

Dr. Eng. Arch. Radosław Achramowicz, university professor<sup>1)</sup>  
 ORCID: 0000-0002-3923-4504

# The evolution of LED lighting technology and its impact on innovative architectural solutions

## *Ewolucja technologii oświetleniowej LED i jej wpływ na innowacyjne rozwiązania architektoniczne*

DOI: 10.15199/33.2024.07.06

**Abstract.** The article describes the development of architectural lighting innovations derived from LED technology. The first part synthetically presents the history. Next, studies of two cases are conducted: German-Italian and Chinese, in which breakthrough technological and material solutions were used. The first example – *Led Wallpaper* focuses on issues related to the building and finishing of internal walls integrated with light sources, while the second – *GreenPix* presents the possibilities of using large-scale lighting solutions in the construction of glass facades. The conclusions presented in the article can be used in architectural design as well as in related disciplines focusing on the issue of illumination integrated with the building structure.

**Keywords:** architecture; lighting; illumination; partition, facade.

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono rozwój architektonicznych innowacji oświetleniowych wywodzących się z technologii LED. Pierwsza jego część syntetycznie przybliży historię elektrycznych źródeł światła i zakres ich zastosowania. W następnej kolejności przeprowadzono studium dwóch przypadków: niemiecko-włoskiego oraz chińskiego, w których zastosowano przełomowe rozwiązania technologiczno-materiałowe. Pierwszy z przykładów – *Led Wallpaper* koncentruje się na zagadnieniach związanych z wykonawstwem i wykańczaniem ścian wewnętrznych zintegrowanych ze źródłami światła, a drugi – *GreenPix* przybliży możliwości zastosowania wielkoskalowych rozwiązań oświetleniowych przy budowie szklanych fasad. Wnioski zaprezentowane w artykule mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu architektonicznym, jak również w dyscyplinach pokrewnych, ogniskujących uwagę na zagadnieniu iluminacji zintegrowanych ze strukturą budynku.

**Słowa kluczowe:** architektura; oświetlenie; iluminacja; przegroda; fasada.

It is more than a year since the death of American engineer and inventor Nick Holonyak, creator of the light-emitting diode – also known as LED – an inconspicuous device of a few millimeters that offered extraordinary new possibilities for handling light. Today, LED sources can be found almost everywhere, from small appliances to building and interior design elements and architectural façades. They indicate escape routes, illuminate advertisements and most information in the city and, in fact, it is difficult to identify an area of life where they are not present. Unfortunately, the vast majority of light-emitting diodes are treated instrumentally – as a source of efficient and low-failure light, yet LED technology brings not only a new technological quality, but also an aesthetic one. They offer architects and the entire construction sector opportunities that designers could not even dream of a dozen years ago.

The aim of this article is to give as broad an overview as possible of this technology, which is widely used today. Let us

Mija ponad rok od śmierci amerykańskiego inżyniera i wynalazcy Nicka Holonyaka, twórcy diody świecącej – zwanej także LED – niepozornego, kilkumilimetrowego urządzenia, które zaoferowało nowe, niezwykle możliwości operowania światłem. Dziś źródła LED znajdują się prawie wszędzie, począwszy od drobnych urządzeń, przez elementy zabudowy i wyposażenia wnętrz, aż po fasady architektoniczne. Wskazują one drogi ewakuacji, podświetlają reklamy i większość informacji w mieście i właściwie trudno wskazać obszar życia, gdzie nie są obecne. Niestety, w znakomitej większości diody świecące są traktowane instrumentalnie – jako źródło efektywnego i mało awaryjnego światła, a przecież technologia LED wnosi nie tylko nową jakość technologiczną, ale również estetyczną. Oferują one architektom i całemu sektorowi budowlanemu możliwości, o których jeszcze kilkanaście lat temu projektanci nie mogli nawet marzyć.

Celem artykułu jest przybliżenie, w możliwie jak najszerszym ujęciu, tej powszechnie dziś stosowanej technologii. Zaczynijmy od konstatacji, iż polemika na temat światła w architekturze ma trzy zasadnicze wątki, które wzajemnie się uzupełniają: pierwszy z nich to **technologia** – bez niej nie byłaby możliwa jakakolwiek dyskusja i progres; drugi wątek do-

<sup>1)</sup> Warsaw University of Technology, Faculty of Architecture; radoslaw.achramowicz@pw.edu.pl

start with the observation that the polemics on light in architecture has three main topics, which are mutually complementary: the first is **technology** – without it no discussion and progress would be possible; the second concerns **aesthetics** – after all, through works of art, creators realize their dreams and intentions, placing them in the context of civilization; and finally, the third concerns the emotional and extrasensory impact of light. The aforementioned topics, from the point of view of the design process, are difficult to separate as they have a synergistic relationship. The projects referred to in the article can also be considered in terms of broadly understood functionality, energy efficiency or environmental impact, but also in terms of beauty, in phenomenological terms, where light is a source of well-being (including visual comfort and non-visual impact) as well as a catalyst for aesthetic impressions. Due to the nature of the article relating to objectively measurable innovations of a technological, material or process nature [1], issues of a phenomenological nature have been limited as they require separate elaboration.

Two EU documents were the main catalysts driving the experiments using LED sources: in 2006, the Low Voltage Directive [2] was published, which gave the first impetus to luminaire designers, followed three years later by the implementation of EC Regulation 244/2009 [3], which resulted in the withdrawal of traditional incandescent light sources from the commercial market in the EU.

The light-emitting diodes in question have a number of advantages not available with other light sources. The main advantages include, first and foremost, their miniature size and robustness, long service life combined with high luminous efficacy, as well as obtaining full luminous flux within a short time of switching on the device [4]. However, they also have the significant disadvantage of low power per individual diode, which is why they must be used in larger numbers as repeatable modules or clusters in architectural lighting solutions. The fact that their strengths far outweigh their weaknesses, however, has resulted in diodes being used in many areas of the economy, both those related to architecture and those related to other fields of technology not directly relevant to the discipline in question, such as automotive and aviation lighting, traffic signals and road lighting, advertising, stage and exhibition lighting, all kinds of audiovisual equipment, or even specialist medical devices [5].

Today, we can see that in addition to the direct economic effects resulting from the transition of lighting to LED technology, this change has brought global environmental benefits, directly impacting on the reduction of carbon consumption, CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emissions and dust emitted by power plants. The European Commission estimates that the complete phase-out of traditional incandescent light bulbs in the EU results in annual savings comparable to the electricity production of ten medium-sized power plants. This corresponds to the electricity consumption of 11 million households.

### Why innovation?

Lighting design involves several disciplines, of which we are most interested in architecture and urban planning (in planning terms through the development of Lighting Master Plans and

tyczy **estetyki** – wszak przez dzieła twórcy realizują swe marzenia i zamysły, umieszczając je w kontekście cywilizacyjnym; wreszcie trzeci – dotyczy emocjonalnego i pozazmysłowego oddziaływania światła. Wymienione zagadnienia, z punktu widzenia procesu projektowego, są trudne do rozdzielania, gdyż charakteryzują się relacją synergiczną. Przywołane w artykule projekty można również rozpatrywać pod kątem szeroko rozumianej funkcjonalności, efektywności energetycznej czy oddziaływania na środowisko, ale także w kontekście piękna, w ujęciu fenomenologicznym, gdzie światło jest źródłem samopoczucia (m.in. komfort widzenia i oddziaływanie pozawzrokowe), jak i katalizatorem wrażeń natury estetycznej. Ze względu na charakter artykułu odnoszący się do obiektywnie mierzalnych innowacji o charakterze technologicznym, materiałowym czy procesowym [1], zagadnienia o naturze fenomenologicznej zostały ograniczone, jako wymagające osobnego opracowania.

Głównymi katalizatorami napędzającymi eksperymenty wykorzystujące źródła LED były dwa dokumenty unijne: w 2006 r. opublikowano tzw. Dyrektywę Niskonapięciową [2], która dała pierwszy impuls projektantom opraw oświetleniowych, a następnie, trzy lata później, wdrożono Rozporządzenie KE 244/2009 [3], którego efektem było wycofanie tradycyjnych żarowych źródeł światła z obrotu handlowego w UE.

Omawiane diody elektroluminescencyjne mają wiele wad, nieosiągalnych w przypadku pozostałych źródeł światła. Do głównych zalet należą przede wszystkim ich miniaturowe rozmiary i wytrzymałość, długa żywotność połączona z dużą skutecznością świetlną, a także uzyskiwanie pełnego strumienia świetlnego w krótkim czasie od włączenia urządzenia [4]. Mają one jednak także istotną wadę, jaką jest mała moc pojedynczej diody, dlatego też w architektonicznych rozwiązaniach oświetleniowych muszą być wykorzystywane w większej liczbie, jako powtarzalne moduły czy klastry. Zdecydowana przewaga ich mocnych stron nad słabościami poskutkowała jednak tym, że diody znalazły zastosowanie w rozlicznych obszarach gospodarki, zarówno powiązanych z architekturą, jak również z innymi dziedzinami techniki, nieodnoszącymi się wprost do interesującej nas dyscypliny, jak chociażby oświetlenie samochodowe i lotnicze, sygnalizacja drogowa i oświetlenie dróg, reklama, oświetlenie estradowe oraz wystawiennicze, wszelkie urządzenia RTV, czy nawet specjalistyczne urządzenia medyczne [5].

Dziś widzimy, że oprócz bezpośrednich efektów ekonomicznych wynikłych z przestawienia oświetlenia na technologię LED, zmiana ta przyniosła globalne korzyści związane z ochroną środowiska naturalnego, wpływając bezpośrednio na redukcję zużycia węgla, emisję CO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub> oraz pyłów emitowanych przez elektrownie. Z szacunków Komisji Europejskiej wynika, że całkowita rezygnacja z tradycyjnych żarówek w UE daje roczne oszczędności porównywalne z produkcją prądu dziesięciu średnich elektrowni. Odpowiada to zużyciu energii elektrycznej przez 11 mln gospodarstw domowych.

### Dlaczego innowacja?

Projektowanie oświetlenia dotyczy kilku dyscyplin, z których najbardziej nas interesuje architektura i urbanistyka (w zakresie planistycznym przez opracowywanie tzw. *Ligh-*

in the implementation of lighting technologies in buildings or public spaces). The other disciplines are electrical engineering (as lighting technology) and industrial design (as luminaire design). Conscious design and subsequent use, growing out of the intersection of these three disciplines, indicates an increasingly deep integration of lighting issues with R&D issues, which is often seen as a reflection of a country's economic development, with innovation in its broadest sense being a non-negotiable foundation of a country's competitive advantage [6]. The current demand for innovative lighting solutions seems to focus primarily on the pursuit of energy efficiency and environmental performance. As a result, the aim of design has become to develop solutions that are efficient and low emission, yet visually appealing. This is accompanied by the testing of experimental solutions.

Currently, the Polish literature on architectural lighting is marginal and scattered. It is also impossible to identify any research center that approaches the topic systemically. Completing the picture faced by both the person researching the issue of light in architecture and the person designing in this field is the fact that in Poland the profession of light architect does not officially exist, which in Western countries has the wording *lighting architect* or *lighting designer*. There, too, and especially in Anglo-Saxon countries, the situation is the opposite of ours, both in terms of the popularity of the profession, the implementations that follow, and innovative research. Among the numerous literature on the subject, there are items that address the issue on an architectural scale, such as *SuperLux. Smart Light Art, Design & Architecture for Cities* [7] autorstwa Davina Jacksona, w skali miasta – *Urban Lighting for People: Evidence-Based Lighting Design for the Built* [8] edited by Navaz Davoudian, or in the area combining issues of technological innovation with the psychological aspects of light, such as the series of interviews *Light & Emotion. 47 Conversations with lighting designers* [9] developed by Vincent Lagarnier and Jasmine van der Pol. R&D work by commercial players – multinationals such as Arup and Philips – is also important in this field.

### History of the technology

The origins of LED technology can be traced back to the inter-war period, but first it is worth going back to the end of the 19th century when, in 1878, the Briton Joseph Wilson Swan developed the first incandescent light bulb, which lasted barely a few tens of hours and was perfected and patented a year later by the American engineer-inventor Thomas Edison. The solution did not resemble today's incandescent bulbs – instead of a tungsten strand, the vacuum bulb contained a charred bamboo fiber [10, 11]. It was not until 1913 that Irving Langmuir, a young engineer at General Electric and later winner of the Nobel Prize in Chemistry [12], developed a tungsten filament and argon-filled incandescent bulb, the principle of which is still in use today. Technological curiosities include an incandescent light bulb installed in 1901 and still in operation today in the American town of Livemore, in the local fire station [13]. The twin bulbs at the Struga hydroelectric power station in Kashubia, where they have been

*ting Master Planów* oraz w zakresie implementacji technologii oświetleniowych w budynki czy przestrzenie publiczne). Pozostałe dyscypliny to: elektrotechnika (jako technika świetlna) oraz wzornictwo przemysłowe (jako projektowanie opraw oświetleniowych). Świadome projektowanie i następnie użytkowanie, wyrastające na styku tych trzech dyscyplin, wskazuje na coraz głębszą integrację zagadnień oświetleniowych z problematyką B+R, która często jest postrzegana jako odzwierciedlenie rozwoju gospodarczego danego kraju, a szeroko rozumiana innowacyjność jest niepodważalnym fundamentem przewagi konkurencyjnej poszczególnych państw [6]. Wydaje się, że obecne zapotrzebowanie na innowacyjne rozwiązania oświetleniowe koncentruje się przede wszystkim na poszukiwaniach związanych z energooszczędnością i ekologicznością. W efekcie celem projektowania staje się opracowywanie rozwiązań wydajnych i niskoemisyjnych, a przy tym atrakcyjnych wizualnie. Towarzyszy temu testowanie rozwiązań eksperymentalnych.

Obecnie polska literatura dotycząca oświetlenia architektonicznego jest marginalna i rozproszona. Nie można wskazać także żadnego ośrodka badawczego, który podejmowałby tematykę systemowo. Dopelnieniem obrazu, przed którym stoi zarówno osoba badająca zagadnienia światła w architekturze, jak i osoba projektująca w tej dziedzinie, jest fakt, iż w Polsce oficjalnie nie istnieje zawód architekta światła, który w krajach Zachodu ma brzmienie *lighting architect* lub *lighting designer*. Tam też, a szczególnie w krajach anglosaskich, sytuacja wygląda odwrotnie niż u nas, zarówno jeśli chodzi o popularność zawodu, idące za tym realizacje, czy innowacyjne badania. Wśród licznie reprezentowanej literatury przedmiotu można wskazać pozycje, które podejmują zagadnienie w skali architektury, jak np. *SuperLux. Smart Light Art, Design & Architecture for Cities* [7] autorstwa Davina Jacksona, w skali miasta – *Urban Lighting for People: Evidence-Based Lighting Design for the Built* [8] pod redakcją Navaz Davoudian, czy w obszarze łączącym zagadnienia innowacji technologicznych z psychologicznymi aspektami światła, jak np. cykl wywiadów *Light & Emotion. 47 Conversations with lighting designers* [9] opracowany przez Vincenta Lagarnier i Jasmine van der Pol. Istotne na tym polu są również prace B+R prowadzone przez podmioty komercyjne – międzynarodowe koncerny, jak np. Arup czy Philips.

### Historia technologii

Początki technologii LED sięgają okresu międzywojennego, jednak najpierw warto cofnąć się do końca XIX wieku, gdy w 1878 r. Brytyjczyk Joseph Wilson Swan opracował pierwszą, działającą ledwie kilkadziesiąt godzin żarówkę, która rok później została udoskonalona i opatentowana przez amerykańskiego inżyniera wynalazcę Thomasa Edisona. Rozwiązanie to nie przypominało dzisiejszych żarówek – zamiast skrętki z wolframu w próżniowej bańce znajdowało się zwęglone włókno bambusa [10, 11]. Dopiero w 1913 r. Irving Langmuir, młody inżynier z General Electric, a późniejszy laureat Nagrody Nobla w dziedzinie chemii [12], opracował żarówkę z żarnikiem wolframowym i wypełnioną argonem, której zasada działania funkcjonuje do czasów współcze-

responsible for the emergency signaling of electricity since 1896, have been in operation for even longer [14]. These are exceptions, however, as the primary shortcoming of this technology from the start was its low energy efficiency, where light emission accounted for only a few per cent and the rest was emitted heat. In fact, this was the primary reason for the withdrawal of this light source from production throughout the EU, replacing it with the light-emitting diode.

Few today remember that the foundations for LED technology were laid in the 1920s. It was then that Soviet radio technician Oleg Vladimirovich Losev noticed that the diodes used in radio receivers emitted light. Following his discovery, he patented the so-called *Crystalline Generator* in 1927, described as a light transmitter, which was used for “*high-speed telegraph and telephone communication, image transmission and other applications*” [15], and the essay in which Losev published the results of his research with a free translation into Polish reads: *Luminous carborundum detector and detection with crystals* [16, 17]. Although Losev's discovery was rapidly disseminated in Soviet and Western scientific journals, the results of the practical application of diodes had to wait several more decades. It is worth mentioning here that the fascination of the time with new sources of electric light is also reflected in art – almost simultaneously there are the precursory explorations of the Hungarian artist Laszlo Moholy Nagy, later a Bauhaus professor, who, as early as 1922, experimented with the telephone as a tool for creating light images and predicted that architectural space could be the subject of light projection [18]. In the following decade, at the dawn of the Second World War, two more Hungarians, Zoltan Bay and György Szigeti, expanded on Losev's research and developed the prototype of the modern diode. During their experiments, they discovered that, depending on the degree of contamination of the light emitter, it could glow white, yellowish or greenish [19]. Still, these experiments were a long way from contemporary, mass-market solutions and they were not translated into the economy and remained outside the focus of architecture.

The light-emitting diode entered mass production in the second half of the 20th century in a form developed by American engineer Nick Holonyak of General Electric. In 1962, the inventor demonstrated the first light-emitting diode, which was preceded by experimental work in the fields of materials science, optics and chemistry [20]. Designed by Holonyak, the diodes found their way into a wide range of electronic devices and domestic appliances, and later into the automotive and aerospace industries. In the 1990s, the first so-called high-brightness diodes became available and penetrated urban spaces in the form of traffic lights and advertisements. In the following decade, they found their way into architecture thanks to their illumination, which began to rely on luminaires that had already been mass-produced. An assumption can be made that it is then, at the beginning of this century, that diodes are becoming – however non-obviously – the building material that shapes the space around us [21]. The last two decades have seen an increasing development of electroluminescent light sources. This is due to technological

synch. Do ciekawostek natury technologicznej należy zaliczyć żarówkę zamontowaną w 1901 r. i działającą do dziś w amerykańskim miasteczku Livemore, w tamtejszej remizie strażackiej [13]. Jeszcze dłużej pracują dwie bliźniacze żarówki w elektrowni wodnej Struga na Kaszubach, gdzie od 1896 roku odpowiadają za sygnalizację awaryjną prądu [14]. Są to jednak wyjątki, gdyż podstawowym mankamentem tej technologii była od początku mała wydajność energetyczna, gdzie emisja światła stanowiła tylko kilka procent, a reszta to wyemitowane ciepło. Było to zresztą podstawowym powodem wycofania tego źródła światła z produkcji w całej UE, zastępując je diodą elektroluminescencyjną.

Mało kto dziś pamięta, iż podwaliny pod technologię LED zostały stworzone w latach dwudziestych ubiegłego wieku. Wtedy to radziecki technik radiowy Oleg Władimirowicz Łosiew zauważył, że diody używane w odbiornikach radiowych emitują światło. W następstwie swego odkrycia opatentował w 1927 r. tzw. *Generator Krystaliczny*, określane mianem *przekaznika światła*, który posłużył do „*komunikacji szybkiego telegrafu i telefonu, przesyłania obrazów i innych aplikacji*” [15], a esej, w którym Łosiew opublikował rezultaty swych badań, w wolnym tłumaczeniu na język polski brzmi: *Świecący detektor karborundu i wykrywanie kryształów* [16, 17]. Mimo że odkrycie Łosiewa błyskawicznie rozposzechniono w radzieckich i zachodnich czasopismach naukowych, to na efekty praktycznego zastosowania diod należało poczekać jeszcze kilka dziesięcioleci. Warto tu nadmienić, że ówczesna fascynacja nowymi źródłami światła elektrycznego znajduje odzwierciedlenie także w sztuce – niemal równoległe pojawiają się prekursorskie poszukiwania węgierskiego artysty Laszlo Moholy Nagy, późniejszego profesora Bauhausu, który już w 1922 r. eksperymentuje z telefonem, jako narzędziem do tworzenia obrazów świetlnych i prognozuje, iż przestrzeń architektoniczna może być przedmiotem projekcji świetlnej [18]. W kolejnej dekadzie, u progu drugiej wojny światowej, kolejni dwaj Węgrzy, Zoltán Bay i György Szigeti rozwinęli poszukiwania Łosiewa i opracowali pierwowzór współczesnej diody. Podczas eksperymentów odkryli, iż w zależności od stopnia zanieczyszczenia emitera światła, może on świecić na białe, żółtawe lub zielonkawe [19]. Wciąż jednak eksperymentom tym było bardzo daleko do współczesnych, masowych rozwiązań, nie miały one przełożenia na gospodarkę oraz pozostawały poza obszarem zainteresowania architektury.

Dioda świecąca weszła do masowej produkcji w drugiej połowie XX wieku w formie opracowanej przez amerykańskiego inżyniera Nicka Holonyaka z General Electric. Wynalazca ten zademonstrował w 1962 r. pierwszą diodę emitującą światło, co zostało poprzedzone pracami eksperymentalnymi z ograniczonym materiałem, optyki i chemii [20]. Zaprojektowane przez Holonyaka diody znalazły zastosowanie w wielu urządzeniach elektronicznych i sprzętach domowych, a następnie w przemyśle samochodowym i lotniczym. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku pojawiły się pierwsze diody o tzw. *wysokiej jasności*, które przeniknęły do przestrzeni miast pod postacią sygnalizacji świetlnych i reklam. W kolejnej dekadzie znalazły zastosowanie w architekturze za sprawą jej iluminacji, która zaczęła bazować na oprawach oświetleniowych produkowanych na

advances that enable, among other things: increasingly better photometric and colorimetric performance of light-emitting diodes, with their progressive miniaturization and increased efficiency, which in turn encourages the development of innovative design solutions for light sources and luminaires themselves [22].

From a technical point of view, the light-emitting diode, abbreviated as LED (Light-Emitting Diode), belongs to the so-called 4th generation of artificial light sources and is classified as a semiconductor optoelectronic device, in which the phenomenon called electroluminescence, occurring in a semiconductor crystal, is responsible for light emission. The first three generations are sources using combustion (I), incandescent lamps (II) and discharge lamps (III). This classification is a direct result of the different mechanisms of light generation.

Due to the type of emission, we can distinguish different types of diodes, such as RGB, OLEDs, i.e. organic diodes, PowerLEDs and many others used in architecture. Let us therefore follow two examples of innovative solutions: the first, dedicated to architectural interiors, was created in an Italian-German cooperation, while the other, with a decidedly external application, comes from China. These are seemingly extreme examples that have in common that, while being ground-breaking in their class, provide a pretext for demonstrating the innovative potential of light-emitting diodes.

### Examples of the application of innovative LEDs in architecture

The first example discussed is the LED Wallpaper, designed by **Ingo Maurer** in 2006 and put into mass production by the German company Architects Paper in 2011 (Photo 1). *We are talking about a luminous and programmable wall cladding that functions as a wallpaper and a lamp at the same time, the installation of which does not require any electrical expertise.* The wallpaper was conceived as atmospheric and decorative lighting, designed to “complete”, as it were, the visual quality of the living space. Achieving the desired visual comfort in this case was linked to the “introduction” of light, which in architectural design is referred to as ambient light, with a non-obvious, hidden source.

The design phase and prototype development, which we are most interested in from an innovation point of view, took a total of four years. In order to turn the pilot solution into a commercial product, research and development work was undertaken related to the following issues:

- 1) the fire resistance of the base material, which would be similar to paper wallpaper;
- 2) embedding the diodes in a flexible and fragile base material;
- 3) the development of conductive ink and the creation of a process line that would allow

masową już skalę. Można założyć, że właśnie wówczas, na początku bieżącego stulecia, diody stają się – choć to nieoczywiste – materiałem budowlanym kształtującym otaczającą nas przestrzeń [21]. W okresie dwóch ostatnich dekad można zaobserwować coraz intensywniejszy rozwój elektroluminescencyjnych źródeł światła. Dzieje się tak za sprawą postępu technologicznego, który umożliwia m.in.: uzyskiwanie coraz lepszych parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych diod świecących, przy jednoczesnej postępującej ich miniaturyzacji i zwiększaniu wydajności, co z kolei sprzyja powstawaniu nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych źródeł światła oraz samych opraw oświetleniowych [22].

Z technicznego punktu widzenia dioda elektroluminescencyjna, w skrócie określana LED (ang. *Light-Emitting Diode*), należy do tzw. IV generacji sztucznych źródeł światła i jest zaliczana do półprzewodnikowych urządzeń optoelektronicznych, w których za emisję światła odpowiada zjawisko zwane elektroluminescencją, zachodzące w tzw. kryształach półprzewodnikowych. Pierwsze 3 generacje to źródła wykorzystujące proces spalania (I), lampy żarowe (II) oraz lampy wyładowcze (III). Podział ten wynika bezpośrednio z różnych mechanizmów powstawania światła.

Ze względu na rodzaj emisji, możemy wyszczególnić różne rodzaje diod, jak RGB, OLED, czyli diody organiczne, PowerLED i wiele innych stosowanych w architekturze. Prześledźmy zatem dwa przykłady innowacyjnych rozwiązań: pierwsze – dedykowane wnętrzom architektonicznym powstało w kooperacji włosko-niemieckiej, drugie – o zdecydowanie zewnętrznym zastosowaniu pochodzi z Chin. Są to pozornie skrajne przykłady, które łączy to, że będąc przełomowe w swej klasie, stanowią pretekst do ukazania innowacyjnego potencjału diod świecących.

### Przykłady zastosowania innowacyjnych diod w architekturze

Pierwszym z omawianych przykładów jest *LED Wallpaper* zaprojektowana przez **Ingo Maurera** w 2006 r., a wdrożona do masowej produkcji przez niemiecką firmę Architects Paper w 2011 r. (fotografia 1). **Mowa o świecącej i programowalnej okładzinie ściennej, spełniającej funkcję tapety i lampy zarazem**, której montaż nie wymaga żadnej specjalistycznej wiedzy z dziedziny instalacji elektrycznych. Tapeta z założenia po-myślana została jako oświetlenie nastrojowe i dekoracyjne, mające niejako „dopełniać” jakość wizualną miejsca zamieszkania.

Uzyskanieżądanego komfortu wizualnego w tym przypadku związane było z „wprowadzeniem” światła, które w projektowaniu architektonicznym określane jest jako tzw. ambientowe, o nieoczywistym, ukrytym źródle.

Faza projektowania i prototypowanie, które najbardziej nas interesują z punktu widzenia innowacji, trwały w sumie cztery lata. Aby „przekuć” pilotażowe rozwiązanie w produkt komercyjny, podjęto prace badawczo-rozwojowe związane z następującymi zagadnieniami:

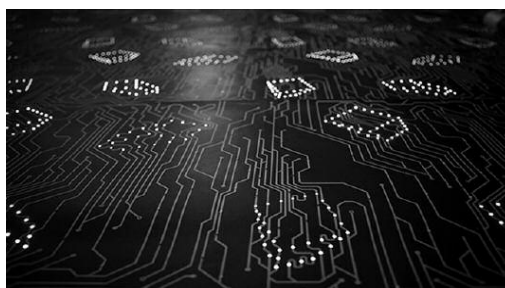


Photo 1. Ingo Maurer, LED Wallpaper

Photo: author archive

Fot. 1. Ingo Maurer, LED Wallpaper

Fot.: archiwum autora

electronic circuits to be printed directly onto the base material using standard printing presses;

4) creating electronic circuits that are physically flexible and at the same time easy to cut and connect directly on site, while maintaining the performance and quality of the light.

When carrying out the research work, the most difficult technological challenge was a base material for electronics that could meet the requirements of public spaces and yet be as easy to install as standard wallpaper. The base material therefore had to be strong and flexible, resistant to moisture and easy to clean, in addition to having a fire resistance rating of B1. As a result of the search for materials, it emerged that the simplest solution, plain paper interlining, was the best carrier for electronic circuits. It was also a sensitive issue to design and print the electronic circuits in such a way that strips of wallpaper of different lengths could be cut so that they could be used in rooms of different heights. The circuit printing technology established at the outset of the R&D work required the use of sophisticated silver printing machines. As a result, the product was very expensive and difficult to mass produce, so this solution was abandoned. Consequently, a conductive ink was developed that greatly simplified the process of printing electronic circuits. In parallel, a device dedicated to this process was constructed, which significantly increased production efficiency. Another important issue was the development of flexible diode-to-paper mounting. Manual work has proven to be a much better solution than robotizing the process, as it is more precise and less costly. Finally, the diodes that form the patterns on the wallpaper are spaced 3 mm apart from each other. One standard wallpaper section consists of five repeating patterns (60 x 64 cm) and the repeating pattern consists of 48 white, 60 blue and 60 red LEDs. One section of wallpaper therefore has 840 light points, corresponding to a power consumption of 60 watts [23]. The entire system is controlled by an electronic circuit that allows individual programming of the light color and brightness adjustment. The power supply and electronics controller are concealed in the skirting board.

Finally, a unique process sequence was developed to put the *LED Wallpaper* into production: in the first production phase, the interlining was colored (green, red, white or black) using standard printing presses; in the second phase, the conductive electronic circuits were printed; and in the final phase, the LEDs were physically embedded in the wallpaper, after which the whole thing was rolled up in the form of a roll 60 cm wide and 320 cm long – just like classic wallpaper. The entire work is best summed up in the words of Ingo Maurer, who said: *New technologies are opening the way to new forms, giving shape to what was previously only the domain of pure imagination. Imagination backed by LED technology made it possible to create the first luminous wallpaper, which can simply be switched on and off like any other lamp, dimmed or changed in pattern and colors to suit any mood* [24].

The other example discussed is **GreenPix – Zero Energy Media Wall**, the curtain wall of the Xicui Building in Beijing. The building was designed by US architectural firm Simone

1) ognioodpornością materiału podkładowego, który byłby zbliżony do papierowej tapety;

2) osadzeniem diod w elastycznym i delikatnym materiale podkładowym;

3) opracowaniem farby przewodzącej prąd i stworzenie takiego ciągu technologicznego, który umożliwiałby drukowanie obwodów elektronicznych bezpośrednio na materiale podkładowym z wykorzystaniem standardowych maszyn drukarskich;

4) stworzeniem takich obwodów elektronicznych, które byłyby fizycznie elastyczne i zarazem łatwe do przycinania oraz łączenia bezpośrednio na budowie, zachowując przy tym parametry i jakość świecenia.

Podczas prowadzenia prac badawczych, najtrudniejszym wyzwaniem technologicznym był materiał podkładowy dla elektroniki, który mógłby spełniać wymagania stawiane przez przestrzenie publiczne, a zarazem byłyby tak łatwy w montażu jak standardowa tapeta. Podkład musiał być zatem wytrzymały i elastyczny, odporny na wilgoć i łatwo czyszczący, a dodatkowo mieć ognioodporność w klasie B1. W efekcie prowadzonych poszukiwań materiałowych okazało się, że rozwiązanie najprostsze, czyli zwykła papierowa flizelina stanowi najlepszy nośnik pod układy elektroniczne. Newralgicznym zagadnieniem było również zaprojektowanie i nadrukowanie obwodów elektronicznych w sposób umożliwiający wycinanie paszków tapety o różnej długości, tak aby móc stosować je w pomieszczeniach o różnej wysokości. Założona na wstępie prac badawczo-rozwojowych technologia drukowania obwodów wymagała użycia skomplikowanych maszyn nadrukujących srebrem. W efekcie produkt był bardzo drogi i trudny w produkcji seryjnej, dlatego też zrezygnowano z takiego rozwiązania. W konsekwencji została opracowana farba przewodząca, która znacznie uprościła proces drukowania obwodów elektronicznych. Równoległe skonstruowano urządzenie dedykowane temu procesowi, co znacznie zwiększyło wydajność produkcji. Kolejnym ważnym zagadnieniem było opracowanie elastycznego mocowania diod do papieru. Okazało się, że ręczna praca jest znacznie lepszym rozwiązaniem niż robotyzacja tego procesu, ponieważ jest bardziej precyzyjna i mniej kosztowna. Finalnie diody tworzące wzory na tapecie, rozmieszczone są względem siebie w odległości 3 mm. Jeden standardowy odcinek tapety składa się z pięciu powtarzających się wzorów (60 x 64 cm), a powtarzalny wzór składa się z 48 białych, 60 niebieskich i 60 czerwonych diod. Jeden odcinek tapety ma więc 840 punktów świetlnych, co odpowiada poborowi mocy 60 Watt [23]. Całość jest sterowana przez układ elektroniczny, który umożliwia indywidualne programowanie barwy światła i regulację jasności świecenia. Zasilacz i sterownik układu elektronicznego są chowane w listwie przypodłogowej.

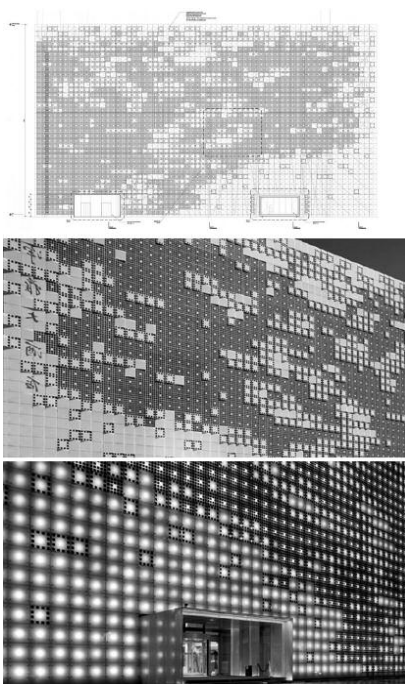
Finalnie, aby wdrożyć *LED Wallpaper* do produkcji, opracowano wyjątkowy ciąg technologiczny: w pierwszej fazie produkcji nadawano flizelinie kolor (zielony, czerwony, biały lub czarny) przy użyciu standardowych maszyn drukarskich; w drugiej nadrukowywano układy elektroniczne przewodzące prąd, a w ostatniej fazie osadzano fizycznie diody w tapecie, po czym całość zwijano w formę rolki o szerokości 60 cm i długości 320 cm – analogicznie jak w klasycznej tapecie. Całość prac najlepiej podsumowują słowa Ingo Maurera, który mówi: *Nowe*

Giostra & Partners Architects in 2005 and commissioned in 2008. From a formal point of view, the project was reduced to transforming the façade into the largest contemporary LED display of 2,200 m<sup>2</sup>, and the first such large photovoltaic system integrated into a glass curtain wall (Photo 2). The façade, according to lighting contractor Arup, is a kind of screen made up of 2292 colored modules formed from light-emitting diodes, which are stretched to a height of 33 m and a width of 60 m [25]. The two most important technological challenges focused on the responsiveness of this screen to the surrounding environment, while ensuring the energy self-sufficiency of the entire building. The first idea involved developing special software that transformed an ordinary LED screen into a “smart skin” – an interactive platform for posting events and artistic projections, which would allow interaction with the public space and users.

The subject matter was intended to provide entertainment and community involvement. The other challenge, regarding self-sufficiency, was much more difficult and involved creating a building that would absorb the sun's energy during the day and use it for later illumination, and in addition, as Simon Giostra wanted, the display would visually respond to and reflect the natural cycles of the day. In order to meet these design objectives, the following four issues were focused on [26, 27]:

- 1) the responsiveness of the façade with the environment, which, combined with the software, was to enable the real activity of this giant ‘monitor’ – a media wall that was intended to stimulate Beijing's art community and create an artwork that changes through its audience;
- 2) the energy self-sufficiency of the entire building thanks to a façade that had a distinctly southern exposure;
- 3) consideration of local seismic requirements;
- 4) the flexibility of the use of the façade, which, while maintaining the efficiency of the photovoltaic cells in combination with numerous LED modules, would provide the possibility of ventilation and illumination of the interior of the building.

The designers succeeded in meeting all of these objectives and the building became an example of energy efficiency, where the photovoltaic panels absorbed as much as twice as much solar energy as the luminous façade consumed [28]. This was possible because the architects at Simon Giostra & Partners, together with Arup and in collaboration with Schuco International KG and SunWays AG, developed a new



**Photo 2. Green-Pix Zero Energy Media Wall, design and concept of the facade behavior in the day and night**

*Photo: author archive (compilation based on <https://segd.org/projects/greenpix-zeroenergy-media-wall-0/> & [http://sgp-a.com/sgp-a/wp-content/uploads/2012/07/a21\\_greenpix\\_pressrelease\\_en\\_rev.pdf](http://sgp-a.com/sgp-a/wp-content/uploads/2012/07/a21_greenpix_pressrelease_en_rev.pdf))*

*Fot. 2. Green-Pix Zero Energy Media Wall, projekt oraz zasada działania fasady w dzień i w nocy*

*Fot. archiwum autora (opracowanie własne na podstawie <https://segd.org/projects/greenpix-zero-energy-media-wall-0/> i [http://sgp-a.com/sgp-a/wp-content/uploads/2012/07/a21\\_greenpix\\_press-release\\_en\\_rev.pdf](http://sgp-a.com/sgp-a/wp-content/uploads/2012/07/a21_greenpix_press-release_en_rev.pdf))*

technologie otwierają drogę do nowych form, nadając kształt temu, co dotychczas było jedynie domeną czystej wyobraźni. Wyobraźnia wsparta technologią LED umożliwiła stworzenie pierwszej świecącej tapety, którą można zwyczajnie włączać i wyłączać, jak każdą inną lampę, przyciemnić lub zmienić wzór i kolory, aby dopasować się do każdego nastroju [24].

Drugim z omawianych przykładów jest **GreenPix – Zero Energy Media Wall**, czyli ściana kurtynowa budynku Xicui w Pekinie. Obiekt został zaprojektowany przez amerykańską pracownię architektoniczną Simone Giostra & Partners Architects w 2005 r. i oddany do użytkowania w 2008 r. Z formalnego punktu widzenia projekt sprowadzony został do przetworzenia fasady w największy współczesny wyświetlacz LED o powierzchni 2200 m<sup>2</sup>, a zarazem pierwszy tak duży fotowoltaiczny system zintegrowany ze szklaną ścianą osłonową (fotografia 2). Fasada, jak podaje Arup, będący wykonawcą oświetlenia, to swoisty ekran składający się z 2292 kolorowych modułów utworzonych na bazie diod świecących, które są rozciągnięte na wysokość 33 m i szerokość 60 m [25]. Dwa najważniejsze wyzwania technologiczne ogniskowały się na responsywności tego ekranu względem otaczającego środowiska, przy jednoczesnym zapewnieniu samowystarczalności energetycznej całego obiektu. Pierwsze z założeń wiązało się z opracowaniem specjalnego oprogramowania, które przekształcało zwykły ekran LED w „inteligentną skórę” – interaktywną platformę do zamieszczania wydarzeń i projekcji artystycznych, co umożliwiałoby wchodzenie w interakcję z przestrzenią publiczną i użytkownikami. Zagadnienie to miało zapewnić rozrywkę i zaangażowanie społeczności lokalnych. Drugie z wyzwań, dotyczące samowystarczalności, było znacznie trudniejsze i zakładało stworzenie budynku, który absorbowałby energię słoneczną podczas dnia i używał jej do późniejszej iluminacji, a dodatkowo, jak chciał Simon Giostra, wyświetlacz miałby wizualnie reagować i odzwierciedlać naturalne cykle dnia. W celu spełnienia tych założeń projektowych skoncentrowano się na czterech następujących zagadnieniach [26, 27]:

- 1) responsywności fasady ze środowiskiem, co w połączeniu z oprogramowaniem, miało umożliwiać realną działalność tego gigantycznego „monitora” – ściany medialnej, która w swym zamierzeniu miała pobudzić społeczność artystyczną Pekinu i stworzyć dzieło sztuki zmieniające się za sprawą publiczności;
- 2) samowystarczalności energetycznej całego budynku dzięki fasadzie, która miała wyraźnie południową ekspozycję;
- 3) uwzględnieniu lokalnych wymagań sejsmicznych;
- 4) elastyczności użytkowania fasady, która przy jednoczesnym zachowaniu wydajności ogniw fotowoltaicznych w połączeniu z licznymi modułami LED dawałaby możliwość wentylacji oraz doświetlenia wnętrza budynku.

technology for laminating photovoltaic cells into the glass curtain wall of the building, integrating them with LED modules. In order to provide an adequate level of daylight in the interior spaces, it was proposed that the photovoltaic cells be combined with translucent glass cover panels according to the principle of three levels of density: 0-12-24 cells per panel. This ‘composition’ avoids the tedious homogeneity of the façade detail and solves the problem of the visual clash between the cells and the night-time illumination, achieving instead an ornamental effect reminiscent of monitor pixels. As the design team points out, this innovative solution also ensured that the penetration of natural light into the building was controlled, converting excess solar radiation into the energy required for the wall-monitor to function [29, 30].

**Summary**

Over the past decade or so, there has been a huge leap in the quality of lighting technology, which has forced a redefinition of the concepts of luminous efficiency, durability, usability and aesthetic effects possible with LED technology.

At the same time, the boundaries of what is possible in architectural lighting have shifted. The examples cited in the article demonstrated concrete technological solutions that until recently were inaccessible to designers and contractors. As a conclusion to the article, let us use a table comparing the most important aspects of the innovations undertaken in the two examples discussed.

**Aspects of LED innovation**  
*Aspekty innowacyjności LED*

Aspects of LED innovation/Aspekty innowacyjności	LED Wallpaper	Green Pix Media Wall
Prototype demonstration/Prototypowa demonstracja	■	
Commercialized product/existing building/Produkt skomercjalizowany/istniejący budynek	■	■
Energy savings/Energooszczędność	■	■
Energy self-sufficiency/Samowystarczalność energetyczna		■
Energy production /Produkcja energii		■
Use of easily recyclable materials/Zastosowanie materiałów łatwo przetwarzalnych	■	
External application/Zastosowanie zewnętrzne		■
Internal application/Zastosowanie wewnętrzne	■	
Interactivity/Interaktywność		■
Visual comfort for users/Komfort wizualny użytkownika	■	■
Flexibility/mobility of the application/Elastyczność/mobilność zastosowania	■	
Possibility of transformation/Możliwość przekształcania	■	
Accessibility and ease of installation/Dostępność i łatwość montażu	■	
High level of technological complexity/Wysoki poziom skomplikowania technologicznego	■	■
Breakthrough innovation for the industry/Innowacja przełomowa dla dziedziny	■	■

Projektantom udało się spełnić wszystkie wymienione założenia, a budynek stał się przykładem efektywności energetycznej, gdzie panele fotowoltaiczne absorbowały aż dwa razy więcej energii słonecznej, niż zużywała świecąca fasada [28]. Było to możliwe, ponieważ architekci z Simon Giostra & Partners wspólnie z Arup oraz we współpracy z Schüco International KG i SunWays AG opracowali nową technologię laminowania ogniw fotowoltaicznych w szklanej ścianie osłonowej budynku, integrując je z modułami LED. W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu doświetlenia wewnętrznych pomieszczeń podczas dnia, zaproponowano, aby ogniw fotowoltaiczne zespolić z półprzezroczystymi szklanymi panelami osłonowymi zgodnie z zasadą trzech poziomów zagęszczenia: 0-12-24 sztuki ogniw na panel. Dzięki takiemu „kompozycyjnemu” zabiegowi uniknięto nużącej jednorodności detalu fasady, rozwiązano problem kolizji wizualnej ogniw z nocną iluminacją, uzyskując w zamian efekt ornamentu przywodzącego na myśl piksele monitora. Jak podkreśla zespół projektowy, to innowacyjne rozwiązanie zapewniło również kontrolę nad penetracją wnętrza budynku przez światło naturalne, przekształcając nadmiar promieniowania słonecznego w energię niezbędną do funkcjonowania ściany – monitora [29, 30].

**Podsumowanie**

Na przestrzeni kilkunastu lat nastąpił ogromny skok jakości technik oświetleniowych, który wymusił zdefiniowanie na nowo pojęcia wydajności świetlnej, trwałości, użytkowości i efektów estetycznych możliwych do osiągnięcia dzięki technologii LED. Jednocześnie przesunęły się granice tego, co jest w oświetleniu architektonicznym możliwe. Przytoczone w artykule przykłady pokazały konkretne rozwiązania technologiczne, które

jeszcze do niedawna były niedostępne dla projektantów i wykonawców. Jako podsumowanie artykułu niech posłuży tabela zestawiająca najważniejsze aspekty innowacji podjętych w obu omawianych przykładach.

Received: 23.12.2023  
Revised: 24.05.2024

Wpłynął do redakcji: 23.12.2023 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 24.05.2024 r.

**Literature**

[1] OECD. Podręcznik Frascati 2002. Proponowane procedury standardowe dla badań statystycznych w zakresie działalności badawczo-rozwojowej. Warszawa: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego; 2010.

[2] PE. Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 05.04.2006 r.  
[3] KWE. Rozporządzenie Komisji (WE) nr 244/2009 z 18.03.2009r.  
[4] Żagan W. (red.). LED-y w technice świetlnej. Wydanie 1. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2019.



- [5] Peláez EA, Villegas ER. LED power reduction trade-offs for ambulatory pulse oximetry. W: 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2007. DOI: 10.1109/IEMBS.2007.4352784.
- [6] Bochińska B, Palczewska I. Diagnoza stanu wzornictwa. Wydanie 1. Warszawa, Instytut Wzornictwa Przemysłowego; 2008.
- [7] Jackson D. SuperLux. Smart Light Art, Design & Architecture for Cities. 1st ed. London: Thames & Hudson. 2015.
- [8] Davoudian N. (ed.). Urban Lighting for People: Evidence-Based Lighting Design for the Built. 1st ed. London: RIBA. 2019.
- [9] Lagarnier V, van der Pol J. Light&Emotion. Exploring Lighting Cultures. 47 Conversations with lighting designers. 1st ed. Philips: Koninklijke Philips Electronics N. V.; 2009.
- [10] Swan KR. Sir Joseph Swan and the Invention of the incandescent electric lamp. 1st ed. London: Longmans, Green and Co.; 1946.
- [11] Friedel R., Israel P. Edison's Electric Light: The Art of Invention. 1st ed. Baltimore: The Johns Hopkins University Press; 2010.
- [12] <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/Langmuir-Irving;3930491.html> (dostęp 22.03.2023).
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Centennial\\_Light](https://en.wikipedia.org/wiki/Centennial_Light) (dostęp 22.03.2023).
- [14] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia\\_wodna\\_Struga](https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_wodna_Struga) (dostęp 01.12.2023).
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Oleg\\_Losev](https://en.wikipedia.org/wiki/Oleg_Losev) (dostęp: 01.12.2023).
- [16] Losev OV. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals. W: Philosophical Magazine. 7th series. 5. 1928. DOI: 10.1080/14786441108564683.
- [17] Zheludev N. The life and times of the LED – a 100-year history; Nature Photonics, Volume 1. 2007. DOI: 10.1038/nphoton.2007.34.
- [18] Moholy-Nagy L. Kino symultaniczne albo polikino. W: Iluzjon, nr 1; 1986.
- [19] Bor Z. Optics by Hungarians. W: FizikaiSzemle 1999/5. 202. o. Szeged: József Attila University; 1999.
- [20] Touchstone LA. Nick Holonyak Jr., pioneer of LED lighting, dies. W: <https://news.illinois.edu/view/6367/1920044460> (dostęp: 01.12.2023).
- [21] Wong L, After Dark, 1st ed. London: Thames & Hudson; 2022
- [22] Heinzerling D, Schiavon S, Webster T, Arens E. Indoor environmental quality assessment models: A literature review and a proposed weighting and classification scheme. W: Building and Environment. 2013; DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.027.
- [23] <https://materialdistrict.com/material/led-wallpaper/> (dostęp: 01.12.2023).
- [24] Achramowicz R, Lorens A. Architektura a design w XXI wieku. Wybrane zagadnienia z interdyscyplinarnej praktyki projektowej. Wydanie 1. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2021.
- [25] <https://www.arup.com/projects/greenpix-zero-energy-media-wall> (dostęp: 01.12.2023).
- [26] <https://www.archdaily.com/245/greenpix-zero-energy-media-wall> (dostęp: 01.12.2023).
- [27] [https://www.archiportale.com/news/2008/05/architettura/greenpix-zero-energy-media-wall\\_11791\\_3.html](https://www.archiportale.com/news/2008/05/architettura/greenpix-zero-energy-media-wall_11791_3.html) (dostęp: 01.12.2023).
- [28] [https://tu1403.eu/wp-content/uploads/Vol-3-1\\_for-web-Open-Access-9789463661102.pdf](https://tu1403.eu/wp-content/uploads/Vol-3-1_for-web-Open-Access-9789463661102.pdf) (dostęp: 01.12.2023).
- [29] [http://sgp-a.com/sgp-a/wp-content/uploads/2012/07/a21\\_greenpix\\_press-release\\_en\\_rev.pdf](http://sgp-a.com/sgp-a/wp-content/uploads/2012/07/a21_greenpix_press-release_en_rev.pdf)(dostęp: 01.12.2023).
- [30] <https://segd.org/projects/greenpix-zero-energy-media-wall-0/> (dostęp: 01.12.2023).