ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

EVALUATION OF PERFORMANCE OF VACUUM TUNNEL DIODES AND THEIR USE AS GENERATOR OF ELECTRICITY

С.Нестеров*, д.т.н., А.Холопкин*, к.ф.-м.н. / sbnesterov@niivt.ru
S.Nesterov*, D.Sc., A.Kholopkin*, Ph.D.

Проведены теоретические оценки характеристик вакуумных туннельных диодов (ВТД) с горячим металлическим электродом и холодным электродом, изготовленным из полупроводника n-типа, в температурном диапазоне от 300 до 600 К. Результаты вычислений показывают перспективность использования ВТД в качестве генераторов электроэнергии в указанном диапазоне температур. Рассчитанные величины удельной генерируемой электрической мощности и КПД вакуумных туннельных диодов в 1,5–3 раза и в 3–4 раза превышают соответствующие характеристики термоэлектрических преобразователей энергии.

Theoretical characteristics of vacuum tunnel diodes (VTD) with metal hot electrode and a cold electrode that is made of n-type semiconductor in the temperature range from 300 to 600 K are estimated. The calculation shows good prospects for the use of VTDs as generators of electricity in the specified temperature range. The calculated values of the specific electrical power and efficiency of VTDs are 1.5 to 3 times and 3 to 4 times higher than the corresponding characteristics of the thermoelectric energy converters.

Одной из важнейших задач в области энергосбережения является создание устройств по преобразованию низкотемпературного тепла в электричество. В настоящее время для этого используются термоэмиссионные и термоэлектрические преобразователи энергии.

Термоэмиссионные преобразователи энергии представляют собой вакуумные диоды с электродами, расположенными на сравнительно большом расстоянии – не менее нескольких микрон [1]. Рабочие температуры этих преобразователей находятся в диапазоне 1500–2500°C из-за большой величины работы выхода электронов из катода, составляющей около 4–5 эВ.

Термоэлектрические преобразователи энергии – твердотельные полупроводниковые приборы с p-n-переходами [2, 3]. Они могут работать в диапазоне температур от –100 до 600°C, но имеют сравнительно малый КПД, обусловленный высокой теплопроводностью полупроводника из-за

значительного вклада решеточной компоненты в общую теплопроводность материала.

Целью настоящей работы является определение основных характеристик вакуумных туннельных диодов (ВТД) для оценки возможности их использования в качестве генераторов электроэнергии в диапазоне температур от 50 до 300°C.

ВТД, как и термоэмиссионные приборы, состоят из двух плоских электродов, помещенных в вакуум и разделенных промежутком шириной порядка 1 нм. Катод изготовлен из металла, а анод – из полупроводника n-типа. Работа выхода электронов из катода выше работы выхода электронов из анода, а температура катода выше температуры анода. Благодаря эффекту туннелирования, электронам, испущенным из катода, не надо преодолевать потенциальный барьер размером в несколько электрон-вольт. Как и в диодах Шоттки [4], им необходимо преодолеть потенциальный барьер гораздо меньшей высоты, кото-

* НИИ вакуумной техники им. С.А.Векшинского / Vekshinski Research Institute of Vacuum Technology.

рая равна разности работ выхода электронов из металла и полупроводника. В зависимости от вида металла и полупроводникового материала, а также уровня легирования полупроводника, разность этих работ может настраиваться и находиться в диапазоне от 0,1 до 1 эВ, поэтому эффективное генерирование электроэнергии может быть обеспечено при значительно меньших температурах. Кроме того, наличие вакуумного промежутка между электродами устраняет решеточную компоненту теплопроводности, что позволяет увеличить КПД вакуумных туннельных диодов.

Расчет основных характеристик ВТД, таких как плотность электрического тока, плотность потока энергии, генерируемая электрическая мощность и КПД в зависимости от напряжения, проводился при следующих условиях:

- электроды в ВТД плоские и параллельны друг другу, характеристики ВТД зависят только от координаты z в направлении, перпендикулярном плоскости электродов;
- ВТД находится в состоянии термодинамического равновесия;
- протекание электрического тока не нарушает термодинамическое равновесие;
- отсутствие поверхностных состояний в полупроводнике;
- не учитывается снижение высоты потенциального барьера в полупроводнике за счет сил изображения;
- ширина обедненного слоя в полупроводнике меньше длины свободного пробега электронов,

поэтому расчеты плотности потока электронов можно проводить в баллистическом режиме;

- отсутствие переноса тепла, обусловленного решеточной теплопроводностью, из-за наличия вакуумного зазора между электродами;
- температура металлического электрода выше температуры полупроводникового электрода ($T_m > T_n$).

Поскольку работа выхода электронов из металла выше работы выхода электронов из полупроводника n -типа ($\Phi_m > \Phi_n$), электроны покидают полупроводник, оставляя его заряженным положительно, и заряжают металлический электрод отрицательно.

С учетом перечисленных выше допущений, для плотности электрического тока j и плотности потока энергии q , переносимого электронами в направлении оси z в баллистическом режиме, справедливы следующие выражения [6, 7]:

$$j = \frac{4\pi q_e m}{h^3} \int_0^\infty \tau(E_z V_d) \frac{1}{\exp\left(\frac{E_r + E_z - F - V_d}{k_b T}\right) + 1} dE_r dE_z, \quad (1)$$

$$q = \frac{4\pi m}{h^3} \int_0^\infty \tau(E_z V_d) (E_r + E_z) \frac{1}{\exp\left(\frac{E_r + E_z - F - V_d}{k_b T}\right) + 1} dE_r dE_z, \quad (2)$$

где q_e – заряд электрона; m – масса электрона; h – постоянная Планка; E_r – энергия электронов с импульсами, лежащими в плоскости параллельной поверхности электродов; E_z – энергия электронов с импульсами, лежащими в направлении, перпендикулярном поверхности электродов;

One of the major challenges in the field of energy saving is the creation of devices for converting low temperature heat into electricity. Currently, thermionic and thermoelectric energy converters are used for these purposes.

Thermionic energy converters are vacuum diodes with electrodes placed at a relatively great distance from each other, which is not less than a few microns [1]. Operating temperature of these converters is in the range of 1500–2500°C due to the large cathode work function, which is about 4–5 eV.

Thermoelectric energy converters are solid-state semiconductor devices with p-n junctions [2, 3]. They can work in the temperature range from -100°C to +600°C, but have a relatively low efficiency due to the high thermal conductivity of the semiconductor as a result of the significant contribution of lattice component in the overall thermal conductivity of the material.

The aim of this project is to define the basic characteristics of vacuum tunnel diodes (VTD) to assess the possibility of their use as generators of electricity in the

temperature range from 50°C to 300°C.

VTD like thermionic devices consist of two flat electrodes placed in vacuum and separated by a gap of about 1 nm. The cathode is made of metal, and the anode of the n-type semiconductor. The cathode work function is above the anode work function and the cathode temperature is above the anode temperature. Thanks to the tunneling effect, for the electrons emitted from the cathode, it is not necessary to overcome a potential barrier of several electron volts. As in the Schottky diodes [4],

Рис.1. Форма потенциального барьера в полупроводнике $U(z, d_0, V_d)$ в зависимости от расстояния z в нм для ширины вакуумного зазора $d_0 = 0,1, 0,9$ и $2,2$ нм, концентрации электронов $N_n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$, напряжения на ВТД $V_d = 0,1$ эВ и работы выхода электронов $\Phi_m = 3$ эВ и $\Phi_n = 2$ эВ из металла и полупроводника соответственно

Fig.1. The shape of the potential barrier in the semiconductor, $U(z, d_0, V_d)$ depending on the z distance in nm for the width of the vacuum gap $d_0 = 0.1, 0.9$ and 2.2 nm, concentration of electrons $N_n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$, voltage $V_d = 0.1$ eV and the work of electrons $\Phi_m = 3$ eV and $\Phi_n = 2$ eV for the metal and semiconductor, respectively

F – энергия Ферми; K_b – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; V_d – напряжение на

ВТД; $\tau(E_z, V_d)$ – коэффициент прозрачности потенциального барьера.

Для оценки коэффициента прозрачности при туннелировании электронов через потенциальный барьер $\tau(E_z, V_d)$, который имеет представленную на рис.1 форму, в квазиклассическом приближении можно применить следующую формулу [5]:

$$\tau(E_z, V_d) = \tau_0 \exp\left(-\frac{4\pi\sqrt{2m}}{h} \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{U(z, V_d) - E_z} dz\right), \quad (3)$$

где E_z – компонента энергии электрона в направлении, перпендикулярном поверхности электродов; z_1 и z_2 – точки на кривой потенциального барьера с одинаковыми значениями E_z ; τ_0 – коэффициент порядка 1.

На рис.1 представлены различные формы потенциального барьера в полупроводнике $U(z, d_0, V_d)$ в зависимости от расстояния z для различных значений ширины вакуумного зазора d_0 . Из рис.1 следует, что с уменьшением d_0 электроны могут эффективно туннелировать через вакуумный зазор, при этом высота потенциального барьера на поверхности полупроводника возрастает до значения, равного разности работ выхода электронов из металла и полупроводника.

Расчеты характеристик ВТД проводились для следующих значений параметров:

- разность работ выхода электронов из металла и полупроводника n -типа $\Delta U = 0,1-1,0$ эВ (работа выхода для кремния $\Phi_n = 4,2$ эВ);
- концентрация донорной примеси $N_n = 10^{20}-10^{25} \text{ м}^{-3}$;
- расстояние между электродами $d_0 = 0,1-5,0$ нм;

they must overcome the potential barrier of much smaller height, which is equal to the difference of electron work function for metal and semiconductor. Depending on the type of metal and semiconductor and on semiconductor doping, the difference between these works can be adjusted in the range from 0.1 eV to 1 eV, so the effective power generation can be achieved at much lower temperatures. In addition, the vacuum gap between the electrodes eliminates the lattice component of thermal conductivity, which allows to increase the efficiency of the vacuum tunnel diodes.

The calculation of the main characteristics of the VTDs, such as the electric current density, power density, electrical power and efficiency depending on voltage, was carried out under the following conditions:

- electrodes are flat and parallel to each other. The characteristics of VTDs depend only on the coordinate z in the direction perpendicular to the electrodes plane;
- VTD is the state of thermodynamic equilibrium;
- the electric current does not violate thermodynamic equilibrium;
- the absence of surface states in the semiconductor;

- reduction of the potential barrier height in a semiconductor due to image forces is not taken into account;
- the width of the depleted layer in the semiconductor is less than the mean free path of the electrons, so calculations of the density of the electron beam can be performed in a ballistic mode;
- no heat transfer caused by lattice thermal conductivity, due to the vacuum gap between the electrodes;
- temperature of the metal electrode is above the temperature of the semiconductor electrode ($T_m > T_n$).

- разность температур между горячим металлическим и холодным полупроводниковым электродами $\Delta T = 0-300$ К при фиксированной температуре полупроводникового электрода $T_n = 300$ К.

На рис.2 приведены зависимости плотности электрического тока $j(d_o, T_m, V_d)$ и плотности потока энергии $q(d_o, T_m, V_d)$ от напряжения на ВТД V_d для $T_m = 500$ К и разности работ выхода $0,2$ В. Зависимость плотности электрического тока $j(d_o, T_m, V_d)$ от V_d представляет собой вольт-амперную характеристику ВТД, где напряжение холостого хода при $j = 0$ равно $0,07$ В, а ток короткого замыкания при $V_d = 0$ равен 700 А/см². Максимальная плотность потока энергии (тепла), переносимого электронами, составляет 130 Вт/см² при разности температур между электродами 200 К.

Если толщина электродов равна $0,2$ мм, то для молибдена с коэффициентом теплопроводности 131 Вт/м·К при температуре 500 К и кремния с коэффициентом теплопроводности 148 Вт/м·К при температуре 300 К, при потоке энергии 130 Вт/см² на металлическом электроде происходит падение температуры на 2 К, а на кремниевом электроде – на $1,8$ К. Таким образом, чтобы создать на вакуумном промежутке разность температур 200 К, необходимо приложить к электродам ВТД разность температур $203,8$ К.

Расчеты показывают, что с уменьшением N_n происходит уменьшение максимальных значений плотности электрического тока и потока энергии.

Рис.2. Зависимости плотности электрического тока $j(d_o, T_m, V_d)$ в А/см² и плотности потока энергии $q(d_o, T_m, V_d)$ в Вт/см² от напряжения V_d в В для $d_o = 0,6$ нм, $T_m = 500$ К, $T_n = 300$ К, $\Phi_m = 4,4$ эВ, $\Phi_n = 4,2$ эВ и концентрации электронов $N_n = 10^{25}$ м⁻³

Fig.2. Dependence of electric current density $j(d_o, T_m, V_d)$ in А/см² and of energy flux density $q(d_o, T_m, V_d)$ in Вт/см² on the voltage V_d for $d_o = 0.6$ nm, $T_m = 500$ K, $T_n = 300$ K, $\Phi_m = 4.4$ eV, $\Phi_n = 4.2$ eV and electron concentration $N_n = 10^{25}$ m⁻³

Удельная электрическая мощность, генерируемая ВТД, равна произведению напряжения на плотность электрического тока. КПД вакуумного туннельного диода определяется как отношение

Since the electron work function for metal is higher than for n-type semiconductor ($\Phi_m > \Phi_n$), electrons leave the semiconductor, leaving it positively charged, and charge metal electrode negatively.

With the above assumptions the following expression are valid for electric current density j and the energy flux density q carried by the electrons in the z axis direction in the ballistic regime [6, 7]:

$$j = \frac{4\pi q_e m}{h^3} \int_0^\infty \tau(E_z V_d) \times \frac{1}{\exp\left(\frac{E_r + E_z - F - V_d}{K_b T}\right) + 1} dE_r dE_z, \quad (1)$$

$$q = \frac{4\pi m}{h^3} \int_0^\infty \tau(E_z V_d) (E_r + E_z) \times \frac{1}{\exp\left(\frac{E_r + E_z - F - V_d}{K_b T}\right) + 1} dE_r dE_z, \quad (2)$$

where q_e is the electron charge; m is the electron mass; h is Planck constant; E_r is the energy of electrons with momenta lying in planes parallel to the electrode surface; E_z is electrons energy with momenta lying in the direction perpendicular to the surface of the electrode; F is the Fermi energy; K_b is Boltzmann constant; T is absolute temperature; V_d is the voltage at VTD; $\tau(E_z, V_d)$ is

the transparency coefficient of a potential barrier.

To estimate the transparency coefficient for electron tunneling through a potential barrier $\tau(E_z, V_d)$, which form is represented in Fig.1, the following formula can be applied in quasiclassical approximation [5]:

$$\tau(E_z V_d) = \tau_0 \exp\left(-\frac{4\pi\sqrt{2m}}{h} \times \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{U(z, V_d) - E_z} dz\right), \quad (3)$$

where the E_z is component of the electron energy in the direction perpendicular to the surface of the electrodes; z_1 и z_2 are points on the curve of the potential barrier with

Рис.3. Зависимости удельной электрической мощности $P(d_0, T_m, V_d)$ в Вт/см² и КПД $\eta(d_0, T_m, V_d)$ в % от напряжения V_d для $d_0 = 0,6$ нм, $T_m = 500$ К, $T_n = 300$ К, $\Phi_m = 4,4$ эВ, $\Phi_n = 4,2$ эВ и концентрации электронов $N_n = 10^{25}$ м⁻³

Fig.3. Dependence of specific electric power $P(d_0, T_m, V_d)$ in W/cm² and the efficiency $\eta(d_0, T_m, V_d)$ on the voltage V_d for $d_0 = 0.6$ nm, $T_m = 500$ K, $T_n = 300$ K, $\Phi_m = 4.4$ eV, $\Phi_n = 4.2$ eV and electron concentration $N_n = 10^{25}$ m⁻³

удельной генерируемой электрической мощности к плотности потока энергии, переносимой электронами. На рис.3 представлены типичные зависимости удельной электрической мощности

$P(d_0, T_m, V_d)$ и КПД $\eta(d_0, T_m, V_d)$ от напряжения V_d для $T_m = 500$ К и разных значений ширины вакуумного зазора d_0 .

Из рис.3 следует, что вычисленные зависимости удельной электрической мощности и КПД от напряжения на ВТД имеют колоколообразную форму. Аналогичные зависимости КПД получаются и для других концентраций донорной примеси. С уменьшением N_n происходит снижение удельной электрической мощности и увеличение КПД.

На рис.4 представлены зависимости максимальной удельной электрической мощности $P_{\max}(d_0, T_m)$ от T_m для $T_n = 300$ К, $\Phi_m = 4,4$ эВ, $\Phi_n = 4,2$ эВ, $d_0 = 0,6$ нм и концентрации электронов $N_n = 10^{25}$ м⁻³. Для сравнения также приведены максимально возможные значения КПД в цикле Карно $\eta_{\text{carno}} = (T_m - T_n)/T_m$.

Анализ результатов вычислений позволяет сделать следующие выводы:

- электрическая мощность и КПД возрастают с увеличением разности температур между электродами;
- с увеличением концентрации атомов донорной примеси увеличивается генерируемая электрическая мощность и незначительно уменьшается КПД;
- с увеличением разности работ выхода уменьшается генерируемая электрическая мощность и увеличивается КПД;
- с увеличением ширины вакуумного зазора уменьшается генерируемая электрическая

the same values of E_z ; τ_0 is the coefficient close to 1.

Fig.1 shows various shapes of the potential barrier in the semiconductor $U(z, d_0, V_d)$ depending on the distance z for different values of the vacuum gap d_0 . It follows that with a decreasing of d_0 the electrons can effectively tunnel through the vacuum gap, and the height of the potential barrier at the semiconductor surface increases to a value equal to the difference between the electron work functions for metal and semiconductor.

Characteristics of VTDs were calculated for the following parameters:

- difference between the electron work function for metal and n-type semiconductor $\Delta U = 0.1-1.0$ eV (the work function for silicon $\Phi_n = 4.2$ eV);
- donor impurity concentration $N_n = 10^{20}-10^{25}$ м⁻³;
- distance between electrons $d_0 = 0.1-5.0$ nm;
- temperature difference between hot metal and cold semiconductor electrodes $\Delta T = 0-300$ К at a fixed temperature of the semiconductor electrode $T_n = 300$ К.

Fig.2 shows the dependences of electric current density $j(d_0, T_m, V_d)$ and energy flux

density $q(d_0, T_m, V_d)$ on the voltage V_d on VTD for $T_m = 500$ К and for the difference of the work functions of 0.2. The dependence of electric current density $j(d_0, T_m, V_d)$ on V_d is a voltage-current characteristic of the VTD, where the open-circuit voltage at $j = 0$ is equal to 0.07 V, and the short-circuit current at $V_d = 0$ is equal to 700 A/cm². The maximum density of energy (heat) flux carried by electrons is 130 W/cm² at the temperature difference between the electrodes of 200 К.

If the thickness of the electrodes is 0.2 mm, then for

Рис.4. Зависимости максимальной удельной электрической мощности $P_{max}(d_o, T_m)$ в Вт/см² и максимального КПД $\eta_{max}(d_o, T_m)$ в % от T_m в К для $d_o = 0.6$ нм, $T_n = 300$ К, $\Phi_m = 4.4$ эВ, $\Phi_n = 4.2$ эВ и концентрации электронов $N_n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$

Fig.4. Dependence of maximum specific electric power $P_{max}(d_o, T_m)$ in W/cm² and the maximum efficiency $\eta_{max}(d_o, T_m)$ in % on T_m for $d_o = 0.6$ nm, $T_n = 300$ K, $\Phi_m = 4.4$ eV, $\Phi_n = 4.2$ eV and electron concentration $N_n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$

мощность и снижается КПД (сильнее для малых значений $d_o < 0.4$ нм и слабее для больших значений $d_o > 0.6$ нм);

- КПД находится в диапазоне 40–50% от максимально возможного значения в цикле Карно.

С практической точки зрения в температурном диапазоне 350–600 К оптимальны концентрация электронов $N_n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$, разность работ выхода 0,2–0,3 эВ и ширина вакуумного зазора 0,5–0,8 нм, при которых достигается максимальная удельная электрическая мощность до 15 Вт/см² и КПД в диапазоне 45–50% от максимально возможного значения в цикле Карно.

Рассчитанные характеристики ВТД в температурном диапазоне 350–600 К превосходят аналогичные характеристики термоэлектрических преобразователей энергии. Так, удельная генерируемая мощность и КПД вакуумных туннельных диодов в 1,5–3 раза и в 3–4 раза превышают соответствующие характеристики термоэлектрических преобразователей энергии. Для получения требуемых значений напряжения и тока генераторов электрической энергии отдельные ВТД могут соединяться последовательно-параллельно.

Приведенные оценки характеристик ВТД показывают перспективность их использования в качестве генераторов электроэнергии в температурном диапазоне 350–600 К.

Одной из основных трудностей при создании ВТД является разработка принципиально новой технологии изготовления структур с вакуумным зазором шириной 0,5–0,8 нм, равной двум-трем межатомным расстояниям в твердом теле. Однако развитие нанотехнологий в электро-

molybdenum with thermal conductivity of 131 W/m·K at temperature of 500 K and for silicon with thermal conductivity of 148 W/m·K at temperature of 300 K, when the energy flux is equal to 130 W/cm², a temperature drop for metal electrode reaches 2 K, and for silicon electrode – 1.8 K. Thus, to create in vacuum gap the temperature difference of 200 K, the temperature difference between electrodes of VTD should be equal to 203.8 K.

Calculations show that with decreasing of N_n the maximum density of electric current and energy flux decreases.

The specific electrical power generated by the VTD is equal to the product of voltage and electric current density. The efficiency of the vacuum tunnel diode is defined as the ratio of the generated specific electrical power to the energy flux density transferred by electrons. Fig.3 shows typical dependences of the specific electric power $P(d_o, T_m, V_d)$ and efficiency $\eta(d_o, T_m, V_d)$ on the voltage V_d for $T_m = 500$ K and different values of the vacuum gap width d_o .

Fig.3 shows that the calculated dependences of specific electric power and efficiency on

the voltage on VTD have bell-shaped form. Similar dependences of the efficiency are obtained for other concentrations of the donor impurity. With the decrease of N_n decreases specific electric power and increases efficiency.

Fig.4 presents the dependences of maximum specific electric power $P_{max}(d_o, T_m)$ on T_m for $T_n = 300$ K, $\Phi_m = 4.4$ eV, $\Phi_n = 4.2$ eV, $d_o = 0.6$ nm and the concentration of electrons, $N_n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$. For comparison also the maximum values of the efficiency in the Carnot cycle $\eta_{carno} = (T_m - T_n)/T_m$ are shown.

нике и микроэлектромеханике позволяет надеяться, что в ближайшее время существующие трудности будут успешно преодолены.

Возможным технологическим решением для получения ВТД с вакуумным зазором субнанометрового диапазона может быть нанесение на поверхность полупроводника перфорированных одно-, двух-, трехатомных слоев изолирующих материалов, мономолекулярных слоев органических соединений и графеновых пленок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стаханов И.П., Черковец В.Е. Физика термоэмиссионного преобразователя. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектронные устройства: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1978.
3. Dresselhaus M.S. and Heremans J.P. Thermoelectric Handbook, Macro to Nano, Ed. by D.M. Rowe, CRC Press, 2006, Chap. 34.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х т.; кн. 1. – М.: Мир, 1984.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматгиз, 1963.
6. Holopkin A.I., Abrutin V.N. Vacuum Tunnel Diodes for Cooling Devices and Power Generators, Proceedings of International Conference on Thermoelectrics (ICT 2006), Austria, Vienna, (2006), pp. 201–203.
7. Холопкин А.И., Абрютин В.И. Расчет характеристик вакуумных туннельных диодов для систем охлаждения и генераторов электрического тока и сравнение с термоэлектрическими приборами // Сб. докл. X Межгосударственный семинар: термоэлектрики и их применение, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2006 г. – СПб, 2016. С. 1–6.
8. Нестеров С., Холопкин А. Вакуумные туннельные диоды // Наноиндустрия. 2014. № 6(52). С. 46–50.

Analysis of the calculation results allows to draw the following conclusions:

- electric power and efficiency increase with increasing temperature difference between the electrodes;
- generated electric power increases and the efficiency slightly decreases with increasing concentration of atoms of donor impurity;
- generated electric power decreases and efficiency increases with increasing difference between the work functions;
- generated electric power and the efficiency decrease with increasing width of the vacuum gap (stronger for small values of $d_0 < 0.4$ nm and weaker for large values of $d_0 > 0.6$ nm);
- efficiency is in the range of 40–50% of maximum possible value in the Carnot cycle.

From a practical point of view in the temperature range of 350–600 K, the concentration of electrons, $N_n = 10^{25} \text{ m}^{-3}$, the difference in the work functions of 0.2–0.3 eV and the width of vacuum gap of 0.5–0.8 nm are optimal, because at such values the maximum specific electrical power reaches up to 15 W/cm^2 and an efficiency is in the range of 45–50% of maximum possible value in the Carnot cycle.

The calculated characteristics of VTD in the temperature range of 350–600 K exceed similar characteristics of thermoelectric energy converters. Thus, the specific generated power and efficiency of vacuum tunneling diodes are in 1.5–3 times and in 3 to 4 times higher than the corresponding characteristics of the thermoelectric energy converters. To obtain the required values of voltage and current of electric power generators separate

VTDs can be connected in series/parallel.

The estimation of the characteristics of VTDs shows the prospects of their use as generators of electricity in the temperature range of 350–600 K.

One of the main challenges in creating VTDs is to develop a fundamentally new technology of manufacturing of structures with a vacuum gap of 0.5–0.8 nm, which is equal to two or three interatomic distances in solids. However, the development of nanotechnology in electronics and MEMS allows to hope that in the near future the difficulties will be overcome.

The deposition on the semiconductor of perforated one-triatomic layers of insulating materials, monomolecular layers of organic compounds and graphene films can be possible technological solution in the manufacturing of VTDs with a sub-nanometer vacuum gap. ■