

doi:10.15199/48.2022.10.54.

Ogniwa słoneczne na każdą pogodę – możliwości i perspektywy

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję hybrydowego systemu ogniw słonecznych zwanych ogniwami słonecznymi na każdą pogodę, składającego się z modułu fotowoltaicznego wzbogaconego o urządzenie piezoelektryczne, tryboelektryczne lub magazyn fotoelektronów. Ze względu na drastyczne globalne zmiany klimatyczne tradycyjne urządzenia do pozyskiwania energii wykorzystujące wyłącznie energię słoneczną stają się mniej efektywne, stąd potrzeba przeprojektowania systemów generowania energii z różnych źródeł w jednym urządzeniu.

Abstract. This article describes the concept of a hybrid solar cell system, known as an all-weather solar cell, consisting of a photovoltaic module enriched with piezoelectric, triboelectric or photoelectron storage devices. Drastic global climate change, forces a construction update of traditional solar energy harvesters due to decrease of its efficiency, hence the need to redesign energy generation systems to combine different harvesting technologies in one device. (**Any-weather solar cells – possibilities and prospective applications**).

Słowa kluczowe: zielona energia; generatory energii; urządzenie piezoelektryczne; urządzenie tryboelektryczne; magazyny fotoelektronów.

Keywords: green energy; energy generators; piezoelectric device; triboelectric device; photoelectron storage devices.

Wstęp

W związku z rozwojem cywilizacyjnym i dostępem do coraz to bardziej nowoczesnej technologii, jak i wzrostem standardów życia zwiększa się zużycie energii. W takiej sytuacji dobrym rozwiązaniem mogą okazać się zdecentralizowane systemy energetyczne, zwiększające liczbę indywidualnych producentów. Rosnące zainteresowanie energią odnawialną jest odpowiedzią na ciągły wzrost populacji na świecie i obawy o zachowanie środowiska naturalnego. Jako przykład nisko- lub zeroemisyjnych źródeł energii podaje się technologię fotowoltaiczną, która do generowania prądu elektrycznego wykorzystuje promieniowanie słoneczne.

Aktualne wyzwania stawiane systemom fotowoltaicznym są związane głównie z redukcją kosztów wytwarzania paneli i zwiększeniem wydajności konwersji światła słonecznego na energię [1–3]. Istotnymi elementami mającymi wpływ na wydajność systemów bazujących na zamianie energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną są: położenie geograficzne, zachmurzenie, temperatura, opady oraz całkowita ekspozycja danego panelu/miejsca na światło [4].

Aby sprostać rosnącemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną stworzono koncepcję „ogniwa słonecznego na każdą pogodę” – urządzenia zdolnego do generowania energii zarówno ze słońca, jak i deszczu, poprzez uwzględnienie dodatkowej warstwy na górnej powierzchni panelu słonecznego [5,6]. Możliwość pozyskiwania energii z deszczu, który jest najczęstszym zjawiskiem atmosferycznym występującym na kuli ziemskiej nad zwrótnikiem Raka i Koziarocza staje się coraz częstszym obiektem badań. Początkowo idea pozyskiwania energii z kropli deszczu miała służyć dostarczeniu zasilania do małych urządzeń zużywających niewiele energii [7], poza konwersją sił elektrostatycznych w energię została poszerzona o możliwość konwersji energii wibracji mechanicznych oraz fali akustycznej w połączeniu z technologią paneli słonecznych. Przykładem urządzeń tego typu są urządzenia piezoelektryczne [8, 9], czy też piezoelektryczne/tryboelektryczne, a także elektromagnetyczne [10, 11].

Kolejną ciekawą koncepcją są ogniwa słoneczne na każdą pogodę, zdolne do gromadzenia energii słonecznej z szerszego zakresu spektralnego (poza długościami fali wykorzystywanymi przez panele bezpośrednio) w ciągu dnia i emisji światła podczas okresów zaciemnienia przy użyciu wbudowanych luminoforów o długotrwałej poświacie. Związki te pochłaniają specyficzną długość fali światła w

godzinach słonecznych, a następnie w okresie bezsłonecznym emitują fluorescencję o długości fali odpowiedniej dla pracy paneli fotowoltaicznych [12].

W ramach niniejszego artykułu przedstawiono różne technologie, które mogą posłużyć do konstrukcji tytułowych ogniw na każdą pogodę, zwiększających ogólną produkcję energii, ze szczególnym naciskiem na:

- urządzenia piezoelektryczne;
- urządzenia tryboelektryczne;
- magazynowanie fotoelektronów w luminoforach o długotrwałej poświacie.

Koncepcje ogniwa słonecznego na każdą pogodę przedstawiono w sposób schematyczny na Rysunku 1.

Urządzenia piezoelektryczne

Zjawisko piezoelektryczne polega na wykorzystaniu ruchu obiektów takich jak krople deszczu (uderzenie, rozpryskanie się, odbijanie i rozprzestrzenianie się) do konwersji energii mechanicznej na energię elektryczną. Urządzenie tego typu składa się ze wspornika zbudowanego z przynajmniej trzech warstw: dwóch elektrod oddzielonych nieorganicznym materiałem piezoelektrycznym, np. tytanianem cyrkonowo-olowiowym, tytanianem baru lub też materiałem organicznym, jak w przypadku ferroelektryków polimerowych. Taki układ powoduje polaryzację ładunków dodatnich i ujemnych pomiędzy elektrodami a warstwą piezoelektryka. Kropla uderzająca o powierzchnię powoduje miejscową koncentrację ładunków na powierzchni elektrody powodując przemieszczanie się ładunków. Po spłynięciu kropli ładunki zostają uwolnione i następuje powrót do poprzedniego stanu.

Najważniejszą zaletą tej technologii jest przede wszystkim prostota wykonania. Ponadto grubość zastosowanych warstw jest rzędu mikrometrów dzięki temu urządzenia są lekkie i nie zwiększają masy całego systemu.

Wadą tego rozwiązania jest ilość uzyskanych energii, które zależą głównie od wielkości kropli, intensywności opadów oraz możliwości wystąpienia dezaktywacji urządzenia w wyniku pokrycia elektrody cienką warstwą wody. Najlepszy wynik dla urządzenia piezoelektrycznego pozwolił na pozyskiwanie energii równej: $213 \mu\text{W cm}^{-2}$ ($2076 \mu\text{J}$) przy napięciu $7,6 \text{ V}$ [13].

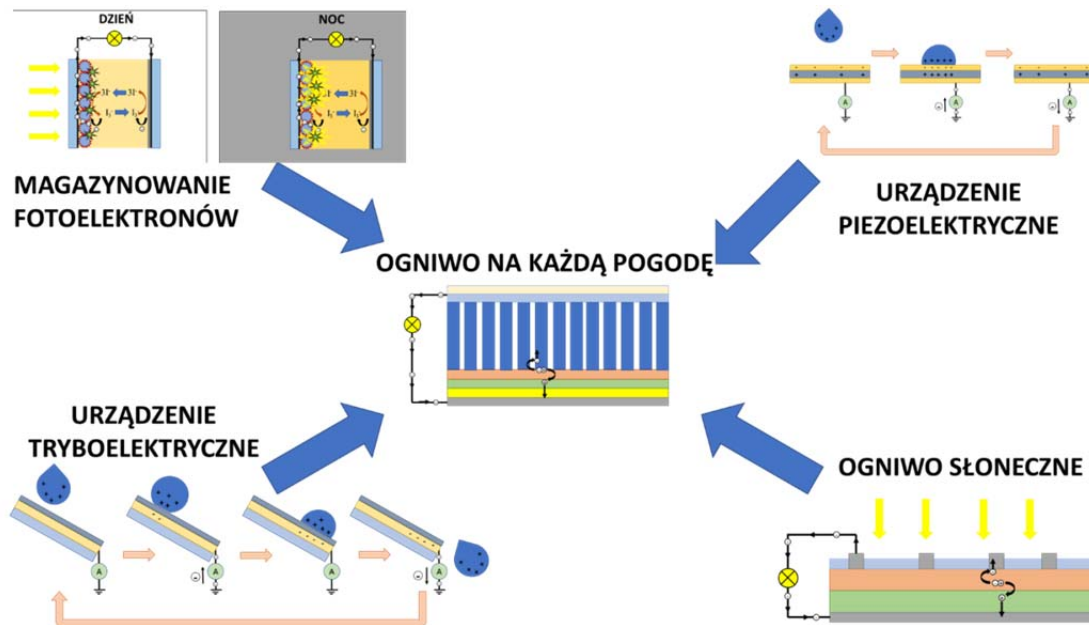
Urządzenia tryboelektryczne

Inną technologią zdolną pozyskać energię elektryczną z deszczu prezentują urządzenia tryboelektryczne, które zbudowane są z podłoża, na które nakładają się elektrody

pokrytą warstwą hydrofobową. Mechanizm generowania energii bazuje na przenoszeniu ładunku elektrostatycznego poprzez kroplę poruszającą się po powierzchni hydrofobowej. W momencie kontaktu kropli z warstwą hydrofobową dochodzi do polaryzacji warstwy, która przemieszcza się wraz z kroplą.

Istotną zaletą tej technologii jest wykorzystanie materiałów przeziernych, które nakładać można niemal na dowolną powierzchnię.

Niestety wadą technologii tryboelektrycznej jest obecność jonów w wodzie opadowej, gdyż to one wytwarzają ładunek elektrostatyczny. Najlepszy wynik dla urządzenia tryboelektrycznego pozwolił na pozyskiwanie energii równej: $1,156 \mu\text{W cm}^{-2}$ przy napięciu $10,0 \text{ V}$ i prądzie $2 \mu\text{A cm}^{-2}$ [14].



Rys. 1. Schemat koncepcji ogniwa na każdą pogodę

Magazynowanie fotoelektronów w luminoforach o długotrwałej poświacie

Szczególnie przydatnymi cechami luminoforów są zdolność przechowywania fotoelektronów oraz wykazujących fosforescencję o długim czasie emisji. Zjawisko fosforescencji pozwala na emisję promieniowania z zakresu UV, Vis lub NIR w wyniku wzbudzenia odpowiednim promieniowaniem. Do materiałów tej grupy zaliczają się różne kompozycje m.in. tlenków i siarczków z dodatkiem jonów metali ziem rzadkich. Różnorodność dostępnych kombinacji daje możliwość niemal dowolnej modyfikacji zakresów promieniowania wzbudzającego oraz otrzymanego efektu fosforescencji w wybranym zakresie. Luminofory stosuje się głównie jako elementy dekoracyjne, w wyświetlaczach oraz indykatory w biomedycynie, naukach przyrodniczych czy też energetyce.

Mechanizm funkcjonowania efektu fosforescencji i magazynowania fotoelektronów przebiega w następujących etapach:

- Pobudzenie nośnika promieniowaniem o odpowiedniej długości fali;
- Przechowanie wzbudzonego nośnika (pułapka fotonowa);
- Uwolnienie energii z nośnika i rekombinacja ładunków.

Efektywność do przechowywania wzbudzonego nośnika w pułapce fotonowej zależy głównie od koncentracji pułapek, ich głębokości oraz rodzaju.

Obecnie badania nad związkami o właściwościach fosforescencyjnych opisują niezwykle różnorodność w syntezie nowych luminoforów z różnymi aktywatorami, matrycami i pasmami emisji-wzbudzenia (UV-VIS-NIR), idąc na przeciw oczekiwaniom aplikacyjnym. Istotnymi aspektami w projektowaniu nowych kombinacji luminoforów

jest odpowiednia konfiguracja pasma elektronowego oraz zastosowanie zastosowana teoria pasmowa i redoks. Skutkuje to zrozumieniem relacji pomiędzy komponentami, strukturą a właściwościami. Wychwytywanie odpowiednich fotonów obejmuje analizę typów pułapek fotonowych odpowiadających defektom sieci krystalicznej.

Zaletą magazynowania fotonów jest to, że można przygotować luminofory, które są „szyte na miarę”, co oznacza, że parametry dobrane są tak aby najlepiej odpowiadały danemu zastosowaniu.

Niestety słabą stroną luminoforów jest możliwość zastosowania ich tylko w ogniwach słonecznych, które wykazują duży poziom przezierności, gdyż najlepiej stosować warstwę magazynowania fotoelektronów jako warstwę spodnią ogniwa.

Możliwości i perspektywy

W celu wytworzenia energii zarówno ze światła słonecznego, jak i energii opadów deszczu w literaturze opisano strukturę łączącą urządzenie tryboelektryczne z ogniwem słonecznym. Elektrode wykonano z folii poli(3,4-etylenodiosioksyfien): poli(styrenosulfonian) (PEDOT:PSS). Została ona wprowadzona do heterozłącza krzemowego (Si) ogniwa słonecznego zintegrowanego z urządzeniem tryboelektrycznym. PEDOT:PSS zastosowano do zwiększenia gęstości prądu zwarciovego.

Nadrukowany polidimetylosiloksan (PDMS) posłużył jako materiał tryboelektryczny, natomiast elektrodę stanowiła warstwa PEDOT:PSS. Wydajność tego urządzenia została znacznie poprawiona poprzez większy obszar kontaktu między kroplą deszczu a nadrukowanym PDMS. Uzyskane wartości generowanego prądu wyniosły ok. $33,0 \text{ nA}$ dla prądu zwarciovego i ok. $2,14 \text{ V}$ dla napięcia w obwodzie otwartym [10]. Aby zwiększyć wydajność

układu hybrydowego ogniwo słoneczne/ warstwa tryboelektryczna wymagana jest jednak jego dalsza modyfikacją. W tym celu zastosowano warstwę blokującą dziury i warstwę antyodbiciową, którą uzyskano poprzez modyfikację strukturalną PEDOT:PSS – składnika warstwy tryboelektrycznej, teksturowanie powierzchni warstwy krzemowej oraz pasywację.

Kolejna propozycja układu hybrydowego zakłada zastosowanie prasowanego na gorąco grafenu na tylną stronę podłoża z politereftalanu etylenu z warstwą tlenku indowo-cynowego (ITO). Na warstwie ITO zbudowano zmodyfikowane barwnikowe ogniwo słoneczne. Ze względu na zawartość soli w kroplach deszczu, krople spadając na powierzchnię grafenu docierają na obrzeże i na styku kropli deszczu i grafenu tworzy się dwuwarstwowy pseudokondensator (EDL). Kurcząca się kropla uwalnia elektrony do grafenu, ładując w ten sposób pseudokondensator. W czasie badań prowadzonych z użyciem kwaśnego deszczu, wysunięto hipotezę, że ogniwo słoneczne z warstwą tryboelektryczną powinno dawać wyższe sygnały prądowe i napięciowe ze względu na większe stężenie jonów w deszczu tego rodzaju. Pomimo obiecujących wyników energia elektryczna wytwarzana z samego deszczu jest znacznie niższa od wymaganej w praktycznych zastosowaniach, dlatego konieczna będzie dalsza optymalizacja układu. W przedstawionej propozycji nie użyto zwykle stosowanego w ogniwach słonecznych podłoża szklanego z fluorowanym tlenku cyny (FTO), ze względu na kruchość szkła, choć nie wyklucza to zastosowania FTO w układach ogniw słonecznych na każdą pogodę innego rodzaju.

Celem połączenia fotowoltaiki (konwersji energii słonecznej) z innym rodzajem konwersji energii pozwalającej na pracę układu nie tylko w czasie słonecznych dni, ale i w nocy czy też warunkach ograniczonego nasłonecznienia (np. we mgle) grupa naukowców pod przewodnictwem profesora Tenga wytworzyła ogniwo słoneczne na każdą pogodę z użyciem luminoforów. Na fotoanodę nanieśli oni m-TiO₂ służący jako podłoże dla luminoforu. Jak już wcześniej wspomniano, luminofory charakteryzują się zdolnością do gromadzenia energii światła ultrafioletowego i/lub widzialnego, a następnie fosforescencję w zakresie widzialnym w temperaturze pokojowej bez konieczności dalszego naświetlania. Barwnikowe ogniwo słoneczne to ogniwo słoneczne trzeciej generacji składające się z impregnowanej barwnikiem fotoanody, elektrolitu w postaci układu redoks I⁻/I₃⁻ i wykonanej z platyny przeciwelektrody. Stwierdzono, że tak skonstruowane ogniwo referencyjne miało charakterystykę fotowoltaiczną o wydajności na poziomie 8,08%. Zastosowanie modyfikacji fotoanody poprzez dodanie luminoforu o barwie fioletowej, niebieskiej, szarobłękitnej (cyjan), zielonej, czerwonej lub białej skutkowało w najlepszym przypadku zwiększeniem wydajności do 10,08%, gdy porówna się ogniwa słoneczne z i bez luminoforu, oraz biorąc pod uwagę działanie słońca i fosforescencji [5].

Podsumowując koncepcja ogniw słonecznych na każdą pogodę, w których energię uzyskuje się zarówno z opadów deszczu, jak i energii słonecznej lub w emisji pochłoniętej energii jest ciekawym pomysłem, który może zwiększyć wydajność obecnie stosowanych ogniw słonecznych. Układy z modułami przetwarzającymi energię deszczu mogą stać się szczególnie korzystną opcją na obszarach, gdzie występują intensywne opady deszczu. Co więcej, w przeciwieństwie do energii słonecznej niewyczerpalne źródła energii związane z wodą z wodospadów, deszczową i falami oceanicznymi nie są ograniczone porą dnia, pogodą czy też klimatem. Trudno jest dokładnie porównać

poszczególne metody konwersji energii z wielorakich jej źródeł, ponieważ wielkość generowanej energii różni się znacząco.

Pod względem budowy układów generującym energię z deszczu zwrócono już uwagę, jak niezwykle istotną kwestią jest architektura samego urządzenia. Prosta membrana PVDF może wytwarzać bardzo małą ilość energii, rzędu 10⁻¹⁹ μW cm⁻², jednakże może ona być jednocześnie używana w połączeniu z innymi materiałami. Bardziej zoptymalizowane urządzenia dawały pozytywne wyniki albo pod względem uzyskiwanego potencjału (około 7V), albo akceptowalnej gęstości mocy – rzędu 213 μWcm⁻². Interesujące jest zastosowanie bardziej szeroko zakrojonego podejścia do pozyskiwania energii mechanicznej, uwzględniającego zwłaszcza elewację budynku, gdzie energię generowałyby nie tylko padające krople deszczu, ale także wibracje powodowane wiatrem. W zależności od architektury urządzenia, kąta nachylenia i składu chemicznego kropli deszczu układy tryboelektryczne dawała wartości rzędu jednego μWcm⁻². Porównując energię pozyskiwaną z deszczu w sposób mechaniczny lub elektrostatyczny można zauważyć, że siła mechaniczna dawała większy uzysk niż siły elektrostatyczne. Widać na tym przykładzie, że jeśli chodzi o energię zjawisk naturalnych, takich jak opady, poziom konwersji energii jest dowodem na to, że technologie te na razie nie mogą służyć jako główne źródło energii, ale można je wykorzystywać do obsługi innych urządzeń, takich jak panele słoneczne. Na chwilę obecną technologie te są w stanie zwiększać gromadzoną energię jedynie w ograniczonym stopniu. Ponadto poli(tetrafluoroetylenopolimer, PTFE) materiał charakteryzujący się jednocześnie niską stałą dielektryczną, niskim współczynnikiem tarcia, wysoką wytrzymałością mechaniczną, wysoką stabilnością i doskonałą plastycznością, można z łatwością stosować do budowy ogniw słonecznych na każdą pogodę.

Inną potencjalną technologią jest magazynowanie fotoelektronów, które zakłada, że część światła o określonej długości fali może zostać pochłonięta przez materiał luminoforowy, a następnie wyemitować promieniowanie o długości fali odpowiedniej do generowania prądu przez materiał fotoaktywny. Jeśli weźmiemy pod uwagę luminofory jako dodatkowy komponent konwencjonalnych ogniw słonecznych, uzyska się ogromne możliwości projektowania i przygotowania materiału dostosowanego do konkretnego połączenia materiałów fotoaktywnych stosowanych w urządzeniu fotowoltaicznym. Ponadto różnorodność metod syntezy luminoforów w stanie stałym pozwala na wykorzystanie znanej i taniej technologii do wytwarzania tychże materiałów. Największym wyzwaniem w stosowaniu luminoforów jest synchronizacja ich z zakresem absorpcji barwnika fotoaktywnego ogniwa słonecznego. Do tego jednak wystarczy zebrać niewykorzystane fragmenty widma światła i przekształcić je w określone pasmo światła (fosforescencja), z którego ogniwo fotowoltaiczne może korzystać podczas słabego nasłonecznienia lub braku światła słonecznego. W przypadku najczęściej stosowanych materiałów fotoaktywnych pasmo absorpcji warstwy aktywnej wynosi 350–820 nm, więc najlepszym materiałem LLP byłby Lu₂O₃ aktywowany Tb³⁺ i domieszkowany Ca²⁺, Sr²⁺ wzbudzany przy 254 nm i zapewniający ok. 20–30 h fosforescencji przy fali długości 543 nm. Parametry te doskonale pasują do materiałów występujących w organicznych konstrukcjach fotowoltaicznych takich jak P3HT czy PCDTBT, dla których maksimum absorpcji znajduje się pomiędzy 520 i 560 nm.

Innym materiałem, który stosować można w ogniwach słonecznych na każdą pogodę, jest grafen ze wszystkimi jego odmianami oraz modyfikacjami. Wprowadzenie

elektrod grafenowych, w których generowanie energii zachodzi zarówno pod wpływem kropli deszczu, jak i energii słonecznej, zwiększa współczynnik konwersji energii słonecznej na elektryczną do 22%.

Konkludując, ogniwa słoneczne na każdą pogodę to trend przyszłości, który powinien coraz częściej stawać się obiektem badań, gdyż w pewnym momencie naukowcy osiągną górną granicę konwersji światła słonecznego na energię elektryczną i aby zaspokoić rosnące zapotrzebowanie na ten typ energii będą oni musieli połączyć różne technologie pozyskiwania energii do tworzenia systemów hybrydowych.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych” otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe”.
(Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/NCBR/2018).

Autorzy: dr Krzysztof A. BOGDANOWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl.

LITERATURA

- [1] Lamnatou, C.; Chemisana, D.; Cristofari, C. Smart grids and smart technologies in relation to photovoltaics, storage systems, buildings and the environment. *Renewable Energy*, 185 (2022), 1376-1391
- [2] Moreno Escobar, J.J.; Morales Matamoros, O.; Tejeida Padilla, R.; Lina Reyes, I.; Quintana Espinosa, H. A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities. *Sensors* (2021), 21, 6978.
- [3] Sansaniwal, S.K.; Sharma, V.; Mathur, J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2018), 82, 1576–1601.
- [4] Della Ceca, L.S.; Micheletti, M.I.; Freire, M.; Garcia, B.; Mancilla, A.; Salum, G.M.; Crinó, E.; Piacentini, R.D. Solar and Climatic High Performance Factors for the Placement of Solar Power Plants in Argentina Andes Sites—Comparison With African and Asian Sites. *J. Sol. Energy Eng.* (2019), 141, 041004.
- [5] Tang, Q.; Wang, X.; Yang, P.; He, B. A Solar Cell That Is Triggered by Sun and Rain. *Angew. Chem. Int. Ed.* (2016), 55, 5243–5246.
- [6] Tang, Q. Frontispiece: All-Weather Solar Cells: A Rising Photovoltaic Revolution. *Chem. A Eur. J.* (2017), 23.
- [7] Guigon, R.; Chaillout, J.-J.; Jager, T.; Despesse, G. Harvesting raindrop energy: Experimental study. *Smart Mater. Struct.* (2008), 17.
- [8] Kim, H.; Kim, S.M.; Son, H.; Kim, H.; Park, B.; Ku, J.; Sohn, J.I.; Im, K.; Jang, J.E.; Park, J.-J.; et al. Enhancement of piezoelectricity via electrostatic effects on a textile platform. *Energy Environ. Sci.* (2012), 5, 8932.
- [9] Yang, Z.; Zhou, S.; Zu, J.; Inman, D. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. *Joule* (2018), 2, 642-697.
- [10] Han, M.; Zhang, X.-S.; Sun, X.; Meng, B.; Liu, W.; Zhang, H. Magnetic-assisted triboelectric nanogenerators as self-powered visualized omnidirectional tilt sensing system. *Sci. Rep.* (2014), 4, 4811.
- [11] Yang, H.; Fan, F.R.; Xi, Y.; Wu, W. Design and engineering of high-performance triboelectric nanogenerator for ubiquitous unattended devices. *EcoMat.* (2021), 3:e12093.
- [12] Tang, Q.; Wang, J.; He, B.; Yang, P. Can dye-sensitized solar cells generate electricity in the dark? *Nano Energy* (2017), 33, 266–271.
- [13] Wong, V.-K.; Ho, J.-H.; Chai, A.-B. Performance of a piezoelectric energy harvester in actual rain. *Energy* 2017, 124, 364–371.
- [14] Liang, Q.; Yan, X.; Gu, Y.; Zhang, K.; Liang, M.; Lu, S.; Zheng, X.; Zhang, Y. Highly transparent triboelectric nanogenerator for harvesting water-related energy reinforced by antireflection coating. *Sci. Rep.* 2015, 5, 9080.