



II Международная научно-практическая конференция  
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Калинин Ю.Е., [kalinin48@mail.ru](mailto:kalinin48@mail.ru)

16-18 сентября 2020 г  
Воронеж, Россия





«Альтернативная и интеллектуальная  
энергетика»

# Введение

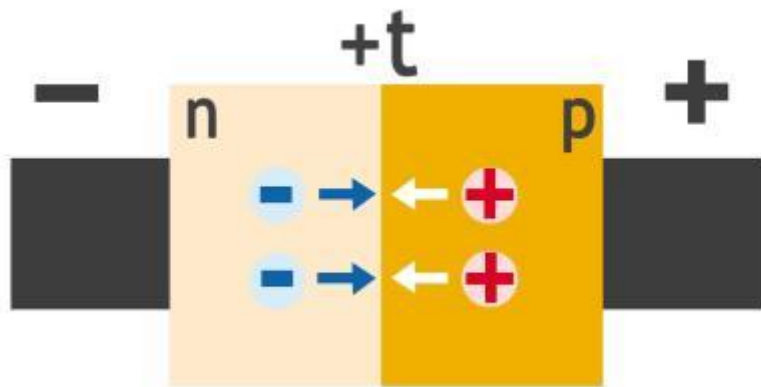
Термоэлектрические генераторы, работающие на эффекте Зеебека, обладают такими уникальными достоинствами, как полная автономность, экологичность, высокая надежность и долговечность, достаточно высокие удельные энергосовесовые характеристики. Главный же недостаток термоэлектрических генераторов – их низкая эффективность, как правило, не превышающая ~ 10-12 %. Однако, даже не смотря на столь низкую эффективность, применение термоэлектрических генераторов постоянно растет. Более того, во многих случаях применение термоэлектрических генераторов является фактически безальтернативным (системы энергопитания космических объектов для освоения дальнего космоса, энергоустановки на морских и подводных объектах, различные устройства, удаленные от линий электропередач, например, функционирующие в условиях высокогорья и Крайнего севера и т.д.).



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

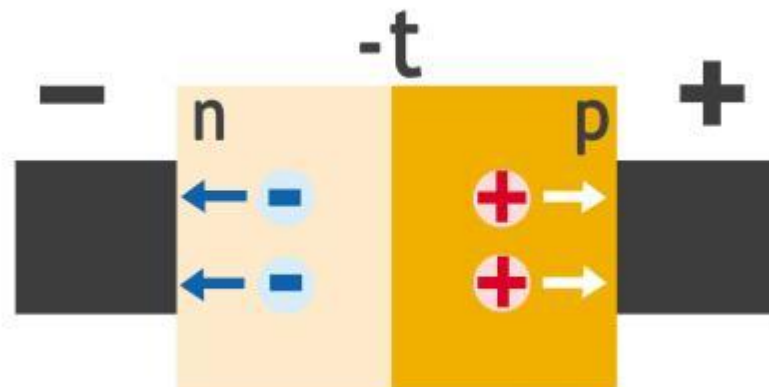
Перспективы развития термоэлектрических систем охлаждения и генерации электрической энергии

# Принцип работы: эффект Пельтье



$$Q_t = k\Delta T$$

Выделение тепла Пельтье в контакте полупроводников n- и p-типа



Поглощение тепла Пельтье в контакте полупроводников n- и p-типа



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

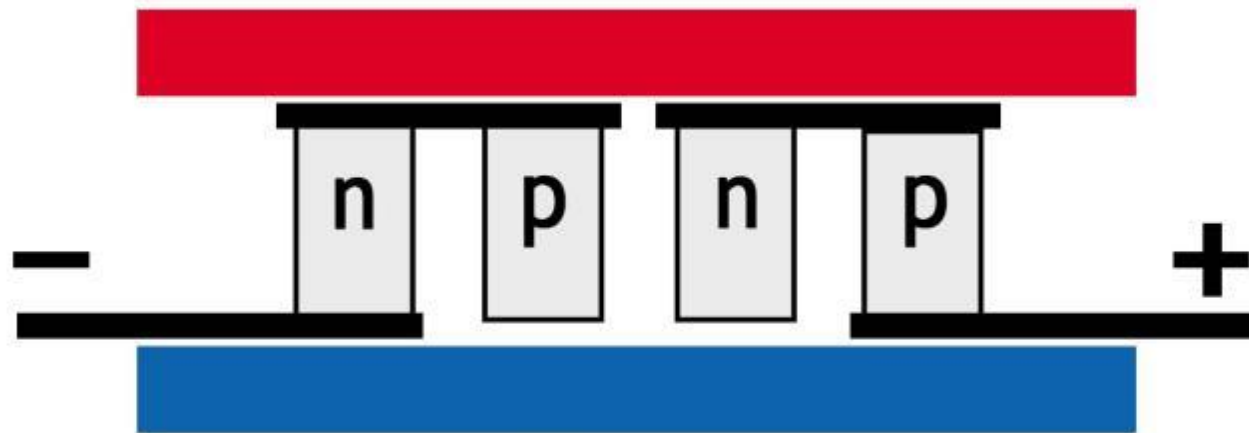
Перспективы развития термоэлектрических систем охлаждения и генерации электрической энергии

# Принцип работы: эффект Зеебека

$$E = \alpha \cdot (T_2 - T_1),$$

Тепло

$T_2$



$T_1$

Холод



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

## Полупроводниковый термоэлектрический модуль охлаждения – основной структурный элемент кондиционера и холодильника





«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Причины низкой эффективности

Низкая эффективность термоэлектрических генераторов и охладителей, в первую очередь, определяется свойствами используемого термоэлектрического материала. Для эффективной термоэлектрической генерации за счет эффекта Зеебека, используемый материал должен обладать оптимальным сочетанием таких физических свойств, как высокая удельная электропроводность, высокое значение термо-ЭДС (или коэффициента Зеебека), низкая теплопроводность. К настоящему времени, только для ограниченного числа материалов удалось добиться удовлетворительного сочетания этих свойств, определяющих их термоэлектрическую добротность и делающих пригодными для коммерческого использования.



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Термоэлектрики

Ключевым элементом термоэлектрической энергетики и охладителей являются полупроводниковые материалы, используемые для такого преобразования и называемые термоэлектриками.

Термоэлектрические материалы условно делятся по диапазону температур применения, в котором они имеют наиболее эффективные свойства.

По этому принципу термоэлектрики классифицируют на

- низкотемпературные (от 0 °С до 300 °С);
- среднетемпературные (от 300 °С до 600 °С);
- высокотемпературные (от 600 °С до 900 °С).



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Эффективность термоэлектрического преобразования энергии определяется величиной, называемой термоэлектрической добротностью

$$Z = \frac{\sigma S^2}{\chi}$$

где  $\sigma$  – электрическая проводимость;

$S$  – термоэдс;

$\chi$  – теплопроводность.





«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Термоэлектрическая добротность имеет размерность обратной температуры и зависит только от физических свойств материала. Добротность чаще всего используется в виде безразмерной комбинации:

$$ZT = \frac{\sigma S^2 T}{\chi}$$

где T – рабочая или средняя температура преобразователя

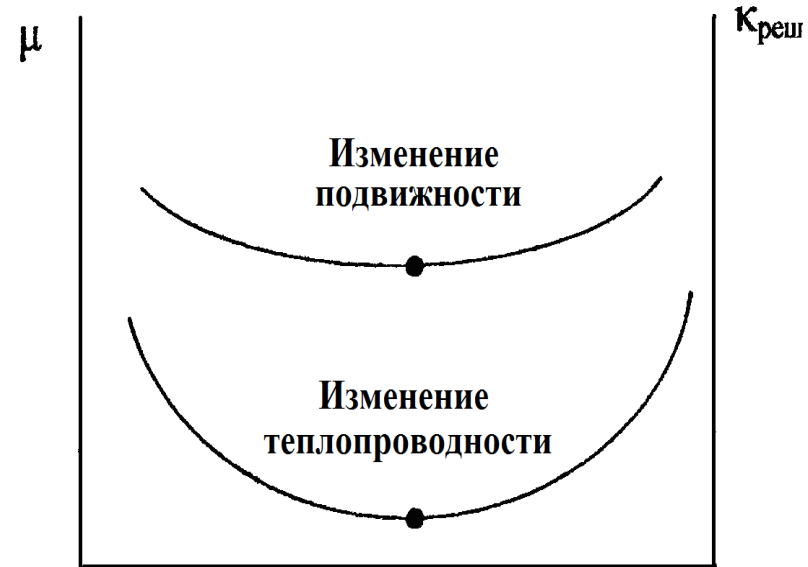


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Перспективы развития термоэлектрических систем охлаждения и генерации электрической энергии

Наиболее эффективными низкотемпературными материалами являются термоэлектрики на основе непрерывных твердых растворов двух полупроводников, например, кремний и германий (высокотемпературные термоэлектрики). Это же возможно и для изоморфных соединений:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  – p-тип,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  – n-тип – псевдобинарные непрерывные твердые растворы для низкотемпературного диапазона.

В обоих случаях компоненты твердого раствора имеют неограниченную растворимость друг в друге.



$\text{Bi}_2\text{Te}_3$

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$

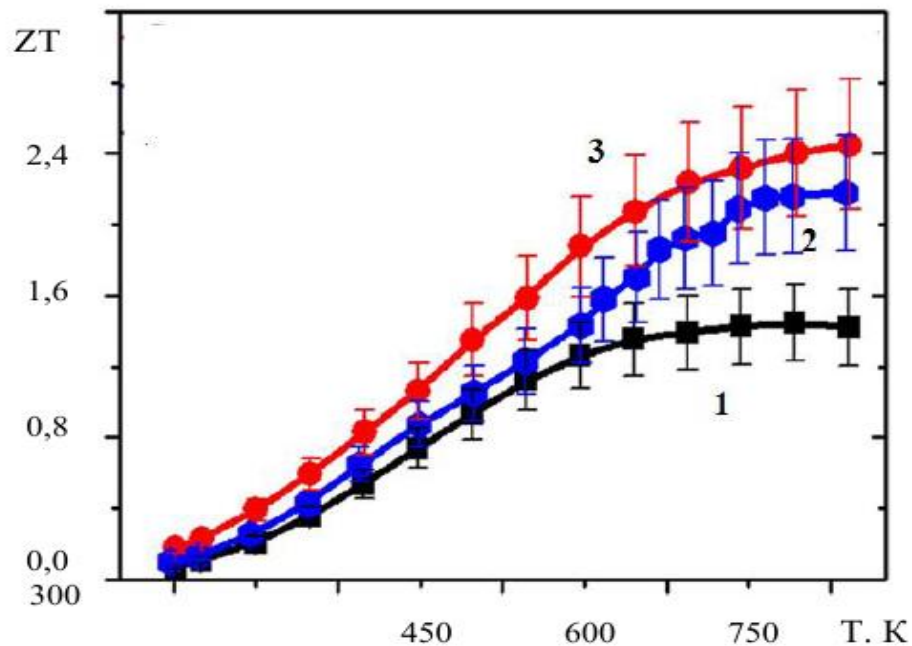
Иллюстрация метода твердых растворов



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Типичные среднетемпературные термоэлектрики

Перспективы развития термоэлектрических систем охлаждения и генерации электрической энергии



Термоэлектрическая добротность ZT для системы

$Pb_{0.98}Na_{0.02}Te+x\% SrTe$  [21]:

1 -  $Pb_{0.98}Na_{0.02}Te$ ;

2 -  $Pb_{0.98}Na_{0.02}Te + 4\% SrTe$ ;

3 -  $Pb_{0.98}Na_{0.02}Te + 8\% SrTe$

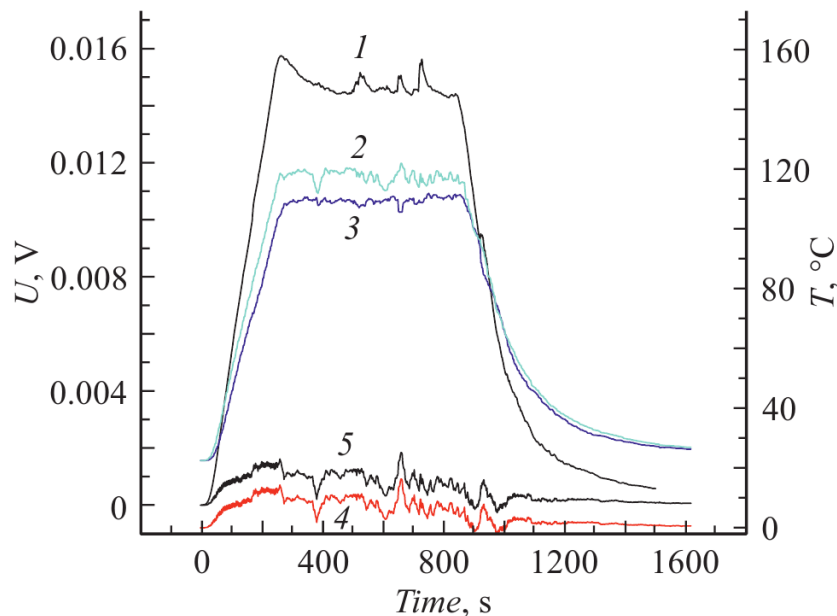
Tan G. et al. // Nature Communications, 2016. - V 7. - P.12167.



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

## Термовольтаический эффект в градиентных системах на основе PbTe

Перспективы развития термоэлектрических систем охлаждения и генерации электрической энергии



Результаты измерения термовольтаического эффекта в гетероструктуре на основе PbTe.

- 1 — выходной сигнал с образца;
- 2 — температура поверхности образца, прилегающей к нагревателю;
- 3 — температура противоположной поверхности образца;
- 4 — временная зависимость разницы температур поверхностей образца, на которых измеряется выходной сигнал;
- 5 — составляющая выходного сигнала, получающаяся за счет эффекта Зеебека в образце, равная  $US \approx \Delta T(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)/3$ .

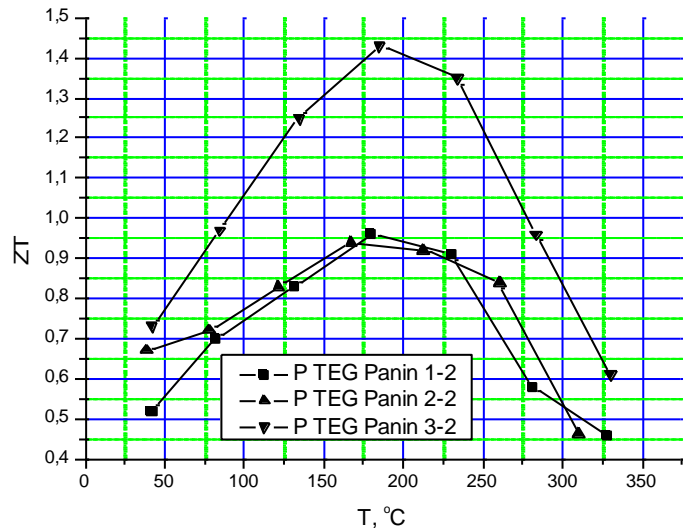


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Перспективы развития термоэлектрических систем охлаждения и генерации электрической энергии

# Перспективы повышения термоэлектрической добротности

- Увеличение КПД термоэлектрических преобразователей
- на 20% приведет к резкому расширению области их применения



Термоэлектрическая добротность (ZT)

ZT =

Текущий показатель

1

Резкое расширение области применения

2 – 3

Замена традиционных кондиционеров

3 – 4



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Заключение

- I. **Термоэлектрические генераторы и системы кондиционирования имеют ряд преимуществ:**
  1. Отсутствие движущихся, изнашивающихся частей, рабочих жидкостей и газов. Роль рабочего вещества в термоэлектрическом кондиционере играют носители заряда в полупроводнике (электроны и дырки).
  2. Практически неограниченный ресурс работы как следствие отсутствия движущихся частей и обычных рабочих веществ, находящихся в области комнатных температур.
  3. Бесшумность работы термоэлектрического блока.
  4. Малая инерционность кондиционера.
  5. Произвольная ориентация в пространстве и поле тяжести, устойчивость к динамическим и статическим перегрузкам.
  6. Возможность плавного и точного регулирования холодо-производительности и температурного режима.
  7. Легкость перехода из режима охлаждения в режим нагрева.
- II. **Возрастание добротности до 2 – 3 приведет к увеличению КПД термоэлектрических преобразователей примерно до 20 % и к резкому расширению области их применения, а величина ZT около 3-4 представляется достаточной для того, чтобы термоэлектрические устройства могли конкурировать по эффективности с электрическими генераторами и холодильными агрегатами, работающими на других принципах.**



**Спасибо за внимание**