

# მაღალტემპერატურული თერმოელექტრული გენერატორი SiGe შენადნობების ფუძეზე

## კარლო ბარბაქაძე

სოხუმის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის ლაბორატორიის ხელმძღვანელი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი

## გურამ ბოკუჩავა

სოხუმის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის დირექტორი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი

## ზურაბ ისაკაძე

სოხუმის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის მეცნიერ-თანამშრომელი

## აზა კუცია

სოხუმის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის მეცნიერ-თანამშრომელი

## ირაკლი ტაბატაძე

სოხუმის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის მეცნიერ-თანამშრომელი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი

## მერი ბარბაქაძე

სოხუმის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის ინჟინერი

## მერი რეხვიაშვილი

სოხუმის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის ინჟინერი

## აბსტრაქტი

სტატიაში წარმოდგენილია ზოგადი ცნობები თერმოელექტრული გენერატორის (თეგ) შედგენილობისა და მუშაობის პრინციპის შესახებ. თეგ-ის ძირითად კვანძებად დასახელებულია თერმოელემენტი და თერმოელექტრული მოდული. აღწერილია თერმოელემენტის კონსტრუქცია და მუშაობის პრინციპი. მოყვანილია 16 თერმოელემენტის შემცველი მონოლითური თერმოელექტრული მოდულის სქემატური გამოსახულება. მოყვანილია თერმოელექტრული მასალის მქვ-ის დამოკიდებულება მის ეფექტურობასა და ცხელსა და ცივ ბოლოებს შორის არსებულ ტემპერატურათა სხვაობაზე. ნაჩვენებია თერმოელექტრული SiGe შენადნობების პერსპექტულობა მაღალტემპერატურული თეგ-ების შესაქმნელად. ნაჩვენებია გერმანიუმის მცირე შემცველობის SiGe შენადნობების გამოყენების უპირატესობა ფართო მოხმარების თეგ-ების შესაქმნელად. აღწერილია n - და p-ტიპის Si<sub>0.95</sub>Ge<sub>0.05</sub> შენადნობების დამზადების, მათი კომუტაციური გადასვლების ფორმირების და მათ ფუძეზე ჰაერზე 900°C ტემპერატურამდე მომუშავე მონოლითური თერმოელექტრული მოდულის შექმნის ტექნოლოგია. აღნიშული ტექნოლოგიებით დამზადებულია 16 თერმოელემენტის შემცველი 6 მოდული, რომლებსაც ცივ ბოლოებზე მიერთებული აქვთ ელექტროსაიზოლაციო კვანძები. მოყვანილია ერთერთი ასეთი თერმოელექტრული მოდულის ენერგეტიკული მახასიათებლები გაზომილი გაზის გამახურებლისა და წყლის გამაცივებლის გამოყენების პირობებში. მითითებულია თერმოელექტრული SiGe შენადნობების ფუძეზე შექმნილი თეგ-ის გამოყენების პერსპექტული მიმართულებები.

## საკვანძო სიტყვები:

თერმოელექტრობა, თერმოელექტრული ეფექტურობა, თერმოელექტრული ბატარეა, თერმოელექტრული გენერატორი

# High Temperature Thermoelectric Generator Based on SiGe Alloys

**Karlo Barbakadze**

Head of Laboratory,  
Sokhumi Institute of Physics and Technology,  
Doctor of Technical Science

**Guram Bokuchava**

Director of Sokhumi Institute of Physics and Technology,  
Doctor of Technical Science

**Zurab Isakadze**

Research Scientist,  
Sokhumi Institute of Physics and Technology

**Aza Kutsia**

Research Scientist,  
Sokhumi Institute of Physics and Technology

**Irakli Tabatadze**

Research Scientist,  
Sokhumi Institute of Physics and Technology,  
Doctor of Technical Science

**Meri Barbakadze**

Engineer,  
Sokhumi Institute of Physics and Technology

**Meri Rekhviashvili**

Engineer,  
Sokhumi Institute of Physics and Technology

## Abstract

The article provides general information on the composition and working principle of the thermoelectric generator (TEG). The main nodes of the TEG are the thermocouple and the thermoelectric module. The article describes the construction and operating principle of the thermocouple and provides a schematic representation of a monolithic thermoelectric module containing 16 thermocouples. It also shows the dependence of the coefficient of performance of the thermoelectric material on its efficiency and the temperature difference between hot and cold ends. The viability for thermoelectric SiGe alloys for the development of high-temperature TEGs as well as the advantages of using SiGe alloys with low germanium content to produce widely used TEGs are demonstrated. The article describes the technology of making n - and p-type Si<sub>0.95</sub>Ge<sub>0.05</sub> alloys, forming their commutative transitions and creating a monolithic thermoelectric module operating at the temperature of 900 °C. 6 modules containing 16 thermoelements are made using the mentioned technologies that have electrical insulation nodes connected to the cold ends. The article provides the energy characteristics of one of the thermoelectric modules that are measured under the conditions of using gas heater and water cooler. Prospective directions for the use of a TEG created based on the thermoelectric SiGe alloys are indicated.

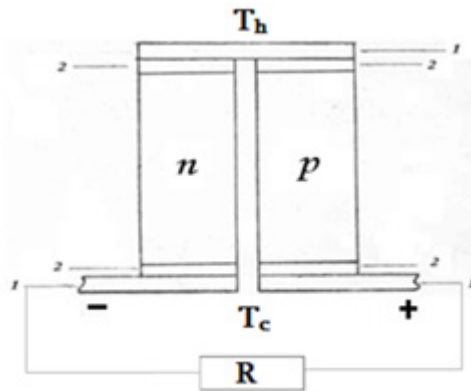
## Keywords:

Thermoelectricity, thermoelectric effectiveness, thermoelectric battery, thermoelectric generator

## შესავალი

თერმოელექტრული გენერატორი (თეგ) მასში გასულ სითბურ ენერგიას პირდაპირ გარდაქმნის ელექტრულ ენერგიად. გარდაქმნას  $n$  - და  $p$ -ტიპის გამტარობის თერმოელექტრული მასალებისაგან დამზადებული შტოები ახორციელებენ, რომლებიც თეგ-ის შემადგენელ თერმოელექტრულ მოდულებში არის განთავსებული.

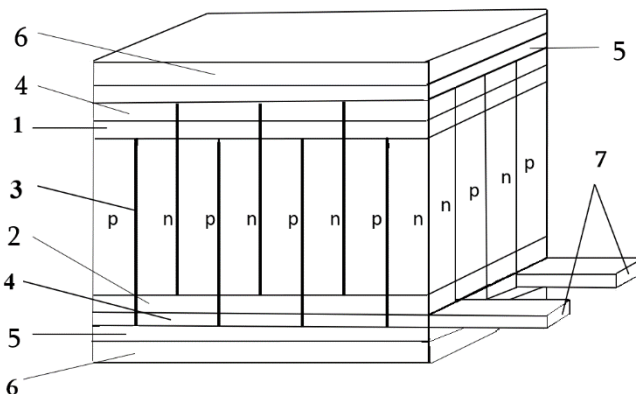
თეგ-ი ერთი ან რამდენიმე მოდულისაგან შედგება. უმარტივეს თეგ-სა და მოდულს თერმოელემენტი წარმოადგენს, რომლის სქემატური გამოსახულება ნახ. 1-ზე.



ნახ. 1. თერმოელემენტის სქემატური გამოსახულება. 1 - დენგამტარები; 2 - კომუტაციური გადასვლები;  $n$  - ტიპის შტო;  $p$  - ტიპის შტო;  $T_h$  - ცხელი ბოლოების ტემპერატურა;  $T_c$  - ცივი ბოლოების ტემპერატურა;  $R$  - მომხმარებლის ელექტრული წინააღმდეგობა.

თერმოელემენტის შტოები ერთიმეორესთან მიმდევრობით არის კომუტაციური და დენგამტარი ფირფიტებით შეერთებული. ეს უკანასკნელები ელექტრული და სითბური დანაკარგების შემცირების მიზნით მაღალი ელექტრული და სითბური გამტარობის მასალებისაგან არის დამზადებული. ამავე მიზნით თერმოელექტრული შტოებისა და საკომუტაციო ფირფიტების დამაკავშირებელი კონტაქტები მაღალი სიმტკიცით, ელექტროგამტარობით და სითბოგამტარობით ხასიათდებიან. როდესაც თერმოელემენტის ერთი ბოლო ცხელია, მეორე კი შედარებით ცივი ის ზეებეკის ეფექტით გარკვეული სიმძლავრის ელექტრულ ენერგიას გამოიმუშავებს.

ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია მიმდევრობით შეერთებული 16 თერმოელემენტის (32 შტოს) შემცველი მონოლითური თერმოელექტრული მოდულის სქემატური გამოსახულება, რომელსაც ცხელ და ცივ ბოლებზე მიერთებული აქვს ელექტროსაიზოლაციო კვანძები.



ნახ. 2. მონოლითური თერმოელექტრული მოდულის სქემატური გამოსახულება.

- 1 - ცხელი მხარის კომუტაციური ფირფიტა;
- 2 - ცივი მხარის კომუტაციური ფირფიტა;
- 3 - შტოებსშორისი ელექტროიზოლაციური ფენა;
- 4 - დენის გამტარები.
- 5 - კერამიკული ფირფიტა;
- 6 - ელექტროსაიზოლაციო კვანძის კოლექტორი;
- 7 - დენის გამომყვანები.

თერმოელექტრული მასალის შტოს მიერ გამოიმუშავებული ელექტრული ენერჯის მქვ  $\eta$  შემდეგი ფორმულით გამოისახება<sup>1</sup>, სადაც  $T_h$  და  $T_c$  არის შტოს ცხელი და ცივი ბოლოების ტემპერატურები,  $Z$  კი შტოს შესაბამისი მასალის ეფექტურობა.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_h - \dot{Q}_c}{\dot{Q}_h} \frac{\sqrt{1 + Z \frac{\dot{Q}_h + \dot{Q}_c}{2}} - 1}{\sqrt{1 + Z \frac{\dot{Q}_h + \dot{Q}_c}{2}} + \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h}}$$

ამ ფორმულის პირველი წევრი მქვ-ის თერმოდინამიკურ ნაწილს წარმოადგენს, რომელიც სამუშაო ტემპერატურის გაზრდით იზრდება, მეორე წევრი კი – მატერიალურ ნაწილს, რომელიც თერმოელექტრული მასალის ეფექტურობის გაზრდით იზრდება. აქედან გამომდინარე, მაღალტემპერატურული თეგ-ის შექმნა მაღალი ეფექტურობის თერმოელექტრული მასალების ფუძეზე ენერგეტიკული თვალსაზრისით პერსპექტიულია.

თერმოელექტრული მასალის ეფექტურობა  $Z$  შემდეგი ფორმულით განისაზღვრება:  
 $Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$

სადაც  $\alpha$  არის ზეებეკის კოეფიციენტი,  $\sigma$  – ელექტროგამტარობა,  $\lambda$  კი – სითბოგამტარობა. თერმოელექტრობაში მომუშავე მკვლევარების ამოცანას მაღალი ეფექტურობის თერმოელექტრული მასალების დამუშავება და მათ ფუძეზე მაღალი ეფექტურობის თეგ-ის შექმნა წარმოადგენს, რაც დაბალი ელექტრული და სითბური წინააღმდეგობების კომპლექსური გადასვლების დამუშავებით მიიღწევა.

ცნობილი მაღალტემპერატურული თერმოელექტრული მასალებიდან მხოლოდ SiGe შენადნობებმა ჰპოვეს პრაქტიკული გამოყენება. მათი პოტენციური მქვ, მაქსიმალური სამუშაო ტემპერატურის ( $T_h = 1100^\circ\text{C}$ -მდე) და ეფექტურობის ( $Z = 0,6 - 1,0 \cdot 10^3 \text{ K}^{-1}$ ) გათვალისწინებით<sup>2,3,4,5</sup>, 15 %-ს აღწევს. გარდა ამისა მათ შეუძლიათ ვაკუუმში, ინერტული გაზის გარემოში და ჰაერზე სტაბილური მუშაობა, რაც თეგ-ის ექსპლუატაციას მნიშვნელოვნად ამარტივებს.

SiGe შენადნობები Si-ისა და Ge-ის მყარ ხსნარს წარმოადგენენ<sup>6</sup>, რომელთა სითბოგამტარობა 8-10 ჯერ ნაკლებია ცალკეული კომპონენტის სითბოგამტარობაზე<sup>3</sup>. მათი ენერგეტიკული ფაქტორის  $\alpha^2 \sigma$  გაზრდა მალეგირებელი ელემენტების დამატებით (ფოსფორი n-ტიპისათვის, ბორი p-ტიპისათვის) ხორციელდება. აღნიშნული ელემენტები კარგად იხსნებიან SiGe შენადნობებში და ოპტიმალური კონცენტრაციის დენის თავისუფალ გადამტანებს – ელექტრონებსა და ხვრელებს წარმოქმნიან შესაბამისად.

## კვლევები

კოსმოსურ ენერგეტიკაში გამოყენებული თეგ-ები  $\text{Si}_{0,68}\text{Ge}_{0,32}$ <sup>6</sup> და  $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ <sup>7</sup> შენადნობების ფუძეზე არის შექმნილი. ეს შენადნობები კომპონენტების ერთობლივი დნობით, შენადნობის მაქსიმონ-იზირებელი ზონური დნობით, ჰომოგენური სხმულის დაფქვით და მიღებული ფხვნილის ვაკუუმური ცხელი წნეხვით არის დამზადებული. ფართო მოხმარების თეგ-ის შესაქმნელად Ge-ის მცირე შემცველობის n - და p-ტიპის  $\text{Si}_{0,95}\text{Ge}_{0,05}$ <sup>6</sup> შენადნობები იქნა დამუშავებული<sup>8,9</sup>. მათი სინთეზი და კომპაქტირება კომპონენტების ერთობლივი დაფქვითა და მიღებული ულტრადისპერსული ფხვნილის

- 1 A. F. Ioffe. Semiconductor's Physics. M. – L., USSR AS Publishing. 1957, 491 p.
- 2 Dismukes J. P., Ekstrom I., Steigmeier E. F., Kudman I., Beers D. S. Thermal and Electrical Properties of Heavily Doped Ge-Si Alloys up to 1300K. J. of Appl. Phys. 35 (1964), pp. 2899-2907.
- 3 J. F. Braun. Application of Silicon Germanium thermoelectric devices for electrical power production in Space. In: Proc. of XIV International Conference of the Energy Conversion. S.-Petersburg, 1995, pp. 394-400.
- 4 B. A. Cook, J. L. Harringa, S. H. Han, and C.B. Vining.  $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$  thermoelectric alloys prepared with GaP additions. J. Appl. Phys. 78 (9), 1 November 1995, pp. 5474-5480.
- 5 D. M. Rowe and V. S. Shukla. The effect of phonon-grain boundary scattering on the lattice thermal conductivity and thermoelectric conversion efficiency of heavily doped fine-grained, hot-pressed silicon germanium alloy. J. Appl. Phys. 52(12), December 1981, pp. 721-726.
- 6 M. Hansen, K. Anderko. Constitution of binary alloys. v.2, M, 1962, 1488 p.
- 7 <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%BE%D1%81-954>
- 8 <https://en.wikipedia.org/wiki/SNAP-10A>
- 9 K. Barbakadze, M. Biliseishvili, Z. Isakadze, I. Tabatadze, V. Gabunia, A. Kutsia, M. Barbakadze, M. Rekhviashvili. Development of Thermoelectric n- and p-type  $\text{Si}_{0,95}\text{Ge}_{0,05}$  Alloys and Creation on Their Base Thermoelectric Batteries, Working in Air Till Temperature 1000 °C. International Conference Advanced Materials and Technologies (Proceedings). Tbilisi, Georgia. October 21-23, 2015.

ვაკუუმური ცხელი წნეხვით განხორციელდა. ცხრილში 1 მოყვანილია აღნიშნული შენადნობების თერმოელექტრული მახასიათებლების საშუალო მნიშვნელობები (n- და p-ტიპის მიმართ)  $T_h = 1000^\circ\text{C}$  და  $T_c = 100^\circ\text{C}$  ტემპერატურულ გრადიენტში. ცხრილიდან ჩანს, რომ თერმოელექტრული SiGe შენადნობების ეფექტურობა Z და მკვ η ნაკლებად არის Ge-ის შემცველობაზე დამოკიდებული. ამ ფაქტისა და n- და p-ტიპის  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$  შენადნობების შედარებით დაბალი თვითღირებულების გათვალისწინებით, მათი გამოყენება ფართო მოხმარების თეგ-ის შესაქმნელად შედარებით პერსპექტიულია.

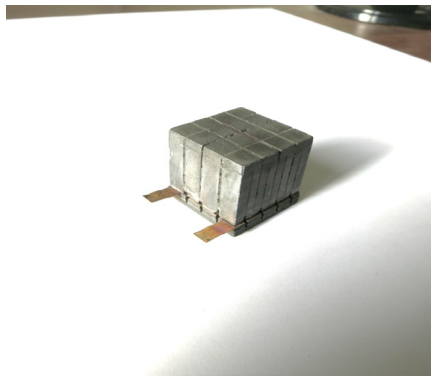
ცხრილი 1

SiGe შენადნობების თერმოელექტრული მახასიათებლები

შენადნობი	$\alpha$ $10^{-6}$ ვ. $\text{K}^{-1}$	$\sigma$ $\text{ომ}^{-1}\text{სმ}^{-1}$	$\lambda$ $10^{-2}$ ვტ.სმ $^{-1}$ K $^{-1}$	$\alpha^2\sigma$ $10^{-4}$ ვტ	Z $10^{-3}$ K $^{-1}$	$\eta$ %
$\text{Si}_{0.68}\text{Ge}_{0.32}$	225	500	4.65	25.3	0.54	9.1
$\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$	200	575	4.25	23.0	0.54	9.1
$\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$	210	706	6.55	31.1	0.47	8.2

თერმოელექტრული მასალის ფუძეზე თეგ-ის შექმნის ერთ-ერთ წინაპირობას მისთვის მექანიკურად მტკიცე და დაბალი ელექტრული და სითბური წინააღმდეგობების კომპლუტაციური გადასვლების დამუშავება წარმოადგენს. ამ მიზნით n- და p-ტიპის  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$  შენადნობებისათვის საკომპლუტაციო მასალებად გამოყენებულია გრაფიტი და Si-B შენადნობი<sup>10, 11</sup>. გრაფიტის კომპლუტაციას ჰაერზე  $350^\circ\text{C}$  ტემპერატურამდე შეუძლია სტაბილურად მუშაობა, ვაკუუმში და ინერტული გაზის გარემოში კი –  $900^\circ\text{C}$  ტემპერატურამდე. მისგან განსხვავებით, Si-B შენადნობის კომპლუტაციას, როგორც ვაკუუმში და ინერტული გაზის გარემოში, ასევე ჰაერზე  $1100^\circ\text{C}$  ტემპერატურამდე შეუძლია სტაბილურად მუშაობა.

ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია მიმდევრობით შეერთებული 16 თერმოელემენტის შემცველი მონოლითური თერმოელექტრული მოდულის ფოტოგრაფია. მისი შტოები დამზადებულია n- და p-ტიპის  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$  შენადნობებისაგან. მათი ზომებია: ფართი –  $0,3 \times 0,5$  სმ<sup>2</sup>; სიგრძე – 1.8 სმ. შტოები ერთიმეორესთან 0.03 სმ სისქის მინა-კერამიკული კომპოზიტის ფენით არის დაკავშირებული. მოდულის ცხელი მხარის კომპლუტაციური ფირფიტები დამზადებულია 0.3 სმ სისქის Si-B შენადნობისაგან, ცივი მხარის კომპლუტაციური ფირფიტები კი – 0.2 სმ სისქის ელექტროდული გრაფიტისაგან. კომპლუტაციური ფირფიტები შტოებთან Fe-Ni-ის შენადნობისაგან დამზადებული ფირით არის მირჩილული. მოდულს ცივ მხარეზე მიერთებული აქვს AlN-ისა და გრაფიტის ფირფიტებისაგან დამზადებული ელექტროსაიზოლაციო კვანძი, დენის გამომყვანებით<sup>12</sup> მათი შეკავშირება დიფუზიური შედეგებით განხორციელდა.



ნახ. 3. მიმდევრობით შეერთებული 16 თერმოელემენტის შემცველი მონოლითური თერმოელექტრული მოდული. (მასშტაბი: 1:1)  
ნახ. 4

ა-ზე ნაჩვენებია 0.2 სმ სისქის ფოლადის ფირფიტებისაგან შეკრული წყლის გამაცივებელთან მირჩილული თერმოელექტრული მოდულის ფოტოგრაფია. მირჩილვა კალით განხორციელდა ნახ. 4

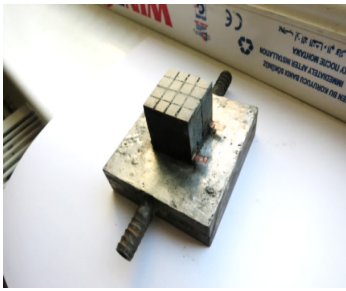
10 Guram Bokuchava, Karlo Barbakadze, Giorgi Darsavelidze, Boris Shirokov. Achievements of Sukhumi Iliia Vekua Institute of Physics and Technology in the field of thermoelectric materials science and instrument making. Jour. of Thermoelectricity #6, Kiev, 2017.

11 Karlo Barbakadze, Zurab Isakadze, Aza Kutsia, Meri Barbakadze, and Meri Rekhviashvili. Structural and thermoelectric characteristics of n- and p-types  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$  alloys, synthesized by hot pressing. International Conference Lopota Resort, Georgia, October 1-6, 2017 (thesis).

12 Karlo Barbakadze, Guram Bokucava, Zurab Isakadze, Aza Kutsia, Irakli Tabatadze, Meri Barbakadze, Meri Rekhviashvili. Electrical insulating assembly on base aluminum nitride for thermoelectric Batteries. Journal ENERGI № 3(91) Tbilisi, 2019.



**ბ**-ზე ნაჩვენებია თერმოელექტრული მოდულის გამოცდის ამსახველი ფოტოგრაფია. მოდულის ცხელი ბოლო ბუნებრივი გაზის წვის შედეგად წარმოქმნილი ალით ცხელდება, ცივი ბოლო კი გამდინარე წყლით ცივდება.



**ა**



**ბ**

ნახ. 4. **ა.** თერმოელექტრული მოდული მირჩილული წყლის გამაცივებელთან (1x 0.4); **ბ.** თერმოელექტრული მოდულის გამოცდა მოდულის ენერგეტიკული მახასიათებლები:  $T_h = 717^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c = 97^{\circ}\text{C}$ ;  $T_h - T_c = 620^{\circ}\text{C}$ ;  $E = 3.3$  ვ;  $R_{\text{ობტ}} = 0.5$  ომ;  $v = 1.64$  ვ;  $W = 5.38$  ვტ;  $w = 0.73$  ვტ/სმ<sup>2</sup>.

ანალოგიური კონსტრუქციის თერმოელექტრული მოდული, დამზადებული n- და p-ტიპის  $\text{Si}_{0.68}\text{Ge}_{0.32}$  შენადნობების ფუძეზე, გამოცდილი იქნა ჰაერზე  $700\text{--}200^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურულ გრადიენტზე მუშაობის პირობებში. მისი ენერგეტიკული მახასიათებლები 1 წლიანი გამოცდის შემდეგ 3% იქნა შემცირებული.

### დასკვნები

n- და p-ტიპის  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$  შენადნობების ფუძე შექმნილი მონოლითური თერმოელექტრული მოდული, როგორც მინი თეგი, აღჭურვილი გაზის გამახურებლით, დემონსტრირებული იქნა თავდაცვის ეროვნული აკადემიის სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე, რამაც ოფიცრებისა და მსმენელების დიდი ინტერესი გამოიწვია.

თერმოელექტრული SiGe შენადნობების ფუძეზე შექმნილი დენის წყაროს გამოყენება საქართველოს მთიან რეგიონებში განთავსებული სასაზღვრო პუნქტების ელექტრული მომსახურებისათვის პერსპექტიულად მიგვაჩნია. ანალოგიური მიზნით იქ ფოტოელექტრული დენის წყაროები გამოიყენება, რომელთაც ღამისა და უამინდობის პერიოდში თეგ-ი ჩაენაცვლება.

ანალოგიური თეგ-ის გამოყენება (ჰაერის რადიატორით) ძნელად მისაღწეად ადგილებში განთავსებული მონიტორინგისა და სათვალთვალ ობიექტების უწყვეტი ელექტრული მომსახურებისათვის პერსპექტიულად მიგვაჩნია.

საინტერესოა აგრეთვე გაზისა და მზის წყლის გამაცხელებლებთან კომბინირებული SiGe შენადნობების ფუძეზე შექმნილი თეგ-ის გამოყენება. თეგ-ის მიერ გატარებული სითბო ამ შემთხვევაში პირდაპირი დანიშნულებით (წყლის გასაცხელებლად) გამოიყენება და თეგ-ის ეფექტურობა მისი მუშა ფართის ერთეულის მიერ გამომუშავებული ელექტრული ენერგიის სიმძლავრით შეფასდება.

### გამოყენებული ლიტერატურა

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_materials](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_materials);
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator);
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope\\_thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator);
- Ромашка (ядерная энергетическая установка);
- <https://ru.frwiki.wiki/wiki/BES-5>;
- <https://en.wikipedia.org/wiki/SNAP-10A>.