

Warszawa, 15.05.2026

Niewidzialna elektroda

Zespół badawczy tworzony przez naukowców z Politechniki Łódzkiej, Łukasiewicz – Instytutu Mikroelektroniki i Fotoniki (Łukasiewicz - IMiF), Politechniki Wrocławskiej oraz Politechniki Warszawskiej, zademonstrował niemal całkowicie przezroczystą elektrodę dla średniej podczerwieni, która posiada przewodność porównywalną z przewodnością metali. Wyniki opisano w pracy „Large-Area Metal-Integrated Grating Electrode Achieving Near 100% Infrared Transmission”, opublikowanej w *Light: Science & Applications* (<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02270-0>).

Niemożliwy kompromis w podczerwieni

Przezroczyste elektrody przewodzące (TCE, ang. *transparent conductive electrodes*) są kluczowym elementem nowoczesnych urządzeń optoelektronicznych. Ich zadanie wydaje się proste: mają skutecznie przewodzić prąd, a jednocześnie pozostawać przezroczyste dla światła. W praktyce jednak te dwie cechy trudno pogodzić. Wysoka przewodność wymaga obecności swobodnych elektronów, które jednocześnie powodują pochłanianie i odbicie promieniowania.

Problem ten staje się szczególnie wyraźny w zakresie podczerwieni, zwłaszcza średniej i dalekiej, gdzie większość materiałów przewodzących jest niemal całkowicie nieprzezroczysta. To właśnie dlatego badania nad przezroczystymi elektrodami koncentrują się głównie na świetle widzialnym i bliskiej podczerwieni, tam kompromis między przewodnością a transmisją jest łatwiejszy do osiągnięcia.

W podczerwieni sytuacja wygląda znacznie gorzej: materiały, które dobrze sprawdzają się w zakresie widzialnym, tracą swoje właściwości, ponieważ silnie oddziałują ze światłem, pochłaniając je lub odbijając.

Nowe podejście zaproponowane przez naukowców omija to ograniczenie. Zamiast polegać na pojedynczym materiale, wykorzystuje specjalnie zaprojektowaną metastrukturę złożoną z półprzewodnika i metalu. Dzięki temu możliwe jest rozdzielenie funkcji przewodzenia prądu i propagacji światła. W rezultacie uzyskano strukturę, która przepuszcza aż 94% promieniowania podczerwonego, o 35% więcej niż gładka powierzchnia półprzewodnika, a jednocześnie zachowuje przewodność elektryczną zbliżoną do metalu.

Gdzie technologia może przynieść największe korzyści

Technologie podczerwone stanowią podstawę wielu dynamicznie rozwijających się zastosowań od kamer termowizyjnych, laserów i fotodetektorów, po systemy detekcji gazów, LiDAR oraz źródła promieniowania wykorzystywane w przemyśle i medycynie.

W tego typu urządzeniach elektroda często znajduje się bezpośrednio na drodze propagacji światła, dlatego jej ograniczona przezroczystość obniża sprawność całego układu.

Zwiększenie transmisji przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej przewodności przekłada się na bardziej efektywną emisję, wyższą czułość detekcji oraz lepszą jakość sygnału, a w przypadku systemów termowizyjnych na wyraźniejszy obraz i potencjalnie krótszy czas odpowiedzi urządzeń.

Struktura zaprojektowana tak, by prąd i światło sobie nie przeszkadzały

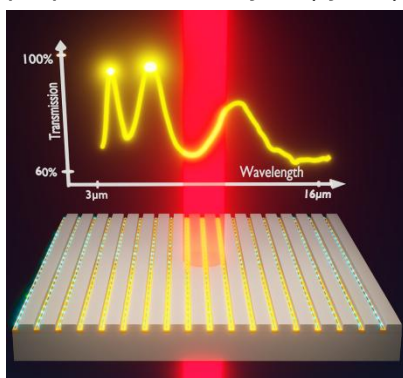
– Kluczową ideą tej pracy jest odejście od klasycznej, cienkiej warstwy przewodzącej. Zamiast oczekiwać od jednego materiału, że spełni wszystkie funkcje jednocześnie, zaprojektowaliśmy nanostrukturę fotoniczną łączącą metal i półprzewodnik tzw. *metal-integrated monolithic high contrast grating* (metalMHCG) – tłumaczy Karolina Bogdanowicz z Łukasiewicz – IMiF, doktorantka Politechniki Łódzkiej.

Jest to struktura fotoniczna, która rozdziela dwie funkcje zwykle pozostające w konflikcie. Metal odpowiada za wydajny transport prądu, natomiast otaczająca go architektura półprzewodnikowa została zaprojektowana tak, aby światło mogło przechodzić przez strukturę, minimalizując oddziaływanie z metalem. Innymi słowy, transport prądu i transmisja optyczna zostały tu celowo rozseparowane.

– Ta strategia projektowa stanowi istotę innowacji. Zamiast wybierać między przewodnością a przezroczystością, struktura pozwala niemal bezkompromisowo zoptymalizować oba te parametry jednocześnie. Najbardziej uderzające jest to, że elektroda, mimo bardzo wysokiej przewodności, działa jak warstwa antyrefleksyjna. Dzięki temu światło prawie się od niej nie odbija, w przeciwieństwie do typowych granic między materiałami, np. półprzewodnik - powietrze - wyjaśnia prof. dr hab. inż. Tomasz Czystanowski z Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej.

94% transmisji i bardzo niski opór - wynik, który zaskakuje

W demonstracji eksperymentalnej strukturę metalMHCG wykonano na podłożu GaAs, a złote paski umieszczono pomiędzy okresowo rozmieszczonymi elementami półprzewodnikowymi (rys. 1). Uzyskano 94% transmisji dla światła niespolaryzowanego



rys. 1 Demonstration of a transparent conductive infrared electrode enabling nearly absorption- and reflection-free transmission with metal-like conductivity.

przy centralnej długości fali 7 μm . Jednocześnie opór powierzchniowy wyniósł około 2.8 Ω/\square (ohm na kwadrat), co wskazuje na wyjątkowo wysoką przewodność elektryczną na tle innych koncepcji przezroczystych elektrod.

Dlaczego standardowe materiały elektrod dla podczerwieni nie wystarczają

Do najbardziej znanych materiałów stosowanych jako przezroczyste elektrody (TCE) należą ITO, grafen, cienkie warstwy metali oraz różnego rodzaju sieci metaliczne. Rozwiązania te dobrze sprawdzają się w zakresie światła widzialnego, jednak w podczerwieni ich ograniczenia stają się znacznie bardziej odczuwalne: albo zbyt silnie pochłaniają światło, albo je odbijają, albo ich opór elektryczny jest zbyt wysoki, by zapewnić efektywny transport prądu.

Nowe podejście omija te problemy, ponieważ nie opiera się na pojedynczej, jednorodnej warstwie przewodzącej. Zamiast tego wykorzystuje zaprojektowaną architekturę fotoniczną, która niezależnie kontroluje transmisję optyczną i przewodnictwo elektryczne, co daje wyraźną przewagę nad klasycznymi rozwiązaniami materiałowymi.

Badacze zademonstrowali swoje rozwiązanie na arsenku galu (GaAs) — materiale powszechnie stosowanym w laserach i detektorach podczerwieni — co podkreśla bezpośrednie znaczenie wyników dla zastosowań praktycznych.

– Co ważne, sama idea nie jest ograniczona wyłącznie do arsenku galu, może zostać zastosowana w dowolnym półprzewodniku, a także zaprojektowana dla wybranego promieniowania z zakresu od ultrafioletu do podczerwieni. Zakres podczerwieni wybraliśmy celowo, aby pokazać, że koncepcja działa nawet w tak wymagającym dla przezroczystych elektrod obszarze widmowym. – podkreśla prof. T. Czystanowski.

„Duża powierzchnia” ma znaczenie

W życiu codziennym określenie „duża powierzchnia” zwykle kojarzy się z wymiarami liczonymi w metrach kwadratowych. W mikro- i nanotechnologii oznacza jednak coś zupełnie innego, a mianowicie skalę wyraźnie większą niż typowe elementy w tej dziedzinie, takie jak pojedyncze tranzystory czy rozmiar komórki biologicznej. W tym kontekście „duże” mogą być struktury o rozmiarach setek mikrometrów lub pojedynczych milimetrów.

W swojej pracy badacze zaprezentowali elektrody o powierzchni przekraczającej 1 cm^2 . To skala zdecydowanie wykraczająca poza typowe, małe prototypy optoelektroniczne i zbliżona do wymiarów istotnych z punktu widzenia rzeczywistych matryc emiterów podczerwieni oraz detektorów. Innymi słowy, nie jest to już tylko dowód koncepcji, lecz wyraźny krok w stronę praktycznych zastosowań.

Uzyskanie tego efektu było możliwe dzięki wykorzystaniu stosowanych w Łukasiewicz – IMiF zaawansowanych technik mikro- i nanofabrykacji, takich jak elektronolitografia, i trawienie plazmowe. Metody te umożliwiają precyzyjne kształtowanie struktur

półprzewodnikowych oraz ich integrację z metalem z nanometrową dokładnością. Co istotne, zastosowane podejścia technologiczne są zgodne ze standardowymi procesami wykorzystywanymi w przemyśle półprzewodnikowym. To ma kluczowe znaczenie dla przyszłego skalowania i wdrożeń.

Praca stanowi również przykład efektywnej współpracy wiodących ośrodków w Polsce zajmujących się mikroelektroniką i fotoniką, łączącej kompetencje w zakresie projektowania, wytwarzania oraz pomiarów i analizy parametrów struktur.

Kolejny krok to skalowanie

Kluczowym kolejnym etapem jest przeskalowanie technologii z poziomu struktur laboratoryjnych do pełnych płytek półprzewodnikowych oraz jej integracja z działającymi urządzeniami.

Jest to przede wszystkim wyzwanie technologiczne, a nie koncepcyjne. Zasada działania została już jasno wykazana, teraz konieczne jest dopracowanie procesu, jego skalowanie oraz wdrożenie w istniejących platformach technologicznych. To właśnie sprawia, że uzyskany wynik jest szczególnie obiecujący.

Otwiera on również drogę do nowych generacji urządzeń pracujących w podczerwieni, w których kompromis między przewodnością a przezroczystością przestaje być kluczowym ograniczeniem.

Kontakt:

Eksperti:

Politechnika Łódzka Prof. Tomasz Czystanowski: tomasz.czystanowski@p.lodz.pl

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki Dr hab. inż. Anna Szerling
anna.szerling@imif.lukasiewicz.gov.pl

Marketing/PR: Patrycja Skoczek patrycja.skoczek@imif.lukasiewicz.gov.pl +48 604 372 470