

# EM Magazyn elektroniki Użytkowej

dodatek  
do  
miesięcznika



P o z n a ć i z r o z u m i e ć s p r z ę t

O tym się mówi



*Słowa błękitny, niebieski od stuleci są intensywnie eksploatowane przez poetów. Także w elektronice określenie niebieski budzi żywe reakcje. Konkretnie chodzi o elementy świecące niebieskim światłem. O ile niebieskie diody LED są dziś codziennością, o tyle historia niebieskiego lasera półprzewodnikowego, który jest specyficzną odmianą diody LED, jest co najmniej godna uwagi i refleksji.*

## Prehistoria

Diody LED wynalezione na początku lat 60. szybko znalazły miejsce w aparaturze elektronicznej, zastępując żarówki-kontrolki. Siedmiosegmentowe wyświetlacze LED do dziś są bardzo popularne i nie dały się pokonać ekonomiczniejszym wyświetlaczom LCD.

Czerwone, zielone i żółte diody LED, zbudowane na bazie związków Arsenu (As), galu (Ga), fosforu (P), indu (In) i glinu (Al),

towarzyszą nam od lat. Oprócz diod świecących światłem widzialnym wykorzystujemy powszechnie także diody świecące w podczerwieni. W odtwarzaczach płyt kompaktowych pracują podczerwone lasery. Półprzewodnikowe lasery czerwone stosowane są w odtwarzaczach DVD oraz w popularnych wskaźnikach laserowych.

Inaczej jest z diodami świecącymi w kolorze niebieskim. Wprawdzie pierwsze niebieskie diody LED zbudowane w oparciu o węgiel krzemu (SiC) powstały dość dawno, jednak przez lata nie miały one praktycznego zastosowania ze względu na małą sprawność, a tym samym zbyt małą jasność.

Tymczasem w dobie szybkiego postępu technicznego niebieskie diody o parametrach porównywalnych z dobrymi diodami czerwonymi i zielonymi były bardzo pożądane. Umożliwiłyby powstanie nie tylko diod świecących białym światłem (które uzyskuje

się ze zmieszania światła w kolorach czerwonym, zielonym i niebieskim), ale też nowych kolorowych wyświetlaczy RGB na bazie struktur LED.

Obecnie białe diody LED znajdują coraz szersze zastosowanie, a pełnokolorowe wyświetlacze LED są obecne na ulicach w tablicach reklamowych i najprawdziwszych kolorowych ekranach wielkiego formatu.

Coraz częściej mówi się o wykorzystaniu diod LED do oświetlenia w miejsce żarówek. Duże osiągnięcia w tym zakresie mają Osram (Siemens), Philips czy General Electric.

Ostatnie dwa, trzy lata upłynęły pod znakiem gwałtownie rosnącej popularności niebieskich diod LED (w tym diod białych). Nie da się tego powiedzieć o niebieskich diodach laserowych, o których mówi się bardzo głośno od dziesięciu lat.

Z niebieskimi diodami laserowymi wiąże się ogromne nadzieje. Jak zwykle chodzi

o pieniądze i to o duże pieniądze. Niebieski laser półprzewodnikowy umożliwia kilkukrotne zwiększenie pojemności dysków optycznych, otwiera nowe perspektywy i stwarza rynek wartości miliardów dolarów.

Popularne płyty CD o pojemności do 700MB są odczytywane przez lasery podczerwone o długości fali światła 780nm (0,78 mikrometra). W odtwarzaczach DVD pracują lasery czerwone o długości fali 635...650nm, co pozwoliło zwiększyć pojemność płyty do 4,7GB. Ocenia się, że laser niebieski o długości fali 400...460nm pozwoli zwiększyć pojemność jednej strony (warstwy) płyty nawet do 15GB. Przy obecnych sposobach kodowania pojemność 15GB wystarczy do zapisania dwóch godzin filmu o jakości HDTV, sześciu godzin przy „standardowej” jakości telewizyjnej i do 20 godzin w trybie ekonomicznym. Najwięksi potentaci (m.in. Sony, Pioneer, Matsushita) pracują nad propozycjami standardu DVD następnej generacji.

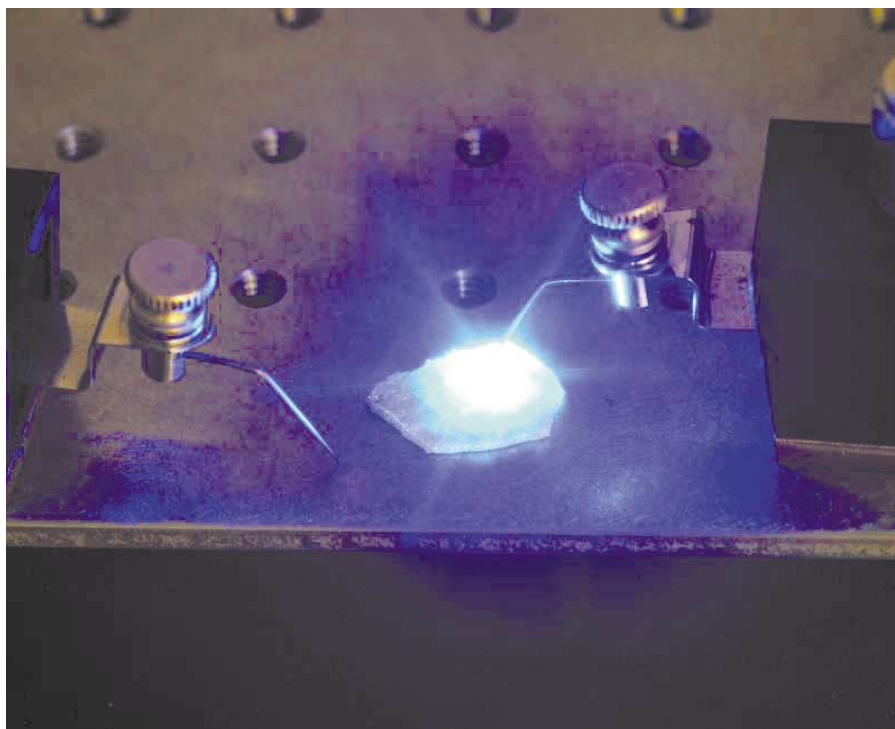
Pierwsze bardzo niedoskonałe niebieskie lasery półprzewodnikowe powstały na początku lat 90. Uplłynęło dziesięciolecie. Nie sprawdziły się prognozy głoszące, iż niebieskie lasery będą komercyjnie wykorzystywane najpóźniej w roku 2000, a nawet dwa czy trzy lata wcześniej. Mamy rok 2002 i nadal niebieskie lasery nie znalazły zastosowania w sprzęcie powszechnego użytku. Trudności technologiczne wcale nie są najważniejszą przeszkodą.

I tu zaczyna się historia tytułowej „błękitnej” afery i gorączkowego „niebieskiego” wysiugu.

### Błękitny wysiug

Niebieskie diody LED z węgliku krzemu (SiC) powstały dość wcześnie, ale miały nad wyraz mizerne parametry, wysoką cenę i praktycznie nie nadawały się do żadnych poważniejszych zastosowań. Z drugiej strony wspaniałe perspektywy otwierające się przed twórcami niebieskiego lasera i właścicielami związanych z tym patentów wzmagały presję wywieraną na badaczy i konstruktorów. Badania prowadzono w licznych firmach i na uczelniach. Wiadomo było, że w grę wchodzi trzy główne materiały: znany i stosowany wcześniej węgiel krzemu (SiC), selenek cynku (ZnSe) oraz azotek galu (GaN)

Choć diody LED oparte na węgliku krzemu znane były od lat, jednak związek ten nie posłużył jako kluczowy materiał przy konstrukcji niebieskiego lasera. Uwaga badaczy skierowana była na selenek cynku i inne związki z grup II-VI tablicy Mendelejewa. Azotek galu zapowiadał się znacznie mniej korzystnie. Wprawdzie już w 1969 w laboratoriach RCA w Princeton wytworzono cienkie warstwy krystalicznego azotku galu, jednak na następny, decydujący krok trzeba było czekać ponad 20 lat.



I oto w listopadzie roku 1993 nieznanemu Japończykowi Shuji Nakamura, pracującemu w japońskiej firmie *Nichia Chemical Industries Limited*, zadziwił świat, zawiadamiając o skonstruowaniu wyjątkowo jasno świecącej niebieskiej diody LED (o światłości 1 kandeli), a niewiele później zawiadomił o stworzeniu niebieskiego świecącego lasera.



Cztery lata wcześniej założyciel i szef *Nichia Corp.*, Nobuo Ogawa zaryzykował, zaufał młodemu człowiekowi i wyłożył ponad 3 miliony dolarów na jego badania - sumę zaskakująco wysoką, w porównaniu z obrotami i zyskami swej niezbyt dużej firmy.

Historia wynalazku Nakamury, pracującego samotnie w nieznanym firmie, bez wsparcia wielkich koncernów i uniwersytetów, jest jak na obecne czasy, zadziwiająca. Wydawałoby się, że w wyścigu o ogromne zyski, jeden człowiek nie posiadający większego doświadczenia sromotnie przegra z gigantami dysponującymi niemal nieograniczonymi funduszami. Zdziwienie, a właściwie konsternacja, „ortodoksyjnego” środowiska były tym większe, że *Nichia* była firmą produkującą... luminofor do świetlówek, a Nakamura, „pogromca natury i następcą Edisona”, jak go później nazywano, był w kręgach naukowych zupełnie nieznaną osobą. W tym czasie nie posiadał nawet godnego uwagi stopnia naukowego (w roku 1989 ukończył uniwer-

sytyet w japońskim mieście Tokushima, a tytuł doktora uzyskał dopiero w 1994).

I oto w roku 1995 Nakamura ogłosił powstanie jasno świecącej białej diody LED, zawierającej kolorowe struktury, w tym niebieską, a także niebieskiego lasera pracującego impulsowo przez kilkadziesiąt godzin. Był to ogromny sukces. Nakamura o kilka lat wyprzedził konkurencję! Wprawdzie już wcześniej ogłaszano stworzenie niebieskich diod laserowych (np. firma 3M w roku 1991), jednak lasery te oparte na pierwiastkach z grup II-VI były wyjątkowo nietrwałe.



Nakamura poszedł inną drogą. Zbudował niebieski laser i diody z azotku galu (GaN). W jednym z wywiadów stwierdził, że jedynym powodem, dla którego zajął się właśnie azotkiem galu był brak konkurencji. Miał tu przykre doświadczenia, bowiem wcześniej, w ciągu dziesięciu lat pracy opracował nowe metody produkcji kryształów GaP, GaAs, warstw epitaksjalnych GaAlAs i diod podczerwonych GaAlAs. Przegrał jednak walkę konkurencyjną z takimi gigantami jak Toshiba, Matsushita, Stanley, Rohm, Sharp i Sanyo, które w tym czasie osiągnęły podobne rezultaty.

Po tym niepowodzeniu, w roku 1989, za cel postawił sobie stworzenie niebieskiego lasera półprzewodnikowego. Zadanie było wprawdzie bardzo trudne, ale Nakamura miał za sobą dziesięć lat doświadczeń z materiałami do produkcji diod świecących. Chcąc uniknąć nierównej walki konkurencyjnej poszedł własną drogą - postawił na materiał, którym praktycznie nie interesowała się konkurencja - na azotek galu (GaN). Praktycznie cała ówczesna konkurencja (m.in. 3M, Purdue, North Carolina State University) skoncentrowała bowiem uwagę na selenku cynku (ZnSe).

### Problemy techniczne

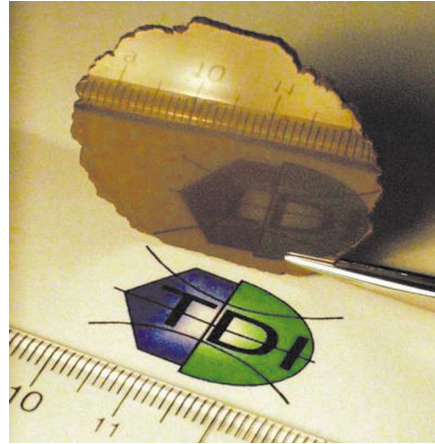
Podstawą elementów półprzewodnikowych, w tym diod LED i laserów są kryształy. Małą krystaliczną strukturą czynną lasera trzeba zbudować na jakimś podłożu. Podłożem tym też jest kryształ. Najlepiej jest, gdy struktura czynna wykonana jest z tego samego materiału, co podłoże, jak to jest na przykład w klasycznych elementach krzemowych, gdzie struktury wytwarzane są na powierzchni płytki krzemowej. Nie zawsze jest to możliwe. W czasie, gdy Nakamura eksperymentował z azotkiem galu nie było odpowiednich płytek z azotku galu. Trzeba było nanosić struktury czynne mikronowej grubości na „obce” podłoże.

I tu pojawia się istotny problem, dotyczący, najprościej biorąc, rozmiarów siatek krystalicznych azotku galu i podłoża. Wielkość modułu siatki krystalicznej powinna być identyczna. Jakakolwiek różnica powoduje jednak defekty (dyslokacje) podczas procesu epitaksjalnego nakładania warstw GaN, a w konsekwencji zmniejsza moc wyjściową i skraca żywotność struktury lasera.

Pierwsze lasery z azotku galu powstały na podłożu szafirowym (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), przy czym grubość czynnej struktury wynosiła kilka mikrometrów. Różnica rozmiarów (stałych) siatki krystalicznej szafiru i azotku galu wynosi 13,5%, co stwarza duże trudności technologiczne. Aby przy korzystaniu z podłoża szafirowego, jedynego dostępnego w tamtym czasie, opanować wspomniane problemy, Nakamura opracował nową metodę nakładania warstw GaN, zwaną

MOCVD (metallo-organic chemical vapor deposition).

Próbowano też wytworzyć laser GaN na węglu krzemu i na krzemie. Dopiero w październiku roku 2001 amerykańska firma TDI ogłosiła, że potrafi wykonać płytki z czystego GaN (o średnicy 35mm), które stanowią doskonałe podłoże dla niebieskich diod LED i laserów.



Dużo łatwiej jest ze wspomnianymi „konkurencyjnymi” materiałami grup II-VI, gdzie przy wykorzystaniu jako podłoża arsenku galu (GaAs), różnica wymiarów siatek krystalicznych jest bliska zeru. Stąd zainteresowanie selenkiem cynku, który pozwalał w względnie prosty sposób wytworzyć niebiesko świecące struktury laserowe. Niestety, ogromną wadą była szybka degradacja struktury, co od początku wręcz przekreślało nadzieje na wytworzenie laserów ZnSe do zastosowań komercyjnych.

Właśnie trwałość wszelkich niebieskich laserów była kolejnym ogromnym wyzwaniem dla konstruktorów. Jednym z najistotniejszych problemów były trudności z uzyskaniem dobrego kontaktu omowego wyprowadzeń, co wynika z małej koncentracji nośników w warstwie o przewodnictwie p. Między innymi dlatego pierwsze lasery niebieskie pracowały przy napięciu zasilania rzędu 20...40V, a gęstość prądu wymagana do powstania zjawiska laserowego była bardzo duża (40...100A/mm<sup>2</sup>), co mimo małych wymiarów struktury wymuszało konieczność pracy przy dużych prądach roboczych, rzędu 1A. Tamczasem lasery te wytwarzały promieniowanie o mocy optycznej rzędu pojedynczych miliwatów. Oznaczało to, że w czasie pracy w znikomo małej strukturze lasera wydziela się kilkadziesiąt watów mocy strat w postaci ciepła. Właśnie dlatego pierwsze niebieskie lasery w ogóle nie mogły pracować w trybie ciągłym, a jedynie mogły wytwarzać krótkie, mikrosekundowe impulsy. Nawet przy takiej przerywanej pracy impulsowej zachodziły szkodliwe procesy i następowała bardzo szybka degradacja struktury czynnej i w rezultacie trwałość była żałośnie mała.

Kolejne ulepszenia umożliwiły zbudowanie lasera pracującego ciągle, ale musiał on być intensywnie chłodzony w sposób wymuszony. Nadal ogromnym problemem była też znikoma trwałość, wynosząca najpierw kilka, potem kilkadziesiąt godzin. Zbudowanie takich elementów było połowicznym sukcesem, ponieważ uzyskana moc, nie przekraczająca 5mW oraz konieczność intensywnego chłodzenia przekreślały możliwość wykorzystania w popularnym sprzęcie. W nagrywarkach i odtwarzaczach płyt następnej generacji potrzebne są niebieskie lasery o mocy 20...40mW przeznaczone do pracy ciągłej i mające trwałość liczoną w tysiącach i dziesiątkach tysięcy godzin.

### Przeszkody

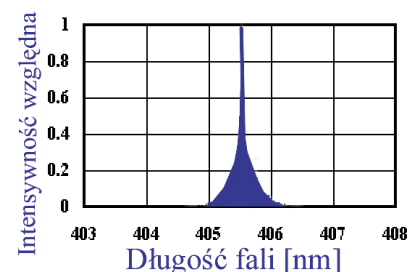
I takie lasery już istnieją! Nie są jednak ani popularne, ani tanie. Oto niektóre przyczyny:

W roku 1999 Nakamura zaczął pracować w amerykańskiej firmie Cree Inc. jako doradca w zakresie „niebieskiej” optoelektroniki. Potem dopomógł znanej japońskiej firmie ROHM wypuścić na rynek szereg nowych produktów.

W międzyczasie Nichia uzyskała kilkaset patentów związanych z niebieskim laserem GaN, dotyczących różnych etapów produkcji. Oskarżyła ROHM o naruszenie patentu na niebieski laser, a Nakamura o zdradę sekretów firmy.

Nakamura odzwajemnił się pozwem do sądu o odpowiednie wynagrodzenie za swój wynalazek (Nichia wyłożyła wprawdzie duże sumy na badania, ale on sam oprócz pensji, podobno nic nie zyskał; mówi się o 200 (!) dolarach gratyfikacji). Nichia skierowała do sądu także inne pozwy, między innymi przeciw niemieckiej firmie OSRAM, nie dotyczącej jednak najważniejszych patentów na niebieski laser GaN.

Na marginesie warto dodać, iż OSRAM ogłasza się pierwszym europejskim twórcą niebieskiego lasera do pracy ciągłej. Projekt wspierany przez rząd, przy współpracy z kilkoma uczelniami, w tym ze słynnym Fraunhofer Institute, zaowocował najpierw laserem impulsowym (1999), potem do pracy ciągłej z wymuszonym chłodzeniem (styczeń 2001), obecnie laserem do pracy ciągłej (InGaN) nie wymagającym dodatkowego chłodzenia. Trzeba jednak znacznie zwiększyć trwałość tak opracowanego elementu.



Niebieskie lasery GaN zaprezentowała także wspomniana firma Cree.

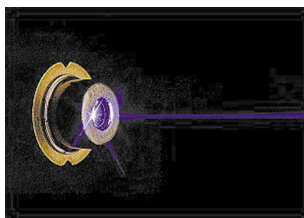
Z kolei koncern Matsushita chciał pójść zupełnie inną drogą. Ma nadzieję na tak zwany SHG-laser, gdzie SHG to *second harmonics generation*, czyli wytwarzanie drugiej harmonicznej. Niebieskie światło o długości fali około 400nm otrzymuje się tu przez podwojenie częstotliwości promieniowania podczerwonego o długości fali około 800nm. Chodzi o podwojenie częstotliwości z, bagatela 375 teraherców, do 700 teraherców, co wykonywane jest z wykorzystaniem odpowiedniego falowodu.

Sony i NEC zaprezentowały jesienią lasery nadające się do celów komercyjnych, o mocy 30mW i spodziewanej trwałości 15000 godzin.

Także polskie ośrodki naukowe mają znaczące sukcesy w dziedzinie „niebieskiej optoelektroniki” - Shuji Nakamura wykonał jeden ze swych laserów na podłożu z polskiego kryształu GaN, a uzyskane parametry były znacznie lepsze od innych wykonanych wcześniej na innych podłożach.

W laboratoriach firm i na uczelniach trwa gorączkowy wyścig, mający na celu obejście istniejących patentów, ale jak na razie tak naprawdę tylko Nichia dysponuje laserem nadającym się do komercyjnego wykorzystania. Kilkaset patentów, których właścicielem jest Nichia, wysokie, wręcz zaporowe ceny laserów tej firmy oraz procesy sądowe są dodatkową poważną barierą w upowszechnieniu niebieskich laserów i płyt DVD następnej generacji. Znacząca kwestią jest też fakt, że Nichia jest nieustępliwym monopolistą, nie

udziela licencji, więc nie ma możliwości zakupu równoważnych laserów z innego źródła. Brak tego *second source* też mocno zniechęca przyszłych wytwórców sprzętu. Odpowiedni niebieski laser jest więc na rynku, ale nawet tacy znakomici producenci, jak Sony i Philips, wstrzymują się z ich wykorzystaniem. Przedstawiciel Philipsa otwarcie stwierdził, że jego firma na razie nie zamierza wprowadzać na rynek produktów wykorzystujących niebieski laser półprzewodnikowy.



Dalszy postęp i upowszechnienie omawianego głównego bohatera, niebieskiego lasera, zależy teraz od znalezienia odmiennych rozwiązań, nie objętych istniejącymi patentami. Wielkie nadzieje obudziła informacja wspomnianej już, niewielkiej firmy TDI z Dakoty, która ma sposób na wytwarzanie płytek podłożowych z GaN i szuka partnerów, którzy umożliwią podjęcie masowej produkcji.

Należy się spodziewać, że najbliższe miesiące przyniosą doniesienia o kolejnych istotnych osiągnięciach łamiących dotychczasowy monopol.

(red)

**P.S.** Już po napisaniu artykułu, w styczniu 2002, zaprezentowano niebieski laser całkowi-

cie polskiej produkcji, powstały w długofalowym programie rządowym „Rozwój niebieskiej optoelektroniki”. Długość fali światła wynosi 425nm. Laser ten został opracowany przez 30-osobowy zespół polskich naukowców pod kierunkiem prof. Sylwestra Porowskiego z Centrum Badań Wysokociśnieniowych Polskiej Akademii Nauk. Nieprzypadkowo pojawia się nazwa Centrum Badań Wysokociśnieniowych, ponieważ laser zbudowano na bazie monokryształów azotku galu (GaN), wytwarzanych w warunkach bardzo wysokich ciśnień, porównywalnych z ciśnieniami stosowanymi przy produkcji sztucznych diamentów.

Polscy naukowcy mają duże osiągnięcia w dziedzinie niebieskiej optoelektroniki. Mają też licznych konkurentów. Każdy miesiąc przynosi nowe informacje w tej dziedzinie. Oprócz bardzo obiecujących metod wytwarzania monokryształów azotku galu i budowania lasera na tym „naturalnym” podłożu, wciąż podejmowane są próby wykorzystania innego podłoża. Oprócz wykorzystywanego od dawna szafiru, ostatnio coraz więcej mówi się o nakładaniu warstw czynnych GaN na jeszcze inne podłoża, na przykład na zwykły krzem. Początek dała Motorola, nakładając na krzem arsenek galu (GaAs) z wykorzystaniem warstwy pośredniczącej, pozwalającej w pewien sposób wyrównać różnice rozmiarów siatki krystalicznej. Ostatnio taki pomysł wykorzystano do nałożenia azotku galu na krzem ([www.nitronex.com](http://www.nitronex.com)).

Pomimo ogromnej konkurencji i licznych wysiłków wielu badaczy, nadal nie przedstawiono niebieskiego lasera o parametrach i cenie odpowiednich dla sprzętu powszechnego użytku. Nadal czekamy na przełom.