



ГИБКАЯ ФОТОНИКА ДЛЯ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

С.Ильин*, В.Лучинин* / *cmid_leti@mail.ru*

Рост потребления и стоимости энергетических ресурсов, а также усиление негативного воздействия на окружающую среду делают особенно востребованными и актуальными энергоэффективные решения. Перспективным высокотехнологичным направлением следует признать гибкую электронику и фотонику [1–4]. Данные понятия отражают как материаловедческий базис – конструктивно-материаловедческие особенности подложек, систем коммутации-изоляции и функциональных элементов, так и технологический базис – комплекс способов формирования функциональных элементов и систем коммутации-изоляции, основанных в первую очередь на печатных рулонных трафаретных и капельно-струйных технологиях. В рамках гибкой электроники и фотоники сложились направления органических источников освещения, пленок с управляемыми оптическими параметрами, а также гибких солнечных источников энергии. Помимо общности целевых функций их в ряде случаев объединяют материаловедческий базис и технологии формирования.

Цель настоящей публикации – систематизация информации о современных научно-технологических и промышленных решениях в области гибкой фотоники применительно к современным проблемам искусственного и естественного освещения, регулирования освещенности, а также преобразования солнечной энергии в условиях традиционной среды обитания человека (частное жилье, общественные и производственные здания, транспортные средства). Рассмотренные инженерные решения и перспективные разработки гармонично вписываются в новую техногенную среду.

ИЗЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (OLED)

Излучатели на основе органических материалов OLED (Organic Light-Emitting Diode – органический светодиод) – одно из основных решений будущего светотехники. Форму, размер, дизайн, цвет,

FLEXIBLE PHOTONICS FOR THE HUMAN ENVIRONMENT

S.Ilin*, V.Luchinin* / *cmid_leti@mail.ru*

The growth in consumption and cost of energy resources as well as the increased negative impacts on the environment, make modern energy solutions especially relevant. The flexible electronics and photonics should be recognised as promising high-tech areas [1-4]. These concepts consider material science as a basis, i.e. the design-related and materials science-related features of substrates, switching and insulation systems, functional elements, as well as the technological basis, i.e. a series of methods to form functional elements and switching and insulation systems based primarily on the screen and inkjet printing technologies. In the development of flexible electronics and photonics such areas were developed as the organic light sources, the films with controlled optical properties as well as flexible solar power panels. In addition to commonness of the targeted functions, they are similar in some cases from the points of view of the material science and producing technologies.

This publication aims to systematise the information on the modern science, technology and industry solutions in the field of flexible photonics in the context of the present problems of artificial and natural lighting, dimming, and conversion of solar energy in the traditional human environment (private housing, public and industrial buildings, vehicles). Considered engineering solutions and advanced developments harmonize with the new industrial environment.

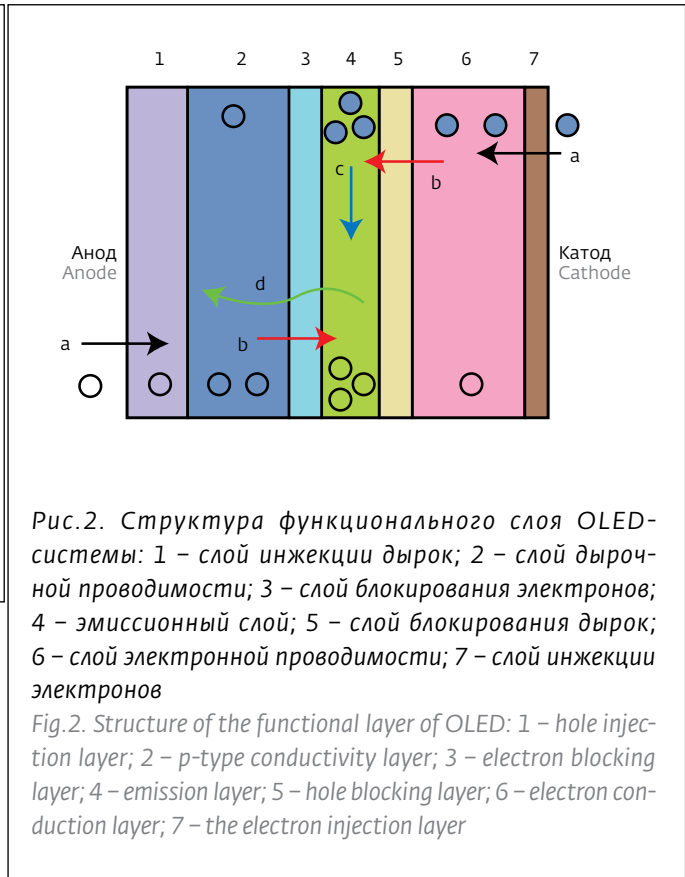
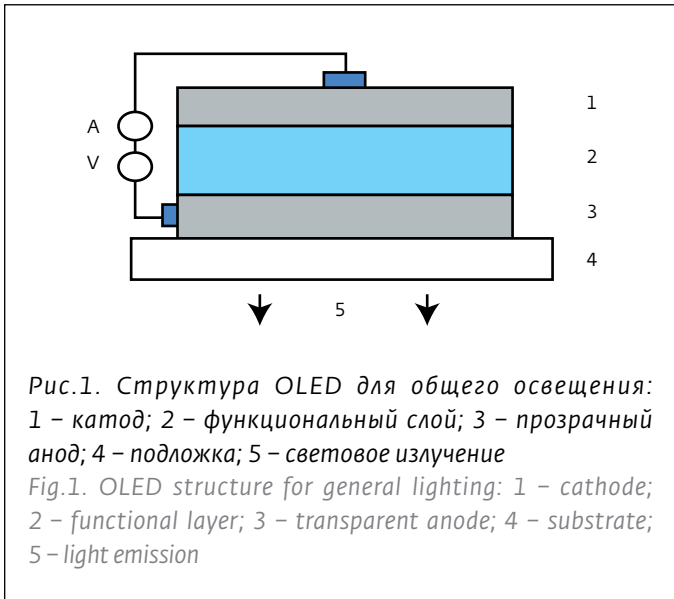
ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODES (OLED)

Organic Light-Emitting Diode is one of the key solutions for lighting in the future. The shape, size, design, colour and light output, all of these properties of OLEDs can be varied and picked up in an extremely large number of combinations.

OLED is a solid-state semiconductor light source based on the functional layer of organic material sandwiched between the anode and cathode layers

* Санкт-Петербургский электротехнический университет "ЛЭТИ"

* Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"



светоотдачу таких излучателей можно варьировать и подбирать в чрезвычайно большом количестве сочетаний.

OLED – полупроводниковый твердотельный источник света на основе функционального слоя из органических материалов, размещенного между слоями катода и анода на подложке (рис.1). Функциональный слой характеризуется достаточно сложной тонкопленочной структурой, которая схематически представлена на рис.2.

Анод и катод выступают в роли источников носителей заряда – дырок и электронов (рис.2a). Под воздействием приложенного электрического потенциала они перемещаются соответственно в слоях инжекции дырок 1 и электронов 7, свойства которых обеспечивают ускорение носителей заряда. Через слои дырочной проводимости 2 и электронной проводимости 6 с минимальным уровнем рекомбинации носители заряда попадают в слои блокирования электронов 3 и дырок 5 (рис.2b). При этом обеспечивается регулирование их прохождения, а также пространственное ограничение области рекомбинации для уменьшения безызлучательных потерь. В эмиссионном слое 4 происходит рекомбинация (рис.2c) электронно-дырочных пар с испусканием квантов света (рис.2d).

Подобная тонкопленочная структура нуждается в надежной герметизации для защиты от воздействия кислорода и паров воды с помощью стеклянной крышки или многослойного пленочного покрытия для структур на гибкой подложке.

Таким образом, OLED-структура представляет собой ультраплоский излучающий источник света, важнейшее отличие которого – диффузный

on the substrate (fig.1). The functional layer has by a rather complex thin-film structure which is schematically shown in fig.2.

The anode and cathode are the sources of charge carriers, holes and electrons (fig.2, a). Under the influence of an applied electric potential they are moved respectively in the injection layers of holes 1 and electrons 7 whose properties allow the acceleration of the charge carriers. Through the hole conduction layers 2 and electronic conductivity layers 6 with a minimal of recombination, charge carriers fall into the electron blocking layers 3 and hole blocking layers 5 (fig.2, b). This ensures control of their passage as well as the spatial restriction of the recombination area to reduce non-emissive losses. Recombination of electron-hole pairs occurs in the emission layer 4 (fig.2, c) with the emission of photons (fig.2, d).

Such thin film structure needs a reliable sealing for protection against the influence of oxygen and water vapour with a glass lid or multilayer film coating for structures on a flexible substrate.

Thus the OLED is an ultra-planar emitting light source, the most important difference of which is the diffusion (Lambertian), spatially distributed nature of



(ламбертовский), пространственно-распределенный характер излучения, не требующий включения в конструкцию дополнительных оптических элементов.

Спектр люминесценции OLED-структуры достаточно узок (50-100 нм). Положение спектральных максимумов определяется характеристиками используемых материалов. Спектр покрывает практически всю видимую область без выраженных локальных экстремумов, что обеспечивает комфортное психофизическое восприятие испускаемого света.

Для управления спектральными и световыми характеристиками используются три основных конструктивных разновидности OLED-структур: многослойная, самая простая в изготовлении; сдвоенная, обеспечивающая повышенную эффективность; полосовая, позволяющая настраивать цвет, в том числе изменять оттенок белого. Именно OLED-структуры настраиваемого света являются, по сути, единственными разрабатываемыми устройствами, которые позволяют реализовать широкий диапазон цветовых температур от 2300K до 8200K, потенциально перекрывая практически весь спектр солнечного излучения.

В производстве OLED-структур получили развитие два направления: осаждение из газовой фазы и нанесение из раствора.

Первое разрабатывается для SM-светодиодов на основе "малых" молекул (small-molecules), хорошо испаряемых и малорастворимых. На практике используются как термическое распыление в вакууме, так и перенос паров в сверхчистом газе-носителе. Оба метода технологически хорошо отработаны для широкого спектра различных полупроводниковых материалов, позволяют формировать отдельные слои и топологические структуры заданной чистоты и однородности для обеспечения требуемой эффективности. Наиболее существенные недостатки осаждения из газовой фазы – высокая себестоимость вследствие сложности и дороговизны используемого оборудования, а также сравнительно небольшие площади получаемых OLED-структур.

Нанесение из раствора используется для P-светодиодов на основе сопряженных полимеров, которые хорошо растворимы и нелетучи. В этом случае наряду с методами струйной печати для создания OLED-систем освещения большой площади, в первую очередь гибких, наибольший интерес представляют технологии

the emission not requiring the using of any additional optical elements.

The luminescence spectrum of the OLED is rather narrow (50-100 nm). The position of spectral peaks is determined by the characteristics of the materials used. The spectrum covers almost the entire range of the visible area without any pronounced local extrema that provides the comfortable psychophysical perception of the light emitted.

To control the spectral and light characteristics, three main design types of OLEDs are used, i.e. multilayer, which is the easiest to manufacture; dual, which provides an increased efficiency; banded, which allows you to adjust the colour including changing the shade of white. Adjustable OLED are in fact the only developed devices that can implement a wide range of colour temperatures from 2300K to 8200K, thus potentially overlap almost the entire spectrum of solar radiation.

In producing of OLEDs two areas were developed: deposition from the gas phase and a solution coating.

The first one is developed for the SM-LEDs based on small molecules, which evaporate well and are slightly soluble. In practice both thermal spraying in vacuum and vapour transfer in the highly purified carrier gas are used. Both methods are technologically well developed for a wide range of different semiconductor materials that let you create separate layers and topological structure of a given purity and uniformity to ensure the required efficiency. The most significant disadvantages of the gas-phase deposition are the high cost due to the complexity of the equipment as well as a relatively small area of the derived OLEDs.

Solution coating is used for the P-LEDs based on conjugated polymers which are soluble and non-volatile. In this case, along with the inkjet printing methods, to create OLED lighting systems of a large area and especially flexible ones, roll-to-roll technologies are of the greatest interest. In fact, that is an analogue of offset printing which is based on the formation of layers by transferring the organic material solution onto a substrate using a printing cylinder. Such organisations as Fraunhofer COMEDD, General Electric Global Research and Novaled actively advance this technological trend. The key advantages of the method include a high rate of application of organic materials at a relatively low cost.

The formulas of most materials used in modern designs are a trade secret and therefore not disclosed. OLED-structures are usually produced using the group-arrangement processes, a sheet type



roll-to-roll. По сути, это аналог офсетной печати, в основу которого положено формирование слоев переносом раствора органического материала на подложку с помощью печатающего цилиндра. Активно развивают это технологическое направление такие организации, как Fraunhofer COMEDD, General Electric Global Research и Novaled. Основные достоинства метода – высокая скорость нанесения органических материалов при относительно низкой себестоимости.

Формулы большинства материалов, применяемых в современных разработках, являются коммерческой тайной и потому не разглашаются. Производство OLED-структур организуется, как правило, с использованием процессов группового исполнения: листового типа для методов напыления и ленточного типа для roll-to-roll.

При оценке перспектив разработки и производства OLED-светильников необходимо принять во внимание стандарты на оптические характеристики источников света (табл.1). Основные преимущества OLED-освещения представлены в табл.2.

Развитие технологий твердотельных источников освещения LED идет параллельно с OLED, причем по светоотдаче последние отстают от LED как минимум на 5-7 лет. Это отставание, а также наличие целого ряда технологических проблем ограничивает промышленное производство недорогих OLED.

Сложившиеся на рынке цены составляют 0,002-0,005 \$/лм для корпусированных LED и 0,3-0,5 \$/лм для OLED. Существенная доля себестоимости приходится на стеклянную подложку, что делает приоритетным развитие гибких структур на

Таблица 1. Стандартизация оптических характеристик источников света
Table 1. Standardization of optical characteristics of light sources

Характеристика Characteristic	Стандарт Standard
Светоотдача Light output	ГОСТ Р 54350-2011
Яркость Brightness	ГОСТ ИСО 8995-2002
Срок службы L70 Lifetime L70	IES LM-80-08
Относительная цветовая температура Relative color temperature	ANSI C78.377
Коэффициент цветопередачи CRI	CIE 13.3-1994
Сортировка по цвету Chromaticity range	ANSI C78.377
Универсальный показатель ослепленности Discomfort Glare	CIE 117-1995

for the deposition methods and a roll type for the roll-to-roll method.

In assessing the prospects for the development and production of OLED lamps one should take into account the optical performance standards of the light sources (table 1). The main advantages of OLED lighting are shown in table 2.

Development of solid-state LED lighting products goes in parallel with OLED, and a technological gap is at least 5-7 years. This gap as well as the presence of a number of technological problems limit the industrial-scale production of inexpensive OLED.

Current market prices are \$0.002 – \$0.005/lm for a packaged LED and \$0.3 – \$0.5/lm for OLED. A substantial proportion of the cost accounts for the glass substrate, thus giving priority to the development of flexible polymer-based structures.

Basic requirements for the optical characteristics of commercial OLED lighting systems are presented in table 3.

The OLED lighting products are represented by a number of well-known companies (table 4). The comparison of the actual parameters of OLED-structures from table 4 with the desired values for a wide commercial use (table 3) shows that, given the

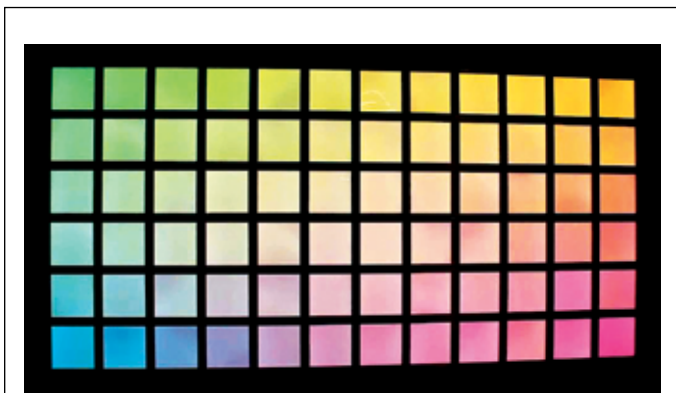


Рис.3. Динамическая подсветка стены Verbatim Velve OLED

Fig.3. Verbatim Velve OLED lighting panel



Таблица 2. Преимущества и перспективы OLED-освещения
Table 2. Advantages and prospects of OLED lighting

Преимущество Advantage	Практическая значимость The practical significance
Гибкость и комфортность конструкции Flexibility and comfort design	Возможности интегрирования в различные интеллектуальные системы Possibility of integration in a variety of intelligent systems
Малый вес Lightweight	Идеальный источник света для решений, критичных к весовым параметрам The ideal light source for solutions that are critical to weight
Рассеянный неяркий свет Diffused soft light	Отсутствие бликов No glare
Высокая светоотдача High light output	По светоотдаче сравнимы с галогенными лампами Comparable with halogen lamps
Отсутствие вредных материалов в конструкции Contains no hazardous materials	Экологичность и простота утилизации Environmentally friendly and easy recycling
Низкое напряжение Low voltage	Безопасность эксплуатации Safety of operation
Энергоэффективность Energy efficiency	Малые энергетические затраты Small energy costs
Возможность регулировки цвета Ability to adjust the color	Дополнительные возможности проектирования при использовании OLED различных цветов Additional design possibilities using different colors OLED
Хорошая цветопередача Good color reproduction	Расширение диапазона использования Expanding the range of use
Прозрачность Transparency	Невидимость в выключенном состоянии Invisibility when turned off

полимерной основе. Основные требования к оптическим характеристикам систем коммерческого OLED-освещения представлены в табл.3.

На рынке OLED-светотехники представлен целый ряд известных фирм (табл.4). Сопоставление реально достигнутых параметров OLED-структур из табл.4 с требуемыми значениями для широкого

high cost, the practical use of OLED can be of only the limited nature.

However manufacturers in collaboration with leading designers in the field of lighting equipment offer a number of solutions for general lighting, installations and luminaires based on OLEDs. Typically they are characterised by the relative

Таблица 3. Требуемые характеристики OLED-структур для коммерческого рынка
Table 3. Required characteristics of OLEDs for the commercial market

Сегменты рынка Market segments	Яркость, кд/м ² Brightness, cd/m ²	Площадь, см ² Area, cm ²	Срок службы, ч Lifetime, h	Светоотдача, лм/Вт Light output, lm/W
Декоративное освещение Decorative lighting	50–500	10–100	10 000	10–15
Аварийное освещение Emergency lighting	300–500	300	25 000	25–35
Наружное освещение Outdoor lighting	1 000	>1 000	10 000	35–50
Общее освещение General lighting	5 000	5 000	10 000	50–100
Автомобилестроение Automobile production	50–2 000	5–50	10 000	10–20



Таблица 4. Основные производители OLED-модулей освещения
Table 4. Major manufacturers of OLED-lighting systems

Производитель Manufacturer	Размер, мм Size, mm	Яркость, кд/м ² Brightness, cd/m ²	Срок службы, ч Lifetime, h	Светоотдача, лм/Вт Light output, lm/W	Относительная цветовая темпе- ратура, К Relative color temperature, K	Цвет свечения Emission color
Philips Lumiblade www.lumiblade- experience.com	124 x 124	4 000	9 000	16,8	3 200	Белый White
Verbatim www. verbatimlighting.com	140 x 140	2 000	8 000	28	2 700–6 500	Настраиваемый (красный, синий, зеленый) Adjustable (red, blue, green)
Blackbody www.blackbody- oled.com	100 x 100	–	14 000	–	3 200	Белый, красный White, red
Fraunhofer COMEDD www.comedd. fraunhofer.de	150 x 75	1 000	–	–	3 200	Белый, цветопе- рестраиваемый White, adjustable
OSRAM www.osram.com	Диаметр 112 Diameter	1 000	5 000	23	2 800	Белый White
RIOE	–	5 000	–	15	3 300, 4 000, 5 000	Белый White
Lumiotec www.lumiotec. com	145 x 145	2 800	5 000	28	2 800	Белый White
WAC Lighting www. waclighting.com	16 x 16	–	10 000	31–35	4 000	Белый, цветопе- рестраиваемый White, adjustable

коммерческого использования (табл.3) показывает, что, учитывая высокую себестоимость, практическое использование OLED пока может носить только ограниченный характер.

Тем не менее производители в сотрудничестве с ведущими дизайнерами в области светотехники предлагают большое количество решений общего освещения, инсталляций и светильников на основе OLED. Как правило, для них характерны лаконичность и относительный минимализм стиля, подчеркивающие уникальность свойств самого света.

На рис.3 представлена одна из разработок фирмы Verbatim – динамическая подсветка стены с использованием серийно выпускаемых модулей VELVE OLED. Характерными особенностями инсталляции являются мягкая светоотдача, управление цветом и интегрированная калибровка.

minimalism of style, emphasising the unique properties of light itself.

Fig.3 shows one of the developments of the Verbatim company, the dynamic wall lighting with the VELVE OLED modules commercially available. The characteristic features of the installation are the soft light output, colour management and integrated calibration.

The developments of Fraunhofer COMEDD, along with TABOLA modules, also include the colour adjustable OLED which can simulate natural lighting depending on the time of day, blue light in the morning, white colour at around noon, warm reddish or yellowish colours in the evening.

The Japanese Research Institute for Organic Electronics (RIOE) demonstrated OLED-panels (fig.4) which are composed of almost transparent elements. Excluding wiring conductors the declared transparency reaches 70-75%.



Рис.4. Прозрачная светозлучающая OLED-панель RIOE
Fig.4. Transparent light-emitting OLED-panel RIOE

Среди разработок Fraunhofer COMEDD, наряду с модулями TABOLA, также и цветоперестраиваемые OLED, способные имитировать естественное освещение в зависимости от времени суток: синий свет утром, белый около полудня, теплые красноватые или желтоватые тона в вечернее время.

Японским научно-исследовательским институтом органической электроники RIOE были продемонстрированы OLED-панели (рис.4), которые составлены из практически прозрачных элементов. Без учета разводки проводников заявленная прозрачность достигает 70–75%.

Компания Lumiotec выпускает серийный OLED-модуль, в излучении которого полностью отсутствуют инфракрасная и ультрафиолетовая составляющие, что особенно привлекательно для использования в музеях.

Таким образом, OLED-освещение представлено на коммерческом рынке целым спектром готовых изделий и решений. Активно складываются локальные рынки сбыта, то есть достигнута стадия начальной коммерциализации. Инвестиции в НИОКР приобрели в настоящее время устойчивый характер, что позволяет предполагать развитие рынка OLED-освещения в ближайшие несколько лет.

ПЛЕНКИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Значимая роль в создании комфортной среды обитания человека принадлежит таким факторам, как естественное освещение и тепловой баланс помещений. Большие площади остекления, характерные для современной архитектуры, требуют эффективных решений

The Lumiotec company produces serial OLED-modules in the radiation of which there is absolutely no infrared or ultraviolet components, thus making them particularly attractive for use in museums.

It can be stated that OLED lighting are presented in the commercial market by a whole range of finished products and solutions. Local markets have become more stable, that means that the phase of initial commercialisation is reached. Investments in R&D are currently becoming more sustainable, and that suggests that the OLED lighting market will continue to evolve in the next few years.

FILMS WITH CONTROLLED OPTICAL PROPERTIES

A significant role in creating a comfortable environment can be attributed to factors such as natural light and heat balance of the premises. The large areas of glazing typical of modern architecture require effective solutions for managing light transmission and heat transfer processes. Control over the intensity of solar radiation transmittance can be both active and passive.

The active management of transparency is characteristic of the electrochromic structures. There are two main physical and technological trends in the development thereof. The first trend is based on the use of the multilayer structure of metal oxide films where a change in transparency occurs due to reversible chemical reactions. The second trend is focused on creating flexible structures and uses the so-called smart film as active elements, LC (liquid crystals), PDLS (dispersed polymer liquid crystals) and SPD (suspended particle devices).

The operating principle of the LC and PDLC structures is illustrated in fig.5. With no applied voltage, the liquid-crystal film is opaque since liquid crystals are in a disordered state. AC arrange crystals in rows, which makes the structure transparent. The SPD system operates in a similar manner with the only difference that rod-like particles of the laminated material are placed in the polymer matrix.

To create flexible electrochromic structures three types of films are used:

- EVA is an ethylene-vinyl-acetate film. The advantages are good adhesion to glass and plastic and the low cost of production, and the disadvantages are a relatively low transparency, the tendency to delamination and sensitivity to humidity.
- PVB is a polyvinyl butyral film characterised by a high adhesion to glass, and a low adhesion to plastics. It occupies a middle place as far as the quality-price ratio is concerned.

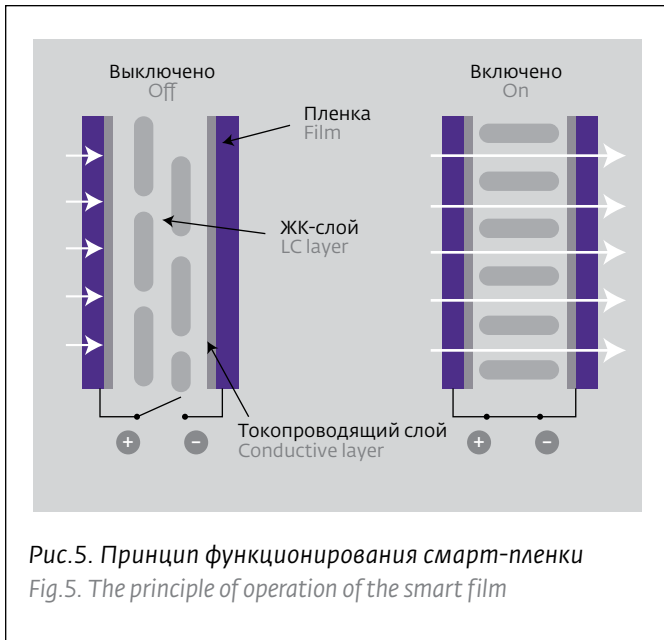


Рис.5. Принцип функционирования смарт-пленки
 Fig.5. The principle of operation of the smart film

по управлению процессами светопропускания и теплопередачи. Управление интенсивностью пропускания солнечного излучения может быть активным и пассивным.

Активное управление прозрачностью характерно для электрохромных структур. Можно выделить два основных физико-технологических направления в их развитии. Первое основано на использовании многослойной структуры пленок оксидов металлов, когда изменение прозрачности происходит вследствие протекания обратимых химических реакций. Второе ориентировано на создание гибких структур и в качестве активных элементов использует так называемые смарт-пленки: LC (liquid crystal – жидкие кристаллы), PDLC (polimer dispersed liquid crystal – дисперсные полимерные жидкие кристаллы) и SPD (suspended particle devices – устройства на взвешенных частицах).

Принцип действия структуры типов LC и PDLC проиллюстрирован на рис.5. При отсутствии приложенного напряжения жидкокристаллическая пленка является матовой, так как жидкие кристаллы в этом состоянии неупорядочены. Приложение переменного тока структурирует кристаллы, выстраивая их в ряды, что делает структуру прозрачной. SPD-структура функционирует аналогичным образом – с той лишь разницей, что в матрицу полимера помещаются стержнеобразные частицы слоистого материала.

Для создания гибких электрохромных структур используются три типа пленок:

- TPU is a thermoplastic polyurethane film which is characterised by the best adhesion to glass and plastics. This is the most high-quality film impervious to moisture, mechanical loads and hostile environments, but also the most expensive in the production.

The systems on smart films, e.g. LC and PDLC are characterised by an increase or decrease in transparency without significant changes in light transmission; that means that glass becoming opaque does not darken the room. Modern liquid-crystal films of the third generation (3G) in an opaque state have a high degree of light scattering, which allows, in addition to the basic functions, using them as a screen to obtain high-quality images with virtually no loss of colour.

The systems on the smart films like SPD are characterised by the simultaneous changes in transparency and light transmittance under the influence of the control voltage.

Currently the industrial production of electrochromic structures is established. As seen from table 5, the main disadvantage of the commercially produced products has a very short service life especially of flexible structures due to aging.

In practice electrochromic structures can be used both outside and inside buildings (fig.6). Hybrid and virtually energy-independent solutions, which combine, for example, a flexible solar energy panel and an electrochromic film in a single glass design, have a good potential.

The passive management of light transmission is characteristic of the photochromic structures. The light transmittance of the photochromic glass (fig.7) changes due to reversible chemical reactions depending on the intensity of solar radiation exposure.

The light transmittance value is inversely proportional to the magnitude of the intensity of solar radiation. Furthermore, for photochromic structures are typical the UV-reflection and IR radiation delay, that allows using them to regulate the thermal parameters too.

Photochromic films usually are not included in the composition of glass but are glued onto it. The photochromic films offered in the market are characterised by the following parameters:

- reflection of solar radiation – up to 58%;
- infrared radiation delay – up to 99%;
- reflection of ultraviolet radiation – up to 99%;
- visible light transmission – up to 78%.

If electrochromic structure due to the managed properties and flexibility of the structure can be



- EVA – этиленвинилацетатная пленка. Достоинствами являются хорошая адгезия к пластикам и стеклу и низкая себестоимость изготовления, недостатками – относительно низкая прозрачность, склонность к расслоению и чувствительность к влажности.
- PVB – поливинилбутиральная пленка, характеризующаяся высокой адгезией к стеклу и низкой – к пластикам. Занимает среднее положение по соотношению "цена-качество".
- TPU – пленка из термопластичного полиуретана, характеризующаяся наилучшей адгезией к стеклу и пластикам. Это наиболее качественная пленка, невосприимчивая к влажности, механическим нагрузкам и воздействию агрессивных сред, но и самая дорогостоящая в производстве.

Для систем на смарт-пленках типа LC и PDLC характерно увеличение или уменьшение прозрачности без значительных изменений светопропускаемости, то есть стекло, становясь матовым, не затемняет помещение. Современные жидкокристаллические пленки третьего поколения (3C) в непрозрачном состоянии обладают высокой степенью светового рассеивания, что позволяет, помимо основных функций, использовать их в качестве экрана для получения очень качественного изображения практически без потери цветопередачи.

Для систем на смарт-пленках типа SPD характерно одновременное изменение прозрачности и светопропускания под действием управляющего напряжения.

В настоящее время налажено промышленное производство электрохромных структур. Как видно из табл.5, основным недостатком коммерчески выпускаемых продуктов является весьма непродолжительный срок службы, особенно гибких структур, вследствие старения.

На практике электрохромные структуры могут использоваться как снаружи, так и внутри помещений (рис.6). Весьма перспективными могут быть и гибридные, по сути, энерго-независимые решения, сочетающие в одной стеклянной конструкции, например, гибкий солнечный источник энергии и электрохромную пленку.

Пассивное управление светопропусканием характерно для фотохромных структур. Светопропускание фотохромного стекла (рис.7) меняется вследствие протекания обратимых химических реакций в зависимости от интенсивности воздействия солнечного излучения.

Таблица 5. Основные характеристики коммерческих электрохромных структур
Table 5. Main characteristics of commercial electrochromic structures

Характеристика Characteristic	Polytronix Polyvision, стекло www.polytronixglass.com	PDLC-пленка, Южная Корея www.oknaidveri.ru	Smart Film, пленка www.lumenmarket.ru
Светопропускание в прозрачном состоянии, % Light transmittance in the transparent mode, %	≥ 75	80	73
Опалесценция (мутность), % Opalescence, %	5–7	–	7
Отклонение УФ-излучения, % Rejection of UV, %	–	99	98
Рабочее напряжение, В Operating voltage, V	12, 24, 48	110	110
Энергопотребление, Вт/м ² Power consumption, W/m ²	3–5	7	10
Время переключения, мс Switching time, ms	100	15	100–400
Диапазон рабочих температур, °С Operating temperature, °C	-30 – +75	-20 – +70	-10 – +50
Срок службы, лет Lifetime, years	10	5	3
Максимальный размер, мм Maximum size, mm	1530 × 3050	1200 × 3000	1200 × 3000

effectively used in intelligent comfort control systems, the photochromic ones may only be used in stand-alone solutions.

The key obstacle preventing a wide spread of films with controlled optical properties is a very short lifetime due to aging of the active substance, and the high cost.



Рис.6. Демонстрация электрохромных стекол (фото: Glass Apps LLC)
 Fig.6. Demonstration of electrochromic glass (photo: Glass Apps LLS)

Величина светопропускания обратно пропорциональна интенсивности солнечного излучения. Кроме того, для фотохромных структур характерно отражение УФ- и задержка ИК-излучения, что позволяет при их использовании регулировать и тепловые параметры.

Фотохромные пленки, как правило, не входят в состав стекла, а наклеиваются на него. Предлагаемые на рынке фотохромные пленки характеризуются следующими основными параметрами:

- отражение солнечного излучения – до 58%;
- задержка инфракрасного излучения – до 99%;
- отражение ультрафиолетового излучения – до 99%;
- пропускание видимого света – до 78%.

Если электрохромные структуры благодаря управляемым свойствам и гибкости структуры могут эффективно использоваться в интеллектуальных системах управления комфортом, фотохромные могут применяться только в автономных решениях.

Основными препятствиями широкого распространения пленок с управляемыми оптическими параметрами является весьма непродолжительный срок службы вследствие старения активного вещества, а также высокая стоимость.

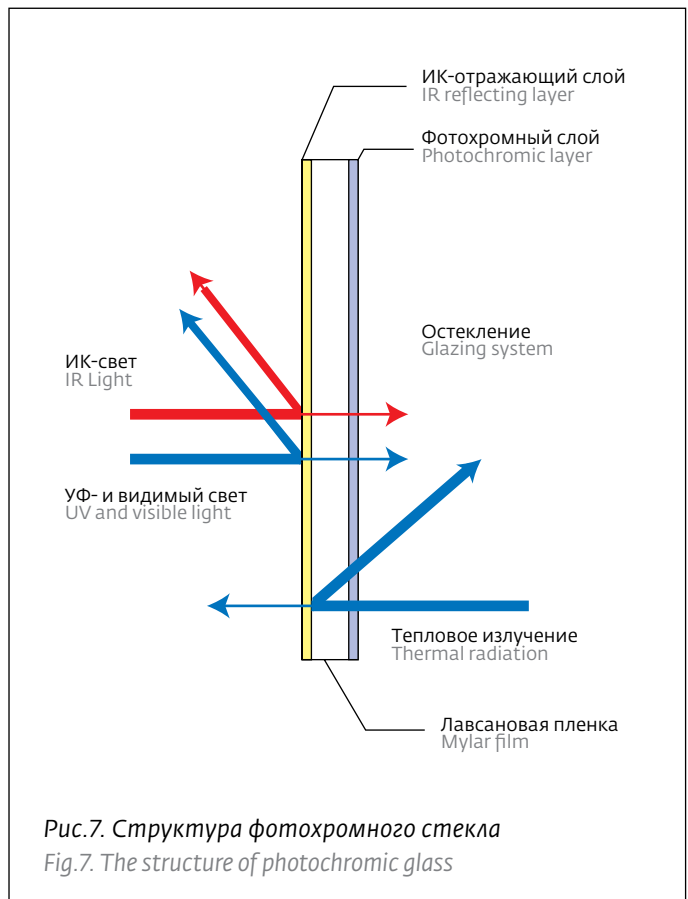


Рис.7. Структура фотохромного стекла
 Fig.7. The structure of photochromic glass



ГИБКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Гибкие солнечные источники энергии также потенциально интересны с точки зрения обеспечения комфортной среды. Экологичность и безопасность получения электрической энергии, легкость конструкции, возможность размещения на любых наружных поверхностях, а также перспективы интеграции с другими устройствами гибкой фотоники – основные преимущества, стимулирующие разработку гибких солнечных источников энергии. Наиболее существенной проблемой остается ощутимо меньшая (более чем два раза по сравнению с кремниевыми монокристаллическими батареями) эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую.

Принцип работы гибких устройств солнечной энергетики основан на фотоэлектрическом эффекте – генерации тока под воздействием излучения в фотоэлементах на основе неоднородных полупроводниковых структур, таких как p-n переходы, гетеропереходы и варизонные системы.

В процессе формирования структуры фотоэлемента (рис.8) на полимерную подложку 1 последовательно наносятся контактный слой 2, слой p-типа 3 и n-типа 5, для повышения эффективности разделенные буферным слоем 4, а также прозрачный контактный слой 6.

Эффективность преобразования определяется в первую очередь электрофизическими характеристиками и оптическими свойствами используемых материалов. Снижение эффективности работы фотоэлементов в основном связано с отражением солнечного излучения, селективным его поглощением, тепловым рассеянием и рекомбинацией электронно-дырочных пар в структуре. Повышают эффективность путем подбора материалов с оптимальными параметрами, создания многослойных структур из материалов с различной шириной запрещенной зоны, нанесения многофункциональных оптических покрытий, а также применения нанотехнологий и наноструктур для увеличения внутреннего квантового выхода и использования ИК-излучения в процессе преобразования энергии.

Солнечные источники энергии классифицируются по пиковой мощности. Один пиковый ватт – значение вырабатываемой мощности при условии, что солнечное излучение в 1 кВт/м^2 падает на элемент при температуре 25°C . Однако солнечная освещенность редко достигает этой величины. Более того, в процессе работы элемент нагревается значительно выше номинальной температуры, что уменьшает его мощность. Частичное затемнение в свою очередь

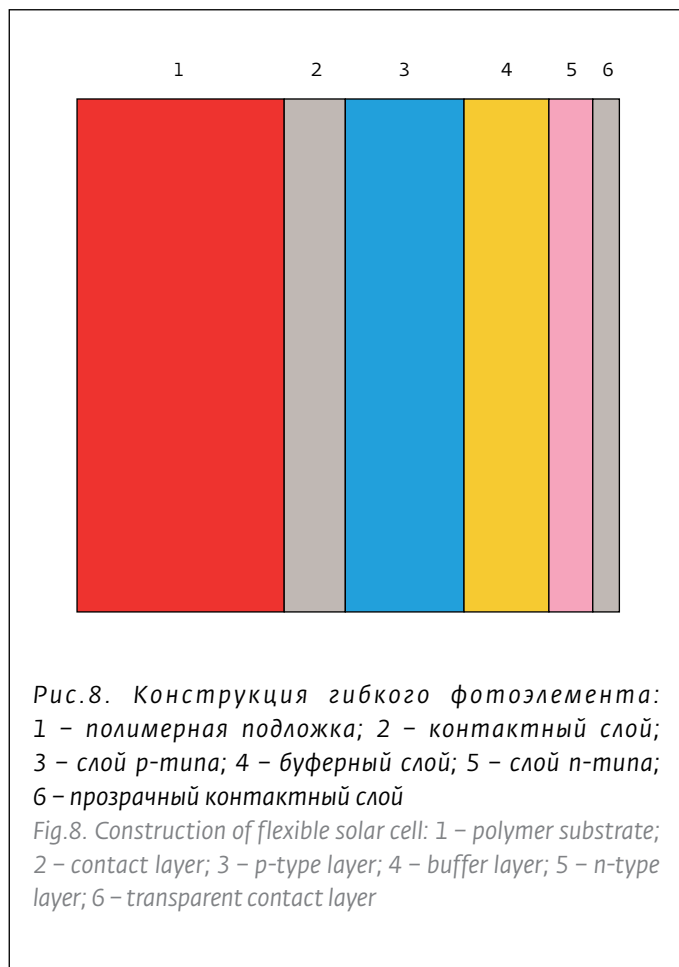


Рис.8. Конструкция гибкого фотоэлемента: 1 – полимерная подложка; 2 – контактный слой; 3 – слой p-типа; 4 – буферный слой; 5 – слой n-типа; 6 – прозрачный контактный слой

Fig.8. Construction of flexible solar cell: 1 – polymer substrate; 2 – contact layer; 3 – p-type layer; 4 – buffer layer; 5 – n-type layer; 6 – transparent contact layer

FLEXIBLE SOLAR POWER PANELS

Flexible solar power panels are also potentially interesting from the point of view of comfortable environment. Environmental friendliness and power generation safety, lightness of the structure, the possibility of placing on any exterior surface as well as the prospects for integration with other flexible photonic devices are the core advantages designed to promote the flexible solar energy. The most significant problem remains a significantly lower (more than doubled compared with the single-crystal silicon panels) efficiency concerning the conversion of solar energy into electrical energy.

The working principle of flexible solar power devices is based on the photoelectric effect, the electric current generation under the influence of radiation in solar cells based on inhomogeneous semiconductor structures such as p-n junctions, hetero-junctions and variband systems.

To forming a solar cell structure (fig.8) on the polymer substrate 1 the contact layer 2, the layers of p-type 3, buffer layer 4, the layers of n-type 5 and



вызывает падение выходного напряжения из-за потерь в неосвещенной части.

Гибкая солнечная энергетика прошла несколько этапов технологического развития. Для создания первых батарей использовались монокристаллические технологии на основе сверхчистого кремния. При наибольшей эффективности их основные недостатки – это высокая стоимость сырья и оборудования для производства, сложность технологий и критичность к условиям освещенности и температурному режиму.

Во втором поколении солнечных элементов снижение стоимости и возможность создания гибких структур определялись использованием поликристаллического кремния, селенида кадмия, селенида меди-индия-галлия (CIGS). Однако в этом случае технологические процессы требуют применения токсичных материалов, а готовые изделия содержат вредные вещества, для которых впоследствии необходимы дорогостоящие процедуры утилизации. Кроме того, основные материалы сравнительно редки и достаточно дороги, что также приводит к достаточно высокой стоимости производства.

Тем не менее, по имеющимся данным, до 90% объектов солнечной энергетике в настоящее время оснащены устройствами первого и второго поколения.

Третье поколение – это тонкопленочные солнечные батареи. Они успешно продвигаются на рынке солнечной энергетике, хотя и составляют пока относительно небольшую его долю. Одно из приоритетных, активно разрабатываемых направлений – применение органических технологий. Именно они, по оценкам экспертов, обладают максимальным коммерческим потенциалом и будут способствовать развитию солнечной энергетике в ближайшие годы. Такие технологии наиболее экологичны, используют доступные сравнительно недорогие материалы и изначально ориентированы на создание гибких устройств.

Некоторые промышленно выпускаемые и разрабатываемые гибкие солнечные источники энергии представлены в табл.6.

Как и в OLED-устройствах освещения, в качестве активно развиваемых методов получения гибких солнечных источников энергии второго и третьего поколений используются технологии термического осаждения и высокопроизводительные roll-to-roll процессы.

Четвертое, пока в большей степени перспективное, поколение представляет собой гибридные структуры, объединяющие технологические материалы предшествующих поколений и инновационные нанотехнологии и наноструктуры. Некоторые разработки

the transparent contact layer 6 are successively applied.

The efficiency of conversion is determined primarily by the electrophysical and optical properties of the materials used. A decrease in the efficiency of solar cells is mainly due to the reflection of solar radiation, its selective absorption, heat dissipation and recombination of electron-hole pairs in the structure. The efficiency is increased by selecting the materials with optimal properties, creating the multilayer structures made of materials with different forbidden-band widths, applying multifunctional optical coatings and applying nanotechnology and nanostructures to increase the internal quantum efficiency and the use of infrared radiation in the process of energy conversion.

Solar energy sources are classified according to the peak power. One peak watt is the value of the generated power under the condition that the solar radiation of 1 kW/m² falls on an element at 25°C. However sunlight rarely reaches this value. Moreover, during the operation an element is heated significantly above its rated temperature thereby reducing its capacity. Brownout, in turn, causes a drop in the output voltage due to losses in the unlit side.

Flexible solar power panels has gone through several stages of the technological development. To create the first single-crystal battery, monocrystal technologies based on the ultra-pure silicon were used. At the highest efficiency their main disadvantages the high cost of raw materials and equipment for production, sophisticated technology and criticality to the light conditions and temperature requirements.

In the second generation of solar cells, cost reduction and the ability to create flexible structures were determined using materials such as polycrystalline silicon, cadmium selenide, selenide, copper-indium-gallium (CIGS). But in this case the applied processes require the use of toxic materials, and the finished products contain harmful substances which subsequently require expensive disposal procedures. In addition, the basic materials are relatively rare and rather expensive thus also leading to relatively high production costs.

However, according to the available data, up to 90% of solar energy facilities are currently equipped with devices of the first and second generation.

The third generation is represented by the thin-film solar batteries. They are making progress



Таблица 6. Гибкие солнечные источники энергии
Table 6. Flexible solar panels

Производитель/разработчик Manufacturer/developer	Технологические материалы Materials	Эффективность, % Efficiency, %	Особенности Features
SANYO	Монокристаллический и поликристаллический Si Monocrystalline and polycrystalline Si	22,8	Сверхтонкий активный слой An ultrathin active layer
Solo Power www.solopower.com	CIGS на полимерной подложке CIGS on polymer substrate	11	Высокая гибкость, меньшая хрупкость High flexibility, low brittleness
DayStar Technologies www.daystartechinc.com	CIGS на титановой подложке CIGS on titanium substrate	19,5	Высокая гибкость, низкий вес на единицу мощности High flexibility, good power-to-weight ratio
Швейцарская федеральная лаборатория материаловедения и технологии EMPA, www.empa.ch	CIGS на полимерной подложке CIGS on polymer substrate	20,4	Высокая эффективность High efficiency
Midsummer www.midsummer.se	CIGS на стальной подложке CIGS on steel substrate	15	Высокая эффективность High efficiency
Японский национальный институт передовых наук и технологий в промышленности AIST, www.aist.go.jp	CIGS на пластиковой подложке и подложке из титановой фольги CIGS on plastic and titanium foil	14,7; 17,4	Высокая эффективность High efficiency
Heliatec www.heliatec.com	Органические пленки олигомеров Organic oligomer film	12	Низкая себестоимость Low cost
Университет Валенсии University of Valencia	Пленки органических аналогов перовскита Films of organic analogues of perovskite	12	Прозрачность Transparency

гибких солнечных источников энергии четвертого поколения представлены в табл.7. Подобные решения призваны обеспечить в первую очередь повышение эффективности поглощения и преобразования солнечной энергии, а также использование более доступных и дешевых исходных материалов.

but their share in the solar power panels market until now is relatively small. One of the actively developed priority areas is the use of organic technologies. According to experts, they have a maximum commercial potential and will promote the development of solar energy in the coming

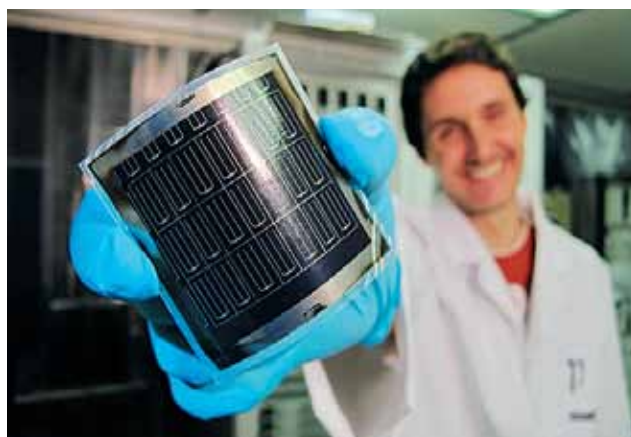


Рис.9. Гибкие солнечные источники энергии Solo Power (слева) и EMPA (справа)
Fig.9. Flexible solar panels of Solo Power (left) and EMPA (right)



В качестве примера гибкие солнечные источники энергии фирм Solo Power и EMPA представлены на рис.9.

Таким образом, можно констатировать, что развиваются и промышленное производство, и исследования гибких солнечных источников энергии. Для более широкого практического использования, в том числе в интегральных решениях с другими устройствами гибкой фотоники, необходимы повышение срока службы и эффективности, а также удешевление и технологическая отладка массового производства.

years. These technologies are most environmentally friendly, use relatively inexpensive materials, and they initially focused on the creation of flexible devices.

Some commercially available and developed flexible solar power panels are presented in table 6.

Like in the case of OLED-lighting devices, the thermal deposition technologies and high-efficiency roll-to-roll processes are increasingly used as the methods for producing flexible solar power panels of the second and third generation.

The fourth generation, which still represents an upcoming trend, is the hybrid structures that

Таблица 7. Перспективные разработки гибких солнечных источников энергии
Table 7. Prospective developments of flexible solar panels

Производитель/разработчик Manufacturer/developer	Материалы и технологии Materials and technologies	Особенности Features
Мичиганский университет University of Michigan	Наночастицы серебра в поликристаллическом Si The silver nanoparticles in the polycrystalline Si	Внутреннее поглощение до 95% Internal absorption of up to 95%
Университет Иллинойса University of Illinois	Наночастицы Si в монокристаллическом Si Si nanoparticles in monocrystalline Si	Прозрачность Transparency
Ensol As	Наночастицы металла Metal nanoparticles	Прозрачность Transparency
Университет Аризоны University of Arizona	Наночастицы металла в органическом полимере Metal nanoparticles in an organic polymer	Возможность настройки спектра поглощения Ability to adjust the absorption spectrum
Университет Северного Далласа University of North Dallas	Квантовые точки селенида кадмия, наномембраны Si Quantum dots of CdSe, Si nanomembranes	Высокая гибкость при использовании Si High flexibility
Университет Висконсин-Мэдисон University of Wisconsin-Madison	Углеродные нанотрубки Carbon nanotubes	Эффективность преобразования световой энергии до 75% The efficiency of converting light energy to 75%
Калифорнийский технологический институт California Institute of Technology	Наноструктурированные волокна Si в полимере Si nanostructured fibers in the polymer	Внутренняя квантовая эффективность до 90% Internal quantum efficiency up to 90%
Университет Миссури University of Missouri	Структура наноантенн на золотой подложке Nano-antennas structure on a gold substrate	Поглощение видимой и ИК-областей спектра Absorption of visible and infrared light
Массачусетский технологический университет Massachusetts Institute of Technology	Графен Graphene	Высокая механическая прочность high durability
Швейцарский федеральный технологический институт Swiss Federal Institute of Technology	Сенсибилизация красителем (ячейки Гретцеля) Dye-sensitized solar cells	Экологичность технологии Environmentally friendly technology
Северо-Западный университет США Northwestern University, USA	Сенсибилизация красителем (ячейки Гретцеля) Dye-sensitized solar cells	Экологичность технологии Environmentally friendly technology



ПЕРСПЕКТИВЫ

Все представленные направления гибкой фотоники – OLED-освещение, пленки с управляемыми оптическими параметрами и солнечные источники энергии – обладают сходными характерными чертами. В первую очередь, это широкое использование нанотехнологий, обеспечивающих требуемые характеристики изделий. Современный уровень подобных технологий характеризуется все более широким применением экологически безопасных материалов и технических процессов, которые не образуют вредных отходов в процессе утилизации после окончания жизненного цикла изделий.

Промышленное производство OLED-освещения, пленок с управляемыми оптическими параметрами и гибких солнечных источников энергии уже достигло стадии создания специализированных предприятий полного цикла. Совместные проекты и инвестиции реализуются в рамках как согласованной политики отдельных коммерческих компаний – разработчиков и производителей, так и государственных программ перспективного технического и экономического развития.

Несмотря на ограниченность практического применения рассмотренных систем (в первую очередь из-за их пока весьма высокой стоимости), уже сформировался спрос на международном рынке, что существенно улучшает перспективы успешной коммерциализации появляющихся разработок. Высокий уровень инвестирования и хорошие темпы научно-технологического развития этих направлений говорят о том, что в ближайшем будущем рассмотренные устройства гибкой фотоники станут естественными элементами быта. Совокупность достигнутых и планируемых параметров конкретных устройств позволят интегрировать их в интеллектуальные интерфейсы обеспечения комфортной среды обитания человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лучинин В. Мультидисциплинарные технологии. Гибкая электроника и фотоника. – Нано- и микросистемная техника, 2013, №12(161), с.2-6.
2. Лучинин В. Гибкая электроника. – Наноиндустрия, 2013, №8 (46), с.26-32.
3. Афанасьев П., Боков О., Лучинин В. Научно-технологический комплекс экспресс-прототипирования изделий гибкой электроники и фотоники. – Наноиндустрия, 2013, №6(44), с.94-104.
4. Афанасьев П., Боков О., Лучинин В. Создание технологического кластера гибкой печатной электроники. – Наноиндустрия, 2014, №3(49), с.52-56.

combine technological materials of previous generations, innovative nanotechnologies and nanostructures. Some developing flexible solar energy sources of the fourth generation are presented in table 7. Such solutions are designed to primarily increase the efficiency of absorption and conversion of the solar energy and use cheaper raw materials.

For example, the flexible solar power panels of the Solo Power and EMPA companies are shown in fig.9.

Thus, we can say that both the research and manufacturing of flexible solar energy sources are in progress. For more practical use including in integrated solutions with other flexible photonic devices, an increase in service life and efficiency, as well as cheapening and debugging of mass production will be required.

PERSPECTIVES

All the presented areas of flexible photonics, e.g. OLED lighting, the films with controlled optical properties and solar power panels have common typical features. Primarily this involves a widespread use of nanotechnologies providing the required product specifications. The advanced level of such technologies is characterised by an increased use of environmentally friendly materials and technical processes, which do not constitute any hazardous waste in the recycling process after the end of a product lifecycle.

The industrial production of OLED lighting, the films with controlled optical properties and flexible solar energy has already reached the stage of creation of the dedicated full-cycle enterprises. Joint projects and investments are implemented within the policy agreed between individual businesses, i.e. developers and manufacturers, and the governmental programmes for the long-term technological and economic development.

Despite the limited practical application of the considered systems, primarily because of their still very high cost, there is a demand in the international market, which significantly improves the prospects for successful commercialization of the emerging developments. A high level of investment and a good pace of scientific and technological development in these areas suggest that in the near future the flexible photonic devices will become ordinary elements of life. A set of the achieved and planned parameters of specific devices allow integrating them into intelligent interfaces designed to ensure a comfortable living environment. ■