

# Ленточный термоэлектрический генератор из углеродного волокна

© Д.К. Иванов<sup>1</sup>, К.Г. Иванов<sup>1</sup>, О.Н. Урюпин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
191186 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Kivanov@mail.ru

Поступила в Редакцию 19 сентября 2021 г.

В окончательной редакции 24 сентября 2021 г.

Принята к публикации 24 сентября 2021 г.

Создан прототип термоэлектрического генератора на  $p-n$ -переходах ленточного углеродного волокна, модифицированного импульсным током.

**Ключевые слова:** углеродное волокно, термоэлектрическая эффективность,  $p-n$ -переход.

DOI: 10.21883/FTP.2022.02.51954.21

## 1. Введение

В связи с глобальным потеплением климата растет необходимость снижения производства тепла и оптимизации его использования. Одним из возможных путей решения проблемы является утилизация тепловых отходов от промышленного и бытового производства путем прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. При этом необходимо учитывать экологичность такого преобразователя для предотвращения дополнительного использования тепла после его вывода из эксплуатации при утилизации. Одним из наиболее экологичных материалов, имеющих в распоряжении человечества, является углерод. Поэтому наше исследование посвящено изучению возможности создания термоэлектрического генератора (ТЭГ) из углеродного волокна (УВ) и измерение его термоэлектрических свойств.

## 2. Эксперимент и обсуждение

Ранее в работе [1] было установлено, что углеродное волокно после воздействия импульсного тока изменяет знак термоэдс с отрицательного на положительный. Такое уникальное свойство УВ было решено использовать для создания последовательности нескольких  $p-n$ -переходов вдоль ленточного УВ. Для этого участок ленты УВ длиной  $\sim 2$  см подвергался воздействию импульсного тока с амплитудным значением в тысячи А и длительностью полупериода 100 мкс. Последующий за ним двухсантиметровый участок ленточного УВ электрическим током не модифицировался, а после него следующие 2 см опять подвергались воздействию импульсного тока. Участки ленточного УВ, подверженные модификации импульсным током, имеют  $p$ -тип проводимости и легко идентифицируются на рис. 1 как распушенные области УВ. Не модифицированные участки УВ сохра-

няют исходную структуру, имеют  $n$ -тип проводимости и видны на рис. 1 как не распушенные области.

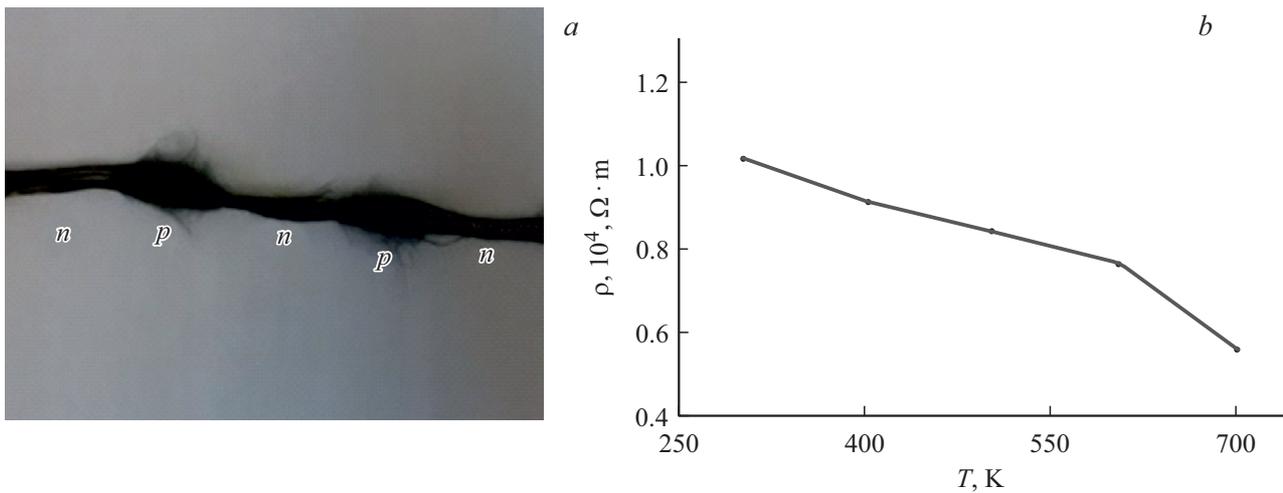
Такая лента с чередующимися участками стала основой для создания прототипа термоэлектрического генератора (ТЭГ) на  $p-n$ -переходах.

Действующая модель ТЭГ была изготовлена из модифицированной импульсным током ленты УВ, намотанной и зафиксированной стеклонитью на кварцевой трубке диаметром 1 см (рис. 2).

Полученное таким образом устройство было названо ленточным термоэлектрическим генератором из углеродного волокна (ЛТГУВ).

На рис. 3 изображена схема, поясняющая работу изготовленного в работе ЛТГУВ рис. 2. На трубку из кварцевого стекла, которая выдерживает большие перепады температур, наматывалось УВ с набором четырех  $p-n$ -переходов. Области  $p$ -типа изображены более толстыми линиями (на рис. 2 это распушенные части УВ). Области  $n$ -типа изображены более тонкими линиями. Волокно с  $p-n$ -переходами наматывалось вокруг кварцевой трубки так, что одна часть  $p-n$ -переходов была расположена противоположно по отношению к другой, как это схематически показано на рис. 3. Одна из сторон нагревалась пламенем пропановой горелки, другая сторона находилась при комнатной температуре (рис. 3). Показания значения термоэдс фиксировались в тот момент, когда при нагревании их максимальное значение начинало уменьшаться. Это означало, что температура холодных  $p-n$ -переходов начинает подниматься и перепад температур уменьшается. Процесс нагрева происходил в течение 5–7 с. Температура фиксировалась термопарой, закрепленной под одним из  $p-n$ -переходов. Величина температуры горячих  $p-n$ -переходов варьировалась изменением расстояния пламени горелки до кварцевой трубки. Таким образом, были получены зависимости, изображенные на рис. 4.

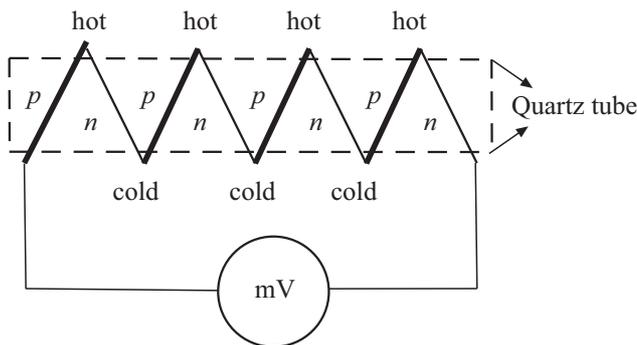
Как видно из рис. 4, наименьшее изменение термоэдс с повышением разности температур от 150 до 500 К имеет УВ  $n$ -типа (линия точками), затем более заметный



**Рис. 1.** *a* — ленточное углеродное волокно после модификации импульсным током. *b* — зависимость удельного сопротивления ЛТГУВ из четырех *p*–*n*-переходов на трубке из кварцевого стекла.



**Рис. 2.** Действующая модель термоэлектрического генератора на *p*–*n*-переходах ленточного УВ на трубке из кварцевого стекла.



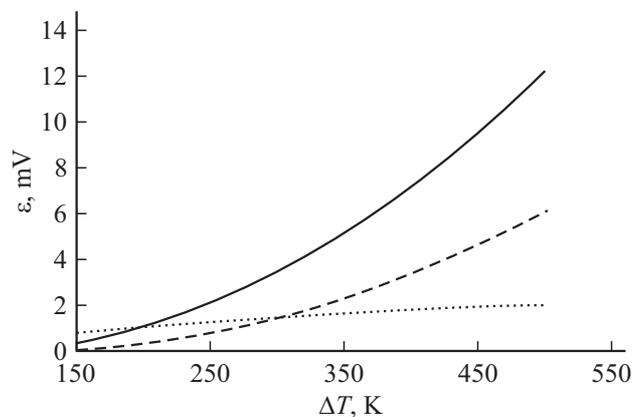
**Рис. 3.** Схема ЛТГУВ, поясняющая его работу.

рост в пределах данного изменения разности температур имеет один *p*–*n*-переход (штриховая кривая), и лента из четырех *p*–*n*-переходов достигает максимального значения ~ 12 мВ при разности в 500 К (сплошная кривая), т.е. температура горячих *p*–*n*-переходов достигает 800 К. Температура холодных *p*–*n*-переходов оставалась комнатной. Заметная нелинейность двух кривых рис. 4

может объясняться разной температурной зависимостью термоэдс для УВ разного типа проводимости, установленной в работе [1].

Для углеродных волокон значение теплопроводности  $\kappa$  лежит в пределах 0.8–1.6 Вт/м·К, которая в работе не измерялась. Термоэлектрическая добротность  $Z = S^2/\rho \cdot \kappa$  по данным удельного электросопротивления  $\rho$ , термоэдс  $S$ , взятых соответственно из рис. 1, *b* и 4 (сплошная линия) для разности температур в 500 К и теплопроводности, положенной равной  $\kappa = 1$  Вт/м·К, при расчете дает значения  $Z \sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

Углеродное волокно способно выдерживать в вакууме разогрев до 3000 К и выше, что позволяет создавать большую разность температур между горячими и холодными *p*–*n*-переходами. Как следует из рис. 4, при разности температуры в 500 К термоэдс одного *p*–*n*-перехода (рис. 4, штриховая кривая) в ~ 5 раз превышает это



**Рис. 4.** Зависимость термоэдс  $\epsilon$  в мВ от разности температур: пунктирная кривая — для УВ *n*-типа, штриховая кривая — для одного *p*–*n*-перехода и сплошная кривая — для четырех *p*–*n*-переходов.

значение при разности в 300 К рис. 4. Еще больший рост термоэдс дает увеличение числа  $p-n$ -переходов сплошная кривая рис. 4.

### 3. Заключение

Создан и испытан прототип термоэлектрического генератора на  $p-n$ -переходах ленточного углеродного волокна, модифицированного импульсным током. Возможность создавать большое число  $p-n$ -переходов и высоких перепадов температур между ними может найти применение в определенных технических задачах. Например, теплостойкие ткани, пронизанные тысячами углеродных волокон с  $p-n$ -переходами, могут одновременно быть теплоизоляторами и генераторами наподобие солнечных батарей.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

[1] Д.К. Иванов, К.Г. Иванов, О.Н. Урюпин. ФТП, **51**, 7 (2017).

*Редактор Г.А. Оганесян*

#### **Ribbon thermoelectric generator of carbon fiber**

*D.K. Ivanov<sup>1</sup>, K.G. Ivanov<sup>1</sup>, O.N. Uryupin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> St. Petersburg State University  
of Industrial Technologies and Design,  
191186 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A prototype of a thermoelectric generator based on  $p-n$  junctions of a carbon fiber ribbon modified by a pulsed current has been created.