

Białe jest piękne

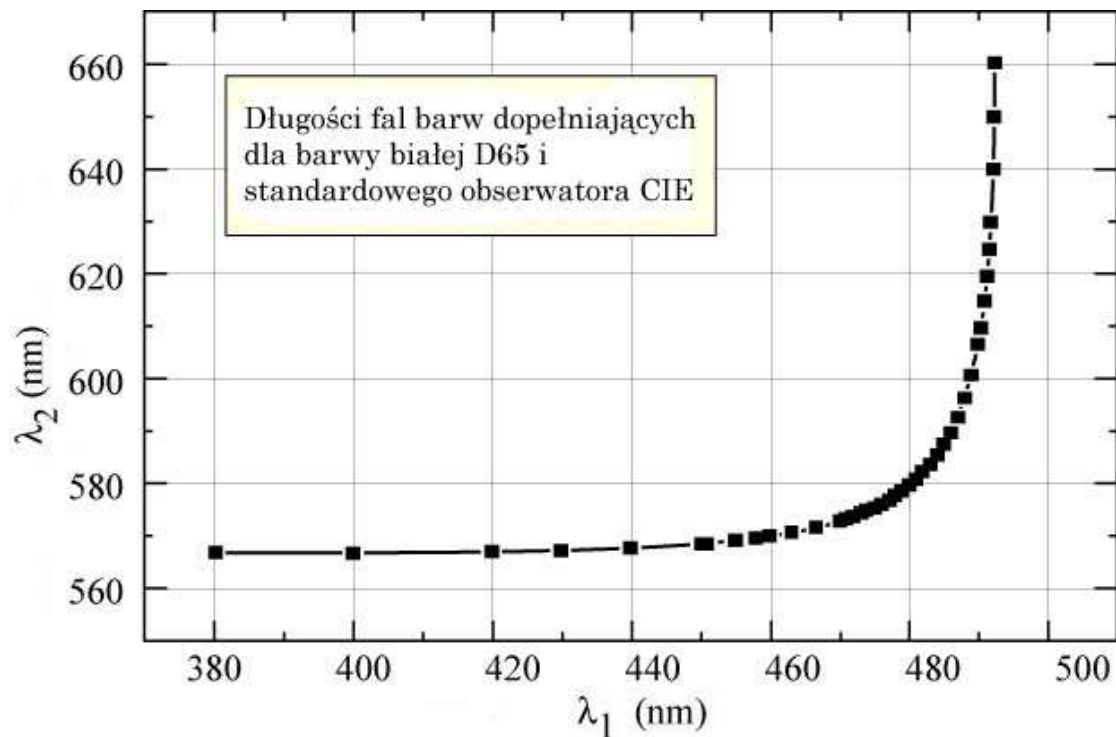
Mechanizm generowania światła w strukturze diody LED umożliwia uzyskanie promieniowania o wąskim zakresie długości fal, niemal monochromatycznego. Tak więc pojedyncze złącze LED nie może być źródłem światła białego – do tego potrzeba przynajmniej dwóch promieniowań monochromatycznych.

Diodowe źródła światła białego można podzielić na dwie główne kategorie: źródła wykorzystujące same diody LED w kilku kolorach oraz źródła wykorzystujące diody o jednej długości fali w połączeniu z substancjami i strukturami zmieniającymi tę długość fali.

Cechami, które mają podstawowe znaczenie przy określaniu jakości źródła światła, w szczególności światła białego jest efektywność świetlna (stosunek całkowitego strumienia mocy promieniowania do strumienia świetlnego), związana z nią całkowita sprawność świetlna (stosunek całkowitej mocy elektrycznej do strumienia świetlnego) oraz zdolność reprodukcji barw. Ze względu na mechanizm widzenia barw w ludzkim oku oraz podstawowe prawa fizyki, którym podlega powstawanie światła w diodach nie jest możliwa jednoczesna maksymalizacja wydajności źródła i jakości oddania barw. Zależnie od konkretnej aplikacji wydajność lub jakość oddania barw musi być wybrana jako priorytet. I tak do celów oświetlenia użytkowego w domach, biurach, sklepach, muzeach jakość oddania barw ma bardzo duże znaczenie, ale już przy oświetleniu ulic, parkingów czy klatek schodowych ważniejsza staje się wydajność.

Światło białe wytwarzane przez same diody LED.

Wytwarzanie światła białego przez same źródła niemal monochromatyczne jakimi są diody LED bazuje najczęściej na układach dwu, trzy lub cztero elementowych. Czym więcej długości fal mieszamy tym uzyskujemy wyższy indeks oddania barw kosztem zmniejszonej wydajności świetlnej. Najbardziej wydajne są źródła światła białego na bazie dwóch diod o barwach dopełniających.

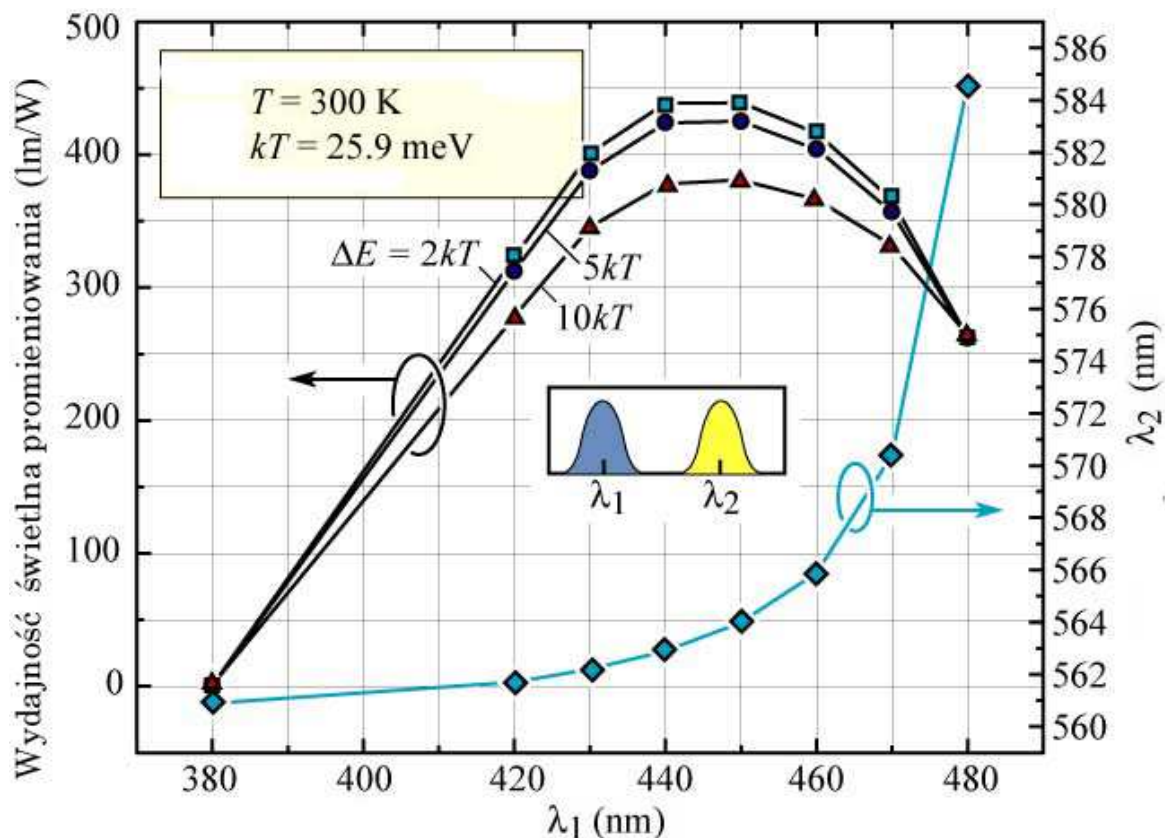


Rys. 1: Długości fal barw dopełniających, które zmieszane w odpowiednich proporcjach (ogólnie różnych dla każdej pary barw) dają wrażenie światła białego określonego w normach CIE jako D65 (światło dzienne o temperaturze barwowej ok. 6500K).

Jakie barwy wybrać, by źródło było maksymalnie wydajne?

Znając stosunek mocy promieniowań dla poszczególnych kolorów w parach barw dopełniających oraz funkcję czułości ludzkiego oka $V(\lambda)$ możemy narysować wykres obrazujący efektywność świetlną źródła składającego się z dwóch diod LED.

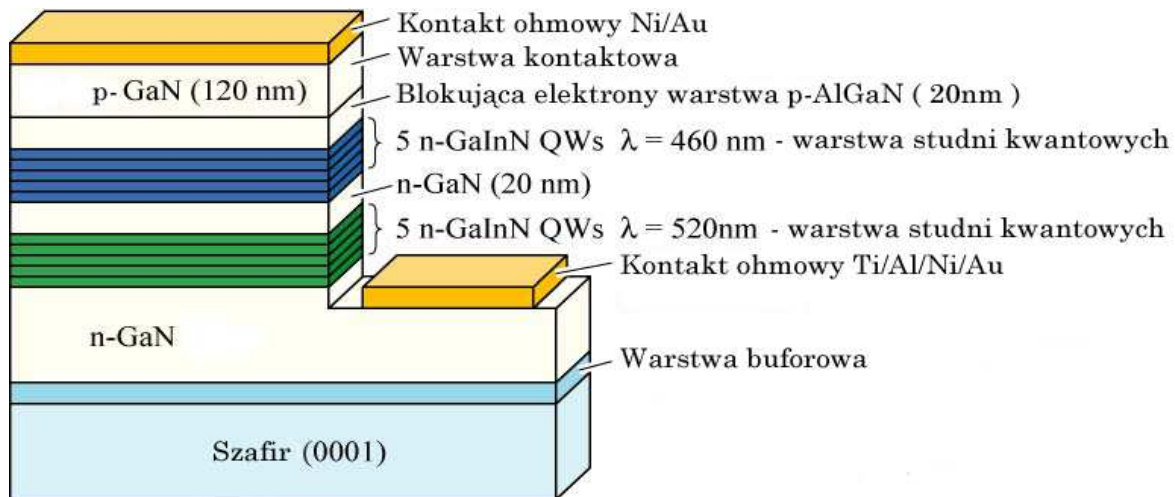
Taki wykres pokazano na rys. 2. Widać na nim trzy krzywe odpowiadające trzem obliczeniom dla trzech różnych szerokości połówkowych widm diod, $\Delta E = 2kT, 5kT$ i $10kT$. przy założeniu że mają kształt krzywych Gaussa.



Rys. 2: Obliczona wydajność świetlna dwuchromatycznego źródła światła białego D65 dla standardowego obserwatora CIE i dla 3 różnych szerokości połówek widm barw składowych λ_1 i λ_2 .

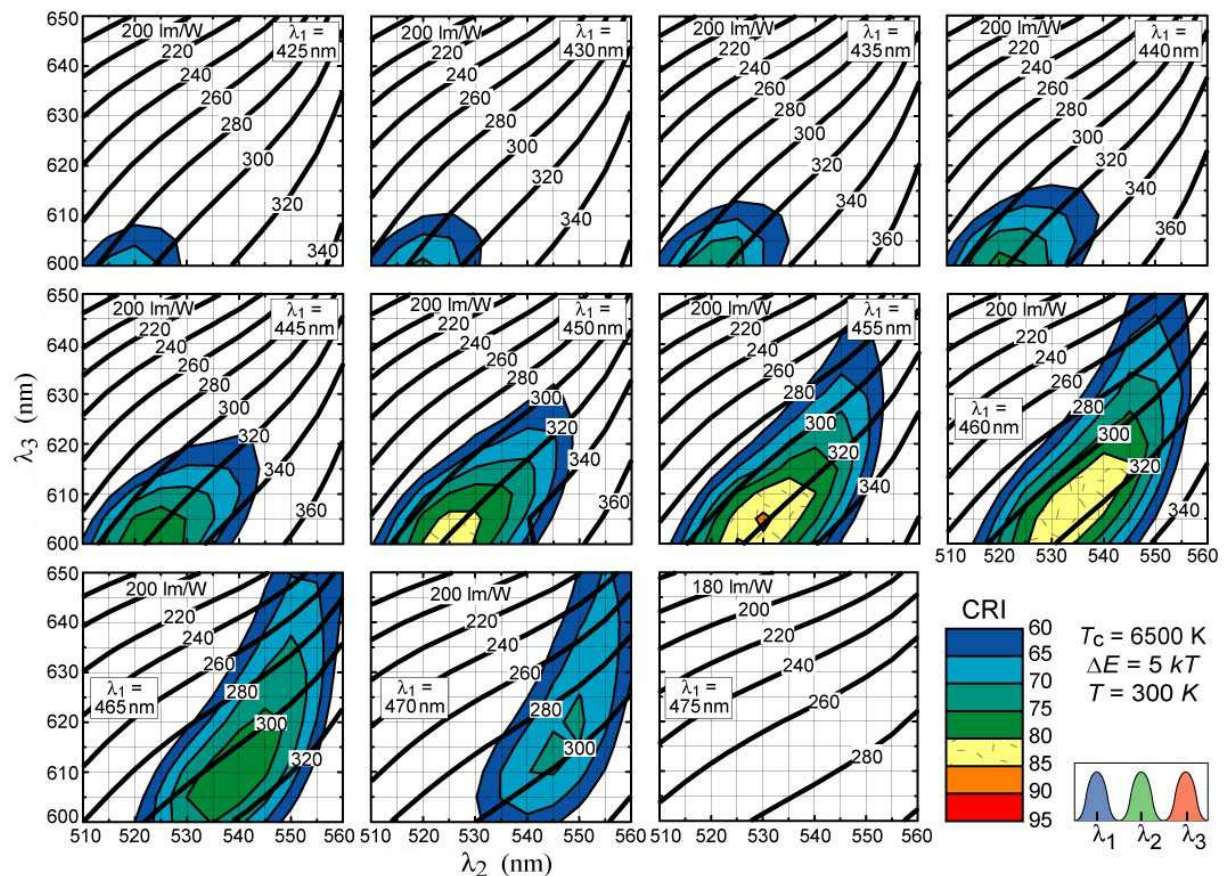
Widać, że maksimum wydajności świetlnej istnieje dla pary barw o długościach fali ok. 445nm i 584nm i wynosi aż ok. 440 lm/W.

Możliwe realizacje takiego podwójnego układu to użycie dwóch diod LED, żółtej i niebieskiej. Zbudowano też działające układy wykorzystujące jednoelementowe wielowarstwowe struktury, w których miesza się np. światło niebieskie z przejść międzypasmowych studni kwantowych oraz szerokie, żółte widmo przejść w parach domieszek donor-akceptor albo światło z przejść międzypasmowych dwóch zespołów studni kwantowych (zobacz rys. 3).



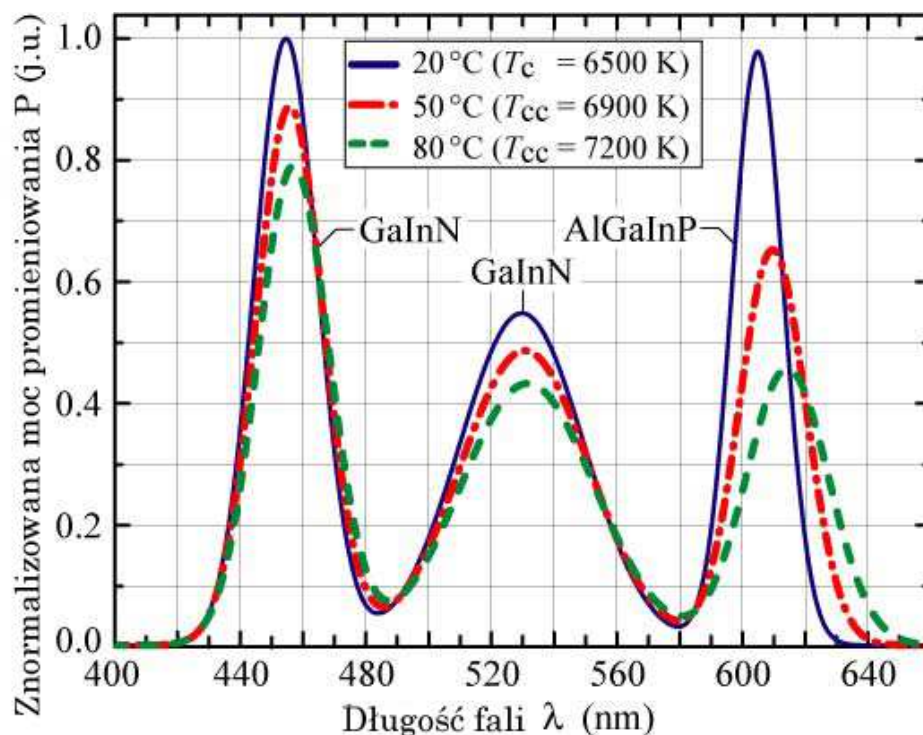
Rys. 3: Struktura monolitycznej dwukolorowej diody z dwoma aktywnymi obszarami świecenia.

Źródła światła białego zbudowane z diod LED w trzech kolorach mają niższą wydajność świetlną ale za to lepszy indeks oddania barw niż źródła dwuchromatyczne. Zależności wydajności świetlnej i indeksu CRI od różnych długości trzech fal składowych przedstawiono na rys. 4.



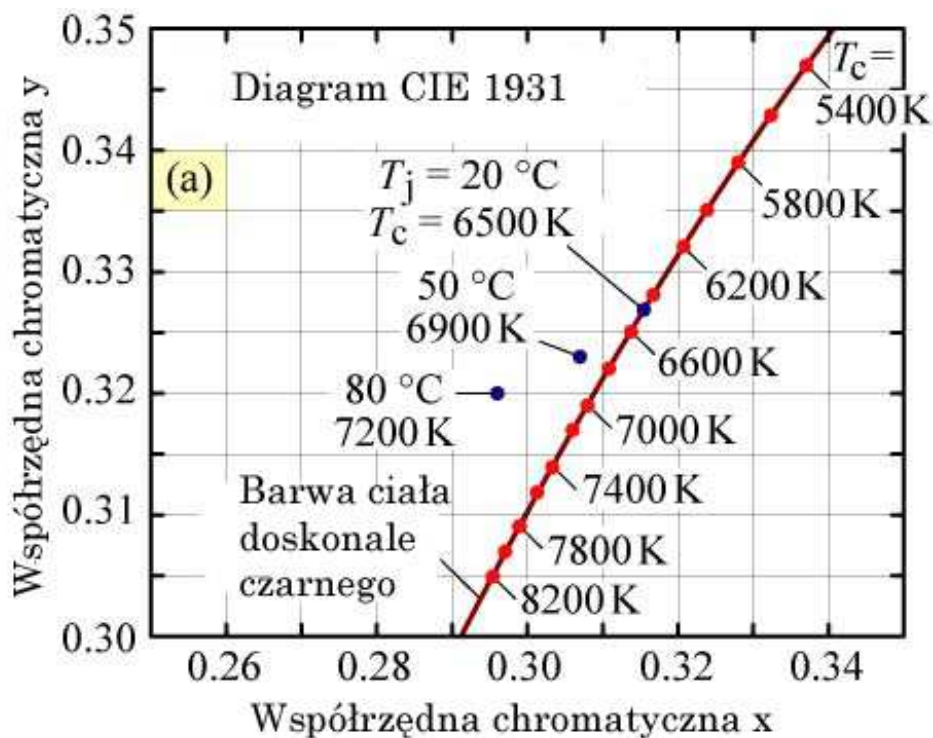
Rys. 4: Wykresy konturowe wydajności świetlnej i indeksu CRI dla różnych kombinacji trzech kolorów diod o szerokości połówkowej widma równej 5kT dających wrażenie światła białego o temperaturze barwowej 6500K.

Dokładna analiza tych wykresów pokazuje, że najwyższą wartość CRI (ok. 85 przy wydajności świetlnej ok. 320lm/W) otrzymamy dla diod o długościach fali ok. 455, 530 i 605 nm. Z rysunku wynika również, że wartość CRI jest bardzo czuła na położenie maksimum widm składowych barw. Ten fakt rodzi pytanie o stabilność termiczną trójskładnikowych diodowych źródeł światła białego. Zarówno intensywność promieniowania w maksimum widma, jego położenie jak i szerokość widma – wszystkie te parametry w inny sposób i różnie dla różnych kolorów diod – zależą od temperatury otoczenia i temperatury samego złącza półprzewodnikowego diody - rys. 5.



Rys. 5: Widmo emisyjne trójchromatycznego diodowego źródła światła białego dla różnych temperatur.

W rezultacie rosnącej temperatury w jakiej pracują złącza diod następuje przesunięcie temperatury barwowej źródła na diagramie CIE w kierunku wyższych wartości – rys 6.



Rys. 6: Zmiany położenia barwy trójchromatycznego źródła światła białego w funkcji temperatury. Temperatura barwowa źródła $T_c = 6500\text{ K}$ dla temperatury złącza $T_j = 20\text{ °C}$.

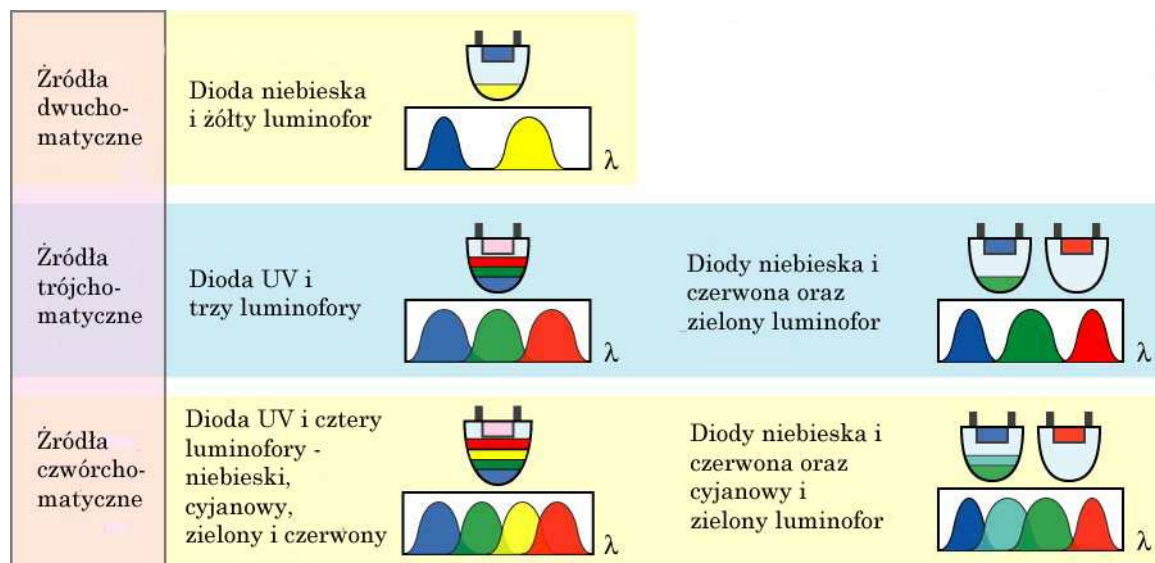
To przesunięcie kolorystyczne może być wyeliminowane poprzez korekcję intensywności świecenia poszczególnych diod. Można to zrobić na dwa sposoby – albo poprzez pomiar w czasie rzeczywistym jasności diod i jej odpowiednią korekcję, albo poprzez pomiar temperatury diod i korekcję intensywności świecenia według znanych jej zależności od temperatury. Ta druga metoda jest prostsza choć nie bierze z kolei pod uwagę efektów związanych ze spadkiem wydajności diod w funkcji czasu ich eksploatacji.

Budowane są również źródła światła białego oparte na układach 4 a nawet 5-diodowych. W takich układach, kosztem ich wydajności można elastycznie i dokładnie wybierać pożądaną temperaturę barwową przy jednoczesnym zachowaniu bardzo wysokich parametrów oddania barw.

Źródła światła białego wykorzystujące konwersję długości fali.

W źródłach światła białego bazujących na konwersji długości fali promieniowanie emitowane przez diodę LED jest częściowo lub w całości wykorzystywane do optycznego wzbudzenia luminoforu, mieszaniny luminoforów, struktur półprzewodnikowych lub barwników organicznych. Podobnie jak przy wykorzystaniu samych diod LED wydajność źródeł spada ze wzrostem liczby składników barwy białej, ale jednocześnie rośnie ich zdolność oddania

barw i już w 4-składnikowych źródłach CRI osiąga wartość bardzo bliską maksymalnemu 100.



Rys. 7: Najczęściej stosowane układy wykorzystujące ultrafioletowe, niebieskie lub czerwone diody i luminofory.

Sprawność η konwertera zmieniającego długość fali światła z wartości λ_1 na λ_2 jest zależna od wartości straty energii przy zmianie długości fali absorbowanej na długość fali emitowaną przez konwerter η_{conv} (tzw. przesunięcie Stokesa. Czym mniejsza różnica w długościach fal tym sprawność η_{conv} jest większa) i od zewnętrznej sprawności kwantowej konwertera η_{ext} , będącej stosunkiem ilości fotonów zaabsorbowanych do ilości fotonów ostatecznie wyemitowanych poza obszar konwertera.

$$\eta = \eta_{\text{conv}} * \eta_{\text{ext}}$$

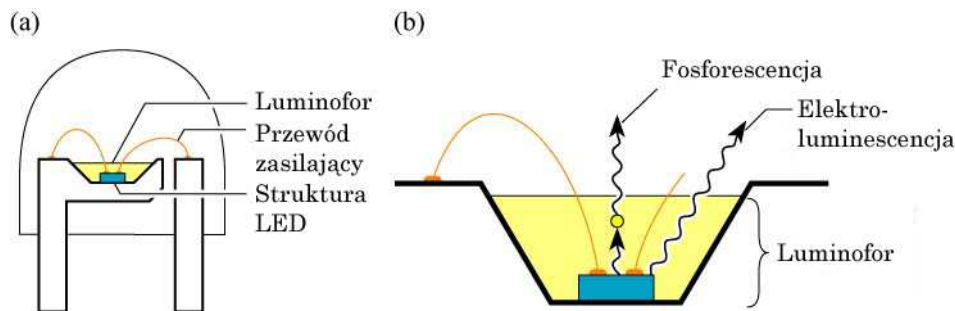
gdzie $\eta_{\text{conv}} = \lambda_1 / \lambda_2$, a η_{ext} jest iloczynem charakterystycznej dla danego materiału kwantowej wydajności emisji w stosunku do absorpcji pomnożonej przez wydajność ostatecznej emisji światła poza obszar konwertera. Ta ostatnia wartość jest z kolei zależna od rozkładu przestrzennego konwertera, np. luminoforu. Generalnie cienkie warstwy konwertera mają najlepszą sprawność, ponieważ czym grubsza jest warstwa tym większe znaczenie ma zjawisko reabsorpcji promieniowania.

Tak więc źródła światła białego bazujące na konwersji długości fali, ze względu na fundamentalne mechanizmy kwantowe zmniejszające sprawność tego procesu mają mniejszą całkowitą wydajność niż źródła na samych diodach LED. Przykładowo konwersja światła z diody UV o długości fali 405nm na światło o barwie czerwonej, 625nm, może mieć maksymalną sprawność $\eta = 65\%$. Dlatego w wysokowydajnych źródłach światła lepiej

stosować czerwone diody niż czerwone luminofory. Z drugiej strony niskie koszty produkcji oraz większa stabilność temperaturowa źródeł światła białego wykorzystującego konwertery długości fali powoduje, że takie właśnie konstrukcje dominują na rynku.

Najbardziej popularnym rozwiązaniem jest układ niebieskiej diody GaInN/GaN, której promieniowanie jest częściowo absorbowane przez luminofor, emitujący następnie światło z maksimum w obszarze żółtym.

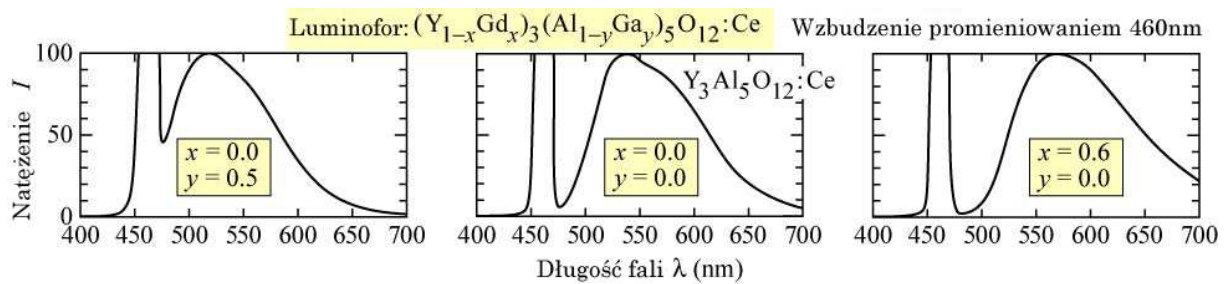
Budowę takiego układu przedstawia rys. 8



Rys. 8: a) – struktura białej diody LED składającej się z chipu GaInN i żółtego luminoforu otaczającego chip, b) – elektroluminescencja chipu diody i fosforescencja luminoforu zwiększająca pierwotną długość fali emitowanej przez diodę.

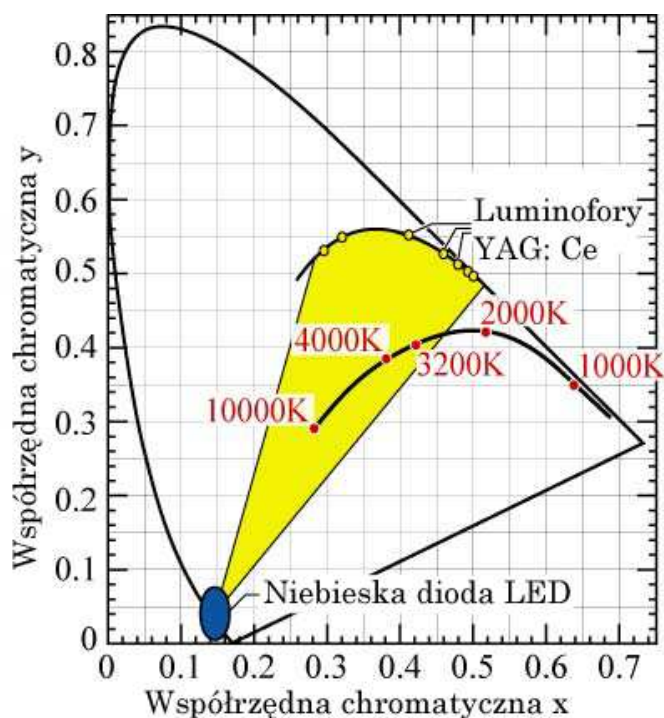
Grubość warstwy luminoforu i gęstość jego roztworu w tworzywie stanowiącym obudowę diody determinuje proporcje intensywności pasma emisyjnego diody niebieskiej i luminoforu a co za tym idzie pozwala optymalizować wydajność i współczynnik oddania barw takiego źródła. Dodatkowo rozkład przestrzenny luminoforu jest kluczowy dla jednorodności przestrzennej zarówno intensywności jak i składu widmowego światła emitowanego przez diodę, stąd sposób dystrybucji luminoforu w obudowie diody stanowi zagadnienie techniczne o zasadniczym znaczeniu.

Najszerzej wykorzystywanym luminoforem w tym układzie jest domieszkowany cerem syntetyczny itrowo-aluminiowy granat YAG (YAG:Ce). Granaty to związki chemiczne o budowie $A_3B_5O_{12}$ gdzie A i B to pierwiastki a O – tlen. YAG to $Y_3Al_5O_{12}$. Co ciekawe kształt widma emisyjnego granatu YAG a w szczególności położenie jego maksimum może być modyfikowane poprzez zamianę itru (Y) na gadolin (Gd) a aluminium (Al) na gal (Ga) – rys. 9.



Rys. 9: Widma źródła światła białego zbudowanego w oparciu o diodę niebieską 460nm i domieszkowany cerem YAG o różnych proporcjach Gd i Ga.

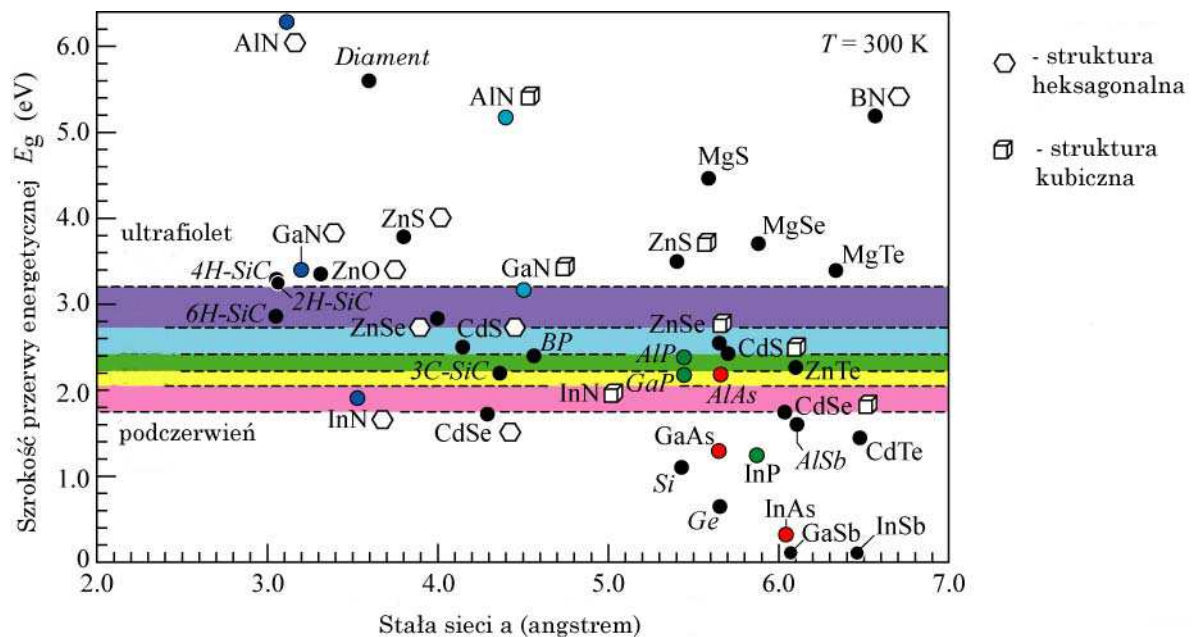
Modyfikacja widma emisyjnego YAG:Ce pozwala w układzie z niebieską diodą LED zbudować źródła światła o temperaturze barwowej z bardzo szerokiego zakresu- rys. 10:



Rys. 10: Punkty na diagramie CIE odpowiadające chromatyczności luminoforów YAG: Ce o różnej zawartości Gd i Ga i chromatyczności niebieskiej diody LED. Obszar zaznaczony na żółto określa wszystkie kolory możliwe do uzyskania przez taki układ dioda-luminofor. W szczególności łatwo widać, że można wyprodukować źródła światła białego o temperaturach barwowych z bardzo szerokiego zakresu od ok. 2800K do ponad 10 000K.

Źródła światła białego mogą być produkowane również w oparciu o diody ultrafioletowe. W szczególności używając diod świecących w dalekim ultrafiolecie (200-20nm) można stosować te same luminofory i mieszaniny luminoforów, których używa się w lampach fluorescencyjnych. W takim przypadku całość uzyskiwanego widma widzialnego pochodzi z emisji luminoforu co uniezależnia to widmo od konkretnej intensywności i długości fali diody pobudzającej oraz daje bardzo wysokie indeksy odwzorowania barw. Niestety wydajność tych źródeł jest niska, chociażby ze względu na bardzo duże przesunięcie Stokesa.

Innym typem konwerterów są półprzewodniki, w których następuje emisja światła wywołana wcześniejszą absorpcją energii z pierwotnego źródła diodowego. W oparciu o takie konwertery zbudowane są diody PRS-LED (photon-recycling semiconductor LED). Emisja w półprzewodniku następuje dzięki przejściom promienistym elektronów pomiędzy pasmem przewodnictwa i pasmem walencyjnym a zatem kolor otrzymanego światła jest funkcją szerokości przerwy energetycznej – rys. 11.



Rys. 11: Szerokość przerwy energetycznej w funkcji stałej sieci dla najważniejszych pierwiastków i dwupierwiastkowych związków chemicznych będących półprzewodnikami. Pismem prostym oznaczono półprzewodniki o prostej przerwie energetycznej, kursywą – półprzewodniki o skośnej przerwie.

Układy PRS-LED mają dobrą wydajność, ale ze względu na małą szerokość widm emisyjnych półprzewodników – stosunkowo niski indeks oddania barw.

Białe diody można również produkować używając jako konwerterów barwników organicznych. Największym problemem przy takich rozwiązaniach jest niska żywotność barwników, które pod wpływem absorpcji kolejnych fotonów stopniowo przestają być aktywne optycznie, blakną. Mają też z reguły dość małą różnicę pomiędzy długością fali absorbowanej i emitowanej, która może wykluczyć powstawanie światła białego.