

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР SiGe, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Выполнил:

Аспирант 2 года обучения

Ю.М. Кузнецов

Научный руководитель:

доктор ф.-м. наук,

зав. лаб. 2.8 НИФТИ ННГУ

М.В. Дорохин

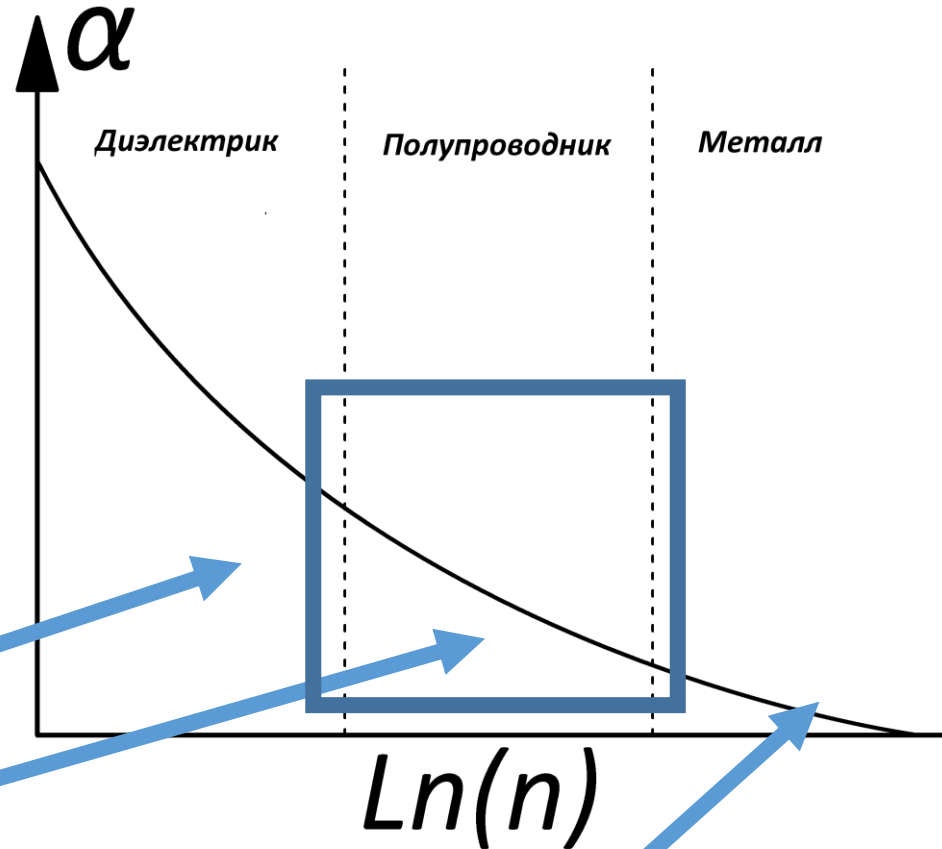
$$U = \alpha \cdot \Delta T$$

α – коэффициент Зеебека

$$\alpha = \frac{8\pi^2 k_B^2}{3eh^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n} \right)^{2/3}$$

Слишком высокое
сопротивление

Видимо, некий
оптимальный вариант,
почему бы не использовать
его?



Низкий коэффициент Зеебека
(достаточно для создания датчиков
температуры – термопар, например
 $\alpha_{Ch} = 24 \mu V/K$, $\alpha_{Al} = -17 \mu V/K$, следовательно,
общий коэффициент: $\alpha = 41 \mu V/K$)



Коэффициент Зеебека

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \cdot \lambda}$$

Удельное сопротивление
 $\sigma = F(a)$

Закон Видемана-Франца

$$\lambda = \sigma \cdot L \cdot T$$

L – постоянная Лоренца

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 =$$

$$= 2.47 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{Ом} \cdot \text{K}^{-2}$$

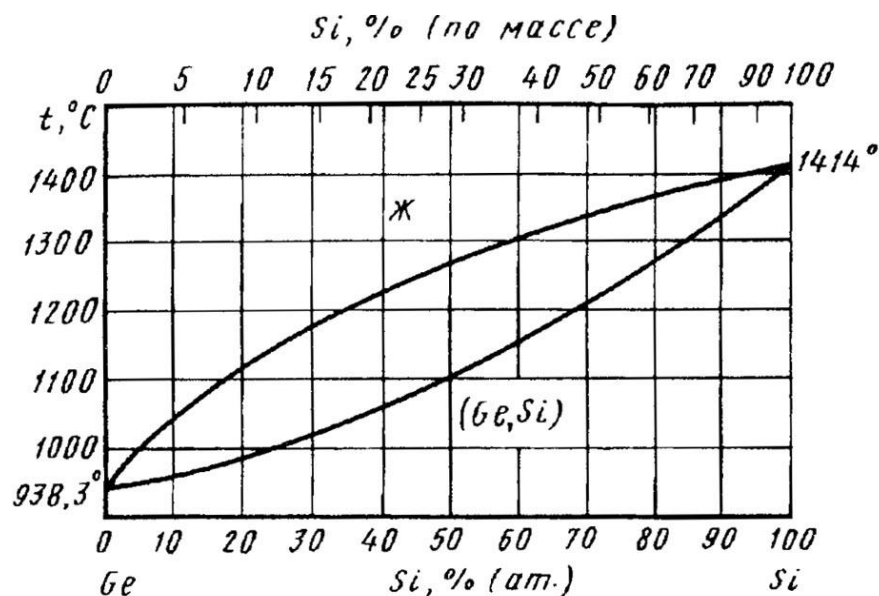
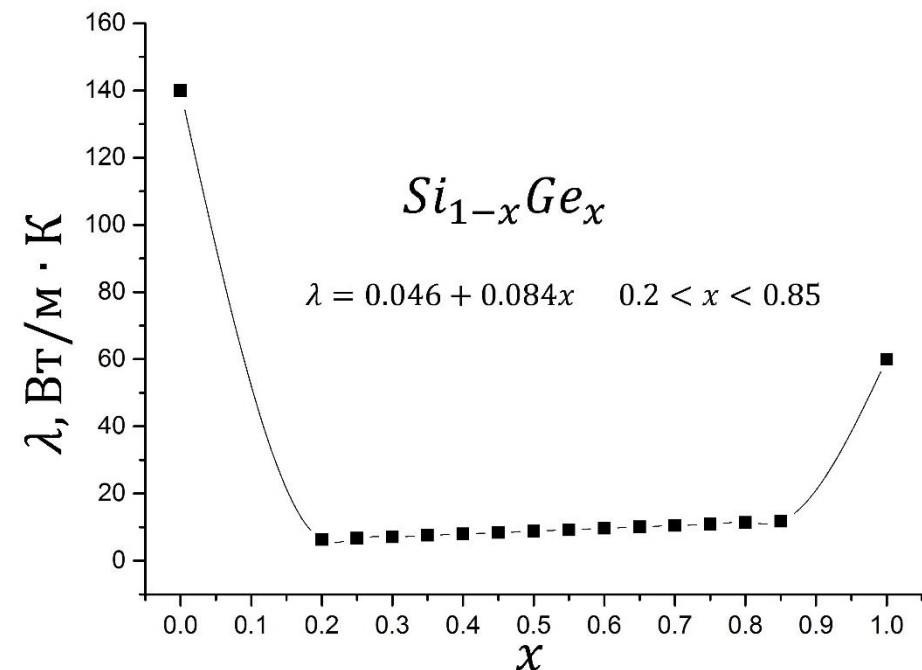
Теплопроводность

Электронная

Фононная

Определяется:

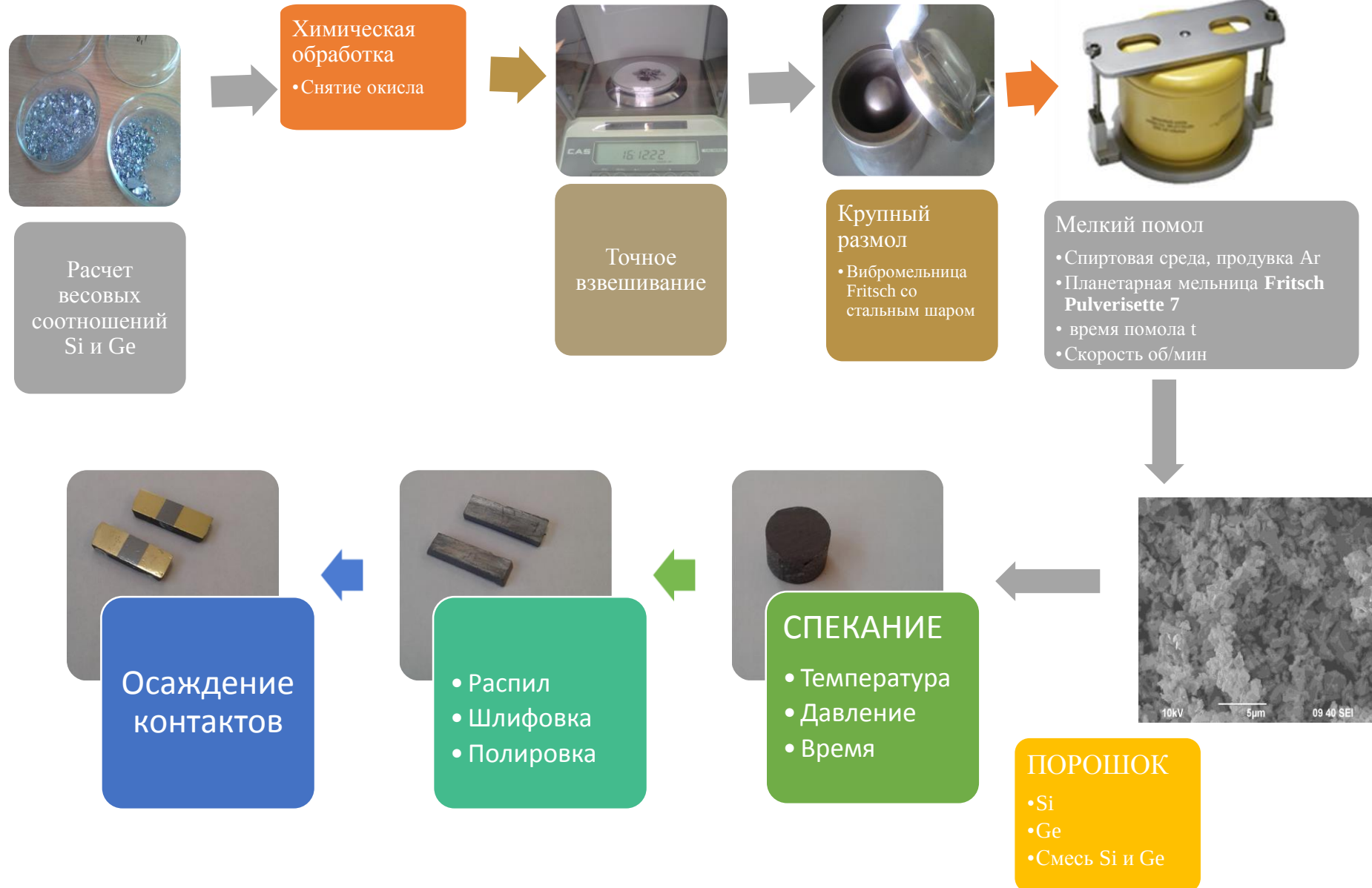
1. Кристаллическим совершенством
2. Наличием границ
3. Наличием дефектов
4. Наличием дополнительных фаз



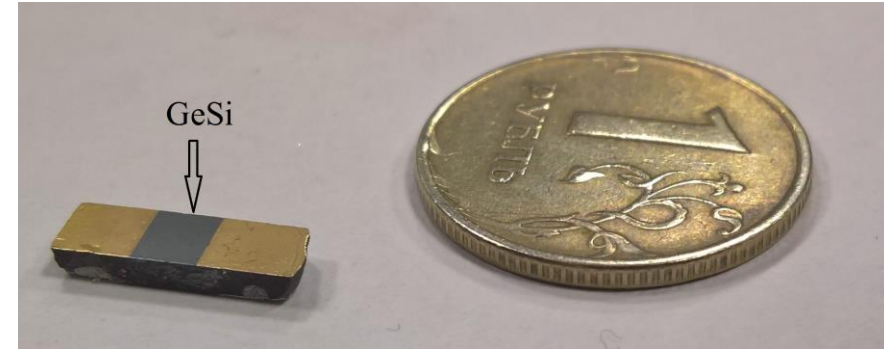
- ✓ Простая фазовая диаграмма – хороший материал для контроля;
- ✓ Используются материалы с хорошо известной технологией;
- ✓ Научиться спекать термоэлектрики на примере простого материала.

Подбор оптимального состава

Технологический процесс



- Рентгено-дифракционный анализ;
- Электронная микроскопия;
- Измерение термоэлектрических характеристик: α , σ , λ ;



В качестве легирующей примеси будем использовать сурьму.

Достоинства: низкая токсичность, дешевизна.

Недостатки: низкая предельная растворимость.

Вариация:

1. Степень перемешивания порошка
2. Максимальная температура спекания
3. Концентрация сурьмы

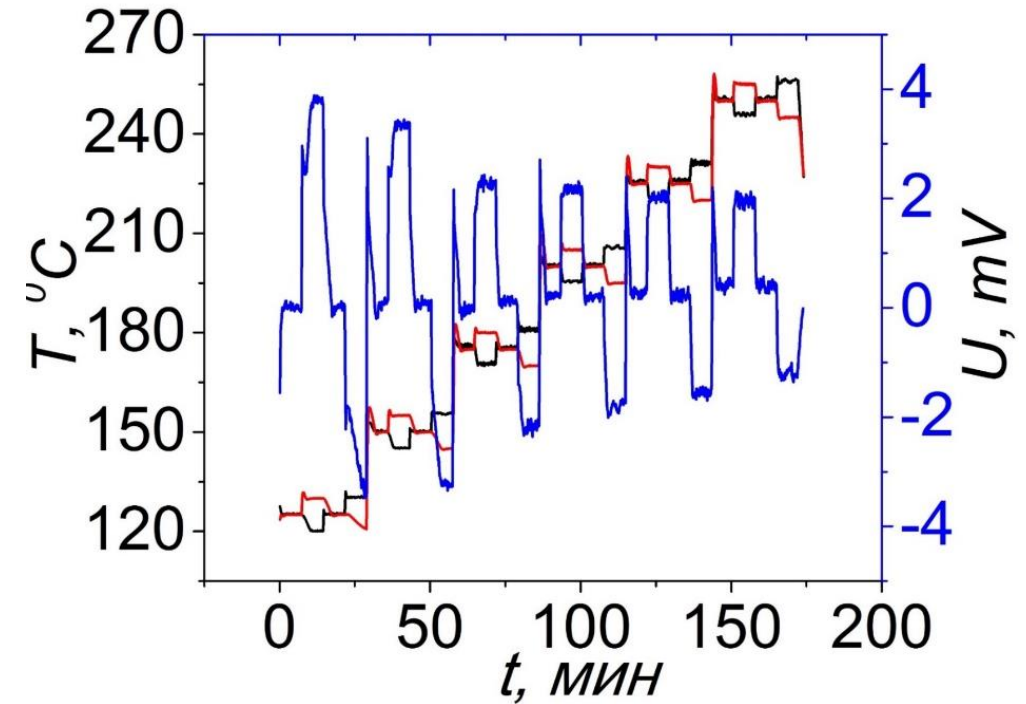
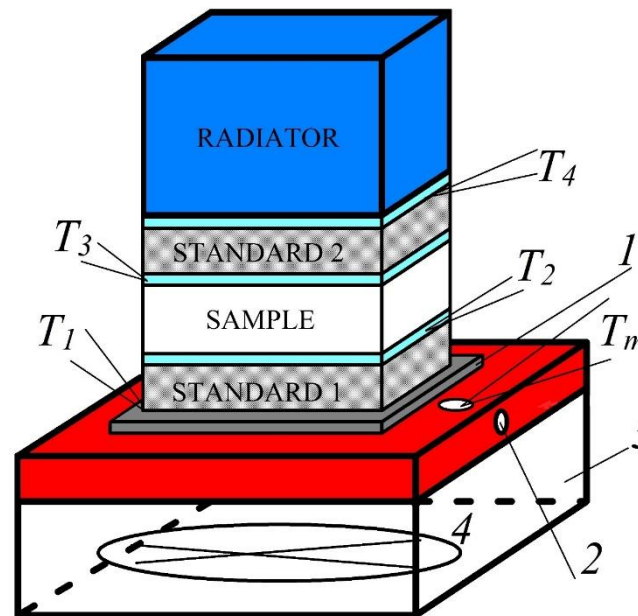
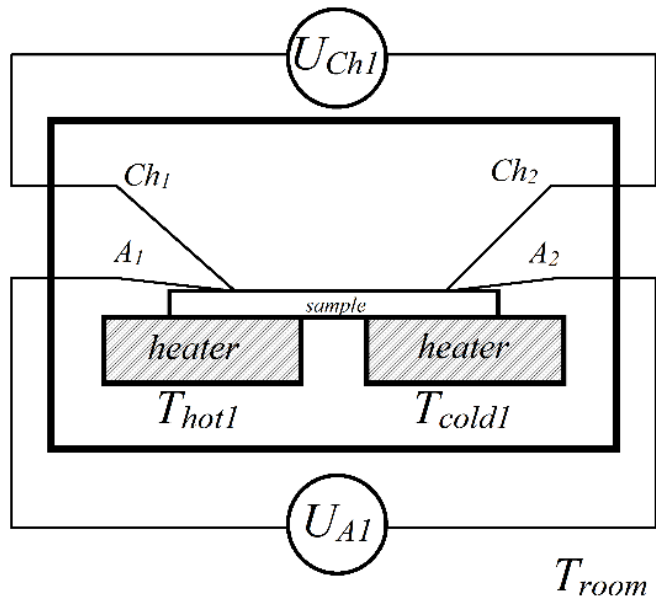
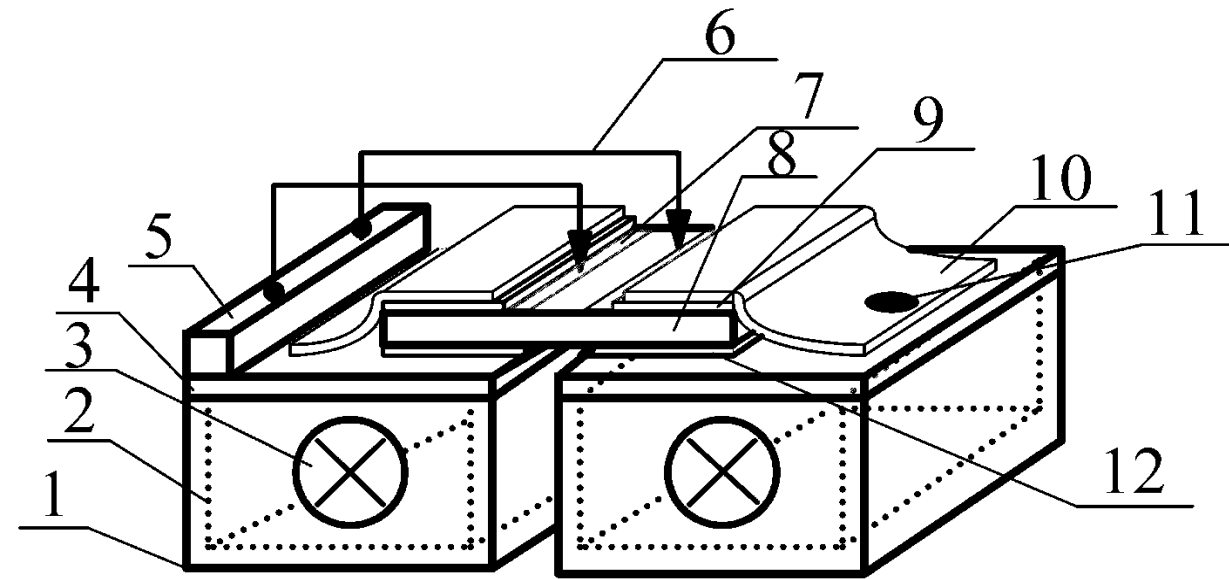
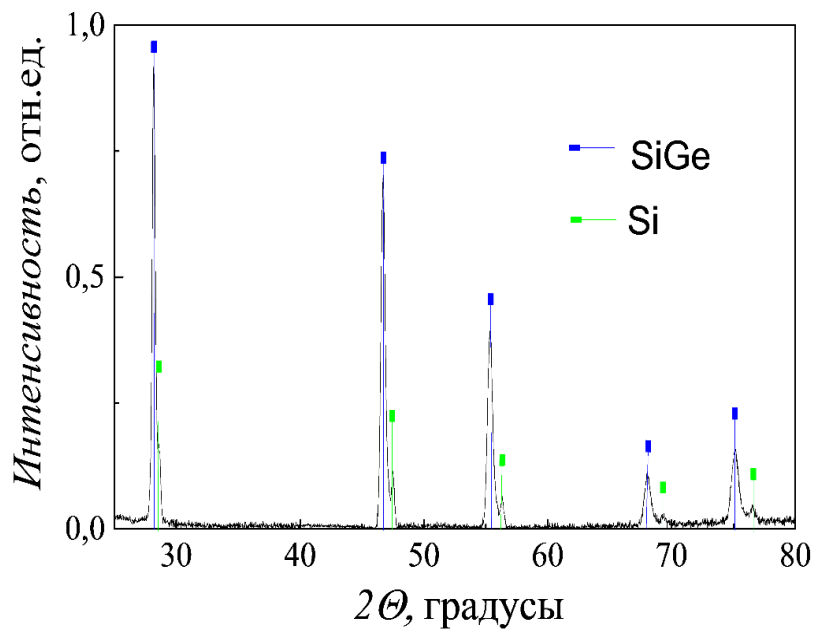


Рис. Пример экспериментально полученных кривых: синяя кривая – величина термо-ЭДС, красная кривая – температура 1-столика, чёрная кривая – температура 2-столика

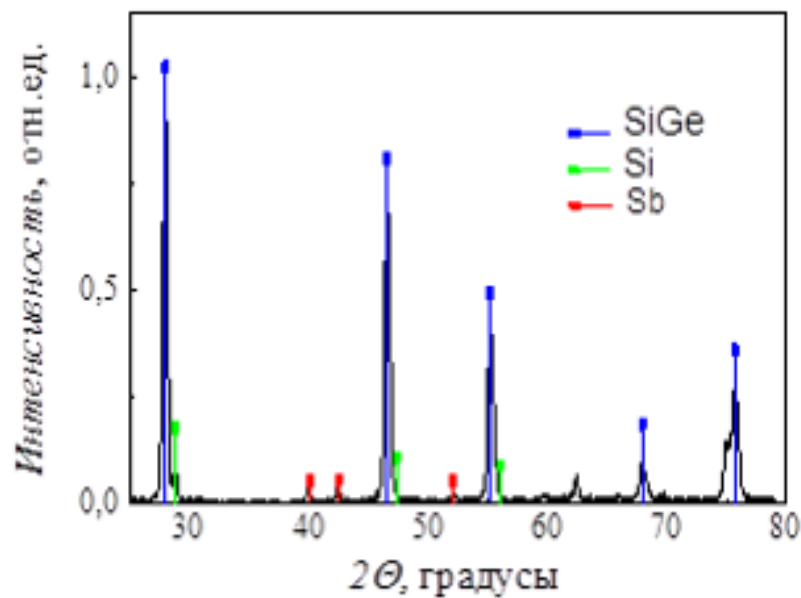
6 часов



$ZT \sim 0.0009$

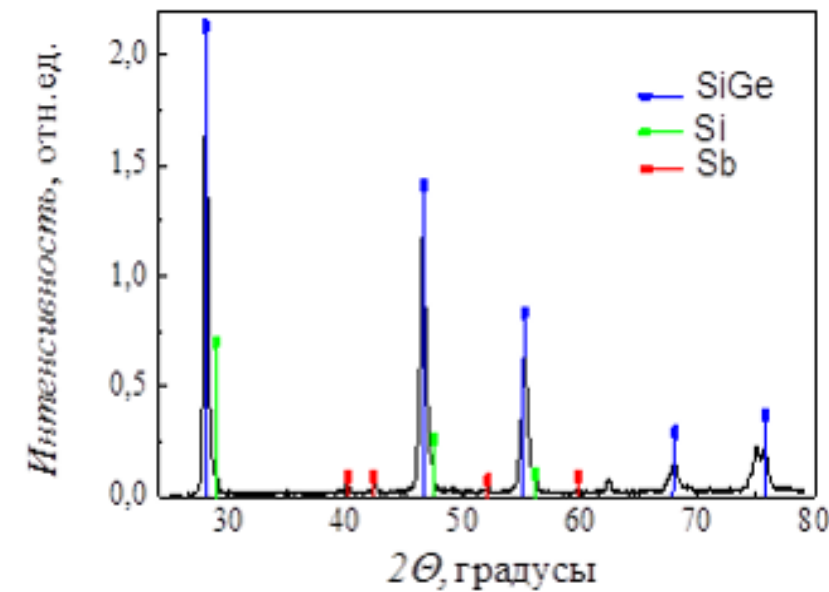
Без сурьмы
Много чистого Si

6 часов



$ZT \sim 0.003$

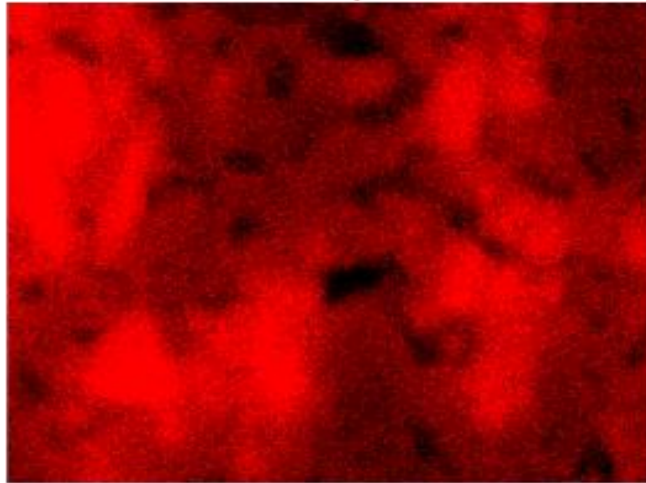
6 часов + 6 часов



$ZT \sim 0.01$

Распределение кремния в зависимости от условий спекания

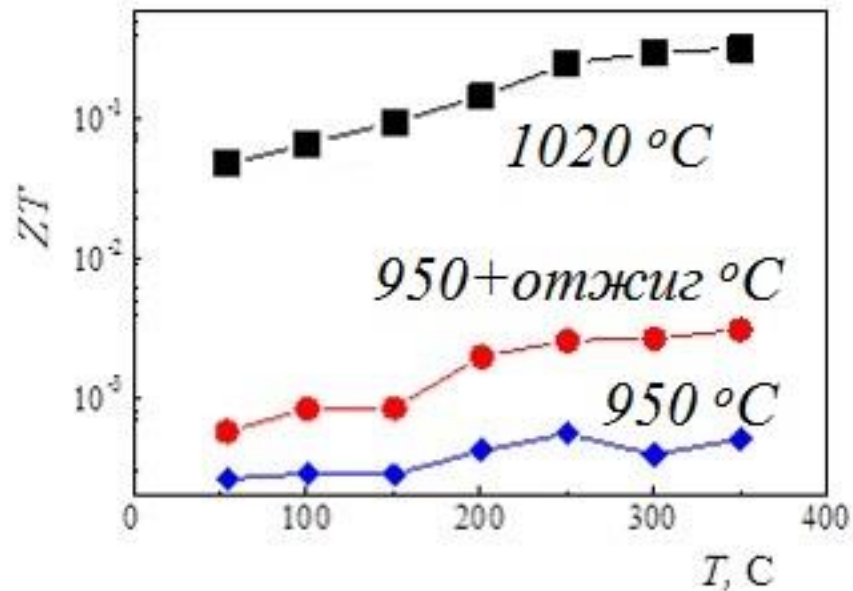
Si K серия



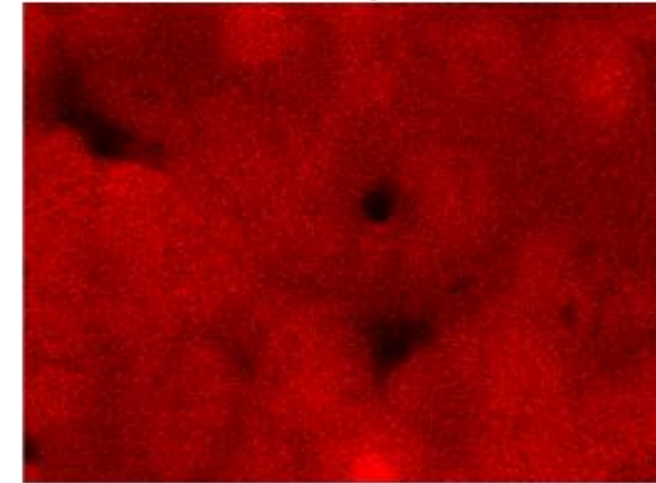
10μm

$$T_{max} = 950^{\circ}\text{C} + 30 \text{ мин.}$$

отжиг



Si K серия



10μm

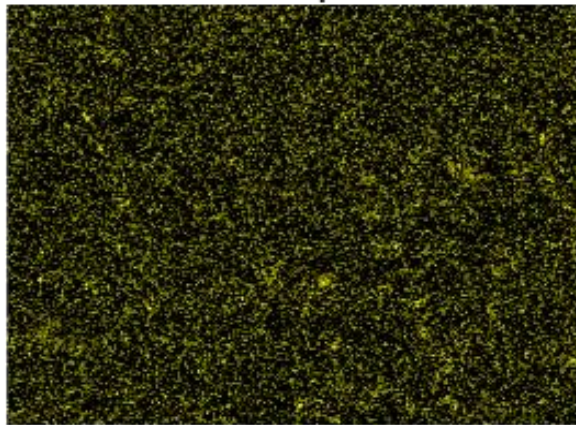
$$T_{max} = 1020^{\circ}\text{C}$$

При температуре выше 940°C германий начинает вытекать из пресс-формы. В качестве возможного решения был предложен высокотемпературный отжиг. Это решение привело к образованию массивных кластеров *Si* и *Sb*.

Лучший технологический путь – увеличение температуры спекания

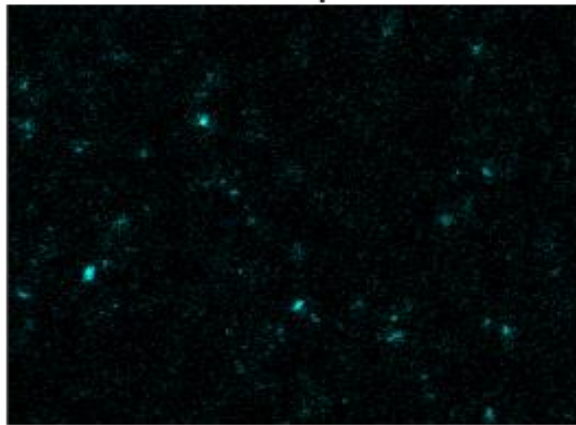
Кластеры Sb в материале

Sb L серия



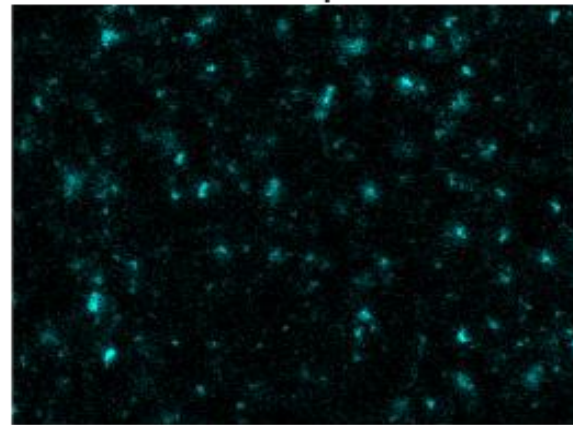
50μm

Sb L серия



50μm

Sb L серия



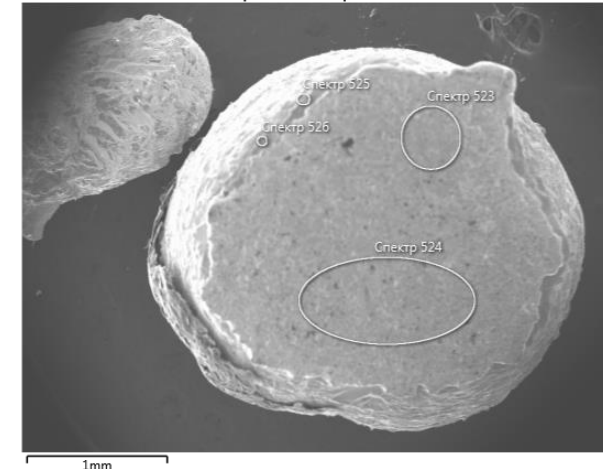
50μm

0,5 ат. % Sb

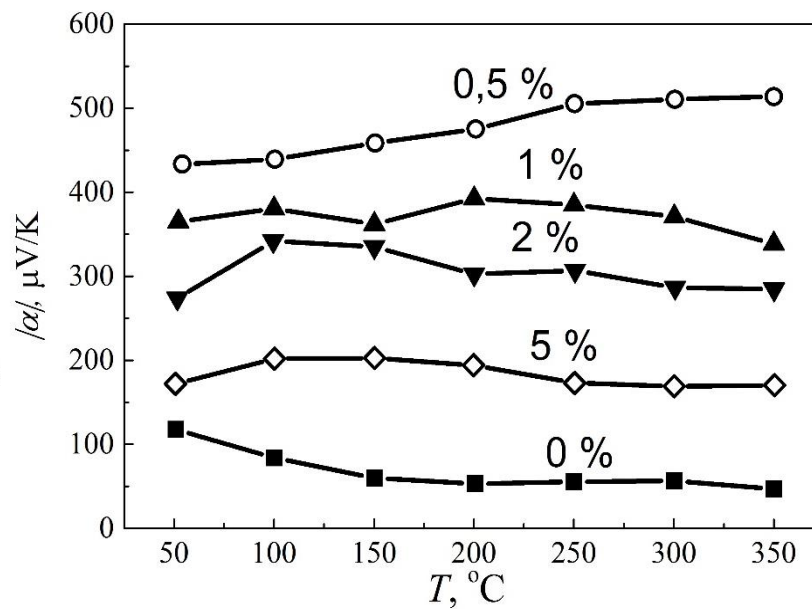
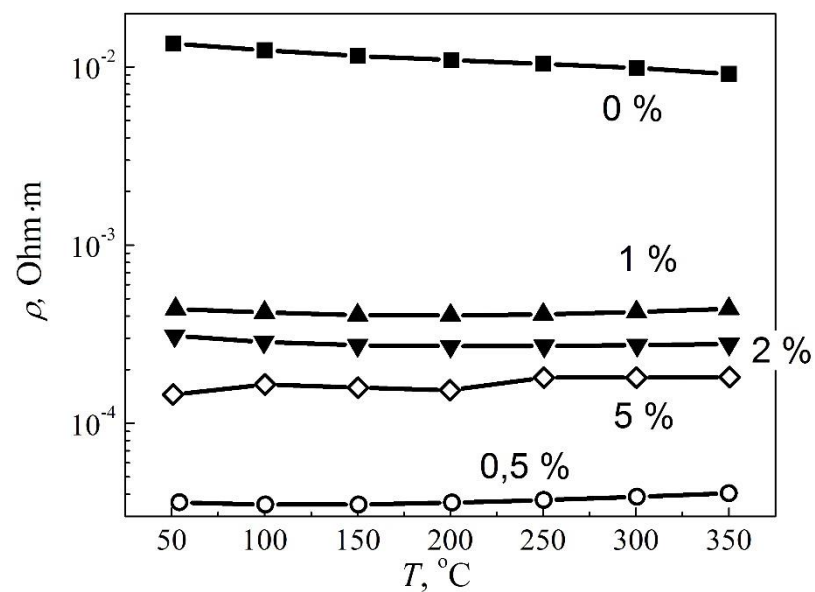
1 ат. % Sb

2 ат. % Sb

Электронное изображение 258

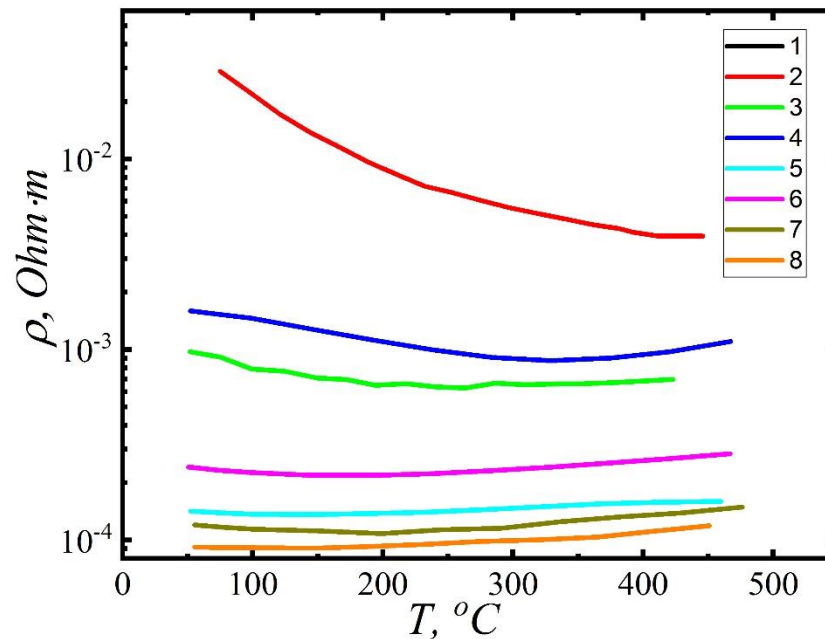
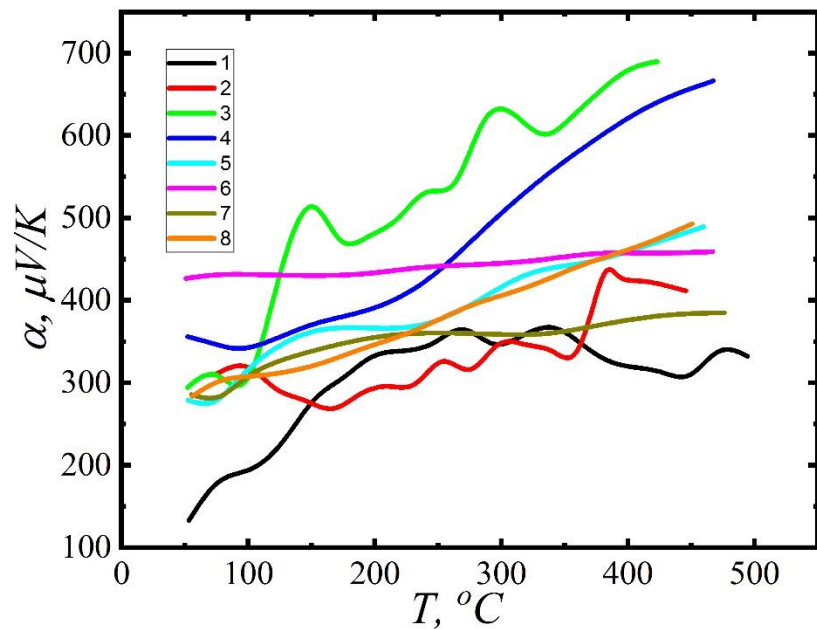
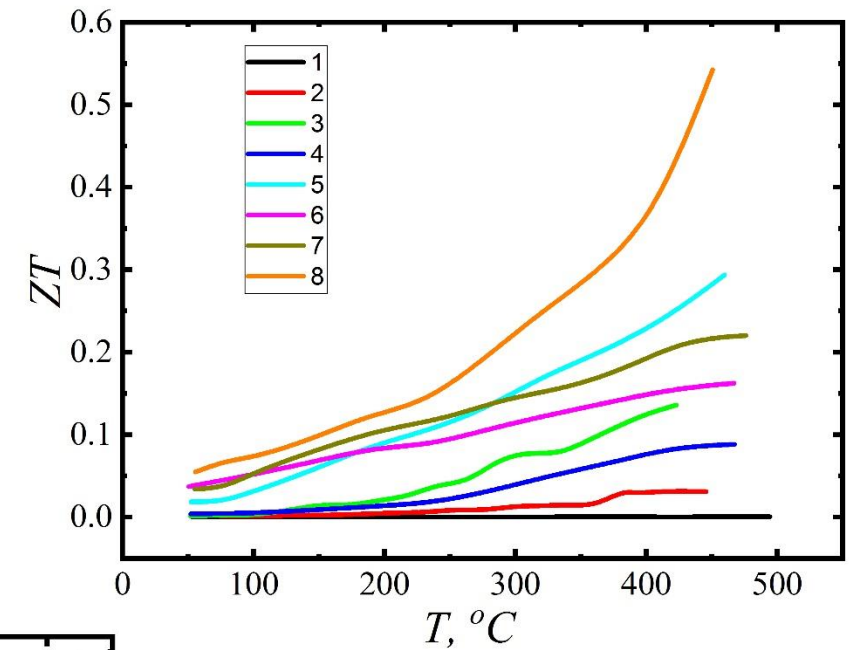


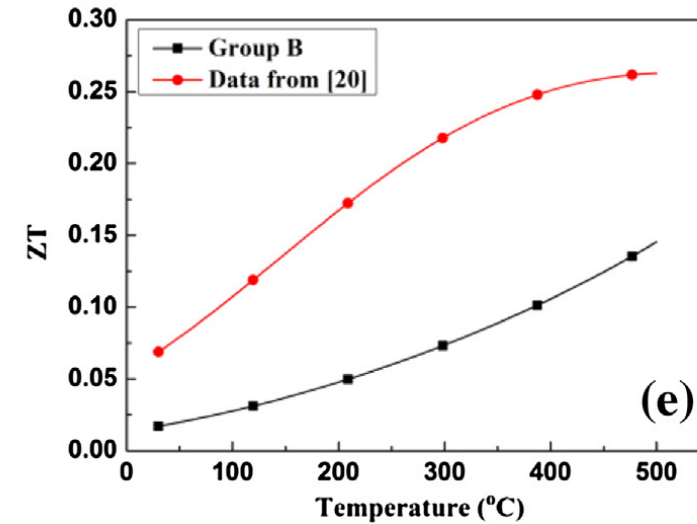
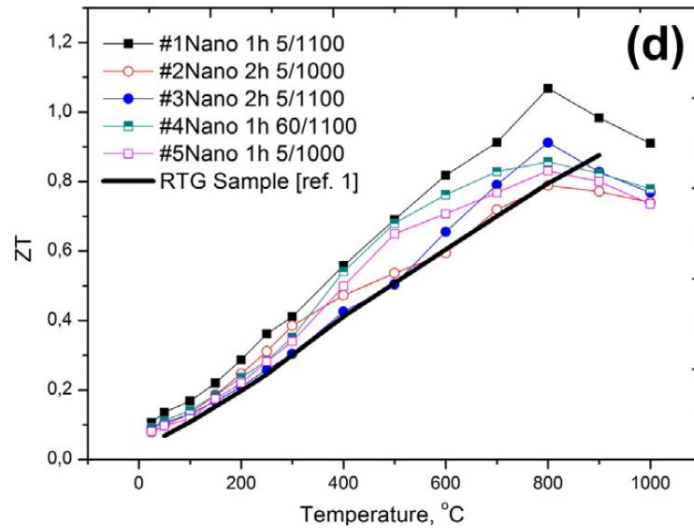
1mm



Кластеры Sb создают потенциальный барьер на границе с полупроводником. Это приводит к повышению сопротивления и снижению коэффициента Зеебека.

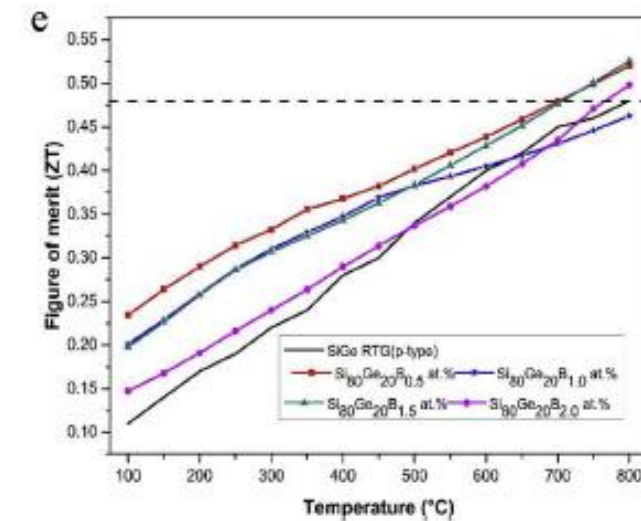
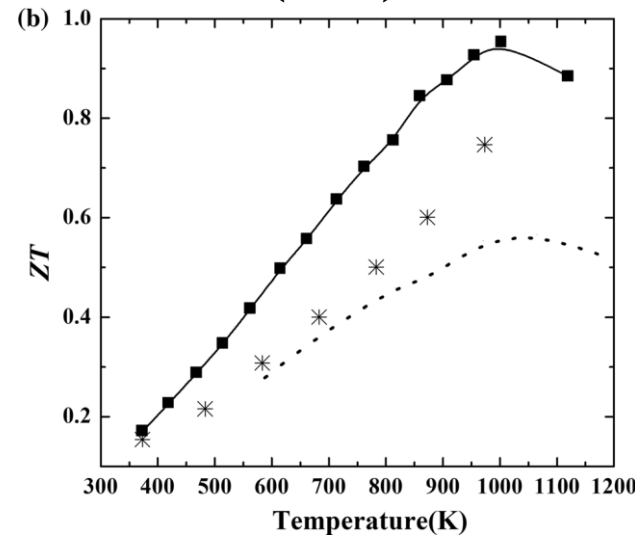
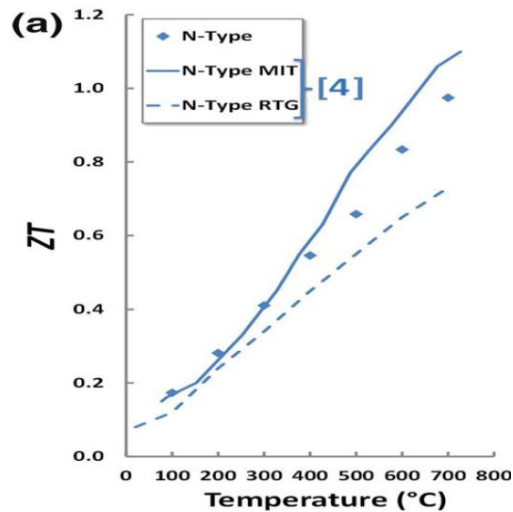
№	$T_{sp}, ^\circ C$	$n_{Sb}, \%$	№	$T_{sp}, ^\circ C$	$n_{Sb}, \%$
1	750	0,5	5	1020	0,7
2	900	0,5	6	1040	0,7
3	1020	0,5	7	1020	0,9
4	996	0,7	8	1040	0,9





A.A. Usenko et al. Scripta Mat., 96, P.9, (2015)

H. Li et al. Mat. Chem. Phys., 117, P.14534, (2013)



K. Romanjek et al. J. El. Mater., 618, P.403, (2015)

J. Li, et.al. J. Electr. Mat., 9, P.106, (2018)

R. Murugasami, et.al J. All. Comp., 143, P.35, (2019)

1. Экспериментально исследованы факторы, влияющие на коэффициенты эффективности (температура спекания, концентрация легирующей примеси, состав исходного порошка) термоэлектрических преобразователей энергии на основе SiGe, полученных методом искрового плазменного спекания.
2. Показано отрицательное влияние кластеров отдельных элементов (Si, Ge, Sb) на величину термоэлектрической эффективности вследствие образования потенциальных барьеров, препятствующих транспорту свободных носителей заряда.
3. Показана принципиальная возможность получения термоэлектрических преобразователей энергии на основе SiGe, легированного сурьмой – материалом, обладающим меньшим токсичным воздействием по сравнению с другими легирующими примесями, например, фосфором.

Спасибо за внимание