



Politechnika Łódzka

Katedra Fizyki Molekularnej

Laboratorium z fotofizyki i fotochemii

Ćwiczenie FF 1

Elektroluminescencja złącz p-n

Opracowali:
Dr inż. Jarosław Jung
Dr inż. Marcin Kozanecki

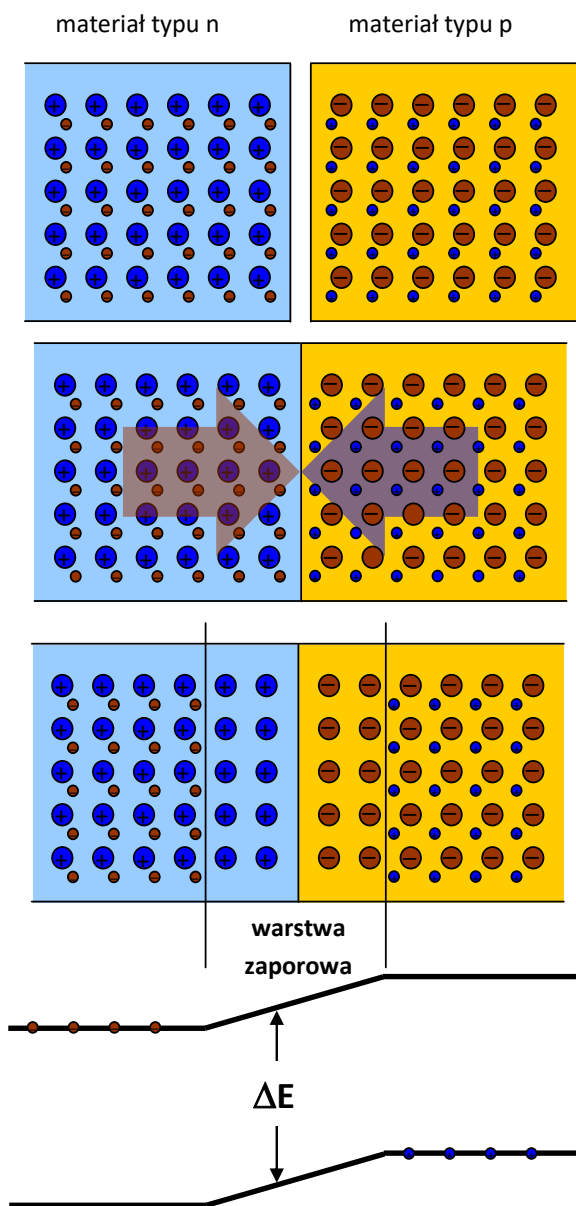
Łódź 2010

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawiska elektroluminescencji półprzewodnikowych złączy $p-n$ na podstawie badania zależności wydajności świetlnej od prądu przepływającego przez złącze oraz charakterystyk prądowo-napięciowych diod elektroluminescencyjnych emitujących światło o różnej barwie.

2. Wstęp

2.1. Budowa i zasada działania diody elektroluminescencyjnej.

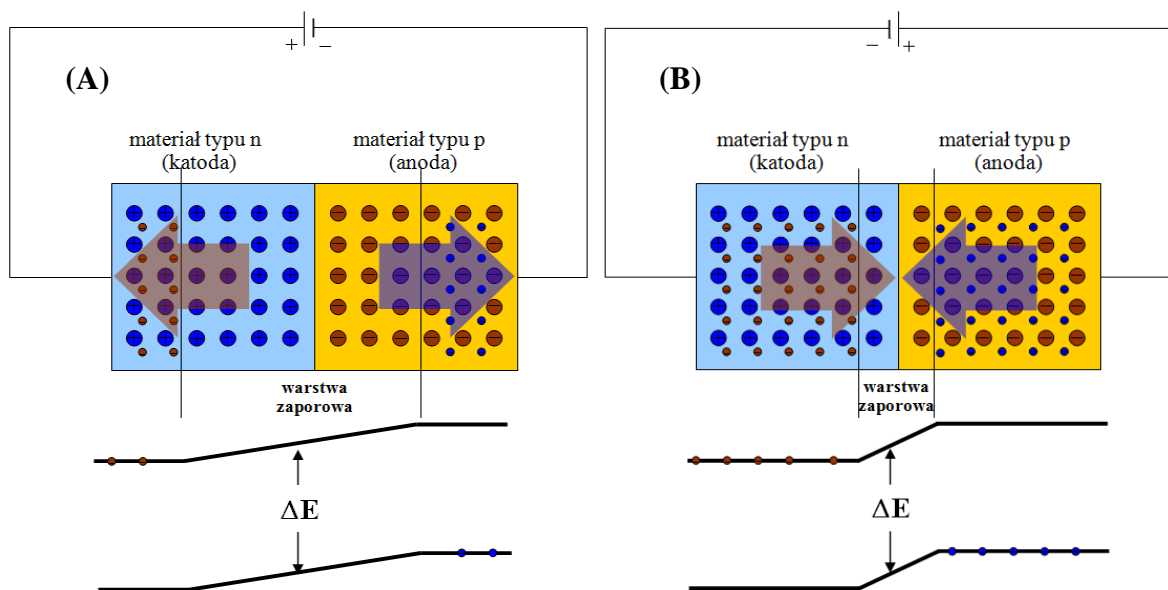


Rys.1. Schemat złącza $p-n$. Symbole oznaczają odpowiednio: ● - domieszkę donorową; ● - domieszkę akceptorową; ● - Elektron; ● - dziurę. Strzałkami zaznaczono kierunek samoistnej dyfuzji nośników

Diody elektroluminescencyjne (z ang. Light Emitting Diodes - LED) są półprzewodnikowymi urządzeniami mającymi zdolność emisji fal elektromagnetycznych w zakresie światła widzialnego, bliskiej podczerwieni lub bliskiego ultrafioletu. Podstawowym elementem ich budowy jest złącze $p-n$ (rys. 1) stanowiące układ dwóch połączonych półprzewodników, z których jeden jest typu n (katoda), drugi zaś typu p (anoda) – patrz rysunek 1. Przez granicę zetknięcia zarówno elektrony, jak i dziury mogą swobodnie dyfundować jedynie w kierunku odwrotnym do kierunku wzrostu ich koncentracji. Elektrony dyfundują zatem z obszaru n do obszaru p , natomiast dziury w przeciwnym kierunku. W obszarze złącza $p-n$ zostaje wytworzone pole elektryczne i związane z nim napięcie kontaktowe, które stanowi barierę potencjału przeciwdziałając dalszej dyfuzji

nośników prądu. Obszar złącza pozbawiony swobodnych dziur i elektronów nazywany jest warstwą zaporową.

Przyłożenie do złącza $p-n$ różnicy potencjałów prowadzi do poszerzenia lub zwężenia warstwy zaporowej w zależności od polaryzacji przyłożonego napięcia – patrz rys. 2. W przypadku spolaryzowania złącza w kierunku zaporowym szerokość bariery potencjału wzrośnie na skutek zsumowania się zgodnych pod względem kierunku: zewnętrznego pola elektrycznego oraz pola elektrycznego w warstwie zaporowej (rys. 2A).



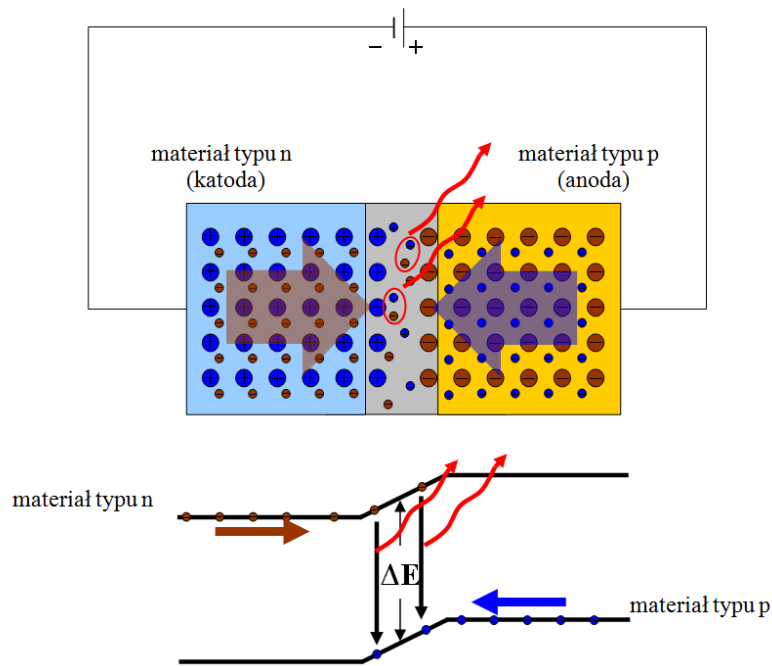
Rys.2. Złącza $p-n$ w zewnętrznym polu elektrycznym podłączone w kierunku: (A) - zaporowym; (B) – przewodzenia. Symbole oznaczają odpowiednio: ● - domieszkę donorową; ● - domieszkę akceptorową, ● - elektron; ● - dziurę. Strzałkami zaznaczono kierunek samoistnej przepływu nośników.

Polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia (rys. 2B) prowadzi do zmniejszenia się szerokości bariery potencjału ze względu na przeciwnie skierowane pola elektryczne. Sprzyja to przepływowi elektronów i dziur przez złącze, gdzie może następować ich rekombinacja z wydzieleniem kwantu promieniowania elektromagnetycznego (rekombinacja promienista), zjawisko takie nazywane jest elektroluminescencją. Energia wypromieniowanego fotonu jest bezpośrednio związana ze strukturą energetyczną materiałów użytych do budowy złącza $p-n$ i równa różnicy energii (ΔE) pomiędzy pasmem przewodnictwa materiału typu p oraz pasmem walencyjnym materiału typu n (rys. 3). Wynika z tego, że poprzez dobór materiału, z którego wykonane jest złącze $p-n$ możliwe jest uzyskanie urządzenia emitującego promieniowanie o różnej długości fali (λ), zgodnie ze wzorem Plancka:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} \quad (1)$$

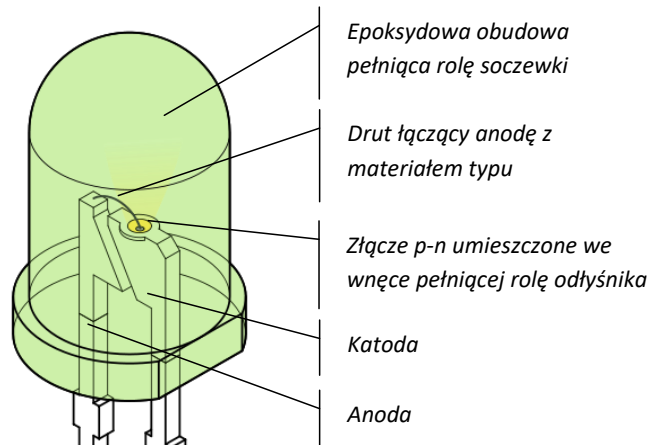
gdzie c - prędkość światła w próżni, zaś h stała Plancka.

Emisja w złączu p - n zachodzi na skutek promienistej rekombinacji migrujących przez obszary n i p , odpowiednio elektronów i dziur. Należy pamiętać jednak, że rekombinacja taka zachodzi z pewnym prawdopodobieństwem, co związane jest z możliwością wystąpienia konkurencyjnych przejść bezpromienistych (głównie konwersji wewnętrznej i/lub przejść międzysystemowych).



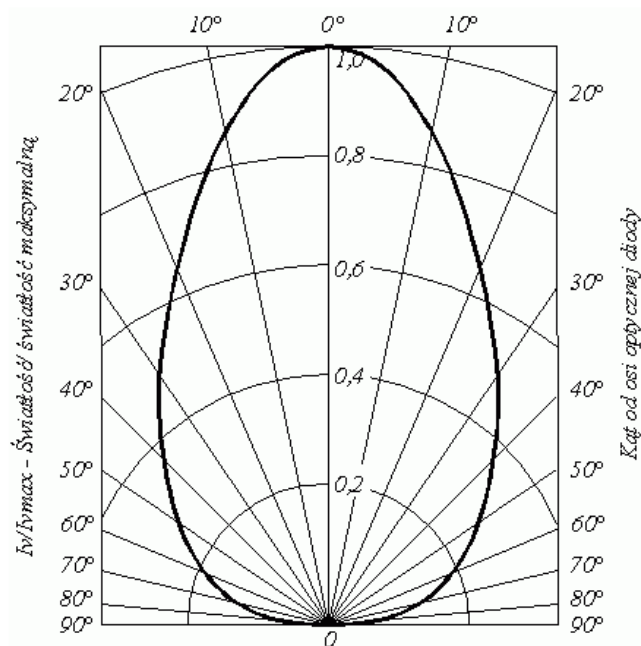
Rys.3. Zasada działania diody elektroluminescencyjnej. Strzałkami zaznaczono kierunek ruchu nośników. Czerwone, fioletowe strzałki ilustrują emisję fotonu. Na fioletowo zaznaczono obszar złączowy, w którym następuje rekombinacja nośników.

Podstawowym elementem diody LED jest złącze p - n umieszczone zazwyczaj na katodzie w specjalnej wnęcie spełniającej rolę odbłyśnika (rys. 4). Materiał typu p złącza p - n połączony jest z anodą cienkim drucikiem. Całość zatopiona jest w epoksydowej obudowie chroniącej złącze przed kontaktem z tlenem, bądź wilgocią, które powodowałyby błyskawiczną korozję złącza. Obecnie najbardziej popularne na rynku są diody cylindryczne o średnicach 3, 5, bądź 8 mm, w tym przypadku epoksydowa obudowa pełni również rolę soczewki, a często również odpowiedniego filtra pozwalającego modyfikować barwę światła emitowanego przez złącze. Produkowane są również diody cylindryczne, prostopadłościowe i inne.



Rys. 4. Budowa diody elektroluminescencyjnej. Rysunek zaczerpnięto ze strony internetowej: http://en.wikipedia.org/wiki/File:LED_Labelled.svg

Zastosowanie sferycznie ukształtowanych odbłyśników pozwala na zwiększenie natężenia emitowanego przez diodę światła, pociąga jednak za sobą ograniczenie kąta świecenia (dla wielu diod elektroluminescencyjnych kąt ten wynosi jedynie około 60° - rys. 5). Oznacza to bardzo nierównomierny rozkład natężenia światła na oświetlanych powierzchniach. Stosowanie „mlecznych” obudów jedynie częściowo rozwiązuje wspomniany problem. W przypadku diod, w których obudowa jest jednocześnie barwnym filtrem, problem ten ma niebagatelne znaczenie, gdyż oprócz niejednorodnego rozkładu strumienia świetlnego w przestrzeni można oczekiwać również różnic w charakterystyce spektralnej promieni emitowanych pod różnymi kątami.



Rys. 5. Przykładowy rozkład kątowy światłości diody LED.

Możliwe jest również zamknięcie w jednej obudowie więcej niż jednego złącza, co umożliwia emisję różnych barw światła z jednego urządzenia. Typowym przykładem są tzw. diody RGB – będące kombinacją złączy emitujących światło czerwone, zielone i niebieskie. W efekcie otrzymujemy źródło światła odbieranego przez ludzkie oko, jako światło białe. W takich rozwiązaniach złącza emitują światło jednocześnie. Innym przykładem diod wielozłączowych są urządzenia emitujące alternatywnie światło o dwóch różnych długościach fali – np. diody bipolarne lub diody ze złączami posiadającymi wspólną elektrodę (najczęściej katodę).

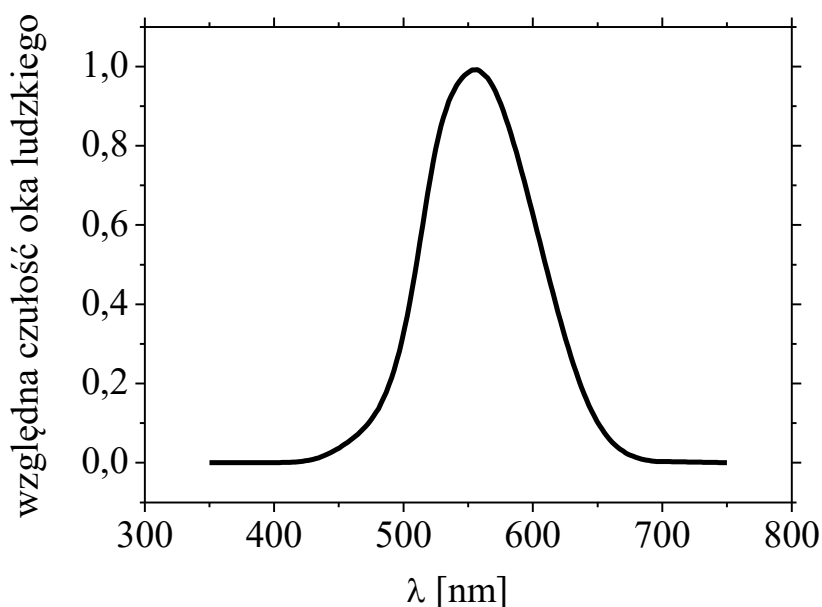
2.2. Wielkości fotometryczne opisujące diody LED.

Czułość ludzkiego oka (przyjmuje się, że oko ludzkie aktywne jest w zakresie od 380 do 760 nm) bardzo silnie zależy od długości fali promieniowania oraz natężenia światła, w związku z czym proste wielkości radiometryczne są słabo przydatne do oceny efektów działania danego promieniowania z zakresu fal widzialnych przez ludzkie oko. Działem optyki, który zajmuje się pomiarem światła w odniesieniu do wrażenia, jakie wywołuje na ludzkie oko jest fotometria.

Podstawową wielkością fotometrii, charakteryzującą źródło promieniowania, jest strumień świetlny (ϕ_v) – ilość energii przenoszonej przez falę elektromagnetyczną przez dowolną powierzchnię w jednostce czasu. Jednostką strumienia świetlnego jest lumen [1 lm = 1 cd·1 sr]. Strumień świetlny wyrażony jest wzorem:

$$\phi_v = K_m \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} W(\lambda) \chi(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

gdzie: stały współczynnik $K_m = 683 \text{ lm/W}$ (tzw. fotometryczny równoważnik promieniowania) pochodzi z „fotometrycznej” definicji kandeli definiującej ją jako światłość, jaką ma w określonym kierunku źródło emitujące promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości $5,4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ i którego energetyczne natężenie promieniowania w tym kierunku wynosi $1/683 \text{ W/sr}$, $W(\lambda)$ moc promieniowania wyrażona w watach, $\chi(\lambda)$ jest współczynnikiem uwzględniającym średnią czułość ludzkiego oka w funkcji długości fali promieniowania (patrz rysunek 6). Przyjmuje się, że dla światła o długości 555 nm jednemu lumenowi odpowiada promieniowanie o mocy 0,00147 W.



Rys. 6. Widmo względnej czułości oka ludzkiego widzącego w jasności (fotopowo).

Kolejną podstawową wielkością charakteryzującą źródło promieniowania jest światłość (natężenie źródła światła) I_v zdefiniowana jako stosunek strumienia świetlnego (ϕ) (wyrażonego w lumenach) do kąta bryłowego (Ω). Jednostką światłości jest kandela (cd), przy czym 1 cd to światłość ciała doskonale czarnego o powierzchni $1/6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ w temperaturze krzepnięcia platyny pod normalnym ciśnieniem. Należy pamiętać jednak, że pomiary radiometryczne są mam w stanie dostarczyć jedynie wartości natężenia promieniowania (I) wyrażonego w W/sr, bez uwzględniania czułości ludzkiego oka. Na użytek fotometrii warto znać zatem zależność pomiędzy światłością źródła a natężeniem promieniowania:

$$I_v(\lambda) = K_m \chi(\lambda) I(\lambda) \quad (3)$$

Ważnymi parametrami charakteryzującymi źródła światła są emitancja świetlna (M) i luminancja (L) zdefiniowane odpowiednio jako strumień świetlny wypromieniowywany przez dany element powierzchni (dS) oraz jako natężenie promieniowania w danym kierunku przez dany element powierzchni:

$$M = \frac{d\phi_v}{dS} \quad (4)$$

$$L = \frac{dI_v}{dS \cos \theta} \quad (5)$$

gdzie θ jest to kąt zawarty pomiędzy wybranym kierunkiem, a normalną do powierzchni ds . Jednostką emitancji w fotometrii jest lm m^{-2} , zaś luminancji nit [$1 \text{ nt} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ m}^{-2}$].

Parametrami opisującymi źródła emitujące światło o różnych długościach fali (λ) są również pojęcia gęstości monochromatycznych: strumienia energetycznego (ϕ_λ), natężenia promieniowania (I_λ), emitancji (M_λ) i luminancji (L_λ), zdefiniowane następująco:

$$\phi_\lambda = \frac{d\phi_v}{d\lambda} \quad (6)$$

$$I_\lambda = \frac{dI_v}{d\lambda} \quad (7)$$

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} \quad (8)$$

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad (9)$$

Bardzo istotnym pojęciem w fotometrii jest natężenie oświetlenia E_v zdefiniowane jako stosunek strumienia świetlnego do wielkości oświetlanej powierzchni (ΔS):

$$E_v(\lambda) = \frac{\phi_v(\lambda)}{\Delta S} \quad (10)$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks [$1\text{lx} = 1\text{lm} \cdot 1\text{ m}^{-2}$].

Natężenie oświetlenia jest jedyną wielkością światła, która nie charakteryzuje samego źródła światła, lecz jasność oświetlenia powierzchni.

2.3. Własności elektryczne diod LED

Podobnie, jak w przypadku innych typów diod, właściwości elektryczne LED-ów przedstawiane są za pomocą charakterystyk prądowo-napięciowych opisujących zależność prądu płynącego przez złącze (I_D) od przyłożonego napięcia (U_D). Opisana jest ona równaniem:

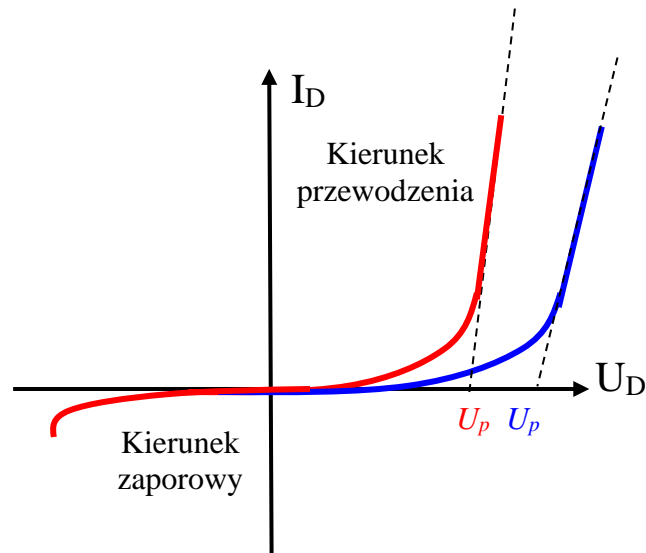
$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

gdzie I_0 - prąd zaporowy, e - ładunek elementarny, k – stała Boltzmanna, T – temperatura złącza w skali Kelwina, n – współczynnik mieszczący się w granicach od 1 do 2 (zależnie od konstrukcji i domieszkowania diody).

Równanie to słuszne jest dla obu polaryzacji złącza p - n , a jego typowy wykres przedstawia rys. 7.

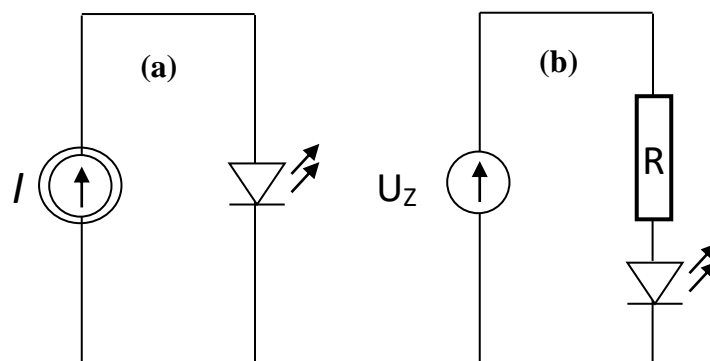
Punkt przecięcia prostej ekstrapolującej odcinek charakterystyki prądowo-napięciowej uzyskanej dla wysokich napięć z osią napięcia U_D wyznacza napięcie progowe U_p diody.

Napięcia progowe maleją wraz ze wzrostem długości emitowanej przez diodę fali świetlnej, co związane jest ze zmniejszaniem się bariery energetycznej złącza ΔE . Zazwyczaj napięcia progowe wyznacza się – jak pokazuje rysunek 7. Typowe spadki napięcia dla różnych typów LED-ów pokazano na diagramie 1.



Rys. 7. Typowa charakterystyka prądowo-napięciowa dla diod LED emitującej światło długofalowe (krzywa czerwona) i krótkofalowe (krzywa niebieska). Linia przerywaną zaznaczono sposób wyznaczenia napięcia progowego U_p .

Warto zauważyć, że w kierunku przewodzenia prąd I_D gwałtownie wzrasta ze wzrostem napięcia U_D . Prądy przepływające przez diodę nie mogą być zbyt duże, gdyż wydzielane ciepło mogłoby spowodować zniszczenie złącza. Diody LED zasilane są zwykle ze źródeł prądowych lub źródeł napięciowych z szeregowo dołączonym rezystorem ograniczającym wielkość płynącego prądu (rysunek 8a i 8b).



Rys. 8. Schematy dwóch sposobów zasilania diod LED.

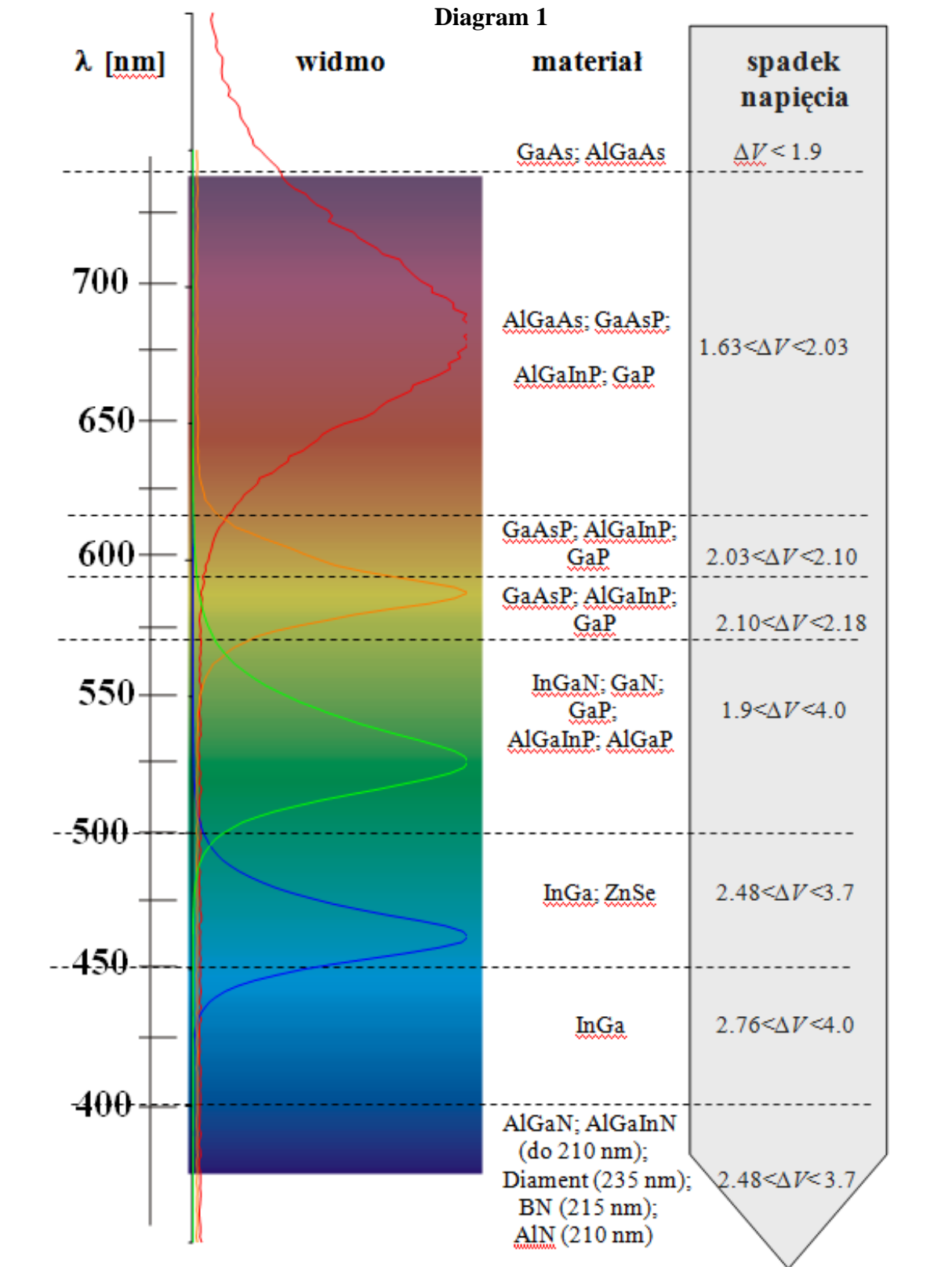
Parametrem określającym maksymalne bezpieczne dla diody natężenie prądu jest tzw. maksymalny prąd przewodzenia (zasilający). Przepływ prądu przez diodę oraz spadek

napięcia na złączu powodują wydzielanie się ciepła. Z punktu widzenia poboru mocy diody można podzielić na 3 kategorie:

1. diody miniaturowe emitujące jedną barwę światła i wykorzystywane przede wszystkim jako elementy wskaźnikowe (emitowany strumień świetlny nie przekracza pojedynczych lumenów). Są to zazwyczaj urządzenia małej mocy zasilane prądami około 1-20 mA. Jedną z podstawowych zalet tego typu diod jest niska emisja ciepła, w związku z czym są one bezpieczne w użyciu, nie wymagają żadnych dodatkowych osłon lub ekranów.
2. diody średniej mocy – stosowane są, gdy wymagane jest źródło światła emitujące strumień świetlny o wartości kilku lumenów. Zasilane są one najczęściej prądami rzędu 100 mA. W celu zabezpieczenia diody przed przegrzaniem (uszkodzenie soczewki) często budowane są jako układy kompaktowe zawierające dwa identyczne złącza (z obudowy wyprowadzone są wówczas dwie anody i dwie katody). Do najpopularniejszych zastosowań tego typu urządzeń zaliczyć należy panele świetlne, oświetlenie awaryjne, światła zewnętrzne w samochodach i samolotach.
- 3 diody wysokiej mocy zasilane są prądami przekraczającymi niekiedy nawet 1 A. Mają one nieco inną budowę niż diody omówione w punktach 1 i 2, gdyż znaczna emisja ciepła wymaga, by złącze montowane było na radiatorze. Mogą one emitować strumień świetlny przekraczający 1000 lumenów. Stosowane są do oświetlenia pomieszczeń, w latarkach, mogą stanowić też alternatywę dla używanych obecnie lamp halogenowych w reflektorach samochodowych.

Inną istotną charakterystyką LED-ów jest ich charakterystyka spektralna. Określa ona zależność intensywności emitowanego światła w funkcji długości fali. Dla większości złącz *p-n* charakterystyki te są krzywymi kształtem przypominające krzywe Gaussa. W praktyce charakterystykę widmową LED-ów jednobarwnych określa się podając długość emitowanej fali (odpowiadającej największej emisji) oraz szerokość połówkowa linii widmowej (w typowych LED-ach wartość ta zawiera się w przedziale od kilkunastu do kilkudziesięciu nm). Wybrane długości fali emitowane przez różne diody zestawiono na diagramie 1. W przypadku diod białych typu RGB oraz diod wielobarwnych widmo jest prostą sumą charakterystyk widmowych poszczególnych złącz wykorzystanych do ich konstrukcji. Osobną grupę stanowią diody zawierające warstwy materiału fosforyzującego, gdzie widmo składa się z ostrej linii charakterystycznej dla użytego złącza wykorzystywanej jednocześnie do wzbudzenia fosforu (tym mianem określa się grupę materiałów o silnej fosforescencji – nie mylić z pierwiastkiem fosforem) oraz szerokiej linii związanej z emisją fosforu (zazwyczaj

linia ta ma szerokość spektralną rzędu kilkuset nm). Diody tego typu to niektóre diody białe (emitujące tzw. ciepłe światło) oraz niektóre diody fioletowe. Bardziej złożone widma emisyjne mogą mieć LED-y w których barwa światła jest modyfikowana poprzez użycie filtrów optycznych.



Sprawność świecenia LED-ów zależy od wielu czynników, przy czym do najważniejszych zaliczyć należy: własności elektryczne i optyczne materiału półprzewodnikowego (przewodnictwo elektryczne, współczynnik załamania światła, szerokość bariery energetycznej złącza, transmitancja), własności optyczne obudowy (transmitancja, współczynnik załamania światła), temperatura, prąd diody, reflektancja odbłyśnika i inne. Dla LED-ów zdefiniowano szereg ważnych parametrów charakteryzujących ich przydatność jako źródła światła, konwertujące energię prądu elektrycznego na energię świetlną. Jednym z nich jest skuteczność świetlna źródła światła (η_{sw}) zwana też wydajnością świetlną wyrażoną w lumenach/wat. Określa ona jak sprawnie dioda konwertuje energię elektryczną na energię promieniowania elektromagnetycznego. Jest wyrażona ilorazem strumienia świetlnego wysyłanego przez źródło do mocy potrzebnej do jego wytworzenia (P) i wyraża się wzorem:

$$\eta_{sw} = \frac{\phi}{P} = \frac{\int E dS}{U_D I_D} \quad (12)$$

gdzie E jest to natężenie oświetlenia (wyrażone w lx), dS to element oświetlanej powierzchni, U_D jest to spadek napięcia na diodzie, I_D - prąd płynący przez diodę.

W LED-ach białych osiągane są obecnie wartości skuteczności świetlnej na poziomie 20-100 lm/W, co oznacza, że są one kilkakrotnie bardziej sprawne od żarówek (ok. 10 lm/W) i lamp halogenowych ok. 15 lm/W). Producenci LED-ów podają, że ich produkty są w stanie pracować około 30 000 – 100 000 godzin. Jest to znacznie więcej niż świetlówki (10 000 – 15 000 godzin) i żarówki (1000 – 2000 godzin). Powyższe dane jednoznacznie określają zakres zastosowań obecnie produkowanych diod elektroluminescencyjnych jako oświetlenia. LED-y stanowią alternatywę dla żarówek i świetlówek i powinny wkrótce zastąpić je w oświetleniu pomieszczeń, jako elementy bardziej wydajne. Jednak w przypadku oświetlenia ulicznego w najbliższym czasie nadal powinny królować lampy sodowe, których sprawność jest znacznie większa od LED-ów i wynosi ok. 150-200 lm/W.

2.5. Zastosowania diod LED

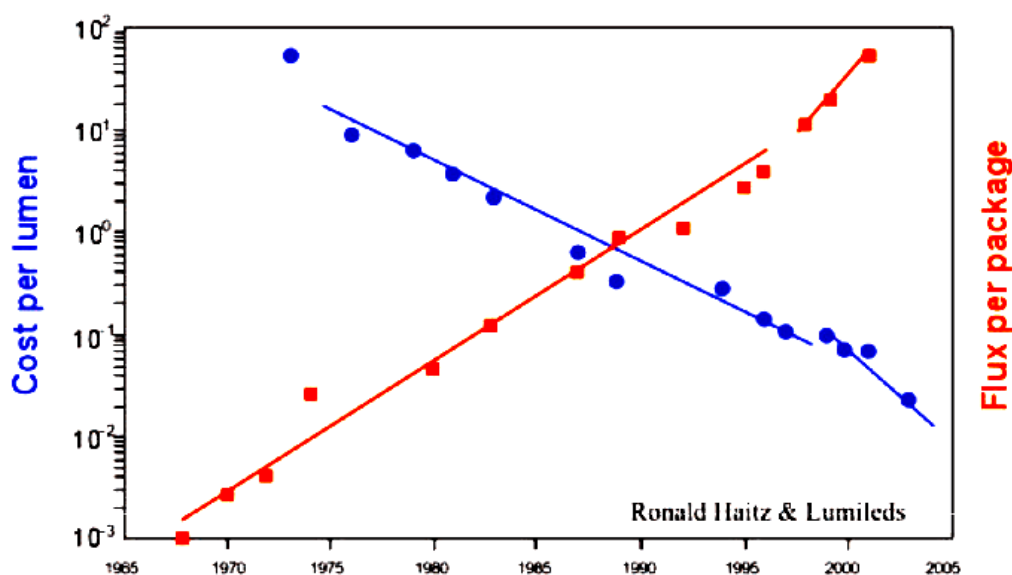
Jak wspomniano we wstępie w niedalekiej przyszłości LED-y mogą praktycznie całkowicie wyprzeć z rynku dotychczas używane źródła światła. Bez wątpienia to efekt licznych zalet tych źródeł światła, do których zaliczyć należy przede wszystkim: wysokie wartości luminacji, dużą sprawność (niezależną od kształtu i rozmiaru diody), przekładającą się na mały pobór mocy oraz niskie napięcie zasilania, a co za tym idzie wysoki poziom bezpieczeństwa

użytkowników, małe rozmiary, dużą trwałość i żywotność oraz niską emisję ciepła. Wspomniane cechy istotne są praktycznie z punktu widzenia każdej aplikacji LED-ów. Warto wymienić tu jednak jeszcze inne istotne cechy, dzięki którym LED-y stanowią alternatywę dla tradycyjnych rozwiązań.

Możliwość emisji światła o konkretnej długości fali bez konieczności użycia filtrów optycznych oraz ich bardzo wysoka odporność na czynniki zewnętrzne powodują, że diody elektroluminescencyjne coraz częściej znajdują zastosowanie jako światła sygnalizacyjne (sygnalizacja uliczna, lampy samochodów, samolotów i okrętów) oraz światła sceniczne. W tym drugim przypadku wykorzystuje się również łatwe sterowaniem natężeniem światła (poprzez regulację prądu diody). Wymienione powyżej cechy, krótkie czasy włączenia/wyłączenia (rzędu mikrosekund), fakt, że częste włączanie i wyłączanie diod nie skraca ich żywotności, małe rozmiary, oraz możliwość emisji różnych barw (diody wielozłazkowe) powodują, że LED-y na szeroką skalę wykorzystuje się w produkcji paneli informacyjnych, tablic ogłoszeniowych, ekranów i wyświetlaczy. LED-y wykorzystuje się również w produkcji latarek, wskaźników świetlnych, zabawek, i różnego typu gadżetów. Coraz większe moce świetlne uzyskiwane z LED-ów oraz wąskie zakresy widmowe powodują, że LED-y zaczęto traktować, jako potencjalną alternatywę dla laserów małej mocy (tzw. lasery półprzewodnikowe stosowane np. w czytnikach DVD).

Małe moce świetlne uzyskiwane z diod elektroluminescencyjnych przez lata ograniczały ich zastosowanie oświetlaniu pomieszczeń i wykorzystywane były głównie, jako elementy sygnalizacyjne w elektrotechnice i elektronice (nadal jest to ważna aplikacja LED-ów). Obecnie uzyskiwane moce powodują, że LED-y coraz śmielej wypierają żarówki i świetłówki można je nabyć zazwyczaj w postaci kompaktowego elementu zawierającego od kilku do kilkudziesięciu diod. Warto wspomnieć również, że LED-y emitujące światło podczerwone znalazły powszechne zastosowanie w fotokomórkach, łączach światłowodowych, urządzeniach zdalnego sterowania, czy czytnikach kodów kreskowych.

Biorąc pod uwagę prawo Haitz'a należy oczekiwać dalszego rozwoju tego typu urządzeń. Prawo to głosi, że maksymalny strumień świetlny generowany przez diodę elektroluminescencyjną rośnie dwudziestokrotnie w ciągu dekady, przy jednoczesnym dziesięciokrotnym spadku kosztów jednego wyemitowanego lumena – patrz rysunek 9.



Rys. 9. Graficzna ilustracja prawa Haitz'a.
Nature Photonics 1, 23 (2007) doi:10.1038/nphoton.2006.78s

W ostatnich latach kierunkiem rozwoju, do którego przywiązuje się dużą wagę i przeznaczają się znaczne fundusze jest rozwój urządzeń pracujących w oparciu o materiały organiczne (tzw. OLED – Organic Light Emitting Diodes) w tym również polimery. Produkowane są prototypy takich urządzeń (również w Katedrze Fizyki Molekularnej PŁ, jednak obecnie koszt organicznych półprzewodników, jak i specyficzna technologia ich przetwarzania nie pozwala im konkurować na rynku z klasycznymi diodami produkowanymi ze związków nieorganicznych. Należy również podkreślić niskie wydajności OLED-ów. Jednak możliwość tworzenia w pełni elastycznych źródeł światła (również innych elementów elektronicznych) w postaci świecących włókien, lub folii powinna stworzyć nowe kierunki rozwoju całej optoelektroniki.

Na koniec warto wspomnieć o wadach diod elektroluminescencyjnych. Do najważniejszych należy zaliczyć znaczną czułość LED-ów na temperaturę zewnętrzną i napięcie zasilania, które musi przekroczyć wartość napięcia progowego. Należy zaznaczyć również, że wzrost prądu diody powoduje jednocześnie spadek wydajności świetlnej co podnosi koszty eksploatacji LED-ów dużej mocy. Z punktu widzenia ekonomii istotną wadą LED-ów jest również konieczność zasilania ich prądem stałym. Podnosi to koszty instalacji oraz obniża sprawność energetyczną (dodatkowe układy prostownicze i transformatory) całego systemu. Powoduje to, że cena jednego lumena światła uzyskanego z LED-a nadal jest wyższa niż w przypadku żarówek, czy świetlówek. Przełomem mogą okazać się wielozłączone diody elektroluminescencyjne zasilane prądem przemiennym opracowane przez firmę Seoul Semiconductor. Gdy wartości prądu przyjmują umownie wartości dodatnie,

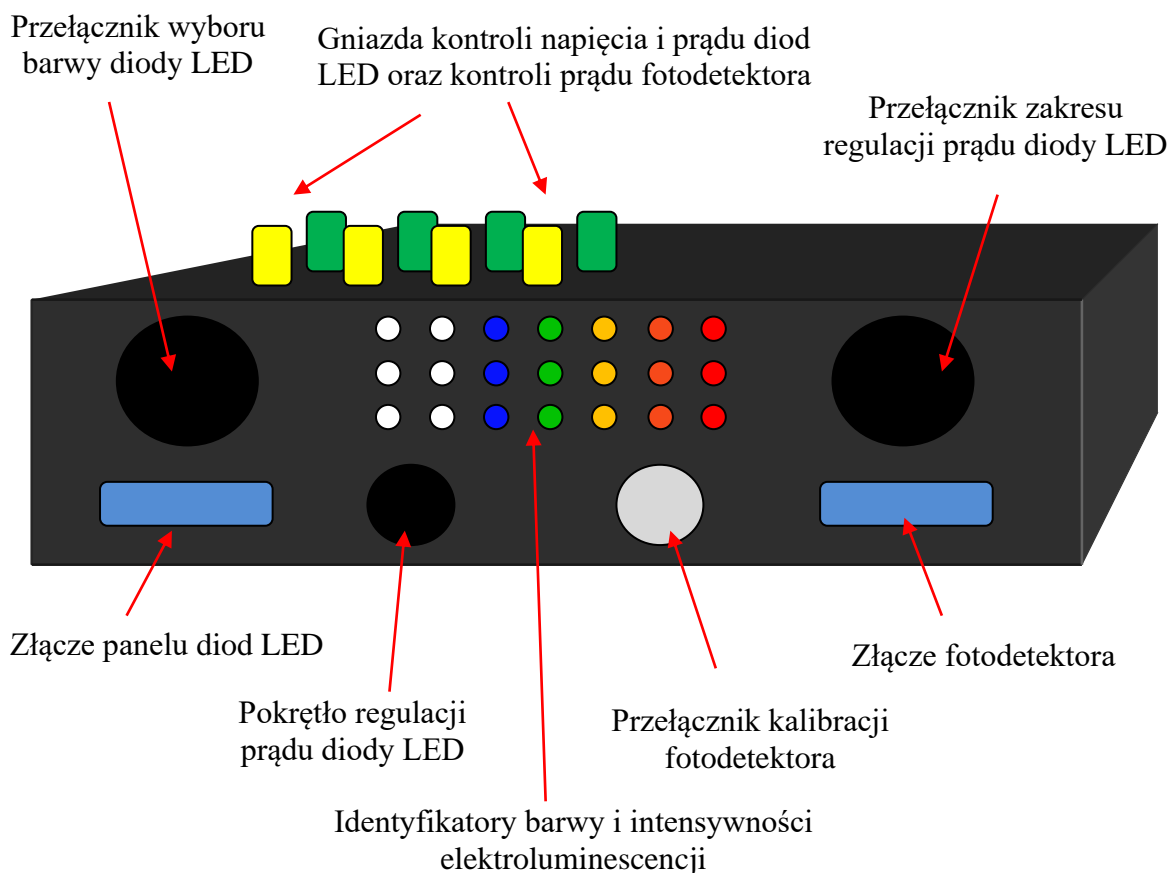
wówczas „świeci” część diody (złącze spolaryzowane w kierunku przewodnictwa), podczas gdy pozostała część (spolaryzowana zaporowo) nie emituje światła. Zmiana kierunku przepływu prądu powoduje zmianę polaryzacji złącz, a tym samym zmianę obszaru diody, z którego następuje emisja.

Istotną wadą białych LED-ów jest ich charakterystyka widmowa, znacznie odbiegająca od widma słońca. Powoduje to, że LED-y mogą mieć negatywny wpływ na wzrok, choć z drugiej strony ograniczenie emisji promieniowania UV i IR w porównaniu z żarówkami, czy świetlówkami stanowi ich zaletę.

3. Stanowisko pomiarowe

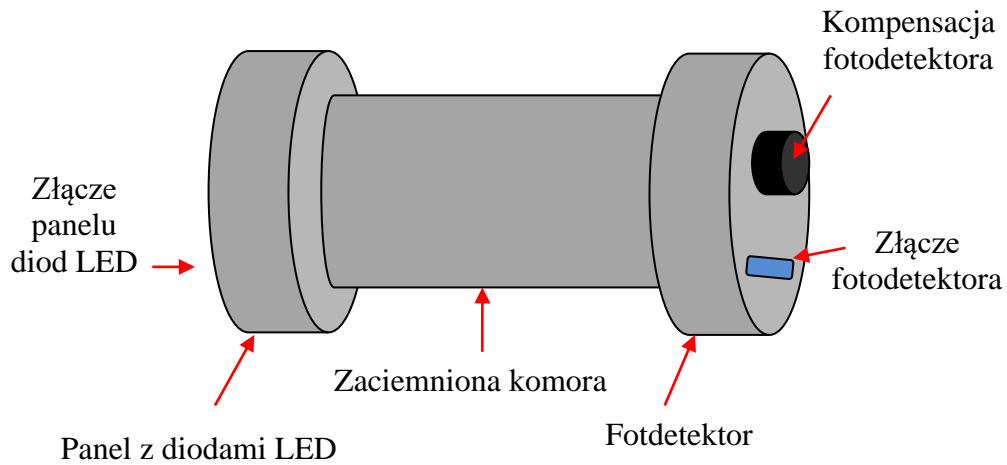
Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiony jest na rys. 10. Składa się ono z:

- 1) modułu sterująco-kontrolnego zawierającego: źródło prądowe zasilające diody LED, układ zasilający fotodetektor, gniazda kontrolne oraz zespół przełączników, wskaźników i pokręteł (rys. 10).



Rys. 10. Schemat modułu sterująco-kontrolnego.

- 2) Zaciemnionej komory pomiarowej zakończonej z jednej strony panelem diod LED, a z drugiej fotodetekтором (rys.11).



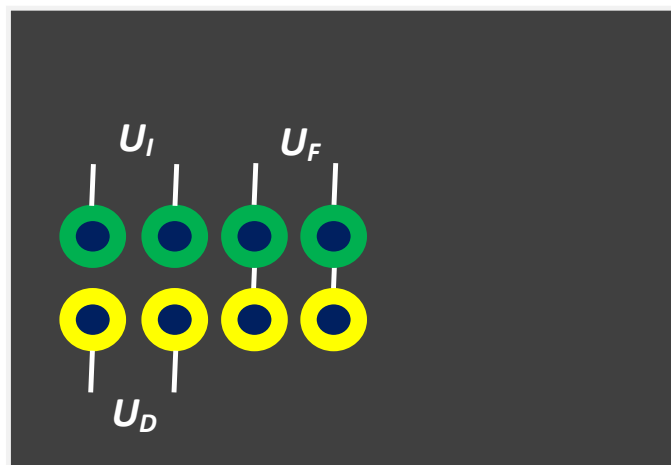
Rys. 11. Schemat komory pomiarowej.

- 3) Zestawem mierników przeznaczonych do pomiarów prądu i napięcia diody LED oraz natężenia oświetlenia E rejestrowanego przez fotodetektor.

Fotodetekтором jest fotodioda krzemowa wraz z przekształtnikiem prąd-napięcie i wzmacniaczem o regulowanym automatycznie wzmocnieniu.

4. Wykonanie pomiarów

1. Do gniazd kontrolnych znajdujących się na górnej części modułu sterująco-kontrolnego dołączyć woltomierze zgodnie z poniższym rysunkiem.



Rys. 12. Wyprowadzenia napięć kontrolnych na górnej płycie modułu sterująco-kontrolnego.

2. Do odpowiednich złącz modułu sterująco-kontrolnego podłączyć panel diod LED i fotodetektor.

3. Zasilic układ za pomocą przełącznika znajdujacego się na tylnej ścianie obudowy modułu sterujaco-kontrolnego.
4. Za pomocą przełącznika wyboru barwy diody LED wybrać diode o barwie bialej.
5. Pokrętle regulacji prądu diody LED ustawic wartosc napięcia sterujacego wydajnoscia źródła prądowego $U_I = 1V$.
6. Przełącznikiem zakresu regulacji prądu diody LED wybrać najniższą wydajność prądową źródła prądowego (od 0 do 200 μA).
7. Przełącznik kalibracji fotodetektora ustawic w pozycji, w której diody identyfikujace barwę i intensywność elektroluminescencji będą swiecic światłem pulsujacym (w tym polozeniu przełącznika diody elektroluminescencyjne w panelu diod LED są wygaszone – w komorze pomiarowej panuje ciemność).
8. Pokrętle kompensacji prądu ciemnego fotodetektora znajdujacym się na komorze pomiarowej ustawic wartosc 0V (z najwiekszą dokladnością jaka jest możliwa).
9. Przełącznik kalibracji fotodetektora ustawic w pozycji, w której diody identyfikujace barwę i intensywność elektroluminescencji będą swiecic światłem ciągłym (w tym polozeniu przełącznika diody elektroluminescencyjne w panelu diod LED swieca).
10. Zmierzyć spadek napięcia U_D na diodzie LED i odczytaną wartosc zanotowac w tabeli odpowiadajacej badanej diodzie.
11. Zmierzyć natężenie rejestrowanego oświetlenia E odczytujac napięcie U_F na mierniku kontrolnym fotodetektora i odczytaną wartosc zanotowac w tabeli odpowiadajacej badanej diodzie.
12. Zgodnie z tabelą, kolejno zmieniać wartosc prądu diody LED i wykonać czynności zapisane w punktach od 10 do 11.
13. Przełącznikiem zakresu regulacji prądu diody LED wybrać wydajność prądową źródła prądowego (od 0 do 2 mA) i wykonać czynności zapisane w punktach od 7 do 11.
14. Przełącznikiem zakresu regulacji prądu diody LED wybrać wydajność prądową źródła prądowego (od 0 do 20 mA) i wykonać czynności zapisane w punktach od 7 do 11.
15. Za pomocą przełącznika wyboru barwy diody LED wybierać kolejno diody o barwach: niebieskiej, zielonej, żółtej, pomarańczowej i czerwonej wykonujac dla kazdej z nich czynności zapisane w punktach od 5 do 14.

5. Opracowanie wyników pomiarów

W celu prawidłowego opracowania wyników pomiarów należy:

1. przeskalować zmierzone napięcie U_I na prądy diod LED według wzoru:

$$I_D = \alpha \cdot U_I \quad (13)$$

gdzie współczynnik α (wyrażony w - A/V) przyjmuje różne wartości różnych zakresów regulacji wydajnością prądową źródła prądowego (patrz tabela 2),

2. przeskalować napięcie U_F rejestrowane przez fotodiodę na prądy fotodetektora I_F według wzoru:

$$I_F = \beta \cdot U_F \quad (14)$$

gdzie współczynnik β (wyrażony w - A/V) przyjmuje różne wartości dla diod o różnych barwach (patrz tabela 2),

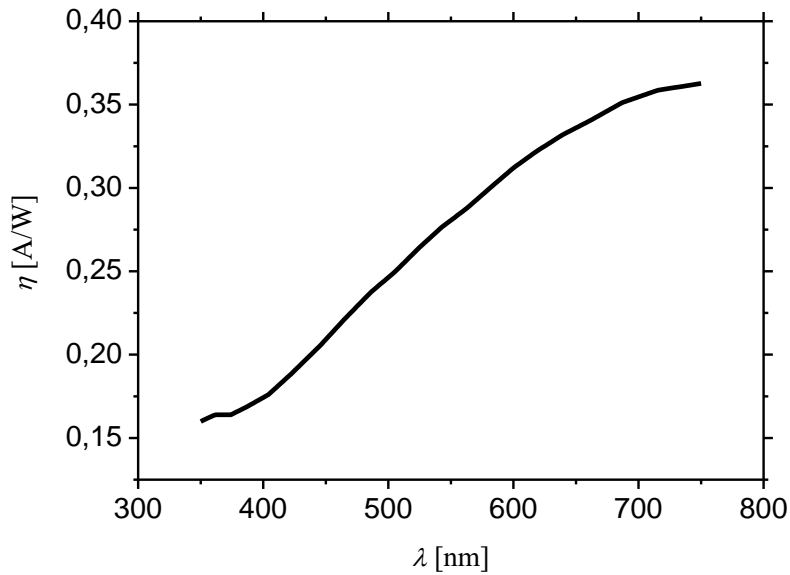
1. 3. wyznaczyć spektrometryczną gęstość monochromatyczną strumienia światła $\phi(\lambda)$ (W/nm), która dana jest wzorem:

$$\phi(\lambda) = \frac{d\phi}{d\lambda} = I_F \frac{\delta(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda} \quad (15)$$

oraz fotometryczną gęstość monochromatyczną strumienia świetlnego ϕ_λ wyrażoną wzorem:

$$\phi_\lambda = \frac{d\phi_v}{d\lambda} = K_m I_F \frac{\delta(\lambda)\chi(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda} \quad (16)$$

gdzie: β jest to współczynnik (wyrażony w - A/V), który przyjmuje różne wartości dla diod o różnych barwach (patrz tabela 2), $K_m = 683$ (lm/W) to fotometryczny równoważnik promieniowania, $\delta(\lambda)$ jest to znormalizowany rozkład spektralny emisji diody LED, $\eta(\lambda)$ jest to fotoczułość fotodetektora (wyrażona w jednostkach - s*A/liczba fotoów) (rys. 13), $\chi(\lambda)$ to średnia czułość ludzkiego oka, a λ to długość fali świetlnej.



Rys. 13. Charakterystyka spektralna fotodiody pomiarowej.

Całkowity strumień świetlny ϕ_v rejestrowany przez fotodetektor wynosi:

$$\phi_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_\lambda d\lambda = K_m I_F \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta(\lambda) \chi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda} \quad (17)$$

gdzie λ_1 i λ_2 to najmniejsza i największa długość fali świetlnej analizowanych widm spektralnych.

Rejestrowane przez fotodetektor natężenie oświetlenia E_v wynosi:

$$E_v = \frac{\phi_v}{S} \quad (18)$$

a odpowiadająca mu światłość (natężenie źródła światła emitowanego) I_v diody LED jest równa:

$$I_v = \frac{\phi_v}{\Omega} = \frac{\phi_v}{s} \cdot R^2 \quad (19)$$

gdzie S to powierzchnia fotodetektora, R to odległość fotodiody od diody LED, a s to powierzchnia wycięta ze sfery o promieniu R przez kąt bryłowy Ω .

Jeżeli fotodetektor znajduje się naprzeciw źródła światła (w osi diody) i jego wymiary są niewielkie w stosunku do jego odległości R od diody LED, to całkowita światłość LED-a I_{0v} będzie w przybliżeniu równa:

$$I_{0v} = I_v \cdot \int_{0^{\circ}}^{90^{\circ}} \sigma(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi \quad (20)$$

gdzie $\sigma(\varphi)$ jest to rozkład kątowy światłości diody LED (rys. 5).

Tabela 2

Współczynnik β [A/V]			
Kolor diody	Wydajność źródła prądowego		
	0 – 200 μ A $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ [A/V]	0 – 2 mA $\alpha = 2 \cdot 10^{-4}$ [A/V]	0 – 20 mA $\alpha = 2 \cdot 10^{-3}$ [A/V]
biała	$6,39 \cdot 10^{-9}$	$7,94 \cdot 10^{-8}$	$3,74 \cdot 10^{-7}$
niebieska	$6,39 \cdot 10^{-9}$	$7,94 \cdot 10^{-8}$	$3,74 \cdot 10^{-7}$
zielona	$6,39 \cdot 10^{-9}$	$7,94 \cdot 10^{-8}$	$3,74 \cdot 10^{-7}$
żółta	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$2,78 \cdot 10^{-8}$
pomarańczowa	$1 \cdot 10^{-9}$	$6,39 \cdot 10^{-9}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$
czerwona	$1 \cdot 10^{-9}$	$6,39 \cdot 10^{-9}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$

1. Na podstawie wzoru (13), należy wyliczyć prądy przepływające przez złącza $p-n$ w każdej z badanych diod LED, a także w oparciu o zależności (15), (16), i (17) wyliczyć odpowiadające tym prądom wartości natężenie oświetlenia E_v . Do obliczeń należy przyjąć: $\lambda_1 = 350$ nm, $\lambda_2 = 750$ nm, $S = 5,9 \cdot 10^{-6}$ m², $R = 0,175$ m oraz $d\lambda = 2$ nm. W załączonym pliku (Excel – widma spektralne i rozkład kątowy) znajdują się stabelaryzowane rozkłady spektralne $\delta(\lambda)$, $\eta(\lambda)$ i $\chi(\lambda)$.
2. Na podstawie obliczeń wykonanych w punkcie 1, na jednym rysunku sporządzić wykres zależności prądu od spadków napięć na poszczególnych diodach oraz ten sam wykres tylko w skali półlogarytmicznej $\log_{10}(I_D) = f(U_D)$ (charakterystyki prądowo-napięciowe).

3. Podobnie jak to opisano w punkcie 2 na jednym rysunku sporządzić wykres zależności natężenia oświetlenia E_v od spadków napięć na poszczególnych diodach oraz ten sam wykres tylko w skali półlogarytmicznej $\log_{10}(E_v) = f(U_D)$.
4. Wykonać także wykresy natężenie oświetlenia E_v w funkcji prądów I_D płynących przez diody w skali liniowej i podwójnie logarytmicznej $\log_{10}(E_v) = f(\log_{10}(I_D))$.
5. Napisać wnioski dotyczące uzyskanych wyników obliczeń i wykresów.

6. Dla największej wydajności źródła prądowego (20 mA) obliczyć na podstawie wzorów (15) i (16) spektrometryczną gęstość monochromatyczną strumienia światła $\phi(\lambda)$ oraz fotometryczną gęstość monochromatyczną strumienia świetlnego ϕ_λ w zakresie długości fali świetlnej od $\lambda_1 = 350$ nm do $\lambda_2 = 750$ nm, dla każdej z badanych diod LED.
7. Wyniki obliczeń $\phi(\lambda)$ i ϕ_λ w funkcji długości fali świetlnej przedstawić graficznie na jednym wykresie osobno dla diod LED o określonej barwie.
8. Porównać uzyskane wykresy i napisać wnioski.

9. Dla białej diody LED obliczyć całkowitą światłość I_{0v} (wzór 20) zakładając, że $s = S = 5,9 \cdot 10^{-6}$ m² i $R = 0,175$ m. W załączonym pliku (Excel – widma spektralne i rozkład kątowy) znajduje się tabelaryzowany rozkład kątowy $\sigma(\varphi)$. Do obliczeń należy przyjąć $d\varphi = 1^\circ$.
10. Napisać wnioski.

Tabele pomiarowe

Dioda biała			
Zakres prądowy	U_I [V]	U_D [V]	U_F [V]
0 – 200 μA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 2 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 20 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		

Dioda niebieska			
Zakres prądowy	U_I [V]	U_D [V]	U_F [V]
0 – 200 μA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 2 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 20 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		

Dioda zielona			
Zakres prądowy	U_I [V]	U_D [V]	U_F [V]
0 – 200 μA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 2 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 20 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		

Dioda żółta			
Zakres prądowy	U_I [V]	U_D [V]	U_F [V]
0 – 200 μA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 2 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 20 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		

Dioda pomarańczowa			
Zakres prądowy	U_I [V]	U_D [V]	U_F [V]
0 – 200 μA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 2 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 20 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		

Dioda czerwona			
Zakres prądowy	U_I [V]	U_D [V]	U_F [V]
0 – 200 μA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 2 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		
0 – 20 mA	1		
	1,26		
	1,58		
	1,99		
	2,51		
	3,16		
	3,98		
	5,01		
	6,31		
	7,94		