



ВАКУУМНЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

С.Нестеров*, д.т.н., А.Холопкин*, к.ф.-м.н. /
sbnesterov@niivt.ru

Вакуумные туннельные диоды (ВТД) могут применяться как в охлаждающих приборах, так и в твердотельных генераторах электрического тока. Квантово-механические расчеты максимальной электрической мощности и эффективности ВТД в зависимости от ширины вакуумного зазора и разности температур на электродах в режиме генерации электроэнергии показывают перспективность их использования в генераторах электрического тока, работающих от разнообразных источников тепла в наименее используемом диапазоне температур 300–600°C. Однако для создания ВТД большой площади для генераторов электрического тока необходимы дополнительные научные исследования.

Проблемы энергосбережения и утилизации бросового тепла металлургических заводов, тепловых электростанций, дизельных двигателей и других источников в последнее время становятся особенно актуальными. До сих пор наиболее перспективными твердотельными генераторами электрического тока, использующими низкотемпературное тепло (до 250–350°C), считались термоэлектрические приборы.

В 2000 году компания Cool Chips заявила о начале разработок твердотельных вакуумных туннельных диодов (ВТД), предназначенных для использования в устройствах охлаждения и производства электроэнергии. Типичный ВТД представляет собой два металлических или полупроводниковых электрода, разделенных вакуумным промежутком шириной в несколько нанометров. При нагревании одного из электродов возникает туннельный поток электронов от горячего электрода к холодному через вакуумный зазор, создавая ТЕРМОЭДС, величина которой пропорциональна разности температуры между электродами.

Основные преимущества применения ВТД в охлаждающих приборах:

VACUUM TUNNEL DIODES

S.Nesterov*, D.Sc., A.Kholopkin*, Ph.D. /
sbnesterov@niivt.ru

Vacuum tunnel diodes (VTD) can be used in cooling devices and in solid-state electric generators. Quantum-mechanical calculations of the maximum electric power and efficiency of VTDs depending on the width of the vacuum gap and on the temperature difference between the electrodes in the mode of electricity generation shows promise for their use in the electrical generators, working on a variety of heat sources in the least used temperature range of 300–600°C. However, for a large area VTDs for electric generators more research is needed.

Nowadays the problems of energy saving and utilizing of waste heat from metallurgic plants, heat power stations, diesel engines and other heat sources are very urgent. Thermo-electric devices have been considered recently as the most promising electric current generators using low temperature heat less than 250–350°C.

In 2000 the firm Cool Chips declared the beginning of development of VTDs as basic elements for solid-state coolers and electric power generators. But after 2003 no new investigation results were reported.

A typical VTD consists of two metal or semiconductor electrodes separated with several nanometer vacuum gap. At heating one of electrode there appears a tunnel electron flow directed from hot electrode to cold electrode creating electromotive force that is proportional to the temperature difference between electrodes.

According to Cool Chips information the cooling VTDs have the following advantages:

- high efficiency – about 55 % connected with reduction of back heat flow through a vacuum gap (this figure was calculated in theoretical department of Stanford university), for comparison, efficiency of cooling systems on the basis of compressors is about 45%, and on the basis of thermoelectric devices – 5–8%;

*НИИ вакуумной техники им. С.А.Векшинского.

*Vekshinski Research Institute of Vacuum Technology.



- высокая эффективность по отношению к циклу Карно, которая, по данным Стенфордского университета, достигает 55%, что обусловлено низким обратным тепловым потоком через вакуумный зазор. Для сравнения: эффективность охлаждающих систем на базе компрессоров составляет 45%, на базе термоэлектрических приборов – 5–8%;
- удельная стоимость от 0,05 до 0,10 долл./Вт. Для сравнения: удельная стоимость охлаждающих систем на базе компрессоров и термоэлектрических приборов составляет 0,1–0,2 долл./Вт и более 1,5 долл./Вт соответственно;
- полное отсутствие загрязнения окружающей среды.

До сих пор практическое применение ВТД сдерживалось отсутствием технологии создания устройств с электродами большой площади и вакуумным зазором шириной 5–10 нм. Компания Cool Chips предложила изготавливать электроды ВТД путем напыления металлической пленки на подложку с последующим ее отделением, в результате чего рельеф пленки полностью повторял рельеф подложки. Расстояние между такими электродами регулировалось с помощью пьезокерамического кольца. Экспериментально была подтверждена возможность реализации ВТД с вакуумным зазором 20–50 нм и рабочей площадью электродов 1–2 см² [1, 2]. Однако в этих работах не сообщалось, каким образом предполагается сохранять заданную величину вакуумного зазора, устранять температурные деформации электродов и ослаблять влияние вибраций в процессе работы ВТД. Также не сообщалось, каковы результаты испытаний ВТД для охлаждения реальных объектов.

Поскольку пока не удалось найти информацию о ВТД, предназначенных для производства электроэнергии, авторами были проведены предварительные квантово-механические расчеты характеристик ВТД с целью оценки перспективности их использования в качестве генераторов электрического тока. Были рассчитаны зависимости электрического тока, напряжения, электрической и тепловой мощности, а также эффективности ВТД от расстояния между электродами и их температуры.

На рис.1–3 представлены расчетные зависимости генерируемой электрической мощности $Q_e(d)$ на согласованной нагрузке (электрическое

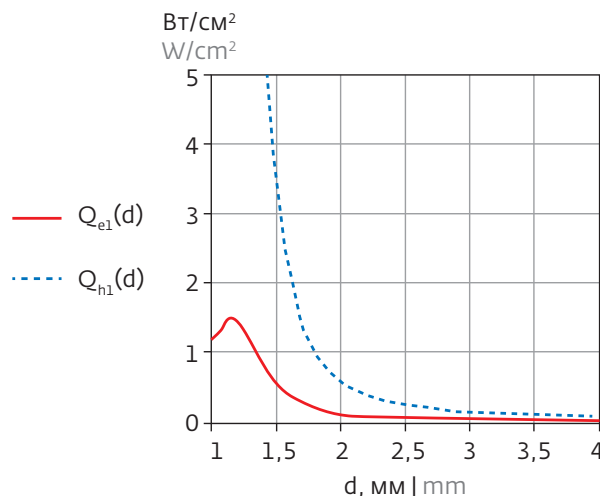


Рис.1. Зависимость генерируемой электрической мощности на согласованной нагрузке $Q_{e1}(d)$ и потока тепла $Q_{h1}(d)$ от ширины вакуумного зазора для температуры холодного электрода 50°C и температуры горячего электрода 350°C

Fig.1. Dependence of the generated electric power at the matched load $Q_{e1}(d)$ and the heat flow $Q_{h1}(d)$ on the vacuum gap width for the cold electrode temperature 50°C and the hot electrode temperature 350°C

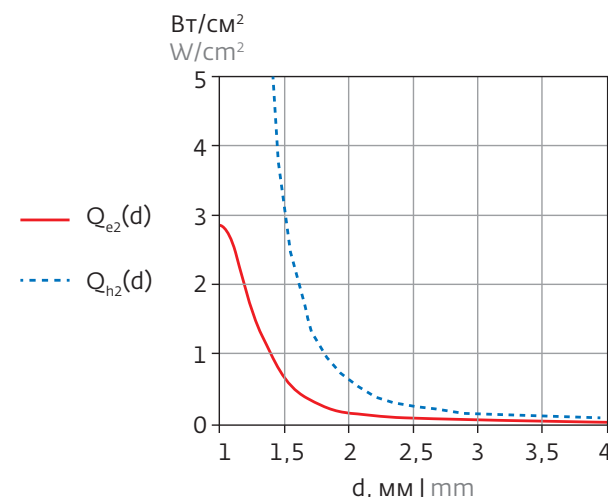


Рис.2. Зависимость генерируемой электрической мощности на согласованной нагрузке $Q_{e2}(d)$ и потока тепла $Q_{h2}(d)$ от ширины вакуумного зазора для температуры холодного электрода 50°C и температуры горячего электрода 450°C

Fig.2. Dependence of the generated electric power at the matched load $Q_{e2}(d)$ and the heat flow $Q_{h2}(d)$ on the vacuum gap width for the cold electrode temperature 50°C and the hot electrode temperature 450°C

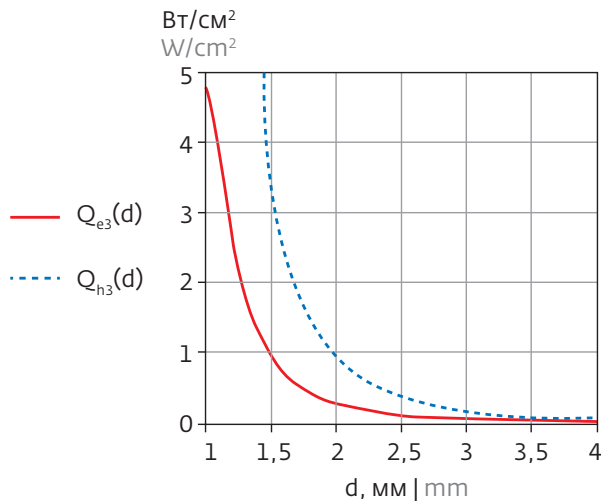


Рис.3. Зависимость генерируемой электрической мощности на согласованной нагрузке $Q_{e3}(d)$ и потока тепла $Q_{h3}(d)$ от ширины вакуумного зазора для температуры холодного электрода 50°C и температуры горячего электрода 550°C

Fig.3. Dependence of the generated electric power at the matched load $Q_{e3}(d)$ and the heat flow $Q_{e3}(d)$ on the vacuum gap width for the cold electrode temperature 50°C and the hot electrode temperature 550°C

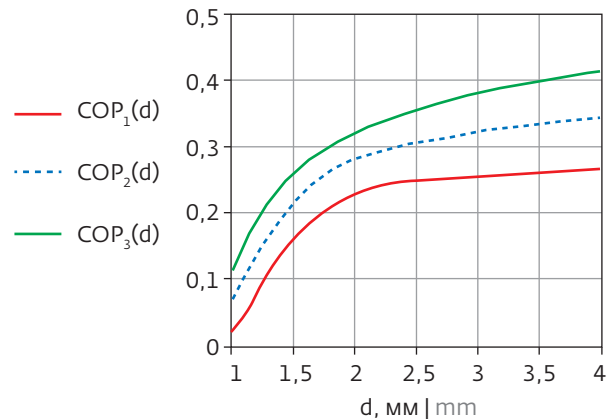


Рис.4. Зависимость эффективности ВТД от ширины вакуумного зазора $\text{COP}_1(d)$, $\text{COP}_2(d)$ и $\text{COP}_3(d)$ для температуры холодного электрода 50°C и температуры горячего электрода 350°C , 450°C и 550°C соответственно

Fig.4. Dependence of the VTD efficiency on the vacuum gap width $\text{COP}_1(d)$, $\text{COP}_2(d)$ and $\text{COP}_3(d)$ for the cold electrode temperature 50°C and the hot electrode temperature 350°C , 450°C and 550°C respectively

сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению ВТД) и теплового потока $Q_h(d)$ от расстояния между электродами d и температуры холодного и горячего электродов T_c и T_h соответственно. На рис.4 представлена зависимость эффективности ВТД ($\text{COP}(d) = Q_e(d)/Q_h(d)$) от расстояния между электродами d .

При проведении расчетов были сделаны следующие допущения:

- потенциальный барьер имеет трапецеидальную форму;
- ширина барьера равна ширине вакуумного зазора;
- не учитывается уменьшение ширины и высоты барьера из-за наведенного заряда на поверхностях электродов;
- электроды изготовлены из одного металла;
- работа выхода электронов из металла – 1 эВ, температура холодного электрода – 50°C ; температура горячего электрода – 350°C , 450°C и 550°C .

Результаты расчетов показывают, что электрическая мощность и эффективность ВТД при ширине вакуумного зазора от 1 до 5 нм значительно превышают аналогичные характеристики термоэлектрических приборов, а сами

- low specific cost of about 0.05–0.1 USD/Watt, for comparison, specific cost of cooling systems on basis of compressors and thermoelectric devices is about 0.1–0.3 and 1.0–1.5 USD/Watt respectively;
- environmental safety.

Up till now practical applications of VTDs are restrained by absence of VTD creation technology with electrodes of large area and vacuum gap width of 5–10 nanometers.

Several years ago the firm Cool Chips pls offered the engineering solution to manufacture large area VTD by sputtering metal film on semiconductor substrate with their subsequent separation so that the relief of a metal film completely repeated a relief of a substrate. The distance between electrodes was adjusted by piezoceramic ring elements. Some experimental structure of VTDs with 20–50 nm vacuum gap and 1–2 cm² working area of electrodes was manufactured. However, till now there is no information of methods of gap width control in process of VTD operation, methods of compensation of vibrations and thermal deformations of electrodes. There is no information of VTD application for the cooling of real objects.

There is a lack of information now concerning VTD application for electric energy production. That is why the authors have made preliminary



ВТД могут быть использованы в качестве генераторов электрического тока в диапазоне температур источников тепла 300–600°C.

При учете влияния наведенного на поверхности электродов заряда, приводящего к уменьшению ширины и высоты потенциального барьера, а также увеличению туннельного тока через барьер, характеристики ВТД улучшаются.

С целью создания высокоэффективных ВТД большой площади для генераторов электрического тока необходимо решить следующие задачи:

- определить материалы электродов (проводники или полупроводники) с оптимальной работой выхода электронов;
- определить формы поверхности и микрорельефа электродов;
- разработать технологии создания и поддержания вакуумного зазора между электродами в диапазоне 1–5 нм;
- разработать технологии нанесения на холодный электрод слоев материалов, уменьшающих работу выхода электронов;
- разработать технологии нанесения на холодный электрод слоев материалов с зонной структурой, имеющей дискретные уровни

quantum-mechanical calculations of VTD characteristics to evaluate their prospects as electric current generators.

Dependences of electric current, electromotive force, electric power, heat flow and VTD efficiency on the vacuum gap width and temperature difference on electrodes have been calculated.

Fig.1-3 present calculated dependences of generated electric power $Q_e(d)$ at the matched load (electrical load resistance is equal to the internal VTD resistance) and the heat flow $Q_h(d)$ on the distance between electrodes d for different temperatures on the cold and hot electrode T_c and T_h respectively.

Fig.4 shows the dependence of the VTD efficiency ($COP(d) = Q_e(d)/Q_h(d)$) on the distance between electrodes d .

Calculations have been made with the following assumptions:

- the potential barrier has trapezoidal form;
- the width of a barrier is equal to vacuum gap width (reduction of width and heights of a barrier due to the induced charge on surfaces of electrodes was not considered);
- electrodes are made of the same metal;
- the work function of electrons is equal to 1.0 eV, the temperature of a cold electrode is 50°C;
- the temperature of a hot electrode is 350°C, 450°C and 550°C.



в запрещенной зоне или зону проводимости, расположенные на несколько kT_h (k – постоянная Больцмана, T_h – температура дырок) выше уровня Ферми в холодном электроде, что обеспечивало бы резонансное туннелирование электронов только в интересующем диапазоне их энергии [3];

- разработать конструкцию и технологию изготовления электродов из термоэлектрических материалов, обеспечивающих дополнительный вклад в электрическую мощность;
- разработать динамические системы.

Необходимо отметить, что создание ВТД большой площади может быть реализовано только на базе новых идей и современных нанотехнологий.

Целесообразно разработать ВТД большой площади с использованием имеющегося научно-технического потенциала в области туннельной микроскопии, высоковакуумной техники и создания твердотельных приборов с субмикронными размерами элементов. На первом этапе предполагается выполнение следующих работ: измерение основных характеристик ВТД малой площади с использованием туннельных микроскопов; разработка технических требований к материалам электродов, их форме и качеству обработки поверхности; выполнение расчетов различных вариантов ВТД и экспериментальная проверка возможности реализации оригинальных идей изготовления ВТД большой площади. На втором этапе предполагается разработка технологических процессов изготовления ВТД, включая разработку специального технологического и контрольно-измерительного оборудования. На третьем этапе предполагается разработка генераторов электрического тока и систем охлаждения на базе ВТД большой площади.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hishinuma Y., Geballe T.H., Moyzhes B.Y., Kenny T.W. Refrigeration by combined tunneling and thermionic emission in vacuum: Use of nanometer scale design. – Appl. Phys. Lett. 78, p. 2752–2754, 2001.
2. Tavkhelidze A., Skhiladz G., Bibilashvili A., Tsakadze L. Electron tunneling through large area vacuum gap. – ICT-2002, Conference Proceedings, 2002.
3. Korotkov A.N., Likharev K.K. Cooling by resonant Fowler-Nordheim emission. – Physica B 284–288, p. 2030–2031, 2000.

Results of calculations show that VTD electric power and efficiency in practically interesting range of vacuum gap width of 1–5 nm exceed similar characteristics of thermoelectric devices and that VTDs can be used in electric power generators in the temperature range of 300–600°C.

The induced charge on the electrode surface reduces the gap width and the height of potential barrier and increases the tunnel current – thus the main VTD characteristics are improved as well.

Preliminary calculations show that VTDs can be used as high efficiency coolers and power generators.

In order to create effective large area VTD for power generators it is necessary to carry out a number of theoretical and research works, including:

- selection of materials for electrodes (metals or semiconductors) with optimum work functions;
- optimization of surface shape and microrelief of electrodes;
- development of technology of creation and maintenance of gap width in the range of 1–5 nanometers;
- development of materials deposition technology on electrodes that reduces work function;
- development of materials deposition technology on electrodes with discrete levels in band-gap or conduction band located a few $k_B T_h$ above the Fermi level in hot electrode for resonant tunneling of electrons only in the interesting range of electron energy;
- development of technology of electrodes manufacturing made of thermoelectric materials, combining the effect of electron tunneling and the Seebeck effect;
- development of dynamic systems.

It is necessary to note that creation of large area VTDs can be realized only on the basis of new ideas and nanotechnology application.

At the first stage we are planning to conduct the following work: measurements of small area VTD basic characteristics with use of tunnel microscopes; development of technical requirements to materials of electrodes, their shape and quality of surface processing; conducting of calculations of various variants of VTDs and experimental test to realize original ideas of large area VTDs manufacturing.

At the second stage we are planning to develop processes of VTDs manufacture including development of the special process, control and measuring equipment.

At the third stage we are planning to develop cooling systems and power generators on the basis of large area VTDs. ■

