

## Полевые свойства $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$ ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) гетероструктур

Х. М. Мадаминов

*Изучены процессы токопрохождения в диодных структурах  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ). Из полученных результатов видно, что в исследованных образцах, при малых напряжениях ток подчиняется закону Ома. А при дальнейшем увеличении напряжения начинается рост тока по нелинейному закону. На основе анализа зависимости  $\ln \sigma = f(\sqrt{E})$  установлено, что нелинейность обусловлена полевым эффектом Пула-Френкеля. На основе выполненных анализов полученных результатов обоснована перспективность использования твердых растворов  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), выращенных на кремниевых подложках, в качестве активного материала в преобразователях тепловой энергии в электрическую энергию на основе термовольтаического эффекта.*

*Ключевые слова:* твердый раствор замещения, активация носителей заряда, вольт-амперная характеристика, эффект Пула-Френкеля, полевой механизм, коэффициент Френкеля, концентрация ловушек.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-28-32

### Введение

В последнее время исследование физических процессов в полупроводниковых твердых растворах (ТР) типа  $A^{IV}B^{IV}$  становится все больше существенным. Как показывают проведенные исследования, эти твердые растворы являются перспективными для создания на их основе лазеров, модуляторов света, фотопреобразователей и других функциональных устройств [1, 2].

Известно, что путем изменения параметров зонной структуры ТР можно создать новые, более эффективные материалы для различных областей техники с требуемыми сочетаниями физических характеристик [3].

Эффект Пула-Френкеля влияет на то, что при приложении достаточно больших электрических полей к образцу полупроводника

энергия активации электронов с электронных энергетических уровней уменьшается за счет дополнительной энергии поля. Полупроводниковое соединение  $Si_{1-x}Sn_x$ , принадлежащее к вышеперечисленному типу материалов группы  $A^{IV}B^{IV}$  обладает рядом отличительных свойств, которые позволяют, применяет их при изготовлении различных полупроводниковых приборов [4, 5], при этом температурная область их функционирования зависит от энергии активации носителей заряда. Таким образом, представляет интерес изучение возможности изменения энергии активации электронов воздействием электрических полей, т. е. влияние эффекта Пула-Френкеля на параметры ТР  $Si_{1-x}Sn_x$ .

Целью данной работы являлись исследования темновых вольт-амперных характеристик фотодиодов на основе структур  $Si-Si_{1-x}Sn_x$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ).

### Образование твердых растворов на основе $Si_{1-x}Sn_x$

Возможность образования непрерывного ТР замещения определяется типом кристалли-

Мадаминов Хуршиджон Мухамедович, доцент, к.ф.-м.н. Андижанский государственный университет. Узбекистан, 170100, г. Андижан, ул. Университетская, 129. E-mail: khurmad@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2022 г.

ческих решеток раствор образующих компонентов, их геометрическими размерами и зарядовыми состояниями. Академиком М. С. Саидовым предложены условия образования непрерывного ТР замещения в следующем виде [6]

$$\Delta z = \sum_{i=1} z_i^m - \sum_{i=1} z_i^n = 0, \quad (1)$$

$$\Delta r = \left| \sum_{i=1} r_i^m - \sum_{i=1} r_i^n \right| \leq 0,1 \sum_{i=1} r_i^m = 0, \quad (2)$$

где  $z_i^m, z_i^n$  – валентности;  $r_i^m, r_i^n$  – ковалентные радиусы атомов растворяющего  $m$  и растворяемого  $n$  химического элемента или элементов, образующих молекулы растворяющего и растворяемого соединений соответственно,  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Когда растворяющие и растворяемые элементы или молекулы изовалентны между собой, то они являются электронейтральными и условие (1) выполняется. Известно, что растворимость атомарного или молекулярного соединения растворяемого компонента ТР зависит от сравнительного размера его с соответствующим размером растворителя. Чем ближе соответствующие размеры атомов или молекул компонентов ТР, тем слабее энергия упругих деформаций кристаллической решетки, и тем больше взаимная растворимость раствор образующих компонентов, следовательно, тем больше кристаллическое совершенство ТР. Когда отличие суммы ковалентных радиусов атомов молекул раствор образующих компонентов больше 10 %, образование ТР замещения этих компонентов незначительное [6].

Сумма валентности атомов молекул  $Si_2$  и  $SiSn$  равны, и для них выполняется условия электронейтральности (1):

$$\Delta z = (z_{Si} + z_{Si}) - (z_{Si} + z_{Sn}) = 0, \quad (1^*)$$

где  $z_{Si}$  и  $z_{Sn}$  – валентности атомов кремния и олова, соответственно.

Суммы ковалентных радиусов атомов молекул  $Si_2$  и  $SiSn$  имеют близкие значения, тогда из условия (2) можно получить:

$$\Delta z = |(r_{Si} + r_{Si}) - (r_{Si} + r_{Sn})| = |2,34 \text{ \AA} - 2,57 \text{ \AA}| = 0,23 \text{ \AA} \approx 0,098(r_{Si} + r_{Si}) < 0,1(r_{Si} + r_{Si}), \quad (2^*)$$

где  $r_{Si}$  и  $r_{Sn}$  – ковалентные радиусы атомов кремния и олова по Полингу, соответственно. Из (2\*) видно, что разница сумм ковалентных радиусов атомов молекул  $Si_2$  и  $SiSn$  составляет порядка 9,8 %, следовательно, эти компоненты удовлетворяют условию образования непрерывного твердого раствора замещения, представленной в [6].

Замещение  $Si_2$  молекулой  $SiSn$  не сильно деформирует кристаллическую решетку, при этом энергия упругих искажений кристаллической решетки будет незначительное и твердый раствор замещения в виде  $Si_{1-x}Sn_x$  является стабильно твердой фазой. Пространственная конфигурация двух стабильных тетраэдрических связей твердого раствора  $Si_{1-x}Sn_x$  представлена на рис. 1.

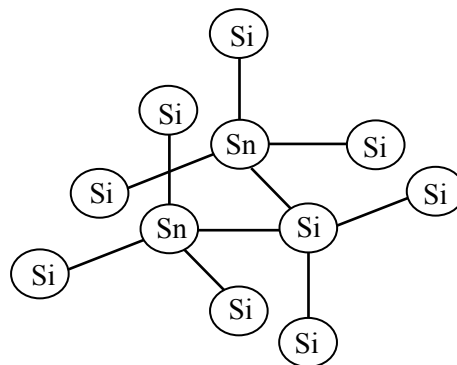


Рис. 1. Пространственная конфигурация тетраэдрических связей  $Si_{1-x}Sn_x$

### Экспериментальная методика и обсуждение результатов

Твердые растворы  $Si_{1-x}Sn_x$  выращивались методом ЖФЭ из ограниченного объема олова (Sn) раствора-расплава в атмосфере водорода. Водород очищался пропусканием через палладиевую трубочку. Процесс роста пленок осуществлялся принудительным охлаждением раствора-расплава. ЖФЭ была проведена на вертикально расположенном кварцевом реакторе с горизонтально расположенными подложками. Для получения хорошего интерфейса между подложкой и эпитаксиальной пленкой необходимо близкое значение параметров решетки, коэффициентов термического расширения и кристаллическая структура материалов подложки и пленки. С другой стороны, материал подложки должен быть доступным и хорошо изученным. Известно, что среди эле-

ментарных полупроводников кремний и олова являются доступными и довольно хорошо изученными материалами. Ковалентные радиусы атомов Si и Sn составляют 1,17 Å и 1,4 Å, соответственно. Температурные коэффициенты линейного расширения Si и Sn составляют  $4,2 \times 10^{-6}$  1/К и  $23,4 \times 10^{-6}$  1/К соответственно. Следовательно, Si является подходящим материалом для получения слоя твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  хорошего качества.

Кроме этого известно, что кристаллографическая плоскость с ориентацией (111) имеет две оборванных связи, а плоскость (100) – одну оборванную связь. Поэтому элементарные полупроводники хорошо растут на подложках с ориентацией (111), а на подложках с ориентацией (100) получить качественную пленку довольно сложно. Поэтому в качестве подложек были использованы пластинки из Si шайб с кристаллографической ориентацией (111) и удельным сопротивлением 1 (Ом см).

Для проведения исследований были изготовлены структуры  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  путем выращивания твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$   $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 0,8$  (Ом см). При измерении ВАХ использовались образцы с толщинами 10–40 мкм эпитаксиального слоя твердого раствора. Омические токосъемные контакты, сплошные с тыльной стороны и четырехугольные с площадью 9 мм<sup>2</sup> со стороны эпитаксиального слоя, создавались путем вакуумного напыления серебра, при давлении  $\sim 10^{-5}$  Торр.

Вольтамперные характеристики гетероструктур  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  измерялись в темноте при различных значениях толщины эпитаксиального слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  в прямом и обратном направлениях тока при напряжениях смещения от -3 до +5 В. Для этого образцы механически плотно закреплялись на металлический криостат, который откачивался до остаточного давления  $\sim 10^{-3}$  Торр.

Напряжение к образцу подавалось от блока питания Б5-45А и измерялось вольтметром В7-9, а ток, проходящий через полупроводниковую структуру, фиксировался комбинированным прибором Ц-300.

На рис. 2 приведен ВАХ структур  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  с различной толщиной твердого

раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  при комнатной температуре (293 К). Из рис. 2 видно, что зависимость величины прямого тока от приложенного напряжения, для всех значений толщины  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  носит нелинейный характер. Величина тока через  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  растет и изменяется 1–2 порядка, т. е. ВАХ имеет диодный характер. На ВАХ выявляются следующие 2 участка: 1 – омический ( $I \propto U$ ) и 2-область резкого роста тока ( $I \propto U^m$ ,  $m > 1$ ). Видно, что переходные напряжения от омической области к резкому росту тока с уменьшением толщины, уменьшаются. Это доказывает наличие полевого эффекта Пула-Френкеля в исследуемых образцах.

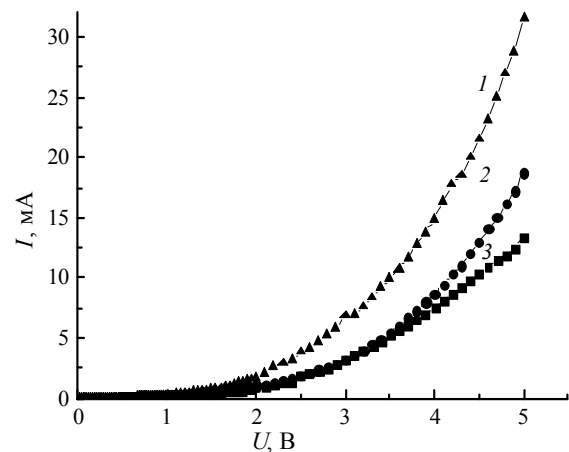


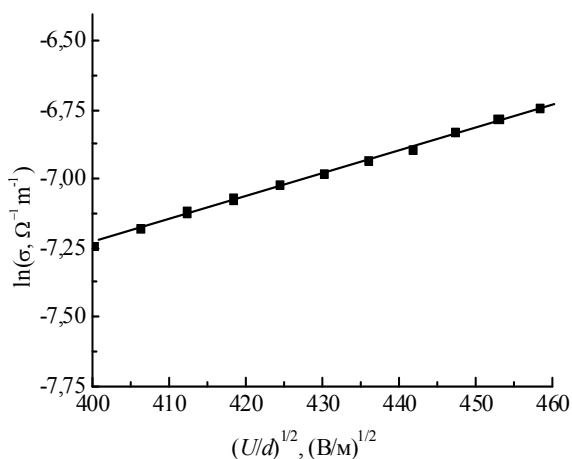
Рис. 2. Прямые токи темновых ВАХ  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  структур при  $T = 293$  К. Толщина образцов, мкм: 1 – 20, 2 – 25, 3 – 30

По теории Пула-Френкеля, рост полевой зависимости проводимости представляется в виде [7]

$$\sigma = \sigma_0 \exp(\beta\sqrt{E}), \quad (3)$$

здесь  $\beta$  – коэффициент Френкеля и он определяется по наклону зависимости  $\ln \sigma = f(\sqrt{E})$ .

На рис. 3 представлены рассчитанные зависимости электропроводности при комнатной температуре в координатах  $\ln \sigma = f(\sqrt{E})$  для области резкого роста тока в ВАХ гетероструктуры  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ , с толщиной базовой области  $d = 20$  мкм. Из графических данных было определено значения коэффициента Френкеля, которое составляло  $\approx 8,7 \times 10^{-2}$  (см/В)<sup>1/2</sup>.



**Рис. 3.** Зависимость электропроводности  $\ln \sigma \propto f(\sqrt{U/d})$  от электрического поля, при  $T = 293 \text{ K}$  для  $p\text{Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$  структур

Известно, что определяя критическую величину электрического поля, соответствующее началу нелинейной зависимости электропроводности от приложенного напряжения, согласно выражению [7]

$$N_t = \left( \frac{2e}{kT\beta} \sqrt{E_{cr}} \right)^3 \quad (4)$$

можно определить концентрацию дефектов ( $N_t$ ) ответственных за проводимость гетероструктуры  $p\text{Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$ .

По значениям критического электрического поля  $E_{cr}$ , при котором нарушается закон Ома, по формуле (4) были определены концентрации ионизованных центров  $N_t$  в исследованных структурах. По данным проведенных экспериментов на разных образцах (с толщиной  $d = 20 \div 30 \text{ мкм}$ ) для концентрации ловушек получено её среднее значение  $\sim 2,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

### Заключение

Таким образом, были изготовлены  $p\text{-Si-n-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) структуры с толщинами базового  $n$ -слоя  $W \approx 20\text{--}30 \text{ мкм}$ , в едином технологическом цикле методом жидкофазной эпитаксии, на монокристаллических  $p\text{-Si}$  подложках с ориентацией (111).

Проведено исследование механизма проводимости в  $p\text{Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$  гетероструктурах на основе твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ , полученной жидкофазной эпитаксией. На основе ана-

лиза зависимости  $\ln \sigma = f(\sqrt{E})$ , определено значение коэффициента Френкеля  $\beta$  и установлено, что нелинейность ВАХ этих структур обусловлена полевым эффектом Пула-Френкеля. А также оценена концентрация ионизованных центров (ловушек)  $N_t$ , значения которых сильно зависят от полевого эффекта.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты позволяют заключить, что в наших экспериментах при комнатной температуре наблюдается эффект Пула-Френкеля в  $p\text{Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$  гетероструктурах. Наличие эффекта Пула-Френкеля в твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  может позволить применять воздействие высоких напряжений на параметры различных приборов на основе этого полупроводника [8]. Наиболее реальным представляется применение эффекта Пула-Френкеля в преобразователях тепловой энергии в электрическую энергию на основе термовольтаического эффекта [9].

Автор глубоко признателен своему научному консультанту, академику АН РУз С. З. Зайнабидинову, а так же профессорам А. С. Саидову, Ш. Н. Усмонову – за плодотворные дискуссии при подготовке данной статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зайнабидинов С. З., Мадаминов Х. М. // Петербургский журнал электроники. 2017/ № 4/ С. 8.
2. Saidov A. S., Usmonov Sh. N., Kalanov M., Madaminov Kh. M. // Technical Physics Letters. 2010. Vol. 36. № 9. P. 827.
3. Пашаев А. М., Тагиев Б. Г., Тагиев О. Б. // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 5. С. 861.
4. Зайнабидинов С. З., Саидов А. С., Мадаминов Х. М., Усмонов Ш. Н., Икромов А. Ш. // Доклады АН РУз. 2021. № 2. С. 40.
5. Мадаминов Х. М. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. № 2. С. 71.
6. Саидов М. С. // Гелиотехника. 2006. № 4. С. 48.
7. Нифтиев Н. Н., Алиджанов М. А., Тагиев О. Б., Мурадов М. Б. // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 2. С. 173.
8. Жуков Н. Д., Михайлов А. И., Мосияш Д. С. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 3. С. 340.
9. Казанин М. М., Каминский В. В., Гревцев М. А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 7. С. 887.

## Field properties of $p\text{Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$ ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) heterostructures

*Kh. M. Madaminov*

Andijan State University  
129 University st., Andijan, 170100, Uzbekistan  
E-mail: khurmad@mail.ru

*Received February 25, 2022*

*In this article, the processes of current flow in  $p\text{Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) diode structures were studied. It can be seen from the results obtained that in the studied samples, at low voltages, the current obeys Ohm's law. And with a further increase in voltage, the current begins to increase according to a nonlinear law. Based on the dependence  $\ln \sigma = f(\sqrt{E})$  analysis, it was found that the nonlinearity is due to the Poole-Frenkel field effect. On the basis of the performed analyzes of the obtained results, the prospects of using  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) solid solutions grown on silicon substrates as an active material in thermal-to-electrical energy converters based on the thermovoltaic effect are substantiated.*

*Keywords:* the substitutional solid solution, activation of charge carriers, current-voltage characteristic, the Poole-Frenkel effect, field mechanism, the Frenkel coefficient, trap concentration.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2022-2-28-32

### REFERENCES

1. S. Z. Zainabidinov and Kh. M. Madaminov, *Peterburgskii zhurnal elektroniki*, No. 4, 8 (2017).
2. A. S. Saidov, Sh. N. Usmonov, M. U. Kalanov, and Kh. M. Madaminov, *Technical Physics Letters* **36**, 827 (2010).
3. A. M. Kpashaev, B. G. Tagiev, and O. B. Tagiev, *Physics of the Solid State* **55**, 861 (2014).
4. S. Z. Zainabidinov, A. S. Saidov, X. M. Madaminov, Sh. N. Usmonov, and A. Sh. Ikromov, *Dokladi Akademii Nauk Respubliki Uzbekistan*, No. 2, 40 (2021).
5. Kh. M. Madaminov, *Herald of the Bauman Moskov State Technical University, Series Natural Sciences* **92**, 71 (2021).
6. M. S. Saidov, *Applied Solar Energy*, No. 4, 48 (2006).
7. N. N. Niftiev, M. A. Alidjanov, O. B. Tagiev, and M. B. Muradov, *Semiconductors* **37**, 173 (2003).
8. N. D. Zhukov, A. I. Mikhaylov, and D. S. Mosiyash, *Semiconductors* **53**, 340 (2019).
9. M. M. Kazanin, V. V. Kaminskii, and M. A. Grevcev, *Semiconductors* **53**, 887 (2019).