ИННОВАЦИОННАЯ ЭНЕРГОТЕХНОСФЕРА. РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ИЗ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

INNOVATIVE ENERGY TECHNOSPHERE. ENERGY RECOVERY FROM ENVIRONMENT

УДК 621.311.25, ВАК 05.14.08, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.73.3.38.44

П.Афанасьев*, С.Ильин*, В.Лучинин*
P.Afanasyev*, S.Ilyin*, V.Luchinin*

Представлен анализ современной энерготехносферы – одного из ключевых наукоемких социально-ориентированных направлений создания комфортной, безопасной и экономически эффективной среды обитания. Рассмотрены тенденции и перспективы развития гибкой гибридной наноэнергетики, основанной на рекуперации энергии из окружающей среды и тела человека.

The article analyzes the modern energy technosphere that is one of the key high-tech social-oriented area of creation a comfortable, safe and cost effective environment. The tendencies and prospects of development of flexible hybrid nano-energetics based on energy recovery from the environment and the human body are considered.

Стремительная интеллектуализация технических систем, обеспечивающих современную среду обитания человека [1], невозможна без адекватных гармонизированных энергетических решений [2]. Глобальный энергетический потенциал сегодня представляет собой совокупность природных ископаемых и активно развивающихся альтернативных возобновляемых ресурсов (рис.1) [3]. В оценках динамики структуры энергопотребления до 2040 года, сделанных Всемирным энергетическим агентством и Институтом энергетических исследований РАН, прогнозируется устойчивый рост (до 15%) альтернативной энергетики при сохранении доминирующей роли природных ископаемых [4].

Развитие альтернативной энергетики для интеллектуальной биотехносферы [5] уже сегодня включает в себя (наряду с глобальными системами возобновляемой энергии) устройства, рекуперирющие энергию природных и техногенных источников окружающей среды (рис.2). Целью данной статьи является анализ современного состояния гибкой гибридной наноэнергетики как одного из ключевых наукоемких социально ориентированных направлений создания

комфортной, безопасной и экономически эффективной среды обитания [6].

ГИБКАЯ ГИБРИДНАЯ НАНОЭНЕРГЕТИКА

Использование в качестве источников энергии как внешних природных и техногенных воздействий, так и воздействий человеческого организма актуально и востребовано в широком спектре устройств, в том числе в автономной носимой и биоимплантируемой электронике. Развитие подобных интеллектуальных систем индивидуального жизнеобеспечения и комфорта определяет потребность в миниатюрных гибких (а во многих случаях – и эластичных) устройствах гибридной наноэнергетики.

Термин "наноэнергетика" прочно вошел в современный научный лексикон и подчеркивает тот факт, что речь идет об устройствах, в основу работы которых положены наноразмерные эффекты и при создании которых широко используются наноматериалы и нанотехнологии. В то же время особенности работы, общность технологической и материаловедческой баз, а также сопоставимость достигнутых параметров наногенераторов обеспечивают синергетический эффект гибридным устройствам на их основе.

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" / Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Рис.1. Глобальный энергетический потенциал
Fig.1. Global energy potential

Данное востребованное направление отвечает социально-техническим требованиям благодаря ориентации на "зеленые" технологии на основе инновационных наноструктурированных экологически дружественных материалов, которые минимизируют вредные отходы производства и безопасны после окончания жизненного цикла изделий.

Возможность преобразования в электричество энергии солнечного излучения, а также механических, акустических и электромагнитных воздействий, на основе инновационных наноструктурных решений многофункциональных устройств стала действенным стимулом развития наноэнергетики.

Хотя ведущая роль в развитии гибкой гибридной наноэнергетики пока принадлежит фото-

Rapid intellectualization of technical systems that provide the modern human environment [1], is impossible without adequate harmonized energy solutions [2]. Today's global energy potential is a set of natural resources and actively developing alternative renewable resources (Fig.1) [3]. Studies of the dynamics of the structure of energy consumption until 2040, made by the International Energy Agency and the Energy Research Institute of Russian Academy of Sciences, predict a steady growth (up to 15%) of

alternative energetics while maintaining the dominant role of natural resources [4].

The development of alternative energetics for intelligent biotechnosphere [5] includes already today (along with global renewable energy systems) devices that recovery energy of natural and anthropogenic sources of the environment (Fig.2). The purpose of this article is the analysis of the current state of flexible hybrid nano-energetics as one of the key socially oriented knowledge-intensive areas for creation of a

comfortable, safe and cost effective environment [6].

FLEXIBLE HYBRID NANO-ENERGETICS

The use of both external natural and anthropogenic impacts and influences of human body as sources of energy is important and in demand in a wide range of devices, including wearable and autonomous bioimplantable electronics. The development of such intelligent systems of personal life sustenance and comfort determines need in

Рис.2. Рекуперация энергии из окружающей среды

Fig.2. Energy recovery from the environment

вольтаике [7, 8], в 2006 году был представлен первый пьезонаногенератор [9], а в 2012 году – первый трибонаногенератор [10]. Пьезоэлектрический и трибоэлектрический эффекты, лежащие в основе соответствующих устройств, на наноструктурном уровне позволяют преобразовывать механические и акустические воздействия как

внешних источников, так и человеческого организма.

В термогенераторах, непосредственно преобразующих тепловую энергию в электрическую на основе эффекта Зеебека [11], переход на наноструктурный уровень открывает возможность использовать тепловое излучение не только

miniature flexible (and in many cases elastic) devices of hybrid nano-energetics.

The term "nanoenergetics" is firmly entrenched in the modern scientific lexicon, and underlines the fact that we are talking about devices, which are based on nanoscale effects and at the creation of which the nanomaterials and nanotechnologies are widely used. At the same time, a commonality of the technical and material bases, as well as the comparability of the achieved parameters of the nanogenerators provide a synergistic effect of hybrid devices based on them.

This demanded field meets socio-technical requirements because of its focus on "green" technologies based on innovative nanostructured environmentally friendly materials that minimize hazardous wastage and are safe after end-of-life of products.

The possibility of conversion to electricity of solar radiation energy as well as mechanical, acoustic and electromagnetic impacts, based on innovative nanostructured solutions of multifunctional devices has become an effective stimulus for the development of nano-energetics.

Although photovoltaics is playing a leading role in the development of flexible hybrid nano-energetics [7, 8], in 2006, the first piezonanogenerator was presented [9], and in 2012 – the first tribo-nanogenerator [10]. Piezoelectric and triboelectric effects, which are the base for the appropriate devices, on the nano-structural level allows to convert the mechanical and acoustic effects of both external sources and the human body.

In a thermal generators, which directly convert thermal energy into electrical energy on the basis of Seebeck effect [11], the transition to the nano-structural level

Сравнение параметров гибких искусственных техногенных рекуператоров энергии

Comparison of parameters of flexible artificial anthropogenic energy recuperators

Рекуператоры энергии Energy recuperators	Эффективность преобразования энергии, % Efficiency of energy conversion, %	Удельная мощность, мВт/см ² Specific power, mW/cm ²	Особенности Features
Солнечные элементы Solar cells	25–28	100,0	Зависимость от времени суток и местоположения Dependence on time of day and location
Пьезонаногенераторы Piezo-nanogenerators	15–50	20,0	Доминируют свойства активных материалов Properties of active materials dominate
Трибонаногенераторы Tribo-nanogenerators	10–70	50,0	Доминируют свойства активных материалов Properties of active materials dominate
Термонаногенераторы Thermo-nanogenerators	5–10	4,5	Зависимость от достигаемой разности температур Dependence on achieved temperature difference
Ректенны Rectenna	40–70	0,5	Зависимость от мощности излучателя и расстояния Dependence on power of radiator and distance

объектов окружающей среды, но и человеческого тела [12].

Современная среда обитания человека (в особенности – среда мегаполисов) насыщена электромагнитными излучениями промышленного и бытового происхождения. Именно поэтому один из современных энергетических трендов – их рекуперация и преобразование, которые представлены такими устройствами как ректенны [13].

Использование гибких наногенераторов требует адекватных устройств накопления и хранения заряда, среди которых сегодня лидируют литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы [14].

Достаточно высокие (достигнутые в относительно короткие сроки) значения параметров рекуператоров энергии (см. таблицу) и конструктивно-технологическая унификация современных разработок способствуют интеграции устройств гибкой гибридной наноэнергетики в интеллектуальные системы

unlocks the ability to use thermal radiation of both objects of the environment and human body [12].

The modern human environment (especially the environment of big cities) is saturated by electromagnetic radiation of industrial and domestic origin. That is why one of the modern trends in energetics is its recovery and transformation, which is represented by such devices as rectenna [13].

The use of flexible nanogenerators requires adequate devices for accumulation and storage of charge, among which the

lithium-ion batteries and supercapacitors are the leaders [14].

Quite high (achieved in a relatively short period of time) parameter values for each type of energy recuperators (table) and technological unification of the modern developments contribute to the integration of devices of flexible hybrid nano-energetics into intelligent systems at all levels, from the individual to distributed global objects.

Environmentally safe non-volatile devices of flexible hybrid nano-energetic are in demand at all levels of the formation of economically viable intellectual

environment. The commercial attractiveness of such devices increases due to high degree of demand in specific areas. So, the quality of life of people suffering from a number of diseases is directly determined by the use of wearable or implantable biomedical devices. It is obvious that not only the degree of functional comfort, but in many cases the possibility of application of these devices is determined by their nonvolatility. Such area of development of flexible hybrid nano-energetic as efficient use of energy processes occurring in the human body is largely consistent with

Рис.3. Издание "Гибкая гибридная наноэнергетика. Рекуперация энергии из окружающей среды" (авторы: С.Ю.Ильин и В.В.Лучинин)

Fig.3. Flexible hybrid nano-energetics. Energy recovery from environment (authors: S.Yu.Ilyin and V.V.Luchinin)

this trend. The energy independence of the individual in terms of biotechnosphere not only extends his functionality, but also provides effective integration into modern intelligent information networks.

Currently, the development of a number of devices of flexible hybrid nano-energetics has already reached the stage of industrial maturity. Investments of the leading manufacturers of micro- and nano-energetics and the initiative projects accelerate commercialization of such developments, despite the complexity and relatively high cost of most devices.

The establishment and development of flexible hybrid nano-energetics is the result of technological advances in the beginning of the XXI century. Although mass commercialization of its innovative features being formed, flexible hybrid nano-energetics, empowering individual personalized integration is already an integral part of the modern intellectual society [15, 16].

Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", in the year of its 130th anniversary, in the framework of the generalization of the results of a number of research works in the field

на всех уровнях – от индивида до распределенных глобальных объектов.

Экологически безопасные энергонезависимые устройства гибкой гибридной наноэнергетики востребованы на всех уровнях формирования экономически целесообразной интеллектуальной среды. Коммерческую привлекательность подобных устройств увеличивает и высокая степень их востребованности в достаточно специфических областях. Так, качество жизни людей, страдающих рядом заболеваний, напрямую определяется использованием носимых или вживляемых биомедицинских устройств. Очевидно, что не только степень функционального комфорта, но во многих случаях и сама возможность применения этих устройств определяется их энергонезависимостью. Данной тенденции во многом отвечает и такое направление развития гибкой гибридной наноэнергетики, как эффективное использование энергетических процессов, происходящих в организме человека. Энергонезависимость индивидуума в условиях биотехносферы не только расширяет его возможности, но и обеспечивает эффективную интеграцию в современную интеллектуальную информационную среду.

В настоящее время разработки целого ряда устройств гибкой гибридной наноэнергетики уже достигли стадии промышленной зрелости. Инвестиции ведущих производителей микро- и наноэнергетики и инициативные проекты ускоряют коммерциализацию таких разработок,

of energy recovery from the air-waves, the environment and the human body, have published a review of the current state of flexible hybrid nano-energetics (Fig.3). This edition is prepared by Department of micro- and nano-electronics and Center of micro-technology and diagnostics. His emergence is largely determined by the fact that miniature recuperators of energy from the environment as sources of autonomous power supply of modern electronic and information biomedical systems are one of the priority areas of joint scientific educational activities of the staff

несмотря на сложность и достаточно высокую себестоимость большинства устройств.

Становление и развитие гибкой гибридной наноэнергетики – результат технического прогресса начала 21 века. Хотя массовая коммерциализация ее инновационных возможностей только формируется, гибкая гибридная наноэнергетика, расширяя возможности индивидуальной персонализированной интеграции, уже сегодня представляет собой неотъемлемую часть современного интеллектуального социума [15, 16].

В Санкт-Петербургском электротехническом университете (ЛЭТИ) в год его 130-летия в рамках обобщения результатов ряда научно-исследовательских работ в области рекуперации энергии из радиоэфира, окружающей среды и тела человека выпущено издание, в котором предложен обзор современного состояния гибкой гибридной наноэнергетики (рис.3). Данное издание подготовлено кафедрой микро- и наноэлектроники и центром микротехнологии и диагностики. Его появлению во многом способствовал тот факт, что одним из приоритетных направлений совместной научно-образовательной деятельности коллективов этих структурных подразделений университета являются миниатюрные рекуператоры энергии из эфира и окружающей среды как источники автономного энергообеспечения современных радиоэлектронных, информационных и биомедицинских систем.

В издании рассмотрены современное состояние и перспективные научно-инженерные решения сверхминиатюрных устройств для генерации и хра-

нения электроэнергии, включая гибкие солнечные элементы, пьезо-, трибо- и термонаногенераторы, рекуператоры энергии из радиоэфира (ректенны), литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы, а также гибридные интегрированные энергообеспечивающие устройства на их основе. Особое внимание уделено материаловедческому базису и технологическим решениям гибких, эластичных и конформных конструкций, обеспечивающих простоту интеграции в различные объекты, а также возможность использования высокопроизводительных (в том числе печатных) технологий с целью достижения энергетической и экономической эффективности систем рекуперации энергии нового поколения на основе наноматериалов и нанотехнологий. Представлены промышленно выпускаемые компоненты и устройства, а также инновационные разработки в области гибкой гибридной наноэнергетики.

Издание является мультидисциплинарным и предназначено для инженеров, научных работников, преподавателей и студентов, специализирующихся в области электроники, фотоники, микро- и наноэнергетики и биомедицины. Оно также будет полезно широкому кругу специалистов, интересующихся созданием и применением современных миниатюрных автономных систем энергообеспечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая интеллектуальная среда обитания человека находится в процессе своего формирования. Гибкая гибридная наноэнергетика, как одно из современных

of the structural subdivisions of the university.

The publication reviews the current situation and future engineering solutions for subminiature devices for generation and storage of electricity, including flexible solar cells, piezo-, tribo- and thermo-nanogenerators, energy recovery from the radio (rectenna), lithium-ion batteries, supercapacitors and hybrid integrated energy-supply devices based on them. Special attention is given to the material basis and technological solutions of flexible, elastic and conformal structures providing easy integration into

various objects, as well as the possibility of using high performance (including printing) technologies to achieve energy and economic efficiency of the energy recovery systems of new generation based on nanomaterials and nanotechnology. Commercially available components and devices, as well as innovative developments in the field of flexible hybrid nano-energetics are considered.

The multidisciplinary publication is intended for engineers, researchers, teachers and students specializing in electronics, photonics, micro- and nano-energetics and biomedicine. It can also

be useful to a wide range of professionals interested in the creation and application of modern miniature autonomous power supply systems.

CONCLUSION

New intelligent human habitat is in the process of its formation. Flexible hybrid nano-energetics as one of the modern areas of development of innovation technosphere, undoubtedly, is a significant part of intellectual, friendly and comfortable environment that provides a high quality of life and extends the physiological and functional abilities of a person. ■

направлений развития инновационной энерготехносферы, безусловно, является значимой составной частью не только интеллектуальной, но и дружелюбной комфортной среды, обеспечивающей высокое качество жизни и расширяющей физиологические и функциональные возможности человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Large area and flexible electronics / Ed. by Mario Caironi and Yong-Young Noh. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2015. 558 p.
2. Bing K.L., Li T., Hng H.H. et al. Waste energy harvesting. Mechanical and thermal energies. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 592 p.
3. Solar power advantages and disadvantages (<http://www.costofsolar.com/management/uploads/2013/07/solar-energy-potential.png>).
4. Word Energy Outlook 2015 (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015ES_Russian.pdf).
5. Wang Z.L., Wu W. Nanotechnology-enabled energy harvesting for self-powered micro-/nanosystems // Angew. Chem. Int. Ed. 2012. № 51. P. 2–24.
6. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации на долгосрочный период (<http://www.sntr-rf.ru/materials/strategiya-nauchno-tekhnologicheskogo-razvitiya-rossiyskoy-federatsii-na-dolgosrochnnyy-period>).
7. Ming Peng, Dechun Zou. Flexible fiber/wire-shaped solar cells in progress: properties, materials and designs // J. Mater. Chem. A. 2015. Vol. 3. P. 20435–20458.
8. Jelle B.P. Building integrated photovoltaics: a concise description of the current state of the art and possible research pathways // Energies. 2016. Vol. 9. № 21. P. 1–31.
9. Zhong L.W., Guang Zh., Ya Y. et al. Progress in nanogenerators for portable electronics // Materials Today. 2015. Vol. 15. № 12. P. 532–543.
10. Zhong L.W. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors // ASC Nano. 2013. Vol. 7. P. 9533–9557.
11. Pennelli G. Review of nanostructured devices for thermoelectric applications // Beilstein J. Nanotechnol. 2014. № 5. P. 1268–1284.
12. Wearable monitoring systems / ed. by A. Bonfiglio and D. De Rossi. Berlin: Springer Science+Business Media, 2011. 268 p.
13. Афанасьев П.В., Ильин В.А., Козырев А.Б. и др. Рекуперация энергии из эфира // Нано-и микросистемная техника. 2013. № 12 (161). С. 47–52.
14. Peng H. Fiber-shaped energy harvesting and storage devices. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 218 p.
15. Hao Wu, Yong An Huang, Feng Xu, Yongqing Duan et al. Energy harvesters for wearable and stretchable electronics: from flexibility to stretchability // Adv. Mater. 2016. Vol. 28. P. 9881–9919.
16. Vlad A., Singh N., Galande C., Ajayan P.M. Design considerations for unconventional electrochemical energy storage architectures // Adv. Energy Mater. 2015. Vol. 5. (doi:10.1002/aenm.201402115).

VIII ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НОР

30–31 марта в Москве состоялась VIII Ежегодная конференция Нанотехнологического общества России (НОР). На конференции были представлены научные доклады по различным тематикам, посвященные новейшим достижениям в области нанотехнологий. На организационной сессии НОР обсуждались вопросы развития общества и его взаимодействия с партнерами для популяризации нанотехнологий в России. Молодежная секция конференции продемонстрировала большой потенциал студентов и молодых ученых и актуальность продвижения проблем применения нанотехнологий в их среде.

Впервые в рамках конференции НОР состоялись мастер-классы, на которых было представлено в работе научное оборудование и демонстрировались современные прикладные технологии производственных компаний. В частности, "НТ-МДТ Спектр Инструментс" представила атомно-силовой микроскоп Solver Next с контроллерами Px и Hybrid для измерений по новой методике HD (нерезонансная осцилляционная спектроскопия) с целью определения топографии, карты адгезии,

контактной жесткости и модуля Юнга поверхности. Компания "Фотокор" продемонстрировала прибор Photocor Mini и метод динамического рассеяния света. Компания "ОПТЭК" представила сканирующий зондовый микроскоп Bruker Dimension FastScan. ФГБНУ "ТИСНУМ" показало прибор "НаноСкан-4D Компакт", который позволяет выполнять измерение твердости и модуля упругости методом инструментального индентирования в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 8.748-2011 и ISO 14577, измерение твердости царапанием (склерометрия) с постоянной или переменной нагрузкой и измерение вязкоупругих свойств методом динамического механического анализа. Компания "Тинэкс" продемонстрировала упрочняющие, антикоррозионные и декоративные покрытия металлов с наноалмазами и примеры их промышленного применения. "Автостанкопром" представил многофункциональные нанопленки "Эпилам", обладающие антиадгезионными и антифрикционными свойствами.

НОР