

Jakość światła białego

Diody LED należą do tzw. IV generacji źródeł światła sztucznego, określanej jako SSL (ang. *solid state lighting*), co można przetłumaczyć jako oświetlenie oparte na elektroluminescencji ciał stałych. Obok „klasycznych” diod LED bazujących na złączach nieorganicznych kryształów półprzewodnikowych do tej kategorii należą m.in. diody OLED i PLED oparte odpowiednio na półprzewodnikach organicznych i polimerowych.

Poprzednie trzy generacje źródeł światła to: używane od zarania dziejów źródła spaleniowe (do tej grupy należą np. łuczywo, świeca, lampa naftowa), wprowadzone na rynek pod koniec XIX wieku źródła żarowe (do tej grupy należy np. żarówka wolframowa lub halogenowa) i dostępne w sprzedaży od początku lat 30. XX wieku źródła wyładowcze (do tej grupy należą np. świetlówki liniowe i kompaktowe, lampy rtęciowe, sodowe, ksenonowe). Poszczególne generacje oświetlenia różnią się zasadniczo sposobem wytwarzania światła i technologią produkcji źródeł światła. Każdej kolejnej generacji, ze względu na coraz bardziej wyrafinowany sposób działania, odpowiada specyficzny, rosnący zestaw parametrów, którymi opisywane są źródła, a tam, gdzie ich produkcję regulują branżowe normy - specyficzny zestaw norm. Dodatkowo zmiany w sposobie opisu światła są wymuszane przez rozwój naszej wiedzy na temat percepcji światła. Z kolei klient końcowy, który o wytwarzaniu światła wie z reguły bardzo niewiele, musi otrzymać prawdziwy, a zarazem bardzo prosty, zrozumiały opis produktu, niezbędny do dokonania wyboru zgodnego z własnymi potrzebami.

Byt określa świadomość

Jeśli do opisu źródeł spaleniowych, np. świec, stosuje się w ogóle jakiś parametr (nie mówiąc o zapachu), to jest nim czas palenia się. Wszyscy jesteśmy przyzwyczajeni do tego, że źródła żarowe opisuje moc żarówki. Średni czas życia często nie jest przez producentów w ogóle podawany. Źródła żarowe, przez wiele dziesięcioleci dominujące na rynku, zwłaszcza konsumenckim, wyrobiły w klientach intuicję. Każdy z nas mniej więcej wie, ile światła daje żarówka o mocy 100 W lub halogen o mocy 50 W. Po wejściu na rynek źródeł kolejnej generacji – wyładowczych, a w szczególności świetlówek kompaktowych zastępujących tradycyjne żarówki,

producenci byli zmuszeni podawać ich parametry świetlne w stosunku do znanych parametrów żarówek. Tak więc na opakowaniu świetlówki kompaktowej niemal zawsze, obok nadal mało intuicyjnego i mało zrozumiałego pojęcia strumienia świetlnego, podaje się moc żarówki, która dałaby porównywalną ilość światła. Podobnie rzecz się ma w przypadku źródeł opartych na diodach LED. Okazuje się jednak, że ekwiwalentna moc lub strumień świetlny nie wystarczają do opisu źródeł III generacji, a tym bardziej IV generacji.

Żarnik wolframowy typowej, tradycyjnej żarówki rozgrzewa się do temperatury między 2700 a 3300°C, a promieniowanie, które wysyła, jest w kształcie widma bardzo podobne do promieniowania tzw. ciała doskonale czarnego o tej samej temperaturze. Tak więc temperatura barwowa typowych żarówek mieści się w dość wąskim obszarze niskich wartości i nie ma zbyt wielkiej potrzeby, żeby ją szczegółowo określać (paradoksalnie barwa źródeł światła o niskiej temperaturze barwowej jest określana jako ciepła. Jest tak ze względu na dużą intensywność świecenia w czerwonej części, a kolor czerwony jest „ciepły”, kojarzy się z ciepłem). Powstawanie światła w źródłach wyładowczych, a także w diodach to zupełnie inny mechanizm. W obu technologiach można uzyskać widma porównywalne z widmem ciała doskonale czarnego w o wiele wyższych temperaturach lub znacznie odbiegające od widma ciała doskonale czarnego. Tak więc w przypadku źródeł III i IV generacji rodzi się potrzeba użycia dodatkowych parametrów opisu, szczególnie jeśli chodzi o źródła światła białego.

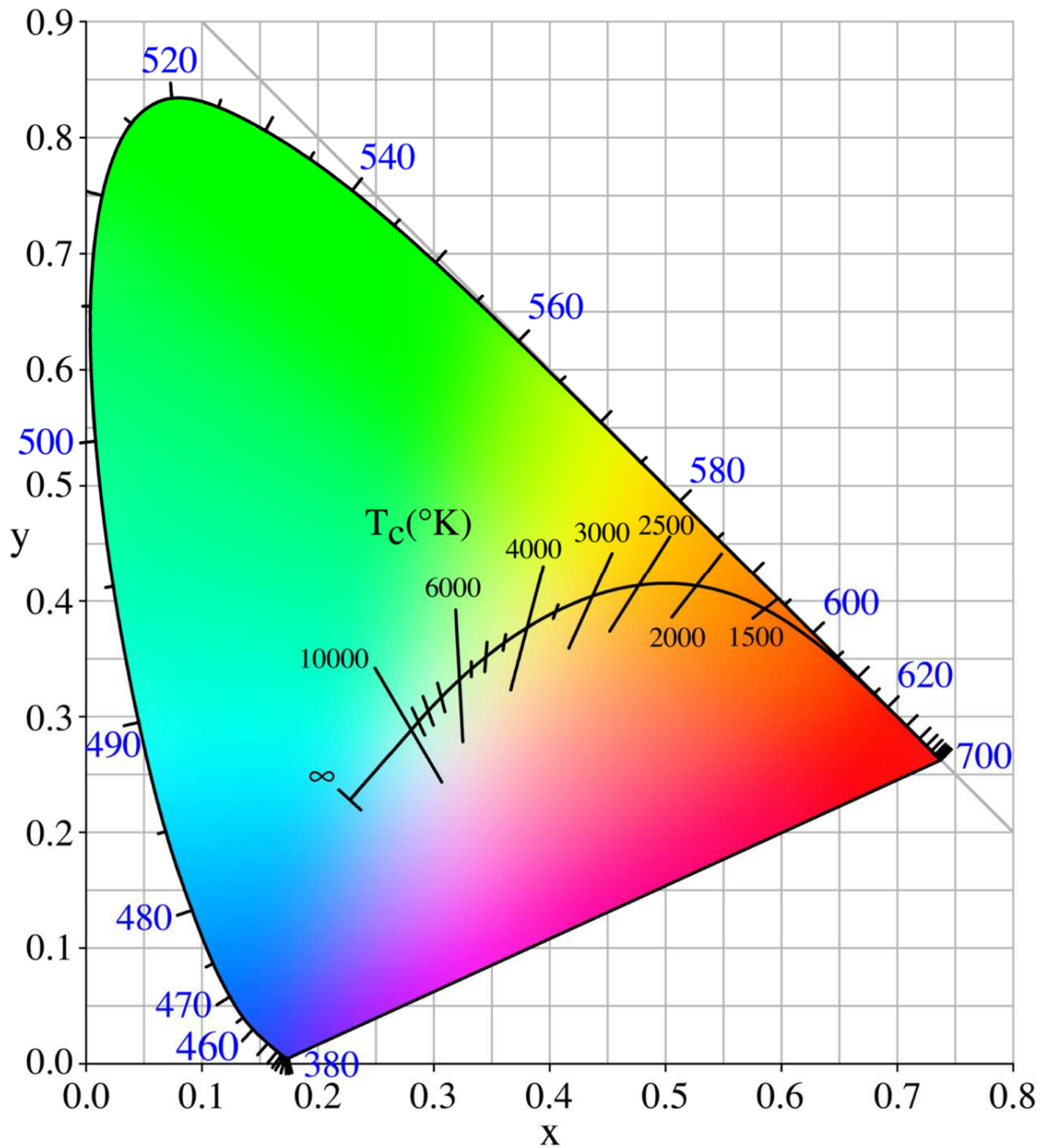
Jak cię widzą, tak cię piszą

Poniżej znajduje się krótkie omówienie parametrów stosowanych do opisu diodowych źródeł światła białego:

x, y – współrzędne chromatyczne na diagramie CIE1931. Współrzędne te mogą być obliczone na podstawie znajomości rozkładu widmowego badanego promieniowania oraz trzech tzw. funkcji dopasowania koloru, które są doświadczalnie zbadanymi i stabilizowanymi wartościami. Iloczyn intensywności promieniowania przez wartość funkcji dopasowania koloru w danej długości fali scałkowany po całym zakresie widzialnych długości fal pozwala obliczyć tzw. współczynniki trójbarwne danego promieniowania, które dają się dalej przekształcić na współrzędne chromatyczne. Współrzędne x, y są używane właściwie wyłącznie w technicznych

opisach diod przeznaczonych dla fachowców i są zupełnie nieintuicyjne dla przeciętnego klienta końcowego, dla którego diody monochromatyczne opisuje się najczęściej tylko nazwą koloru, a diody białe – temperaturą barwową. *Notabene* podanie temperatury barwowej i współczynnika Duv dostarcza tej samej informacji o barwie światła, którą można odczytać ze współrzędnych x , y , tylko w nieco bardziej intuicyjnej formie.

Trzeba podkreślić, że współrzędne chromatyczne dają pełną informację o wrażeniu barwnym, jakie wywrze na obserwatorze dane promieniowanie, natomiast nie niosą informacji o składzie widma. Jeśli źródło promieniowania jest monochromatyczne lub niemal monochromatyczne, tak jak w przypadku diod jednokolorowych, to można powiedzieć, że współrzędne x , y są wystarczającymi parametrami do opisu jakości światła. Inaczej rzecz się ma, jeśli źródło jest niemonochromatyczne, zwłaszcza gdy mamy do czynienia ze źródłem światła białego. Dwa źródła światła o różnym składzie widmowym mogą wywoływać to samo wrażenie barwne i mieć te same współrzędne x , y , jednak nietrudno się domyślić, że będą oświetlały otoczenie w różny sposób, bo inaczej będą wyglądać różnokolorowe przedmioty oświetlane światłem o odmiennym widmie. Dlatego do opisu jakości światła białego konieczne jest użycie dodatkowych parametrów, takich jak omówione dalej CRI.



Rys. 1. Diagram CIE 1931, na którym oznacza się barwę światła określoną za pomocą współrzędnych x, y . Na rysunku zaznaczono krzywą ciała doskonale czarnego i odcinki zawierające punkty o kilku przykładowych temperaturach barwowych najbliższych (CCT).

CCT (ang. *correlated color temperature*) [K] – temperatura barwowa najbliższa. Można ją zdefiniować jako temperaturę ciała doskonale czarnego któremu odpowiada światło o barwie najbardziej zbliżonej do badanej barwy, przy tej samej jasności. Matematycznie oblicza się ją najczęściej, korzystając z reprezentacji barw

na diagramie CIE1978, znanym także jako CIELUV, i szukając punktu na krzywej ciała doskonale czarnego, który leży najbliżej punktu odpowiadającego chromatyczności badanego źródła światła. Określanie wartości CCT ma praktyczny sens tylko wtedy, gdy punkt chromatyczności badanego źródła leży blisko krzywej ciała doskonale czarnego.

Duv – parametr określający różnicę pomiędzy chromatycznością źródła światła o danej CCT a chromatycznością ciała doskonale czarnego o tej samej temperaturze barwowej na diagramie CIELUV. Różne normy podają różną graniczną wartość Duv, dla której ma sens określanie temperatury barwowej, np. w amerykańskiej normie ANSI C78.377-2008 wartość ta wynosi 0,006.

CRI (ang. *color rendering index*) – indeks oddania barw. Jego określenie bazuje na porównaniu chromatyczności próbek kolorystycznych oświetlonych badanym światłem i światłem porównawczym. Światło porównawcze to światło o tej samej temperaturze barwowej dla źródeł o temperaturze poniżej 5000 K lub tzw. iluminat światła dziennego o danej temperaturze dla źródeł powyżej 5000 K. Indeks CRI można obliczyć na podstawie znajomości widma promieniowania, chociaż idea użycia próbek kolorystycznych bierze się stąd, że klasycznie do obliczenia CRI potrzebne są tylko dane kolorymetryczne, wyrażające się położeniem punktu odpowiadającego danemu wrażeniu barwnemu na odpowiednim diagramie kolorystycznym. Definicja i rozumienie parametru CRI podlegają ewolucji w miarę wzrostu naszej wiedzy o percepcji światła. Najczęściej spotykany w opisach jest tzw. ogólny indeks CRI (ang. *general CRI*), nazywany również indeksem Ra, który oblicza się na podstawie badania i uśredniania wyników dotyczących ośmiu próbek kolorystycznych o stosunkowo nisko nasyconych barwach. Aby dokładniej określić jakość światła białego, stosuje się dodatkowo kolejnych sześć próbek kolorystycznych i oblicza sześć dodatkowych, tzw. specjalnych indeksów CRI. Kolejną modyfikacją sposobu określania CRI było włączenie do obliczeń tzw. funkcji kolorystycznej adaptacji wzroku, związanej z umiejętnością stopniowego przetwarzania wrażeń barwnych przez nasz umysł przy złym, nienaturalnie zabarwionym oświetleniu na wrażenia znane ze świata oświetlonego światłem białym o dobrej jakości, takim jak słoneczne. Międzynarodowa Komisja Oświetlenia (CIE) stale pracuje nad udoskonalaniem metod pomiarowych i opracowywaniem norm dotyczących opisu światła. Jako alternatywę dla CRI w zakresie opisu efektów, jakie

wywoła oświetlenie realnych przedmiotów światłem danej jakości, stosuje się coraz bardziej skomplikowane modele, np. najnowszy model określany jako CIECAM02, zdecydowanie bardziej biorący pod uwagę zdolności adaptacji kolorystycznej ludzkiego wzroku. Prace nad tymi zagadnieniami prowadzą też inne ośrodki, np. amerykański NIST (National Institute of Standards and Technology) będący agendą Departamentu Energetyki USA. NIST opracowuje nowy, alternatywnym dla CRI standard o nazwie CQS (ang. *color quality scale*) – skala jakości barwy. Trzeba przy okazji powiedzieć, że na gruncie polskim nie przyjęto jeszcze żadnych norm dotyczących metod pomiaru i opisu diod LED, obowiązują wyłącznie przepisy będące tłumaczeniem norm Wspólnoty Europejskiej dotyczące bezpieczeństwa urządzeń wykorzystywanych w technologii LED.

Źródło światła	CRI
Światło słoneczne	100 (a)
Halogen kwarcowy z żarnikiem wolframowym	100 (b)
Żarówka z żarnikiem wolframowym	100 (b)
Świetlówka	60–95 (b)
Biała dioda z luminoforem	55–95 (b, c)
Biała dioda LED dwuchromatyczna	10–60 (b, c)
Biała dioda LED trójchromatyczna	60–95 (b, c)
Biała dioda LED tetrachromatyczna	70–95 (b, c)
Lampa rtęciowa z luminoforem	50 (b)
Lampa rtęciowa	33 (b)
Lampa sodowa nisko- i wysokociśnieniowa	10 i 22 (b)
Zielone światło monochromatyczne	-50 (c)

Tab. 1. Ogólny indeks oddania barw (Ra) dla różnych źródeł światła: (a) używając światła słonecznego jako referencyjnego, (b) używając światła żarowego o tej samej CCT jako referencyjnego, (c) używając iluminantu światła dziennego D65 jako referencyjnego

Nazwa	Barwa w świetle dziennym	Próbka
TCS01	Jasno szarawo czerwony	
TCS02	Ciemno szarawo żółty	
TCS03	Mocno żółtawo zielony	
TCS04	Umiarkowanie żółtawo zielony	
TCS05	Jasno niebieskawo zielony	
TCS06	Jasno niebieski	
TCS07	Jasno fioletowy	
TCS08	Jasno czerwonawo purpurowy	
TCS09	Mocno czerwony	
TCS10	Mocno żółty	
TCS11	Mocno zielony	
TCS12	Mocno niebieski	
TCS13	Jasno żółtawo różowy	
TCS14	Umiarkowanie oliwkowo zielony	

Tabela 2. Próbki kolorów testowych (ang. Test Color Samples – TCS) do określania indeksu CRI według zaleceń Międzynarodowej Komisji Oświetlenia (CIE). Pierwsze osiem próbek o barwach nisko nasyconych służy do wyznaczania ogólnego indeksu oddania barw, tzw. indeksu Ra. Pozostałe 6 próbek obejmuje kolory nasycone i „barwy znanych obiektów”: skóry ludzi o białej karnacji i liści drzew. Wszystkie razem próbki umożliwiają obliczenie indeksu CRI.

Wydajność świetlna [lm/W] świadczy o tym, jaka jest sprawność konwersji energii elektrycznej dostarczonej do źródła światła na światło. Wydajność świetlna jest ilorazem strumienia świetlnego i mocy dostarczonej energii elektrycznej będącej z

kolei iloczynem napięcia i natężenia prądu zasilającego. Ten podstawowy parametr świadczący o poziomie energooszczędności, mimo że jest stosunkowo prosty w swojej konstrukcji, bywa przedmiotem różnego rodzaju nieścisłości i manipulacji. W szczególności należy pamiętać, że wydajność pojedynczej diody zmierzona w warunkach laboratoryjnych będzie zawsze wyższa od wydajności modułu diodowego, diodowego zamiennika lub diodowej oprawy, ze względu na dodatkowe straty w układzie zasilającym i optycznym. Poza tym należy zwrócić uwagę na warunki pomiaru strumienia świetlnego, którego wartość bierze się do obliczania wydajności. . Jeśli np. weźmiemy do obliczeń wartość strumienia świetlnego z pomiaru wykonywanego na linii produkcyjnej diody, który odbywa się w ciągu ułamka sekundy i na złączu diody w temperaturze pokojowej, zamiast wartości pomiaru strumienia w realnych warunkach pracy i temperaturze złącza sięgającej 100°C to możemy otrzymać wyniki różniące się o czynnik 2. W związku z tym różne instytucje międzynarodowe i krajowe zajmujące się normami osobno określają sposób pomiaru wydajności diod, modułów diodowych i całych opraw. Większość tych norm jest dopiero w fazie opracowywania.

Przestrzenny rozkład intensywności – pokazuje zależność intensywności światła od kąta odchylenia wiązki od osi optycznej pojedynczej diody, „żarówki” diodowej lub oprawy diodowej. Na jego podstawie określa się m.in. często podawany przez producentów parametr nazywany kątem świecenia diody. Najczęściej przyjmuje się, że aby go zmierzyć, należy znaleźć kąt wiązki, której intensywność jest o połowę mniejsza od intensywności wiązki centralnej.

Przestrzenny rozkład barwy – ważny i rzadko podawany parametr diod i opraw z diodami białymi. Informuje o tym, jakie są współrzędne chromatyczne wiązek opuszczających źródło światła pod różnymi kątami. Ze względu na stopień skomplikowania konstrukcji diody białej zawsze występuje pewna niejednorodność przestrzenna uzyskiwanej barwy.

Poza parametrami optycznymi stosuje się również parametry dotyczące właściwości elektrycznych, takich jak napięcie przewodzenia, i innych cech, np. czasu życia diody.

Czas życia jest podawany jako tzw. L70 lub L50, co oznacza czas, po jakim dioda osiągnie spadek jasności odpowiednio do 70 lub 50 proc. początkowej wartości. Ze

względu na to, że parametr ten sięga dziesiątków tysięcy godzin, jego określanie odbywa się zawsze metodą ekstrapolacji pomiarów odbywających się w znacznie krótszym czasie. Np. według normy IES LM-80-08 opracowanej przez amerykańskie Illuminating Engineering Society czas pomiaru wynosi 6000 godzin.

Każdemu według potrzeb

W całym łańcuchu dostaw technologii LED występują różne typy podmiotów, zainteresowane specyficznym zestawem parametrów opisujących kupowane przez nie produkty. Zajmijmy się przykładowo firmami produkującymi moduły diodowe oraz klientami końcowymi.

Producenci modułów są zainteresowani przede wszystkim jak najniższą ceną diod przy jak najlepszej jakości. Jeśli chodzi zaś o jakość, interesujące jest uzyskanie jak największej wydajności świetlnej oraz jednorodności parametrów zakupionej partii diod.

Mimo stałego rozwoju i udoskonalania technologii produkcji nie jest i nigdy nie będzie możliwe uzyskanie idealnej jednorodności parametrów diod LED, takich jak barwa, wydajność świetlna i napięcie przewodzenia. Te niejednorodności mają swoje źródła na wielu etapach procesu produkcji. Odgrywają tu rolę: niejednorodność strukturalna i chemiczna kryształów stanowiących podłoże, fluktuacje zachodzące w procesie epitaksjalnego wzrostu struktur aktywnych, a także niejednorodności powstające przy tworzeniu kontaktów elektrycznych i zamykaniu złączy diodowych w obudowę. Wahania parametrów dotyczą w sposób szczególny diod białych tworzonych najczęściej na bazie diod niebieskich i luminoforów, gdzie pojawia się dodatkowo problem powtarzalności składu chemicznego, a przede wszystkim rozkładu przestrzennego samego proszku luminoforu.

W celu zapewnienia jak największej jednorodności parametrów producenci stosują procedurę podziału wyprodukowanej partii diod na tzw. biny, czyli grupy zawierające diody z parametrami z określonych przedziałów. Binning dotyczy przede wszystkim wydajności, napięcia przewodzenia i barwy. Ten ostatni jest najbardziej skomplikowany, zwłaszcza jeśli chodzi o diody białe. Właściwie każdy z wiodących producentów diod ma własny system podziału diod na biny, a normy w tym zakresie

dopiero są ustalane. Z jednej strony, podstawą podziału diod białych jest temperatura barwowa, której zakresy wyznaczają granice binów wzdłuż krzywej ciała doskonale czarnego. Z drugiej strony, istotnym pojęciem są elipsy McAdama, które określają wielkość obszarów na wykresach chromatyczności zawierających punkty o nierozróżnialnej dla standardowego obserwatora różnicy barwy.

Klient końcowy nie jest zainteresowany tymi technicznymi niuansami. Interesuje go możliwość zakupu produktu o powtarzalnych, ale prosto określonych parametrach, np. o temperaturze barwowej określonej zwyczajnie w stopniach Kelvina. W tej sytuacji producent, który chce zachować powtarzalność barwy na poziomie wyższym od przeciętnej rozróżnialności barw, ma do wyboru przynajmniej dwie strategie: kupować diody tylko z jednego binu albo kupować diody z różnych, odpowiednio wybranych binów i mieszać je w swoich produktach w celu uzyskania pożądanej temperatury. Drugi wariant jest korzystniejszy dla producenta diod, bo może on łatwiej sprzedać całą partię towaru i można oczekiwać, że będzie skłonny sprzedawać diody taniej w takim systemie.

Oczywiście, poza znajomością temperatury barwowej klient powinien wiedzieć, jaki jest całkowity strumień świetlny modułu i jaka moc elektryczna jest przez niego pobierana. Aby ułatwić porównanie, można podzielić przez siebie te dwie wielkości, podając *explicite* wynik dla danego źródła światła.

Piotr Mroziński / alled.pl