более эффективно работают в области температур  $T = 100\text{--}400$  К, а термодатчики на основе Si<B,S> могут успешно применяться в области более высоких температур –  $T = 200\text{--}450$  К.

Стабильность параметров, малое потребление энергии при эксплуатации, высокая чувствительность, высокое быстродействие и возможность использовать термодатчики для дистанционного управления температурой объекта, а также в различных средах и объектах определяют большие функциональные возможности термодатчиков на основе сильнокомпенсированного кремния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.w3.org/TR/html4/loose.dtd>
2. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К.С. // ЖТФ. 2006. 76. № 9. С. 125–129.
3. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Самтаров О.Э. // ЖТФ. 2005. 39. № 7. С. 823–825.

*Поступила 04.05.07*

## Summary

In work are presented the results of studies working out and the creation of thermosensor on the basis of strongly compensated silicon doped with Mn and S. It is stated that thermosensitivity and stability of parameters of worked out thermosensor is high than the existing sensitive thermosensor. It is stated, that thermosensor on the basis of strongly compensated silicon doped with manganese Si<B,Mn> more effectively work in the field of temperature  $T=100\text{--}400$  °K and thermosensor on bass of Si<B,S>, can be successfully used in the field of more high temperature  $T=200\text{--}450$  °K.

---