

## **Komunikacja bezprzewodowa w świetle widzialnym i optycznym w 6G**

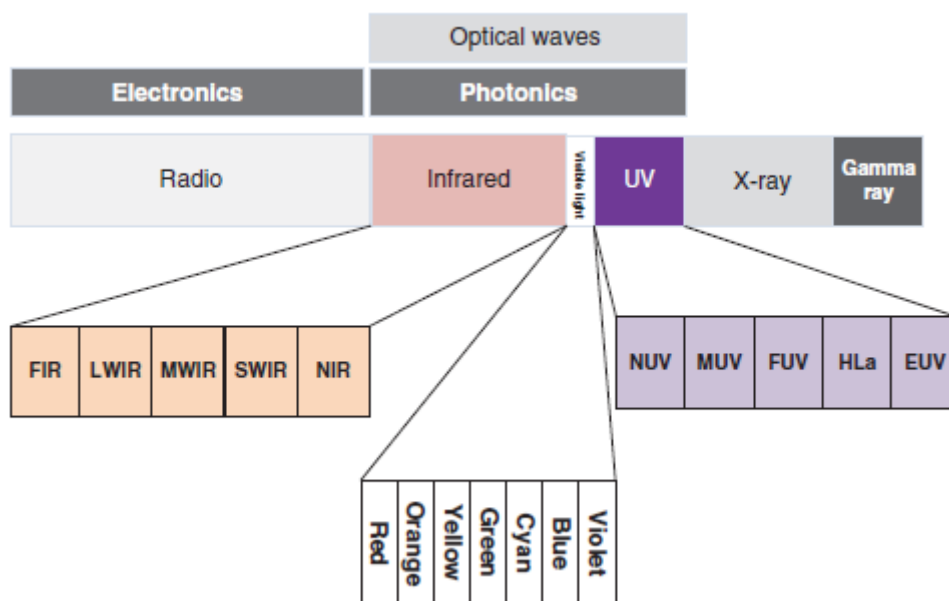
Komunikacja bezprzewodowa w świetle widzialnym (OWC) odnosi się do komunikacji bezprzewodowej wykorzystującej widmo optyczne, w tym podczerwień (IR), światło widzialne i ultrafiolet (UV), jako medium transmisyjne. Jest to obiecująca technologia uzupełniająca dla tradycyjnej komunikacji bezprzewodowej działającej w pasmach częstotliwości radiowych (RF). Systemy OWC wykorzystują światło widzialne do przekazywania informacji, powszechnie określane jako komunikacja w świetle widzialnym (VLC), która przyciągnęła wiele uwagi w ciągu ostatnich lat. Pasma optyczne może zapewnić niemal nieograniczoną przepustowość bez zezwolenia regulatorów na całym świecie. Można je stosować w celu realizacji szybkiego dostępu przy niskich kosztach dzięki dostępności gotowych nadajników i detektorów optycznych (tj. diod elektroluminescencyjnych, diod laserowych i fotodiod). Ponieważ fale IR i UV mają podobne zachowanie jak światło widzialne, zagrożenia bezpieczeństwa i zakłócenia RF można znacznie ograniczyć, a obawy dotyczące promieniowania radiowego dla zdrowia ludzi można wyeliminować. Oczekuje się, że będzie miał oczywiste zalety w scenariuszach wdrożeniowych, takich jak sieci domowe, komunikacja pojazdowa w inteligentnych systemach transportowych, oświetlenie pasażerów samolotów i elektroniczny sprzęt medyczny wrażliwy na zakłócenia RF. Zewnętrzna komunikacja typu punkt-punkt OWC, znana również jako komunikacja Free-Space Optical (FSO), wykorzystuje mocną, wysoko skoncentrowaną wiązkę laserową w nadajniku, aby osiągnąć dużą szybkość transmisji danych na duże odległości do kilku tysięcy kilometrów. Oferuje ekonomiczne rozwiązanie wąskiego gardła w sieciach naziemnych, umożliwia połączenia krzyżowe między platformami kosmicznymi, powietrznymi i naziemnymi oraz ułatwia łącza międzysatelitarne o dużej przepustowości dla powstającej konstelacji satelitów LEO. Ponadto podwodna komunikacja OWC zapewnia wyższe szybkości transmisji niż tradycyjne systemy komunikacji akustycznej przy znacznie niskim zużyciu energii i niskiej złożoności obliczeniowej. Niniejszy rozdział skupi się na kluczowych aspektach komunikacji OWC, składających się z

- Definicja i charakterystyka widma optycznego składającego się z promieniowania IR, światła widzialnego i UV.
- Główne zalety techniczne i wyzwania optycznej komunikacji bezprzewodowej.
- Potencjalne scenariusze zastosowań bezprzewodowej komunikacji optycznej.
- Ewolucja bezprzewodowej komunikacji IR, komunikacji w świetle widzialnym, bezprzewodowej komunikacji UV i komunikacji FSO.
- Konfiguracja transceivera optycznego.
- Główne cechy źródeł optycznych i detektorów, w tym diod elektroluminescencyjnych, diod laserowych i fotodiod.
- Różne konfiguracje łączy optycznych oraz ich zalety i wady.
- Techniki optycznego wielowejściowego wielowyjściowego (MIMO), w tym optyczne multipleksowanie przestrzenne i optyczna modulacja przestrzenna.

### **Widmo optyczne**

Komunikacja bezprzewodowa optyczna odnosi się do komunikacji bezprzewodowej działającej w widmie optycznym, wykorzystującej sygnały optyczne do przekazywania informacji. Jest to obiecująca technologia uzupełniająca dla tradycyjnej komunikacji bezprzewodowej opartej na pasmach częstotliwości radiowych i technologii elektronicznej. Komunikacja w świetle widzialnym, tj. systemy OWC wykorzystujące światło widzialne jako medium transmisyjne, przyciągnęła wiele uwagi w ciągu

ostatnich lat. Ponadto w ciągu ostatnich dziesięcioleci stosowano systemy OWC wykorzystujące sygnały podczerwone i ultrafioletowe, znane również jako komunikacja IR i UV. Widmo optyczne składa się z trzech części: pasm IR, światła widzialnego i UV, jak pokazano na rysunku i w tabeli 1.



Band		Wavelength	Frequency
Infrared	Far infrared (FIR)	15–1000 $\mu\text{m}$	300 GHz to 20 THz
	Long-wavelength infrared (LWIR)	8–15 $\mu\text{m}$	20–37 THz
	Mid-wavelength infrared (MWIR)	3–8 $\mu\text{m}$	37–100 THz
	Short-wavelength infrared (SWIR)	1.4–3 $\mu\text{m}$	100–214 THz
	Near infrared (NIR)	0.75–1.4 $\mu\text{m}$	214–400 THz
Visible	Red	625–750 nm	400–480 THz
	Orange	590–625 nm	480–510 THz
	Yellow	565–590 nm	510–530 THz
	Green	500–565 nm	530–600 THz
	Cyan	485–500 nm	600–620 THz
	Blue	450–485 nm	620–670 THz
	Violet	380–450 nm	670–790 THz
Ultraviolet	Near-UV (NUV)	300–400 nm	750 THz to 1 PHz
	Middle-UV (MUV)	200–300 nm	1–1.5 PHz
	Far-UV (FUV)	122–200 nm	1.5–2.46 PHz
	Hydrogen Lyman- $\alpha$	121–122 nm	2.46–2.48 PHz
	Extreme-UV (EUV)	10–121 nm	2.48–30 PHz

## Podczerwień

Promieniowanie podczerwone, czasami nazywane również światłem IR, jest rodzajem promieniowania elektromagnetycznego, w którym powstaje kontinuum częstotliwości, gdy atomy pochłaniają, a następnie uwalniają energię. Od najniższych do najwyższych częstotliwości promieniowanie

elektromagnetyczne obejmuje fale radiowe, mikrofałe, podczerwień, światło widzialne, ultrafiolet, promienie X i promienie gamma. Promieniowanie IR ma dłuższe długości fal niż światło widzialne. Dlatego jest niewidoczne dla ludzkiego oka, ale możemy je poczuć jako ciepło. Wszystkie obiekty we wszechświecie emitują pewne poziomy promieniowania IR, a najbardziej widocznymi źródłami są słońce i ogień. Promieniowanie IR jest jednym z trzech sposobów przenoszenia ciepła z jednego miejsca do drugiego, pozostałe dwa to konwekcja i przewodzenie. Wszystko o temperaturze powyżej około 5 °K (-450°F lub -268°C) emituje promieniowanie IR. Słońce emituje połowę swojej całkowitej energii jako IR, a większość widzialnego światła gwiazdy jest pochłaniana i ponownie emitowana jako IR. Podczerwień została odkryta w roku 1800 przez brytyjskiego astronoma Williama Herschela, który zauważył rodzaj niewidzialnego promieniowania w widmie niższym niż światło czerwone poprzez jego wpływ na termometr. W eksperymencie mierzącym różnicę temperatur między kolorami w widmie widzialnym umieścił termometry na ścieżce światła w obrębie każdego koloru widma widzialnego. Zaobserwował wzrost temperatury od niebieskiego do czerwonego i znalazł jeszcze cieplejszy pomiar temperatury tuż za czerwonym końcem widma widzialnego. W widmie elektromagnetycznym fale IR występują na częstotliwościach wyższych niż mikrofałe i tuż poniżej światła czerwonego, stąd nazwa IR. Podczerwień rozciąga się od nominalnej czerwonej krawędzi widma światła widzialnego na 750 nanometrach (nm) do jednego mikrometra ( $\mu\text{m}$ ), co odpowiada zakresowi częstotliwości od około 300 GHz do 400 THz, chociaż wartości te nie są ostateczne. Podobnie jak widzialne spektrum światła, które rozciąga się od fioletu (najkrótsza długość fali światła widzialnego) do czerwieni (najdłuższa długość fali), IR ma swój własny zakres długości fal. Krótsze fale NIR, które są bliższe światłu widzialnemu w widmie elektromagnetycznym, nie emitują żadnego wykrywalnego ciepła. Zostały zastosowane w pilocie telewizyjnym, np. do zmiany kanałów. Dłuższe fale dalekiej podczerwieni (FIR), które są bliższe części mikrofalowej w widmie elektromagnetycznym, mogą być odczuwane jako intensywne ciepło, takie jak ciepło ze światła słonecznego lub ognia. FIR częściowo nakładają się na pasmo terahercowe.

### **Światło widzialne**

Światło lub światło widzialne odnosi się do części widma elektromagnetycznego, którą ludzkie oko może wykryć w celu postrzegania jasności i koloru. Światło przenika tak daleko, jak siatkówka w oku i skóra właściwa w skórze. Większość ludzi może postrzegać wizualnie długości fal od około 400 do 700 nm. Obserwując tęczę, ludzie rozpoznali, że białe światło składa się z różnych kolorowych światel: czerwonego, pomarańczowego, żółtego, zielonego, cyjanu, niebieskiego i fioletowego. Pasma światła widzialnego zaczyna się od najdłuższej długości fali (światło fioletowe) około 400 nm do najkrótszej długości fali (światło czerwone) około 700 nm. Zamiast być wyraźnie wytyczone, granice obszaru widma widzialnego dla ludzi wykazują płynne przejścia. Dolny koniec widma optycznego poniżej czerwonej strony widma widzialnego, gdzie światło ma długość fali dłuższą niż jakiegokolwiek światło w widmie widzialnym, nazywany jest IR, podczas gdy górny koniec poza fioletową stroną widma widzialnego, gdzie światło ma długość fali krótszą niż jakiegokolwiek światło w widmie widzialnym, nazywany jest UV. Ponadto wzrok człowieka i wrażliwość na światło zmieniają się w ciągu jego życia z powodu procesów starzenia się w oku. Zwłaszcza w przypadku krótkiej długości fali części widma widzialnego (światło niebieskie) przejrzystość soczewki zmniejsza się wraz z wiekiem. Głównym naturalnym źródłem promieniowania świetlnego jest słońce i inne źródła, takie jak oświetlenie. Jednak nasze codzienne życie charakteryzuje się również wieloma sztucznymi źródłami światła. Światło nie tylko pozwala nam widzieć otoczenie, ale ma również inne biologiczne skutki i wpływa na cykl snu. Istnieje jednak ryzyko uszkodzenia, zwłaszcza oczu i skóry, jeśli intensywność światła przekroczy pewne progi efektu.

### **Ultrafiolet**

Światło UV odnosi się do obszaru widma elektromagnetycznego pomiędzy światłem widzialnym a promieniami rentgenowskimi, o długościach fal mieszczących się pomiędzy 10 nm (odpowiadającym częstotliwości 30 PHz) i 400 nm (750 THz), krótszych niż światło widzialne, ale dłuższych niż promienie rentgenowskie. Około 10% całkowitego promieniowania elektromagnetycznego ze Słońca to światło UV. Nie jest ono widoczne dla ludzkiego oka, ponieważ ma krótszą długość fali niż światło, które nasz mózg postrzega jako obrazy, podczas gdy wiele ptaków i owadów może wizualnie postrzegać światło UV. Promieniowanie UV zostało odkryte w 1801 roku, gdy niemiecki fizyk Johann Wilhelm Ritter zaobserwował, że niewidzialne światła tuż za fioletowym końcem widzialnego widma przyciemniają papier nasączony chlorkiem srebra szybciej niż światło fioletowe. Nazwał je promieniami odtleniającymi, aby podkreślić jego reaktywność chemiczną, aby odróżnić je od promieni ciepłych (IR) odkrytych w poprzednim roku po drugiej stronie widzialnego widma. W 1893 roku niemiecki fizyk Victor Schumann odkrył promieniowanie UV o długości fali poniżej 200 nm, nazwane „ultrafioletem próżniowym”, ponieważ tlen w powietrzu silnie je pochłania. Naturalnym źródłem promieniowania UV jest światło słoneczne, które dzieli się na trzy różne typy:

- Promieniowanie UV-A (320 nm do 400 nm) jest powszechnie znane jako światło czarne, które jest stosowane w celu wywoływania emisji fluorescencji przez obiekty w celach artystycznych i celebracyjnych. Wiele owadów i ptaków może postrzegać promieniowanie UV-A wizualnie.
- Promieniowanie UV-B (290 nm do 320 nm) powoduje oparzenia słoneczne skóry przy długotrwałej ekspozycji na światło słoneczne, zwiększając ryzyko raka skóry i innych uszkodzeń komórkowych. Jednak około 95% całego promieniowania UV-B ze Słońca może zostać pochłonięte przez warstwę ozonową w atmosferze Ziemi.
- Promieniowanie UV-C (100 nm do 290 nm) to najwyższa część energii promieniowania UV. Jest ono wysoce szkodliwe dla zdrowia ludzkiego, ale warstwa ozonowa Ziemi pochłania je niemal w całości. Jest powszechnie stosowane jako środek dezynfekujący do żywności, powietrza i wody, aby zabijać mikroorganizmy poprzez niszczenie kwasów nukleinowych ich komórek.

Ekspozycja na światło UV-B pomaga skórze wytwarzać rodzaj witaminy D, która wspomaga wchłanianie wapnia i odgrywa kluczową rolę w zdrowiu kości i mięśni. Jednak długotrwałe narażenie na fale UV-A i UV-B bez odpowiedniej ochrony może powodować poważne oparzenia skóry i urazy oczu. Krem przeciwsłoneczny jest niezbędnym środkiem ostrożności przed promieniowaniem UV, ponieważ zapewnia warstwę ochronną, która pochłania fale UV-A i UV-B przed wpływem na skórę. Przy dużej ekspozycji na światło słoneczne bez ochrony ryzyko zachorowania na raka skóry i inne niebezpieczne schorzenia komórkowe dramatycznie wzrasta. Oczywiście należy również chronić przed promieniowaniem UV na zewnątrz, nosząc okulary przeciwsłoneczne zaprojektowane tak, aby blokować promienie UV-A i UV-B. W przeciwnym razie powoduje krótkotrwałe skutki, takie jak fotokeratitis (znane w niektórych przypadkach jako ślepotą łukowa lub śnieżna) lub poważne długotrwałe schorzenia, w tym zaćmę, która prowadzi do ślepoty. Badając światło przechodzące przez przestrzeń kosmiczną, naukowcy często używają innego zestawu podtypów UV zajmujących się obiektami astronomicznymi, tj.

- Promieniowanie bliskiego ultrafioletu (NUV)
- Promieniowanie średniego ultrafioletu (MUV)
- Promieniowanie dalekiego ultrafioletu (FUV)
- Promieniowanie wodorowe Lyman-alfa

- Promieniowanie ekstremalnego ultrafioletu (EUV) może przemieszczać się tylko przez próżnię i jest całkowicie pochłaniane przez atmosferę Ziemi. Promieniowanie EUV jonizuje górne warstwy atmosfery, tworząc jonosferę. Ponadto termosfera Ziemi jest ogrzewana głównie przez fale EUV pochodzące ze Słońca. Ponieważ słoneczne fale EUV nie mogą przenikać przez atmosferę, naukowcy muszą je mierzyć za pomocą satelitów kosmicznych.

### Zalety i wyzwania

W porównaniu z tradycyjną komunikacją bezprzewodową działającą w pasmach RF, OWC wykazują pewne szczególne zalety:

- Ogromne zasoby widmowe Widmo optyczne obejmuje w przybliżeniu od 300 GHz do 30 PHz, co daje bardzo masywne dostępne zasoby widmowe wynoszące około 30 000 THz, co stanowi setki tysięcy razy więcej niż szerokość pasma zapewniana przez fale radiowe. Oznacza to, że zasoby widmowe nie są już wąskim gardłem komunikacji bezprzewodowej i musimy przemyśleć tradycyjne podejścia mające na celu wysoką wydajność widmową, aby osiągnąć wysoką szybkość transmisji danych przy ograniczonej szerokości pasma.

- Działanie bez licencji Częstotliwości radiowe, zwłaszcza pasmo sub-6 GHz, przenoszą wiele kluczowych usług, takich jak komunikacja, nawigacja, radar, nadawanie radiowe i telewizyjne, satelita i radioastronomia, z których większość wymaga jak największej szerokości pasma. Dlatego regionalne i światowe organy regulacyjne muszą narzucić surowe zasady dotyczące widma radiowego w celu przydzielenia zasobów i uniknięcia wzajemnych zakłóceń. Operatorzy sieci komórkowych cierpią z powodu wysokich wydatków na licencje widmowe. Natomiast widmo optyczne nie miało takich ograniczeń do tej pory ze względu na swoje ogromne widmo, właściwości transmisji o wysokiej kierunkowości i odporność na zakłócenia.

- Odporność na zakłócenia radiowe Zakłócenia radiowe powodują zakłócenia w obwodzie elektrycznym z powodu promieniowania elektromagnetycznego lub indukcji elektromagnetycznej. Tymczasem zakłócenia między- lub wewnątrzsystemowe systemów komunikacji bezprzewodowej, takie jak zakłócenia wielu użytkowników, zakłócenia międzykomórkowe, zakłócenia sąsiedniego kanału i promieniowanie poza pasmem, znacznie pogarszają wydajność systemu. Dlatego też potencjalne źródła zakłóceń radiowych, w tym sprzęt elektroniczny powszechnego użytku, są proszone o wyłączenie w samolotach lub szpitalach. Ponadto promieniowanie radiowe jest potencjalnie niebezpieczne w niebezpiecznych operacjach, takich jak elektrownie, generatory jądrowe i kopalnie podziemne. Ponadto moc transmisji sprzętu radiowego powinna być poniżej pewnego regulowanego poziomu, ponieważ istnieją poważne zagrożenia dla zdrowia ludzi narażonych na wysokie promieniowanie radiowe przez długi czas. Natomiast światło nie powoduje zakłóceń radiowych. Dlatego systemy OWC mogą zapewnić wyjątkowe korzyści podczas wdrażania w określonych miejscach, w których tradycyjna komunikacja bezprzewodowa jest zabroniona.

- Transceiver OWC o niskim koszcie wykorzystuje diodę elektroluminescencyjną (LED) lub diodę laserową (LD) jako źródło optyczne do konwersji sygnału elektrycznego na sygnał optyczny w nadajniku, podczas gdy odbiornik wykorzystuje fotodiodę (PD) do konwersji sygnału optycznego na prąd elektryczny. Informacje są przekazywane poprzez modulację intensywności impulsu optycznego po prostu za pomocą kluczowania włącz-wyłącz lub modulacji położenia impulsu. W przeciwieństwie do drogich komponentów RF i złożonych transceiverów stosowanych w komunikacji RF, te komponenty optyczne (tj. diody LED, LD i PD) są dostępne od dawna i są łatwo dostępne na rynku. Ponadto te komponenty optyczne są tanie, lekkie, wysoce energooszczędne, emitują niskie promieniowanie cieplne i mają długą żywotność.

- Wewnętrzne bezpieczeństwo Transmisja bezprzewodowa na częstotliwościach RF ma dobre właściwości nadawcze z szerokim zasięgiem, a sygnały bezprzewodowe mogą łatwo przenikać przez ściany ze względu na długie długości fal radiowych. Dlatego podsłuchujący może łatwo przechwycić sygnały w dowolnym miejscu bez możliwości wykrycia. Natomiast fale optyczne nie mogą przenikać obiektów na swojej drodze i jest bardziej prawdopodobne, że zostaną odbite. Tymczasem sygnały optyczne mają wewnętrzną cechę rozprzestrzeniania się w sposób wysoce kierunkowy, a nie nadawczy. Stąd komunikacja bezprzewodowa w pasmach optycznych zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa.

- Adaptacyjny zasięg transmisji OWC zapewnia elastyczne odległości transmisji w zależności od scenariuszy wdrożenia i zastosowanych źródeł optycznych. Na przykład przy użyciu tanich diod LED o niskiej mocy sygnały optyczne mogą być przesyłane na odległość kilku milimetrów lub kilku metrów w przypadku komunikacji krótkiego zasięgu, podczas gdy odległość transmisji sięga do kilku tysięcy kilometrów przy użyciu wiązek laserowych dużej mocy w przypadku niektórych scenariuszy dalekiego zasięgu, takich jak międzysatelitarne łącza FSO i naziemno-satelitarna komunikacja laserowa

Pomimo swojej przewagi, OWC ma pewne szczególne problemy, które nie są poważne w przypadku komunikacji radiowej, takie jak tłumienie pogodowe, absorpcja atmosferyczna, scyntylacja, błędy ustawienia i ochrona przed zagrożeniami dla ludzi.

- Tłumienie pogodowe Niekorzystne warunki pogodowe mogą mieć wpływ na działanie zewnętrznych OWC (lub komunikacji FSO), pogarszając wydajność lub prowadząc do awarii systemu. Rozpraszanie oznacza odchylenie padającego światła od jego początkowego kierunku, co powoduje rozprzestrzenianie przestrzenne, kątowe i czasowe. Osłabia energię sygnałów optycznych o rząd wielkości dziesiątek lub setek decybeli na kilometr i zniekształca przesyłany sygnał. Dokładny mechanizm rozpraszania zależy od stosunku wielkości cząstek do długości fali promieniowania. Gdy stosunek ten jest bliski jedności, sygnały optyczne ulegają silnemu rozproszeniu. Przy częstotliwościach milimetrowych i terahercowych deszcz i śnieg mogą utrudniać propagację sygnału. Jednak krople deszczu i płatki śniegu są znacznie większe niż długości fal optycznych. Najbardziej szkodliwymi warunkami atmosferycznymi są mgła i mżawka ze względu na ich porównywalne promienie o tym samym rzędzie wielkości co długości fal sygnałów optycznych.

- Absorpcja atmosferyczna Cząsteczki w atmosferze, takie jak tlen i para wodna, mogą pochłaniać energię światła, narzucając tłumienie mocy optycznej. Ta absorpcja zależy od długości fali, tak że dana sytuacja atmosferyczna może być przezroczysta dla niektórych rodzajów światła, podczas gdy inne mogą być całkowicie blokowane. Na przykład światło podczerwone jest pochłaniane głównie przez parę wodną i dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>) w atmosferze, podczas gdy absorpcja przez tlen (O<sub>2</sub>) i ozon (O<sub>3</sub>) silnie tłumi światło UV. Obszary dobrej transmisji nazywane są oknami absorpcji swobodnej i znajdują się w pasmach widzialnym i bliskiej podczerwieni. Przy średnich długościach fal IR występuje więcej okien absorpcji w zakresie od 3 μm do 5 μm i od 8 μm do 12 μm, ale powyżej 22 μm absorpcja pary wodnej ponownie wzrasta do poziomów uniemożliwiających transmisję. Pogoda często może się szybko zmieniać, a wraz ze zmianą zawartości molekularnej atmosfery zmieniają się również właściwości transmisji kanału propagacyjnego. Zmiany te mogą poważnie wpłynąć na dostępność łącza transmisji optycznej.

- Turbulencja Zmienne warunki atmosferyczne powodują turbulencje z powodu różnych temperatur, ciśnień atmosferycznych i poziomów wilgotności w ośrodkach propagacyjnych. Prowadzi to do migotania światła i wędrówki wiązki. Innymi słowy, moc optyczna uzyskana przez odbiornik zmienia się w czasie, a położenie padającego światła zmienia się w przestrzeni. Zjawisko to wynika z otworów wentylacyjnych klimatyzacji w pobliżu transceivera, ciepła promieniowania z dachu lub prądów

zanieczyszczeń w atmosferze. Gradienty temperatury i wilgotności powodują zmiany współczynnika załamania światła w atmosferze, co jest źródłem zniekształceń optycznych. Wiatry i zachmurzenie również wpływają na poziom turbulencji, a nawet pora dnia może zmieniać gradienty temperatury. Wiele wcześniejszych badań w pokrewnych dziedzinach opracowało narzędzia statystyczne do modelowania zależności współczynnika załamania światła od temperatury otoczenia, ciśnienia i wilgotności, a także od długości fali promieniowania.

- Wyrównanie wiązki Zewnętrzne OWC w dużym stopniu opierają się na transmisji w linii wzroku. Dlatego też konieczne jest ciągłe utrzymywanie wyrównania między nadajnikiem a odbiornikiem podczas komunikacji. Jednak dokładne wyrównanie jest szczególnie trudne przy wąskich kątach rozbieżności wiązki przy nadajniku i wąskich polach widzenia (FOV) przy odbiorniku. Zewnętrzny sprzęt OWC jest zazwyczaj instalowany na szczycie wysokich budynków. Kołysanie się budynku spowodowane rozszerzalnością cieplną części szkieletu budynku lub słabymi trzęsieniami ziemi może powodować rozbieżność. Pierwsze może mieć cykl dzienny i sezonowe cechy, podczas gdy drugie jest zwykle nieprzewidywalne. Inną częstą przyczyną rozbieżności są silne wiatry, zwłaszcza gdy sprzęt OWC jest montowany na wysokich budynkach. Pod wpływem dynamicznych obciążeń wiatrem wiele wysokich budynków kołysze się w kierunku wzdłużnym i poprzecznym wiatru lub skręca się z powodu skręcania. Poziomy ruch budynku spowodowany tymi efektami może się wahać od 1/200 do 1/800 wysokości budynku. Budowanie kołysania prowadzi do błędów w kierowaniu wiązką, co pogarsza wydajność systemu. Dlatego też outdoorOWC potrzebuje systemu śledzenia i wskazywania, aby utrzymać dokładne wyrównanie. Ten proces wyrównywania składa się z dwóch etapów, tj. zgrubnego śledzenia i dokładnego wskazywania. Wykorzystuje informacje o lokalizacji GPS lub inną wiedzę a priori, aby najpierw osiągnąć zgrubne śledzenie. Następnie wymaga mechanizmów elektrooptycznych, takich jak detektor kwadraturowy lub matrycowy, aby precyzyjnie kierować wiązkami.

- Bezpieczeństwo i przepisy Narażenie na światło może spowodować obrażenia zarówno skóry, jak i oka, ale uszkodzenie oka jest znacznie poważniejsze, ponieważ oko może koncentrować energię światła, obejmując długości fal od około 0,4 do 1,4  $\mu\text{m}$ , na siatkówce. Światło o innych długościach fal jest filtrowane przez przednią część oka (tj. rogówkę), zanim energia zostanie skoncentrowana. Ponadto niewidzialne światło w paśmie bliskiej podczerwieni również stwarza zagrożenie bezpieczeństwa dla oczu człowieka, jeśli jest obsługiwane nieprawidłowo. W związku z tym projektowanie, wdrażanie i działanie systemów komunikacji optycznej musi zapewniać bezpieczeństwo promieniowania optycznego, aby uniknąć obrażeń u osób, które mogą się z nim zetknąć. Źródła optyczne i detektory o długości fali 0,7–1,0  $\mu\text{m}$  są tanie, ale przepisy dotyczące bezpieczeństwa oczu są szczególnie rygorystyczne. Przy dłuższych długościach fal powyżej 1,5  $\mu\text{m}$  przepisy dotyczące bezpieczeństwa oczu są znacznie łagodniejsze, ale komponenty optyczne są stosunkowo drogie. Istnieje już kilka wytycznych dotyczących sprzętu laserowego lub przepisów dotyczących bezpieczeństwa wiązek optycznych, wydanych przez międzynarodowe organy normalizacyjne lub regulacyjne, takie jak normy American National Standards Institute (ANSI) Z136.1 dotyczące stosowania laserów, normy International Electrotechnical Commission (IEC) dotyczące laserów i sprzętu laserowego (IEC60825-1) oraz prawo (21 CFR 1040) amerykańskiej Agencji ds. Żywności i Leków (FDA). Tabela 2 podsumowuje główne cechy i wymagania dla systemu klasyfikacji zgodnie z normą IEC 60825-1.

Type	Description
Class 1	Low-power device emitting radiation at a wavelength in the band 302.5–4000 nm. Device intrinsically without danger from its technical design under all reasonably foreseeable usage conditions, including vision using optical instruments (binoculars, microscope, monocular).
Class 1M	Same as Class 1, but there is the possibility of danger when viewed with optical instruments (binoculars, telescope, etc.). Class 1M lasers produce large-diameter beams or beams that are divergent.
Class 2	Low-power device emitting visible radiation (400–700 nm). Eye protection is normally ensured by the defense reflexes, including the palpebral reflex (closing of the eyelid). The palpebral reflex provides effective protection under all reasonably foreseeable usage conditions, including vision using optical instruments (binoculars, microscope, monocular).
Class 2M	Low-power device emitting visible radiation (400–700 nm). Eye protection is normally ensured by the defense reflexes, including the palpebral reflex (closing of the eyelid). The palpebral reflex provides an effective protection under all reasonably foreseeable usage conditions, with the exception of vision using optical instruments (binoculars, microscope, monocular).
Class 3R	Average-power device emitting radiation in the 302.5–4000 nm band. Direct vision is potentially dangerous. Generally located on rooftops.
Class 3B	Average-power device emitting radiation in the 302.5–4000 nm band. Direct vision of the beam is always dangerous. Medical checks and specific training required before installation or maintenance is carried out. Generally located on rooftops.
Class 4	There is always danger to the eye and skin, fire risk exists. Must be equipped with a key switch and a safety interlock. Medical checks and specific training required before installation or maintenance is carried out.

### Zastosowania OWC

System OWC nie może całkowicie zastąpić roli komunikacji radiowej ze względu na pewne ograniczenia, takie jak niska mobilność i funkcje typu punkt-punkt. Jest jednak obiecujący jako technologia uzupełniająca komunikację radiową, wdrażana w szczególnych scenariuszach, w których inne środki komunikacji nie mogą działać dobrze. Dlatego też może być przyjęty w wielu zastosowaniach, w tym

- Dostęp szerokopasmowy na ostatniej mili: FSO jest stosowany w celu rozwiązania problemu wąskiego gardła na ostatniej mili między użytkownikami a światłowodowym szkieletem, gdzie instalacja sieci światłowodowej jest trudna lub zbyt kosztowna. Jest atrakcyjny w szczególnych scenariuszach wdrożeniowych, takich jak łączność między budynkami w gęsto zaludnionych obszarach, łączność przez rzekę, tory kolejowe i ulice, komunikacja między wyspami i sieci kampusowe. Sprzęt FSO typu punkt-punkt o zasięgu od 50 m do kilku kilometrów jest łatwo dostępny na rynku z szybkością transmisji danych rzędu Gb/s.

Inteligentny system transportowy: VLC może być stosowany w komunikacji pojazd-pojazd i pojazd-infrastruktura. Na przykład większość obecnych pojazdów jest wyposażona w lampy LED, które działają jako nadajniki do przesyłania informacji o ruchu drogowym, bezpieczeństwie i innych informacji między dwoma pojazdami. Ponadto sygnalizacja świetlna, latarnie uliczne i niektóre elementy infrastruktury, takie jak stacje benzynowe, mogą stać się węzłami komunikacyjnymi do przeprowadzania komunikacji danych i wymiany natychmiastowych informacji o ruchu drogowym.



- **Komunikacja pokładowa:** Innym obiecującym zastosowaniem OWC jest usługa komunikacji pasażerskiej w samolotach, pociągach lub statkach. W tym scenariuszu pasażerowie mogą uzyskać dostęp do sieci za pomocą lampek do czytania wykorzystujących białe diody LED zainstalowane w suficie, pozyskując dane z serwerów pokładowych (np. wiadomości podróżne w czasie rzeczywistym, rezerwacje gastronomiczne i rozrywka) lub łącząc się z Internetem za pośrednictwem pokładowej bramki. Może to ominąć zasadę wyłączania osobistego sprzętu elektronicznego ze względu na możliwe zakłócenia radiowe samolotów.
- **Scenariusze wrażliwe na zakłócenia:** OWC jest odporny na zakłócenia radiowe, co jest atrakcyjne w przypadku szczególnych scenariuszy wrażliwych na takie zakłócenia. W szpitalach, zwłaszcza w obszarach oddechowych i anestetycznych, część sprzętu medycznego jest podatna na zakłócenia różnymi falami radiowymi. Dlatego wdrożenie systemu OWC może przynieść korzyści ich działaniu. Podobna sytuacja ma miejsce w samolotach, gdzie sprzęt elektroniczny pasażerów musi się wyłączać podczas startu i lądowania. W fabrykach Przemysłu 4.0 duża liczba autonomicznych urządzeń, takich jak ramiona robotyczne i automatycznie sterowane pojazdy (AGV), wymaga łączności bezprzewodowej, co narzuca złożone środowisko radiowe z dużym prawdopodobieństwem wzajemnych zakłóceń, w którym OWC może również odgrywać ważną rolę.
- **Ekstremalne środowisko:** W kopalniach podziemnych korzystanie z komunikacji radiowej może spowodować eksplozję z powodu mocy transmisji. Z drugiej strony, żadne techniki bezprzewodowe, z wyjątkiem OWC, nie mogą ustanowić szybkiego łącza komunikacyjnego pod wodą. W tym kontekście OWC jest bezpieczną i wysoce adaptacyjną technologią, która zapewnia oświetlenie i transmisję danych jednocześnie.
- **Łączność dalekiego zasięgu:** Korzystając z wiązek laserowych o dużej mocy i wysokiej koncentracji, FSO może skutecznie połączyć dwie strony komunikacyjne w odległości od kilku kilometrów do kilku tysięcy kilometrów. Jest to korzystne w przypadku niektórych scenariuszy wdrażania, takich jak łącza przestrzeń-ziemia, łącza międzysatelitarne, łącza międzyplatformowe i łączność między sieciami pozaziemskimi.
- **Nadmiarowe łącze i odzyskiwanie po awarii:** łączność FSO można szybko wdrożyć, aby zapewnić zapasowe łącze transmisyjne w przypadku uszkodzenia lub awarii połączenia światłowodowego. Klęski żywiołowe, ataki terrorystyczne i zdarzenia tymczasowe wymagają elastycznego wdrażania i terminowych reakcji. Tymczasowe łącza FSO można łatwo ustanowić w ciągu kilku godzin w sytuacjach awaryjnych, w których lokalna infrastruktura mogłaby zostać uszkodzona lub przesycona. Bolesny przykład wydajności wdrażania FSO jako nadmiarowego łącza zaobserwowano po atakach terrorystycznych z 11 września w Nowym Jorku. Łącza FSO zostały szybko wdrożone w tym obszarze dla korporacji finansowych, które zostały pozbawione linii stacjonarnych.
- **Oświetlenie wewnętrzne-komunikacja:** dzięki odpowiedniemu rozmieszczeniu lamp LED system OWC może zapewnić oświetlenie i komunikację danych w scenariuszach wewnętrznych, takich jak szkoły, uniwersytety, biblioteki, centra handlowe, dworce kolejowe, lotniska i biura. Jest to alternatywny sposób zapewnienia sieci o wysokiej przepustowości oprócz obecnych bezprzewodowych sieci lokalnych działających na częstotliwościach radiowych. W tym kontekście komunikacja za pomocą linii energetycznych i OWC mogą być naturalnie łączone, gdzie kabel zasilający służy zarówno jako źródło zasilania, jak i przesył zwrotny do diod LED.
- **Łączność wojskowa:** Zalety stosowania optycznej bezprzewodowej komunikacji wojskowej w porównaniu z konwencjonalną komunikacją radiową są potrójne: (i) W przeciwieństwie do nadawania fal radiowych, sygnały optyczne są wysoce kierunkowe i podatne na blokadę, co podnosi poziom bezpieczeństwa, ponieważ podsłuchujący mają trudności z przechwyceniem tych sygnałów. (ii) OWC

może poprawić niewidzialność sprzętu wojskowego, ponieważ nie ma sygnatury radiowej, która umożliwiłaby wykrycie go przez pasywne radary. Ponadto wysoka kierunkowość wiązek optycznych znacznie obniża prawdopodobieństwo narażenia na działanie systemów monitorujących. (iii) Sprzęt wojskowy wykorzystujący OWC jest odporny na zakłócenia radiowe i zagłuszanie, natomiast technologia zakłóceń w paśmie optycznym nadal stanowi wyzwanie.

### **Ewolucja bezprzewodowej komunikacji optycznej**

Mówiąc ogólnie, wymiana informacji-przekazów za pomocą dymu, ognisk, pochodni, semaforów i światła słonecznego od czasów starożytnych może być uznana za historyczne formy OWC. Najwcześniejsze wykorzystanie światła do celów komunikacyjnych przypisuje się starożytnym Grekom i Rzymianom, którzy używali swoich polerowanych tarcz do błyskania światłem słonecznym w celu przekazywania prostych wiadomości w bitwach około 800 r. p.n.e. W starożytnych Chinach żołnierze wzdłuż Wielkiego Muru wysyłali sygnały dymne na wieżach sygnalizacyjnych, aby ostrzec przed wrogą inwazją. Budując wieże sygnalizacyjne w regularnych odstępach czasu, można realizować komunikację dalekiego zasięgu wzdłuż Muru na przestrzeni kilku tysięcy kilometrów. Pod koniec XIX wieku heliografy były powszechnie wykorzystywane do komunikacji wojskowej, wykorzystując parę lusterek do kierowania kontrolowanym strumieniem światła słonecznego w ciągu dnia i niektórych innych form jasnego światła w nocy. Kolejnym historycznym kamieniem milowym w dziedzinie OWC jest fotofon wynaleziony przez Alexandra Grahama Bella i jego asystenta Charlesa Sumnera Taintera w 1880 roku. Fotofon przesyłał sygnały głosowe za pomocą sygnałów optycznych na odległość około 200 m. Drgania wywołane głosem na lustrze nadajnika były odbijane przez światło słoneczne do odbiornika, który zamieniał takie drgania z powrotem na głos. We współczesnym rozumieniu diody LED i diody LD są używane jako źródła optyczne w systemach OWC, podzielonych na bezprzewodową komunikację IR, VLC i bezprzewodową komunikację UV [Xu i Sadler, 2008] pod względem długości fal sygnałów optycznych. Ponadto zewnętrzne OWC do transmisji dalekiego zasięgu za pomocą lasera dużej mocy jest dedykowane technice zwanej komunikacją FSO

### **Bezprzewodowa komunikacja w podczerwieni**

Bezprzewodowa transmisja w paśmie IR została po raz pierwszy zaproponowana jako metoda komunikacji krótkiego zasięgu kilka dekad temu. Ponieważ transceivery IR są zazwyczaj lekkie, tanie, zużywają mało energii i są łatwe w produkcji, są szeroko stosowane do zdalnego sterowania telewizorami, klimatyzatorami, odtwarzaczami DVD i zabawkami elektronicznymi. W latach 70. zaprezentowano wewnętrzny system transmisji bezprzewodowej wykorzystujący IR o długości fali 950 nm do łączenia klastr terminali danych o zasięgu do 50 m. Początkowo produkty komercyjne różnych producentów nie mogły być interoperacyjne, co wymagało ustanowienia uniwersalnego standardu komunikacji IR. W związku z tym w 1993 r. utworzono Infrared Data Association (IrDA), organizację standaryzacyjną sponsorowaną przez branżę, w celu określenia specyfikacji fizycznego interfejsu IR i protokołów komunikacyjnych dla komunikacji danych krótkiego zasięgu w aplikacjach takich jak sieci osobiste. Produkty IrDA Commercial IrDA zapewniają przepustowość danych od 9,6 kbps do 16 Mb/s w krótkich łączach w linii wzroku, wahających się od mniej niż metra do kilku metrów. W warstwie MAC można stosować różne protokoły, takie jak Infrared Mobile Communications (IrMC), Infrared Communications (IrCOMM) i Object Exchange (OBEX), a także protokół Ultra-Fast Infrared (UFIR), który obsługuje przepustowość danych do 100 Mb/s. Ponieważ odbiornik optyczny urządzenia IR może zostać oślepiony przez transmitowane światło, stosuje się tryb pracy półdupleksowej. Technologie warstwy fizycznej rozproszonej podczerwieni i warstwy kontroli dostępu do medium dla bezprzewodowych sieci lokalnych zostały określone w grupie roboczej IEEE 802.11 już w 1999 r. W przeciwieństwie do IrDA, system IR WLAN nie działa w linii wzroku, odbijając sygnały od ścian i sufitów. Może działać w sąsiednich pomieszczeniach niezależnie, bez żadnych wzajemnych zakłóceń, z bardzo

niskim prawdopodobieństwem podsłuchu. Na koniec, ale nie mniej ważne, systemy komunikacji laserowej IR mogą być również używane do transmisji dalekiego zasięgu. Typowe scenariusze wdrożenia obejmują łącza między budynkami dla sieci metropolitalnych lub kampusowych. Takie systemy są ściśle typu punkt-punkt i są wrażliwe na mgłę i inne warunki pogodowe.

### **Komunikacja za pomocą światła widzialnego**

W przeciwieństwie do komunikacji IR i UV, VLC może jednocześnie zapewniać oświetlenie i łączność bezprzewodową. Białe diody LED mają wysoką skuteczność świetlną (stosunek strumienia świetlnego do zużytej mocy elektrycznej) wynoszącą ponad 100 lumenów/wat w porównaniu z odpowiednio 15 lumenami/wat i 60 lumenami/wat w przypadku żarówek i świetlówek. Ponadto białe diody LED mają długą żywotność wynoszącą około 50 000 godzin, podczas gdy żarówki i świetlówki zwykle mogą zużywać odpowiednio 1200 i 10 000 godzin. W rezultacie popularyzacja oświetlenia LED wzrosła na całym świecie. Pomysł jednoczesnego oświetlenia i komunikacji przy użyciu szybko przełączających się diod LED do modulacji światła widzialnego został po raz pierwszy zaproponowany w 1999 roku. W 2001 r. projekt Reasonable Optical Near Joint Access (RONJA) firmy Twibright Labs wdrożył system VLC w celu zbudowania 10-megapikselowego połączenia bezprzewodowego typu punkt-punkt o zasięgu 1,4 km. Grupa badawcza z Keio University w Japonii zaproponowała w 2000 r. wykorzystanie białych diod LED do bezprzewodowego łącza komunikacyjnego w domu [Tanaka i in., 2000]. W celu promowania i standaryzacji bezpiecznej, wydajnej komunikacji z wykorzystaniem światła widzialnego, w 2003 r. Nakagawa Laboratories we współpracy z CASIO, NEC i Toshiba w Japonii założyło Visible Light Communication Consortium (VLCC). W 2006 r. naukowcy z Pennsylvania State University zaproponowali wykorzystanie technologii komunikacji za pomocą linii energetycznych jako łącza zwrotnego VLC w celu zapewnienia szerokopasmowego dostępu do aplikacji wewnętrznych. W 2010 roku wspólny zespół badawczy Siemens i Instytutu Heinricha-Hertza, Fraunhofer zademonstrował szybkość transmisji 500 Mb/s przy użyciu białej diody LED na odległość 5 m i 100 Mb/s na większą odległość przy użyciu pięciu diod LED w Berlinie. W 2011 roku grupa robocza IEEE 802.15 zatwierdziła pierwszy standard OWC krótkiego zasięgu wykorzystujący światło widzialne, znany jako IEEE 802.15.7. Ma on na celu zapewnienie szybkości transmisji danych wystarczającej do obsługi usług multimedialnych audio i wideo, a także bierze pod uwagę mobilność łącza widzialnego. Specyfikacje IEEE 802.15.7 obejmują projekt warstwy fizycznej wykorzystujący długości fal światła od 380 do 780 nm oraz podwarstwę MAC, która uwzględni wyjątkowe potrzeby łączy widzialnych. Na podstawie standardu IEEE VLC, termin Light Fidelity (Li-Fi) został wymyślony przez Haraldą Haasa, zapewniając dwukierunkowy system VLC poprzez wykorzystanie fal IR lub częstotliwości radiowych do łącza w górę. Później grupa zadaniowa IEEE 802.15.7 kontynuowała rozwój standardu IEEE 802.15.7 r1, mając na celu zapewnienie trzech głównych funkcji, w tym komunikacji optycznej kamery (OCC), Li-Fi i identyfikacji diody elektroluminescencyjnej (LED-ID), jako zbieżności oświetlenia, komunikacji danych i pozycjonowania. Szybkość transmisji ponad 3 Gb/s z pojedynczej diody LED została zademonstrowana w 2014 r., a szybkość 56 Gb/s została osiągnięta przy użyciu lasera emitującego powierzchnię z pionową wnęką.

### **Bezprzewodowa komunikacja ultrafioletowa**

W całym spektrum UV (10–400 nm) pasmo UV-C (100–290 nm) wykazuje duży potencjał jako medium do komunikacji bezprzewodowej ze względu na możliwość transmisji poza linię wzroku i wpływ pomijalnego szumu otoczenia. Przede wszystkim promieniowanie UV w paśmie UV-C jest ślepe na słońce, ponieważ większość promieniowania słonecznego jest pochłaniana przez warstwę ozonową w górnej atmosferze Ziemi. W rezultacie powstaje prawie pomijalny szum otoczenia w paśmie i idealny kanał transmisji naziemnej. Po drugie, światło UV w tym paśmie ma wysoki stopień rozpraszania zależnego od kąta ze względu na obecność zawieszonych cząstek, mgły i mgiełki w atmosferze. Wysoki

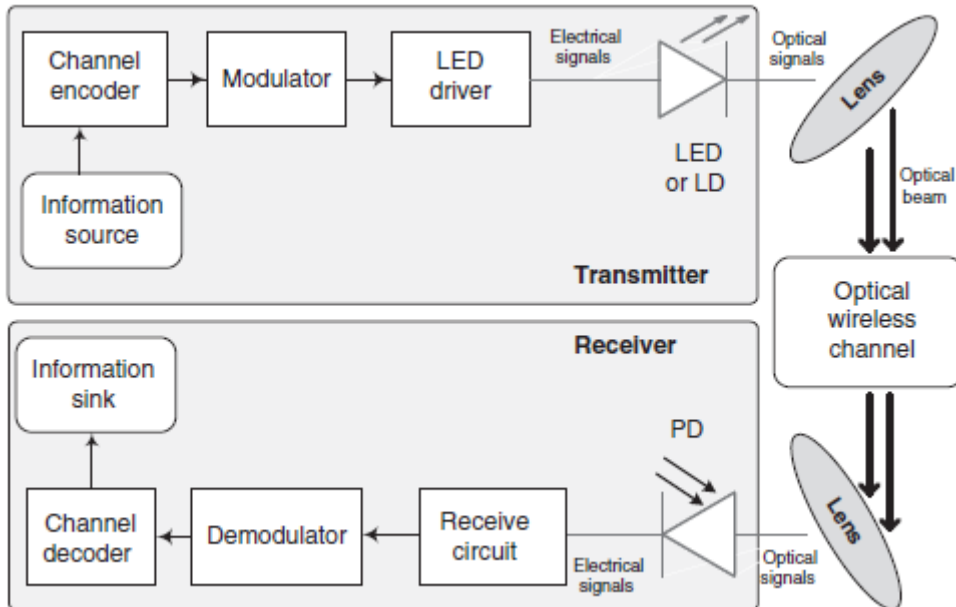
stosunek sygnału do szumu w samym kanale transmisyjnym i silne rozpraszanie umożliwiają ustanowienie połączeń komunikacyjnych poza linią wzroku z fotodiodami o dużym polu widzenia, które przechwytyją duże ilości rozproszonego światła. Pomysł zastosowania bezprzewodowej komunikacji UV do zastosowań na morzu na zewnątrz zrodził się przed II wojną światową w Naval Research Laboratory w Stanach Zjednoczonych. W 1968 r. wdrożono eksperymentalną pracę nad łączem dalekosiężnym o zasięgu 26 km w MIT Lincoln Laboratory. Naukowcy użyli lampy błyskowej ksenonowej jako źródła UV do promieniowania fal o widmie ciągłym z dużą mocą, z najkrótszą długością fali 280 nm i fotopowielaczem w odbiorniku. Ponieważ transceivery UV były duże, energochłonne i drogie, badania nad bezprzewodową komunikacją UV nie poczyniły postępów przez następne kilka dekad. W latach dwudziestych XXI wieku komercjalizacja półprzewodnikowych źródeł optycznych, oferująca wdrożenie transceiverów o niskim koszcie, małych rozmiarach, niskim zużyciu energii i dużej przepustowości, dała odrodzenie bezprzewodowej komunikacji UV. W Stanach Zjednoczonych naukowcy z laboratorium MIT Lincoln przeprowadzili szereg eksperymentów na zewnątrz w celu uzyskania łącza UV-C o krótkim zasięgu (do 100 m). Naukowcy zbudowali odpowiednią platformę sprzętową, wykorzystali albo układy LED, albo diody laserowe jako źródło optyczne i fotopowielacz jako detektor, uzyskali pomiary kanału i opracowali odpowiednie modele rozpraszania. W Chinach zespół badawczy z Beijing Institute of Technology zaprojektował i wdrożył platformę UV-C, wykorzystując lampę rtęciową i fotopowielacz do eksperymentów transmisyjnych na odległość ponad 1 km.

### **Komunikacja optyczna w wolnej przestrzeni**

Zewnętrzne OWC, znane jako komunikacja FSO, są zwykle obsługiwane przy użyciu widma bliskiej podczerwieni jako medium komunikacyjnego ze względu na niskie tłumienie w porównaniu ze światłem widzialnym i światłem UV. Systemy FSO często wykorzystują diody laserowe zamiast diod elektroluminescencyjnych do generowania wysoce skoncentrowanych sygnałów optycznych o dużej mocy do transmisji danych. Wąskie wiązki o małych kątach rozbieżności są używane do nawiązywania połączeń komunikacyjnych między nadajnikiem a odbiornikiem, co prowadzi do problemów z celowaniem i śledzeniem. Dlatego systemy FSO są używane do komunikacji o dużej przepustowości danych między dwoma stałymi punktami na odległości od kilku metrów do kilku tysięcy kilometrów. W porównaniu z komunikacją opartą na RF, łącza FSO mają bardzo dużą dostępną przepustowość, zapewniając tym samym znacznie wyższe szybkości transmisji danych. Szybkości transmisji 10 Gb/s zostały już zaimplementowane do komunikacji na duże odległości, a łącza FSO o przepustowości 40 Gb/s zostało zaimplementowane.

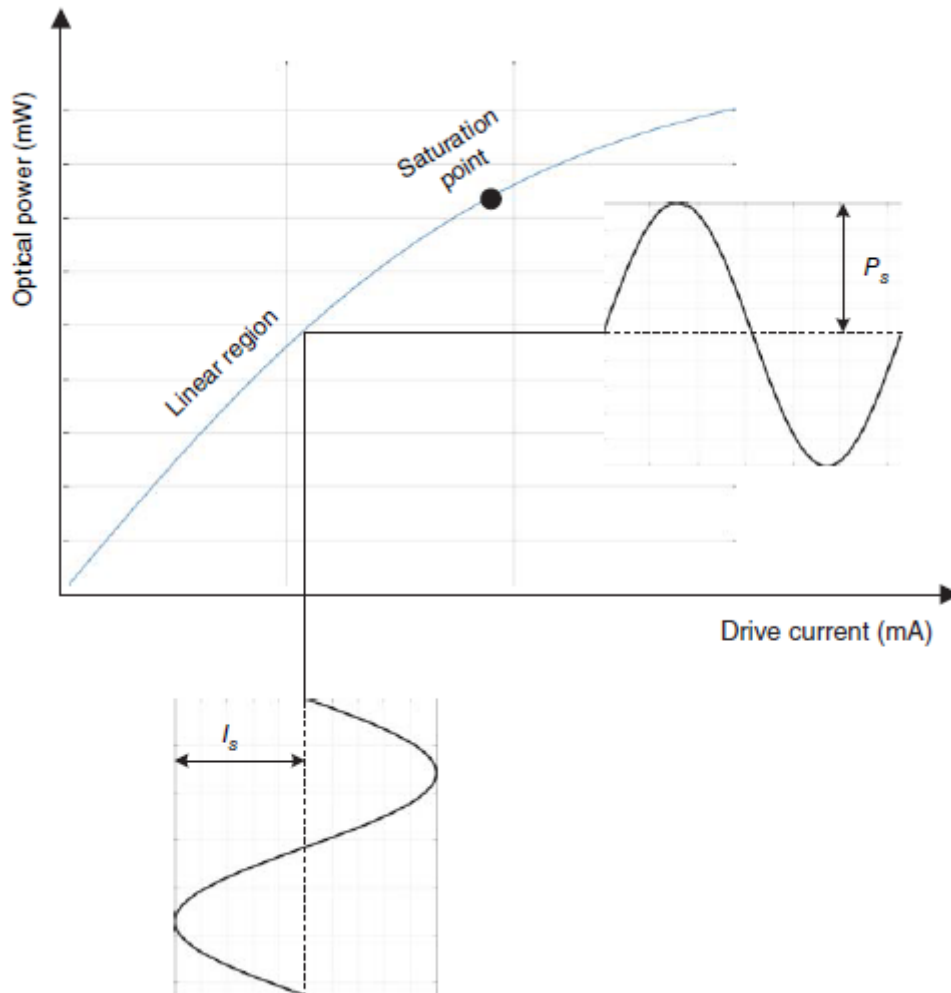
### **Transceiver optyczny**

W systemie OWC, jak pokazano na rysunku , nadajnik moduluje bity informacji do postaci fal optycznych.



Następnie wygenerowane sygnały optyczne są emitowane przez atmosferę w kierunku zdalnego odbiornika. Dioda elektroluminescencyjna lub dioda laserowa jest stosowana do konwersji sygnału elektrycznego na sygnał optyczny w nadajniku, a odbiornik używa fotodiody do konwersji sygnału optycznego na prąd elektryczny. Na koniec odbiornik przetwarza ten prąd elektryczny, a następnie demoduluje i dekoduje sygnał pasma podstawowego w celu odzyskania oryginalnych bitów informacji. Nadajnik obejmuje źródło optyczne i jego obwód sterujący, koder kanału, modulator i soczewkę do ogniskowania lub formowania wiązki optycznej. Bity informacji ze źródła informacji są najpierw kodowane, a następnie modulowane do sygnału elektrycznego. Zmodulowany sygnał jest następnie przepuszczany przez źródła optyczne w celu dostosowania intensywności optycznej. Wiązka optyczna jest koncentrowana przy użyciu soczewki optycznej lub optyki formującej wiązkę przed przesłaniem. Diody LED z kolimatorami wiązkowymi są zwykle stosowane w bezprzewodowej komunikacji krótkiego zasięgu, podczas gdy typowym źródłem optycznym w systemach FSO jest dioda laserowa dużej mocy do transmisji dalekiego zasięgu. Komponent optyczny powinien mieć niewielkie rozmiary i niskie zużycie energii. Jednocześnie powinien zapewniać stosunkowo dużą moc optyczną w szerokim zakresie temperatur z długim średnim czasem między awariami (MTBF). Większość komercyjnych systemów FSO działa w dwóch określonych oknach długości fali przy 850 i 1550 nm, gdzie tłumienie atmosferyczne jest mniejsze niż 0,2 dB/km, a gotowe komponenty są dostępne, ponieważ te dwa okna pokrywają się ze standardowymi oknami transmisyjnymi systemów komunikacji światłowodowej. Lasery VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) są wykorzystywane głównie do transmisji około 850 nm, a lasery Fabry-Perot (FP) i Distributed Feedback (DFB) są używane głównie do pracy przy 1550 nm. Informacje mogą być przekazywane poprzez prostą modulację intensywności impulsu optycznego za pomocą powszechnie stosowanych schematów, takich jak kluczkowanie on-off lub modulacja położenia impulsu, a także modulacja koherentna lub zaawansowane schematy wielonośne, takie jak ortogonalne multipleksowanie z podziałem częstotliwości (OFDM), aby uzyskać wyższą szybkość transmisji. Aby obsługiwać wielu użytkowników w jednym punkcie dostępu optycznego, OWC może stosować nie tylko typowe technologie multipleksowania elektrycznego, takie jak wielodostęp z podziałem czasu, podziałem częstotliwości i podziałem kodu, ale także multipleksowanie optyczne, takie jak wielodostęp z podziałem długości fali. Technologia optycznego wielowięściowego (MIMO) jest również implementowana w OWC, gdzie stosuje się wiele diod LED i

wiele PD, w przeciwieństwie do wielu anten w typowym systemie MIMO działającym w paśmie radiowym. Systemy OWC można podzielić na dwie kategorie w oparciu o metodę detekcji, tj. niekoherentne i koherentne. Systemy niekoherentne zazwyczaj wykorzystują modulację intensywności z detekcją bezpośrednią (IM/DD), gdzie bity informacji są reprezentowane przez intensywność emitowanego światła w nadajniku. Jak pokazano na rysunku ,



intensywność optyczna jest regulowana w odniesieniu do prądu przewodzenia przez diodę LED. W idealnym przypadku prąd napędowy  $I_d$  składa się ze stałego prądu stałego (DC)  $I_{DC}$  i wahania prądu  $I_s$ , tj.

$$I_d = I_{DC} + I_s \quad (1)$$

generowanie wyjściowej mocy optycznej

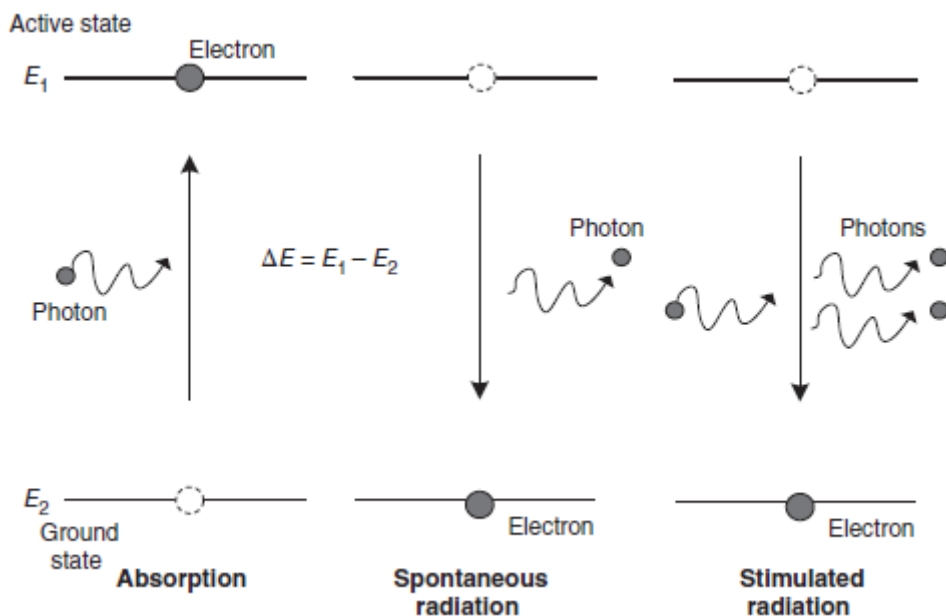
$$P_0 = P_{DC} + P_s \quad (2)$$

podczas pracy w liniowym obszarze diody LED. W odbiorniku fotodioda bezpośrednio wykrywa zmiany w natężeniu światła, aby wygenerować proporcjonalny prąd. Systemy IM/DD są powszechnie stosowane w naziemnych łączach OWC ze względu na ich prostotę i niski koszt. Natomiast systemy koherentne wykorzystują również modulację częstotliwości lub fazy oprócz amplitudy. Za pomocą lokalnego oscylatora odebrany sygnał jest optycznie mieszany przed fotodetekcją w odbiorniku. Chociaż systemy koherentne oferują lepszą wydajność w zakresie tłumienia szumów tła, łagodzenia

zaniku wywołanego turbulencjami i wyższej czułości odbiornika, są one zbyt złożone i energochłonne z praktycznego punktu widzenia. Jak pokazano na rysunku, przednia część systemu IM/DD OWC ma soczewkę optyczną do zbierania i skupiania odebranej wiązki na fotodiodzie. Fotodiody przekształca sygnał optyczny na prąd elektryczny, wykorzystując obwód transimpedancyjny, zwykle niskosumowy wzmacniacz optyczny z rezystorem obciążeniowym. Wyjście obwodu transimpedancji jest filtrowane dolnoprzepustowo w celu ograniczenia szumu termicznego. Na koniec odbiornik demoduluje i dekoduje odebrany sygnał, aby odzyskać oryginalne bity informacji. Fotodiody półprzewodnikowe są zwykle wykorzystywane w komercyjnych systemach OWC, ponieważ mają doskonałą wydajność kwantową dla powszechnie używanych długości fal. Materiał złącza może być z krzemu (Si), indu, galu, arsenku (InGaAs) lub germanu (Ge), które są przede wszystkim wrażliwe na powszechnie używane długości fal i mają niezwykle krótki czas przejścia, co skutkuje wysoką szerokością pasma i detektorami o szybkiej reakcji. Fotodiody Si mają wysoką czułość około 850 nm, podczas gdy fotodiody InGaAs nadają się do dłuższych długości fal około 1550 nm. Fotodiody Ge są rzadko używane ze względu na ich stosunkowo wysoki poziom prądu ciemnego. Fotodiody półprzewodnikowe mogą być diodami Positive-Intrinsic-Negative (PIN) lub Avalanche Photodiode (APD). Diody PIN są zwykle używane w zewnętrznych systemach OWC (znanych również jako FSO) pracujących w odległości do kilku kilometrów. Główną wadą diod PIN jest to, że wydajność odbiornika staje się bardzo ograniczona przez szum termiczny. W przypadku transmisji na duże odległości preferowane są APD ze względu na proces jonizacji uderzeniowej. Jednak ta zaleta wiąże się ze zwiększoną złożonością implementacji. W szczególności do odwrotnego polaryzacji APD potrzebne jest stosunkowo wysokie napięcie, co wymaga zastosowania specjalnych obwodów elektronicznych, co prowadzi do większego zużycia energii. Oprócz fotodiod, system OWC wykorzystuje czujniki obrazu do wykrywania impulsu optycznego, zwanego również systemem kamery optycznej. Czujnik obrazu może przekształcić sygnał optyczny na sygnał elektryczny, co ma tę zaletę, że jest łatwiejszy w implementacji ze względu na szerokie rozpowszechnienie smartfonów z wbudowanymi kamerami.

### **Źródła optyczne i detektory**

Atom jest najmniejszą jednostką materii zachowującą wszystkie właściwości chemiczne pierwiastka. Zgodnie z fizyką klasyczną atom składa się z jądra w centrum atomu i jednego lub więcej związanych elektronów otaczających jądro. Elektrony tworzą powłoki teoretyczne, gdzie powłoka jest orbitą, po której krążą elektrony wokół jądra. Im dalej elektron krąży wokół jądra atomowego, tym większa jest jego energia. Najbliższa powłoka jest powszechnie nazywana stanem podstawowym. Kiedy elektron pochłania energię ze światła (fotonów), pól magnetycznych lub ciepła, jest wzbudzany z niższego poziomu energii do wyższego poziomu poprzez odsunięcie się od jądra, jak pokazano na rysunku.



Stan wzbudzony ostatecznie rozpada się do niższego stanu poprzez emitowanie fotonu, ponieważ wyższe poziomy są na ogół mniej stabilne niż niższe poziomy. Nazywa się to promieniowaniem spontanicznym, w którym faza i kierunek związane z fotonem są losowe. Załóżmy, że energia górnego i dolnego poziomu wynosi odpowiednio  $E_1$  i  $E_2$ , emitowany foton ma energię

$$\Delta E = E_1 - E_2 = hf_0 \quad (3)$$

gdzie  $f_0$  oznacza częstotliwość a stała Plancka

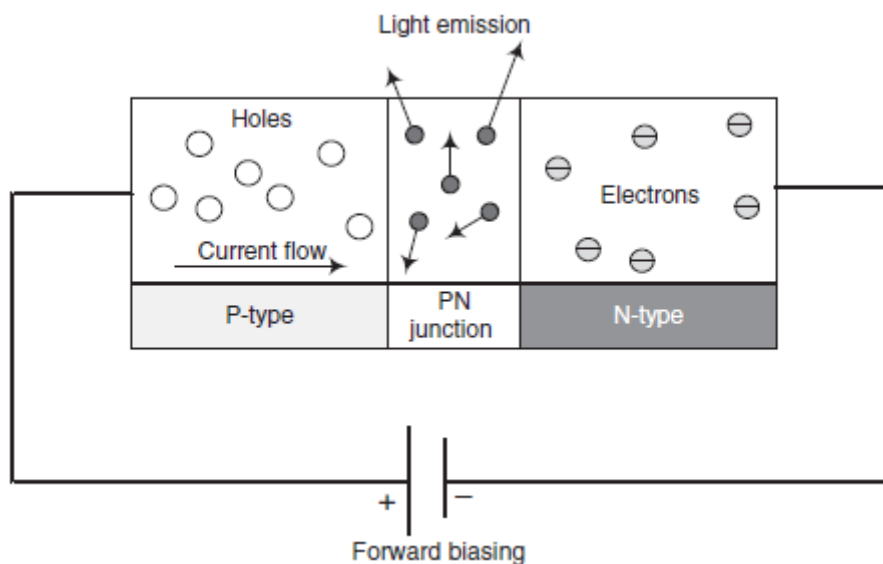
$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J/Hz} \quad (4)$$

Alternatywnie, stymulowane promieniowanie ma miejsce, gdy wzbudzony elektron wchodzi w interakcję z nadchodzącym fotonem, generując nowy foton o skopiowanym kierunku i fazie, które są identyczne z padającym fotonem. W konsekwencji stymulowane promieniowanie tworzy wysoce kierunkową i spójną emisję światła. Henry Joseph Round był zdziwiony w 1907 roku, gdy zaobserwował elektroluminescencję z diody półprzewodnikowej, co doprowadziło do odkrycia diody elektroluminescencyjnej. To zjawisko optyczno-elektroniczne nazywa się promieniowaniem rekombinacyjnym, w którym emisja światła powstaje ze złącza między obszarami półprzewodników typu p i n, gdy elektrony w paśmie przewodnictwa półprzewodnika wpadają do dziur w paśmie walencyjnym. Promieniowanie rekombinacyjne jest podstawą emisji światła zarówno z diod LED, jak i LD. W OWC najczęściej stosowanymi źródłami światła są niespójne diody elektroluminescencyjne i spójne diody laserowe, które są używane jako nadajniki optyczne. Diody LED są używane w zastosowaniach wewnętrznych o krótkim zasięgu i niskiej lub średniej szybkości transmisji danych, podczas gdy diody LD, które są monochromatyczne, spójne, dużej mocy i kierunkowe, są używane głównie w zastosowaniach zewnętrznych o dużej prędkości. Jeśli chodzi o odbiorniki optyczne w OWC, można używać zarówno fotodiod PIN, jak i APD, chociaż te drugie są kosztowne, ale oferują większą czułość i szerokość pasma niż PIN PD. W tej sekcji omówiono typy źródeł światła, ich struktury i ich właściwości optyczne.

### Dioda elektroluminescencyjna



Diody elektroluminescencyjne są wykonane z materiałów półprzewodnikowych, które mogą modyfikować przewodnictwo poprzez wprowadzanie różnych zanieczyszczeń do sieci krystalicznej. Na przykład półprzewodnik samoistny (krzem lub german) domieszkowany fosforem (P), arsenem (As) lub antymonem (Sb) jako zanieczyszczeniem nazywany jest półprzewodnikiem typu n, ponieważ dostarcza elektronów do tworzenia ujemnych nośników prądu. Odwrotnie, dodanie trójwartościowych zanieczyszczeń, takich jak bor (B), gal (Ga), ind (In) i aluminium (Al) do półprzewodnika samoistnego generuje półprzewodnik typu p, zawierający nadmiar dziur jako dodatnie nośniki prądu. Podczas łączenia tych dwóch materiałów półprzewodnikowych ich złącze zachowuje się zupełnie inaczej niż każdy z tych typów materiałów osobno. W takim złączu PN prąd płynie łatwo ze strony p do strony n, podczas gdy przepływ staje się bardzo twardy, jeśli nie nieelastyczny, w kierunku odwrotnym. Strona p półprzewodnika jest również nazywana anodą, podczas gdy strona n jest również nazywana katodą. Bez różnicy napięć (tj. bez polaryzacji) na złączu nośniki ładunku są rozłożone mniej więcej tak samo jak zanieczyszczenia, co powoduje brak przepływu prądu netto. Warunek równowagi jest osiągany w pobliżu złącza PN, gdzie elektrony spadają z pasma przewodnictwa, aby wypełnić dziury w paśmie walencyjnym. Co więcej, żaden prąd nie płynie pod polaryzacją odwrotną poprzez dodanie dodatniego napięcia do strony n i ujemnego napięcia do strony p. Elektroda ujemna przyciąga dziury z materiału typu p, podczas gdy elektroda dodatnia przyciąga elektrony z materiału typu n.



Odciąga nośniki od złącza, a przepływ prądu zwany prądem upływu jest tylko nieznacznie powyżej zera ze względu na wysoką rezystancję półprzewodnika. Zwiększenie napięcia polaryzacji wstecznej na złączu nie powoduje wzrostu prądu, dopóki nie nastąpi duży przepływ prądu wstecznego zwany przebicciem lawinowym. Diody LED emitują fale świetlne poprzez spontaniczną emisję, gdy napięcie polaryzacji w kierunku przewodzenia jest przyłożone do złącza PN, mianowicie napięcie dodatnie po stronie p i napięcie ujemne po stronie n. Przyciąga ono dziury do strony n złącza PN i odwrotnie, powodując ich rekombinację i uwalnianie dodatkowej energii, gdy elektrony w paśmie przewodnictwa wpadają do dziur w paśmie walencyjnym. Proces konwersji mocy elektronicznej na moc optyczną jest dość wydajny, co skutkuje bardzo małą ilością ciepła w porównaniu z konwencjonalnymi żarówkami. Emitowane fotony mogą być falami świetlnymi IR, widzialnymi lub ultrafioletowymi, których nominalna długość fali zależy od energii przerwy energetycznej materiału półprzewodnikowego. Mieszanka materiałów określa przerwę pasmową półprzewodnika złożonego. Tabela 3 zawiera kilka

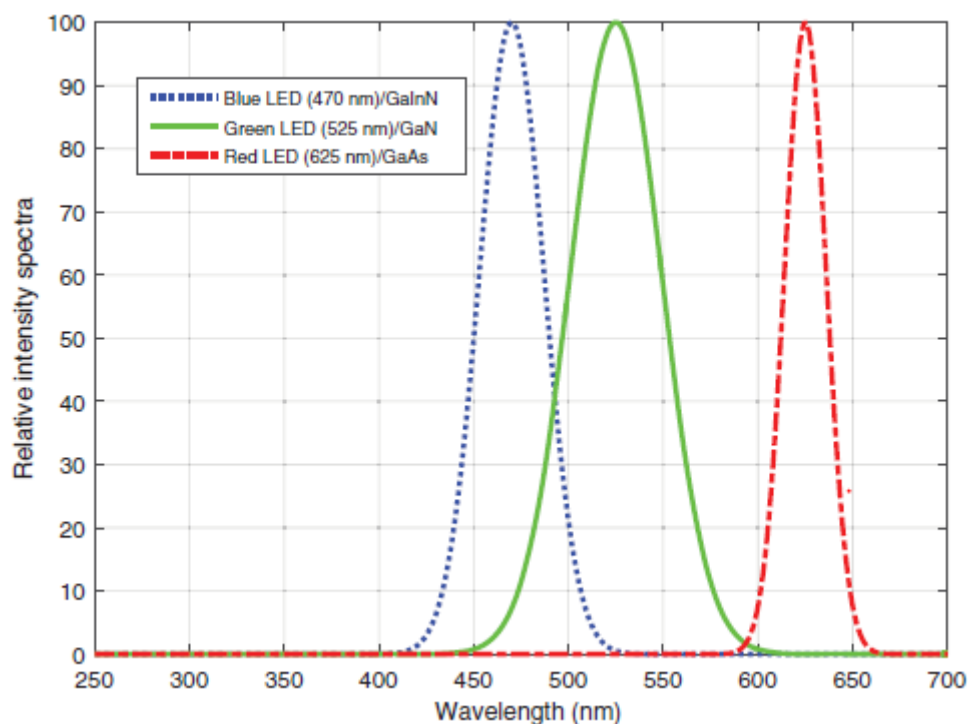
przykładów różnych nieorganicznych materiałów półprzewodnikowych używanych do generowania szerokiej gamy światła o różnych długościach fal.

Semiconductor materials	LED emission	Wavelengths (nm)
Aluminum gallium arsenide (AlGaAs)	Red and infrared	230–350
Aluminum nitrate (AlN)	Ultraviolet	210
Indium gallium nitrate (InGaN)	Green, blue, near-UV	360–525
Zinc selenide (ZnSe)	Blue	459
Silicon carbide (SiC)	Blue	470
Gallium phosphide (GaP)	Red, yellow, green	550–590
Gallium arsenide (GaAs)	Infrared	910–1020
Gallium arsenide phosphide (GaAsP)	Red and orange	700

Charakterystykę emisji diod LED można modelować w widmie emisyjnym o długości fali szczytowej,  $t$ , przy której występuje maksymalna emisja, i szerokości linii odpowiadającej rozproszeniu długości fali, które jest określone przez Schuberta.

$$\Delta \lambda = \frac{1.8 \lambda^2 kT}{hc} \quad (5)$$

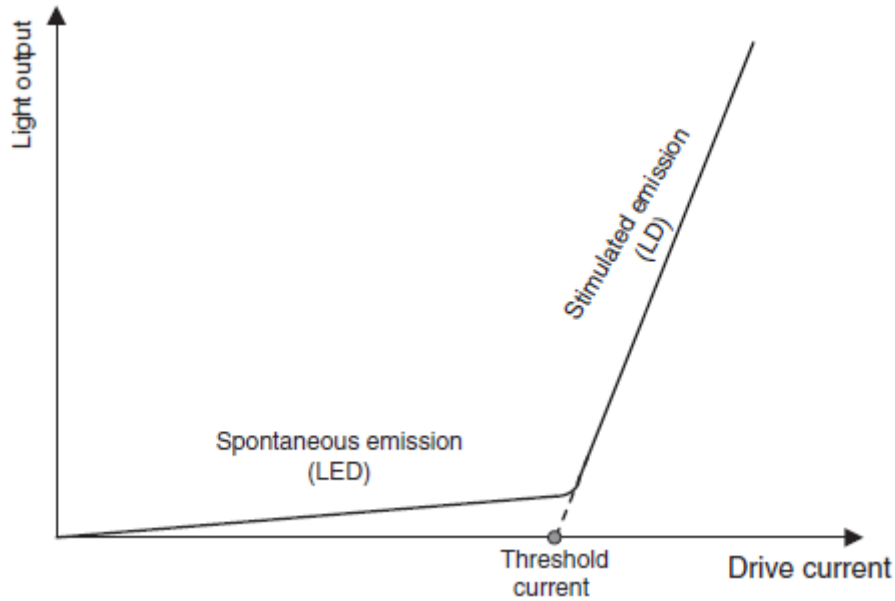
gdzie  $T$  to temperatura,  $h$  oznacza stałą Planka, a  $c$  to prędkość światła. Na przykład teoretyczna długość fali szczytowej i szerokość linii emisji diody LED GaAs w temperaturze pokojowej wynoszą odpowiednio 625 i 28 nm. Rysunek ilustruje trzy typowe widma emisji materiałów LED (czerwony, zielony i niebieski).



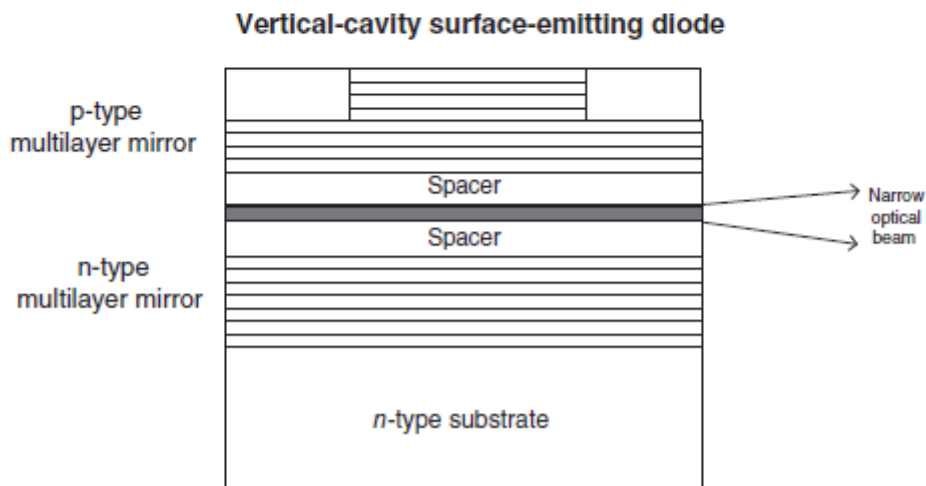
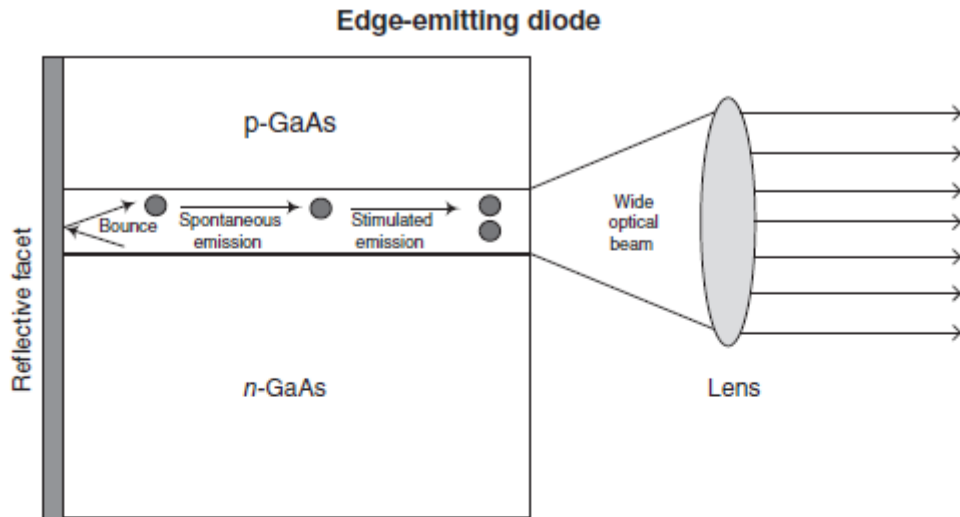
Ponieważ diody LED emitują światło generowane przez emisję spontaniczną, wypromieniowane fotony ze złącza PN rozprzestrzeniają się w dowolnych kierunkach. W związku z tym diody LED emitują światło w szerszym zakresie kątów niż laser, który powstaje w wyniku emisji wymuszonej, co czyni je bardziej pożądanymi niż lasery w niektórych zastosowaniach, takich jak oświetlenie i wyświetlanie. Aby uzyskać najbardziej wydajny sygnał wyjściowy, soczewkę optyczną można zamontować z przodu diody LED, aby skupić emitowane światło, zwykle prostopadle do powierzchni. Jednak jej moc optyczna jest nadal znacznie niższa niż lasera. W związku z tym diody LED są zwykle stosowane w OWC o niskiej szybkości transmisji danych i krótkim zasięgu, gdzie ich moc wyjściowa jest wystarczająca, ale można wykorzystać zalety prostego układu sterowania, niskiego kosztu, szerokiego zakresu temperatur pracy i znacznie wyższej niezawodności. Natomiast OWC oparte na laserach są bardziej adaptacyjne do zastosowań o wysokiej szybkości transmisji danych i dużym zasięgu, charakteryzujących się większą złożonością, wyższym kosztem i większym zużyciem energii.

### **Dioda laserowa**

Materiały półprzewodnikowe, takie jak arsenek galu i fosforek indu, można również wykorzystać do produkcji diod laserowych, które są zamiennie nazywane laserami diodowymi lub laserami półprzewodnikowymi. Podobnie jak inne typy, takie jak lasery gazowe, lasery półprzewodnikowe i lasery światłowodowe, lasery diodowe półprzewodnikowe tworzą wiązki optyczne, gdy spontaniczna emisja wywołuje kaskadę wymuszonej emisji z inwersji obsady wewnątrz rezonansowej wnęki optycznej, gdy prąd elektryczny przepływa przez materiał półprzewodnikowy. Laser wykazuje drastycznie zwiększoną jasność i moc optyczną oraz znacznie węższe widma niż światło emitowane przez jego odpowiednik LED. Struktura prostej diody laserowej jest podobna do struktury diody elektroluminescencyjnej, składającej się z półprzewodnika typu n i półprzewodnika typu p. Podobnie jak dioda LED, LD generuje światło z rekombinacji ekscytonów elektronowo-dziurowych z napięciem spolaryzowanym w kierunku przewodzenia na złączu PN. Gdy prąd napędowy jest niski, ekscytony elektronowo-dziurowe uwalniają swoją energię w wyniku spontanicznej emisji, tak samo jak dioda LED. Jednak diody LD mają odblaskowe powierzchnie do sprzężenia zwrotnego optycznego. Sprzężenie zwrotne ma niewielki wpływ przy niskim prądzie poniżej punktu (znanego jako próg lasera) potrzebnego do wytworzenia inwersji obsady. Wraz ze wzrostem prądu napędowego, więcej par elektronowo-dziurowych jest generowanych spontanicznie, zwiększając prawdopodobieństwo, że spontanicznie emitowany foton stymuluje emisję z ekscytonu, który jeszcze nie uwolnił swojej dodatkowej energii. Gdy prąd osiągnie wystarczająco wysoki poziom powyżej progu, powoduje inwersję obsady między stanem ekscytonu a atomami z dodatkowym elektronem związanym w paśmie walencyjnym, co prowadzi do wymuszonej emisji. Jak pokazano na rysunku ,



dioda laserowa działa jako stosunkowo nieefektywna dioda LED, jeśli prąd napędowy jest poniżej progu. Powyżej progu, przy którym wyjście przesuwa się z niskiej mocy spontanicznej emisji do wyższej mocy wymuszonej emisji, dioda laserowa przekształca znacznie większą część wejściowej mocy elektrycznej w energię świetlną, jak pokazano na bardziej stromym zboczu. Dlatego prąd progowy jest kluczowym czynnikiem decydującym o wydajności lasera półprzewodnikowego. Energia elektryczna potrzebna do osiągnięcia progu, a mianowicie ułamek prądu poniżej progu, który nie jest przekształcany w energię świetlną, staje się ciepłem cieplnym, które musi zostać rozproszone w diodach laserowych. Ciepło to nie tylko marnuje energię, ale również pogarsza wydajność lasera, skracając jego żywotność. Rysunek przedstawia podstawową strukturę diody laserowej emitującej krawędziowo, składającej się z co najmniej trzech warstw: warstwy typu p, warstwy typu n i warstwy złącza.



Powierzchnie odbijające są prostopadłe do cienkiej warstwy złącza, a wnęka odbijająca jest wyrównana wzdłuż płaszczyzny złącza. Ponieważ półprzewodniki mają wysoki współczynnik załamania światła, niepowlekany stały interfejs powietrzny odbija większość wymuszonej emisji z powrotem do półprzewodnika, zapewniając sprzężenie zwrotne dla rezonatora lasera. Duża inwersja populacji przy wysokim prądzie powoduje wysokie wzmocnienie w laserach półprzewodnikowych, więc wnęka odbijająca o długości zaledwie kilkuset mikrometrów może wytwarzać trwałe oscylacje. Obszar emisji na diodzie laserowej emitującej krawędziowo jest cienki, co prowadzi do szybko rozbieżnych wiązek. Diody laserowe można również wytwarzać tak, aby emitowały z ich powierzchni, nazywane diodami laserowymi emitującymi powierzchniowo. Większy, okrągły obszar emisji może obsługiwać większą moc i wytwarzać wysokiej jakości wiązki o znacznie mniejszej rozbieżności. Rysunek powyższy ilustruje strukturę lasera emitującego powierzchniowo z wnęką rezonansową prostopadłą do warstwy aktywnej, znanego jako VCSEL. Zamiast oscylować wzdłuż długiego boku cienkiej warstwy aktywnej, VCSEL oscylują prostopadłe do powierzchni cienkiego dysku warstwy aktywnej. W tym celu dwa lustra wielowarstwowe są zintegrowane odpowiednio na górze i dole warstwy złącza, a wiązka wychodzi przez powierzchnię. Lustra o wysokim współczynniku odbicia wymagane przez wnękę laserową można bezpośrednio wytwarzać w półprzewodniku poprzez osadzanie wielu naprzemiennych cienkich warstw o nieznacznie różnym współczynniku odbicia. Ta wielowarstwowa struktura tworzy wielowarstwową powłokę interferencyjną zaprojektowaną tak, aby silnie odbijać określoną długość fali. W rezultacie reflektor znajdujący się po stronie podłoża przepuszcza niewielką część światła włączy, natomiast

reflektor znajdujący się powyżej warstwy aktywnej odbija całe światło z powrotem do wnęki. Te różnice strukturalne sprawiają, że diody VCSEL zachowują się zupełnie inaczej w porównaniu z diodami emitującymi krawędziowo. Całkowity zysk w jamie diody VCSEL jest niski, ponieważ światło oscylujące między górnym i dolnym zwierciadłem przechodzi tylko przez cienki plaster warstwy aktywnej. Chociaż zysk na jednostkę długości jest wysoki, sama warstwa aktywna jest tak cienka, że całkowity zysk w obie strony wnęki diody VCSEL jest mały. Ta struktura jest ograniczona do generowania mocy rzędu wielkości w miliwatach, znacznie poniżej maksymalnej dostępnej z emiterów krawędziowych. W związku z tym diody VCSEL mają niskie prądy progowe, co czyni je znacznie bardziej wydajnymi. Ich wysoka wydajność i niski prąd napędowy zapewniają im również długą żywotność. W przeciwieństwie do diod emitujących krawędziowo, emisja powierzchniowa pochodzi z obszaru, który zwykle jest okrągły, generując wiązkę kołową. Zaletą jest to, że wiązkę wyjściową można sprząc bezpośrednio z włóknami optycznymi, umieszczając powierzchnię wyjściową bezpośrednio przy rdzeniu włókna. Tymczasem otwór emisyjny w diodzie emitującej krawędziowo jest wąski. Wiązka emitowana z małego otworu ma stosunkowo duży kąt rozbieżności. Typowa rozbieżność wiązki wynosi  $10^\circ$  w kierunku równoległym do warstwy aktywnej i  $40^\circ$  prostopadłe do warstwy aktywnej. Ten kąt rozproszenia jest większy niż wiązka z wysokiej jakości latarki, co sprawia, że wiązka jest zupełnie inna niż ściśle skupiona wiązka lasera helowo-neonowego lub lasera półprzewodnikowego. Na szczęście, do skorygowania tej szerokiej rozbieżności wiązki można zastosować optykę zewnętrzną. Soczewka cylindryczna, która skupia światło w jednym kierunku, ale nie w kierunku prostopadłym, może nadać wiązce kształt kołowy. Soczewki kolimacyjne mogą skupiać szybko rozbieżną wiązkę z emitera krawędziowego, tak aby wyglądała tak wąsko jak wiązka z lasera helowo-neonowego. Natomiast VCSEL są znacznie lepsze, ponieważ emitują światło z szerszej apertury z typową rozbieżnością  $10^\circ$ . Podobnie jak w przypadku diod elektroluminescencyjnych, długości fal emitowanych przez diody laserowe zależą od składu materiałów półprzewodnikowych, jak wymieniono w tabeli 4.

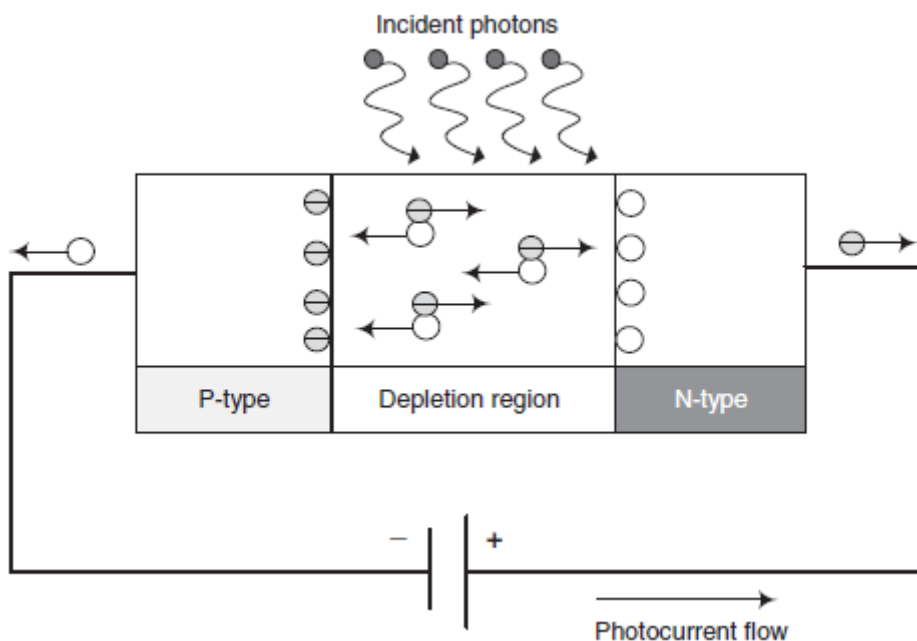
Semiconductor materials	Peak wavelength
Aluminum gallium nitrate (AlGaN)	350–400 nm
Gallium indium nitrate (GaInN)	375–440 nm
Zinc sulfoselenide (ZnSSe)	447–480 nm
Aluminum gallium indium phosphide (AlGaInP)/GaAs	620–680 nm
Gallium aluminum arsenide (GaAlAs)/GaAs	750–900 nm
GaAs/GaAs	904 nm
Indium gallium arsenide (InGaAs)/GaAs	915–1050 nm
Indium gallium arsenide phosphide (InGaAsP)	1100–1650 nm
Indium gallium arsenide phosphide antimony (InGaAsSb)	2–5 $\mu\text{m}$
Lead sulfoselenide (PbSSe)	4.2–8 $\mu\text{m}$
Lead tin selenide (PbSnSe)	8–30 $\mu\text{m}$
Quantum cascade	3–50 $\mu\text{m}$

Dodatkowo w tabeli 5 zamieszczono porównanie głównych charakterystyk diod elektroluminescencyjnych i diod laserowych.

Characteristics	LED	LD
Optical output power	Low	High
Optical linewidth	25–100 nm	0.01–5 nm
Modulation bandwidth	kHz to hundreds of MHz	kHz to tens of GHz
Conversion efficiency	10–20%	30–70%
Divergence	Broad beam	Highly collimated
Reliability	High	Moderate
Coherence	No	Yes
Temperature dependence	Low	High
Drive circuitry	Simple	Complex
Cost	Low	Moderate to high

### Fotodioda

Fotodioda to półprzewodnikowe urządzenie ze złączem PN, które zamienia padające fotony światła na prąd elektryczny lub napięcie. Czasami nazywa się je również fotodetektem, detektorem światła lub fotoczuJNIkiem. Rysunek przedstawia przybliżony przekrój poprzeczny typowej fotodiody, która wygląda jak dioda elektroluminescencyjna, i jej zasadę prowadzenia konwersji foton-elektron.



Strona p półprzewodnika tworzy nadmiar dziur, a strona n ma mnóstwo elektronów. Szczególny obszar między stroną n a stroną p powstaje, gdy elektrony dyfundują ze strony n do strony p, podczas gdy dziury dyfundują w kierunku odwrotnym. W rezultacie powstaje obszar bez wolnych nośników i wbudowane napięcie, zwane obszarem zubożenia, umożliwiającą przepływ prądów elektrycznych tylko w jednym kierunku od anody do katody. Fotodiody zwykle działają pod napięciem polaryzacji zaporowej na złączu PN; mianowicie, strona p fotodiody jest podłączona do ujemnego zacisku zasilacza, a strona n jest podłączona do dodatniego zacisku. Kiedy fotony uderzają w diodę, elektrony walencyjne w fotodiodzie pochłaniają energię świetlną. Jeśli energia jest większa niż przerwa

energetyczna materiału półprzewodnikowego, elektrony walencyjne zrywają wiązanie z atomami macierzystymi i stają się swobodnymi elektronami. Swobodne elektrony przemieszczają się swobodnie z jednego miejsca do drugiego, przenosząc prąd elektryczny. Kiedy elektron walencyjny opuszcza powłokę walencyjną, powstaje odpowiadająca mu dziura. Mechanizm tworzenia ekscytonu elektron-dziura przy użyciu energii świetlnej jest znany jako wewnętrzny efekt fotoelektryczny. Jeśli foton zostanie pochłonięty w materiałach półprzewodnikowych po stronie p lub n, ekscyton elektron-dziura zostanie ponownie połączony jako ciepło, jeśli będą wystarczająco daleko od obszaru zubożenia. Pary elektron-dziura przesuną się na przeciwległe końce, jeśli absorpcja nastąpi w obszarze zubożenia z powodu wbudowanego pola elektrycznego i zewnętrznego pola elektrycznego. Innymi słowy, elektrony poruszają się w kierunku dodatniego potencjału na katodzie, podczas gdy dziury poruszają się w kierunku ujemnego potencjału anody. Te poruszające się nośniki ładunku generują przepływ prądu znany jako fotoprąd w fotodiodzie. Chociaż podstawowa praca fotodiod jest podobna, różne typy fotodiod są projektowane do konkretnych zastosowań. Na przykład fotodiody PIN są opracowywane do zastosowań, które wymagają dużej szybkości reakcji. Pod względem struktur i funkcji fotodiody można podzielić na następujące główne typy:

- Fotodioda PN: Pierwszy opracowany i najbardziej podstawowy typ to fotodioda PN. Była to najszerzej stosowana fotodioda przed rozwojem fotodiod PIN. Ponieważ jest stosunkowo mała, jej czułość nie jest dobra w porównaniu z jej następcami (tj. fotodiodą PIN i APD). Obszar zubożenia zawiera niewiele swobodnych nośników ładunku, a szerokość obszaru można manipulować, dodając napięcie polaryzacji. Ciemny prąd fotodiody PN jest niski, co skutkuje niskim poziomem szumu.
- Fotodioda PIN: Obecnie najczęściej stosowaną fotodiodą jest typ PIN. Główną różnicą w porównaniu z typem PN jest to, że warstwa wewnętrzna jest wytwarzana między warstwami P i N, aby utworzyć większy obszar zubożenia. Ta dioda może zbierać więcej fotonów światła, ponieważ szerszy obszar wewnętrzny między emiprzewodnikami typu p i typu n. Ta warstwa wewnętrzna jest wysoce rezystancyjna, a zatem zwiększa natężenie pola elektrycznego w fotodiodzie. Ze względu na zwiększony obszar zubożenia oferuje niższą pojemność i większą szybkość reakcji.
- Fotodioda APD: Przy wysokim napięciu odwrotnym (bliskim napięciu przebicia) APD stosuje jonizację uderzeniową (efekt lawinowy), aby wytworzyć wewnętrzny zysk prądu w materiale, co z kolei zwiększa efektywną reakcję (większy prąd generowany na foton). Zazwyczaj ma większą szybkość reakcji i zdolność wykrywania słabego światła. Typowy zakres reakcji widmowej wynosi około 300–1000 nm. W APD szum spowodowany ciemnym prądem jest wyższy niż w fotodiodzie PIN, ale zwiększone wzmocnienie sygnału jest znacznie większe, co zapewnia wysoki stosunek sygnału do szumu. Fotodiody mogą być wytwarzane z różnych materiałów półprzewodnikowych. Każdy materiał ma szczególne cechy, aby generować różne fotodiody o różnej czułości, zakresach długości fal, poziomach szumu i szybkościach reakcji. Istnieją cztery główne wskaźniki wydajności stosowane do decydowania o właściwych materiałach, tj.
- Prędkość reakcji fotodiody jest określana przez pojemność złącza PN. Jest mierzona czasem potrzebnym nośnikom ładunku do przekroczenia złącza PN. Pojemność jest bezpośrednio określana przez szerokość obszaru zubożenia.
- Reaktywność to stosunek fotoprądu do mocy padającego światła, który jest zazwyczaj wyrażany w jednostkach A/W (prąd do mocy), zgodnie z

$$R = \frac{\eta q \lambda}{ch} \approx \frac{\eta \lambda}{1.24}, \quad (6)$$



gdzie  $\eta$  oznacza wydajność kwantową, która jest definiowana jako szybkość generowania nośników podzielona przez szybkość padania fotonów,  $q$  jest ładunkiem elementarnym w kulombach, a  $h$  oznacza stałą Plancka. Ponieważ wydajność kwantowa jest mniejsza niż 1, maksymalna czułość fotodiod PN i PIN wynosi około 0,6 A/W, co nakłada poważne ograniczenie na czułość odbiornika. Dlatego rozważano APD, których czułość można poprawić o jeden lub dwa rzędy wielkości, pracując przy bardzo wysokim polu elektrycznym.

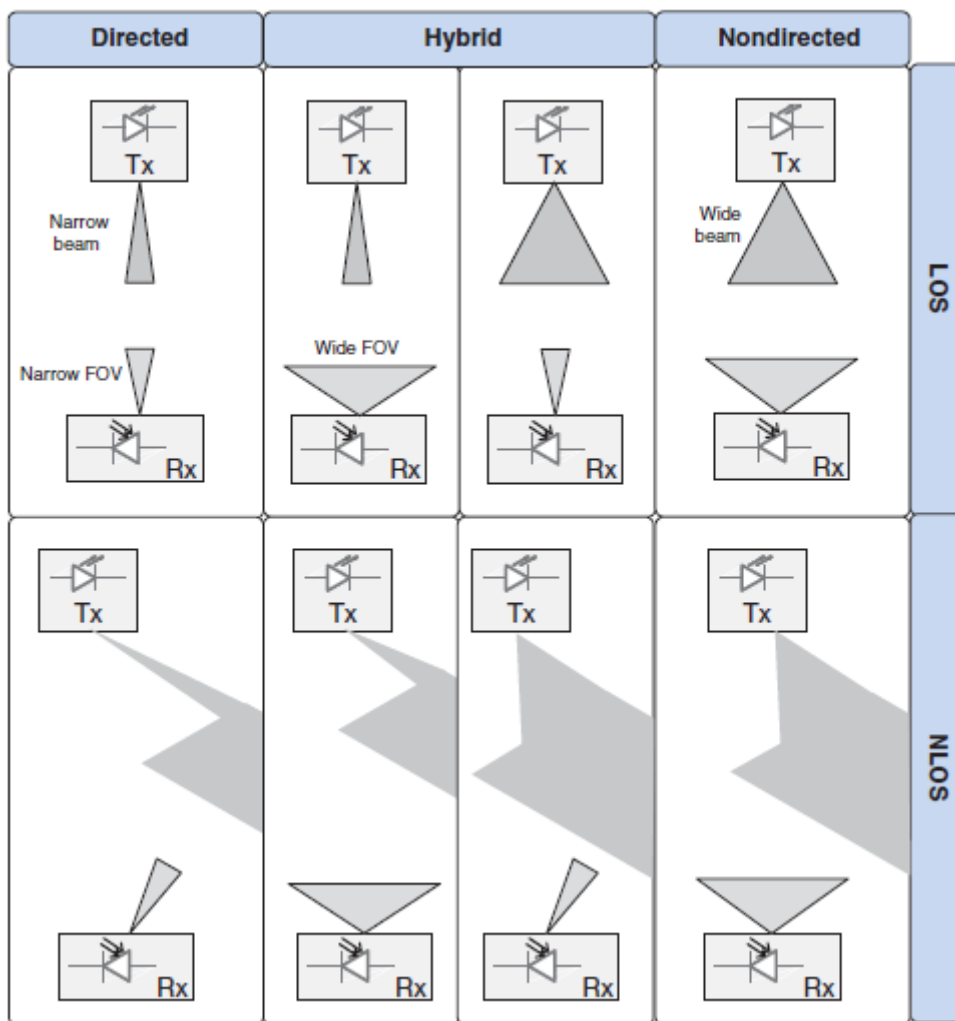
- Prąd ciemny to prąd w fotodiodzie, gdy nie ma padającego światła. Może to być jedno z głównych źródeł szumu w fotodiodzie. Bez polaryzacji prąd ciemny może być bardzo niski.
- Napięcie przebicia to największe napięcie wsteczne, które można przyłożyć do fotodiody, zanim nastąpi wykładniczy wzrost prądu upływu lub prądu ciemnego. Fotodiody powinny być eksploatowane poniżej tego maksymalnego napięcia wstecznego. Napięcie przebicia maleje wraz ze wzrostem temperatury.

Aby ułatwić czytelnikowi zapoznanie się z konkretnymi parametrami, w tabeli 6 podano typowe parametry pracy niektórych fotodiod wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych.

Parameter	Silicon		Germanium		InGaAs	
	PIN	APD	PIN	APD	PIN	APD
Wavelength range (nm)	400–1100		800–1800		900–1700	
Peak wavelength (nm)	900	830	1550	1300	1300/1550	1300/1550
Responsivity (A/W)	0.6	77–130	0.65–0.7	3–28	0.63–0.8	—
Quantum efficiency (%)	65–90	77	50–55	55–75	60–70	60–70
Gain	1	150–250	1	5–40	1	10–30
Bias voltage (V)	45–100	220	6–10	20–35	5	< 30
Dark current (nA)	1–10	0.1–1	50–500	10–500	1–20	1–5
Capacitance (pF)	1.2–3	1.3–2	2–5	2–5	0.5–2	0.5
Rise time (ns)	0.5–1	0.1–2	0.1–0.5	0.5–0.8	0.06–0.5	0.1–0.5

### Konfiguracja łącza optycznego

Łącza optyczne mają różne konfiguracje, które można klasyfikować według dwóch kryteriów: istnienia ścieżki widoczności (LOS) i stopnia kierunkowości, jak pokazano na rysunku .



Łącze LOS między nadajnikiem a odbiornikiem zapewnia największą siłę ścieżki i najmniejsze opóźnienie propagacji. Bez dostępnego łącza LOS transmisja sygnału musi polegać na odbiciu sufitów, ścian lub innych rozpraszających powierzchni odbijających, tworząc środowisko propagacji bez widoczności (NLOS). Jednak łącze NLOS może zwiększyć wytrzymałość łącza, umożliwiając skuteczne połączenie nawet wtedy, gdy bariery blokują bezpośrednie łącze między nadajnikiem a odbiornikiem. W przeciwieństwie do anteny w paśmie RF ze wzorem nadawania, transceiver optyczny ma inną cechę zależną od kąta, tj. kąt wiązki diody elektroluminescencyjnej/diody laserowej i pole widzenia detektora. Jeśli obie strony są kierunkowe, tj. wąska wiązka przy nadajniku i wąskie pole widzenia przy odbiorniku, nawiązywane jest ukierunkowane łącze. Kierowane łącze zwiększa moc sygnału, minimalizuje efekt wielościżkowy i tłumi szum światła otoczenia. Jednak dokładne pozycjonowanie i śledzenie musi być stosowane w celu nawiązania i utrzymania łącza, co narzuca dużą złożoność w projektowaniu systemów komunikacyjnych, szczególnie w środowisku mobilnym. Łącze jest nazywane niekierunkowym, gdy stosuje się nadajnik o szerokim kącie wiązki i odbiornik o szerokim polu widzenia. Niekierunkowe łącze łagodzi potrzebę takiego ukierunkowania i jest wygodniejsze w użyciu, szczególnie w przypadku terminali mobilnych. Możliwe jest również nawiązanie łącza hybrydowego, które łączy nadajnik i odbiornik o różnym stopniu kierunkowości. W ukierunkowanym łączu LOS nadajnik skupia energię optyczną w wąskiej wiązce, co powoduje dużą gęstość strumienia mocy w odbiorniku. Tymczasem odbiornik o wąskim polu widzenia łagodzi zniekształcenia sygnału wywołane wielościżkowo i szum światła otoczenia. Prędkość transmisji jest ograniczona przez utratę wolnej przestrzeni, a nie przez efekt rozproszenia wielodrogowego. W rezultacie ukierunkowane łącze LOS

oferuje najwyższą prędkość transmisji danych i najdłuższy dystans komunikacji w tych samych warunkach. Ponadto może poprawić bezpieczeństwo, ponieważ wysoce kierunkowa wiązka optyczna jest trudna do przerwania i podatna na blokowanie przez podsłuchującego. Ukierunkowane łącze LOS jest stosowane od wielu lat w aplikacjach o niskiej szybkości transmisji, prostych aplikacjach zdalnego sterowania do domowych urządzeń elektrycznych, takich jak telewizory i sprzęt audio. W ciągu ostatniej dekady wzrosło zainteresowanie zastosowaniem ukierunkowanej komunikacji punkt-punkt do różnych zastosowań zewnętrznych, takich jak sieci kampusowe, łączność między budynkami, dostęp do ostatniej mili, backhauling sieci komórkowych i fronthauling, łączność pozaziemska, łącza między satelitami, odzyskiwanie po awarii, wymiana światłowodów w niektórych terenach i łącza tymczasowe. Jednak ukierunkowane łącze LOS jest problematyczne pod względem zasięgu i roamingu. Trudno jest obsługiwać ruch użytkownika mobilnego ze względu na wymóg dostosowania ustalonego wyrównania między nadajnikiem a odbiornikiem. Równie trudne jest jednoczesne wspieranie wielu użytkowników za pomocą prostej konstrukcji transceivera. Niekierunkowe łącze LOS jest uważane za najbardziej elastyczną konfigurację do zastosowań w komunikacji wewnętrznej. System komunikacji optycznej z nadajnikiem o szerokiej wiązce i odbiornikiem o szerokim polu widzenia może osiągnąć szeroki obszar pokrycia i doskonałe wsparcie dla mobilności podobne do systemu RF. Pokonuje blokowanie i zacienianie, polegając na odbiciach od powierzchni obiektów wewnątrz, tak że większa część przesyłanej energii świetlnej jest wykrywana na fotodiodzie. Ponadto zmniejsza się potrzeba dokładnego wyrównania i śledzenia wiązki. Jednak niekierunkowe łącze LOS cierpi z powodu dużego tłumienia wzdłuż ścieżki optycznej i musi również radzić sobie z rozproszeniem wywołanym przez wiele dróg. Chociaż propagacja wielodrożna nie powoduje zaniku wielodrożności, ponieważ rozmiary detektorów są duże w porównaniu z długością fali, to jednak zwiększa interferencję między symbolami, co jest głównym czynnikiem ograniczającym szybkość transmisji danych. Co więcej, odbiornik o szerokim polu widzenia jest podatny na intensywne zakłócenia spowodowane światłem otoczenia w pomieszczeniach, gdzie istnieje duże prawdopodobieństwo występowania silnego oświetlenia tła, co może pogarszać wydajność łącza. Niekierunkowe łącze optyczne NLOS jest również nazywane łączem rozproszonym, w którym nadajnik o szerokiej wiązce jest połączony z odbiornikiem o szerokim polu widzenia za pomocą łącza NLOS. Ze względu na wysoką wytrzymałość i elastyczność jest to najwygodniejsza konfiguracja dla wewnętrznych sieci bezprzewodowych, ponieważ nie wymaga żadnego wyrównania i utrzymania wiązek optycznych oraz jest odporna na blokowanie i zacienianie. Te korzyści mają swoją cenę w postaci wysokiej utraty sygnału, zwykle 50–70 dB przy poziomym oddzieleniu 5 m. Ta utrata wzrasta jeszcze bardziej, jeśli tymczasowa przeszkoda, taka jak ludzie i meble, blokuje główną ścieżkę sygnału. Ponadto fotodiody o szerokim polu widzenia zbiera sygnały, które uległy jednemu lub większej liczbie odbić od sufitu, ścian i obiektów w pomieszczeniu. Odbicia poważnie osłabiają sygnał, przy czym typowe współczynniki odbicia wynoszą od 0,4 do 0,9. Ponadto propagacja wielodrożna może zwiększyć poważny ISI wywołany dyspersją, ograniczając maksymalną szybkość transmisji.

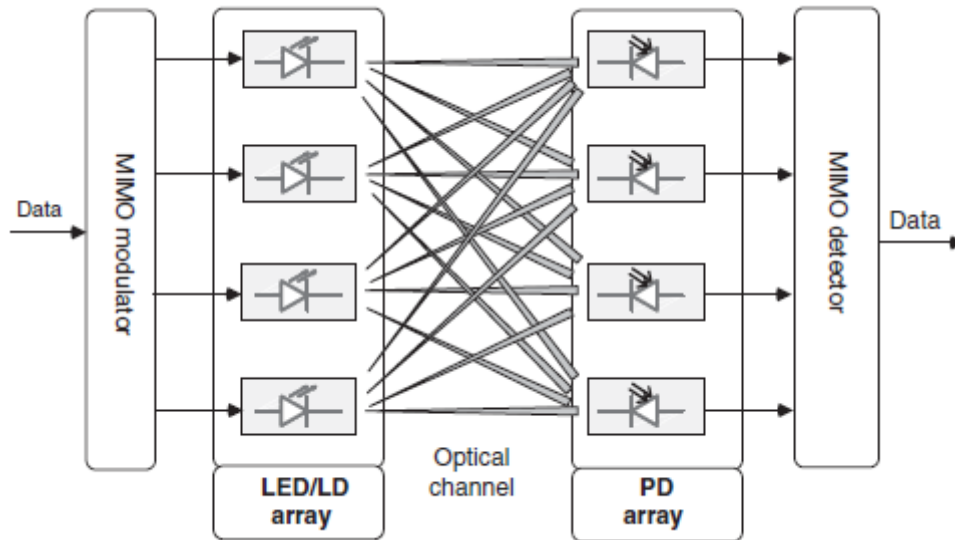
### **MIMO optyczne**

W konwencjonalnej komunikacji RF MIMO stało się już podstawową techniką eliminacji systemów mobilnych i bezprzewodowych sieci lokalnych. Bez marnowania cennego czasu lub zasobów częstotliwości może osiągnąć wysoką przepustowość danych lub wysoką niezawodność, po prostu dodając dodatkowe anteny po stronie nadajnika lub odbiornika. Technologię MIMO można podzielić na multipleksowanie przestrzenne dla dużej pojemności, różnorodność przestrzenną dla zwiększonej niezawodności i formowanie wiązki dla dużego wzmocnienia mocy. OWC mogą łatwo wdrażać wiele nadajników i odbiorników optycznych, ponieważ urządzenia optyczne, tj. diody LED, LD i PD, są gotowe, szeroko dostępne, tanie, mają niskie zużycie energii i są łatwe w instalacji. W związku z tym istnieje potencjał wykorzystania tablicy urządzeń optycznych w celu osiągnięcia równoległej transmisji danych

lub wielu redundantnych ścieżek przy użyciu technik MIMO optycznego. Pod względem funkcjonalności techniki MIMO optyczne mogą być wdrażane w formie multipleksowania przestrzennego lub modulacji przestrzennej, które są wprowadzane w następujących sekcjach:

### Multipleksowanie przestrzenne

Nieobrazowy optyczny system MIMO, składający się z nadajników NT i odbiorników NR, jest zilustrowany na rysunku.



Każdy nadajnik jest wyposażony w matrycę LED z diodami K LED, a każdy odbiornik ma indywidualny koncentrator nieobrazowy. Modulator MIMO moduluje szeregową sekwencją binarną w kategoriach schematów modulacji optycznej, takich jak On-Off Keying, do przesyłanego strumienia danych, a następnie konwertuje go na równoległe strumienie danych NT. W typowej chwili czasowej przesyłany wektor sygnału można wyrazić za pomocą

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{N_T}]^T, \quad (7)$$

gdzie  $s_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_T$  jest sygnałem przesyłanym przez  $i$ -ty nadajnik. Światło ze wszystkich matryc LED jest odbierane przez oddzielne odbiorniki przez LOS i ścieżki rozproszone. Wzmocnienie DC między nadajnikiem  $i$  i odbiornikiem  $j$  można modelować poprzez zsumowanie mocy optycznej emitowanej przez wszystkie K diod LED w nadajniku  $i$ , tj.

$$h_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^K \frac{A_{rx}^j}{d_{ijk}^2} R_o(\phi_{ijk}) \cos(\psi_{ijk}), & 0 \leq \psi_{ijk} \leq \psi_c \\ 0, & \psi_{ijk} > \psi_c \end{cases} \quad (8)$$

gdzie  $A_{rx}^j$  oznacza obszar zbierania odbiornika  $j$ ,  $d_{ijk}$  jest odległością między  $k$ -tą diodą LED przy  $i$ -tym nadajniku i  $j$ -tym odbiorniku,  $\phi_{ijk}$  i  $\psi_{ijk}$  reprezentują odpowiednio kąty emisji i padania,  $\psi_c$  oznacza pole widzenia fotodiody, a  $R_o(\cdot)$  wyraża natężenie promieniowania diod LED Lamberta, które jest podane wzorem

$$R(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi), \quad (9)$$

gdzie  $m$  oznacza rząd emisji lambertowskiej, a  $\phi$  jest kątem emisji względem osi optycznej emitera. Piszemy  $P_{LED}$ , aby oznaczyć średnią moc emitowaną przez diodę LED, a chwilowa moc nadawana jest równa  $P_t = P_{LED}R(\phi)$ , w zakresie od 0 do  $2P_{LED}$ . W ten sposób macierz modelująca ten kanał optyczny MIMO jest tworzona jako

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \dots & h_{N_RN_T} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Odbiornik składa się z koncentratora optycznego, po którym następuje detektor i przedwzmacniacz. Załóżmy, że wzmocnienie koncentratora jest maksymalnym teoretycznym, a obszar zbierania w równaniu (8) jest określony przez

$$A_{rx}^j = \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)} A_{PD} \quad (11)$$

z obszarem fotodiody  $A_{PD}$  i współczynnikiem załamania światła koncentratora  $n$ . Następnie odebrany sygnał w odbiorniku  $j$  można zapisać jako

$$r_j = \gamma P_{LED} \sum_{i=1}^{N_T} h_{ij} s_i + n_j \quad (12)$$

gdzie  $\gamma$  oznacza czułość fotodiody, a  $n_j$  to prąd szumu, który można obliczyć ze wzoru

$$n_j = 2e\gamma(P_j + P_a)B + i_a^2 B, \quad (13)$$

gdzie  $P_j$  jest średnią otrzymaną mocą

$$P_j = P_{LED} \sum_{i=1}^{N_T} h_{ij}^2 s_i^2, \quad (14)$$

$P_a$  oznacza moc światła otoczenia

$$P_a = 2\pi \chi_a A_{rx}^j (1 - \cos(\psi_c)), \quad (15)$$

$B$  to szerokość pasma odbiornika, a  $i_a$  to gęstość prądu szumu przedwzmacniacza. Oznaczając odebrany wektor jako

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_{N_R}]^T, \quad (16)$$

i wektor szumu

$$\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_{N_R}]^T, \quad (17)$$

daje

$$\mathbf{r} = \gamma P_{\text{LED}} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n}. \quad (18)$$

Przekazywane symbole można oszacować w kategoriach

$$\hat{\mathbf{s}} = \frac{1}{\gamma P_{\text{LED}}} (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{r}, \quad (19)$$

gdy odbiornik zna wiedzę o  $\mathbf{H}$ . W przeciwieństwie do systemu radiowego, system OWC może zastosować detektor obrazowania w odbiorniku. Światło z każdej matrycy LED dociera do odbiornika i uderza w każdy piksel na matrycy detektora. System obrazowania optycznego MIMO podąża za tym samym modelem, co przypadek bez obrazowania, z modyfikacją macierzy kanału  $\mathbf{H}$ , gdzie każdy element jest następnie określany przez

$$h_{ij}^{\text{IMG}} = a_{ij} h'_i, \quad (20)$$

gdzie  $h'_i$  jest znormalizowaną mocą w obrazie  $i$ -tej matrycy LED przy aperturze soczewki obrazowej, a  $a_{ij}$  określa, jaka część tej mocy przypada na  $j$ -ty odbiornik. Pierwszy parametr jest podany przez

$$h'_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^K \frac{A'_{rx}}{(d'_{ik})^2} R_o(\phi_{ik}) \cos(\psi_{ik}), & 0 \leq \psi_{ik} \leq \psi_c \\ 0, & \psi_{ik} > \psi_c \end{cases} \quad (21)$$

gdzie  $A'_{rx}$  oznacza obszar zbierania obrazu odbiornika,  $d'_{ik}$  oznacza odległość między  $k$ -tą diodą LED w nadajniku  $i$  a środkiem soczewki zbiorczej. Drugi parametr jest określany przez

$$a_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{s=1}^{N_R} A_{is}} \quad (22)$$

gdzie  $A_{is}$  jest obszarem obrazu  $i$ -tego nadajnika na  $s$ -tym pikselu.

### Modulacja przestrzenna

Optyczna modulacja przestrzenna (OSM) to energooszczędna, wydajna pod względem przepustowości technika transmisji pojedynczego nośnika dla OWC. Nadajnik jest wyposażony w matrycę nadajników optycznych składającą się z wielu przestrzennie oddzielonych diod LED lub LD. Układ tych nadajników jest podobny do diagramu punktów konstelacji w schemacie modulacji cyfrowej. Każdemu nadajnikowi w matrycy przypisany jest indeks odpowiadający unikalnej sekwencji binarnej zwanej symbolem przestrzennym. Przychodzące bity danych są grupowane, a następnie każda sekwencja jest mapowana na jeden z symboli przestrzennych. Pojedynczy nadajnik optyczny jest aktywowany w celu przesłania sygnału optycznego w typowej sytuacji, podczas gdy inne nadajniki pozostają ciche, gdy aktywny nadajnik emituje światło. Aktywny nadajnik emituje określony poziom intensywności w określonej sytuacji czasowej. Po stronie odbiornika optymalny detektor OSM jest używany do oszacowania indeksu aktywnego nadajnika. Jeśli istnieją nadajniki  $N_T$ , system może dostarczać  $\log_2 N_T$  bitów na okres symbolu. Rozważmy system OSM składający się z  $N_T$  jednostek transmisyjnych i  $N_R$  jednostek odbiorczych. Bez utraty ogólności przyjmijmy  $N_T = 4$  dla celów ilustracyjnych. Bity danych, które mają zostać przesłane w trzech kolejnych okresach symboli, to  $[1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$ , które są pogrupowane w

$[\{1, 1\}, \{1, 0\}, \{0, 0\}]^T$ . Każdy okres symboli wybiera diodę LED w odniesieniu do sekwencji danych. Wybrana dioda LED przesyła impuls niepowrotny do zera z intensywnością optyczną  $s_l = P_t$ , która ignoruje informacje o częstotliwości i fazie. Wynikowa macierz przesłana jest podana przez

$$\mathbf{s}(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & s_l \\ 0 & 0 & 0 \\ s_l & 0 & 0 \\ 0 & s_l & 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Każda kolumna tej macierzy odpowiada przesyłanym sygnałom w typowej instancji czasowej, a każdy wiersz odpowiada konkretnej diodzie LED. Na przykład trzecia dioda LED emituje światło o intensywności optycznej  $P_t$ , podczas gdy inne diody LED są wyłączane w pierwszym okresie symbolu. Czwarta dioda LED jest aktywowana w następnym okresie symbolu itd. Otrzymany sygnał można zapisać jako

$$\mathbf{y}(t) = \sqrt{\rho} \mathbf{H}(t) \otimes \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (24)$$

gdzie  $\otimes$  oznacza operację splotu, a średni stosunek sygnału elektrycznego do szumu w każdej jednostce odbiornika jest podany wzorem

$$\rho = \frac{r^2 \bar{P}_r^2}{\sigma^2}, \quad (25)$$

gdzie  $r$  oznacza czułość fotodiody, czyli średnią moc optyczną odbieraną w każdej jednostce odbiorczej

$$\bar{P}_r = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} P_r^i \quad (26)$$

z

$$P_r^i = \sum_{k=0}^K h_{ik} P_t \quad (27)$$

będąc średnią odebraną mocą optyczną w jednostce odbiorczej  $i$ , gdy jednostka nadawcza  $l$  emituje, a  $h_{ik}$  jest wzmocnieniem ścieżki kanału między jednostką nadawczą  $l$  a jednostką odbiorczą  $i$  dla  $k$ -tej ścieżki. Szum w systemie komunikacji optycznej jest sumą szumu termicznego w odbiorniku i szumu śrutowego spowodowanego światłem otoczenia, tj.

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 \quad (28)$$

który można modelować jako niezależny i identycznie rozłożony addytywny biały szum gaussowski o dwustronnej gęstości widmowej mocy  $\sigma^2$ . Tymczasem kanał OSM jest modelowany w macierzy  $N_r \times N_t \times (K + 1)$ , gdzie  $K$  oznacza liczbę ścieżek propagacji, zdefiniowaną jako

$$\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_{11}(t) & \mathbf{h}_{12}(t) & \dots & \mathbf{h}_{1N_r}(t) \\ \mathbf{h}_{21}(t) & \mathbf{h}_{22}(t) & \dots & \mathbf{h}_{2N_r}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{N_r1}(t) & \mathbf{h}_{N_r2}(t) & \dots & \mathbf{h}_{N_rN_r}(t) \end{pmatrix}, \quad (29)$$

gdzie  $\mathbf{h}_{ij}(t) = [h_{ij}^0(t), h_{ij}^1(t), \dots, h_{ij}^K(t)]$  oznacza wektor kanałowy zawierający odpowiedź kanałową pomiędzy jednostką nadawczą  $j$  i jednostką odbiorczą  $i$ . Odbiornik stosuje zmodyfikowaną detekcję maksymalnego prawdopodobieństwa w celu pobrania indeksu aktywnej transmitowanej diody LED,

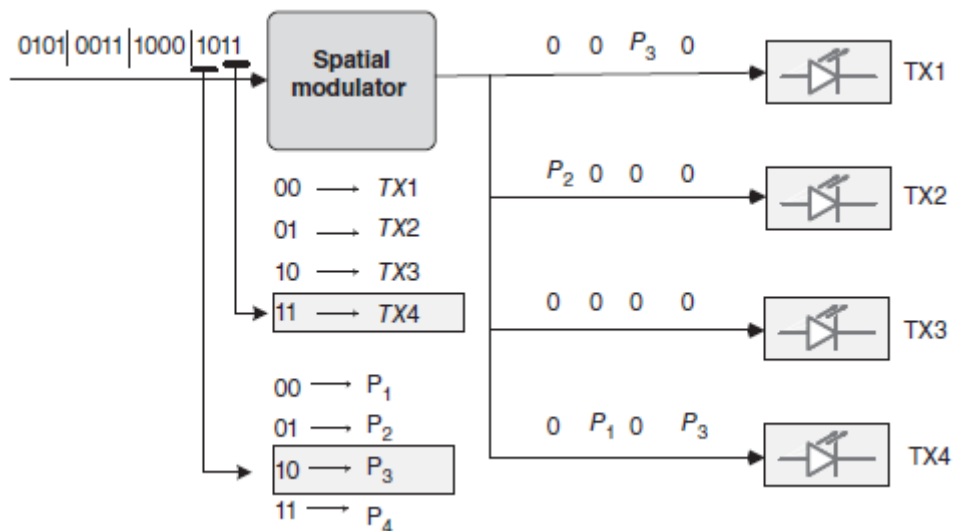
$$\hat{l} = \arg \max_l p_{\mathbf{y}}(\mathbf{y} | \bar{\mathbf{s}}, \hat{\mathbf{H}}) \quad (30)$$

$$= \arg \min_l \sqrt{\rho} \|\mathbf{h}_l \bar{\mathbf{s}}\|^2 - 2(\mathbf{y}^T \mathbf{h}_l \bar{\mathbf{s}}), \quad (31)$$

gdzie  $\hat{\mathbf{H}}$  oznacza wiedzę o kanale w odbiorniku,  $\bar{\mathbf{s}}$  jest wektorem przesyłanym w bieżącym okresie symbolu, a

$$p_{\mathbf{y}}(\mathbf{y} | \bar{\mathbf{s}}, \hat{\mathbf{H}}) = \pi^{-N_r} \exp\left(-\|\mathbf{y} - \sqrt{\rho} \hat{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{s}}\|^2\right) \quad (32)$$

jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa  $\mathbf{y}$  uwarunkowaną  $\hat{\mathbf{H}}$  i  $\bar{\mathbf{s}}$ . Ponadto, modulacja przestrzenna może jednocześnie przysłać dane zarówno w domenie przestrzennej, jak i sygnału. Innymi słowy, wybrana jednostka nadawcza może emitować światło w wielu poziomach intensywności oznaczonych jako  $P_1, P_2, \dots, P_M$ , a nie tylko w jednym natężeniu, aby umożliwić kolejny stopień swobody. Przesyłane bity danych są mapowane na odpowiedni sygnał i indeks nadajnika, zapewniając zwiększoną wydajność widmową  $[\log_2(N_T) + \log_2(M)]$  bps/Hz. Jak pokazano na rysunku, sekwencja bitów (1, 1, 1, 0) jest reprezentowana przez indeks nadajnika 4 i poziom intensywności  $P_3$ .



**Podsumowanie**



Korzystając z terminów bezprzewodowej komunikacji IR, VLC, bezprzewodowej komunikacji UV lub komunikacji FSO, OWC były badane i rozwijane przez kilka dziesięcioleci. Obiecuje to być podejściem uzupełniającym dla obecnych systemów RF w nadchodzącej generacji systemów komunikacji mobilnej. OWC ma pewne szczególne zalety, np. zapewnianie masowo wystarczających zasobów widmowych w pasmach IR, światła widzialnego i UV oraz szeroko dostępne gotowe źródła optyczne i detektory, które są tanie, lekkie, energooszczędne, niezawodne i mają długą żywotność. Dzięki studiowaniu tego rozdziału czytelnicy powinni uzyskać pełny obraz OWC, w tym jego technicznych zalet i wyzwań, ewolucji, różnych scenariuszy zastosowań, podstawowej konfiguracji systemu OWC, charakterystyki źródeł optycznych i detektorów, różnych konfiguracji łącza optycznego i optycznych technik MIMO.