

Fotonika.pl – w którą stronę?
Stan obecny i perspektywy rozwoju
fotoniki w Polsce



**IV KONGRES
ELEKTRYKI POLSKIEJ**

ENERGETYKA JUTRA - BEZPIECZEŃSTWO POKOLEŃ

6-7 CZERWCA 2024 ENEA STADION POZNAŃ



**IV KONGRES
ELEKTRYKI POLSKIEJ**

ENERGETYKA JUTRA - BEZPIECZEŃSTWO POKOLEŃ

Fotonika.pl – w którą stronę?

Stan obecny i perspektywy rozwoju
fotoniki w Polsce

IV Kongres Elektryki Polskiej

materiały do dyskusji programowej w strumieniu FOTONIKA



**STOWARZYSZENIE ELEKTRYKÓW POLSKICH
POLSKI KOMITET OPTOELEKTRONIKI**

Spis treści

1. Wprowadzenie	4
2. Zaawansowane technologie elektroniki i fotoniki w pryzmacie wyzwań i zagrożeń współczesnego świata.....	5
3. Mapa centrów fonicznych w Polsce	14
4. Diamenty polskiej fotoniki – wybrane obszary kompetencji.....	15
5. Kierunki rozwoju i trendy - podsumowanie spotkań warsztatowych w programie „Fotonika.pl – which way further”	25
6. Podsumowanie i kierunki dalszych prac w programie	28
SUPLEMENT	30
S1. Otoczenie fotoniki - krajowe organizacje wspierające rozwój fotoniki.....	30
S2. Wybrane dokumenty strategiczne krajowe i europejskie o kluczowym znaczeniu dla strategii rozwoju fotoniki	34

1. Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie stanowi materiał wprowadzający do dyskusji programowej na temat roli i perspektyw, a także racjonalnej strategii rozwoju fotoniki w Polsce, uwzględniającej wielowektorowe zagrożenia, wyzwania i możliwości występujące we współczesnym świecie, oceniane i analizowane w kontekście szans dla środowiska akademickiego, naukowo-badawczego i przemysłu fotonicznego w Polsce.

Zakres opracowania obejmuje identyfikację kluczowych krajowych kompetencji optoelektronicznych widzianą w pryzmacie potencjału i potrzeb rynku fotonicznego (zarówno globalnego, jak i krajowego), analizę trendów i próbę zaproponowania kierunków rozwoju fotoniki w Polsce.

Tak zdefiniowany zakres pozwala w dalszej perspektywie myśleć o zaproponowaniu strategii rozwoju fotoniki w Polsce, wypracowanej w dyskusjach z szerokim środowiskiem uniwersyteckim, badawczym i przemysłowym, oraz prowadzenie skutecznych, bo wspólnych, działań lobbingowych na rzecz poszukiwania środków inwestycyjnych na rozwój technologii, produktów, przedsięwzięć biznesowych itp.

Działania zostały zainicjowane w roku 2023 przez Polski Komitet Optoelektroniki Stowarzyszenia Elektryków Polskich (PKOpto SEP), najstarszej polskiej organizacji branżowej z obszaru zaawansowanych technologii i prowadzone początkowo w ramach wewnętrznego programu „*Optoelectronics.pl – which way further?*”, zainicjowanego podczas konferencji *Integrated Optics - Sensors, Sensing Structures and Methods IOS 2023*, Szczyrk, 27.02-03.03.2023. Dialogi i spory prowadzone w kuluarach konferencji fotonicznych, regularne dyskusje panelowe prowadzone w ramach kolejnych konferencji (m.in. *XX Konferencja Światłowodów i ich zastosowania*, Lublin, 11-14.09.2023, *VIII Konferencja Optoelektroniczna*, Jachranka, 15-16.11.2023 oraz *Integrated Optics - Sensors, Sensing Structures and Methods IOS 2024*, Szczyrk, 26.02-01.03.2024,) pozwoliły na przygotowanie materiałów do ogólno-środowiskowej dyskusji programowej, która zostanie przeprowadzona w ramach **4 Kongresu Elektryki Polskiej, 6-7.06.2024, w Poznaniu** i podsumowana w uaktualnionej i rozszerzonej wersji raportu „Fotonika.pl – w którą stronę? Stan obecny i perspektywy rozwoju fotoniki w Polsce”.

Mamy ambicję, aby ten dokument miał charakter żywego, systematycznie uaktualnianego głosu całego środowiska fotonicznego, dlatego już dziś zapraszamy Państwa do włączenia się w prace nad tym opracowaniem poprzez przesyłanie sugestii, korygowanie błędów, dodawanie spostrzeżeń i uwag, słowem – współedytowanie treści.

Dla dobra i na rzecz rozwoju fotoniki w Polsce.

*Ryszard Piramidowicz, Maciej J. Nowakowski, Dominik Dorosz, Krzysztof Koczyński,
Paweł Merxo, Patryk Urban, Agnieszka Mossakowska-Wyżczyńska, Stanisław Stopiński, Krzysztof Anders*

2. Zaawansowane technologie elektroniki i fotoniki w pryzmacie wyzwań i zagrożeń współczesnego świata

XXI wiek to czas bezprecedensowego tempa rozwoju wszelkich technologii informacyjnych, naznaczony nieprzewidywalnymi zagrożeniami i wyzwaniami współczesnej cywilizacji, widzianymi szczególnie wyraźnie z perspektywy kraju stabilnego gospodarczo, jednak aspirującego do wyższego poziomu życia i szeroko rozumianego bezpieczeństwa. Szczególna lokalizacja geopolityczna Polski sprawia, że nasz kraj znajduje się w epicentrum wydarzeń, które wyznaczają kierunki zmian społecznych, gospodarczych i politycznych.



Rys. 1. Mapa megatrendów, wyzwań i zagrożeń współczesnego świata

Do największych zagrożeń współczesności należą zarówno pandemie i konflikty zbrojne, jak też wyzwania ekonomiczne oraz narastający kryzys klimatyczny. Dynamicznie zmieniające się czasy wymagają nowatorskiego podejścia, które zapewni przetrwanie i rozwój w warunkach wysokiej niepewności. Nie bez powodu rzeczywistość świata XXI wieku określana jest skrótem VUCA: Volatility (zmienność), Uncertainty (niepewność), Complexity (złożoność) i Ambiguity (niejednoznaczność). W tym kontekście zaawansowane technologie elektroniczne i fotoniczne odgrywają kluczową rolę, umożliwiając społeczeństwu lepsze zrozumienie, adaptację i reakcję na otoczenie zmieniające się z niespotykaną we wcześniejszych dekadach szybkością.

Zagrożenia Cywilizacyjne i Geopolityczne

Pandemia COVID-19 ukazała, jak bardzo globalizacja i współzależności międzynarodowe uczyniły naszą cywilizację podatną na gwałtowne wstrząsy o globalnym zasięgu. Przerwane łańcuchy dostaw, rozpięte wcześniej ponad granicami państw i kontynentów, ograniczenia w podróżach oraz napięcia społeczne wywołane pandemią zburzyły dotychczasowe poczucie stabilności. Dodatkowo, niewyobrażalna wcześniej pełnoskalowa wojna na Ukrainie, przypomniała Europie, że konflikty zbrojne na kontynencie nie są historią, lecz realnym zagrożeniem, wpływającym na bezpieczeństwo energetyczne, gospodarcze i militarne całego regionu.

Ekonomia i Geopolityka

Ekspansja gospodarcza Chin, której skutkiem jest kryzys na globalnym rynku półprzewodników, napięcia handlowe, zaburzenia globalnej gospodarki i inflacja to kolejne czynniki destabilizujące współczesną rzeczywistość. Sankcje ekonomiczne, zerwane łańcuchy dostaw, próby dywersyfikacji źródeł surowców naturalnych, w tym pierwiastków ziem rzadkich (EU Critical Raw Materials Act) zmuszają kraje do szukania nowych rozwiązań technologicznych. Polska, będąca członkiem Unii Europejskiej i NATO, staje przed wyzwaniem lepszego zintegrowania swojej gospodarki z międzynarodowymi łańcuchami dostaw oraz utrzymania stabilności w czasach narastających konfliktów geopolitycznych.

Kryzys Klimatyczny

Zmiany klimatyczne, manifestujące się w rosnących temperaturach średnich, topnieniu lodowców, zaburzeniu cyrkulacji prądów morskich i ekstremalnych zjawiskach pogodowych stanowią kolejne poważne zagrożenie dla współczesnej cywilizacji. Potrzeba pilnych działań na rzecz zrównoważonego rozwoju i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych jest obecnie priorytetem na skalę globalną, niemożliwym do zaadresowania bez zaangażowania i rozwoju zaawansowanych technologii energetycznych, w tym fotowoltaiki, energetyki wiatrowej i magazynowania energii, stwarzających realną szansę na ograniczenie skutków postępującego kryzysu klimatycznego bez istotnego pogorszenia jakości życia.

Trzeba pamiętać, że XXI wiek to również czas wyzwań o skali niewystępującej w żadnej poprzedniej epoce oraz megatrendów technologicznych adresujących obszary uważane do niedawna za pogranicze fantastyki naukowej.

Sztuczna Inteligencja (AI)

Jednym z najważniejszych, o ile nie najważniejszym megatrendem jest rozwój systemów sztucznej inteligencji (AI), wprowadzających nowy paradygmat działania w obszarach analizy wielkich zbiorów danych i automatycznego wnioskowania. Wydaje się, że nie ma dziedziny, w której zastosowanie AI nie przyniesie przełomowych zmian. AI umożliwia

automatyzację procesów, analizę ogromnych ilości danych i podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym. Należy pamiętać, że rozwój AI wzbudza również liczne obawy, zagrożenia i wyzwania etyczne – dlatego rozważana jest nie tylko jako megatrend, ale także potencjalne zagrożenie, a na pewno wyzwanie.

Robotyzacja i automatyzacja

Kolejnym istotnym wyzwaniem jest robotyzacja i automatyzacja, zmieniające obraz procesów przemysłowych i usługowych poprzez zastosowanie robotów i systemów autonomicznych. Robotyka współpracująca (coboty) oraz inteligentne systemy automatyzacji radykalnie przekształcają procesy produkcyjne i transportowe w fabrykach i magazynach, co spektakularnie ilustrują przypadki zrobotyzowanych magazynów firm takich jak Amazon. Trzeba przy tym przyznać, że rozwój robotyzacji i automatyzacji, oprócz niewątpliwych zalet wzbudza również ogromne lęki i niechęć u części społeczeństwa.

Przemysł 4.0

W kontekście czwartej rewolucji przemysłowej, Przemysł 4.0 bazuje na cyfrowej integracji systemów produkcyjnych, wykorzystując Internet Rzeczy (IoT), big data, analitykę oraz sztuczną inteligencję. Umożliwia to budowę i organizację inteligentnych fabryk zdolnych do samokontroli, optymalizacji i dostosowania produkcji w czasie rzeczywistym.

Rolnictwo 4.0

Podobne zmiany zachodzą w rolnictwie, gdzie Rolnictwo 4.0 wykorzystuje technologie cyfrowe, takie jak drony, czujniki IoT, sztuczną inteligencję i analizę danych, do precyzyjnego zarządzania uprawami, zwiększenia wydajności i zrównoważonego rozwoju. Pozostają przy tym do zaadresowania wyzwania związane z integracją zaawansowanych technologii z tradycyjnymi metodami uprawy oraz dostępnością infrastruktury cyfrowej na obszarach wiejskich.

Smart Cities

Rozwój inteligentnych miast (*Smart Cities*) opiera się na wykorzystaniu technologii cyfrowych w celu poprawy jakości życia mieszkańców, zarządzania infrastrukturą i optymalizacji zużycia zasobów. IoT, sztuczna inteligencja oraz systemy monitoringu umożliwiają lepsze zarządzanie ruchem ulicznym, transportem miejskim, energią, odpadami oraz bezpieczeństwem publicznym. Wyzwania w tym zakresie obejmują ochronę prywatności, cyberbezpieczeństwo oraz integrację systemów miejskich.

Internet Rzeczy (IoT)

Internet Rzeczy (IoT) łączy różne urządzenia i czujniki przez internet, umożliwiając zbieranie i analizę danych w czasie rzeczywistym. IoT znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach, od przemysłu i logistyki po inteligentne domy i opiekę zdrowotną, choć

wyduje się, że wyzwaniem pozostają zagadnienia związane z bezpieczeństwem sieci oraz interoperacyjnością różnych platform.

Technologie kwantowe

Na wczesnym etapie rozwoju znajdują się obecnie technologie kwantowe, takie jak komputery kwantowe, telekomunikacja kwantowa oraz kryptografia kwantowa. Mają one potencjał zrewolucjonizowania cyberbezpieczeństwa i systemów obliczeniowych, oferując rozwiązania problemów o wysokiej złożoności i wspierając rozwój sztucznej inteligencji.

Układy elektroniki i fotoniki scalonej

Układy elektroniki i fotoniki scalonej (Electronic Integrated Circuits, EIC oraz Photonic Integrated Circuits, PIC) umożliwiają integrację wielu funkcji optycznych na pojedynczym chipie o miniaturowych rozmiarach. Dzięki zaletom kompaktowości, niewielkiego zużycia energii, obniżonych kosztów packagingu oraz ultra-wysokiej niezawodności znajdują liczne zastosowania komercyjne w systemach telecom i datacom, a ostatnio również w systemach czujników fonicznych pracujących w szerokim zakresie spektralnym.

Technologie komunikacyjne

Gwałtownie rosnące zapotrzebowanie na przepustowość sieci telekomunikacyjnej związane z rozwojem technologii 5G i 6G oraz wymaganiami klientów sieci, skutkuje koniecznością opracowywania nowych rozwiązań dla systemów nadawczo-odbiorczych i dla mediów transmisyjnych. Rozwijane nowe rozwiązania ukierunkowane są zarówno na wzrost częstotliwości i zakresu spektralnego pracy układów nadawczo-odbiorczych, ale również na zwiększanie przepływności samego medium transmisyjnego, poprzez zastosowanie włókien wielordzeniowych i/lub kilkumodowych. Dodatkowo, prowadzone są intensywne prace nad systemami komunikacji optycznej w wolnej przestrzeni do zastosowań w systemach IoT, inteligentnych pojazdach czy transmisji satelitarnej.

W obliczu sumy omówionych wyżej megatrendów, wyzwań i zagrożeń niezbędne jest strategiczne, uporządkowane podejście do planowania ścieżek rozwoju i inwestycji technologicznych. W większości wymienionych wyżej obszarów dominują rozwiązania z obszaru technologii mikroelektronicznych, przy dynamicznie jednak rosnącym udziale technologii fonicznych, niezastępowalnych szczególnie we wszelkich rozwiązaniach związanych z ultra-szybkim przesyłaniem informacji.

W stronę integracji elektroniczno-fonicznej

Wydaje się bezsporne, że kształt współczesnego świata jest w rosnącym stopniu determinowany zaawansowanymi technologiami elektronicznymi i informatycznymi. Nie bez powodu sami siebie określamy mianem społeczeństwa informacyjnego – żyjemy w

otoczeniu informacji, generowanych, agregowanych i przetwarzanych z wykorzystaniem zaawansowanych systemów komputerowych, przesyłanych w superszybkich sieciach telekomunikacyjnych i analizowanych przy wsparciu systemów sztucznej inteligencji. Nieuchronny rozwój technik internetu rzeczy i sztucznej inteligencji zapowiada radykalne przeskalowanie zapotrzebowania na informacje i pojemności informacyjne systemów agregowania, przesyłania i analizy danych.

Za tak dynamicznym rozwojem technologii ICT stoją zaawansowane technologie elektroniki zintegrowanej, rozwijane od początku lat 70-tych XX wieku, wyznaczających początek rewolucji mikroelektronicznej, której skutkiem jest wszechobecność elektronicznych układów scalonych w otaczającym nas świecie. Równoległe z nimi, choć z nieco mniejszą dynamiką rozwijały się technologie nowoczesnej fotoniki, zainicjowane przełomowym wynalazkiem lasera z 1960 r., a następnie opanowaniem technologii niskostratnych światłowodów włóknowych i laserów półprzewodnikowych. Początek XXI wieku przyniósł gwałtowny rozwój kolejnej technologii o podobnie rewolucyjnym potencjale – fotoniki zintegrowanej. Układy fotoniki zintegrowanej (ang. Photonic Integrated Circuits, PICs) zrewolucjonizowały rynek telekomunikacji optycznej i data centers, a po dwóch dekadach nieprzerwanego rozwoju wkraczają na kolejne obszary aplikacyjne, związane przede wszystkim z szeroko rozumianymi technologiami czujnikowymi, a w szczególności z rynkiem IoT. Jednocześnie, obserwuje się w gruncie rzeczy oczywisty trend do integrowania rozwiązań mikroelektronicznych i fonicznych, co pozwala na agregowanie zalet obu technologii i uzyskiwanie efektów synergii.

Fotonika – obszary zastosowań

Fotonika, w połączeniu z elektroniką, stała się wszechobecna w dzisiejszym świecie, zapewniając rozwiązania wykorzystywane powszechnie w komunikacji, energetyce, medycynie, przemyśle, technice wojskowej, badaniach naukowych, metrologii, rozrywce i życiu codziennym. Poniżej scharakteryzowano pokrótce wybrane obszary zastosowań współczesnej fotoniki, niewyczerpujące nawet w połowie jej potencjału aplikacyjnego.

Telekomunikacja optyczna

Nowoczesne sieci telekomunikacyjne, stanowiące swoisty system nerwowy współczesnego społeczeństwa informacyjnego, w przeważającej części bazują na systemach komunikacji światłowodowej. Technologie foniczne stanowią fundament obecnych sieci rdzeniowych i metropolitalnych, z rosnącą udziałem w tzw. systemach ostatniej mili i sieciach dostępowych typu FTTH. W systemach telekomunikacyjnych krzyżują się i łączą różnorodne technologie foniczne, zarówno te stosunkowo dojrzałe i ustandaryzowane – lasery półprzewodnikowe, modulatory elektro-optyczne,

fotodetektory, wzmacniacze optyczne i pasywne włókna światłowodowe, jak i technologie wschodzące, jak układy fotoniki scalonej.

Należy również podkreślić duży i stale rosnący potencjał technologii fotonicznych w kontekście budowania systemów i sieci komunikacji bezprzewodowej (ang. free-space optical communication, FSOC), stanowiących potencjalną alternatywę dla systemów światłowodowych i radiowych tam, gdzie ich instalacja jest niemożliwa ze względu na uwarunkowania techniczne lub nieuzasadniona ekonomicznie.

Medycyna i biotechnologia

W zastosowaniach medycznych technologie fotoniczne można podzielić na te związane z technikami zabiegowymi, diagnostycznymi i pomocniczymi. Fotonika pozwala m.in. na przeprowadzanie precyzyjnych i minimalnie inwazyjnych zabiegów chirurgicznych (skalpel laserowy, cięcie tkanek miękkich), okulistycznych (laserowa korekcja wad wzroku), stomatologicznych (usuwanie próchnicy, leczenie dziąseł, wybielanie zębów), dermatologicznych (terapia fotodynamiczna, usuwanie zmian skórnych) czy w medycynie estetycznej. W ostatnich latach niezwykle intensywnie rozwijającą się dziedziną technik fotonicznych w medycynie jest koherentna tomografia optyczna, w szczególności wykorzystywana do diagnostyki chorób narządu wzroku. Rozwijane są również inne metody i techniki obrazowania, w tym wykorzystujące jednocześnie techniki fotoniczne i ultrasonograficzne.

W zakresie zastosowań medycznych fotoniki należy również wymienić techniki endoskopowe – współczesne aparaty wideoendoskopowe oraz fiberoskopowe, umożliwiające małoinwazyjną diagnostykę i terapię w różnych dziedzinach medycyny (chirurgia, ortopedia, ginekologia, interna).

Wśród zastosowań technologii fotonicznych w medycynie należy również podkreślić rosnący obszar światłowodowych i ogólnie optycznych systemów czujnikowych, przeznaczonych np. do nieinwazyjnych pomiarów parametrów życiowych pacjentów, detekcji bakterii i innych patogenów, detekcji markerów chorobowych czy monitorowania poziomu glukozy lub mleczanów we krwi.

W kontekście przyszłościowych zastosowań technologii fotonicznych w medycynie należy zauważyć również intensywny rozwój technik fotoniki scalonej i systemów typu lab-on-chip, umożliwiających niskokosztową diagnostykę w kierunku obecności bakterii, wirusów, grzybów czy substancji szkodliwych.

Przemysł i inżynieria

Unikatowe możliwości oferowane przez fotonikę są motorem rozwoju nowoczesnych technologii produkcyjnych i kontrolnych. Jednym z kluczowych zastosowań fotoniki jest precyzyjna obróbka materiałów za pomocą promieniowania laserowego, obejmująca

procesy cięcia, spawania, grawerowania oraz tzw. *mikromachiningu*. Lasery, oprócz precyzyjnej kontroli nad szybkością i dokładnością procesów obróbki, zapewniają możliwości przetwarzania (*laser processing, laser manufacturing*) materiałów o wysokiej twardości - metali, ceramik czy polimerów, trudnych do obrabiania tradycyjnymi metodami.

Fotonika odgrywa również kluczową rolę w systemach kontroli jakości w przemyśle, oferując dostęp do zaawansowanych technik pomiarowych interferometrii i spektroskopii optycznej, pozwalających na nieinwazyjne i ultra-dokładne badanie właściwości materiałowych, geometrii produktów czy wykrywanie defektów wewnętrznych. Innym atrakcyjnym polem zastosowań jest metrologia przemysłowa, gdzie fotonika zapewnia możliwość szybkich i precyzyjnych pomiarów, pozwalających na monitorowanie procesów produkcyjnych, zapewnianie ich ciągłości oraz stałą kontrolę parametrów.

Bezpieczeństwo i obrona

Technologie fotoniczne znajdują liczne zastosowania militarne – zaczynając od systemów kierowania ogniem, zarządzania polem walki, przez systemy obserwacji, naprowadzania i śledzenia, aż do systemów bezpiecznej komunikacji kwantowej. Jednym z istotnych kierunków rozwoju uzbrojenia jest zapewnienie wysokiej precyzji rażenia i autonomiczności systemów. Wymaga to zastosowania selektywnych i czułych układów detekcyjnych. Optoelektronika w przypadku tych ostatnich jest absolutnie niezbędna - dotyczy to zarówno uzbrojenia kierowanego przez człowieka, jak i rosnącej gamy amunicji samonaprowadzającej się na cel. Zaawansowane systemy wizualizacji danych, które pierwotnie wprowadzono w lotnictwie, obecnie stosowane są w pojazdach lądowych, a nawet w systemach informacji taktycznej indywidualnych żołnierzy. Szybko rozwijają się systemy bliskiej obserwacji, które dzięki fuzji sensorów i nowoczesnym nahałmowym układom obrazującym umożliwiają m.in. tzw. “widzenie poprzez pancerz”, tj. sytuację, w której operator pozostając w pojeździe bojowym widzi obraz z zewnętrznych układów obserwacyjnych.

Lasery i sensory optyczne stosowane są powszechnie do monitorowania i ochrony strategicznych obszarów, jak również w systemach rozpoznawania i śledzenia. Technologie fotoniczne pozwalają na budowę urządzeń detekcyjnych pracujących w trybie detekcji w miejscu “in situ” oraz detekcji zdalnej “stand off”. Warto zaznaczyć, że wykrywanie zagrożeń obejmuje nie tylko widoczne obiekty na niebie czy morzu – systemy czujników światłowodowych umożliwiają monitoring długich odcinków granic w terenie o ograniczonej widoczności. Najbardziej zaawansowane technologicznie armie wprowadzają do uzbrojenia systemy skierowanej energii, przede wszystkim do zwalczania dronów, trwają też testy systemów broni laserowej o mocach na poziomie kilkudziesięciu kilowatów.

Energetyka

Jednym z najbardziej rozpoznawalnych zastosowań fotoniki w energetyce jest fotowoltaika, czyli technologia konwersji światła słonecznego na energię elektryczną za pomocą ogniw słonecznych. Panele fotowoltaiczne są kluczowym komponentem w rozwijających się instalacjach odnawialnych źródeł energii. Ciągły rozwój nowych materiałów i technologii (takich jak ogniwa cienkowarstwowe, perowskitowe, wielozłączone, z kropkami kwantowymi) zapewnia systematyczny wzrost wydajności paneli fotowoltaicznych, co przyczynia się do obniżenia kosztów energii odnawialnej.

Fotonika znajduje także zastosowania w systemach monitorowania i zarządzania energią za pomocą zaawansowanych czujników optycznych, mierzących natężenie światła, temperaturę czy przepływ energii, co pozwala na optymalizację pracy systemów energetycznych, zarówno w skali mikro, jak i makro. W elektrowniach słonecznych z systemami nadążnymi, czujniki optyczne ułatwiają monitorowanie i regulację orientacji paneli słonecznych w stosunku do słońca, maksymalizując wydajność produkcji energii.

Fotonika oddziałuje również na rozwój inteligentnych sieci energetycznych (*smart grids*), które wykorzystują technologie światłowodowe i sensory foniczne do optymalizowania przepływu energii i reagowania na zmieniające się warunki w systemie energetycznym, co pozwala na efektywne połączenie różnych źródeł energii, zarządzanie zapotrzebowaniem i magazynowaniem energii, co poprawia stabilność i efektywność sieci energetycznych.

Nauka i badania

Wszechobecność technologii fonicznych (a szczególnie laserowych) w nauce umożliwia przekraczanie kolejnych barier poznawczych i rozwijanie nowych rozwiązań na potrzeby gospodarki opartej na wiedzy. W szczególności fotonika jest podstawą zaawansowanych technik mikroskopowych (mikroskopii fluorescencyjnej, konfokalnej i mikroskopii sił atomowych), które pozwalają na obserwowanie struktur na poziomie molekularnym i atomowym. Techniki te są kluczowe w biologii, medycynie oraz materiałoznawstwie, umożliwiając badanie komórek, tkanek, mikro- i nanomateriałów itp.

Fotonika pozwala również na analizę składu chemicznego i struktury materii za pomocą całej gamy zaawansowanych metod spektroskopowych (jak spektroskopia absorpcyjna, emisyjna, ramanowska, fourierowska itp.). Techniki te znajdują zastosowanie w chemii, fizyce, biologii, a także w badaniach środowiskowych i farmaceutycznych.

W dziedzinie fizyki i astronomii, powszechnie wykorzystywane są techniki interferometryczne pozwalające na precyzyjne pomiary odległości, współczynnika załamania światła, topografii powierzchni itp. Stwarzają również możliwość detekcji fal grawitacyjnych w ogromnej skali układach interferometrycznych (jak LIGO).

Lasery i techniki pomiarowe są stosowane do mapowania powierzchni Ziemi (LIDAR), w archeologii, geologii, badaniach atmosferycznych i wielu innych. Fotonika jest również fundamentem wszelkiego rodzaju technologii kwantowych, w tym komputerów kwantowych, teleportacji kwantowej, a także zaawansowanych systemów kryptografii kwantowej.

Przemysł rozrywkowy i fotonika codziennego użytku

Ten, bodaj najliczniejszy obszar zastosowań fotoniki obejmuje całą gamę urządzeń do wyświetlania i projekcji obrazów, od telewizorów i monitorów z ekranami LED i OLED, po zaawansowane kinowe projektory laserowe, urządzenia rzeczywistości rozszerzonej (AR) oraz wirtualnej (VR). Można tu wskazać również zaawansowane systemy oświetleniowe do tworzenia dynamicznych efektów świetlnych, wykorzystywanych podczas wydarzeń plenerowych, koncertów, występów teatralnych itp. W przemyśle filmowym i telewizyjnym zaawansowane technologie świetlne służą do kreowania efektów specjalnych, kluczowych dla narracji wizualnej. W systemach oświetlenia domowego (i komercyjnego) dominują obecnie układy LED, energooszczędne, trwałe i niezawodne. Podobnie wykorzystywane codziennie smartfony, tablety, inteligentne zegarki itp. implementują cały szereg technologii fonicznych, w tym kamery cyfrowe, czujniki optyczne oraz wyświetlacze dotykowe.

3. Mapa centrów fotonicznych w Polsce

Fotonika jako obszar badań i kształcenia jest reprezentowana w Polsce stosunkowo szeroko – poniższy rysunek pokazuje mapę (prawdopodobnie niepełną) polskich ośrodków akademickich i instytutów naukowych identyfikowanych jako zajmujące się fotoniką, z osiągnięciami zauważalnymi w skali krajowej i międzynarodowej.



Rys. 2. Mapa ośrodków naukowych zajmujących się fotoniką w Polsce

Wśród najważniejszych i najszerzej rozpoznawalnych uczelni można wskazać Wojskową Akademię Techniczną, Politechnikę Wroclawską, Politechnikę Warszawską, Uniwersytet Warszawski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Politechnikę Gdańską, Uniwersytet Gdański, Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie, Politechnikę Białostocką, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Politechnikę Łódzką, Politechnikę Poznańską, Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Politechnikę Śląską, Uniwersytet Rzeszowski. W grupie instytutów badawczych należy wymienić działające w ramach Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki (powstały w wyniku połączenia Instytutu Technologii Elektronowej i Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych) oraz PORT Polski Ośrodek Rozwoju Technologii, a także Instytut Łączności PIB, Instytut Wysokich Ciśnień PAN (Unipress), Międzynarodowe Centrum Badań Oka – ICTER.

W odróżnieniu od powszechnego przekonania firmy (zarówno startupy, MŚP, jak i duże podmioty) są na mapie fotonicznej Polski reprezentowane zaskakująco licznie (vide rys. 3). Widać też wyraźnie, że obszary największej aktywności biznesowej pokrywają się w większości z obszarami obecności ośrodków naukowo-badawczych, prowadzących prace w obszarze fotoniki. Widoczna jest również wyraźnie wiodąca rola ośrodka warszawskiego, z największą koncentracją jednostek naukowych, badawczych i

przemysłu fotonicznego, przy nieco mniejszej, choć wyraźnie zaakcentowanej roli ośrodków wrocławskiego, lubelskiego, krakowskiego, śląskiego, poznańskiego, toruńskiego, gdańskiego i rzeszowskiego.



Rys. 3. Fotoniczna mapa Polski – centra naukowe i firmy fotoniczne

4. Diamenty polskiej fotoniki – wybrane obszary kompetencji

Badania naukowe i prace wdrożeniowe prowadzone w obszarze fotoniki w Polsce od lat 60-tych ubiegłego wieku to historia zaledwie kilkunastu dużych programów, nierównego finansowania, niewykorzystanych szans, z dużym trudem zdobywanych środków na rozwój technologii i poza nielicznymi wyjątkami, niewielkiego zainteresowania kolejnych rządów. Na szczęście to również historia zespołów tworzonych przez entuzjastów fotoniki, licznych wzlotów (i oczywiście upadków), wykorzystanych możliwości (szczególnie związanych z racjonalnym skorzystaniem ze środków programów pomocowych Unii Europejskiej), owocujących udanymi przedsięwzięciami naukowymi i biznesowymi. Poniższa sekcja prezentuje diamenty polskiej fotoniki – *success stories*, zarówno w wymiarze naukowym, jak i biznesowym, udowadniając, że w przypadku zaawansowanych techniki i technologii fotonicznych jesteśmy krajem wyraźnie widocznym na mapie europejskiej fotoniki, wnoszącym istotny wkład do rozwoju poszczególnych obszarów kompetencyjnych.

Światłowody

Pierwsze polskie światłowody powstały w połowie lat siedemdziesiątych XX w. na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej (UMCS) w Lublinie. Dzięki szybkiemu postępowi w badaniach nad technologią ich wytwarzania możliwe było uruchomienie w Lublinie już na początku 1979 r. pierwszej w Europie Środkowej światłowodowej linii telekomunikacyjnej bazującej na włóknach wytworzonych w UMCS. Ten niewątpliwie sukces polskiej fotoniki znacząco przyczynił się do intensywnego rozwoju badań technologicznych w innych polskich ośrodkach naukowych. W chwili obecnej znane i doceniane w Europie i na świecie technologiczne ośrodki badawcze światłowodów włóknowych znajdują się na Politechnice Białostockiej, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Instytucie Mikroelektroniki i Fotoniki SBŁ w Warszawie i wspomnianym już UMCS w Lublinie. Kompetencje badawcze i prace prowadzone w tych ośrodkach pokrywają się z najnowszymi światowymi trendami badań technologicznych związanych z opracowywaniem nowych materiałów optycznych (szkła, polimery, materiały krystaliczne), nowych światłowodów (klasycznych i mikrostrukturalnych) oraz z ich nowymi zastosowaniami. W znacznym tempie rozwija się również przemysł światłowodowy. W chwili obecnej fabryki światłowodów w Polsce uruchomiły Corning - światowy lider w technologii światłowodów i Fibrain - niezależny polski producent technologii i systemów światłowodowych, specjalizujący się w tworzeniu nowych rozwiązań fonicznych (światłowodowych) dostosowanych do indywidualnych potrzeb odbiorców. Działa już także polska fabryka chińskiego koncernu YOFC, a w najbliższym czasie planowane jest uruchomienie kolejnych dwóch.



Rys. 4. Wybrane polskie firmy z obszaru techniki światłowodowej

Lasery – lasery kwantowe i ciała stałego

Lasery i urządzenia laserowe o wartości komercyjnej są rozwijane od lat w kilku krajowych ośrodkach naukowych – przede wszystkim w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (systemy laserowe do zastosowań wojskowych, w tym nieśmiercionośna broń laserowa), w Politechnice Wrocławskiej i warszawskim Instytucie Chemii Fizycznej IChF PAN, (lasery femtosekundowe) oraz Instytucie Mikroelektroniki i Fotoniki Sieci Badawczej Łukasiewicz (unikatowe lasery kwantowe, generujące promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni). Część z tych rozwiązań stała się przedmiotem spektakularnych działań komercjalizacyjnych – dobrym przykładem są rozwiązania oferowane na rynku światowym przez firmę Fluence, producenta światłowodowych laserów femtosekundowych (z korzeniami w IChF PAN), czy lasery wrocławskiej firmy Mode-Locked Technology (startup z Politechniki Wrocławskiej).



Rys. 5. Wybrane polskie firmy z obszaru techniki laserowej

Oprócz samych laserów na rynku międzynarodowym z powodzeniem działają polskie firmy oferujące kompletne systemy laserowe – warto tu wymienić systemy obrabiarek laserowych na bazie laserów ciała stałego (adresujące bardzo atrakcyjny rynek *laser manufacturing*) firm Kimla, Eagle, Solaris Laser oraz systemy laserowe oferowane przez pińczowską firmę Microvec.

Fotowoltaika

Rynek klasycznej fotowoltaiki (PV) jest zdominowany przez produkty firm chińskich, zapewniających wszystkie elementy łańcucha wartości – od technologii wytwarzania ogniw do kompletnych paneli. Tym niemniej, na tym trudnym rynku odnajdują się niektóre polskie firmy, działające w obszarze niestandardowych rozwiązań PV.



Rys. 6. Wybrane polskie firmy z obszaru fotowoltaiki

ML System S.A. jest wysoko specjalizowaną firmą technologiczną rozwijającą technologie elementów i systemów PV do zastosowań w klasycznych instalacjach fotowoltaicznych, w zrównoważonym budownictwie, transporcie lądowym i wodnym oraz branży *automotive*. Firma dysponuje własnym zakładem produkcyjnym z nowoczesnym parkiem maszynowym oraz silnym zapleczem B+R. W 2021 r. w ML System uruchomiona została pierwsza na świecie linia produkcyjna transparentnych szyb PV z powłoką kwantową.

Saule Technologies S.A. jest polską firmą technologiczną specjalizującą się w rozwoju innowacyjnych rozwiązań fotowoltaicznych wykorzystujących drukowalne ogniwa perowskitowe, przeznaczone do produkcji ultra-cienkich, lekkich i elastycznych paneli fotowoltaicznych. Obszary działalności Saule Technologies to badania i rozwój technologii perowskitowych ogniw fotowoltaicznych, projektowanie i produkcja paneli PV, wdrażanie nowych rozwiązań fotowoltaiki elastycznej.

Powstała w 2024 r. spółka FIBRAIN Energy jest efektem współpracy czterech wiodących spółek z branży zaawansowanych technologii i energii odnawialnej: FIBRAIN – producenta rozwiązań światłowodowych, DAGLASS – producenta szklanych modułów BIPV, Friendly Innovation – producenta inteligentnych ładowarek oraz Ele-DriveCo – producenta magazynów energii. Jedną ze specjalizacji firmy jest zaawansowana, fizyko-chemiczna obróbka szkła, dzięki której możliwe jest uzyskanie materiału o unikatowych właściwościach, gwarantujących poprawę parametrów produkowanych paneli PV.

Detektory podczerwieni

Firma VIGO Photonics S.A., założona w 1987 r. jest globalnym graczem na rynku detektorów średniej podczerwieni (mid-IR). Główną kompetencją, na której przez lata była budowana jej pozycja rynkowa jest technologia fotodetektorów fotonowych pracujących w zakresie mid-IR, niewymagających chłodzenia kriogenicznego.

Podstawową platformą technologiczną wykorzystywaną do wytwarzania detektorów fotonowych – fotorezystorów i fotodiod był początkowo tellurek kadmowo-rtęciowy (HgCdTe). W ostatnich latach, z uwagi na konieczność zapewnienia w swoim portfolio urządzeń detekcyjnych zgodnych z dyrektywą ROHS, firma VIGO Photonics opracowała i

wdrożyła oryginalną technologię detektorów supersieciowych na bazie materiałów InAs/InAsSb. Obecnie spółka ma w swojej ofercie detektory fotonowe pracujące w zakresie długości fali od 2,0 μm do 16,0 μm . VIGO Photonics oferuje również moduły detekcyjne, składające się z fotodetektorów wyposażonych w specjalizowane układy elektroniczne, optymalizowane pod względem detekcyjności, parametrów szumowych i szybkości działania.



Rys. 7. Detektory podczerwieni opracowane przez firmę VIGO Photonics S.A.

VIGO Photonics dysponuje kompletną linią technologiczną przyrządów półprzewodnikowych, pozwalającą na prowadzenie epitaksji związków grup II-VI i III-V, pełny processing chipów detektorowych, montaż, packaging i integrację z elektronicznymi układami sterowania i odczytu.

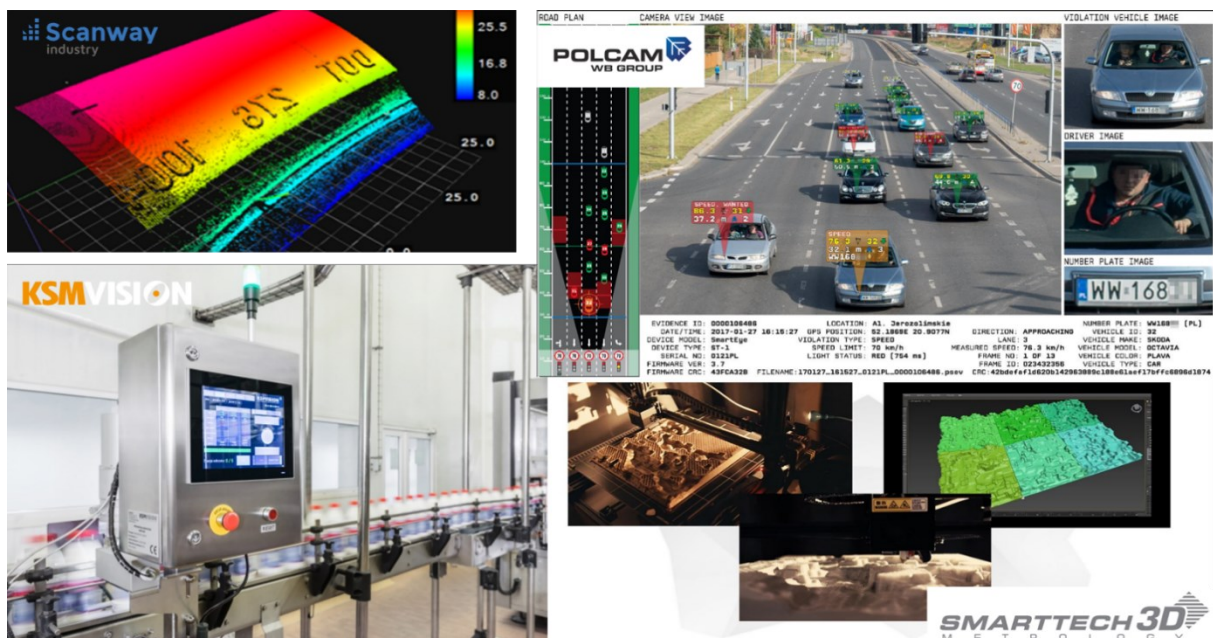
W 2020 r. VIGO Photonics rozpoczęła pionierskie prace koncepcyjne i badawcze w kierunku rozwoju technologii fotoniki scalonej na zakres średniej podczerwieni, których wynikiem jest opracowanie fundamentów platformy technologicznej MIRPIC, przygotowywanej do skalowania w ramach programu IPCEI HyperPIC którego celem jest opracowanie kluczowych technologii oraz uruchomienie pierwszej fabryki układów fotoniki scalonej (*photonic foundry*) na zakres średniej podczerwieni.

Przetwarzanie obrazu

Przetwarzanie obrazu łączy fotonikę z inną polską specjalnością: informatyką. Urządzenia fotoniczne - kamery - są tu jedynie punktem wyjścia. Pozyskany z nich obraz jest przenoszony do postaci cyfrowej, aby umożliwić jego dalsze przetwarzanie i podejmowanie wynikowych działań za pomocą komputerowych algorytmów. Dzięki takiej automatyzacji pętli decyzyjnej za pomocą kamer można dokonywać w czasie rzeczywistym kontroli jakości, oceny bezpieczeństwa, identyfikacji pojazdów czy precyzyjnej detekcji i mapowania błędów. Spółki KSM Vision czy ScanWay z powodzeniem dostarczają wizyjne systemy kontroli jakości na linie produkcyjne różnych gałęzi przemysłu: od spożywczego przez farmaceutyczny i papierniczy po samochodowy. Wchodząca w skład Grupy WB spółka POLCAM jest liderem w branży pomiaru prędkości

i automatycznego mandatowania – jego systemy, w wersjach mobilnych i stacjonarnych, instalują policje drogowe oraz zarządcy infrastruktury na kilku kontynentach.

Szczególnym przypadkiem są optyczne systemy pomiarowe budowane przez firmę Smarttech3D z wykorzystaniem opracowanej na Politechnice Warszawskiej technologii skanowania 3D w najwyższej rozdzielczości. Umożliwia ona szybkie pozyskanie bardzo precyzyjnych informacji o geometrii i kolorze dowolnego obiektu. Wysoka dokładność pomiarów geometrycznych, połączona z realistycznym skanowaniem koloru tekstury, pozwalają nie tylko na szybką kontrolę wszystkich wymiarów dowolnie skomplikowanych kształtów, ale także na tworzenie wiernych cyfrowych modeli – na przykład obiektów dziedzictwa materialnego. Konstrukcja skanerów Smarttech3D umożliwia ich integrację z robotami przemysłowymi, przenosząc automatyzację przemysłowej kontroli jakości czy digitalizacji obiektów na jeszcze wyższy poziom. Inne obszary zastosowań tych urządzeń to archeologia, kryminalistyka, czy inżynieria odwrotna stosowana np. do odtwarzania dawnych części zamiennych.



Rys. 8. Wybrane polskie firmy działające w obszarze technik przetwarzania obrazu

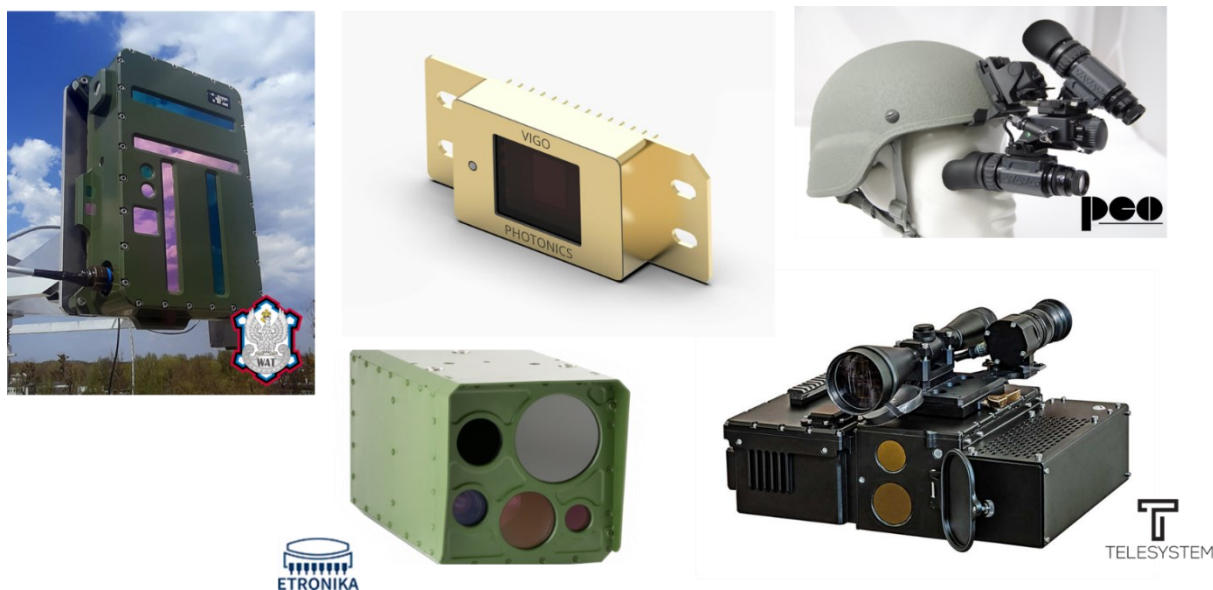
Aplikacje wojskowe

Polska fotonika ma długie i niebagatelne doświadczenie w dziedzinie obronności, które procentuje jakością i parametrami dzisiejszych wyrobów kilku firm. Największą krajową firmą fotoniczną sektora obronnego jest należąca do Polskiej Grupy Zbrojeniowej PCO SA. W jego ofercie znajdują się dzienne i nocne przyrządy celownicze oraz obserwacyjne dla indywidualnych żołnierzy i pilotów, ale także nowoczesne systemy osłony, obserwacyjne i kierowania ogniem, instalowane na wozach bojowych nie tylko polskiej armii.

Wspomniane już detektory podczerwieni z VIGO Photonics są kluczowym elementem ich pokładowych systemów przeciwpożarowych.

Wysoko oceniane na świecie termowizyjne celowniki i urządzenia obserwacyjne produkuje spółka Etronika, stworzona przez byłych pracowników Polskich Zakładów Optycznych. Producentem dziennych i nocnych celowników do broni indywidualnej jest także mające ukraińskie korzenie firma InFOV. Dużym producentem celowników termowizyjnych jest również PCO SA. Wywodząca się z Wojskowej Akademii Technicznej spółka CRW Telesystem-Mesko we współpracy z MESKO SA produkuje układy naprowadzania do amunicji kierowanej, w tym głowice samonaprowadzające do raket Piorun – dzięki jej parametrom jest to obecnie najlepszy na świecie system przeciwlotniczy najkrótszego zasięgu. Inne szeroko znane wyroby polskiej fotoniki to unikatowe systemy pomiarowe firmy Inframet, służące do kalibracji wojskowych przyrządów termowizyjnych.

Należy tu podkreślić, że sama Wojskowa Akademia Techniczna, a szczególnie Instytut Optoelektroniki, IOE WAT, animuje i prowadzi szeroko zakrojone programy badań na wysokich poziomach gotowości technologicznej m.in. nad laserowymi systemami przeciwdronowymi, lidarami do zastosowań wojskowych oraz optycznymi systemami nadzoru granic.



Rys. 9. Wojskowe systemy detekcyjne, naprowadzania i śledzenia z zastosowaniem układów fotonicznych.

BIG PHOTONIC THINGS in Poland – kluczowe inwestycje infrastrukturalne w obszarze fotoniki w ostatnich latach

Oprócz dobrze osadzonych w historii uczelni i instytutów badawczych z wieloletnią tradycją, na dodatkowy komentarz i wzmiankę zasługuje infrastruktura badawcza wybudowana w ostatnich dwóch dekadach (lub właśnie budowana) w ramach programów operacyjnych i programów specjalnych dofinansowanych ze środków europejskich, wspierająca prace badawczo-rozwojowe w obszarze fotoniki. Najważniejsze w ocenie autorów raportu przedsięwzięcia scharakteryzowane są poniżej.

Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (ang. National Laboratory for Photonics and Quantum Technologies, NLPQT), to sieć specjalistycznych laboratoriów badawczych (budowa zakończona z końcem 2023 r.), skupiających się na zaawansowanych technologiach fonicznych oraz technologiach kwantowych.

W ramach NLPQT opracowano ogólnokrajową infrastrukturę do rozpowszechniania standardowej częstotliwości optycznej i systemów dystrybucji klucza kwantowego. Wszystkie skupione w NLPQT laboratoria zapewniają również usługi badawcze dla przemysłu fonicznego i kwantowego.



Rys. 10. Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych

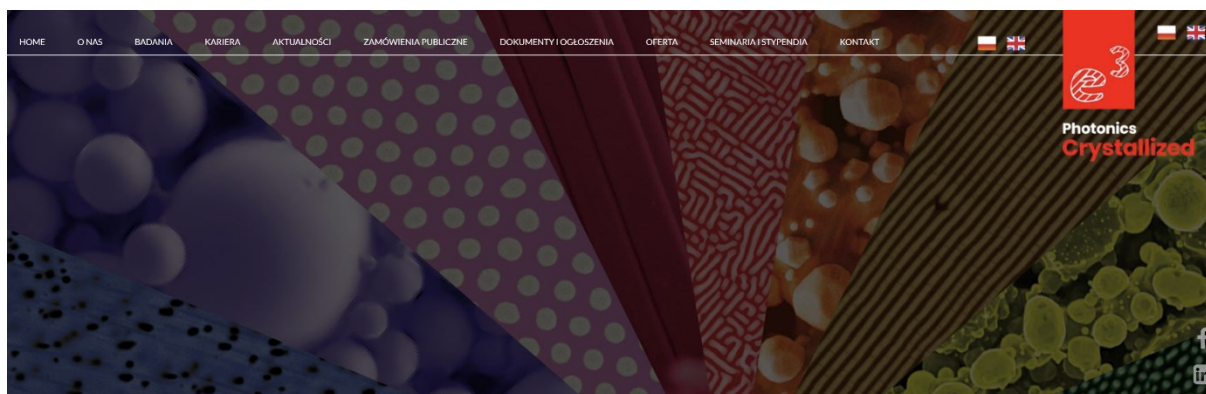
Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii – CEZAMAT, Politechnika Warszawska jest wydzieloną jednostką Politechniki Warszawskiej, której głównym celem jest prowadzenie prac badawczo-rozwojowych w obszarze nowych materiałów i technologii półprzewodnikowych. Laboratoria technologiczne CEZAMAT powstały jako jedna z największych inwestycji w Polsce o charakterze *high-tech*, współfinansowanych przez Unię Europejską. CEZAMAT to ponad 4000 m² laboratoriów o wysokiej i ultra-wysokiej czystości (*cleanroom facility*), wyposażonych w nowoczesne urządzenia technologiczne i aparaturę pomiarową, umożliwiającą realizację prac w zakresie technologii biomedycznych i chemicznych, technologii mikroelektroniki i fotoniki scalonej, technologii układów MEMS i MOEMS, a także rozwiązań lab-on-chip.

Najważniejszym obszarem badań prowadzonych w CEZAMAT w zakresie fotoniki są prace nad rozwojem platform technologicznych fotoniki scalonej, prowadzone we współpracy z Instytutem Mikroelektroniki i Optoelektroniki PW. W szczególności opracowywane są rozwiązania dla platformy azotku krzemu (SiN), umożliwiającej wytwarzanie pasywnych układów fotoniki scalonej na zakres widzialny (VIS) i bliskiej podczerwieni (NIR) do zastosowań w układach czujnikowych (w tym systemach mikrofluidycznych oraz lab-on-chip) oraz dla nowej platformy na zakres średniej podczerwieni MIRPIC (w ramach konsorcjum, w skład którego wchodzi VIGO Photonics S.A., Politechnika Warszawska oraz Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki SBŁ).



Rys. 11. Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii CEZAMAT Politechniki Warszawskiej

Centrum Doskonałości **ENSEMBLE³** zapewnia know-how, infrastrukturę badawczą i zespół ekspertów w obszarze wzrostu kryształów i zaawansowanych materiałów dla fotoniki/optoelektroniki, w tym materiałów plazmowych i metamateriałów. **ENSEMBLE³** zajmuje się opracowywaniem technologii wytwarzania nowych materiałów, badaniami ich właściwości oraz możliwościami zastosowania w energetyce, elektronice, fotonice, medycynie, przemyśle lotniczym, obronnym, kosmicznym, militarnym oraz innych sektorach gospodarki. Główny obszar kompetencji **ENSEMBLE³** to rozwój nowych technologii materiałowych bazujących na wzroście kryształów oraz opracowywanie zaawansowanych materiałów o unikatowych właściwościach elektromagnetycznych.



Rys. 12. Strona internetowa ENSEMBLE³

Sieć Badawcza Łukasiewicz – PORT Polski Ośrodek Rozwoju Technologii jest instytutem badawczym specjalizującym się w inżynierii materiałowej i biotechnologii. PORT jest częścią Sieci Badawczej Łukasiewicz, jednej z największych sieci naukowo-badawczych w Europie, łączącej 22 instytuty z całej Polski. PORT prowadzi zarówno prace badawczo-rozwojowe we współpracy z partnerami przemysłowymi na wysokich poziomach gotowości technologicznej, jak i prace naukowe o charakterze badań podstawowych. W ramach Instytutu działają trzy centra badawcze – Inżynierii Materiałowej, Nauk o Życiu i Biotechnologii oraz Diagnostyki Populacyjnej.

W zakresie szeroko rozumianych technologii fonicznych najważniejsze jest multidyscyplinarne Centrum Inżynierki Materiałowych (CIM) i wchodzące w jego skład Grupa Materiałów i Struktur Fonicznych oraz Grupa Badawcza Epitaksji Związków Półprzewodnikowych. Badania prowadzone w ramach centrum skupione są wokół materiałów fonicznych zapewniających emisję, generację i transmisję sygnałów optycznych w zakresie od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni. Głównym przedmiotem badań są struktury kropek kwantowych, cienkich warstw (w tym monoatomowych), kryształów fonicznych i struktur plazmonicznych, jak również nowych emiterów głębokiego UV bazujących na azotkach grupy-III (AlGaInN). W CIM PORT badane są również nowatorskie materiały foniczne (jak perowskity czy chalcogenki).



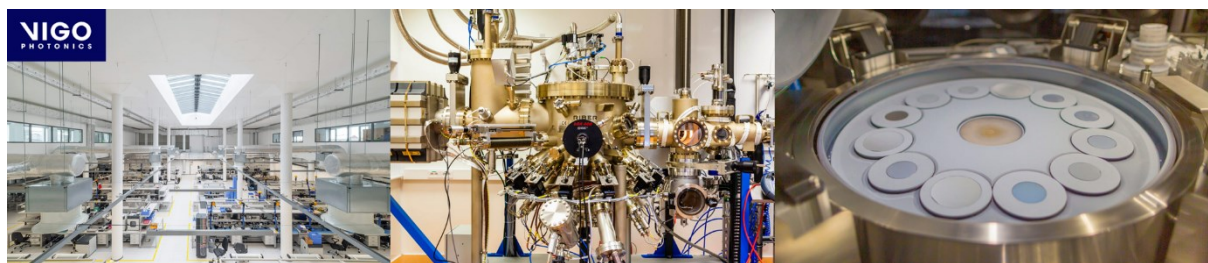
Rys. 13. Strona internetowa Polskiego Ośrodka Rozwoju Technologii PORT (Sieć Badawcza Łukasiewicz)

HyperPIC – pierwsza fabryka układów fotoniki scalonej na zakres mid-IR

Projekt infrastrukturalny „HyperPIC - foniczne układy scalone do zastosowań w średniej podczerwieni” jest realizowany przez firmę VIGO Photonics S.A. Głównym celem projektu jest opracowanie i wdrożenie technologii specjalizowanych, hybrydowych układów fotoniki scalonej na zakres średniej podczerwieni mid-IR (platforma technologiczna MIRPIC) oraz przygotowanie i uruchomienie kompletu linii produkcyjnych zapewniających pełny łańcuch dostaw dla układów MIRPIC.

Projekt HyperPIC realizowany jest w ramach mechanizmu IPCEI – Important Projects of Common European Interest, mającym na celu dofinansowywania wielkoskalowych, transgranicznych przedsięwzięć o wysokim poziomie innowacyjności, kluczowych dla realizacji strategicznych celów Unii Europejskiej, o dużym wpływie na wzrost gospodarczy, miejsca pracy i konkurencyjność gospodarki UE. Projekty IPCEI charakteryzują się wysokim poziomem ryzyka technologicznego i finansowego, co uzasadnia nadzwyczajne wsparcie ze środków publicznych.

W wyniku realizacji projektu HyperPIC VIGO Photonics ma szansę zostać pierwszym na świecie producentem fonicznych układów scalonych dla średniej podczerwieni. Potencjał aplikacyjny układów MIRPIC to głównie miniaturowe systemy czujnikowe do detekcji/monitoringu gazów i cieczy, wielokanałowe układy nadawczo-odbiorcze dla systemów komunikacji optycznej w wolnej przestrzeni, zintegrowane systemy lidarowe, systemy diagnostyki medycznej itp.



Rys. 14. Infrastruktura produkcyjna VIGO Photonics

5. Kierunki rozwoju i trendy - podsumowanie spotkań warsztatowych w programie „Fotonika.pl – which way further”

Pierwsze spotkanie warsztatowe, przeprowadzone w ramach programu „Optoelectronics.pl – which way further” w trakcie konferencji IOS’2023 i poświęcone analizie SWOT polskiej fotoniki, pozwoliło na zdefiniowanie fundamentów do dyskusji na temat fotoniki w Polsce. Należy dodać, że to już kolejna runda tej niekończącej się dyskusji, bo jak się wydaje, każde kolejne pokolenie polskich optoelektroników/fotoników prowadzi podobne rozważania i opracowuje kolejne strategie. Podsumowanie ćwiczenia warsztatowego, zainicjowanego podczas IOS’2023, a następnie kontynuowanego w udostępnionym zdalnie dokumencie, zaprezentowane jest poniżej.

Optoelectronics.pl - which way further? SWOT analysis	
<p>several high tech companies in the field</p> <p>good universities/research centres</p> <p>qualified specialists</p> <p>good research teams</p> <p>availability of technologies</p> <p>increasing number of startups and SMEs</p>	<p>low competence level</p> <p>too many different topics</p> <p>low TRL of currently developed products</p> <p>many small and unconnected research groups</p> <p>no photonic roadmap for Poland</p> <p>limited funding</p>
<p>disruptive technologies</p> <p>EU funding mechanisms for increasing sovereignty - ChipsAct, IPCEI</p> <p>getting a share in developing markets</p> <p>new products emerging from existing Polish technologies</p> <p>low labour costs</p>	<p>political and economic instability</p> <p>low society awareness</p> <p>war</p> <p>no strategic (long term) funding for high risk projects</p> <p>supply chains (materials, equipment, chemicals, etc.)</p> <p>funding problems - other priorities</p>

Rys. 15. Wyniki analizy SWOT dla fotoniki w Polsce – warsztat IOS’2023

Wydaje się, że ten SWOT, pomimo że pobieżny, dobrze podsumowuje sytuację fotoniki w Polsce, wskazując przede wszystkim na bardzo dobry potencjał kadrowy, akademicki i biznesowy, ale również dobre otoczenie technologiczne, co jeszcze dwie dekady temu nie pojawiało się w wypowiedziach środowiska. Pokazuje również liczne szanse, związane z integracją z europejskim rynkiem nauki i biznesu, a także z udziałem w rozwijaniu przetomowych technologii. Jednocześnie wskazuje na słabości wynikające z ograniczeń finansowych, ale również z atomizacji i braku współpracy środowiska, szerokiego wachlarza tematycznego oraz braku dokumentów o charakterze roadmapowym.

Warsztaty „Fotonika.pl – supermoce” prowadzone podczas konferencji TAL’2023 w Lublinie pozwoliły na doprecyzowanie obszarów, w których polska fotonika czuje się mocna i skutecznie konkurująca na arenie międzynarodowej. Wyniki dyskusji, przedstawione na rysunku poniżej dają dobrą diagnozę możliwości polskiego przemysłu i polskiej nauki, wskazując jednocześnie najważniejsze, czy też najbardziej atrakcyjne kierunki rozwoju i ewentualnych przyszłych programów inwestycyjnych.



Rys. 17. Chmura tagów podsumowująca dyskusję nt. najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju fotoniki w Polsce – warsztat IOS’2024

Wydaje się, że ta diagnoza wpisuje się celnie w priorytety zdefiniowane przez Unię Europejską, wskazywane w dokumentach strategicznych oraz wyrażane w nadzwyczajnych instrumentach finansowych, m.in. Important Projects of Common European Interest on Microelectronics and Communication Technologies (IPCEI ME CT), czy ChipsAct.

6. Podsumowanie i kierunki dalszych prac w programie

Raport „*Fotonika.pl – w którą stronę? Stan obecny i perspektywy rozwoju fotoniki w Polsce*” (*materiały do dyskusji programowej*) jest podsumowaniem pierwszej rundy prac zainicjowanych na początku 2023 roku przez Polski Komitet Optoelektroniki SEP, prowadzonych z możliwie szerokim udziałem krajowej społeczności fotonicznej, z udziałem reprezentantów środowiska akademickiego, instytutów badawczych i krajowych przedsiębiorców działających w obszarze fotoniki. Jest zarówno fotografią stanu fotoniki w Polsce (prawdopodobnie niezupełnie kompletną, ale reprezentatywną), jak też próbą wskazania obszarów o największym potencjale rozwojowym, stanowiących albo polską specjalność, albo nisze dla unikatowych produktów czy kompetencji technologicznych. Najważniejszą jednak rolą tego opracowania jest inspirowanie i podtrzymywanie dialogu na temat perspektyw fotoniki w Polsce.

Raport ma charakter wprowadzenia do dyskusji programowej w ramach IV Kongresu Elektryki Polskiej, 6-7 czerwca 2024 r., w Poznaniu. Jesteśmy przekonani, że jej wynikiem będzie uaktualnienie i uzupełnienie raportu, wskazanie trendów i technologii przyszłości, a także sformułowanie rekomendacji dla strategii rozwoju fotoniki w Polsce, uwzględniającej nie tylko aspekty kluczowych technologii, obszarów aplikacyjnych i priorytetów finansowania, ale również zagadnienia kształcenia, rozwoju i zapewnienia stałego napływu kapitału ludzkiego, decydującego o sukcesach polskiej fotoniki.

Program „*Fotonika.pl – which way further?*” jest działaniem o charakterze ciągłym, raport pokongresowy będzie kolejnym, niezwykle ważnym kamieniem milowym, niekończącym działań, ale umożliwiającym formułowanie i nanoszenie uwag i uaktualnień. Liczymy na to, że planowane kolejne spotkania konferencyjne i warsztatowe, a także upowszechnienie dokumentu w postaci elektronicznej z wykorzystaniem narzędzi zdalnego dostępu pozwoli na bezprecedensowo szeroką dyskusję i wyrażenie wspólnego głosu całego środowiska fotonicznego w sprawach kierunków rozwoju fotoniki w Polsce.

Ostatecznym wynikiem prac w programie będzie dokument „*Strategia rozwoju fotoniki w Polsce*”, analizujący kierunki rozwoju fotoniki w perspektywie ekonomicznej, naukowej, technologicznej i społecznej, z uwzględnieniem światowych trendów, wyzwań i zagrożeń. Dokumenty strategiczne wymagają nieustannej aktualizacji – już dziś zapraszamy wszystkich Państwa do wspólnego opracowywania i uaktualniania tej strategii.

SUPLEMENT

S1. Otoczenie fotoniki - krajowe organizacje wspierające rozwój fotoniki

Rozwój fotoniki w Polsce jest dodatkowo animowany i wspierany przez stosunkowo liczne organizacje – stowarzyszenia i klastry, wymienione i zwięźle scharakteryzowane poniżej.



Polski Komitet Optoelektroniki Stowarzyszenia Elektryków Polskich SEP (PKOpto SEP) <http://pkopto.pl/>

Jeden z komitetów najstarszego polskiego stowarzyszenia inżynierów elektryków (SEP), powołany w 1985 roku w wyniku uzgodnień pomiędzy SEP i PAN, z intencją gromadzenia i wyrażania głosu inżynierów, naukowców i przedsiębiorców związanych z szeroko rozumianą optoelektroniką (obecnie fotoniką). Celem organizacji jest stymulowanie rozwoju polskiej optoelektroniki, przez proponowanie kierunków działań, inspirowanie badań i wdrożeń, promowanie talentów, animowanie działalności dydaktycznej i naukowej oraz działania lobbingowe, koordynacyjne i integracyjne na krajowym i międzynarodowym rynku fotoniki. PKOpto SEP jest organizatorem najstarszego polskiego konkursu na prace dyplomowe z dziedziny optoelektroniki (32 edycje).



Polskie Stowarzyszenie Fotoniczne – Photonics Society Poland (PSP) <https://photonics.pl/>

Powstało w 2007 r. w wyniku przekształcenia polskiego oddziału międzynarodowego stowarzyszenia SPIE. Zrzesza naukowców, inżynierów, techników oraz inne osoby fizyczne i prawne aktywnie działające w dziedzinie fotoniki. Stowarzyszenie jest wydawcą rozpoznawalnego w świecie czasopisma *PSP Photonics Letters of Poland*, animatorem działań na rzecz studentów i studenckich kół naukowych. Współpracuje z pokrewnymi organizacjami, w tym z Polską Platformą Technologiczną Fotoniki PPTF, PKOpto SEP oraz Komitetem Elektroniki i Telekomunikacji PAN. We współpracy z dwiema ostatnimi organizuje coroczną konferencję IOS: Integrated Optics - Sensors, Sensing Structures and Methods, wspólnie z PPTF organizuje coroczne Fotoniczne Targi Pracy.



Polska Platforma Technologiczna Fotoniki (PPTF)

<https://pptf.pl/>

Powołana jako konsorcjum w 2013 r., od 2018 r. działa jako związek pracodawców polskiej branży fotoniki i mikroelektroniki. Zrzesza krajowe firmy, uczelnie i instytucje badawcze, działając na rzecz integracji i rozwoju branży, współpracy badawczej oraz kształcenia kadr. Jako organizacja klastrowa stanowi reprezentację przemysłu uznawaną przez instytucje publiczne w kraju i UE. PPTF jest członkiem Photonics21 – reprezentacji europejskiej fotoniki, European Cluster Collaboration Platform (ECCP) oraz European Network of Defence-related Regions (ENDR). Organizacja aktywnie współpracuje z klastrami fonicznymi z Niemiec, Czech, Litwy, Francji i Finlandii, wspomagała utworzenie Ukraińskiego Klastra Fonicznego, bierze udział w projektach europejskich. We współpracy z PSP organizuje Foniczne Targi Pracy, wspólnie z Fundacją Candela wydaje dwujęzyczny Polski Newsletter Optyki i Fotoniki. W 2023 r. PPTF była współinicjatorem powołania Klastra Mikroelektroniki, Elektroniki i Fotoniki (microEPC) i pełni funkcję Koordynatora Klastra.



**Sekcja
Fotoniki**

**Sekcja Fotoniki Komitetu Elektroniki i
Telekomunikacji PAN (SO KEiT)**

<https://sokeit.photonics.pl/>

Powołana w latach 70. XX wieku jako Sekcja Optoelektroniki KEiT, od roku 2015 pod nazwą Sekcja Fotoniki. Prowadzi działania na rzecz integracji krajowego środowiska fonicznego, co obejmuje w szczególności animowanie współpracy między uczelniami, instytucjami naukowymi i firmami fonicznymi, promowanie projektów sektorowych fotoniki, wspieranie współpracy międzynarodowej. Współorganizuje Międzynarodowe Foniczne Targi Pracy na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Sekcja Fotoniki KEiT wspiera wydawanie czasopism z dziedziny fotoniki - Opto-Electronics Review, Optica Applicata, Photonics Letters of Poland oraz International Journal of Electronics and Telecommunications. Sekcja patronuje krajowym i międzynarodowym konferencjom z dziedziny techniki laserowej, światłowodów oraz zastosowań fotoniki.



IEEE Photonics Poland

<https://ieeee.pl/?q=node/49>

IEEE Photonics Poland to oddział lokalny ogólnoświatowej organizacji IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Działalność IEEE Photonics Poland obejmuje między innymi organizację konferencji, warsztatów, seminariów i innych wydarzeń związanych z szeroko rozumianą fotoniką w celu promowania rozwoju nauki i technologii fotonicznych w Polsce poprzez wymianę wiedzy, współpracę naukową i networking wśród profesjonalistów oraz studentów zainteresowanych tą dziedziną.

• candela •

Fundacja Candela

<https://www.candela.org.pl/>

Polska fundacja prywatna założona w 2021 r. Celem jej działalności jest rozwijanie dziedzin optyki, fotoniki i nauk pokrewnych w Polsce, co realizuje przede wszystkim poprzez rozwój studentów, młodych naukowców i młodych przedsiębiorców, a także wspieranie badań naukowych i projektów badawczych. Fundacja jest organizatorem akcji stypendialnych dla studentów oraz konferencji branżowych, wspólnie z PPTF wydaje dwujęzyczny Polski Newsletter Optyki i Fotoniki (PNOF).



Klaster Fotoniki i Światłowodów

<https://klaster-fotoniki.pl/>

Kluczowy klaster krajowy działający w obszarze zaawansowanych technologii fotonicznych. Głównym celem działania klastra jest wspieranie polskiego sektora fotoniki światłowodowej poprzez wspomaganie rozwoju członków klastra oraz transfer innowacyjnych technologii. Misja klastra obejmuje działania na rzecz dostarczania wiedzy, wymiany dobrych praktyk, wspierania innowacyjności oraz stymulowania współpracy firm i instytucji.



microEPC
Klaster Mikroelektroniki,
Elektroniki i Fotoniki

Klaster Mikroelektroniki, Elektroniki i Fotoniki (microEPC)

<https://pptf.pl/klaster-mikroelektroniki-elektroniki-i-fotoniki/>

Klaster powołany w 2023 r. z inicjatywy PPTF oraz Politechniki Warszawskiej. Klaster microEPC to ekosystem zrzeszający podmioty (firmy, uczelnie, instytuty, organizacje) tworzące łańcuchy wartości w obrębie krajowej branży fotoniki i mikroelektroniki. Jego misją jest wspieranie rozwoju polskiej branży mikroelektroniki, elektroniki i fotoniki poprzez tworzenie trwałych ram współpracy opartej na budowie powiązań kooperacyjnych, transferze wiedzy, a także na utworzeniu platformy dialogu i wspólnych działań, prowadzonych przy udziale instytucji rządowych, samorządu oraz instytucji otoczenia biznesu. Klaster nie posiada osobowości prawnej, jego Koordynatorem i reprezentantem jest PPTF.

S2. Wybrane dokumenty strategiczne krajowe i europejskie o kluczowym znaczeniu dla strategii rozwoju fotoniki

1. New Horizons -Securing Europe's strategic autonomy through Photonics, Photonics21 Multiannual Strategic Roadmap 2023–2030, 2023
2. Ocena potencjału oraz perspektyw rozwoju (trendów rozwojowych) sektora technologii fonicznych na Mazowszu (<https://innowacyjni.mazovia.pl/publikacje/raport-z-badania-ocena-potencjalu-oraz-perspektyw-rozwoju-trendow-rozwojowych-sektora-technologii-fonicznych-na-mazowszu.html>)
3. Strategic Research and Innovation Agenda "New Horizons - Securing Europe's strategic autonomy through Photonics"
4. Photonics21 – European Technology Platform. Market Data and Industry Report 2020
5. OIDA Quantum Photonics Roadmap (March 2020), OSA Technical Report, Washington DC
6. Quantum Computing (2020), A technology of the future already present, PWC Technical Report
7. Position Paper on Optics and Photonics Technologies Serving Virtual Worlds - VR AR Industrial Coalition & Photonics21
8. White Paper on Integrated Photonics - EPoSS & Photonics21
9. Quantum PIC Position Paper - Quantum Flagship and Photonics21
10. Strategic Research and Innovation Agenda 2021 (https://www.smart-systems-integration.org/system/files/document/2021-01-15_ECS-SRIA2021_final.pdf)
11. Market Research Study Photonics 2017 (https://www.photonics21.org/download/ppp-services/photonics-downloads/Market-Research-Report_Photonics21_Internet.pdf)
12. Key Digital Technologies - The keys to our digital future – brochure <https://digitalstrategy.ec.europa.eu/en/node/347/printable/pdf>
13. Photonik Forschung Deutschland Licht mit Zukunft, wydawca: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Federalne Ministerstwo Edukacji i Badań - Niemcy) Referat Photonik, Optische Technologien (https://www.photonikforschung.de/media/branche/pdf/BMBF_Photonik_Forschung_Deutschland_final_1.pdf)
14. AGENDA PHOTONIK 2020 - Update 2016, wydawca: BMBF (https://www.photonikforschung.de/media/branche/pdf/2016_Agenda_Photonik_2020_Update_bf_C1.pdf)

Źródła zdjęć i ilustracji (opracowanie własne, chyba, że zaznaczono poniżej inaczej):

Okładka:

- Obraz autorstwa kjpargeter na Freepik, <https://freepik.com/>

Rys. 1.:

- Clean Energy - Obraz autorstwa Freepik, <https://freepik.com/>
- Electromobility - Obraz autorstwa Freepik, <https://freepik.com/>
- Smart agriculture - Obraz autorstwa roroza na Freepik, <https://freepik.com/>
- Pandemic - Obraz autorstwa vecstock na Freepik, <https://freepik.com/>
- IoT - Obraz autorstwa Freepik, <https://freepik.com/>
- Chip Shortage – fot. Krzysztof Anders
- Industry 4.0 - Obraz autorstwa Freepik, <https://freepik.com/>
- Robotization - Obraz autorstwa nuraghies na Freepik, <https://freepik.com/>
- Economic crisis - Obraz autorstwa starline na Freepik, <https://freepik.com/>
- War - Obraz autorstwa Freepik, <https://freepik.com/>
- AI - Obraz autorstwa Freepik, <https://freepik.com/>
- Climate Change - Obraz autorstwa Freepik, <https://freepik.com/>

Rys. 4.:

- Pracownia Technologii Światłowodów, Wydział Chemii, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, <https://opticalfibers.umcs.pl/>
- Corning Optical Communication
- Politechnika Białostocka, #DoświadczajzPB, <https://we.pb.edu.pl/kfeits/nauka-i-badania/bialystok-photonics/laboratories/>
- Fibrain, <https://fibrain.pl/>
- Sieć Badawcza Łukasiewicz, Strona archiwalna, <http://www.itme.edu.pl/index.php?page=departments/z10>

Rys. 5.:

- Sieć Badawcza Łukasiewicz, <https://lukasiewicz.gov.pl/laser-kaskadowy-lukasiewicz-imif/>
- Mode-Locked Technology, <https://mode-locked.com/products>
- fot. Jacek Świdorski, Dział Promocji i Komunikacji WAT
- Fluence Technology, <https://fluence.technology/>
- Kimla, <https://kimla.pl/>
- Microvec, <https://microvec.com/>
- Eagle, <https://eagle-group.eu/pl/>
- Solaris Laser, <https://solarislaser.com.pl/>

Rys. 6.:

- ML System, <https://mlsystem.pl/fotowoltaiczne-szyby-zespolone-2/>

- Klatka z filmu Saule Technologies - Ink-jet printing and crystallization of perovskite, <https://www.youtube.com/watch?v=cRn1aTesLkl>
- Fibrain Energy, <https://energy.fibrain.pl/>

Rys. 7.:

- VIGO Photonics, <https://vigophotonics.com/>

Rys. 8.:

- Scanway, <https://scanway.pl/>
- PolCam Systems, <https://www.polcam.com/>
- KSM Vision, <https://ksmvision.com/>
- Smarttech, <https://skaner3d.pl/>

Rys. 9.:

- System OBRA++, fot. IOE WAT, <https://www.wojsko-polskie.pl/wat/articles/nauka-i-technologia-4/2021-02-15v-obra-ostrzega-przed-promieniowaniem-laserowym/>
- VIGO Photonics, <https://vigophotonics.com/product/butterfly/>
- PCO, <https://pcosa.com.pl/>
- Etronika, <https://www.etrionika.pl/>
- Centrum Rozwojowo-Wdrożeniowe TELESYSTEM-MESKO, <https://telesystem.eu/>

Rys. 10.:

- Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych, <https://nlpqt.fuw.edu.pl/>

Rys. 11.:

- CEZAMAT, <https://cezamat.eu/>

Rys. 12.:

- Strona internetowa ENSEMBLE³, <https://ensemble3.eu/>

Rys. 13.:

- Strona internetowa PORT Centrum Inżynierii Materiałowej, <https://port.lukasiewicz.gov.pl/br/centrum-inzynierii-materialowej/>

Rys. 14.:

- Remarks by Executive Vice-President Vestager, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/speech_23_3158

Wszystkie znaki towarowe w niniejszym raporcie należą do ich właścicieli. Znaki towarowe stron trzecich, nazwy produktów, nazwy handlowe i nazwy firm wymienione w raporcie mogą być znakami towarowymi należącymi do ich właścicieli lub znakami towarowymi zarejestrowanymi przez inne firmy. Te znaki towarowe zostały użyte w celach informacyjnych i na korzyść właściciela znaku towarowego, bez zamiaru naruszenia istniejących praw autorskich.