

Przyrządy niebieskiej optoelektroniki półprzewodnikowej

1. Wstęp

Określenie „niebieska optoelektronika” dotyczy elementów półprzewodnikowych służących do generacji promieniowania o długościach fal ok. 400 nm (światło niebieskie) i krótszych. Są to przede wszystkim emitery światła niebieskiego – lasery i diody elektroluminescencyjne (diody LED), lecz także źródła światła białego, źródła i detektory promieniowania UV. Rozwój tych konstrukcji był ograniczony przez długi czas trudnościami w uzyskaniu odpowiedniej jakości materiałów półprzewodnikowych. Rozwój technologii ich wytwarzania, jaki nastąpił w ostatnich latach umożliwił zwiększenie wydajności źródeł światła oraz wydłużenie ich czasu życia, co pozwala na coraz szersze zastosowanie.

Potrzeba rozwinięcia technologii i konstrukcji struktur dla niebieskiej elektroniki jest spowodowana dwoma faktami: szacuje się, że za 4-5 lat wartość rynku związanego z tą dziedziną elektroniki będzie wynosiła ok. 100 mld dolarów, po drugie: w latach 2010-2012 nastąpi zmiana filozofii w technice oświetlenia.

2. Zastosowanie

Najbardziej zaawansowaną konstrukcją niebieskiej elektroniki jest laser światła niebieskiego. Zastosowanie tego lasera w systemach pamięci optycznych pozwala znacznie zwiększyć pojemności dysków optycznych, zgodnie z zasadą, że gęstość zapisu danych jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu długości fali wiązki promieniowania użytego do zapisu. Zastąpienie dotychczas stosowanego lasera emitującego światło czerwone (długość fali światła 650 nm) laserem niebieskim (długość fali 405 nm) pozwala na zwiększenie pojemności dysku optycznego z 4.7 GB w formacie DVD do 60 GB w dwustronnym dwuwarstwowym dysku pracującym w formacie HD DVD.

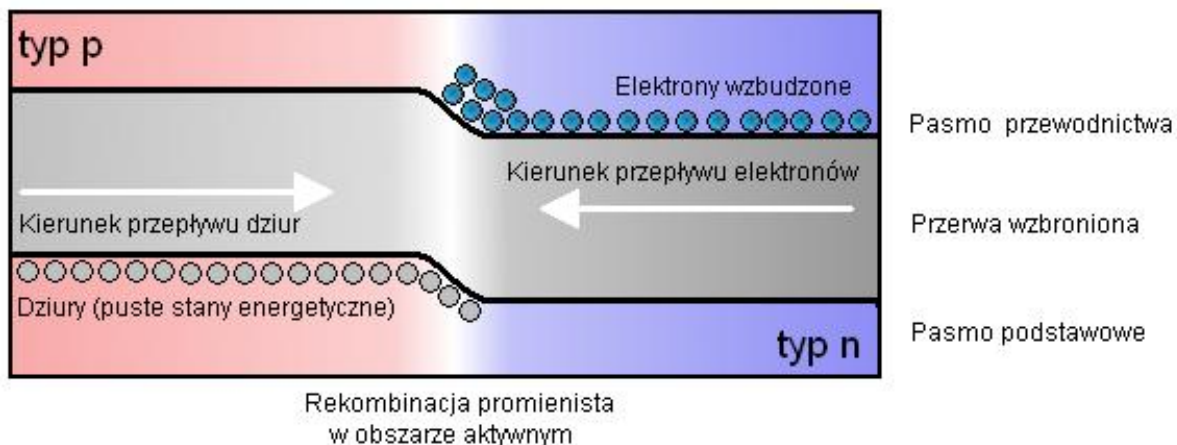
W chwili obecnej, wyświetlacze LED są jedyną konstrukcją umożliwiającą przedstawienie kolorowego obrazu o długości przekątnej większej niż 100 cali. W każdym wyświetlaczu kolorowym odpowiedni kolor uzyskuje się przez mieszanie trzech kolorów podstawowych (czerwonego, zielonego, niebieskiego). W wyświetlaczu typu LED trzy diody elektroluminescencyjne świecące w kolorach podstawowych tworzą jeden punkt świetlny. W związku z tym, dopiero budowa jasno świecących niebieskich diod LED pozwoliła na powstanie tych konstrukcji. Należy też dodać, że rozwinięcie technologii niebieskiej

elektroniki umożliwiło budowę diod świecących czystym kolorem zielonym. Wyświetlacze LED znajdują głównie zastosowanie w reklamie i rozrywce – największym wyświetlaczem użytym do tej pory był ekran o powierzchni ponad 500 m² wykorzystany podczas europejskich koncertów grupy U2 promujących w 2005 roku płytę „Vertigo”.

W medycynie źródła promieniowania ultrafioletowego znajdują zastosowanie w stomatologii (utwardzanie wypełnień), dermatologii (diagnostyka i leczenie schorzeń skóry) i onkologii (możliwość identyfikacji pojedynczych komórek rakowych). W technice wojskowej konstrukcje niebieskiej elektroniki mogą zostać wykorzystane w systemach naprowadzania rakiet, a także w komunikacji podwodnej, ponieważ minimum absorpcji wody przypada dla długości fali promieniowania 400 nm.

3. Fizyczne podstawy działania

O tym, jaka długość fali będzie emitowana przez półprzewodnikowe źródło światła, decyduje szerokość przerwy zabronionej materiału emitera. Szerokość przerwy zabronionej jest to wartość różnicy energii między dnem pasma przewodnictwa a wierzchołkiem pasma podstawowego, czyli między dwoma dozwolonymi wartościami energii, jaką może mieć elektron w półprzewodniku. Emisja światła z półprzewodnika następuje w wyniku elektroluminescencji. Jest to zjawisko emisji fotonu w wyniku oddania nadmiaru energii przez elektron przy przejściu ze stanu wzbudzonego, w jakim znajduje się w paśmie przewodnictwa, do stanu podstawowego (w paśmie walencyjnym). Takie przejście nazywa się rekombinacją promienistą i zachodzi ona w obszarze aktywnym złącza p-n, czyli w obszarze połączenia półprzewodnika typu n, posiadającego nadwyżkę elektronów w stanie wzbudzonym, z półprzewodnikiem typu p mającym puste stany energetyczne (dziury) nie obsadzone przez elektrony w paśmie podstawowym. Rysunek 1 przedstawia schemat elektryczny złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia. Pole elektryczne wewnątrz półprzewodnika powstające w wyniku przyłożenia napięcia do elektrod umieszczonych po obu stronach złącza p-n, powoduje unoszenie elektronów z obszaru typu n w kierunku obszaru aktywnego, gdzie rekombinują one z dziurami z obszaru typu p, emitując przy tym promieniowanie elektromagnetyczne. Energia wyemitowanego kwantu promieniowania, czyli fotonu, a co za tym idzie długość fali, zależy od różnicy energii elektronu w stanie wzbudzenia i w stanie podstawowym, czyli od szerokości przerwy zabronionej materiału. Emisję promieniowania o określonej długości fali uzyskuje się przez odpowiedni wybór materiału półprzewodnikowego. Budowa i zasada działania lasera półprzewodnikowego jest zbliżona, z tą różnicą, że dzięki specjalnej konstrukcji uzyskuje się



emisję wymuszoną światła, przez wymuszenie rekombinacji elektronów z określonych stanów energetycznych.

Rys 1. Schemat półprzewodnikowego złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia.

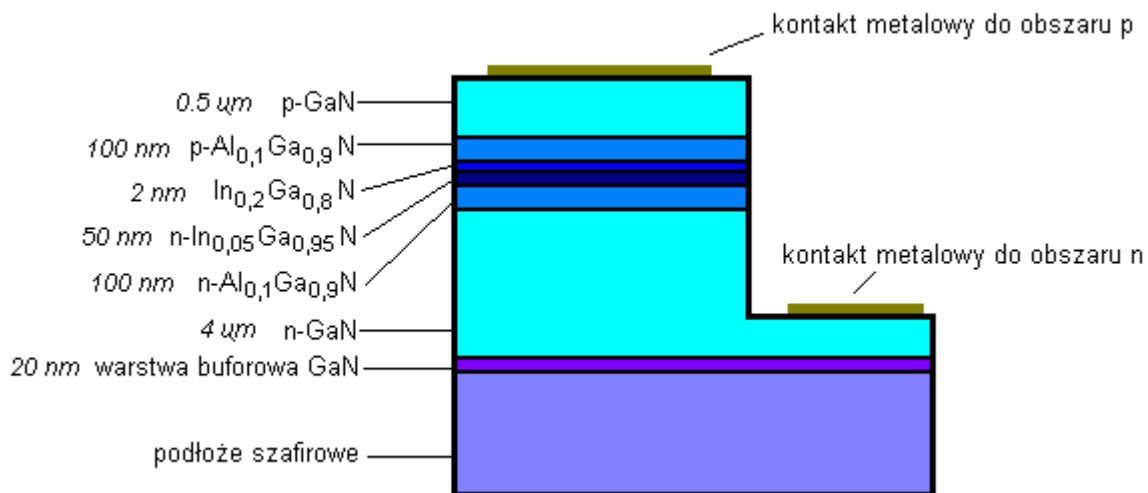
4. Technologia i konstrukcja źródeł światła niebieskiego

Przez szereg lat problemem było wytworzenie diody LED emitującej światło niebieskie, jednocześnie dobrze znane były diody świecące na żółto, czerwono i zielono. Było to spowodowane kłopotami z wytwarzaniem dobrej jakości cienkich warstw półprzewodników o odpowiedniej szerokości przerwy zabronionej, służących do budowy diody LED.

Grupą materiałów półprzewodnikowych możliwych do zastosowania przy generacji światła niebieskiego są związki potrójne azotków trzeciej grupy układu okresowego, czyli azotku glinu (AlN), azotku galu (GaN) oraz azotku indu (InN). Warstwy aktywne wytwarza się w procesie epitaksji, czyli w procesie osadzania monokrystalicznej warstwy półprzewodnika na półprzewodnikowym podłożu z odwzorowaniem struktury krystalicznej podłoża. W przypadku azotków problemem jest fakt, iż brakuje naturalnego podłoża dopasowanego do sieci krystalicznej tych materiałów, na którym można osadzać warstwy. Azotki są osadzane najczęściej na szafirze, którego stałe sieci krystalicznej i współczynnik rozszerzalności termicznej znacznie różnią się od stałych azotków, co skutkuje powstawaniem naprężeń w warstwie aktywnej i generacji defektów w warstwie, które uniemożliwiają właściwą pracę przyrządu. W związku z tym prace, od momentu przeprowadzenia pierwszej epitaksji GaN w 1969 roku do roku 1994, kiedy to Shuji Nakamura z firmy Nichia zaprezentował pierwszy działający niebieski laser półprzewodnikowy, były związane z opracowaniem takich technologii wytwarzania warstw i konstrukcji elementów, aby uzyskać złącze p-n o dostatecznie dobrej jakości umożliwiającej emisję światła. Zbyt duża gęstość defektów w warstwie powodowała powstawanie

parazytycznego zjawiska rekombinacji niepromienistej, dodatkowo w laserach, gdzie przepływają znacznie większe gęstości prądu, następuje szybsza degradacja materiału, co znacznie skraca czas pracy przyrządu.

Przekrój przez rzeczywistą konstrukcję niebieskiej diody LED zaprezentowanej przez Nakamura w 1996 r. jest przedstawiony na rysunku 2. Dodatkowe warstwy, które pojawiają się w strukturze oprócz warstwy aktywnej złącza p-n, mają na celu poprawić działanie przyrządu. Warstwy półprzewodnika zostały wytworzone w procesie wieloetapowej epitaksji, czyli kolejnego osadzania warstw półprzewodnika o różnym składzie. Jak widać na tym przykładzie, aby przyrząd posiadał założone właściwości, proces epitaksji powinien cechować się dużą dokładnością kontroli grubości i składu osadzanych warstw.



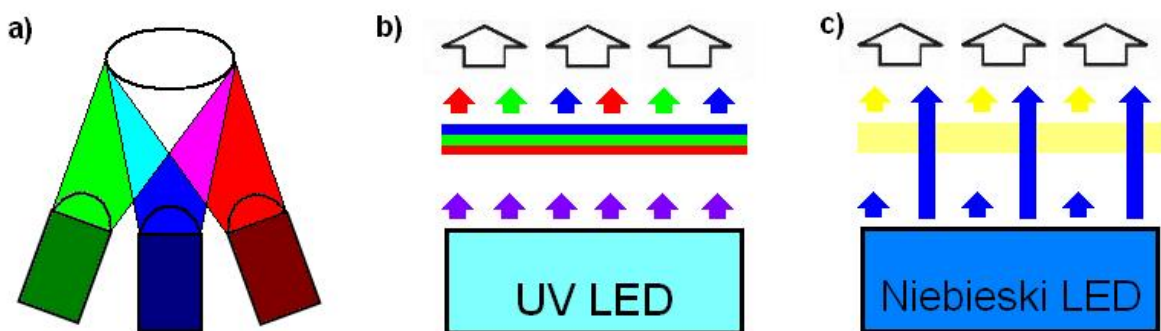
Rys 2. Przekrój struktury diody LED¹

5. Zastosowanie i konstrukcje źródeł światła białego

Niebieska elektronika jest ściśle związana z białą optoelektroniką, rozumianą jako półprzewodnikowe źródła światła emitujące promieniowanie o widmie zbliżonym do widma światła słonecznego. Dzięki temu, że technika dysponuje w chwili obecnej wydajnymi półprzewodnikowymi źródłami światła emitującymi światło w trzech podstawowych barwach (czerwonej, zielonej, niebieskiej), możliwe jest uzyskanie światła białego przez sumowanie tych barw. Najważniejszymi zaletami półprzewodnikowych źródeł światła białego, powodującymi że ich wprowadzanie do techniki oświetleniowej stało się tak atrakcyjną perspektywą, jest znacznie dłuższy czas pracy oraz większa wydajność świetlna, co powoduje

¹ S. Nakamura, et al., *InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes*, Japan J. Appl. Phys. 2, 35(1B): L74-1, 1996.

znaczące obniżenie kosztów eksploatacji. Czas pracy diody LED wynosi 100 tys. godzin, podczas gdy dla klasycznej żarówki wynosi 1 tys. godzin, a dla lampy fluorescencyjnej 6 tys. godzin. Dodatkową korzystną cechą diod LED jest to, że nie występuje w ich przypadku katastroficzne zaprzestanie działania, tylko następuje stopniowy spadek jasności świecenia. Z związku z tym termin wymiany żarówki półprzewodnikowej nie jest sprawą krytyczną, i eliminuje się przypadki, gdy lampa przepala się w najmniej odpowiednim momencie. Wydajność świetlna półprzewodnikowych źródeł światła białego wzrasta z roku na rok i w chwili obecnej wynosi 40 lm/W, i przewiduje się, że osiągnięta zostanie wielkość 200 lm/W. Dla porównania wydajność świetlna klasycznej żarówki wynosi 15 lm/W, a lampy fluorescencyjnej 80 lm/W, i są to maksymalne, nieprzekraczalne wielkości. Dodatkowymi zaletami tych źródeł światła są: współczynnik oddawania barw i temperatura barwy bieli regulowana w szerokim zakresie, niski poziom promieniowania podczerwonego i ultrafioletowego, krótkie czasy włączania i włączania, wytrzymałość mechaniczna, małe wymiary, oraz bezpieczeństwo użytkowania. Wszystkie te cechy powodują możliwość dostosowania właściwości źródła światła do konkretnych celów i stworzenie konstrukcji do zastosowań specjalnych.



Rys. 3. Schematy konstrukcji półprzewodnikowych emiterów światła białego.

Stosowane konstrukcje półprzewodnikowych źródeł światła białego są zaprezentowane na rys. 3. Rysunek 3a, przedstawia konstrukcję, w której światło białe otrzymuje się poprzez mieszanie barw podstawowych pochodzących z trzech chipów LED tworzących diodę RGB. To rozwiązanie cechuje się największą wydajnością. Druga konstrukcja (rys. 3b) wykorzystuje konwersję promieniowania UV emitowanego z chipu LED na światło białe, zachodzącą na trójkolorowym luminoforze pokrywającym powierzchnię diody. Trzecie rozwiązanie to konstrukcja hybrydowa, w której promieniowanie niebieskie emitowane z chipu LED częściowo przechodzi, a częściowo pobudza warstwę luminoforu

emitującego promieniowanie żółte. Barwa biała powstaje na skutek mieszania barwy niebieskiej i żółtej. To rozwiązanie tak jak konstrukcja z rys 3b, cechuje się prostotą wykonania, lecz oferuje słabą jakość światła białego.

6. Podsumowanie

W pracy wykazano, że pojęcie niebieskiej elektroniki przestaje być określeniem z laboratoriów badawczych i konferencji naukowych, a staje się wyrażeniem służącym do określenia znaczącego segmentu na rynku elektroniki konsumenckiej. Trwa walka największych firm elektronicznych o popularyzację dwóch standardów DVD opartych na niebieskim laserze: HD DVD i Blue-ray. Wielkoformatowe ekrany stwarzają nowe perspektywy w dziedzinie rozrywki i reklamy. Natomiast półprzewodnikowe źródła światła są już stosowane w motoryzacji i sygnalizacji świetlnej, a także zaczynają tworzyć nową jakość w technice oświetleniowej.