

Światło – spoiwo współczesnej cywilizacji

# Bezblędne podłoża



## PIOTR PERLIN

Instytut Wysokich Ciśnień, Warszawa

Polska Akademia Nauk

piotr@unipress.waw.pl

Piotr Perlin jest profesorem w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN. Zajmuje się fizyką i technologią przyrządów półprzewodnikowych wytwarzanych na bazie azotków metali grupy III

**Współczesna cywilizacja opiera się przede wszystkim na zarządzaniu informacją, jej przetwarzaniu i wizualizacji. Znaczną część obowiązków cywilizacyjnych w tej dziedzinie wypełnia dziś światło**

Choć powszechna jest percepcja elektroniki jako głównego medium cywilizacji informacyjnej, często nie dostrzega się tu szczególnej roli optoelektroniki, zajmującej się konstrukcją przyrządów wykorzystujących światło. W tej dziedzinie ogromną rolę odgrywają lasery półprzewodnikowe, przyrządy, które pozwalają nam najłatwiej przerzucić część pracy ze spracowanych elektronów na szybkie i wypoczęte fotony. Ich rolą jest przede wszystkim przenoszenie informacji. Lasery półprzewodnikowe transmitują nasze rozmowy telefoniczne na tych odcinkach, na których przemieszczają się one liniami światłowodowymi. To samo dotyczy oczywiście wszechobecnego Internetu, którego szkieletem komunikacyjnym są światłowody. Lasery półprzewodnikowe towarzyszą nam od ponad dwudziestu lat przy odtwarzaniu muzyki z płyt kompaktowych. Od kilkunastu lat oglądamy również filmy odtwarzane z systemów DVD, w których używane są czerwone lasery półprzewodnikowe.

### W falach krótszych

Wymienione aplikacje posługują się laserami podczerwonymi emitującymi światło o długości fali 1550 nm (telekomunikacja), laserami podczerwonymi o długości fali 780 nm

(zapis CD) i laserami czerwonymi 640 nm (zapis wideo DVD). Klasyczne materiały półprzewodnikowe, takie jak arsenek galu, fosforek galu, arsenek indu i ich stopy, nie pozwalają, niestety, na emisję światła o falach krótszych niż mniej więcej 600 nm. Dopiero eksploracja zupełnie nowej grupy materiałów półprzewodnikowych: azotków metali grupy III, takich jak azotek galu, azotek aluminium i azotek indu, pozwoliło na wytworzenie laserów półprzewodnikowych emitujących w falach krótszych: obecnie zademonstrowano emisję w zakresie zaledwie 365–530 nm.

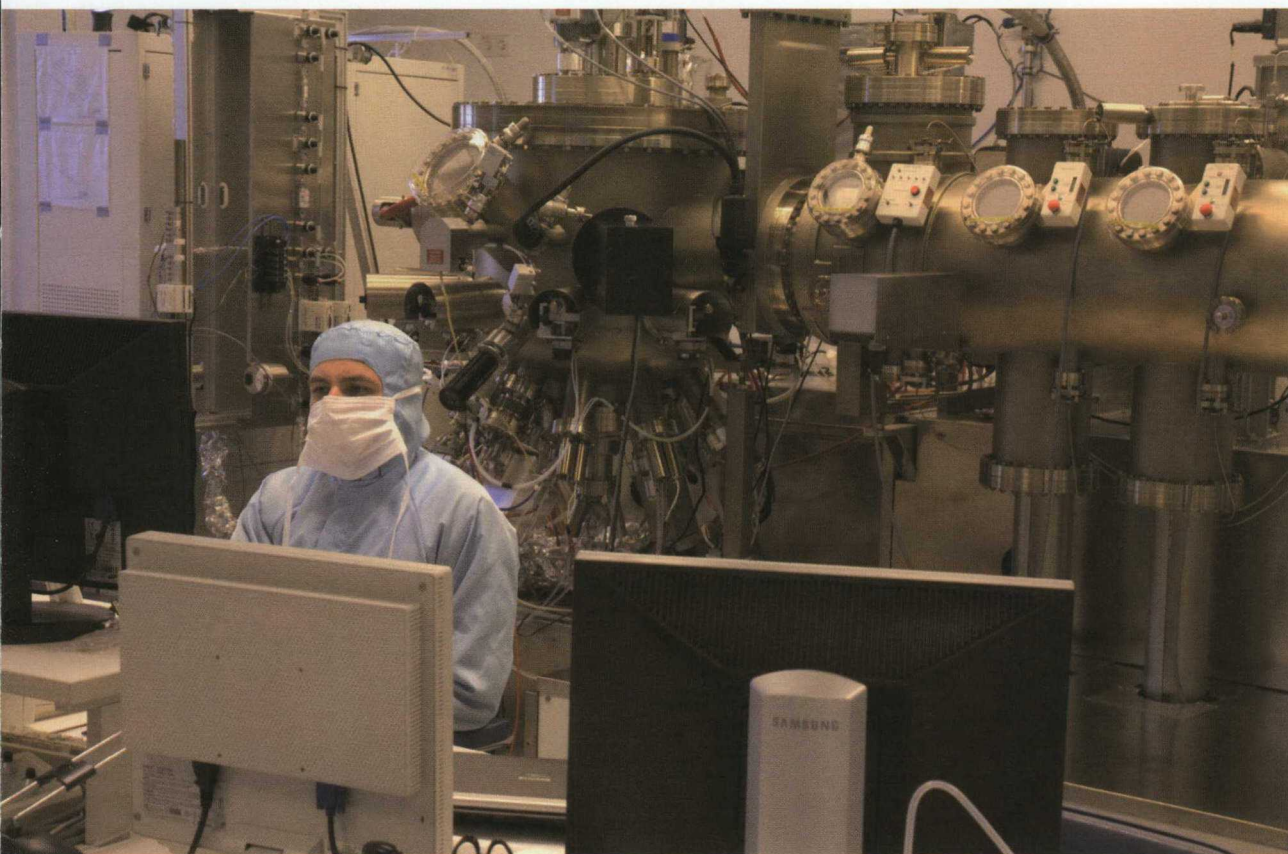
Nowe lasery umożliwiły nie tylko rozwój i polepszenie dotychczasowych zastosowań (np. system DVD zostaje wyparty przez znacznie gęstszy zapis wideo w systemie BluRay, a lasery fioletowe wprowadzają nową jakość w systemach druku cyfrowego), lecz również powstanie nowych obszarów zastosowań. Takim nowym obszarem jest wytwarzanie wyświetlaczy i projektorów barwnych pracujących w systemie RGB (Red, Green, Blue), w których źródłami składowymi światła są trzy lasery emitujące światło czerwone, zielone i niebieskie. Tego typu wyświetlacze mogą mieć zastosowanie w różnego typu projektorach obrazu: od małych pikoprojektorów, które mają być stosowane w telefonach komórkowych, poprzez wyświetlacze samochodowe, telewizję laserową, do ogrom-

**Eksploracja materiałów takich jak azotek galu umożliwiła wytworzenie laserów emitujących światło fioletowe i ultrafioletowe**

nych systemów kinowych. Jakość obrazu w laserowym systemie RGB jest nieporównywalna z konwencjonalnymi źródłami światła opartymi na filtrowanym świetle białym. Dynamika kolorów jest ogromna, a dzięki wąskiemu spektralnie składowym źródłom światła jakość i liczba kolorów jest bez porównania lepsza niż w systemach LCD.

Dzięki różnorodności dostępnych obecnie długości fali emitowanych przez lasery półprzewodnikowe możliwe stało się również





Reaktor MBE w IWC PAN, za pomocą którego uzyskano po raz pierwszy w świecie laser azotkowy tak zwaną metodą PA MBE (plasma assisted MBE)

zastosowanie ich w detekcji zanieczyszczeń powietrza, diagnostyce medycznej oraz w systemach bezpieczeństwa.

### Konstrukcja i wytwarzanie

Lasery diody półprzewodnikowe są przyrządami ogniskującymi w sobie wiele osiągnięć współczesnej fizyki i technologii. Warstwą emitującą światło jest w laserze układ tak zwanych studni kwantowych, czyli dwuwymiarowych obiektów o szerokości 2-10 nm, które mają wyraźnie niższą przerwę energetyczną niż ich otoczenie. Dzięki temu przy stosunkowo niskich prądach można osiągnąć niezbędną w laserach inwersję obsadzeń i akcję laserową. Aby wytworzyć szereg cienkich warstw niezbędnych do pracy lasera, używa się obecnie dwóch metod epitaksji - nakładania cienkich warstw atomowych na wybrane podłoże. Pierwszą jest epitaksja z wiązek molekularnych (MBE), drugą - epitaksja ze związków metaloorganicznych (MOVPE). Oprócz problemu wytworzenia odpowiedniego zestawu warstw półprzewodnikowych o różnych przerwach energetycznych i różnych współczynnikach załamania podstawową kwestią jest posia-

danie odpowiedniego podłoża do wzrostu struktury laserowej. Takie podłoże, wykonane z monokryształu półprzewodnika, decyduje o jakości całej struktury. W przypadku konwencjonalnych laserów materiałem podłoża jest arsenek galu, w przypadku laserów azotkowych - azotek galu. Jednak synteza tego związku stanowiła zawsze ogromne wyzwanie technologiczne. Dlatego wiele azotkowych emiterów światła niebieskiego było i jest nadal tworzonych nie na podłożach z azotku galu, lecz szafiru przypominającego ten kryształ budową. Jednak warstwy atomowe osadzone na podłożach szafirowych nie są równie doskonałe jak struktury budowane bezpośrednio na azotku galu: pojawiają się w nich dyslokacje - miejsca, w których regularna sieć atomów traci prawidłowy kształt, układając się na siatce o nieidealnych rozmiarach. Takich błędów unika się tylko w przypadku stosowania podłoży z kryształów azotku galu.

### Lasery półprzewodnikowe w Polsce

Lasery półprzewodnikowe, które ściśle rzecz biorąc, powinniśmy nazywać półprzewodnikowymi diodami laserowymi, są podob-

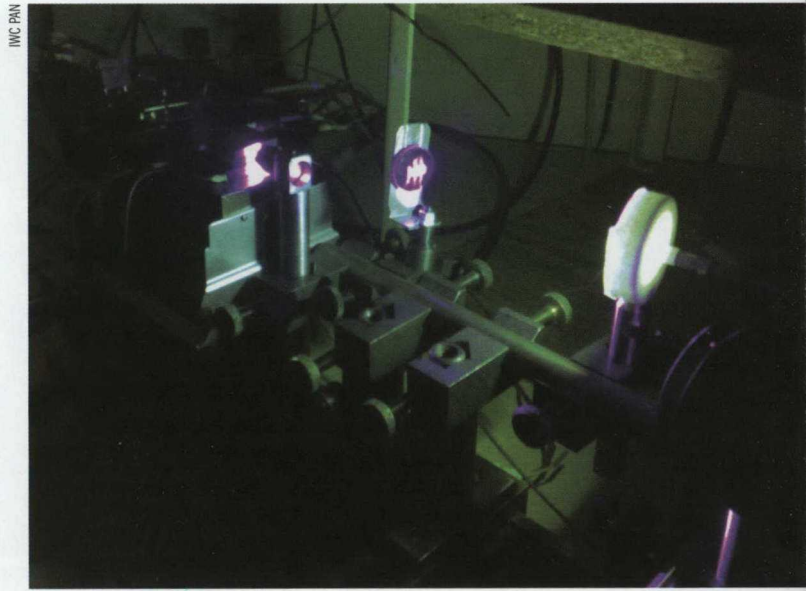


## Światło – spoiwo współczesnej cywilizacji

nie jak i inne lasery owocem rozwoju fizyki współczesnej, w tym szczególnie mechaniki kwantowej oraz inżynierii materiałowej. Choć sama idea koherentnego wzmacniacza i emitera promieniowania została najpierw zastosowana w systemach gazowych działających w zakresie mikrofalowym (maser mikrofalowy) i ciała stałego (laser rubinowy), to szybko zdano sobie sprawę z wygody użycia do konstrukcji laserów półprzewodnikowego złącza p-n. Pierwsze lasery półprzewodnikowe zostały zademonstrowane w 1962 r. przez cztery grupy w Stanach Zjednoczonych. Już cztery lata później Bohdan Mroziewicz, w owym czasie pracownik Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, zademonstrował działanie homozłączonego lasera na arsenku galu. Tematyką laserów półprzewodnikowych zajmowali się w Polsce między innymi dr Andrzej Małąg z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych i prof. Maciej Bugajski z Instytutu Technologii Elektronowej. W ostatnim czasie grupa prof. Bugajskiego otworzyła nowy rozdział w polskiej historii laserów, konstruując kwantowy laser kaskadowy (*Quantum Cascade Laser*) pracujący w zakresie 10  $\mu\text{m}$ . Takie lasery są niezastąpionym źródłem światła dla superczułej detekcji chemicznej.

### Lasery azotowe

Dzisiaj trwają też prace nad nową grupą laserów półprzewodnikowych emitujących światło o małej długości fali – laserami azotowymi: krytyczną technologią niezbędną do ich wytwarzania jest uzyskanie odpowiedniej jakości podłoża z monokrystalicznego azotku galu. W tej dziedzinie miejsce Polski jest szczególne. Już od początku lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia (kiedy jeszcze nie myślnano o azotkowych diodach laserowych) w Centrum Badań Wysokociśnieniowych PAN (obecnie – Instytucie Wysokich Ciśnień PAN, IWC PAN) trwały prace nad wysokociśnieniową syntezą niesłychanie trudnego do wytworzenia azotku galu. Pracami tymi kierował prof. Sylwester Porowski, a wybitną rolę odegrali w nich na początku dr Janusz Karpiński, a później przede wszystkim dr Izabella Grzegory i dr Michał Boćkowski. Prace te doprowadziły do wytworzenia na początku lat 90. pierwszych w świecie praktycznie bezdefektowych kryształów GaN wzrastających z roztworu azotu w galu w ciś-



nieniach powyżej 10 kbar i temperaturach powyżej 1400 C. Choć bardzo wysokiej jakości, kryształy te były zbyt małe do celów przemysłowych. Prace nad ich powiększeniem trwają do dzisiaj i doprowadziły już do uzyskania kryształów wysokociśnieniowych o średnicy 1,5–2 cali o akceptowalnych przez przemysł parametrach optoelektronicznych. Kryształy takie wytwarzane są obecnie w firmie TopGaN będącej spin-offem Instytutu Wysokich Ciśnień PAN.

Mówiąc o miejscu Polski w tej dziedzinie, należy podkreślić także osiągnięcia innej grupy zajmującej się wzrostem kryształów – mowa o firmie Ammono, kierowanej przez dr. Roberta Dwilińskiego, absolwenta Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (praca doktorska pod kierunkiem prof. Marii Kamińskiej). Zespół Roberta Dwilińskiego osiągnął światowe wyniki w wytwarzaniu podłoża azotku galu o rozmiarach 2 cali i o parametrach przewyższających jakiegokolwiek inne materiały dostępne na rynku. Wraz ze swym zespołem opracował on unikatową metodę wzrostu amonothermalnego azotków o wielkich walorach przemysłowych. Choć ciągle gros produkcji podłoża azotku galu pochodzi z japońskiej firmy Sumitomo Electric, polskie technologie wytwarzają materiał o znacznie wyższej jakości, który może być w przyszłości konkurencyjny rynkowo. Przykłady firm TopGaN i Ammono pokazują, że przejście od badań podstawowych i stosowanych do technologii i przemysłu jest możliwe pod warunkiem istnienia pro-

**Obraz pracującej matrycy laserowej wytworzonej jako kooperacja TopGaN i IWC PAN**



technologicznej atmosfery w instytutach badawczych i wejścia kapitału w ryzykowne przedsięwzięcia wysokich technologii.

Rozwój ultranowoczesnych technologii podłożowych w Polsce był zachętą dla grupy z IWC PAN do prac nad krótkofalowymi laserami azotowymi. Nie były one łatwe. Laser półprzewodnikowy to nie tylko sekwencja nanometrowej szerokości warstw półprzewodnika – to również często skomplikowany *processing* przyrządowy. Aby dioda laserowa stała się działającym przyrządem, musi być odpowiednio przygotowana. Większość diod laserowych to przyrządy emisji krawędziowej, w których nośniki – elektrony i dziury – wstrzykiwane są do obszaru w kształcie paska o szerokości kilku mikronów. Pasek ten położony jest z reguły na szczycie grzbietu zwanego mesą, której rola polega na utworzeniu falowodu, w którym propaguje się światło. Istotnym problemem w konstrukcji lasera jest również wytworzenie omowych kontaktów elektrycznych do materiału typu n i p lasera.

### Na celowniku niebieski i zielony

Dzięki rozwinięciu technologii epitaksjalnych i *processing*owych już w 2001 r. udało się nam zademonstrować działanie lasera półprzewodnikowego. Była to druga demonstracja takiego lasera w Europie. Od tego czasu grupy w IWC PAN i firmie TopGaN rozwijają technologię laserową, używając specyficznych metod opracowanych w Polsce. Te specyficzne technologie to między innymi metoda wytwarzania laserów za pomocą MBE. Ta opatentowana przez IWC PAN metoda pozwala uzyskać niezwykle wysokiej jakości struktury pracujące w zakresie spektralnym niebieskim i zielonym.

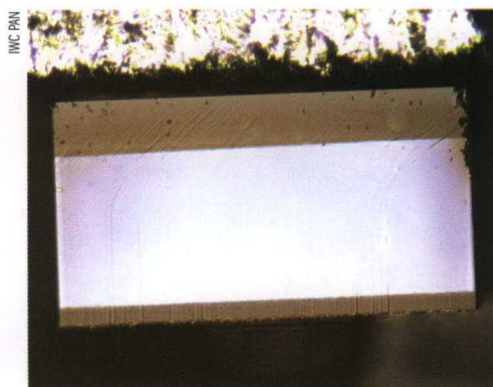
Inną specyficzną polską technologią rozwijaną w IWC PAN jest koncepcja zastosowania tak zwanego *claddingu* plazmonowego do konstrukcji laserów niebieskich i zielonych. Istota tej idei polega na wykorzystaniu efektu wpływu koncentracji plazmy elektronowej na współczynnik załamania (efekt plazmonowy) do efektywnego ograniczenia przestrzennego pola świetlnego w laserze. Ta metoda pozwala na podwyższenie jakości struktur laserowych ze względu na możliwość ograniczenia naprężeń mechanicznych powstałych podczas wytwarzania grubych warstw azotku galowo-glinowego wykorzystywanego w standardowej technologii.

Kolejnym istotnym akcentem w pracach IWC PAN jest problem konstrukcji źródeł światła o wysokiej mocy do zastosowania w projektorach optycznych i urządzeniach drukarskich i litograficznych. Jednym z ważnych przyszłych zastosowań są cyfrowe projektory kinowe, w których obraz barwny uzyskiwany jest za pomocą trzech typów laserów: czerwonych, zielonych i niebieskich. W emiterach światła o dużej mocy korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie monolitycznej integracji wielu emiterów w postaci matryc laserowych. Takie matryce są w stanie emitować moc kilku, a nawet kilkudziesięciu watów. IWC i TopGaN jako jedne z pierwszych instytutów na świecie zademonstrowały matryce laserów azotkowych. Nasze najnowsze konstrukcje to tzw. *minimatryce*, zawierające 3 lub 5 emiterów. Matryce opisane powyżej zostały użyte do wytworzenia emiterów światła o mocy 2,5 W.

Ponieważ matryce laserowe zajmują stosunkowo dużą powierzchnię, są przyrządami wymagającymi podłoża o wyjątkowo wysokiej jakości i niskiej koncentracji dyslokacji. Polskie bezbłędne podłoża produkowane przez firmę TopGaN i firmę Ammono spełniają wszystkie postulaty jakościowe, stwarzając szansę rozwinięcia tej nowej jakościowo technologii. ■

### Chcesz wiedzieć więcej?

- Holc K., Leszczyński M., Suski T., Czernecki R., Braun H., Schwartz U., Perlin P. (2009). Nitride laser diode arrays. *Proc. SPIE*, 7216, 721618.
- Perlin P., et.al. (2009). Application of a composite plasmonic substrate for the suppression of an electromagnetic mode leakage in InGaN laser diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 95, 261108.
- Perlin P., Marona Ł., Leszczyński M., Suski T., Wiśniewski P., Czernecki R., Grzegory I. (2010). Degradation mechanisms of InGaN laser diodes. *Proceedings of the IEEE*, 98, 1214.



Chip laserowy z wyraźnie widocznymi warstwami plazmonowymi (ciemniejszy kolor). Górna warstwa służy jako okładka falowodu, w którym propaguje się światło lasera