

Projektowanie opraw LED - wydajność

Przygotował Stanisław Binkiewicz

Regulacje prawne w UE odnośnie wydajności źródeł światła

Po 1 września 2009 wszystkie żarówki nieprzezroczyste muszą spełniać wymogi klasy A

Według dyrektywy 98/11/WE klasa A

$$W \leq 0.24 \cdot \sqrt{\Phi} + 0.0103 \cdot \Phi$$

Odpowiednik żarówki	Strumień świetlny lm	Sprawność dla klasy A lm/W
25	220	38
40	420	45
60	710	52

Koniec 2009 nowe dyrektywy odnośnie

- wydajności lamp kierunkowych
- wydajności opraw
- klas energetycznych

L Prize nagroda w wysokości 10 000 000 \$ za:

- wyprodukowanie żarówki LED - zamiennika 60W
- wydajność 90lm/W
- temperatura barwowa 2700 - 3000K

Wymagania Energy Star dla opraw bazujących na diodach LED



Minimalna wydajność opraw 20 - 45 lm/W
Większość opraw 35lm/W

W przyszłości wszystkie oprawy powyżej 70lm/W

Wymagania Energy Star dotyczą też:

- minimalnego strumienia świetlnego (zależne od typu oprawy)
- temperatury barwowej oraz współrzędnych chromatycznych światła
- CRI (powyżej 75, zależne od oprawy)
- utrzymania strumienia świetlnego (35 000h lub 25 000h)
- utrzymania niezmienności barwy
- współczynnika mocy (powyżej 0.9 przemysłowe, powyżej 0.7 pozostałe)
- poboru mocy podczas wyłączenia (max 0.5W)
- częstotliwości pracy (min 120Hz)



Program CALiPER Departamentu Energii USA

Większość opraw **nie spełnia** wymagań Energy Star
Część opraw **zepsuła się** w czasie testów

Seria	Rok	Sprawność min lm/W	Sprawność max lm/W	Ilość opraw poniżej 20 lm/W / ilość wszystkich badanych opraw	Ilość zamienników żarówek nie spełniających wymogów UE/ ilość badanych zamienników
1	2007	4	32,8	9/14	nie badano
2	2007	9,2	34,1	6/12	0/1 ok 14lm/W
3	2007	6	61	2/20	1/1
4	2008	8	46	10/20	nie badano
5	2008	9	46	4/10	1/2
6	2008	4	62	1/16	1/5

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{oprawy}}}{P_{\text{oprawy}}}$$

~~$$\eta = \frac{m \cdot \Phi_{\text{LED dla } 25^{\circ}\text{C}}}{m \cdot 1\text{W}}$$~~

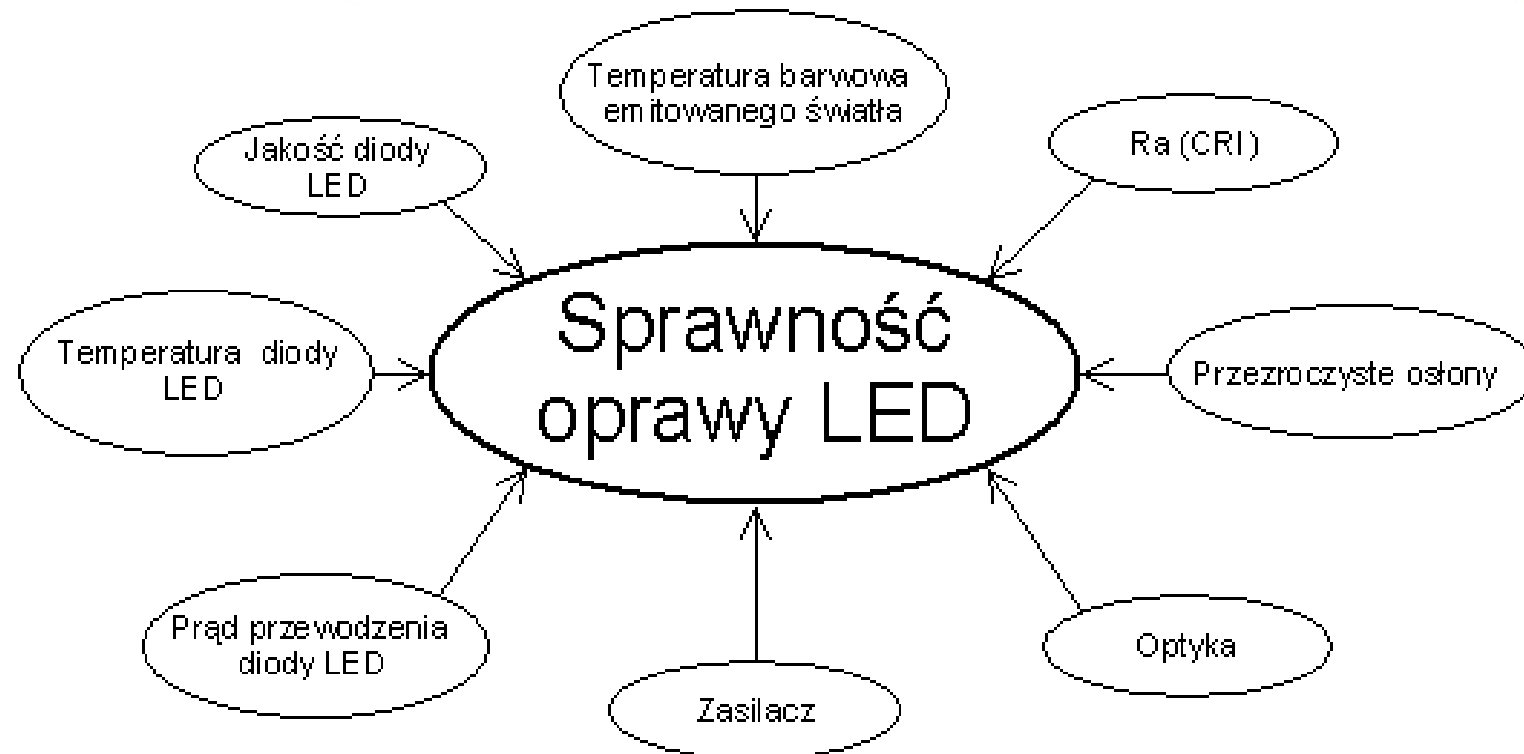
m - ilość diod LED
Φ - strumień świetlny
P - moc



Przykład nieprawidłowego podejścia

Oprawa LED składająca się z **56** diod

- deklarowany przez producenta pobór mocy **56W**
- deklarowany strumień świetlny emitowany przez lampę **4200lm**
- sprawność **75lm/W**



$$\eta_{\text{oprawyLED}} = \frac{m \cdot \Phi \cdot k \cdot \eta_{\text{optyki}} \cdot \eta_{\text{oslony}}}{(1 + \eta_{\text{zasilacza}}) \cdot m \cdot P_{\text{LED}}}$$

m - ilość diod LED

Φ - strumień świetlny emitowany przez diodę dla określonego prądu przewodzenia

k - stosunek strumienia świetlnego emitowanego w rzeczywistej temperaturze pracy LED do strumienia świetlnego emitowanego

w temperaturze 25°C

η - sprawność

Sprawność opraw LED

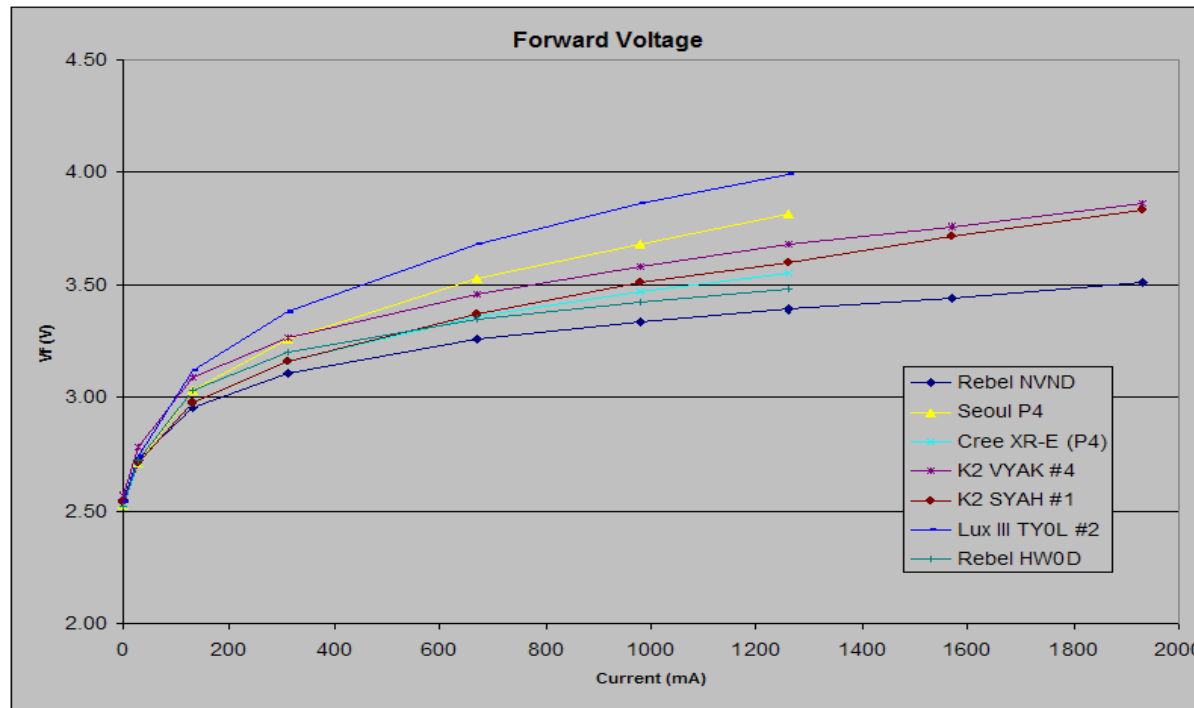
Źródło światła	Sprawność maksymalna lm/W	Sprawność w oprawie lm/W
Żarówka	17	10-17
Halogen	20	12-20
Metalohalogen	70	35-40
Świelówka	90	65-70
Dioda LED	100	65-75
Lampa sodowa wysokoprężna	140	55-65
Lampa sodowa niskoprężna	180	65-75

Sprawność diody LED - jakość

Dioda Rebel 100lm ma sprawność 90lm/W

Porównując 2 różne diody o tym samym strumieniu trzeba zwrócić uwagę na:

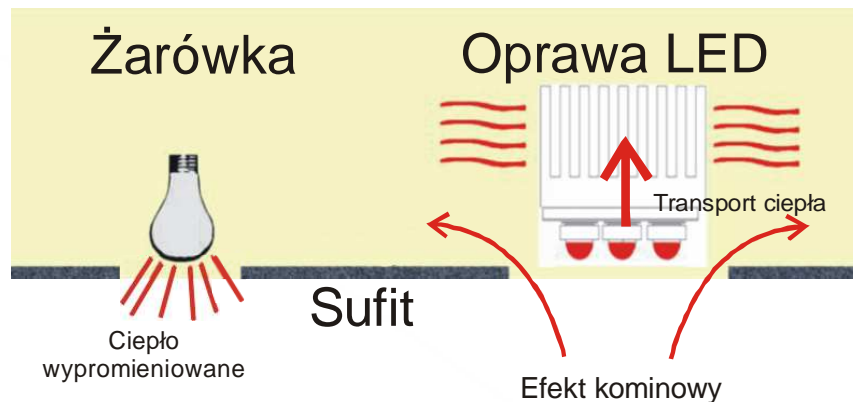
- prąd dla którego jest specyfikowany strumień świetlny (zazwyczaj 350mA)
- napięcie przewodzenia diody dla prądu specyfikowanego



Dla prądu 350mA
minimalne napięcie
2.8V ($\lambda=450\text{nm}$)

Źródło: <http://www.candlepowerforums.com/vb/showthread.php?t=169547>

Sprawność diody LED - temperatura



Źródło światła	Sprawność % (lm/W)	Dystrybucja ciepła %	
		Promieniowanie	Konwekcja + Przewodzenie
Żarówka*	8 (14lm/W)	81 (73%IR)	19
Świetlówka*	21 (100lm/W)	58 (37%IR)	42
LED biała	14 (100lm/W)	14	86
LED czerwona	25 (40lm/W)	25	75

* IESNA Lighting Handbook – 9th Ed

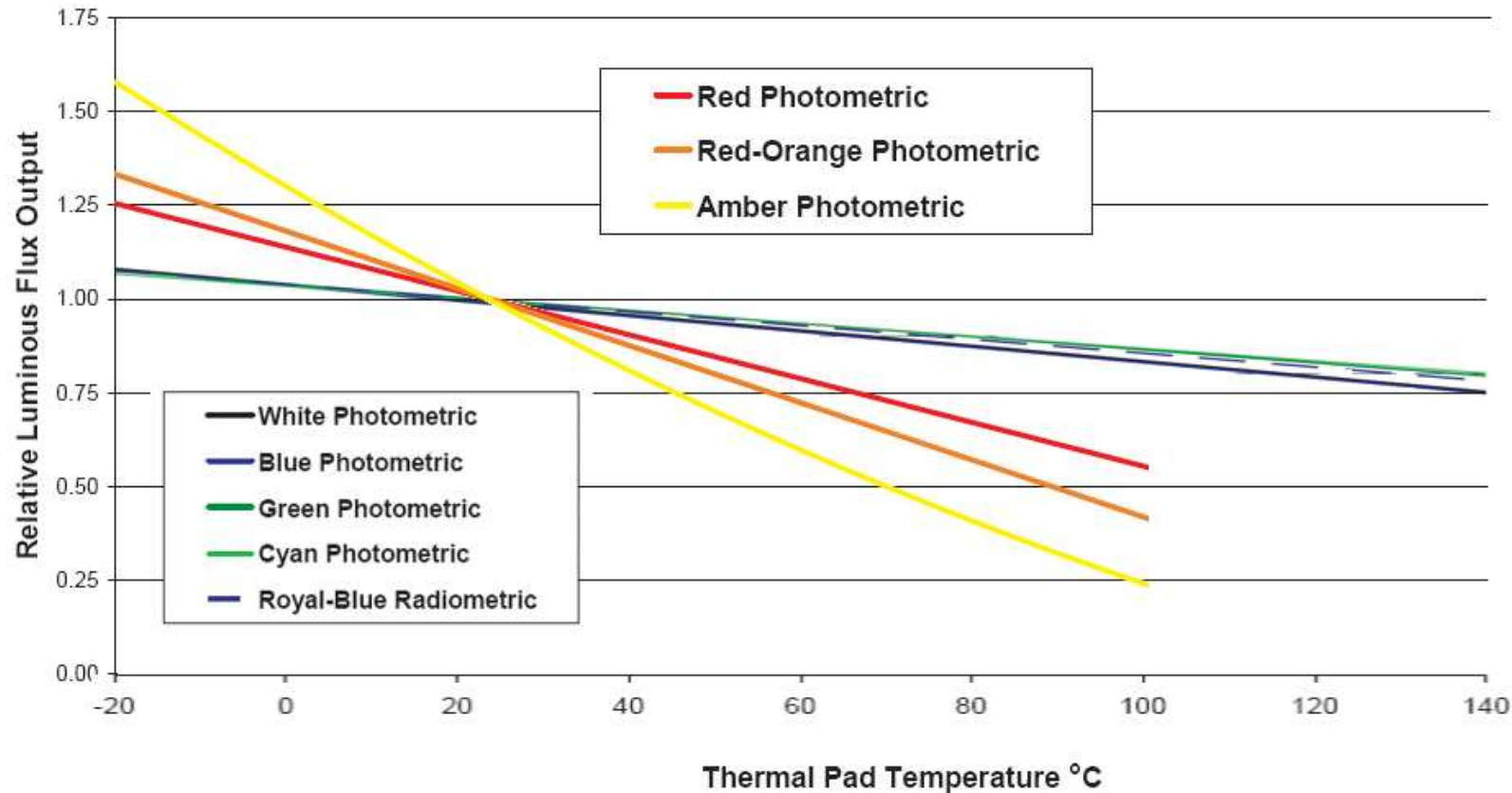
Z każdej diody białej zasilanej prądem 350mA trzeba odprowadzić do radiatorów 0,95W energii cieplnej.

Sprawność diody LED - temperatura

Rezystancja termiczna złącze – pad termiczny:

- InGaN Rebel - 10 K/W
- AlInGaP Rebel – 12 K/W

Obliczając przyrost temperatury należy uwzględnić, że część mocy jest przekształcana w światło.



Sprawność świetlówki - temperatura

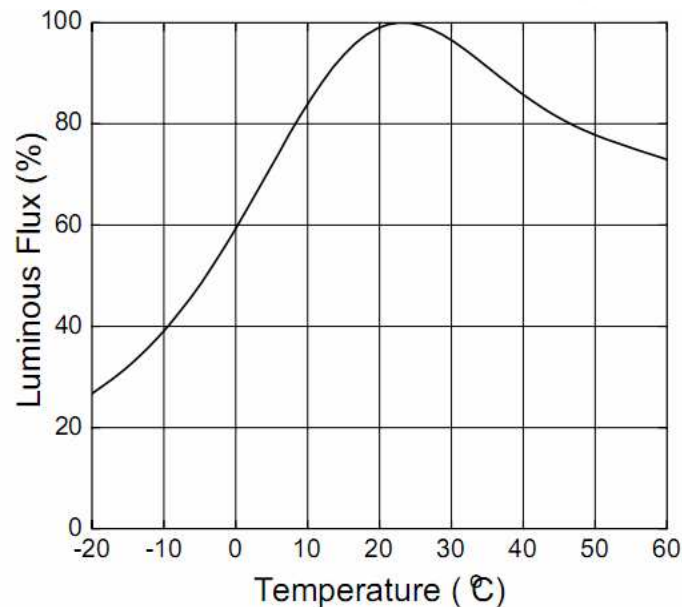
Świetlówki są optymalizowane do pracy w temperaturze pokojowej.

Dla temperatury -20°C strumień świetlny wynosi:

Dioda LED – 110%

Świetlówka – 30%

W zastosowaniach zewnętrznych w niskich temperaturach dioda LED bije na głowę świetlówkę.



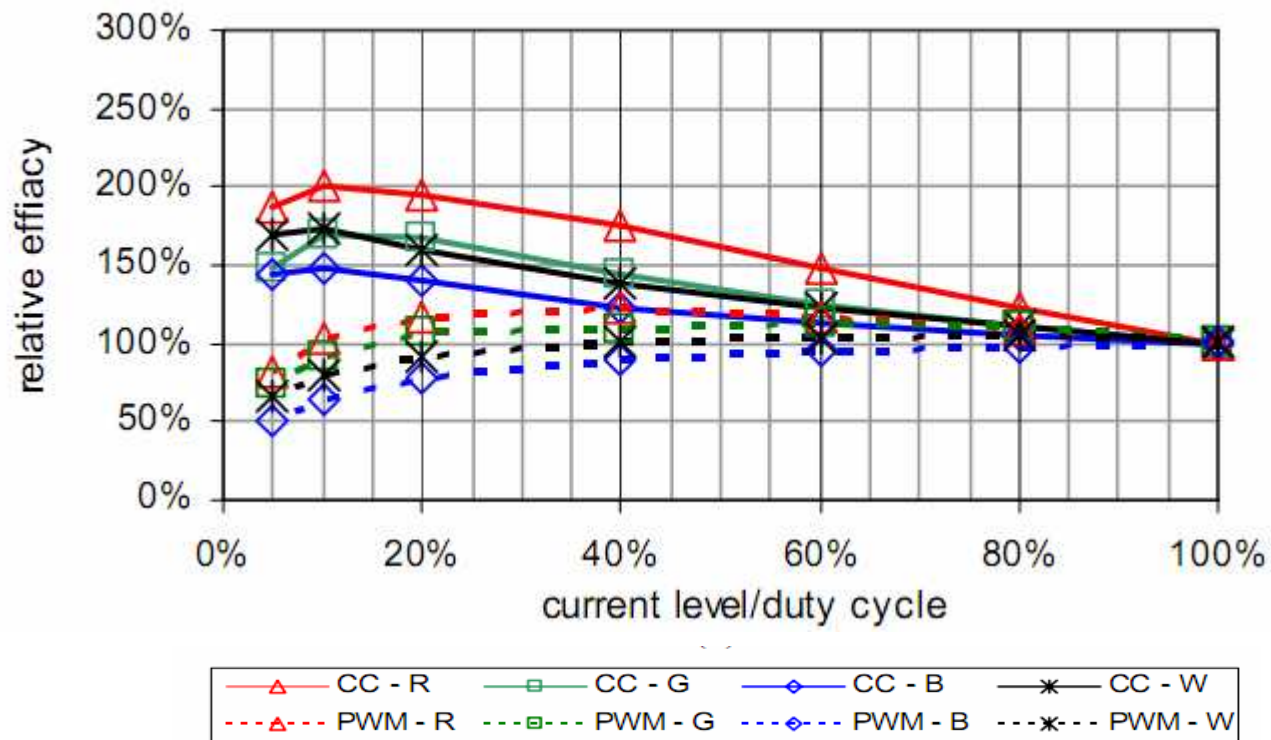
Sprawność diody LED – prąd zasilania

Maksymalna wydajność diody mocy ok. 35mA

Praca przy tak niskich prądach jest nieuzasadnialna ekonomicznie

Diody małej mocy 20mA mają sprawność ok. **20lm/W**

Diody mocy dla prądu 35mA mogą osiągnąć sprawność powyżej **150lm/W**



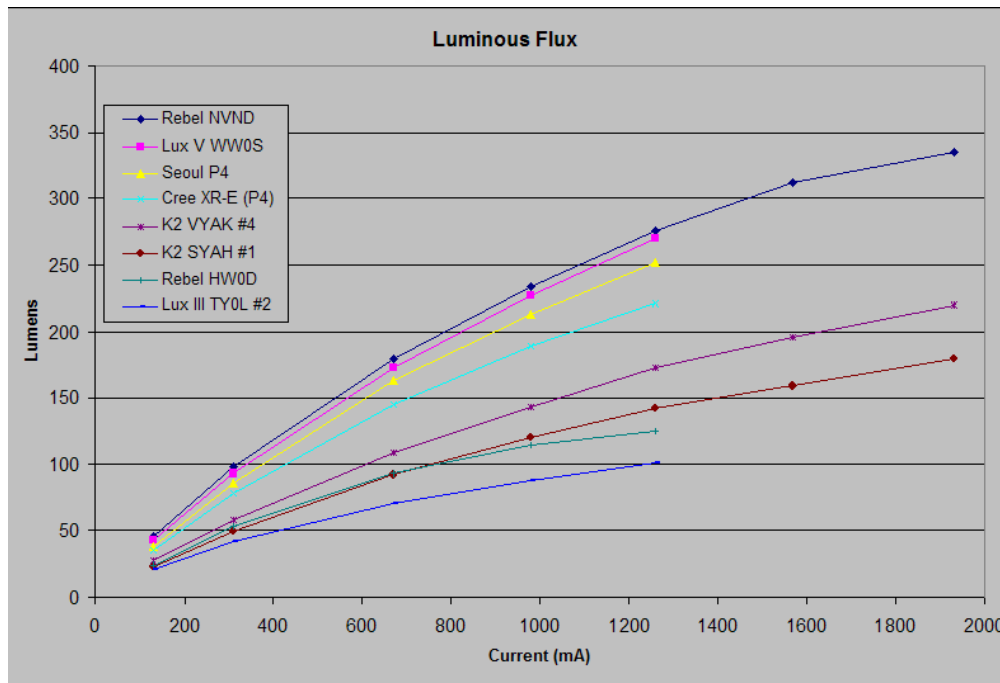
100% = 350mA

Źródło: **Spectral and luminous efficacy change of high-power LEDs under different dimming method.** Yimin Gu, Nadarajah Narendran, Tianming Dong Huiyung Wu

Sprawność diody LED – prąd zasilania

Obecnie jednym z największych wyzwań producentów LED jest stworzenie diody, która miałaby taką samą wydajność w szerokim zakresie prądów zasilania

Usprawnienia wydajności LED przy dużych prądach przewodzenia



UWAGA Diody Rebel nie mogą być sterowane prądem 2A

Źródło: <http://www.candlepowerforums.com/vb/showthread.php?t=169547>

Sprawność diody LED temperatura barwowa

Temperatura barwowa – barwa światła jaką wysyłałoby ciało doskonale czarne rozgrzane do tej temperatury.



Temperatura barwowa zastosowanie

6500 K zastępuje światło dzienne, stosujemy w miejscu pracy

4000 - 5000 K stosujemy do oświetlania miejsca pracy i nauki.

3000 - 4000 K stosujemy do oświetlania miejsca pracy, kuchni,
łazienek

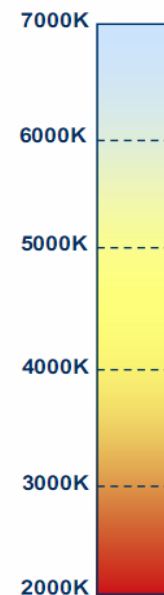
2700 K - stosujemy do oświetlania miejsca odpoczynku , sypialni.

Światło słoneczne 4000-6500K

Światło halogenowe 3100K

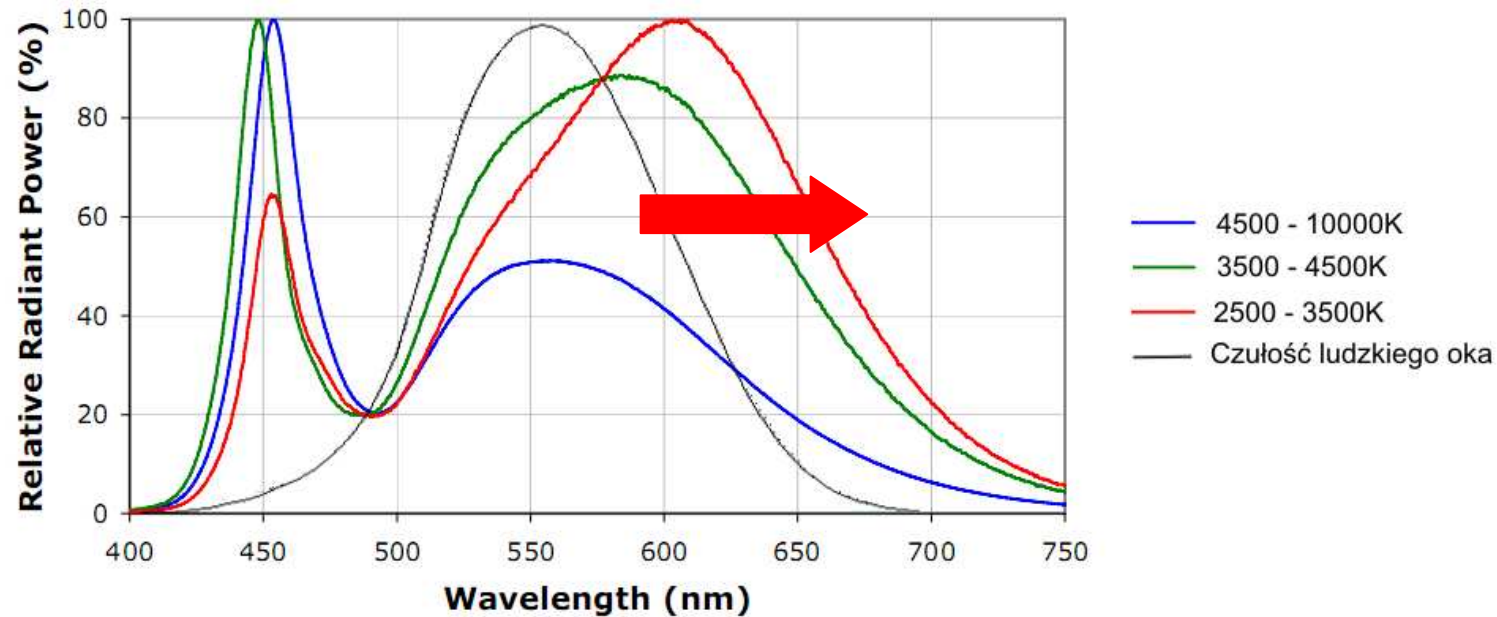
Żarówka 2700K

Śweczka 2000K



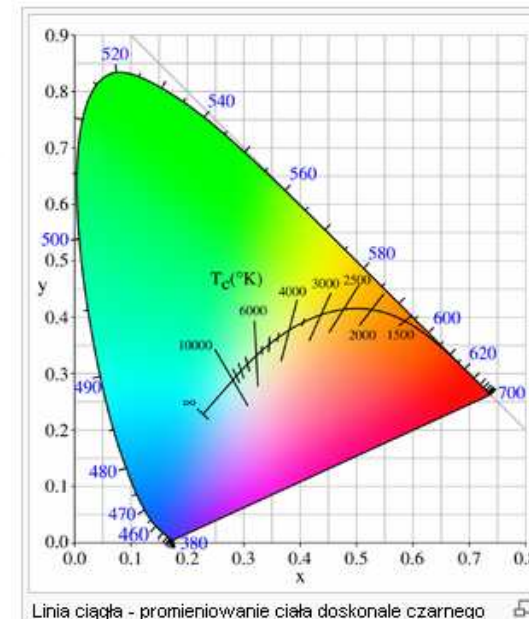
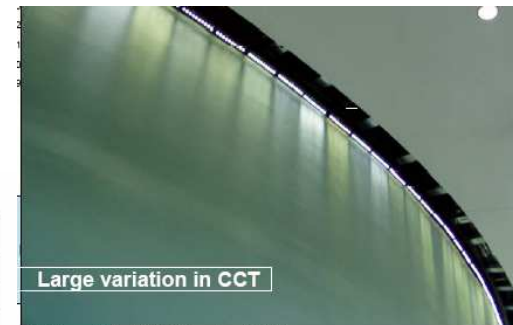
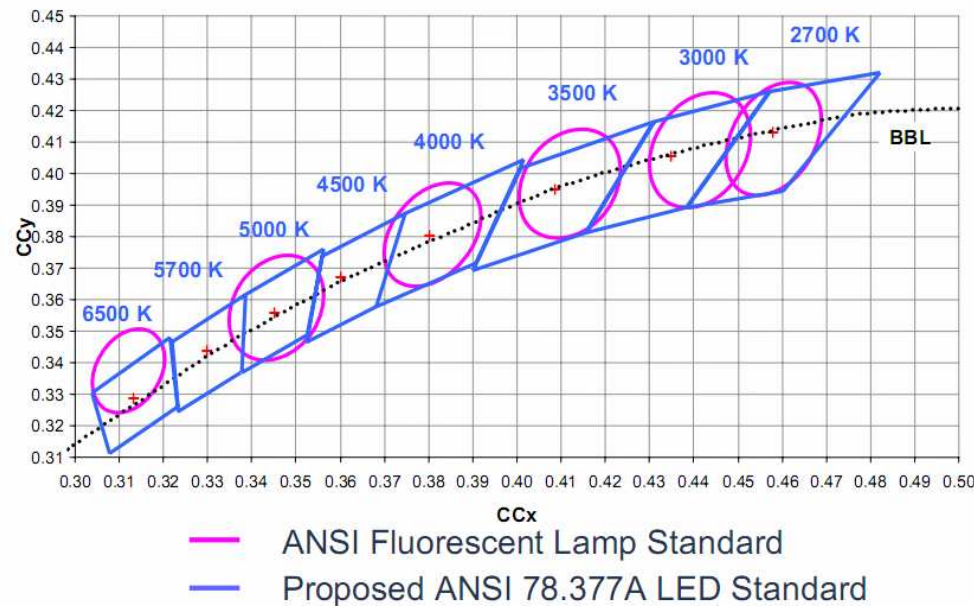
Sprawność diody LED temperatura barwowa

Wraz z obniżaniem się temperatury barwowej widmo promieniowania diody odsuwa się od zakresu maksymalnej czułości ludzkiego oka.



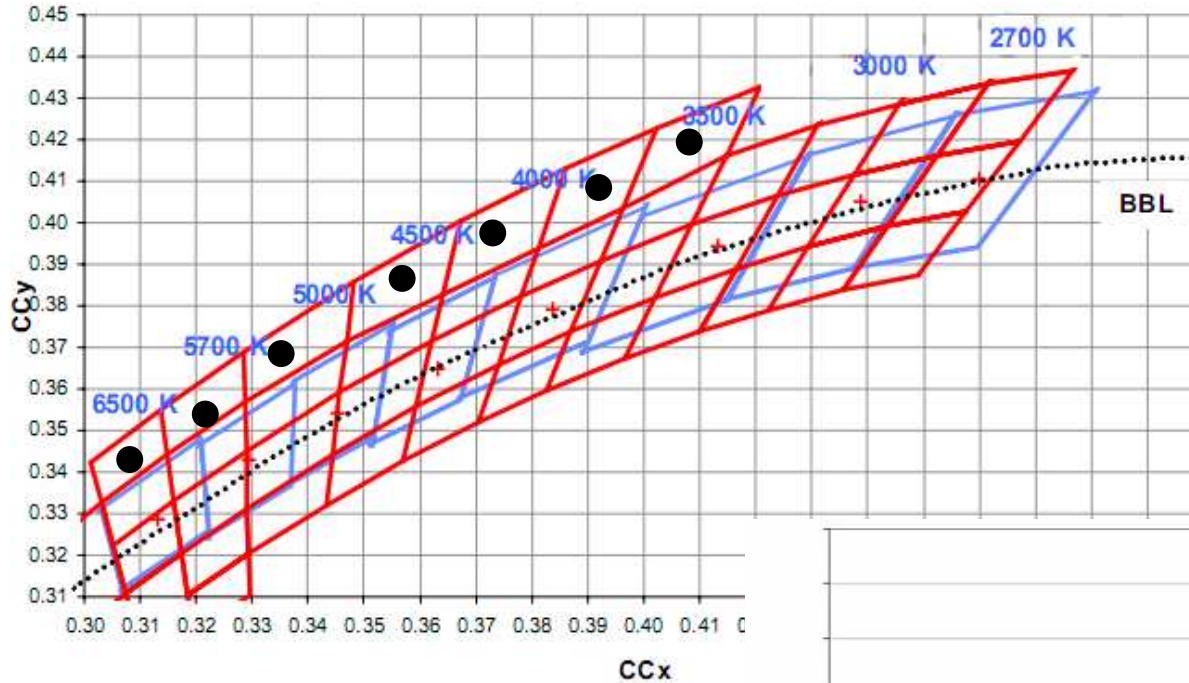
Temperatura barwowa wymagania Energy Star

Tylko światło o współrzędnych chromatycznych zbliżonych do krzywej ciała doskonale czarnego jest białe.
Im dalej od krzywej tym światło staje się bardziej różowawe lub zielonkawe



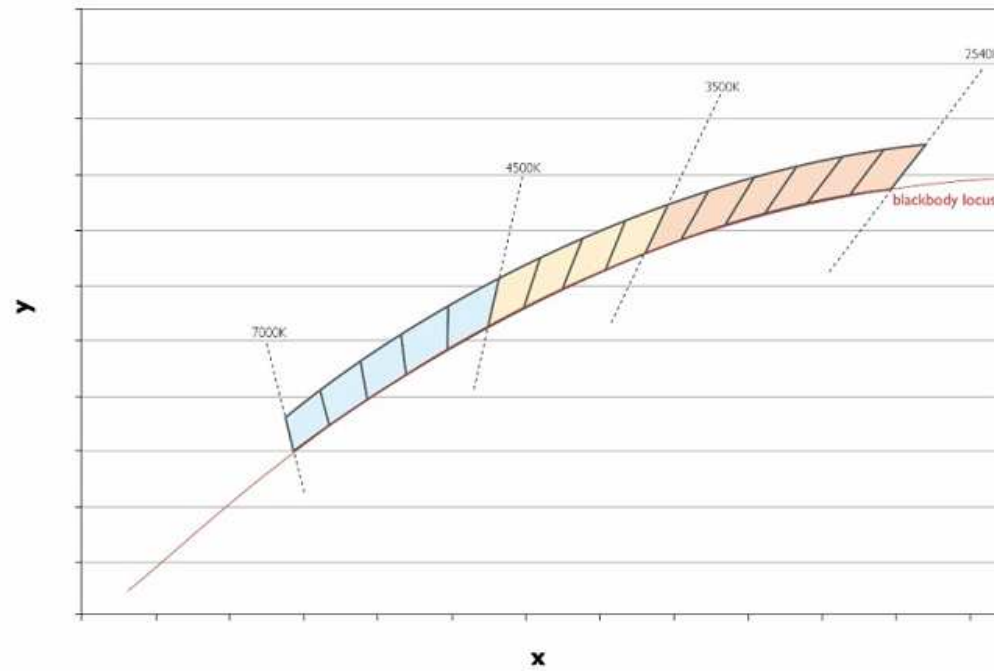
Biny diod Rebel a wymagnia Energy Star

Obecnie



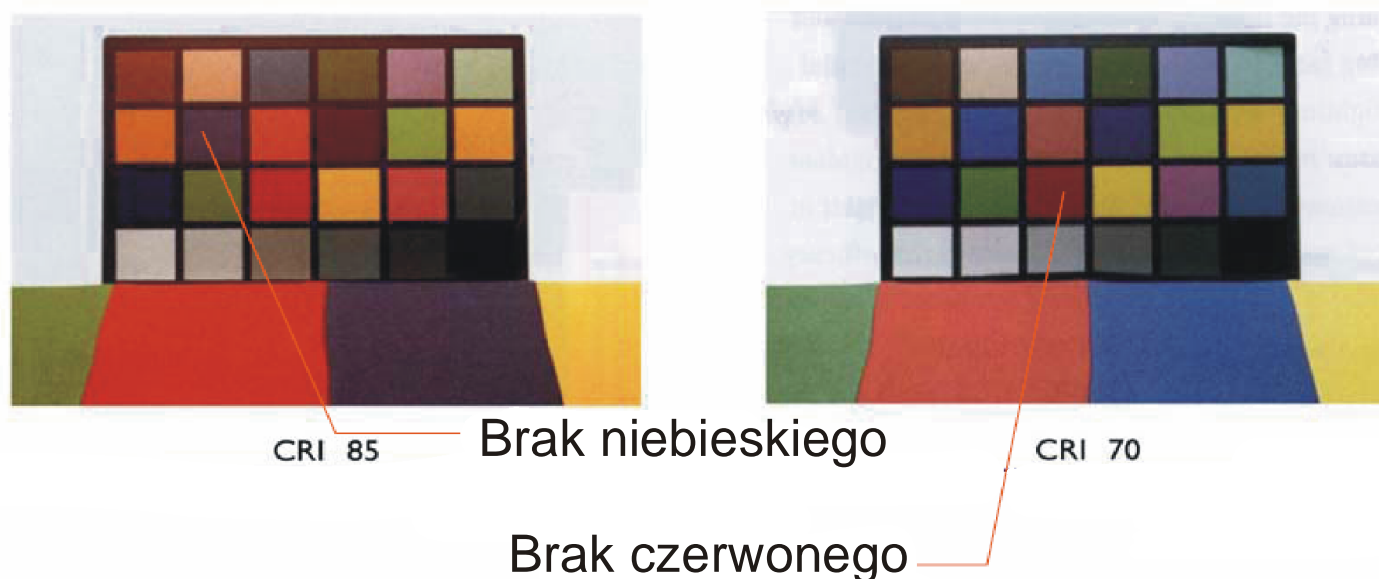
Biny oznaczone
kropką zostaną
wyeliminowane jako
pierwsze

Przyszłość



Współczynnik oddawania barw sprawność

Współczynnik oddawania barw (CRI , Ra) jest zdolnością źródła światła do wiernego odwzorowywania barw



Według normy PN-EN 12464-1

- biura, szkoły, biblioteki, apteki Ra > 80
- gabinety stomatologiczne, fryzjerskie Ra > 90
- magazyny Ra > 60

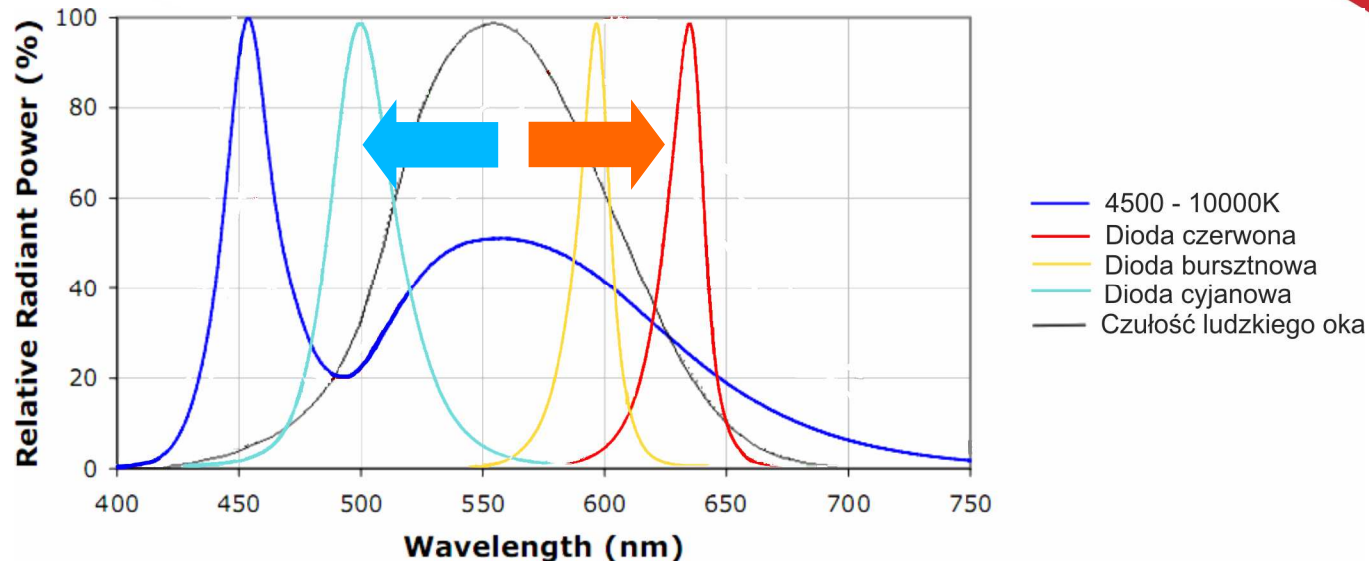
Współczynnik oddawania barw sprawność

Przykładowe współczynniki oddawania barw różnych źródeł światła.

Źródło światła	Współczynnik oddawania barw
Żarówka	100
Halogen	100
Lampa sodowa wysokoprężna	25
Lampa sodowa niskoprężna	5
Świelówka zimna	73
Świelówka ciepła	89
REBEL zimny	70
REBEL naturalny	75
REBEL ciepły	85

Współczynnik oddawania barw sprawność

Sposób zwiększenia współczynnika oddawania barw diody zimnej



Ra=100 całe widmo pokryte równomiernie η_{\max} 200lm/W (sprawność diody100%)
Ra=70 widmo diody zimnej η_{\max} 640lm/W (sprawność diody100%)
Ra=90 R=615nm G=540nm B=460nm* η_{\max} 380lm/W (sprawność diod 100%) **
Realna maksymalna sprawność diod 40%

Straty na mieszaniu kolorów przez dodatkową optykę 15-30%

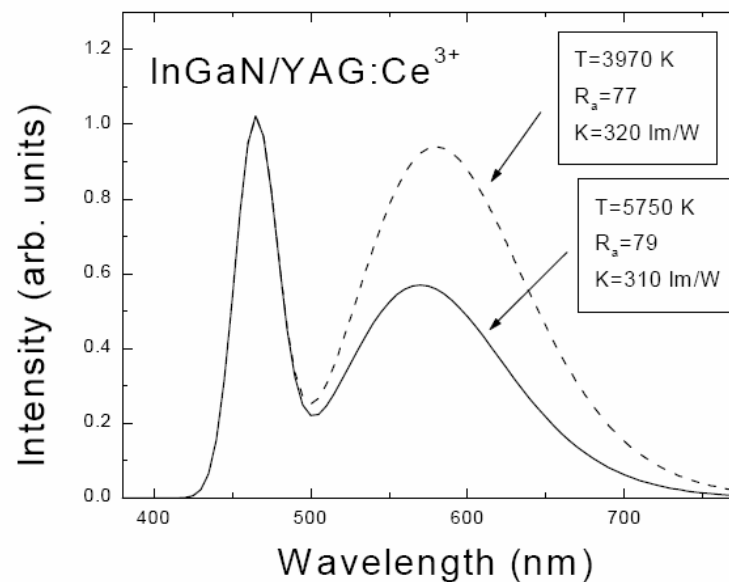
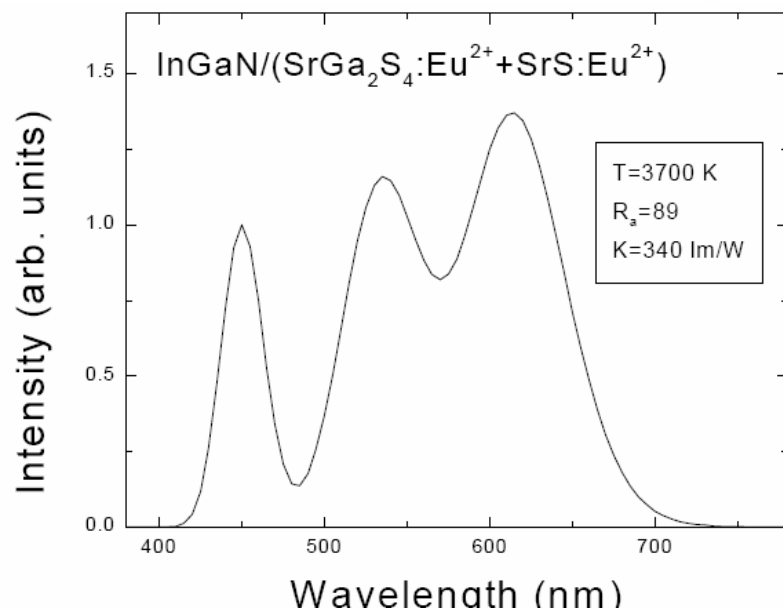
*Źródło LightingYour path to the future. M. George Craford, Philips Lumileds

Współczynnik oddawania barw sprawność

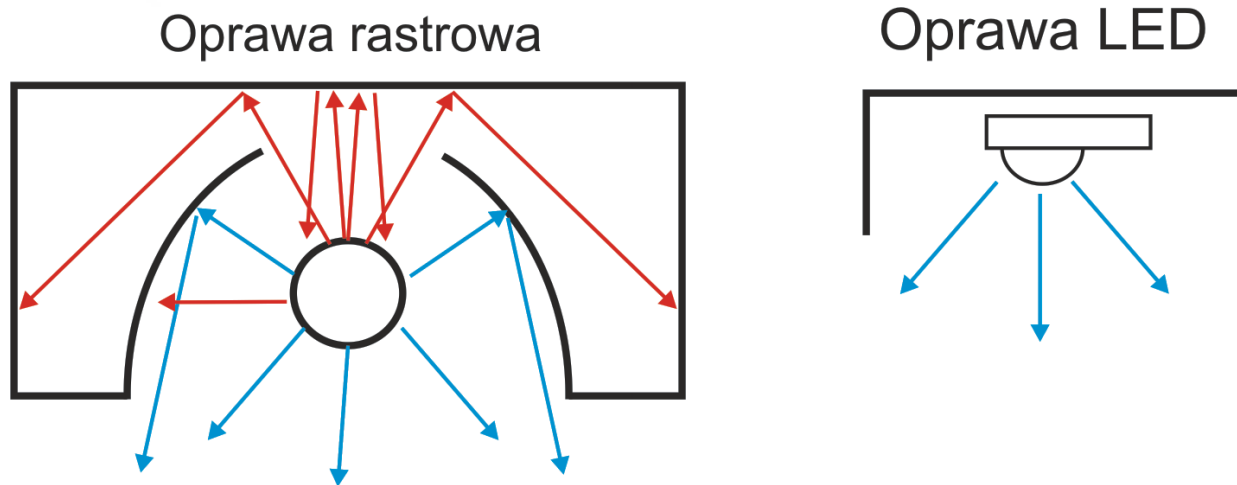
Nie zawsze niska temperatura barwowa
oznacza wysokie Ra i na odwrót.

Linia ciągła emisja luminoforu 570 nm

Linia przerywana emisja luminoforu 580nm

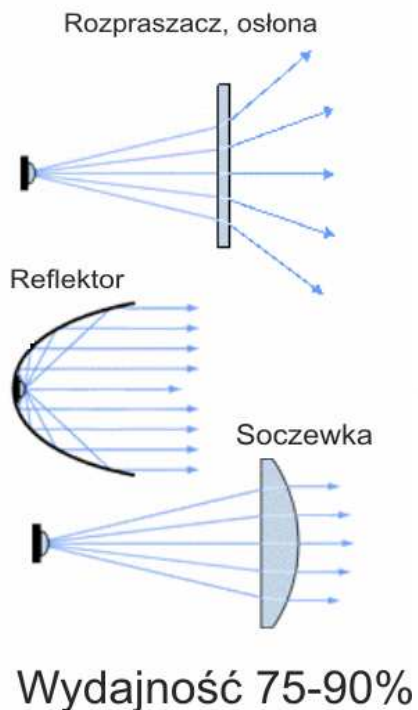


Źródło: **Solid State Lighting** Arturas Zukauskas, Michael Shur Remis Gaska



Na czerwono zaznaczone promienie pochłonięte przez oprawę

Tradycyjne źródła światła emitują promieniowanie w każdym kierunku co powoduje że trzeba stosować dodatkową optykę w oprawach.



Wydajności soczewek
jednego z producentów

Description	White	
	FWHM*	EFF
Plain medium Flat front	18.4	85%
Plain medium Lens front	18.6	83%
Frosted medium	21.8	84%
Frosted Wide	39.2	78%
Elliptical	46X19	80%

Każde przejście promieni z jednego ośrodka do drugiego = **STRATY**

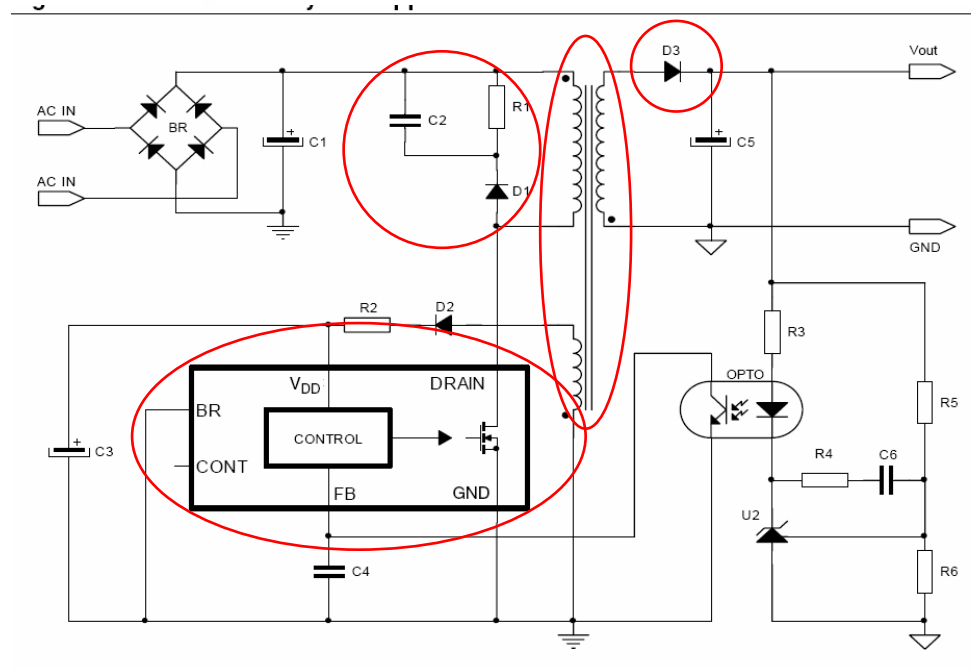
O ile to możliwe nie stosować soczewek oraz osłon jednocześnie

Na osłony wybierać materiały o jak najmniejszym współczynniku pochłaniania i załamania.

Sprawność - zasilacz 230VAC

Zasilacze sieciowe najczęściej występują jako zasilacze typu Flyback.

Zasilacze z transformatorem sieciowym są obecnie rzadko stosowane ze względu na niską sprawność - poniżej 50%.



Viper 27 – zasilacz typu flyback - na czerwono zaznaczone miejsca największych strat
Zasilacze impulsowe sieciowe o mocy kilku watów najczęściej mają sprawność 70-80%

Największą sprawność uzyskujemy gdy:

- Zmniejszamy częstotliwość pracy
- Zwiększamy napięcie wyjściowe
- Zmniejszamy prąd wyjściowy
- Stosujemy transformator o jak najmniejszej indukcyjności pasożytniczej
- Zasilamy sterownik z uzwojenia pomocniczego zamiast bezpośredniego z wysokiego napięcia
- Stosujemy konstrukcję nieizolowaną

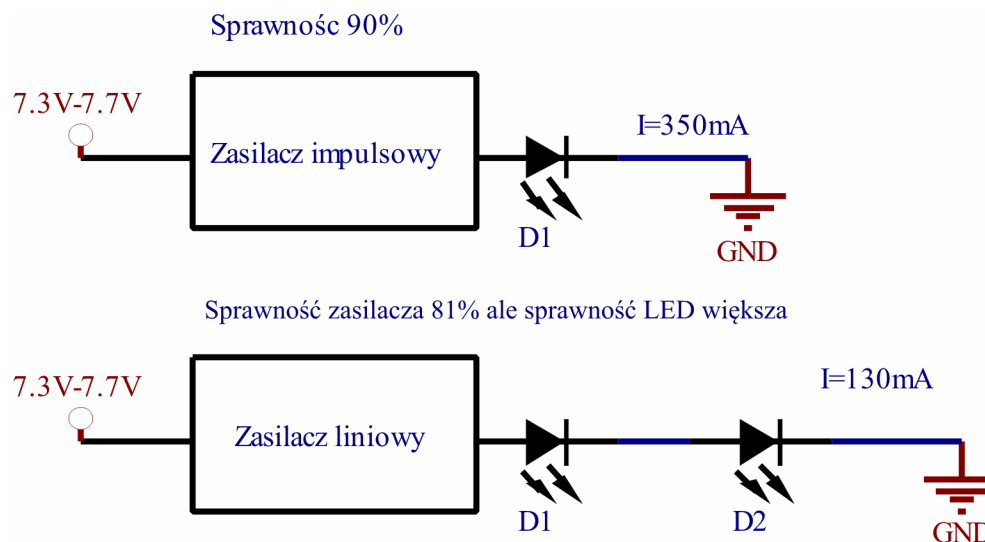
W przypadku konstrukcji nieizolowanej nie ma możliwości zasilania sterownika z uzwojenia pomocniczego, dlatego należy wybrać driver o jak najmniejszym poborze mocy.

Są zasilacze osiągające sprawność nawet **92%** - ale dla:

- $I_{WY}=20\text{mA}$
- $U_{WY}=70\text{V}$
- konstrukcja nieizolowana

Zasilacz niskonapięciowy liniowy

Zasilacz liniowy nie nadaje się, gdy jest duża różnica napięć między wyjściem a wejściem



Zasilacz liniowy + dodatkowa dioda.

Zasilacz niskonapięciowy impulsowy

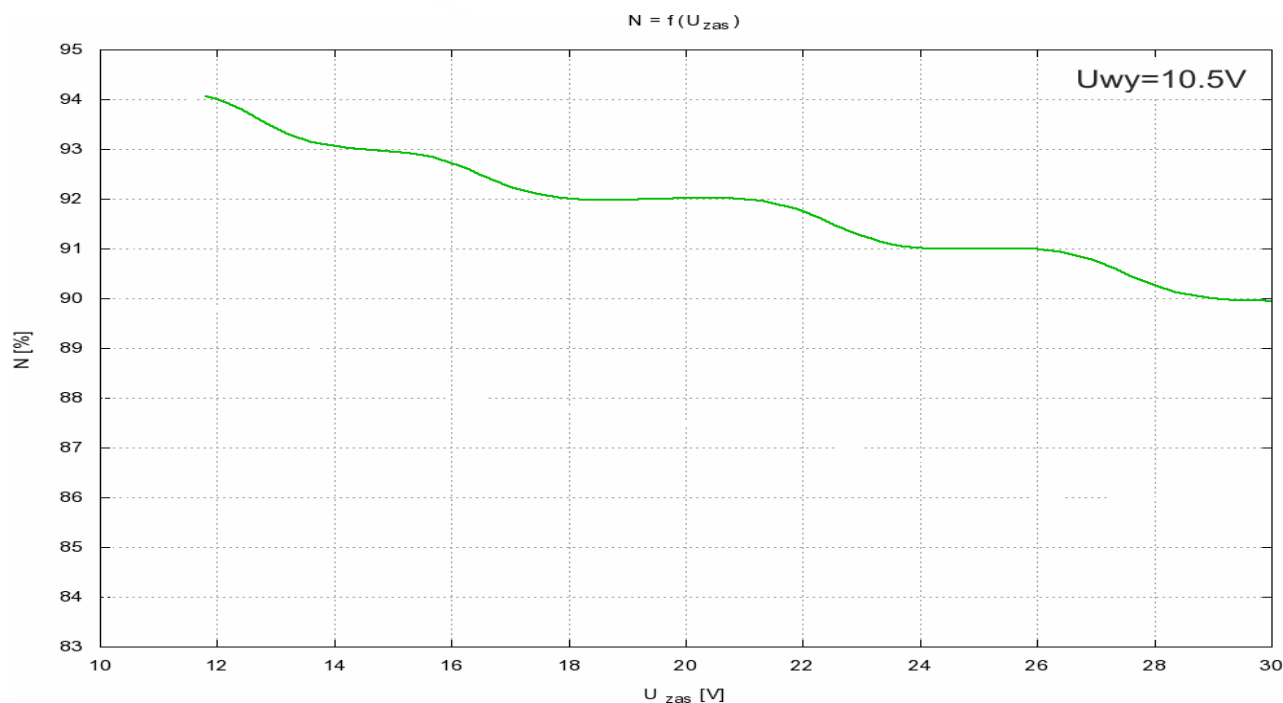
Poniższe sprawności odnoszą się jedynie do samych przetwornic, nie uwzględniają układów prostownika, zabezpieczeń np. przed odwrotną polaryzacją itp. Realna sprawność może być o kilka procent niższa

Topologia	Sprawność max	Wady	Zalety	Uwe w stosunku do Uwy
Buck converter	98%	Nie nadaje się gdy napięcie wyjściowe jest mniejsze niż wejściowe	Najsprawniejsza konstrukcja, nie wymaga kondensatora wyjściowego przez co nadaje się do ściemniania PWM	Większe
Boost converter	95%	Brak kontroli prądu gdy napięcie wejściowe większe niż wyjściowe	Bardzo dobre PFC	Mniejsze
Buck-boost converter	90%	Napięcie wyjściowe odwrócone w stosunku do wejściowego	Prosta konstrukcja	Dowolne
SEPIC converter	85%	Skomplikowana konstrukcja, wymagana specjalna cewka	Prawie każdy sterownik Buck z regulacją od strony masy może pracować w topologii SEPIC	Dowolne
CUK converter	85%	Skomplikowana konstrukcja, Uwy odwrócone w stosunku do Uwe	Nie wymaga kondensatora wyjściowego przez co nadaje się do ściemniania PWM	Dowolne

Zasilacz niskonapięciowy impulsowy


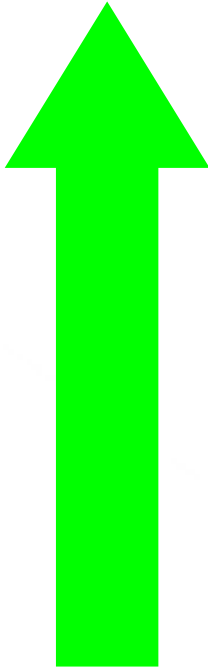




Sprawność zależy głównie od:

- Częstotliwości pracy
- Różnicy napięć między wejściem a wyjściem
- Spadku napięcia na czujniku prądu
- Jakości sterownika i pozostałych elementów



Sprawność przetwornicy impulsowej typu Buck Converter

Podsumowanie

Prąd		Sprawność 
Temperatura złącza		
Temperatura barwowa		
Współczynnik oddawania barw		
Różnica napięć między napięciem zasilania a LED		
Optyka, osłony	BRAK	

Podsumowanie

Zakładając że stworzymy oprawę (żarówkę) której:

- Sprawność zasilacza 90%
- Sprawność optyki 90%
- Temperaturę pracy złącza odpowiadającą sprawności 90 %

oraz korzystając ze wzoru

$$\eta_{\text{oprawyLED}} = \frac{m \cdot \Phi \cdot k \cdot \eta_{\text{optyki}} \cdot \eta_{\text{oslony}}}{(1 + \eta_{\text{zasilacza}}) \cdot m \cdot P_{\text{LED}}}$$

Dioda LUXEON REBEL	Max sprawność w oprawie
6500K LXML-PWC1-0100	65lm/W
4100K LXML-PWN1-0080	52 lm/W
3100K LXML-PWW1-0060	39lm/W

W oparciu o diody 6500K i 4100K można stworzyć żarówkę, która będzie spełniała wymogi UE, ale zastosowanie jej będzie bardzo ograniczone ze względu na mały Ra. Dioda ciepła mająca odpowiedni Ra do szerokiego zastosowania ma za małą wydajność, aby w oparciu o nią stworzyć żarówkę spełniającą wymagania UE.