

PRZEGLĄD ELEKTRYCZNYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA. GŁÓWNE WŁAŚCIWOŚCI I TENDENCJE ROZWOJOWE

1. Wstęp

Historia praktycznych zastosowań oświetlenia elektrycznego liczy sobie około 160 lat, jeżeli za jej początek uznać instalacje poza laboratorium pierwszych lamp łukowych o ręcznie nastawianych elektrodach. Minęło z górą półtora wieku wyteżonej pracy najpierw samotnych wynalazców dysponujących skromnymi środkami i godną podziwu determinacją, a później – prac badawczych podstawowych i aplikacyjnych finansowanych głównie przez zamożnych producentów sprzętu oświetleniowego. Wynikiem tych prac i dociekań jest nadal obserwowany stały rozwój techniki oświetleniowej, czasem niesłusznie uważanej za dziedzinę klasyczną o małym potencjale innowacyjnym. Z roku na rok systematycznie, chociaż powoli, poprawia się parametry źródeł światła i powiększa ich asortyment, a co kilkanaście lat pojawiają się na rynku źródła światła o nowej zasadzie działania. Zarazem minione 160 lat to zaledwie mgnienie oka w procesie ewolucji człowieka, który nadal ma wzrok ukształtowany przez setki tysięcy lat hasania po rozświetlonych sawannach afrykańskich. Nie należy o tym zapominać ustalając i wdrażając w życie standardy oświetleniowe.

Elektryk napotykający problematykę oświetleniową powinien rozumieć zasadę działania różnych źródeł światła i granice ich możliwości, aby rozważnie je stosować, aby nie żądać od producentów parametrów nieosiągalnych, aby nie wierzyć bezkrytycznie tekstom reklamowym i aby nie podpisywać się pod zamówieniem iluś sztuk *żarówek do rtęciówek*.

Kiedy 6 października 1904 roku król pruski i cesarz niemiecki Wilhelm II inaugurował pierwszy rok akademicki w Politechnice Gdańskiej, rozpoczynał działalność jej Instytut Elektrotechniczny, zaprojektowany i wyposażony z rozmachem. Ze względów dydaktycznych do oświetlenia budynku Instytutu użyto wszelkich dostępnych wtedy elektrycznych źródeł światła. Były żarówki węglowe i lampy Nernsta¹, lampy łukowe o węglach czystych², lampy łukowe płomienne³ i lampy łukowe o węglach nasyconych⁴. Pojawiła się też zupełna nowość: prototyp niskoprężnej lampy rtęciowej o ciekłej katodzie (rtęciowej), opatentowanej przez P. C. Hewitta zaledwie w 1901 roku, a kilka lat później – lampa Moore'a do sygnalizacji morskiej, odmiana rury świetlającej.

Po stu latach niewiele wie o tych najnowocześniejszych podówczas lampach. Większość z tych lamp dawno przeszła do muzeów techniki; do zastosowań specjalnych produkuje się jeszcze żarówki węglowe, a dzisiejsze nisko- i wysokoprężne lampy rtęciowe nie przypominają wspomnianego prototypu.

Technika elektrycznych źródeł światła rozpoczęła się od poszukiwań przypadkowych, w małym stopniu uwzględniających skuteczność świetlną źródeł i własności barwowe światła, obecnie

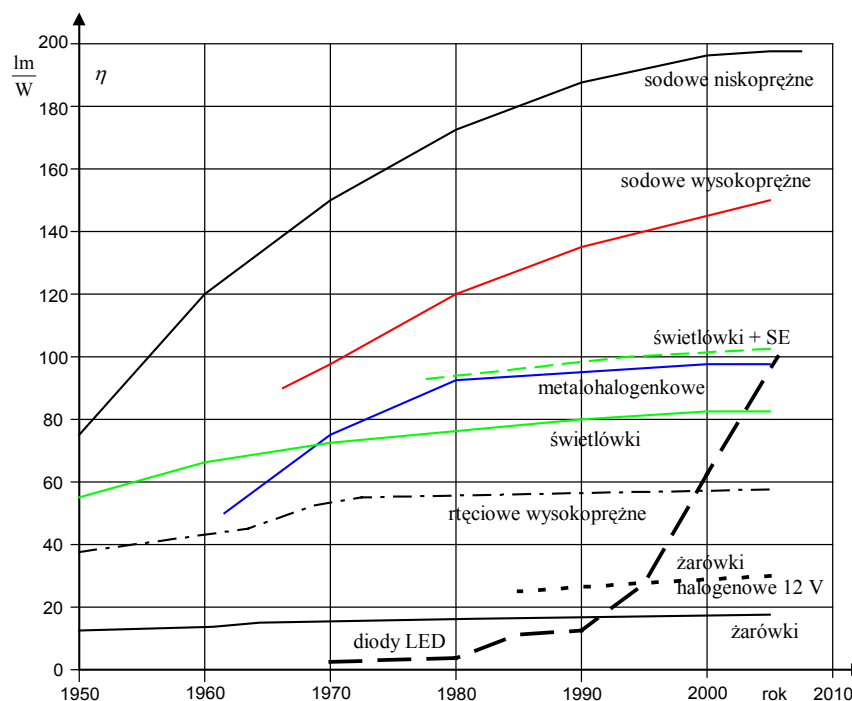
¹ Lampy żarowe, w których żarnikiem jest pręcik z tlenku magnezu lub innego materiału niewymagającego próżni bądź atmosfery beztlenowej. Żarnik przewodzi dopiero w wysokiej temperaturze i jest wstępnie podgrzewany (przez 10–20 s) za pomocą nawiniętej na nim platynowej spirali.

² Lampy łukowe o elektrodach z czystego węgla, w których światło ciepłobiałe jest emitowane głównie przez krater anody, o luminancji L nieprzekraczającej 10^8 cd/m².

³ Lampy łukowe o znaczącym udziale łuku w wytwarzaniu światła dziennobiałego ($L \geq 10^8$ cd/m²).

⁴ Lampy łukowe (płomienne) o elektrodach domieszkowanych dla korekcji widma i zwiększenia skuteczności świetlnej (do 80 lm/W), o przeważającym udziale łuku w wytwarzaniu światła ($L \geq 10^8$ cd/m²).

czynniki o pierwszorzędym znaczeniu. Na rys. 1 przedstawiono poglądowo ewolucję skuteczności świetlnej różnych źródeł światła w minionym półwieczu. Zamiast linii powinny być na tym rysunku szerokie pasma obejmujące pełen zakres wartości skuteczności świetlnej źródeł obserwowany w określonych latach, ale wtedy rysunek byłby nieczytelny. Przedstawione linie są zbliżone do górnej granicy wspomnianych pasm.



Rys. 1. Ewolucja skuteczności świetlnej wybranych źródeł światła
(SE – statecznik elektroniczny)

Inne mechanizmy postępu wyróżniające rozwój źródeł światła w ostatnich 50 latach to dogłębne poznawanie fizykochemicznych podstaw wytwarzania światła na poziomie atomu i cząsteczki, odkrywanie nowych koncepcji źródeł światła i opanowanie nowych materiałów umożliwiających ich realizację na skalę przemysłową.

W minionych 50 latach pojawiły się i nadal są doskonalone lampy sodowe wysokoprężne i lampy metalohalogenkowe oraz bezelektrodowe lampy wyładowcze, a zastosowania oświetleniowe znalazły diody świecące. Nie rozwinęły się kondensatorowe źródła światła, zapowiadane przed pół wiekiem świecące ściany, ale być może to miejsce zajmą organiczne diody elektroluminescencyjne.

Drogę od skuteczności świetlnej 3 lm/W do wartości blisko 10-krotnie większej żarówki przebywały 100 lat, a diody elektroluminescencyjne przebyły ją w 15 lat. Nowy impuls technice oświetleniowej dały tanie świetłowody, a zrewolucjonizowała ją elektronika: przemienniki częstotliwości, elektroniczne stateczniki i zapłonniki bądź zespolone układy stabilizująco-zapłonowe, energoelektroniczne zasilacze oświetlenia awaryjnego oraz najprzeróżniejsze elektroniczne układy sterowania oświetlenia poczynając od prostych ściemniaczy po cyfrowe układy sterowania w budynkach inteligentnych.

W wyniku postępującego upowszechnienia wyładowczych źródeł światła, odbiorników nieliniowych, nasila się problem utrzymania należytej jakości energii elektrycznej i to również w instalacjach i sieciach dawniej uchodzących za niezagrażone odkształceniami harmonicznymi, jak sieci osiedli mieszkaniowych i sieci wiejskie. Nabierają znaczenia problemy ograniczania odkształcenia pobieranego prądu i w konsekwencji – odkształcenia napięcia, a także dużych prądów załączeniowych powodowanych przez kondensatory do poprawy współczynnika mocy. Stateczniki elektro-

Tablica 1. Źródła światła do ogólnych celów oświetleniowych

Źródła światła		Zakres mocy znamionowych W	Skuteczność światlna lm/W	Trwałość h	Czas zaświecania	
					lampy zimnej	lampy nagrzanej (po chwilowym zaniku napięcia)
Żarówki	zwykłe	15 ÷ 2000	8 ÷ 20	1000 ÷ 1500	0	
	halogenowe	10 ÷ 2000	12 ÷ 26	2000 ÷ 3500		
Świetlówki	kompaktowe	5 ÷ 25	50 ÷ 87	8000	0,5 ÷ 3 s, ale strumień świetlny $\Phi \approx \Phi_n$ zimna lampa osiąga po kilku minutach	
	liniowe	10 ÷ 65	40 ÷ 100	6000 ÷ 16000		
Lampy indukcyjne		23 ÷ 165	48 ÷ 74	60000	0,1 ÷ 1 s, ale strumień świetlny $\Phi \approx \Phi_n$ zimna lampa osiąga po kilku sekundach (QL), a nawet kilku minutach (Genura)	
Lampy rtęciowo-żarowe		100 ÷ 1000	17 ÷ 31	1000 ÷ 3000	0	3 ÷ 6 min
Rtęciówki wysokoprężne		50 ÷ 2000	35 ÷ 60	5000 ÷ 10000	3 ÷ 5 min	6 ÷ 10 min
Lampy metalohalogenkowe		20 ÷ 2000	60 ÷ 100	2000 ÷ 10000	3 ÷ 5 min	6 ÷ 10 min (zapłon bez- zwłoczny lamp dwustronnie trzonkowanych)
Sodówki niskoprężne		10 ÷ 200	100 ÷ 200	5000 ÷ 10000	7 ÷ 12 min	0
Sodówki wysokoprężne		35 ÷ 1000	40 ÷ 150	4000 ÷ 16000	3 ÷ 7 min	2 ÷ 6 min (20 s, jeśli antena zapłonowa)
Diody elektroluminescencyjne		0,2 ÷ 5	20 ÷ 100	100 000	0	

Inne właściwości	Zastosowania
Światło ciepłe, żółtawe. Prosta konstrukcja. Niska cena. Nie wymagają osprzętu dodatkowego. Zaświecają się natychmiast. Duża niezawodność. Wrażliwe na odchylenia napięcia zasilającego. Dobrze znoszą częste załączanie. Przy 50 Hz tętnienie światła pomijalne.	Mieszkania, małe pomieszczenia biurowe, handlowe. Miejsca, w których tylko dorywczo korzysta się z oświetlenia. Lampy przenośne, ręczne. Oświetlenie awaryjne.
Światło ciepłe. Prosta konstrukcja. Mogą wymagać osprzętu dodatkowego. Zaświecają się natychmiast. Duża niezawodność. Wrażliwe na odchylenia napięcia. Przy 50 Hz tętnienie światła pomijalne.	Oświetlenie dekoracyjne wewnątrz mieszkalnych i handlowych, wystaw i gablot. Nieduże boiska, korty tenisowe, lodowiska. Otoczenie budynków (lampy sterowane podczerwienią). Iluminacje.
Dobór luminoforu decyduje o barwie światła (dzienna, biała, ciepłobiała...) i wpływa na skuteczność świetlną. Strumień świetlny wyraźnie maleje w niskiej temperaturze otoczenia. Trwałość może wyraźnie maleć przy większej częstotliwości załączeń. Konieczny statecznik. Tętnienie światła, jeśli statecznik indukcyjny.	Mieszkania, małe pomieszczenia biurowe, handlowe. Lampy przenośne. Oświetlenie awaryjne. Pomieszczenia biurowe i handlowe. Audytoria i czytelnie. Magazyny. Hale przemysłowe o niedużej wysokości. Podrzędne ulice i place. <u>Świetłówki De Luxe</u> : sale operacyjne, gabinety diagnostyczne, galerie obrazów, druk barwny, tkalnie i farbiarnie, malarnie, stanowiska kontroli barwy wyrobów.
Światło białe, nietętniące. Wysoka cena. Kosztowny zasilacz.	Trudny dostęp do źródeł światła. Względy prestiżowe.
Oddawanie barw mierne. Nie wymagają statecznika. Dzięki żarnikowi: lampa zimna zaświeca się natychmiast po załączeniu, tętnienie światła nieduże.	Tylko do zastępowania żarówek w istniejących instalacjach (przy tej samej mocy źródła światła pozwalają łatwo zwiększyć natężenie oświetlenia o 50 %)
Oddawanie barw złe, niedobór czerwieni w widmie. Tętnienie światła duże. Konieczny statecznik.	Hangary, magazyny. Place składowe i przeładunkowe, torowiska, bocznice kolejowe, dworce. Ulice i drogi. Parki, trawniki, iluminacja drzew.
Oddawanie barw dostateczne ... doskonałe (zależnie od doboru halogenków). Wrażliwe na odchylenia napięcia zasilającego. Tętnienie światła duże. Konieczny statecznik i ew. układ zapłonowy.	Pomieszczenia biurowe i handlowe. Audytoria i czytelnie. Reprezentacyjne hale. Wysokie hale przemysłowe o dużych wymaganiach co do barwy światła. Hale sportowe. Rozległe tereny oświetlane z krańców: stadiony (możliwość transmisji TV), place prefabrykacyjne, pochylnie, suche doki. Drogi i węzły drogowe o dużym natężeniu ruchu. Iluminacje.
Światło jednobarwne żółtopomarańczowe. Bardzo złe oddawanie barw. Światło zapewnia dużą ostrość widzenia, nawet w zapyłonej lub zamglonej atmosferze. Mało wrażliwe na odchylenia napięcia zasilającego. Tętnienie światła duże. Konieczny statecznik i ew. układ zapłonowy.	Przypadki ograniczonej przejrzystości powietrza z powodu dymu, zapylenia, mgły: odlewnie, składy węglowe, drogi, tunele, mosty i wiadukty, śluzy, kanały, porty, lotniska. Iluminacje budynków z piaskowca i cegły. Stanowiska kontroli wykrywające defekty powierzchni tkanin, blach itp.
Światło złociste ... ciepłobiałe zależnie od ciśnienia i składu atmosfery w jarzniku. Tętnienie światła duże. Konieczny statecznik i ew. układ zapłonowy.	<u>Lampy o skorygowanej barwie</u> : Pomieszczenia handlowe. Przejścia i dworce. Wysokie hale przemysłowe i sportowe. <u>Lampy o nieskorygowanej barwie</u> : Drogi i węzły drogowe. Boiska. Iluminacje budynków z piaskowca i cegły.
Do ogólnych celów oświetleniowych tworzy się matryce zawierające wiele diod, np. $16 \times 16 = 256$ diod. Światło różnokolorowe i białe. Zasilanie bardzo niskim napięciem. Odporne na uderzenia i drgania.	Iluminacje, sygnalizacja, światła obrysowe, duże wyświetlacze. Oprawy oświetleniowe sufitowe, ścienne, przenośne.

niczne z zasilaczami impulsowymi SMPS (ang. *switch mode power supply*) również mają duże prądy załączeniowe, a obwody lamp zasilane prądem dużej częstotliwości zagrażają zakłóceniami wypromieniowanymi.

Ważną stała się kwestia recyklingu zużytych lamp i ochrony środowiska przed zanieczyszczeniem rtęcią, luminoforami, tworzywami sztucznymi i innymi groźnymi materiałami używanymi do produkcji źródeł światła i towarzyszącego im wyposażenia.

Postępu zatrzymać nie można i za kilkadziesiąt lat obraz rynku źródeł światła z pewnością będzie inny niż obecnie (tabl. 1). Zapewne – po dalszych udoskonaleniach – pozostanie większość dzisiejszych lamp, łącznie z żarówkami, ale zakres ich stosowania ulegnie zmianie, bo w porównaniu z obecnym stanem wyraźnie większy udział będą miały diody świecące i zupełnie nowe źródła światła, o których dzisiaj wiadomo niewiele albo zupełnie nic.

2. Lampy żarowe (żarówki)

2.1. Inkandescencyjne wytwarzanie światła

Lampy żarowe działają na zasadzie **inkandescencji**, czyli temperaturowego wytwarzania światła, wykorzystują emisję promieniowania wskutek cieplnego wzbudzenia atomów lub cząstek. Widmo jest ciągłe, obejmuje szeroki zakres długości fal. Gęstość monochromatyczną egzytancji promienistej $E_{e\lambda}$ ciała czarnego¹ o temperaturze bezwzględnej T precyzyjnie opisuje **wzór Plancka**:

$$E_{e\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]},$$

w którym

λ – długość fali,

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^{20} \frac{\text{W} \cdot \text{nm}^4}{\text{m}^2},$$

$$c_2 = 1,439 \cdot 10^7 \text{ nm} \cdot \text{K}.$$

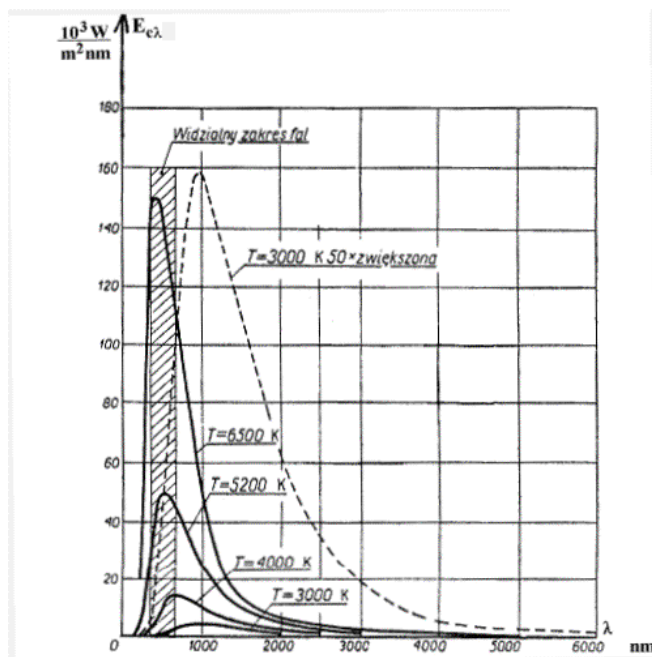
Reprezentacją graficzną prawa Plancka jest rys. 2. Poszukując ekstremum funkcji egzytancji promienistej $E_{e\lambda}$ względem długości fali promieniowania λ otrzymuje się **prawo przesunięć Wiena**:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^6 \text{ nm} \cdot \text{K}$$

Z prawa Wiena wynika, że długość fali λ_{\max} , przy której występuje największa gęstość widmowa egzytancji promienistej jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury T ciała czarnego: $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$. Żarówka bez odzysku energii, z fikcyjnym żarnikiem będącym ciałem czarnym, miałaby największą sprawność fotometryczną i największą skuteczność świetlną przy temperaturze żarnika 6500 K². Gdyby udało się wykonać żarówkę z żarnikiem o takiej temperaturze roboczej – co jest nieprawdopodobne – to miałaby ona sprawność fotometryczną $\eta_f = 0,131$ i skuteczność świetlną $\eta = 90 \cdot \eta_e \approx 90 \cdot 0,8 \approx 70 \text{ lm/W}$ [6]. Ta nieosiągalna granica nie wygląda imponująco w porównaniu z już osiąganą, znacznie większą skutecznością świetlną wielu lamp wyładowczych.

¹ Ciało czarne (promiennik zupełny) ma emisyjność $\varepsilon_\lambda = 1$ niezależnie od długości fali i ma największą możliwą gęstość widmową egzytancji promienistej w każdej temperaturze i dla każdej długości fali.

² Temperaturę 6500 K warto zapamiętać, bo jest ważnym odniesieniem właściwości barwowych światła. Jest to temperatura fotosfery Słońca, jego promieniującej warstwy powierzchniowej, a przy tym światło kształtowała się czułość widmowa oka ludzkiego.



Rys. 2. Gęstość widmowa egzytancji promienistej $E_{e\lambda}$ ciała czarnego o temperaturze bezwzględnej T (reprezentacja graficzna prawa Plancka)

Żarnik wolframowy. Po latach doświadczeń z żarnikami wykonanymi ze zwęglonych włókien naturalnych w roku 1915 Irving Langmuir, użył wolframu – pierwiastka o najwyższej temperaturze topnienia (3650 K). Żarnik wolframowy jest promiennikiem selektywnym¹, wykazuje emisyjność $\varepsilon_\lambda \approx 0,44$ w zakresie widzialnym i wyraźnie mniejszą w zakresie podczerwieni, na którą przypada przeważająca część mocy promienistej żarówki. **Selektywność wolframu** sprawia, że – w porównaniu z ciałem czarnym o tej samej temperaturze – żarówka wolframowa ma korzystniejsze parametry: większą (o 30÷50%) skuteczność świetlną i większą (o 50÷85 K) temperaturę barwową.

Silnie rozgrzany żarnik spłonąłby natychmiast w obecności tlenu, wobec tego we wnętrzu bańki utrzymuje się próżnię albo atmosferę beztlenową. Żarówki małej mocy (do 15 W lub 25 W) wykonuje się jako **próżniowe**, większej mocy – jako **gazowane**.

Gabaryt żarnika powinien być jak najmniejszy, aby ograniczyć jego straty cieplne i, co jest ważne w przypadku projektorów, aby uzyskać możliwie punktowe źródło światła. Żarnik żarówek głównego szeregu 110÷240 V wymaga drutu wolframowego o średnicy 10÷45 μm i znacznej długości. Zatem drut zwija się w skrętkę lub w dwuskrętkę, a nawet w trójskrętkę. Najlepszy jest wolfram polikrystaliczny o opóźnionej rekrytalizacji, z którego otrzymuje się drut niezwisający.

W żarówce gazowanej o stratach cieplnych żarnika decyduje kondukcja ciepła w **warstwie Langmuira**, nieruchomej warstwie gazu „przyklepionej” do żarnika. Straty cieplne żarnika o długości l i średnicy d są proporcjonalne do iloczynu $l \cdot d$ ^{0,3}. W przypadku skrętki chodzi o długość pozorną skrętki l i zewnętrzną średnicę pozorną skrętki d . Łatwo oszacować, że przejście od prostego drutu do skrętki, a także przejście od skrętki do dwuskrętki, pozwala kilkakrotnie zmniejszyć straty cieplne.

Zużycie żarnika wywołują dwa procesy:

- termiczny transport wolframu z żarnika na bańkę, czyli **sublimacja**² **wolframu**, o szybkości *ceteris paribus*³ proporcjonalnej do $T^{30 \div 40}$,

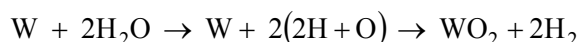
¹ Promiennik nieselektywny, czyli ciało szare (np. ciało stałe o powierzchni chropowatej, jak tlenki metali) ma emisyjność o wartości $\varepsilon_\lambda < 1$ niezależnej od długości fali. Promiennik selektywny (np. metal o powierzchni nieutlenionej) ma emisyjność zależną od długości fali $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$.

² Sublimacja – przejście substancji stałej bezpośrednio w stan gazowy.

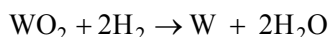
³ Ceteris paribus (łac.) – przy jednakowych pozostałych [warunkach].

- chemiczny transport wolframu z żarnika w miejsca chłodniejsze pod działaniem zanieczyszczeń, zwłaszcza śladowych ilości pary wodnej.

W wysokiej temperaturze przy żarniku cząsteczka wody dysocjuje cieplnie, a uwolnione atomy tlenu łączą się z atomem wolframu tworząc dwutlenek wolframu WO_2 :



Dwutlenek wolframu, lotny w wysokiej temperaturze otoczenia żarnika, w niższej temperaturze kondensuje na powierzchni bańki albo na doprowadnikach i wspornikach żarnika, przy czym wolny wodór redukuje tlen:



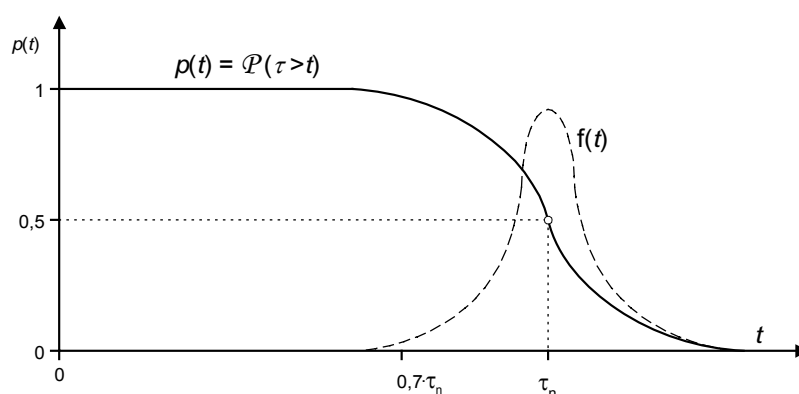
W następstwie tej odwracalnej reakcji w miejscach osiadania narastają kryształy wolframu, a śladowe ilości pary wodnej wracają do destrukcyjnego obiegu, teoretycznie nie ulegając zużyciu.

Żarnik idealny, o jednakowym przekroju i jednakowej temperaturze w każdym miejscu, teoretycznie miałby trwałość nieograniczoną. Z biegiem czasu jego przekrój zmniejszałby się równomiernie coraz wolniej, bo rosłaby jego rezystancja, a malał przepływający prąd i obniżała się temperatura. Żarnik rzeczywisty ma **plamki gorące**, wskutek nieuniknionych przewężeń przekroju i nierównomiernego skoku skrętki, z których wolfram ubywa coraz szybciej, bo proces ten ma *dodatnie sprzężenie zwrotne*.

Trwałość żarówek i innych elektrycznych źródeł światła można rozumieć jako:

- trwałość absolutną** – czas świecenia do chwili wygaśnięcia wskutek uszkodzenia, np. przepalenia żarnika,
- trwałość użytkową**, gwarantowaną przez wytwórcę jako trwałość znamionowa L_n – czas świecenia do chwili, gdy strumień świetlny obniży się poniżej określonego poziomu, np. poniżej 0,85 wartości znamionowej.

Żarówka należy do prostych elementów, w których skutki procesów starzeniowych kumulują się i które cechuje **rozkład normalny** funkcji gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń $f(t)$. Bardziej pogładowa jest **funkcja przeżycia**, zależność od czasu wskaźnika niezawodności $p(t)$ obrazującego prawdopodobieństwo, że trwałość L będzie większa od rozpatrywanej wartości czasu podanej na osi odciętych (rys. 3).



Rys. 3. Przebieg w czasie funkcji gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń $f(t)$ i wskaźnika niezawodności $p(t)$ żarówek

Zwykle żarówki do ogólnych celów oświetleniowych mają trwałość znamionową 1000 h lub 1500 h, a także żarówki halogenowe – od 2000 h do 4000 h. Przy niezmiennych warunkach roboczych żarnika większa trwałość oznacza mniejszą skuteczność świetlną i kierowanie się przy doborze wartością tylko jednego z tych parametrów prowadzi na manowce. Kiedy waliła się gospodarka

nakazowa, władze decydowały się na chybione działania ratunkowe. Tuż przed rokiem 1980 ogłoszono jako sukces zwiększenie trwałości żarówek o 50% (1000→1500 h) i podwyżkę ich cen, nie wspominając, że ma to na celu niewielkie zmniejszenie importu wolframu. Prosty rachunek wykazywał, że u przeciętnego użytkownika koszty wytwarzania światła nie zmieniłyby się, gdyby te „lepsze” żarówki były wyraźnie tańsze, a nie droższe. Żarówki trwalsze, a przy tym droższe, mogą mieć sens tylko w miejscach, gdzie ich wymiana jest kłopotliwa i/lub kosztowna i/lub ważna jest niezawodność świecenia. W porównaniu z tym poziomem trwałości żarówek do ogólnych celów oświetleniowych spotyka się:

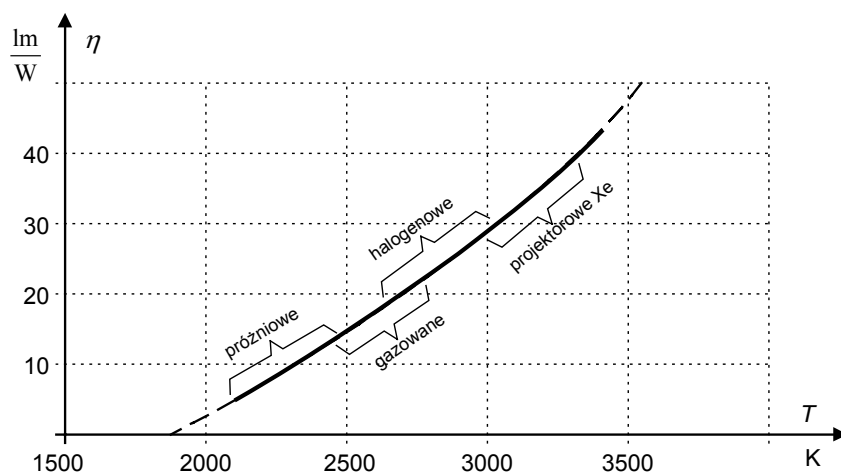
- Żarówki o znacznie większej trwałości, tzw. żarówki niedowoltowane, o obniżonej temperaturze roboczej żarnika, głównie jako żarówki sygnalizacyjne, np. do sygnalizacji ulicznej (8000 h) i miniaturowe LLD 5 V, 0,3 W (100 000 h) albo do nocnych lamp czuwania (6000 h). Z tych zastosowań żarówki są od lat wypierane przez diody elektroluminescencyjne.
- Żarówki o znacznie mniejszej trwałości ($L_n \leq 200$ h), tzw. żarówki przewoltowane, o podwyższonej temperaturze roboczej żarnika, głównie jako żarówki do projektorów obrazów, projektorów samochodowych i do celów fotograficznych.

Ubytek strumienia świetlnego ograniczający trwałość użytkową ma dwie przyczyny:

a) Maleje z czasem strumień świetlny emitowany przez żarnik, bo jego zużywaniu się towarzyszy zmniejszanie się mocy pobieranej przez lampę i temperatury żarnika.

b) Postępuje ciemnienie bańki przez osadzający się na niej wolfram, zwłaszcza w górnej części. Występuje to wyraźniej w bańkach o małej powierzchni. Proces można ograniczać wprowadzając do bańki drobne ilości substancji (np. fluoroglinianów, fluorokrzemianów), które reagują z wolframem na bańce, zamieniając ciemny osad w nalot jasny, bardziej przezroczysty.

W przypadku żarówek do ogólnych celów oświetleniowych, zależnie od zastosowanych zabiegów konstrukcyjnych, po 1000 h świecenia strumień świetlny obniża się o 10÷30%.



Rys. 4. Skuteczność świetlna żarówek w zależności od temperatury roboczej żarnika wolframowego [5]

- żarówki głównego szeregu próżniowe
- żarówki głównego szeregu gazowane zwykłe
- żarówki (gazowane) halogenowe
- żarówki projektorowe halogenowe napełniane ksenonem

Trwałość L i skuteczność świetlna η żarówki silnie zależą od temperatury żarnika:

$$L \propto T^{-30 \div -40}$$

$$\eta \propto T^{4,3}$$

i trudność polega na tym, aby jednocześnie oba te parametry utrzymać na satysfakcjonującym poziomie (rys. 4, tabl. 2), bo łatwo wykonać żarówkę o bardzo dużej trwałości i znikomej skuteczności

ści świetlnej albo odwrotnie – o dużej skuteczności świetlnej i małej trwałości. Trwałość znamionowa żarówek do ogólnych celów oświetleniowych powinna być dobrana, aby zapewnić jak najmniejsze koszty wytwarzania światła; może być korygowana w razie drastycznych zmian kosztu energii elektrycznej. Zwiększenie temperatury żarnika i skuteczności świetlnej bez uszczerbku dla trwałości jest możliwe, jeżeli zwiększa się średnicę drutu żarnika, tzn. *ceteris paribus* w żarówkach o większej mocy i w żarówkach o niższym napięciu znamionowym.

Tablica 2. Porównanie skuteczności świetlnej i trwałości żarówek halogenowych 1000 W, 230 V o różnym przeznaczeniu [1]

Wykonanie	Skuteczność świetlna lm/W	Trwałość h
do ogólnych celów oświetleniowych	22	2000
do oświetlenia studia TV	25	200
do wideofilmowania	27,5	75
do celów fotograficznych	33	15

2.2. Główne odmiany żarówek

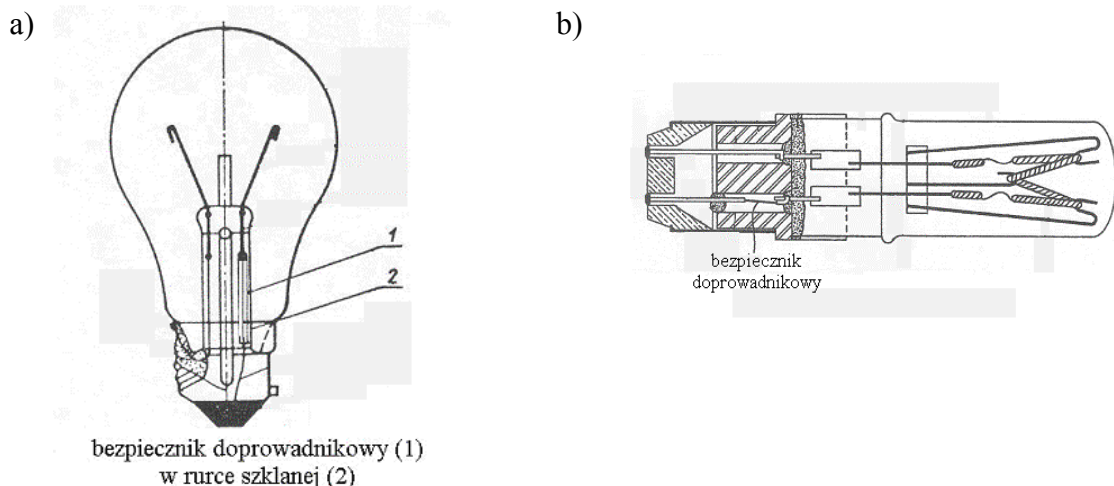
Żarówki gazowane. W cienkościennych dużych bańkach żarówek głównego szeregu, ze zwykłego szkła sodowo-wapiennego, nie można stosować ciśnienia znacznie większego niż atmosferyczne. Bańkę napełnia się gazem o ciśnieniu mniejszym od atmosferycznego ($0,06 \div 0,09$ MPa), aby w nagrzanej żarówce nie przekraczało ono ok. $0,15$ MPa. W porównaniu z żarówką próżniową spowalnia to na tyle proces sublimacji wolframu z żarnika, że jego temperaturę można podnieść o $200 \div 400$ K, zależnie od składu atmosfery, zachowując tę samą trwałość i zwiększając skuteczność świetlną oraz temperaturę barwową światła.

Niestety zwiększają się straty ciepłe żarnika, bo występuje konwekcja, której nie ma w żarówce próżniowej. Przeciwdziała się temu stosując żarnik o jak najmniejszym gabarycie oraz gaz o dużej masie cząsteczkowej, a więc o cząsteczkach mało ruchliwych. Wchodzi w rachubę:

Gaz	N ₂	A	Kr	Xe
Masa atomowa	14,00	39,95	83,80	131,3
Zawartość w atmosferze % wagowo	75,5	1,3	0,0003	0,00004

Początkowo bańkę napełniano azotem (N₂), ale korzyści były mierne ze względu na małą masę atomową oraz pobór energii na dysocjację cieplną cząsteczek dwuatomowych. Obecnie powszechnie stosuje się **argon** (A), najbardziej rozpowszechniony w przyrodzie i wobec tego najtańszy gaz szlachetny. Ma on tu jednak – jak wszystkie gazy szlachetne – istotną wadę, a mianowicie małą energię jonizacji i małe napięcie zapłonu łuku. Przy przerwaniu żarnika u kresu jego trwałości, dochodziłoby przy napięciu 110 V i wyższym do zapłonu łuku w miejscu przerwy i do eksplozji żarówki. Zagrożenie to opanowuje się dwójako:

- bańkę napełnia się nie czystym argonem, ale dodaje się $5 \div 15$ % azotu, który spełnia rolę **inhibitora łuku**, podnosi napięcie zapłonu łuku,
- żarówkę wyposaża się w **bezpiecznik doprowadnikowy** (rys. 5) z drutu monelowego (67% Ni + 30% Cu + Fe, Mn, C) o średnicy $0,14 \div 0,2$ mm, o zdolności wyłączania około 1,5 kA, współpracujący wybiórczo z bezpiecznikiem instalacyjnym $I_n \geq 6$ A lub z nadmiarowym wyłącznikiem instalacyjnym $I_n \geq 6$ A.



Rys. 5. Bezpieczniki doprowadnikowe w żarówkach 230 V: a) zwykłej; b) halogenowej

Zastąpienie argonu znacznie droższym **kryptonem** (Kr) pozwala zwiększyć skuteczność świetlną o dalsze 10%, niewiele, bo krypton jonizuje się jeszcze łatwiej i trzeba zwiększyć procentową dawkę azotu. Podobnie rzecz wygląda przy przejściu od kryptonu do **ksenonu** (Xe). Zagrożenia eksplozji przepalającej się żarówki nie ma w przypadku żarówek na napięcie znamionowe bardzo niskie (ELV), np. 12 V; nie wymagają one dodatku azotu jako inhibitora łuku. Zarazem dzięki małej objętości bańki można ją w całości napęlić droższym gazem szlachetnym, kryptonem, a nawet ksenonem, oraz zwiększyć ciśnienie gazu (do $0,4 \div 0,5$ MPa) i tą drogą znacznie podnieść temperaturę roboczą żarnika i skuteczność świetlną. Dodatkowym czynnikiem, który to ułatwia, jest fakt, że im niższe napięcie znamionowe, tym *ceteris paribus* większa średnica drutu żarnika.

Żarówki halogenowe. Już w roku 1915 powstał, a w roku 1959 został praktycznie wdrożony pomysł odwracalnego cyklu halogenowego. Poza gazem obojętnym do bańki wprowadza się halogen¹ (początkowo jod, obecnie raczej brom), który (rys. 6) w strefie (1) najgorętszej, tuż przy żarniku, występuje w postaci zdysocjowanej. W strefie pośredniej (2) halogen wiąże ulatujące z żarnika atomy wolframu tworząc halogenek². Pozostaje on lotny, nie kondensuje, nie osiada na bańce, jeśli w każdym miejscu strefy chłodniejszej (3) temperatura jest dostatecznie wysoka, co najmniej 250°C w przypadku jodku. Krążąc we wnętrzu bańki cząsteczka halogenku ponownie trafia do strefy pośredniej, gdzie dysocjuje, a wolny wolfram ma szansę trafić znowu do strefy najgorętszej i osiąść na żarniku. Jeśli nie, to opisany proces trwa nadal, a wolfram nie jest bezpowrotnie tracony. Mimo to żarówka halogenowa nie ma nieograniczonej trwałości z oczywistych powodów:

- wolfram najintensywniej sublimuje z przewężeń żarnika i innych plamek gorących, a powraca niekoniecznie w te miejsca,
- po wyłączeniu żarówka stygnie i nieco halogenku osiada na bańce.

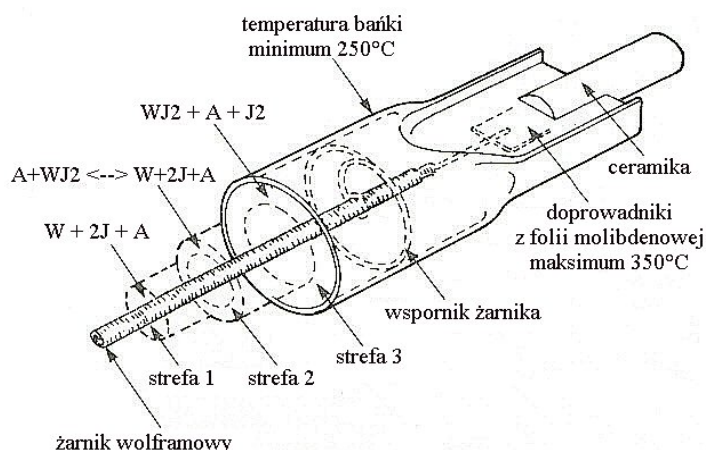
Bańka żarówki halogenowej w miarę możliwości ma kształt cylindryczny z żarnikiem umieszczonym osiowo (rys. 6, 7). Pozwala to utrzymać w każdym punkcie bańki wymaganą temperaturę i – mimo małej powierzchni – bańka wolno ciemnieje.

Badania za pomocą atomów znaczonych wykazały, że duża trwałość obecnych żarówek halogenowych (jodowanych, bromowanych) jest nie tyle wynikiem odwracalnego cyklu halogenowego, co znacznie wolniejszej sublimacji wolframu dzięki wysokiemu ciśnieniu całkowitemu atmosfery

¹ Halogen – pierwiastek z grupy chlorowców (fluorowców): fluor ⁹F, chlor ¹⁷Cl, brom ³⁵Br oraz jod ⁵³J (nie licząc nietrwałego promieniotwórczego astatu ⁸⁵At).

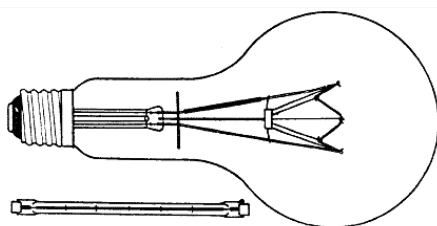
² Halogenek – dwuskładnikowy związek halogenu z innym pierwiastkiem (przede wszystkim z metalem), sól kwasu chlorowcowodorowego: jodek, bromek, chlorek, fluorek.

wypełniającej bańkę i dużemu ciśnieniu cząstkowemu¹ pary wolframu w otoczeniu żarnika.



Rys. 6. Charakterystyczne strefy temperaturowe w żarówce halogenowej

Na skuteczny odwracalny cykl halogenowy można by liczyć dopiero w żarówce fluorowanej. Fluorek wolframu ma najwyższą ze wszystkich halogenków temperaturę dysocjacji cieplnej. Wobec tego dysocjowałby głównie w pobliżu płamek gorących i wolfram powracałby tam, gdzie jest najpotrzebniejszy. Do realizacji tego efektownego pomysłu byłby jednak potrzebny materiał na bańkę żarówki wytrzymujący działanie fluoru i jego związków w wysokiej temperaturze i do tego – przezroczysty; na razie nadziei nie widać.



Rys. 7. Porównanie wymiarów dwóch żarówek 1000 W: zwykłej (u góry) i halogenowej liniowej dwustronnie trzonkowanej (u dołu)

Ze względu na wysoką temperaturę pracy bańkę żarówki halogenowej wykonuje się ze szkła kwarcowego. Ponieważ ma ono bardzo mały współczynnik rozszerzalności cieplnej ($5,8 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), zatopione w nim doprowadniki trzeba wykonać z plastycznej folii molibdenowej (rys. 6). Jeśli żarówka nie ma drugiej, zewnętrznej ochronnej bańki ze zwykłego szkła, to nie należy jej dotykać gołymi rękoma. Pod działaniem potu, zawierającego sole, tworzą się ośrodki krystalizacji kwarcu o zmienionej rozszerzalności cieplnej, co grozi mętnieniem i pękaniem bańki. W razie nieuważnego dotknięcia bądź zabrudzenia, bańkę należy przemyć spirytusem przed kolejnym załączeniem i nagrzaniem żarówki.

2.3. Korekcja widma i rozsyłu światła

Możliwości korekcji widma są nieduże, bo widmo promieniowania żarnika wynika z zasad inkandescencji (rys. 2). **Odbłyśniki i filtry absorpcyjne** nic do tego widma nie dodają, mogą tylko ująć dzięki selektywnemu odbiciu, przepuszczaniu i pochłanianiu. Ich monochromatyczne (widmowe) współczynniki odbicia ρ_λ , przepuszczania τ_λ i pochłaniania α_λ wykazują pożądaną za-

¹ Ciśnienie cząstkowe (ciśnienie parcjale) – ciśnienie jednego z gazów w mieszaninie gazów idealnych; jest równe ciśnieniu, jakie miałby dany składnik mieszaniny zajmując całą jej objętość i mając jej temperaturę. Całkowite ciśnienie mieszaniny gazów jest równe sumie ciśnień cząstkowych poszczególnych składników.

leżność od długości fali padającego promieniowania. Nieuchronnym skutkiem jest zawsze zmniejszenie strumienia świetlnego wysyłanego przez żarówkę, a zatem – zmniejszenie skuteczności świetlnej. Dla ograniczenia luminancji i zapobiegania oślnieniu zwykle żarówki miewają:

- **bańki ze szkła matowanego** (ubytek strumienia świetlnego 3...6%) o powierzchni wewnętrznej trawionej kwasem,
- **bańki ze szkła opalizowanego** (ubytek strumienia ok. 15%) o powierzchni wewnętrznej elektrostycznie pokrytej warstewką, glinki kaolinowej albo krzemionki i dwutlenku tytanu, rozpraszającą światło (softone).

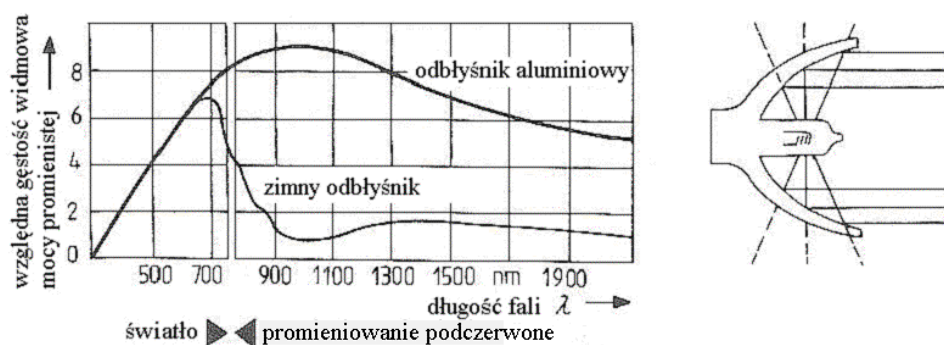
Natomiast dla uzyskania specjalnych efektów oświetleniowych zwykle żarówki miewają **bańki ze szkła barwionego** skrośnie lub powierzchniowo (ubytek strumienia 30÷95%); bańki te miewają też wyszukane kształty (żarówki fasonowe, świecowe, rurowe). Są wśród nich **bańki ze szkła neodymowego** (ubytek strumienia 30÷40%, zwiększenie temperatury barwowej najbliższej o 200 K), barwionego związkami neodymu; bańka jest filtrem absorpcyjnym silnie pochłaniającym promieniowanie o barwie żółtej i pomarańczowej. W uzyskaniu pożądanego rozsyłu mogą pomóc **bańki zwierciadlane** (ubytek strumienia 10÷20%), z odbłyśnikiem wewnętrznym na kopule lub na szyjce, nienarażonym na wpływy środowiska, wykonanym przez próżniowe odparowanie aluminium (odbłyśnik srebrzysty) lub stopu Cu-Al (odbłyśnik złocisty).

Z rozkładu widmowego egzytancji promienistej żarówki halogenowej wynika, że ze względu na wyższą temperaturę żarnika emituje ona większą dawkę **nadfioletu** niż zwykła żarówka, a bańka ze szkła kwarcowego to promieniowanie przepuszcza na zewnątrz. Trzeba o tym pamiętać przy oświetlaniu obiektów wrażliwych na nadfiolet: barwnych obrazów i rycin, tkanin i wyrobów ze skóry. Zagrożenie dla człowieka nie jest duże. Przy natężeniu oświetlenia 1000 lx wytworzonym przez żarówki halogenowe, natężenie napromienienia [W/m^2] nadfioletem UV-B i UV-C sięga zaledwie 2% wartości występującej na wolnym powietrzu przy czerwcowym słońcu w południe. Inaczej mówiąc, 8 godzin ekspozycji przy żarówkach halogenowych odpowiada 10-minutowej ekspozycji przy czerwcowym słońcu. Przy długim czasie ekspozycji i/lub większym natężeniu napromienienia wskazane są żarówki o podwójnej bańce lub oprawy z szybką pochłaniającą nadfiolet. Przy natężeniu oświetlenia znacznie większym niż 1000 lx narażenie byłoby poważniejsze, ale wtedy chodzi o oświetlenie miejscowe, przy którym czynnikiem dokuczliwym i oczywistym bez przeprowadzania pomiarów staje się również promieniowanie podczerwone.

Dla zmniejszenia w emitowanym widmie zawartości **podczerwieni** stosuje się zimne odbłyśniki (zimne zwierciadła), zwłaszcza w kompaktowych oprawach żarówek halogenowych (rys. 8). Są to filtry interferencyjne, wielowarstwowe bardzo cienkie powłoki naprzemian z dwóch różnych materiałów o znacznie różniących się współczynnikach załamania światła (zwierciadła dichroiczne). Idealny zimny odbłyśnik miałby współczynnik odbicia $\rho_\lambda = 1$ w zakresie widzialnym i współczynnik przepuszczania $\tau_\lambda = 1$ w zakresie podczerwieni. Służą do oświetlania obiektów wrażliwych na ciepło; co najmniej o połowę redukują strumień cieplny emitowany w kierunku świecenia. Przy instalowaniu opraw z zimnym odbłyśnikiem trzeba pamiętać, że w kierunku przeciwnym, do tyłu oprawy, jest kierowana znaczna moc cieplna.

W przypadku bezcieniowych lamp operacyjnych stosuje się ponadto filtry podczerwieni, przez które przechodzi światło skierowane na pole operacyjne. Promieniowanie podczerwone musi być praktycznie wyeliminowane, aby nie dopuścić do przegrzania i wysuszenia¹ pola operacyjnego. Mimo to trzeba kontrolować efekt cieplny promieniowania widzialnego, bo w polu operacyjnym wytwarza się natężenie oświetlenia od 10 000 lx do 100 000 lx, zależnie od rodzaju zabiegu. Dzięki filtrom wymagane natężenie oświetlenia wytwarza się przy natężeniu napromienienia (wyrażonym w W/m^2) blisko 10-krotnie mniejszym niż przy użyciu żarówek halogenowych bez żadnych filtrów.

¹ Podczas kilkugodzinnej operacji na otwartym brzuchu pacjent może utracić 2 litry płynów przez parowanie z rany operacyjnej.



Rys. 8. Zasada zimnego odbłyśnika [7]

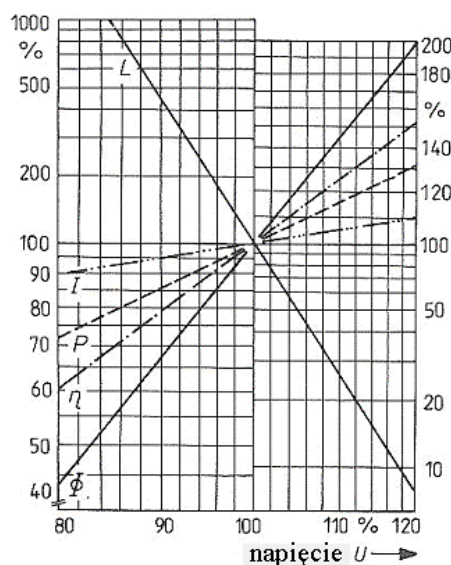
Żarówki z odzyskiem energii. Skuteczność świetlną żarówki udaje się zwiększyć (o 20÷30%) nakładając na powierzchni bańki filtr interferencyjny działający odwrotnie niż wyżej wspomniany: przepuszczający promieniowanie widzialne, a odbijający z powrotem w kierunku żarnika promieniowanie podczerwone.

Żarówki z luminoforem. Jest to na razie kolejny pomysł ze sfery fantazji na żarówkę o rekordowej skuteczności świetlnej, podobnie jak wcześniej wspomniany żarnik nagrany do 6500 K i żarówka fluorowana. Bywa jednak, że z czasem udaje się zrealizować koncepcje uważane wcześniej za nierealne. Chodzi o pokrycie bańki luminoforem, który zamieniałby promieniowanie podczerwone w promieniowanie widzialne, czyli luminoforem antystokesowym, działającym wbrew regule Stokesa (rozdz. 3). Byłoby to możliwe, gdyby cząsteczka luminoforu emitowała kwant promieniowania dopiero po pochłonięciu dwóch lub więcej kwantów promieniowania absorbowanego i czyniła to z wystarczająco dużym prawdopodobieństwem.

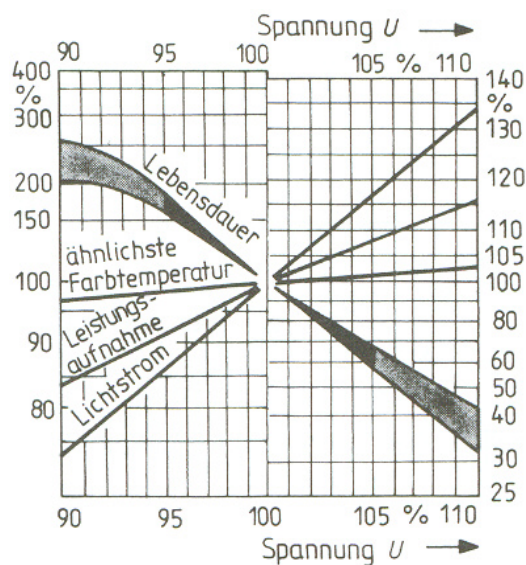
2.4. Problemy eksploatacyjne

Wrażliwość żarówek na odchylenia napięcia zasilającego jest większa, niż innych źródeł światła, dopóki mowa o odchyleniach nie przekraczających kilkunastu procent, tzn. nie zagrażających wygasaniem lamp wyładowczych. Zależność tę można przedstawić w postaci funkcji potęgowej o wykładniku zależnym od temperatury roboczej żarnika i wypełnienia bańki (próżnia czy gaz, skład atmosfery gazowej i jej ciśnienie). Żarówki zwykłe głównego szeregu (rys. 9) silniej reagują na odchylenia napięcia niż żarówki halogenowe (rys. 10). Wykazują w przybliżeniu następującą zależność istotnych parametrów od napięcia:

moc pobierana:	$P = P_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{1,5}$	prąd pobierany:	$I = I_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{0,5}$
strumień świetlny:	$\Phi = \Phi_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{3,6}$	skuteczność świetlna:	$\eta = \eta_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{2,3}$
trwałość:	$L = L_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{-14}$		



Rys. 9. Wpływ względnej wartości napięcia zasilającego (U) na względną wartość parametrów żarówek zwykłych [7]: trwałość (L), moc pobieraną (P), prąd pobierany (I), strumień świetlny (Φ), skuteczność świetlną (η)



Rys. 10. Wpływ względnej wartości napięcia zasilającego (U) na względną wartość parametrów żarówek halogenowych [7]: trwałość (*Lebensdauer*), moc pobieraną (*Leistungsaufnahme*), strumień świetlny (*Lichtstrom*), temperaturę barwową najbliższą (*ähnlichste Farbtemperatur*)

Uwaga: na osi rzędnych (pionowej) podziałka w ćwiartkach II oraz IV dotyczy tylko trwałości L (*Lebensdauer*).

Lampy zwykle pracują przy napięciu zmieniającym się i wypada poradzić sobie z taką sytuacją, przewidzieć jej konsekwencje. Ilustracją niech będzie przykład najprostszy. Grupa żarówek jest załączona połowę czasu użytkowania $0,5 \cdot T_u$ (wieczorem) przy napięciu $0,95 \cdot U_n$, a połowę czasu użytkowania $0,5 \cdot T_u$ (nocą) – przy napięciu $1,05 \cdot U_n$. Określić wytwarzaną przez nie ilość światła, pobieraną energię oraz ich rzeczywistą trwałość.

Parametry charakteryzujące działanie żarówek w rozważanych warunkach użytkowania są następujące:

przy $0,95 \cdot U_n$	strumień świetlny	$\Phi_1 = 0,95^{3,6} \cdot \Phi_n = 0,83 \cdot \Phi_n$
	moc pobierana	$P_1 = 0,95^{1,5} \cdot P_n = 0,93 \cdot P_n$
	trwałość	$L_1 = 0,95^{-14} \cdot L_n = 2,053 \cdot L_n$
przy $1,05 \cdot U_n$	strumień świetlny	$\Phi_2 = 1,05^{3,6} \cdot \Phi_n = 1,19 \cdot \Phi_n$
	moc pobierana	$P_2 = 1,05^{1,5} \cdot P_n = 1,08 \cdot P_n$
	trwałość	$L_2 = 1,05^{-14} \cdot L_n = 0,51 \cdot L_n$

Rzeczywiście wytwarzana ilość światła wynosi

$$Q = 0,5 \cdot (0,83 + 1,19) \cdot \Phi_n T_u = 1,01 \cdot \Phi_n T_u \approx \Phi_n T_u$$

Rzeczywiście zużywana energia elektryczna wynosi

$$A = 0,5 \cdot (0,926 + 1,076) \cdot P_n T_u = 1,00 \cdot P_n T_u$$

Rzeczywista trwałość żarówek wynika z równania określającego, że łączne względne zużycie równa się 1 (100%):

$$\frac{0,5 \cdot L}{2,05 \cdot L_n} + \frac{0,5 \cdot L}{0,51 \cdot L_n} = 1 \quad \text{stad:} \quad L = 0,81 \cdot L_n$$

Działając w podanych warunkach żarówki wytworzą niemal taką samą ilość światła i zużyją taką samą energię, jak gdyby pracowały stale przy napięciu równym znamionowemu, ale ich trwałość obniży się o 19%. Zatem koszt wytworzenia tej samej ilości światła będzie większy. Gdyby pracowały na zmianę przez taki sam czas przy napięciu $0,90 \cdot U_n$ i $1,10 \cdot U_n$, to wyniki byłyby następujące:

$$Q = 1,05 \cdot \Phi_n T_u$$

$$A = 1,00 \cdot P_n T_u$$

$$L = 0,50 \cdot L_n$$

Takie przykłady można mnożyć, zmieniając dane, i okaże się każdorazowo, że praca przy napięciu znamionowym – jeżeli odbiornik elektryczny jest prawidłowo skonstruowany – jest najkorzystniejsza.

Prąd załączania żarówek. Podobnie jak inne metale w postaci czystej, wolfram ma dodatni i dość duży temperaturowy współczynnik rezystywności $\alpha = 0,0046 \text{ K}^{-1}$. Po załączeniu temperatura żarnika szybko zwiększa się o $2300 \div 3300 \text{ K}$ (rys. 3) ponad temperaturę otoczenia i jego rezystancja wzrasta

$$1 + \alpha(\tau_p - \tau_o) = 1 + 0,0046 \cdot (2300 \div 3300) = (12 \div 15) - \text{krotnie}$$

W tym samym stosunku prąd załączeniowy jest większy niż prąd znamionowy. Powyższe oszacowanie nie jest dokładne z trzech powodów:

- zakłada liniową zależność rezystywności od temperatury mimo bardzo dużej różnicy temperatur,
- pomija łagodzący wpływ impedancji instalacji zasilającej,
- pomija łagodzący wpływ nieustalonego stanu cieplnego żarnika.

Każde załączenie nadwiera przewężenia żarnika szczególnie narażone na przegrzewanie, bo mają większą rezystancję, a mniejszą cieplną stałą czasową, niż inne części żarnika o tej samej długości. Zarazem oddziaływania elektrodynamiczne tak dużego prądu wywołują drgania lokalnie przegrzanego żarnika. Ma to umiarkowane znaczenie w przypadku żarówek głównego szeregu (w ogóle nie świecąc w sposób ciągły wytrzymują do 500 000 załączeń), ale duże w przypadku żarówek o szczególnie wysokiej temperaturze roboczej żarnika: fotograficznych i projektorowych. Ich prąd załączeniowy można ograniczać włączając szeregowo termistor NTC albo zasilając żarówki poprzez zasilacz elektroniczny z ogranicznikiem prądu. Termistor potrzebuje $6 \div 12$ minut na ostygnięcie przed kolejnym załączeniem; po przeminieciu prądu załączeniowego może być zwierany, aby przyspieszyć jego stygnięcie.

Udary prądu załączeniowego żarówek wolframowych większej mocy uwzględnia się przy doborze zabezpieczeń nadprądowych, które powinny je przetrzymywać, i przy doborze zdolności załączania rozłączników.

Żarówki z włóknem węglowym, używane obecnie głównie do celów dekoracyjnych, dzięki ujemnemu współczynnikowi temperaturowemu rezystywności $\alpha = -0,0007 \text{ K}^{-1}$, przy załączaniu pobierają prąd ponad 2-krotnie mniejszy niż prąd znamionowy.

Ściemnianie żarówek (ang. *dimming*) jest znacznie łatwiejsze niż obniżanie strumienia świetlnego lamp wyładowczych. Najprostsze rozwiązanie polega na sterowaniu fazowym w obwodzie napięcia sieciowego (50 Hz, 230 V), np. na nastawianiu kąta fazowego zapłonu triaka lub tyrystora w obwodzie żarówki lub żarówek. Przy większym kącie zapłonu towarzyszy temu pobór prądu silnie odkształconego i znaczne zwiększenie współczynnika tętnienia światła. Wady te likwiduje rozwiązanie doskonalsze polegające na sterowaniu w obwodzie wyjściowym „transformatora elektronicznego” zasilającego żarówki ELV, czyli przekształtnika energoelektronicznego o napięciu wyjściowym na przykład 20 kHz lub 50 kHz, 11,5 V $\pm 6\%/-10\%$.

Niezależnie od użytych narzędzi ściemniania (autotransformator, transduktor, triaki, tyrystory, tranzystory, transformator elektroniczny) skutki energetyczne i fotometryczne w prosty sposób zależą od wartości skutecznej napięcia na zaciskach żarówek. Ubocznym skutkiem ściemniania jest zawsze zmniejszenie skuteczności świetlnej i temperatury barwowej, bo polega ono na obniżaniu średniej temperatury żarnika. W przypadku żarówek halogenowych zbyt głębokie obniżanie wartości skutecznej napięcia grozi obniżeniem temperatury w stopniu zakłócającym odwracalny cykl halogenowy.

Pomysłem poronionym jest ściemniacz w postaci diody włączanej szeregowo z żarówką, od czasu do czasu pojawiający się na rynku przy lampkach nocnych albo diody włączanej przez administrację budynku w obwód oświetlenia piwnicy, aby uniemożliwić tam korzystanie z innych odbiorników niż żarówki. Oznacza to obniżenie

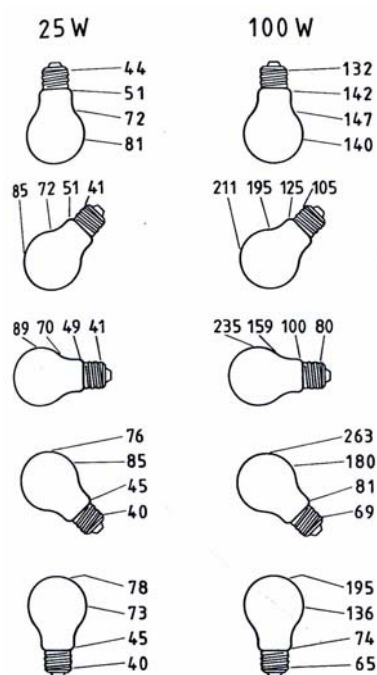
wartości skutecznej napięcia do poziomu $U_n / \sqrt{2} = 0,71 \cdot U_n$ ¹,

strumienia świetlnego do poziomu $0,71^{3,6} \Phi_n = 0,29 \cdot \Phi_n$,

mocy pobieranej do poziomu $0,71^{1,6} P_n = 0,58 \cdot P_n$,

a zatem – dwukrotnego zmniejszenia skuteczności świetlnej, bo $0,29 \Phi_n / 0,58 P_n = 0,50 \eta_n$.

Co prawda takie skutki występują przy obniżeniu napięcia do poziomu $0,71 \cdot U_n$ niezależnie od użytej metody, ale w tym przypadku dochodzi jeszcze jeden skutek – znaczne zwiększenie współczynnika tętnienia światła przy jednoczesnym niekorzystnym zmniejszeniu jego częstotliwości ze 100 Hz do 50 Hz.









Rys. 11. Temperatura różnych punktów powierzchni żarówek głównego szeregu o mocy 25 W oraz 100 W zależnie od położenia pracy (przy temperaturze otoczenia +25 °C) [4]

Żarówka jako źródło ciepła. Około 95% pobranej mocy elektrycznej żarówka rozprasza w postaci mocy cieplnej przez promieniowanie, konwekcję i kondukcję. Powierzchnie zewnętrzne popularnych żarówek głównego szeregu osiągają znaczne temperatury (rys. 11), a żarówek halogenowych 12 V jeszcze wyższe. Zagraża to sąsiadującym obiektom: elementom oprawy, podłożu, na którym jest ona mocowana i pobliskim powierzchniom z materiałów łatwopalnych. Ze względu na zagrożenie pożarowe należy dobierać oprawy oświetleniowe przystosowane do

¹ A nie do poziomu $0,5 \cdot U_n$, jak nauczają moderatorzy forum ise.

zagrożenie pożarowe należy dobierać oprawy oświetleniowe przystosowane do warunków ich instalowania (tabl. 3) i pod żadnym pozorem nie przekraczać największej dopuszczalnej mocy źródła światła określonej przez wytwórcę oprawy.

Tablica 3. Umowne oznaczenia na oprawach oświetleniowych

Symbol	Przeznaczenie oprawy oświetleniowej
	Oprawa przystosowana do mocowania na podłożu z materiału o temperaturze zapłonu nie mniejszej niż 200°C
dawniej:  	Oprawa przystosowana do instalowania w miejscach zagrożonych pożarem z powodu występowania palnych pyłów i włókien
	Oprawa przystosowana do mocowania w ścianach warstwowych
	Oprawa przystosowana do montażu w meblach z materiałów trudno zapalnych. o temperaturze zapłonu nie mniejszej niż 200°C
	Oprawa przystosowana do montażu w meblach z materiałów o nieokreślonych właściwościach palnych (również z materiałów łatwo zapalnych)

3. Lampy wyładowcze – problemy wspólne

Lampy wyładowcze do ogólnych celów oświetleniowych i do celów specjalnych mają wspólne cechy i wspólne problemy związane z zasadą działania, budową, użytkowymi parametrami fotometrycznymi, zasadami doboru i instalowania oraz eksploatacji. Zbiorcze ich przedstawienie ma wprowadzić pewien ład w przekazywaniu wiedzy na ich temat.

Zasada wytwarzania światła. Do wytwarzania światła lampy wyładowcze wykorzystują zjawisko **luminescencji**, tzn. emisji promieniowania optycznego, przez wzbudzone atomy i/lub cząsteczki, przewyższającego promieniowanie inkandescencyjne w tych samych warunkach. Jest to zatem promieniowanie, którego energia powstaje kosztem innych rodzajów energii, niż energia cieplna. Spośród różnych odmian tego zjawiska w lampach elektrycznych są wykorzystywane dwie odmiany luminescencji:

- **Elektroluminescencja** – do wzbudzenia atomów lub cząsteczek pochłaniana jest energia pola elektrycznego (świecenie wyładowania elektrycznego w gazie, świecenie złącza p-n diody świecącej),
- **Fotoluminescencja** – energii do wzbudzenia dostarcza promieniowanie widzialne lub nadfioletowe. Zależnie od tego, po jakim czasie t zanika świecenie po ustaniu wzbudzenia rozróżnia się **fluorescencję** ($t < 10^{-8}$ s), np. świecenie luminoforów w świetlówkach, rtęciówkach i innych lampach oraz **fosforescencję** ($t \gg 10^{-8}$ s), np. świecenie znaków drogowych, podziałówek mierników. Śladową fosforescencję wykazują też luminofory, co nieco zmniejsza współczynnik tętnienia światła lamp z luminoforem zasilanych napięciem 50 Hz.

Ciśnienie w jarzniku lampy. Wiele własności lampy zależy od tego, czy należy ona do lamp

nisko- czy wysokoprężnych, przy czym ta klasyfikacja bywa błędnie interpretowana. Istotne jest to, czy ciśnienie cząstkowe głównego składnika atmosfery wypełniającej jarznik jest na poziomie zbliżonym do 1 Pa, czy znacznie wyższe.

Lampy niskoprężne mają wspomniane ciśnienie rzędu 1 Pa, aby wyeksponować promieniowanie rezonansowe, powstające w następstwie przejścia wzbudzonego atomu z wyższego poziomu energetycznego od razu do stanu podstawowego. Wymaga to ciśnienia tak małego, aby uniknąć wzajemnych oddziaływań sąsiednich atomów. Należą do tej grupy niskoprężne lampy rtęciowe (światłówki, lampy bakteriobójcze, lampy do fototerapii), w których eksponuje się linię rezonansową 253,7 nm wytłumiając linię 184,9 nm oraz niskoprężne lampy sodowe, w których wykorzystuje się dublet sodowy, tzn. dwie bardzo bliskie linie rezonansowe w zakresie widzialnym: 589 i 589,6 nm. Małe ciśnienie sprawia, że mała jest objętościowa gęstość mocy wyrażona w watach lub w lumenach na jednostkę objętości jarznika. Zatem objętość jarznika jest duża, co sprzyja dużym stratom ciepłym zwłaszcza, jeżeli temperatura robocza jest wysoka, jak w sodówkach. Niskie ciśnienie sprawia też, że po krótkotrwałym zaniku napięcia ponowny zapłon następuje bezzwłocznie. W przewidywanym zakresie temperatur otoczenia w jarzniku występuje nasycona para rtęci lub sodu, bo ten składnik podstawowy jest wprowadzany z nadmiarem. W rezultacie ciśnienie pary i parametry wyładowania zależą od temperatury najchłodniejszego miejsca jarznika. Wobec tego lampa jest wrażliwa na zmiany temperatury otoczenia, jeśli jej temperatura robocza jest niska, jak w światłówkach.

Lampy wysokoprężne, w których ciśnienie cząstkowe głównego składnika atmosfery jest znacznie większe niż 1 Pa, na ogół rzędu $10^5 \div 10^7$ Pa. W widmie dominują wyższe przejścia energetyczne, w miarę wzrostu ciśnienia widmo z prążkowego przechodzi w ciągłe. Po krótkotrwałym zaniku napięcia jarznik jest wypełniony zdejonizowaną parą o dużym ciśnieniu, wobec czego ponowny zapłon jest możliwy dopiero po ostygnięciu jarznika. Jednakowoż lampę można zapalić natychmiast, jeśli przyłoży się do elektrod jarznika napięcie zapłonowe znacznie wyższe (od kilkudziesięciu kilowoltów) niż potrzebne do zapłonu zimnej lampy. Aby wykonać odpowiednią izolację elektryczną, przystosowane do tego lampy (metalohalogenkowe) muszą być dwustronnie trzonkowane. Natomiast czas ponownego zapłonu nagrzanej lampy sodowej wysokoprężnej można skrócić poniżej minuty dzięki elektrodzie zapłonowej na ścianie jarznika ceramicznego.

Widmo promieniowania wyładowania wytwarzanego na drodze elektroluminescencji we wnętrzu jarznika może być:

- bezpośrednio przydatne dla celów oświetleniowych, bez korekty za pomocą luminoforów; dotyczy to lamp sodowych nisko- i wysokoprężnych oraz lamp metalohalogenkowych,
- przydatne dla celów oświetleniowych dopiero po przetworzeniu przez warstwę luminoforu na wewnętrznej powierzchni jarznika lub bańki zewnętrznej, bo widmo promieniowania pierwotnego leży w zakresie nadfioletu w całości (światłówki) lub w dużej części (lampy rtęciowe i rtęciowo-żarowe).

Ze względów zdrowotnych w przypadku wszelkich lamp ogranicza się emisję na zewnątrz promieniowania nadfioletowego, jeśli jest ono wytwarzane w jarzniku. Zapewniają to wykonane ze zwykłego szkła sodowo-wapniowego: jarznik światłówki i zewnętrzna bańka osłaniająca jarznik innych lamp, zwłaszcza lamp rtęciowych i rtęciowo-żarowych.

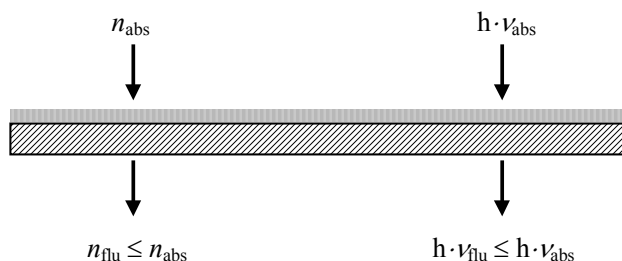
Luminofor przetwarza pochłaniane widmo absorpcyjne w emitowane widmo fluorescencyjne zgodnie z regułą Stokesa (rys. 12): luminofor emituje liczbę kwantów nie większą niż pochłania, o energii nie większej niż pochłania. Zatem liczba kwantów promieniowania fluorescencyjnego n_{flu} jest nie większa niż liczba kwantów promieniowania absorpcyjnego n_{abs} , a energia kwantu promieniowania fluorescencyjnego $h \cdot \nu_{flu}$ jest nie większa niż energia kwantu promieniowania absorpcyjnego $h \cdot \nu_{abs}$. Skuteczność przetwarzania promieniowania przez luminofor może być w prostych sy-

tuacjach zdefiniowana następująco:

$$\eta_k = \frac{n_{\text{flu}}}{n_{\text{abs}}} \quad \text{– sprawność kwantowa luminoforu,}$$

$$\eta_\lambda = \frac{h \cdot \nu_{\text{flu}}}{h \cdot \nu_{\text{abs}}} = \frac{\nu_{\text{flu}}}{\nu_{\text{abs}}} = \frac{\lambda_{\text{abs}}}{\lambda_{\text{flu}}} \quad \text{– sprawność falowa luminoforu,}$$

$$\eta_e = \eta_k \cdot \eta_\lambda \quad \text{– sprawność energetyczna luminoforu.}$$



Rys. 12. Ilustracja reguły Stokesa

Luminofor pobudzony promieniowaniem o dużej energii kwantów (np. nadfioletowym) emituje promieniowanie o mniejszej energii (np. widzialne), przesuwając widmo w kierunku fal dłuższych, zmieniając również jego charakter z liniowego w pasmowe. Decyduje o tym skład chemiczny cząsteczek luminoforu, ich struktura i procedura domieszkowania. Sprawność energetyczna luminoforu bezpośrednio wpływa na skuteczność świetlną źródła światła. Sprawność falowa, a zatem i sprawność energetyczna, jest większa, jeśli obie linie widmowe, absorbowana i emitowana są mniej odległe. Z tego powodu w świetłowie tak się ustala ciśnienie pary rtęci w warunkach znamionowych, by dominowała linia rezonansowa 253,7 nm, a nie druga linia rezonansowa rtęci 184,9 nm.

Zapłon lampy. W każdej z lamp wyładowczych stosuje się różne zabiegi umożliwiające bądź tylko ułatwiające zapłon lampy zimnej. Do jarznika wszystkich lamp, poza gazem podstawowym, wprowadza się gaz zapłonowy, tworzący **mieszaninę Penninga** o współczynniku Townsenda znacznie większym niż dla każdego ze składników z osobna. Gazem zapłonowym jest jeden z gazów szlachetnych albo ich mieszanina. Rozwój lawiny Townsenda jest ułatwiony dzięki temu, że potencjał poziomu metastabilnego gazu zapłonowego o dużym ciśnieniu cząstkowym jest nieco wyższy od potencjału jonizacji gazu podstawowego o małym ciśnieniu cząstkowym. Atomy gazu zapłonowego pełnią rolę krótkotrwałego zasobnika energii jonizacji atomów gazu podstawowego. Drugim zabiegiem powszechnie stosowanym jest pokrywanie elektrod emitorem (pastą emisyjną) o małej pracy wyjścia elektronów. W każdej z lamp stosuje się ponadto niektóre z poniższych zabiegów:

- wytwarzanie napięcia zapłonowego statycznego lub impulsowego znacznie wyższego niż napięcie robocze,
- umieszczenie elektrody pomocniczej tuż przy jednej z elektrod głównych, połączonej wielkoproporowo z drugą elektrodą główną, dzięki czemu wyładowanie rozpoczyna się w niewielkiej przestrzeni międzyelektrodowej,
- wstępne podgrzewanie elektrod, by zmniejszyć pracę wyjścia elektronów.

Gaz buforowy. Wprowadzając do jarznika gaz buforowy można zmieniać w pożądanym sposób przebieg charakterystyki napięciowo-prądowej lampy, na przykład uzyskać potrzebną moc lampy przy korzystniejszej kombinacji wartości prądu i napięcia. Chodzi zwłaszcza o to, aby optymalny spadek napięcia w jarzniku podczas normalnej pracy był skorelowany z przewidywanym napięciem znamionowym instalacji zasilającej. Ciśnienie cząstkowe gazu buforowego może być

znacznie większe niż ciśnienie cząstkowe podstawowego składnika. Dzięki temu w wielu lampach ogranicza on znacznie rozpylanie emitera pokrywającego elektrody, czyli korzystnie wpływa na trwałość lampy. Gaz buforowy może jednocześnie pełnić rolę gazu zapłonowego.

Tętnienie światła dotyka wszelkie lampy zasilane prądem przemiennym o częstotliwości sieciowej. W przypadku żarówek efekt jest znakomicie łagodzony dzięki bezwładności cieplnej żarnika, natomiast bezwładność zjawisk elektrycznych w słupie wyładowania jest do tego niewystarczająca. Więcej na ten temat można znaleźć w pierwszym artykule z cyklu Technika oświetleniowa [6].

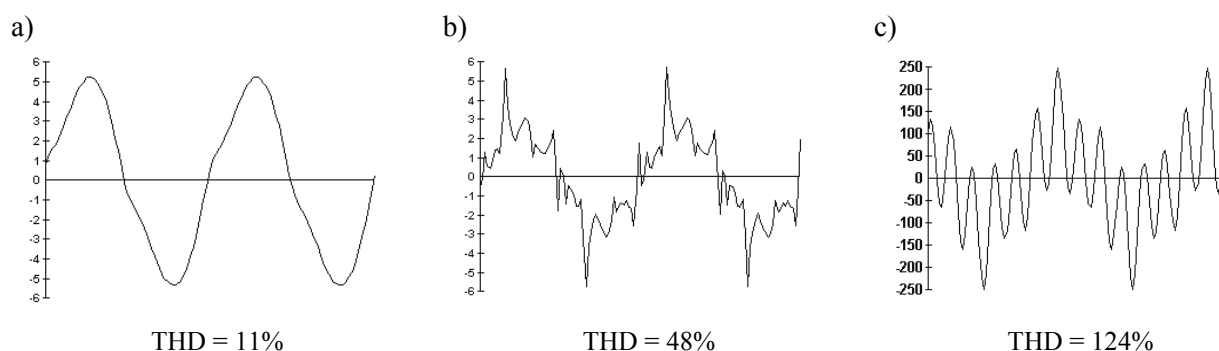
Stabilizacja prądu. Wyładowanie w gazie odznacza się opadającą charakterystyką napięciowo-prądową $u-i$, przedstawia jak gdyby ujemną rezystancję. Aby zapobiec zniszczeniu lampy, trzeba ją przyłączać do sieci w szereg ze statecznikiem ograniczającym prąd, ustalającym punkt pracy na charakterystyce $u-i$. Dla stabilnej pracy napięcie na zaciskach jarznika lampy powinno wynosić około połowy napięcia sieciowego.

Gdyby statecznikiem był rezystor, wytracałby połowę pobieranej mocy i dwukrotnie obniżał skuteczność świetlną układu. Zatem statecznik rezystancyjny jest używany wyjątkowo, w przypadku lampek tłących, zwłaszcza neonowych wskaźników napięcia. Z większości zastosowań lampki tłące są zresztą wypierane przez diody elektroluminescencyjne.

W przypadku lamp wyładowczych zasilanych bezpośrednio napięciem sieciowym 50 Hz stosuje się stateczniki reaktancyjne, na których wytraca się napięcie równe $0,86 \cdot U_n$, bo $\sqrt{0,86^2 + 0,5^2} U_n = U_n$ przy pominięciu strat mocy czynnej w stateczniku. Statecznikiem reaktancyjnym może być transformator rozproszeniowy, dławik nieliniowy (statecznik indukcyjny) albo kondensator (statecznik pojemnościowy). Lampy zasilane prądem dużej częstotliwości mają zasilacz elektroniczny z wbudowanym układem stabilizacji prądu jarznika, tzw. statecznik elektroniczny.

Użycie statecznika indukcyjnego obniża do około 0,5 współczynnik mocy układu, co skłania do wyposażania opraw w kondensatory równoległe do indywidualnej kompensacji mocy biernej.

We wszelkich statecznikach występują straty mocy obniżające skuteczność świetlną lampy łączoną łącznie z jej nieodzownym wyposażeniem. Dyrektywa 2000/55/EC [10], wprowadzona w Polsce dopiero z dniem 7 lipca 2005 r. [11], określa największą dopuszczalną moc pobieraną przez obwody świetlówek, źródeł uczestniczących w wielu krajach w ponad 50% w wytwarzaniu łącznej ilości światła¹.



Rys. 13. Wyniki rejestracji w supermarkecie oświetlonym lampami metalohalogenkowymi 400 W (na osi rzędnych prąd w amperach). Przebieg w ciągu 40 ms prądu pobieranego przez: a) pojedynczą lampę bez kondensatora; b) pojedynczą oprawę z lampą i kondensatorem do kompensacji równoległej; c) rozdzielnicę zasilającą grupę lamp.

¹ Pojęcie objaśnione w pierwszym artykule z cyklu Technika oświetleniowa [6].

Odształcenie prądu. Wyładowanie w jarzniku można odwzorować jako rezystancję nieliniową, a nieliniową charakterystykę $u-i$ mają też powszechnie stosowane stateczniki indukcyjne i elektroniczne. Z obydwu powodów prąd pobierany przez lampy wyładowcze jest odkształcony, a stopień odkształcenia mogą znacznie, a nawet katastrofalnie zwiększyć instalowane w oprawach kondensatory do poprawy współczynnika mocy (rys. 13). Przykładem może być obiekt, w którym takie lampy stanowią główne obciążenie, zasilany z GPZ 110/15 kV zasilającego również stacje trakcyjne z prostownikami 6-pulsowymi, które wprowadzają do sieci poprzedzającej znaczący udział harmonicznych rzędów 5 i 7 oraz 11 i 13, zauważalnych w napięciu zasilającym innych odbiorców. Prąd w instalacji oświetleniowej jest silnie odkształcony, a systematycznie występują warunki, przy wzroście obciążenia trakcyjnego, kiedy płynie prąd 350 Hz zawierający niewiele mniejszą składową 50 Hz (rys. 13c). To sytuacja skrajna, ale rozpowszechnienie lamp wyładowczych i innych odbiorników nieliniowych oznacza konieczność rozwiązywania trudnych problemów już przy projektowaniu instalacji, a nie dopiero po jej oddaniu do użytku, kiedy jest za późno na rozwiązania radykalne i naprawdę skuteczne.

Zakłócenia radioelektryczne. Lampy wyładowcze, a zwłaszcza ich zasilacze bądź układy zapłonowo-stabilizujące generują zakłócenia elektromagnetyczne (EMI) i mogą wymagać filtrów przeciwzakłóceń, ekranowania bądź innych środków zapobiegawczych. Pochodzące z do-brych wytwórni elektroniczne stateczniki świetlówek (np. 40 kHz) generują znacznie słabsze zakłócenia niż tradycyjne układy 50 Hz z dławikiem i zapłonikiem tłącym. Problem nabiera ostrości w przypadku lamp zasilanych prądem o częstotliwości rzędu setek kiloherców (świetlówki Endura) megaherców (lampy indukcyjne) i gigaherców (lampy siarkowe), mimo że zasilacze są tuż przy lampie i długość obwodu dużej częstotliwości jest bardzo mała.

Wrażliwość na warunki instalowania. Lampy wyładowcze są znacznie wrażliwsze niż żarówki na odstępstwa od przewidywanych warunków instalowania, na przykład:

- strumień świetlny zwykłej świetlówki znacznie spada w niskiej temperaturze otoczenia,
- świetlówka cold-start przeznaczona do pracy w metalowej oprawie, ubocznie spełniającej rolę wstęgi zapłonowej, nie zaświeca się w innej oprawie lub bez oprawy,
- lampa metalohalogenkowa lub sodowa wysokoprężna niewłaściwie usytuowana względem odbłyśnika lub umieszczona w nieodpowiedniej oprawie, może nieustannie gasnąć i zapalać się co kilka minut; gaśnie, kiedy nadmiernie wzrasta napięcie łuku wskutek zbyt silnego podgrzewania jarznika promieniowaniem odbitym od odbłyśnika.

Ochrona środowiska. Zużyte lampy wyładowcze zagrażają człowiekowi i środowisku, przede wszystkim ze względu na zawartą w nich rtęć (obecną nie tylko w lampach rtęciowych) i luminofoxy. Zużyte lampy wyładowcze powinny być traktowane jako odpady chemicznie aktywne i poddawane recyklingowi w odpowiednich zakładach.

Uwolnioną do środowiska rtęć bakterie, zwłaszcza w osadach dennych, przetwarzają w **metylortęć**, szczególnie toksyczną postać organiczną, poprzez łańcuch pokarmowy zagrażającą człowiekowi. O ile wchłanianie związków nieorganicznych rtęci z przewodu pokarmowego następuje w niewielkim stopniu (kilkanaście procent), o tyle związków organicznych np. metylortęci w blisko 100%. Po wchłonięciu metylortęć poprzez krew doprowadzana jest do wszystkich tkanek organizmu i gromadzi się w nerkach, mózgu oraz wątrobie. Klasycznymi objawami zatrucia metylortęcią są zaburzenie czucia rąk i stóp, zaburzenia słuchu, wzroku, a nawet zaburzenia osobowości polegające na zanikaniu uczuć wyższych.

Początkowo w świetlówkach liniowych dozowano kropelkę o średnicy 2 mm, czyli 56 mg rtęci¹, po czym w rurach o średnicy 26 mm udało się zejść do 24 mg, a w świetlówkach kompakto-

¹ Przed laty Rosjanie znacznie hojniej napełniali świetlówki, dozując nawet 100 mg.

wych – poniżej 10 mg. To niewiele, ale w jednym tylko kraju, w Niemczech, corocznie ładowano w lampy ponad 2 tony rtęci. Dyrektywa RoHS [12, 13] wchodząca w życie 1 czerwca 2006 r. ogranicza zawartość rtęci w świetłówkach kompaktowych do 5 mg, a w innych do 5÷10 mg zależnie od użytych luminoforów. Firma Philips wyprzedzająco informuje, że w wielu świetłówkach serii MASTER już ograniczyła zawartość rtęci do 2 mg. Wyroby spełniające wymagania dyrektywy mają być odpowiednio oznaczane (rys. 14).



Rys. 14. Znaki zgodności z dyrektywą RoHS

Przed kilkunastu laty prasa alarmowała, że POLAM Rzeszów zgromadził na swoim wysypisku ok. 30 000 m³ stłuczki z wybrakowanych świetlówek, zawierającej około 1 tony rtęci. A przy tym każda z podobnych wytwórni świetlówek zużywała rocznie ponad 30 ton luminoforów, z czego część gubiła w najbliższym sąsiedztwie.

W roku 1994 Główny Urząd Cei zakupił na biurowiec budynki po zakładach wytwórczych lamp elektrycznych Polamp (dawniej im. Róży Luksemburg) w Warszawie. Transakcja została anulowana, bo naruszała prawo gospodarcze, ale rozstrzygającym argumentem było zagrożenie zdrowia pracowników GUC rtęcią zawartą w murach i innych elementach budynku.

Zaskakujące może się wydać następujące zestawienie. Nowoczesna świetlówka kompaktowa 15 W zawiera tylko 3 mg rtęci¹, którą łatwo unieszkodliwić po zużyciu lampy. Równoważne żarówki 75 W rtęci nie zawierają, ale w ciągu 8000 h (trwałość wspomnianej świetlówestki) zużywają dodatkowo 480 kWh, co odpowiada emisji przez elektrownie węglowe dodatkowo ok. 18 mg rtęci, a tej emisji i rozproszonej imisji zapobiec niełatwo. Spalanie węgla partycypuje w ponad 40% w zanieczyszczeniu atmosfery rtęcią. Inaczej mówiąc, to żarówka bardziej zatrzuwa środowisko rtęcią niż równoważna świetlówka kompaktowa.

4. Elektrodoowe lampy fluorescencyjne (świetłówestki)

4.1. Dwuetapowe wytwarzanie światła

Koncepcja lamp fluorescencyjnych, bliskich dzisiejszym świetłówestkom liniowym, pojawiła się około roku 1920, udane rozwiązania techniczne – około roku 1930, a na rynku lampy były dostępne od roku 1938. Od tego czasu następuje ich nieustanny rozwój i nadal są oczekiwane różne udoskonalenia.

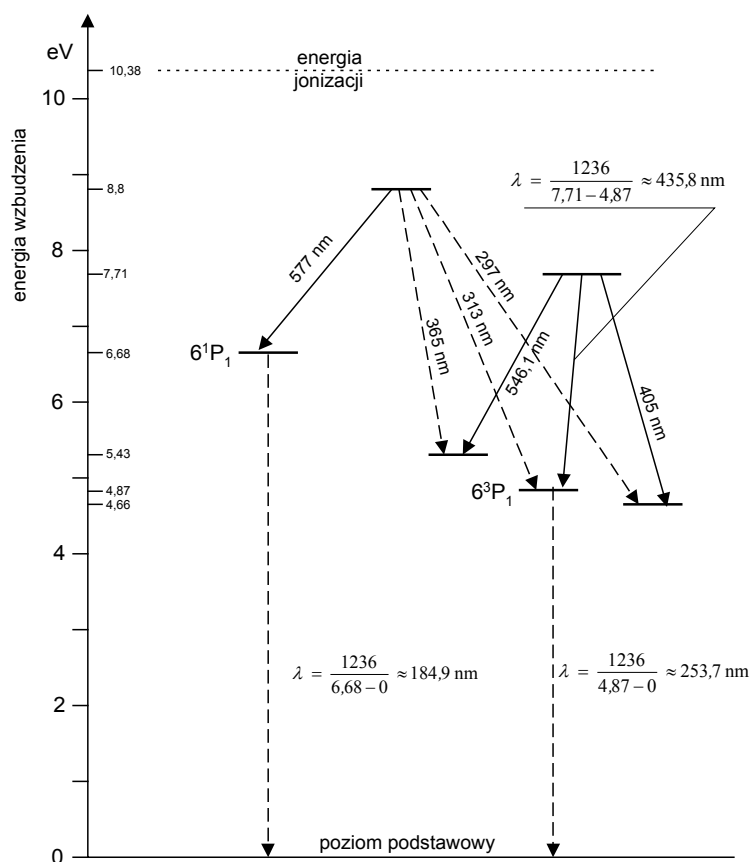
Lampy fluorescencyjne są **niskoprężnymi lampami rtęciowymi**, a zatem wykorzystują **promieniowanie rezonansowe** atomów rtęci emitowane przy przejściu ze stanu wzbudzenia atomu bezpośrednio do stanu podstawowego. W atmosferze o ciśnieniu rzędu 1 Pa, w której są pomijalne wzajemne oddziaływania atomów, mają one ściśle określone dyskretne poziomy energetyczne, jakie mogą osiągać w następstwie wzbudzenia po zderzeniu z elektronem (rys. 15). Zarówno wśród poziomów energetycznych, jak i przejść między nimi, są bardziej i mniej prawdopodobne, a niektóre przejścia – naruszające *reguły wyboru* – są wzbronione. Na rys. 15 przedstawiono poziomy i przejścia energetyczne o dużym prawdopodobieństwie występowania.

W atmosferze rozrzedzonej dominują przejścia rezonansowe, w przypadku rtęci – linie widmowe 184,9 nm oraz 253,7 nm, obie w zakresie nadfioletu UV-C, a więc lampa nieodzwownie wy-

¹ Z powłoką wewnętrzną zapobiegającą absorpcji rtęci przez szkło.

maga luminoforu. Aby skorzystać z większej sprawności falowej, trzeba wyeksponować linię widmową 253,7 nm i wytłumić linię 184,9 nm odpowiednio dobierając ciśnienie cząstkowe pary rtęci ($0,8 \div 1,3$ Pa) oraz inne składniki atmosfery jarznika i ich parametry. W rezultacie bilans mocy w słupie wyładowania świetlówki 40 W, zasilanej prądem 50 Hz, może przedstawiać się następująco:

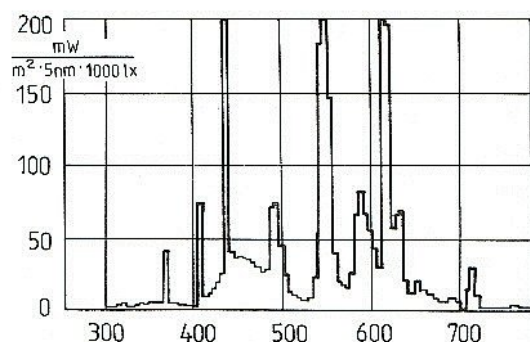
9,2 W	– zderzenia sprężyste elektronów z atomami,
21,3 W	– zderzenia wzbudzające promieniowanie 253,7 nm,
2,0 W	– zderzenia wzbudzające promieniowanie o innej długości fali,
0,3 W	– zderzenia jonizacyjne (o energii $\geq 10,38$ eV),
razem 32,8 W	– moc w słupie wyładowania,
7,2 W	– straty mocy elektrodowe,
razem 40,0 W	– moc całkowita pobierana przez jarznik.



Rys. 15. Ważniejsze termy i ważniejsze przejścia atomu rtęci w atmosferze niskoprężnej (linie widmowe ciągłe występują w zakresie widzialnym widma, linie przerywane w zakresie nadfioletu)

Trudno znacząco poprawić ten bilans mocy odnoszący się do wytwarzania w świetlówce pierwotnego promieniowania nadfioletowego, widma liniowego 253,7 nm. W tym zakresie od kilkudziesięciu lat nie zdarzyło się nic przełomowego i na nic takiego się nie zanosí. Natomiast nieograniczone są możliwości komponowania **luminoforów** przetwarzających to promieniowanie absorpcyjne w promieniowanie fluorescencyjne w zakresie widzialnym. Produkcja luminoforów to technologia najwyższej próby, porównywalna z technologią półprzewodników, jeżeli chodzi o dobór składników, stopnia ich czystości i procedur domieszkowania. Kolejne generacje luminoforów różnią się parametrami barwowymi promieniowania fluorescencyjnego i sprawnością, rzutującą na skuteczność świetlną lampy. Można oczekiwać dalszego postępu w tworzeniu nowych kompozycji luminoforów.

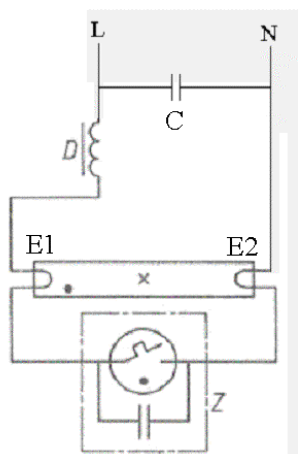
Dzięki dużej skuteczności świetlnej (70 lm/W i więcej) oraz niskiej cenie świetlówki pozostają bezkonkurencyjnym źródłem światła w wielu zastosowaniach, zwłaszcza oświetlenia wnętrz.



Rys. 16. Przykładowe widmo świetlówek trój-pasmowych

Gęstość widmowa egzytancji promienistej, w przedziałach co 5 nm, odniesiona do natężenia oświetlenia 1000 lx

Widmo fluorescencyjne z dominującymi trzema lub czterema pasmami w odpowiednio dobranych zakresach długości fal (rys. 16) pozwala uzyskać pożądane parametry barwowe światła. Na przykład dla uzyskania światła białego o barwie zbliżonej do bieli równoenergetycznej (punkt E w układzie xyz) nie jest bynajmniej konieczna lampa o widmie równoenergetycznym. Poza świetlówkami do ogólnych celów oświetleniowych są produkowane różne inne, np. świetlówki dekoracyjne i świetlówki o widmach sprzyjających wegetacji określonych roślin.

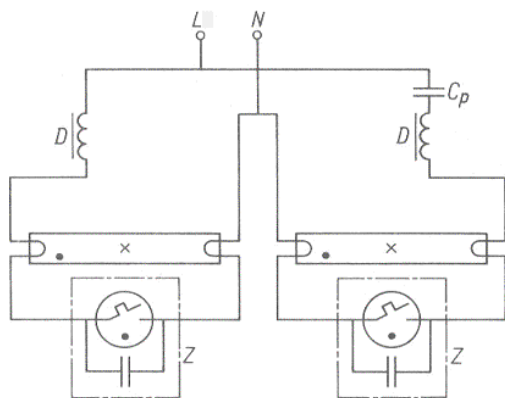


Rys. 17. Obwód pojedynczej świetlówki ze statecznikiem indukcyjnym

D – dławik (statecznik indukcyjny), C – kondensator do poprawy współczynnika mocy, Z – zapłonnik tłący

Najprostszy obwód pojedynczej świetlówki ze statecznikiem indukcyjnym jest przedstawiony na rys. 17. Po załączeniu lampy płynie mały prąd w obwodzie: dławik D – elektroda E1 – zapłonnik Z – elektroda E2. Prawie całe napięcie sieciowe przypada na zapłonnik tłący (ang. *glow-starter*), tj. na małą lampę tłącą, w której rozpoczyna się wyładowanie. Jedna z elektrod zapłonnika jest wykonana z termobimetali i pod wpływem wydzielanego ciepła wygina się, aż do zetknięcia z drugą elektrodą¹. Od tej chwili w obwodzie zaczyna płynąć duży prąd (ok. $1,5 \cdot I_n$) nagrzewający elektrody świetlówki. Jednocześnie zapłonnik stygnie, bo jego elektrody są zwarte, i po paru sekundach elektroda termobimetalowa odgina się, przerywając obwód. Nagłe przerwanie prądu płynącego przez dławik wywołuje siłę elektromotoryczną samoindukcji; między nagrzanymi elektrodami świetlówki pojawia się przepięcie rzędu 1 kV zapoczątkowujące wyładowanie. Gdyby nie doszło do zapłonu, cały ten proces powtarza się. Pojedyncza świetlówka ze statecznikiem indukcyjnym daje światło o tętnieniu [6] niedopuszczalnie dużym w wielu zastosowaniach.

¹ Wielu elektryków mylnie sądzi, że w chwili załączenia świetlówki elektrody zapłonnika są zwarte.

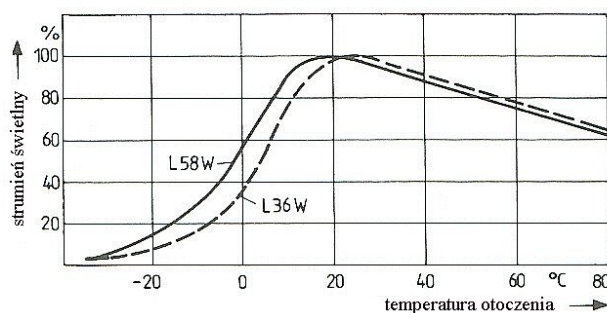


Rys. 18. Układ DUO świetlówek zawierający gałąź indukcyjną (z lewej) oraz gałąź pojemnościową (z prawej)
D – dławik, *C_p* – kondensator szeregowy, *Z* – zapłonnik

Najbardziej rozpowszechnionym w Polsce rozwiązaniem ograniczającym tętnienie światła świetlówek ze statecznikiem indukcyjnym jest układ antystroboskopowy DUO (rys. 18). Zawiera dwie gałęzie (indukcyjną i pojemnościową) z dwiema świetlówkami, przez które płyną prądy przesunięte w fazie. Współczynnik tętnienia światła udaje się zmniejszyć ponad dwukrotnie. Reaktancja kondensatora C_p jest dwukrotnie większa niż reaktancja każdego z dławików D . Gałąź indukcyjna ma współczynnik mocy ok. $0,5_{ind}$, wobec tego kondensator C_p jest tak dobrany, aby gałąź pojemnościowa miała współczynnik mocy ok. $0,5_{poj}$ i układ jako całość nie pobierał mocy biernej. Wypadkowa reaktancja równolegle połączonych stateczników jest równa zero i układ jest w stanie zbliżonym do rezonansu, co może stwarzać problemy w nieustalonych stanach pracy.

4.2. Szczególna wrażliwość na temperaturę otoczenia i częstość załączeń

W jarzniku występuje **nasycona para rtęci**, pozostająca w równowadze z fazą skondensowaną, przy czym jej prężność ma w danej temperaturze największą możliwą wartość, charakterystyczną dla danej substancji, w tym przypadku – rtęci. Tę prężność w ustalonym stanie cieplnym determinuje temperatura najchłodniejszego miejsca jarznika¹. Inaczej mówiąc – z rtęci, którą producent wprowadził z nadmiarem, odparowuje pewna ilość zależna od temperatury najchłodniejszego punktu jarznika. Ta temperatura decyduje o wartości ciśnienia cząstkowego pary rtęci w całym jarzniku i o parametrach fotometrycznych świetlówki.

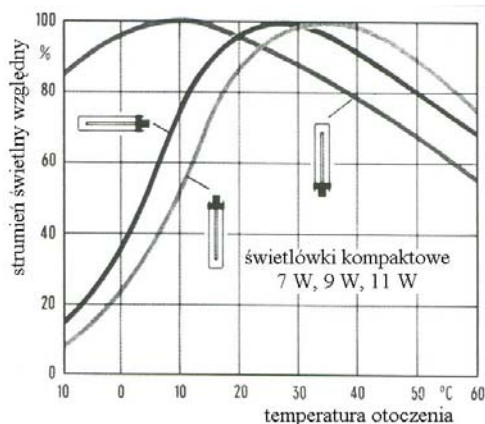


Rys. 19. Zależność strumienia świetlnego świetlówek liniowych od temperatury otoczenia [7]

Zważywszy, że włączone świetlówki, zwłaszcza liniowe, mają niewielki ustalony przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia, $20\div 40$ K zależnie od mocy znamionowej, można oczekiwać znacznego wpływu temperatury otoczenia na ich parametry fotometryczne (rys. 19, 20). To pewna osobliwość świetlówek, niespotykana w przypadku innych lamp do ogólnych celów oświe-

¹ Tak, jak prężność nasyconej pary wodnej we wnętrzu domowej chłodziarki determinuje temperatura parownika, a w łazience bądź nawet w całym mieszkaniu – temperatura odkrytego rurociągu wody zimnej. Na parowniku i na rurze kondensuje nadmiar pary wodnej.

tleniowych. Świetlówki w zwykłym wykonaniu mają największy strumień świetlny w temperaturze otoczenia $20\div 35^{\circ}\text{C}$, z czym związana jest określona temperatura najchłodniejszego punktu jarznika. Strumień świetlny obniża się w niższej temperaturze bo maleje prężność pary rtęci i maleje moc promieniowania $253,7\text{ nm}$, natomiast w wyższej temperaturze zwykle maleje sprawność energetyczna luminoforu.

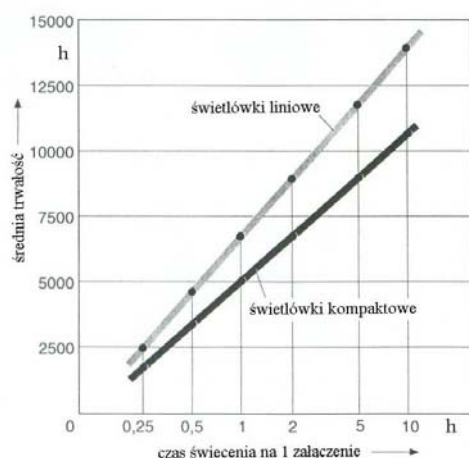


Rys. 20. Zależność strumienia świetlnego świetlówek kompaktowych rozmaicie zamontowanych od temperatury otoczenia [8]

Uwaga: zmiana położenia świetlówki zmienia usytuowanie oraz temperaturę najchłodniejszego punktu jarznika.

Silnie zarysowaną zależność strumienia świetlnego od temperatury otoczenia można osłabić wpływając na skład atmosfery jarznika, odpowiednio dobierając amalgamat i/lub podnosząc ciśnienie gazu pomocniczego. Do pracy w niskiej temperaturze otoczenia są dostępne świetlówki emitujące maksymalny strumień świetlny w temperaturze otoczenia 0°C , np. świetlówki 58 W Thermo-LL (firmy AURA) o dodatkowej izolacji cieplnej jarznika (rura osłonowa $\varnothing 38\text{ mm}$ na jarzniku $\varnothing 26\text{ mm}$); stosuje się też oprawy szczelne podgrzewane mocą traconą w stateczniku i innych elementach wyposażenia.

Jako gaz zapłonowy w dawnych świetlówkach $\varnothing 38\text{ mm}$ stosowano powszechnie argon. Od roku 1978 nowe świetlówki $\varnothing 26\text{ mm}$ napełniano kryptonem, co przy zachowaniu parametrów fotometrycznych pozwalało zredukować pobór mocy o 10% ($20\text{ W} \rightarrow 18\text{ W}$, $40\text{ W} \rightarrow 36\text{ W}$, $65\text{ W} \rightarrow 58\text{ W}$) i w tym stopniu zwiększyć skuteczność świetlną. Aktualnie używane są obydwa gazy, krypton zwłaszcza do świetlówek cold-start, odbywających zapłon bez wstępnego podgrzewania elektrod, kiedy lepiej unikać konieczności stosowania wysokiego napięcia zapłonowego.



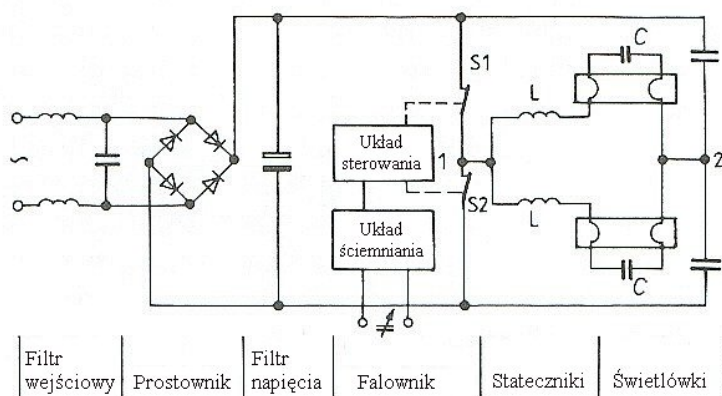
Rys. 21. Trwałość świetlówek w zależności od średniego czasu świecenia przypadającego na jedno załączenie

Każde załączenie świetlówki oznacza dodatkowe rozpylanie emitera z elektrod, zwłaszcza przy zapłonie lampy o niepodgrzewanych elektrodach. Objawia się to zależnością trwałości od częstości załączeń bądź od średniego czasu świecenia przypadającego na jedno załączenie (rys. 21) silniejszą niż w przypadku innych lamp wyładowczych. W świetlówkach sprzed 40 lat przy jednym

załączeniu elektrody zużywały się w takim stopniu, jak w czasie 2 h ciągłej pracy. Z rys. 21 łatwo wydedukować, że w świetlówkach liniowych, których wykres dotyczy, przy jednym załączeniu lampa zużywa się, jak podczas 80 min nieprzerwanego świecenia. Wpływ ten ogranicza się doskonale skład chemiczny i strukturę emiterów, konfigurację elektrod, zastępując argon kryptonem, zastępując zapłonniki tłące zapłonnikami elektronicznymi i wreszcie – zastępując tradycyjne stateczniki statecznikami elektronicznymi.

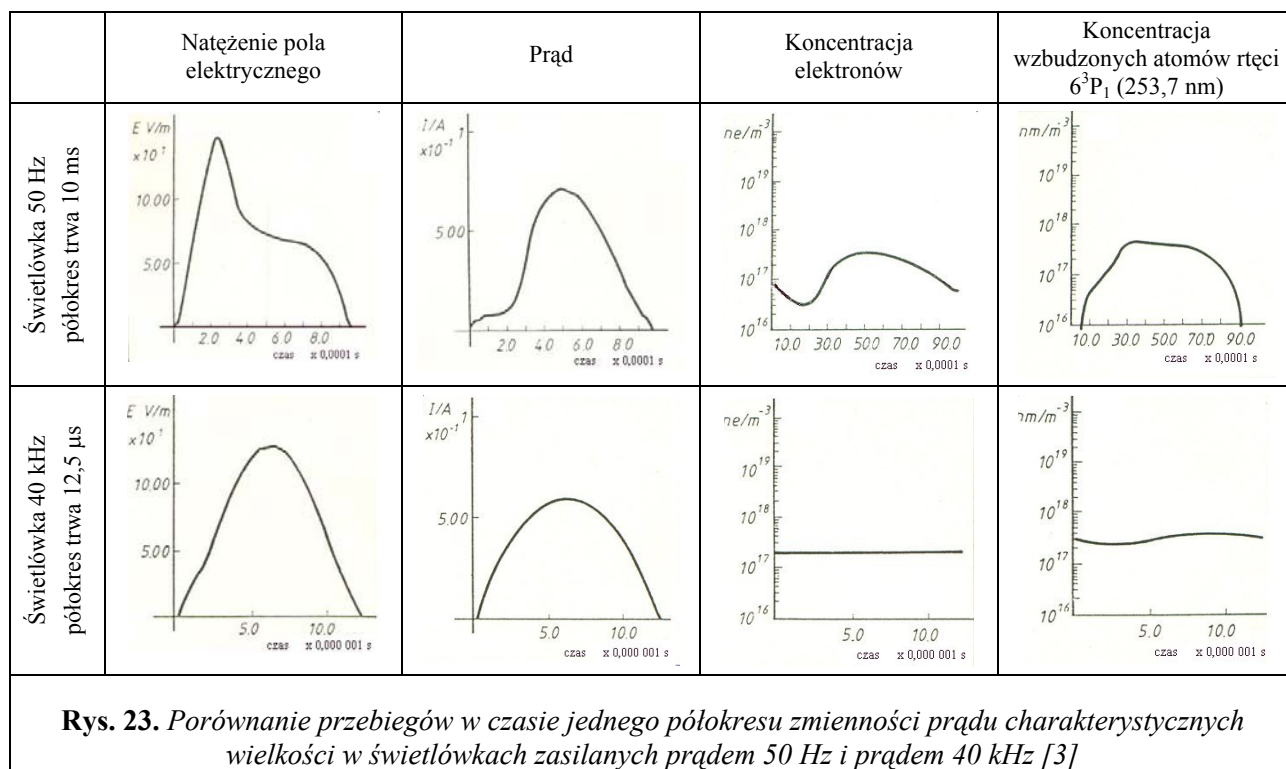
4.3. Elektronizacja wyposażenia obwodu świetlówki

Kolejnym impulsem w rozwoju świetlówek jest elektronizacja wyposażenia ich obwodów: zapłonników, stateczników i regulatorów strumienia świetlnego. Pierwszym krokiem było udoskonalenie tradycyjnego obwodu świetlówki poprzez zastąpienie przypadkowo działającego zapłonnika tłącego precyzyjnym **zapłonnikiem elektronicznym**, który czas wstępnego podgrzewania elektrod ustala ściśle na 1,5 s, bo jego licznik cyfrowy zlicza 75 okresów przepływu prądu, a przepięcie zapłonowe generuje na stałym poziomie 1300 V. Lampa zapala się niezawodnie przy pierwszym impulsie zapłonowym, a jej trwałość zwiększa się dzięki wyeliminowaniu wielokrotnych prób zapłonu.

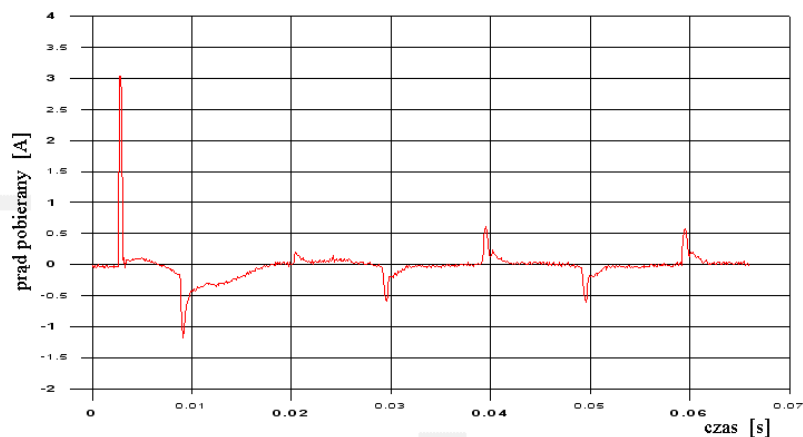


Rys. 22. Uproszczony schemat statecznika elektronicznego świetlówek

Przełomem było wprowadzenie **statecznika elektronicznego** (rys. 22), czyli zasilacza świetlówek z prądem wyjściowym o częstotliwości kilkudziesięciu kiloherców ($25\div 100$ kHz), z wbudowanymi układami zapewniającymi zapłon, stabilizację prądu i ew. regulację strumienia świetlnego. Sprawą decydującą jest wybór takiej częstotliwości prądu, aby dało się wykorzystać naturalną, znikomą bezwładność elektrycznego i cieplnego stanu wyładowania. Jak wynika z rys. 23, zwiększenie częstotliwości z 50 Hz do 40 kHz, czyli 800-krotne skrócenie czasu półokresu zmienności prądu, sprawia, że rezystancja słupa wyładowania jest niemal stała, o czym świadczy sinusoidalny przebieg prądu. Oznacza to, że wyładowanie w jarzniku przestaje być elementem nieliniowym. Co ważniejsze, udaje się zapobiec dostrzegalnej dejonizacji kolumny wyładowania przy naturalnym przejściu prądu przez zero, o czym świadczy zarówno stała koncentracja elektronów, jak i – atomów rtęci wzbudzonych do poziomu 6^3P_1 , które są źródłem promieniowania o długości fali 253,7 nm. Świetlówka 40 kHz jest więc źródłem światła nietętniącego.



Świetlówka 40 kHz ma wiele innych zalet. Skoro po każdym naturalnym przejściu prądu przez zero nie trzeba odbudowywać chmury nośników ładunku, to straty mocy w jarzniku maleją co najmniej o 10%, głównie dzięki obniżeniu strat katodowych. Przy tak dużej częstotliwości do stabilizacji prądu wystarczają małe dławiki powietrzne i straty mocy w *stricto sensu* stateczniku maleją co najmniej o 35%. W rezultacie skuteczność świetlna odniesiona do lampy z wyposażeniem zwiększa się co najmniej o kilkanaście procent.

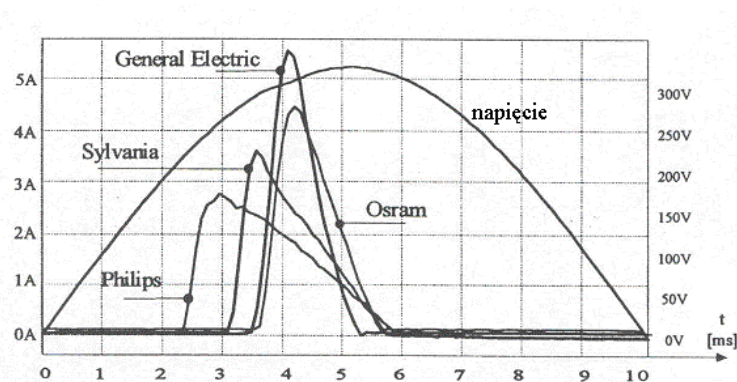


Rys. 24. Przebieg prądu po załączeniu oprawy dwuświełtówkowej 2×36 W, 220 V ze statecznikiem elektronicznym (prąd znamionowy 0,34 A_{rms} , prąd załączeniowy 3,04 A_{max})

Stabilne, powtarzalne warunki zapłonu ograniczają zużycie emitera, dzięki czemu trwałość świetlówki zwiększa się co najmniej o 50% i szerszy jest dopuszczalny zakres zmienności temperatury otoczenia. Mniejsza jest wrażliwość na odchylenia napięcia, a kondensator wygładzający za prostownikiem sprawia, że świetlówka nie gaśnie w razie krótkotrwałego zaniku bądź głębokiego zapadu napięcia. U kresu trwałości zasilacz może odłączać zużytą świetlówkę, która nie migocze i nie zużywa energii.

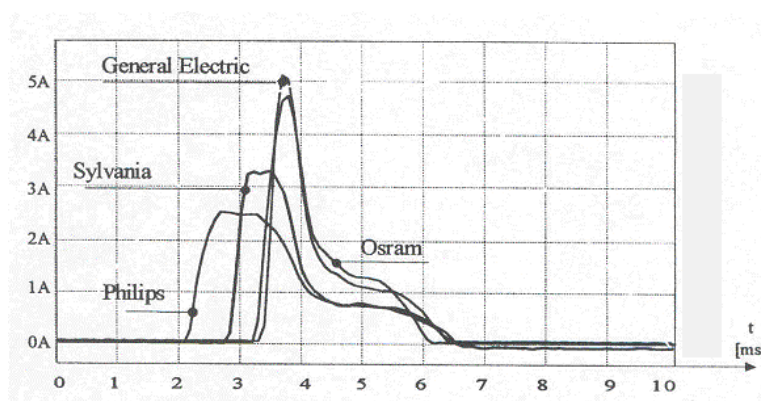
Stateczniki elektroniczne mogą być stosowane przy wszelkich świetłówkach: liniowych, kołowych i kompaktowych, ale określony typ statecznika może być powiązany z określonym typem świetlówek; chodzi nie tylko o napięcie znamionowe i moc, co oczywiste, ale również o rodzaj gazu pomocniczego (argon czy krypton) i tryb wstępnego podgrzewania elektrod bądź jego brak.

Z punktu widzenia instalacji zasilającej świetlówkę ze statecznikiem elektronicznym są odbiornikami kłopotliwymi. W chwili załączania występuje znaczny impuls prądu (rys. 24) związany z ładowaniem kondensatora wygładzającego w zasilaczu (filtru napięcia na rys. 22), o wartości (np. $10 \cdot I_n$) zależnej również od impedancji instalacji poprzedzającej; prąd ten powinien przetrzymywać zabezpieczenia nadprądowe obwodu.



Rys. 25. Przebieg w ciągu jednego półokresu prądu pobieranego przez grupę 10 świetlówek kompaktowych 15 W pochodzących z różnych wytwórni. Zasilanie z zasilacza o napięciu wyjściowym niemal sinusoidalnym ($THD = 0,5\%$)

Prąd pobierany podczas normalnej pracy jest silnie odkształcony (rys. 24, 25, 26) i to w stopniu trudnym do jednoznacznego określenia. Rysunki przekonują, że ta sama grupa świetlówek pobiera prąd o różnym przebiegu w zależności od warunków zasilania, zwłaszcza od stopnia odkształcenia napięcia zasilającego (rys. 25 i 26). Ponadto pochodzące z różnych wytwórni świetlówki o identycznych danych znamionowych i w tych samych warunkach zasilania pobierają prąd o wyraźnie odmiennym przebiegu.



Rys. 26. Przebieg w ciągu jednego półokresu prądu pobieranego przez 10 świetlówek kompaktowych 15 W pochodzących z różnych wytwórni. Zasilanie z instalacji uniwersytetu wiedeńskiego ($THD = 3,6\%$)

Stopień odkształcenia prądu można charakteryzować w różny sposób; wskaźnikiem syntetycznym przydatnym przy projektowaniu instalacji jest współczynnik szczytu (ang. *crest factor*, *CF* albo *current crest factor*, *CCF*), który dla świetlówek kompaktowych na ogół zawiera się w przedziale $3,0 \div 3,3$. Podawane przez niektóre wytwórnie wartości mniejsze niż 1,7, a nawet mniejsze niż

1,5, są błędne. Prawdopodobnie wynikają one z mylnej interpretacji pojęcia współczynnika szczytu: przyjmują za podstawę wartość skuteczną prądu obliczoną tylko dla części półokresu, w której prąd ma wartość niezerową.

4.4. Świetlówki kompaktowe

Świetlówki kompaktowe powstały jako energooszczędne zamienniki żarówek i pierwsze odmiany wiernie imitowały kształt żarówek, co miało ułatwiać ich zastępowalność w różnych oprawach i zmylić czujność osób sceptycznie nastawionych do nowości. Rozwinęły się następnie liczne odmiany, również o innych kształtach, zespolone bądź nie ze statecznikami.



Rys. 27. *Bill Clinton przekonujący Amerykanów do korzystania z energooszczędnych źródeł światła*

Świetlówka kompaktowa może mieć tradycyjny statecznik w postaci dławika, co ma tendencję zanikającą, bądź statecznik elektroniczny. Ta zasadnicza różnica w zasadzie działania i w parametrach użytkowych nie jest należycie eksponowana w polskich katalogach i ulotkach reklamowych, chociaż wystarczy świetlówkę wziąć do ręki, aby się zorientować, o którą chodzi, a czasem wystarczy spojrzeć. Świetlówka ze statecznikiem indukcyjnym jest nieco większa i znacznie cięższa. Skuteczność świetlna jest zbliżona do 50 lm/W a w przypadku statecznika elektronicznego i świetlówek większej mocy osiąga 60÷85 lm/W.

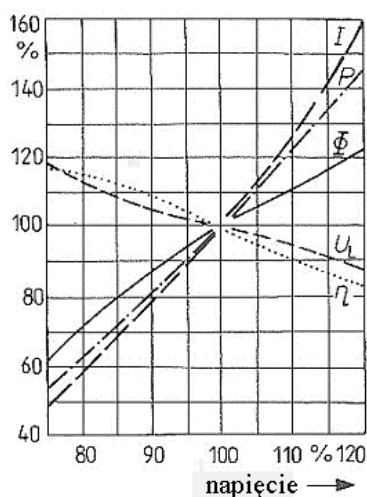
Proste zastępowanie żarówek świetlówkami o mocy 5-krotnie mniejszej, jak to zalecają ich wytwórcy, nieraz kończy się rozczarowaniem. Powody są rozmaite, np. oprawa nieprzystosowana pod względem rozsyłu światła, zbyt zimne światło wymagające stosowania większego natężenia oświetlenia.

Upowszechnienie energooszczędnych źródeł światła, w tym świetlówek kompaktowych, to nie tylko problem pojedynczych użytkowników oświetlenia. To ważny ogólnokrajowy problem gospodarczy, a nawet polityczny. Oświetlenie elektryczne do dziedzina użytkowania energii elektrycznej kryjąca największe procentowe możliwości jej oszczędzania. Polityk nie musi być elektrykiem, aby to zrozumieć, jeżeli poważnie traktuje gospodarczą przyszłość kraju. Pozytywnym przykładem jest Bill Clinton, który serio traktował swoje czołowe hasło wyborcze: *Gospodarka, głupcze!* Nie zawahał się z oficjalnej mównicy prezydenta supermocarstwa przekonywać obywateli do sprawy (rys. 27), która jest poniżej godności hołoty politycznej w krajach zebranych.

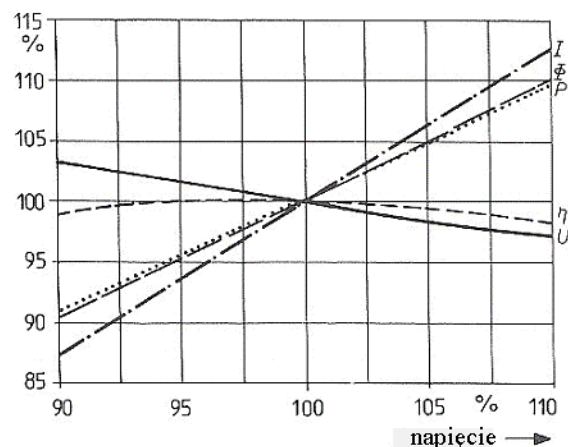
4.5. Podatność na odchylenia napięcia i na ściemnianie

Zależność parametrów lamp wyładowczych od odchyłeń napięcia jest bardziej złożona niż w

przypadku żarówek i nawet dla lamp o określonej zasadzie działania charakteryzuje się szerokim pasmem rozrzutu. Znaczący wpływ mają: nieliniowość charakterystyki statecznika, skład atmosfery jarznika, zależność sprawności luminoforów od ich temperatury i od widma promieniowania pierwotnego. Podawane wykresy (rys. 28, 29) na ogół pomijają wtórny skutek zmian poziomu napięcia – ich wpływ na stopień odkształcenia prądu THD, na zawartość poszczególnych harmoniczych i następstwa tego.



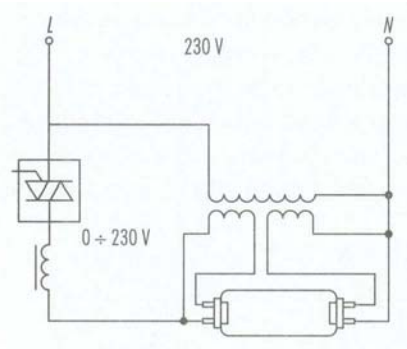
Rys. 28. Wpływ względnej wartości napięcia zasilającego na względną wartość parametrów świetlówek 50 Hz ze statecznikiem indukcyjnym [7]



Rys. 29. Wpływ względnej wartości napięcia zasilającego na względną wartość parametrów świetlówek kompaktowych ze statecznikiem elektronicznym [7]

P – moc pobierana, I – prąd pobierany, U_L – spadek napięcia w jarzniku, Φ – strumień świetlny, η – skuteczność świetlna, L – trwałość

Świetlówki mało różnią się między sobą składem atmosfery jarznika, obserwowane różnice zachowań przy odchyleniach napięcia wynikają przede wszystkim z rodzaju statecznika (rys. 28 i 29) i składu luminoforów. Zwraca uwagę nieznaczna zmienność skuteczności świetlnej niektórych świetlówek kompaktowych (rys. 29), co oznacza, że wpływ odchylen napięcia na moc pobieraną i na strumień świetlny jest niemal jednakowy.



Rys. 30. Układ ściemniania świetlówki 50 Hz z transformatorem do stałego podgrzewania elektrod

Z wykresów wynika też, że napięcie przyłożone do jarznika zmienia się w stopniu znacznie mniejszym niż napięcie sieciowe. Widać tu korzystny wpływ obecności statecznika, zwłaszcza statecznika elektronicznego; poza innymi funkcjami niejako stabilizuje on napięcie na zaciskach samego źródła światła.

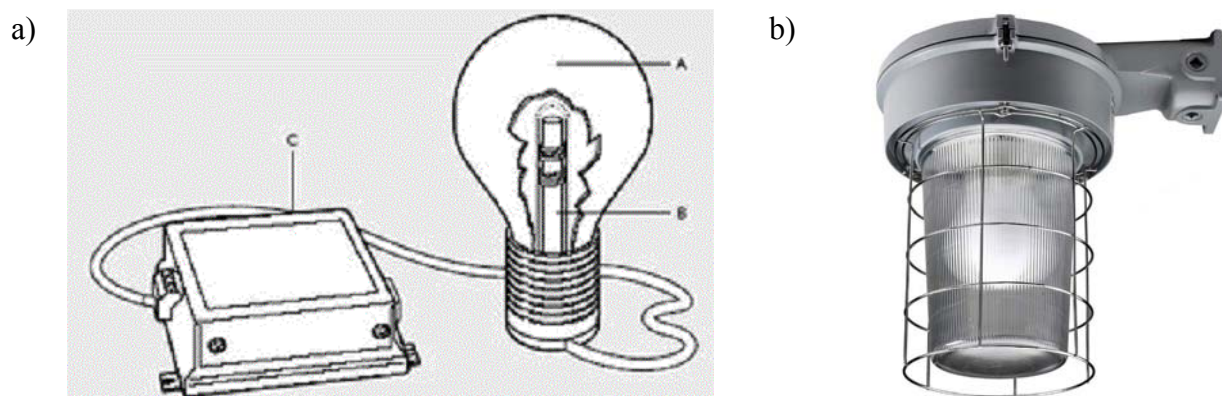
W przypadku świetlówek **ściemnianie** jest o tyle trudne, że przy każdym naturalnym przejściu prądu przez zero, a tym bardziej przy dłuższej pauzie bezprądowej, wyładowanie gaśnie i musi być na nowo zapoczątkowane. Przystosowanie do ściemniania świetlówek zasilanych prądem 50 Hz polega na stałym podgrzewaniu elektrod, co ułatwia ponowny zapłon (rys. 30). Mogą się bez tego obyć świetlówki ze statecznikiem elektronicznym, bo np. przy 40 kHz półokres wynosi tylko 12,5 μ s, a czas blokowania przewodzenia przy sterowaniu fazowym – znacznie mniej. Jeżeli kąt wysterowania ściemniacza jest kontrolowany przez mikroprocesor, to działanie układu jest precyzyjne, niezależnie od nieuniknionych odchyłeń częstotliwości napięcia wyjściowego przekształtnika. Ściemnianie może odbywać się bez zwiększenia stopnia odkształcenia pobieranego prądu.

5. Bezelektrodowe lampy fluorescencyjne

Bezelektrodowe lampy fluorescencyjne były frapującym pomysłem na długo przed ich realizacją na skalę przemysłową. Istotą pomysłu jest wyładowanie w jarzniku wzdłuż zamkniętych pętli generowane przez wzbudnik lub wzbudniki zasilane prądem o wysokiej częstotliwości na podobnej zasadzie, jak w urządzeniach grzejnych indukcyjnych. Skoro głównym czynnikiem ograniczającym trwałość lamp fluorescencyjnych jest zużywanie się elektrod, można ją znacznie zwiększyć eliminując elektrody. Trwałością lampy bezelektrodowej jest mniejsza z dwóch następujących wartości:

- ❖ albo trwałość użytkowa, czyli czas pracy do czasu, kiedy strumień świetlny obniży się do poziomu 70% wartości znamionowej,
- ❖ albo trwałość absolutna, czyli czas do chwili uszkodzenia elektronicznego zasilacza lub innego istotnego składnika wyposażenia.

Zwykle trwałość użytkowa jest mniejsza, dla różnych lamp bezelektrodowych wynosi od 10 000 h do 60 000 h. Głównym atutem większości lamp bezelektrodowych jest bezkonkurencyjna trwałość. Są zatem predestynowane do zastosowań, gdzie jest utrudniony dostęp do lamp przy ich wymianie (wysokie pomieszczenia) i/lub gdzie ważna jest niezawodność działania lamp (sygnalizacja, oświetlenie przeszkodowe). Dzięki wysokiej częstotliwości prądu wyładowania łatwe jest ściemnianie lamp, chociaż na razie wytwórcy nie oferują takiej opcji. Układy regulacji wchodzące w skład zasilaczy kompensują wpływ odchyłeń napięcia zasilającego i parametry fotometryczne nieznacznie się zmieniają przy zmianach napięcia zasilania na przykład w przedziale 185÷255 V.



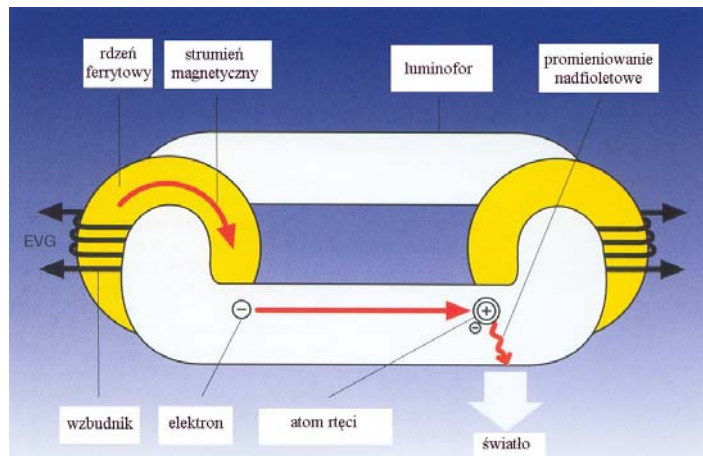
Rys. 31. Lampa indukcyjna QL: a) główne elementy; b) lampa w oprawie przemysłowej
A – bańka pokryta luminoforem, B – wzbudnik, C – zasilacz 2,65 MHz

Pierwsze lampy indukcyjne wprowadziły na rynek w roku 1991 dwie firmy: Matsushita Electric Works oraz Philips. Marzenie o „wiecznej lampie” było tak ujmujące, że Japończycy swoją lampę nazwali *Everlight*. Wybrali częstotliwość zasilania jarznika 13,56 MHz, uzyskując skuteczność świetlną 37 lm/W i trwałość 40 000 h.

Konkurencyjne **lampy indukcyjne QL** firmy Philips (rys. 31), wykorzystujące częstotliwość $2,65 \text{ MHz} \pm 10\%$, były i nadal są najbardziej znanymi i najbardziej rozpowszechnionymi bezelektrodowymi lampami fluorescencyjnymi. Jarznik jest bańką o kształcie zwykłej żarówki i ma pośrodku wzbudnik, rodzaj anteny ferrytowej z cewką połączoną z zasilaczem za pomocą przewodu współosiowego o ściśle określonej długości (np. 40 cm), której nie wolno zmienić pod groźbą rozstrojenia układu. Wokół wzbudnika po liniach kołowych odbywa się wyładowanie.

Lampa wykorzystuje promieniowanie rezonansowe rtęci z wyeksponowaniem linii 253,7 nm (rys. 15), jak świetlówka. Przy tej samej mocy ma jednak znacznie mniejsze wymiary, większą objętościową gęstość mocy, wobec czego osiąga wyższą temperaturę roboczą. Aby rozświetlenie do pełnego strumienia świetlnego trwało kilka sekund, a nie wiele minut, aż do osiągnięcia ustalonego stanu cieplnego, wprowadza się do jarznika dwa różne amalgamaty: podstawowy (Bi In/Hg) w stopce lampy, gdzie sytuuje się najchłodniejszy punkt jarznika w czasie normalnej pracy i pomocniczy tuż poniżej strefy wyładowania, niedaleko bańki lampy, czyli najchłodniejszego punktu jarznika podczas zapłonu. Dzięki temu, mimo nieustalonych warunków cieplnych i przemieszczania się punktu najchłodniejszego, już kilka sekund po załączeniu powstaje i utrzymuje się koncentracja wzbudzonych atomów rtęci na poziomie zbliżonym do ustalonego. Na parametry fotometryczne lampy wpływa temperatura otoczenia, położenie pracy lampy i rodzaj oprawy. Strumień świetlny ma jednak wartość nie mniejszą niż $0,85 \cdot \Phi_n$ przy zmianach temperatury amalgamatu podstawowego w granicach $50 \div 125^\circ\text{C}$.

Dostępne są aktualnie lampy o mocy 55 W, 85 W i 165 W z trzema odmianami luminoforów o temperaturze barwowej światła 2700 K, 3000 K i 4000 K, przy ogólnym wskaźniku oddawania barw $R_a \geq 80$. Widmo jest zbliżone do widma świetlówek z luminoforem trójpasmowym (rys. 16). Skuteczność świetlna zależnie od wykonania wynosi od 64 lm/W do 74 lm/W. Odkształcenie pobieranego prądu jest nieznaczne. Trwałość użytkowa osiąga 60 000 h.



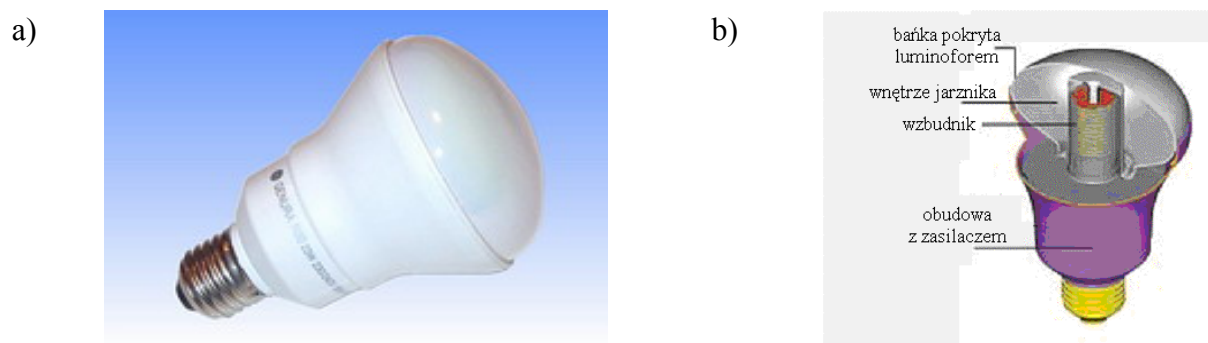
Rys. 32. Bezelektrodowa lampa fluorescencyjna ENDURA o wzbudnikach zewnętrznych

Częstotliwość 250 kHz, stosunkowo niewielką, firma Osram wykorzystuje w bezelektrodowych lampach fluorescencyjnych **Endura**, które pojawiły się w roku 1993. Przy tej częstotliwości jarznik i zasilacz mogą być oddalone od siebie nawet o 20 m. Jarznik w postaci okrągłej rury wygiętej w zamknięty wydłużony prostokąt ma dwa wzbudniki zewnętrzne nałożone na krótszych bokach jarznika (rys. 32). Są dostępne trzy wielkości:

70 W	6500 lm	93 lm/W
100 W	8000 lm	80 lm/W
150 W	12 000 lm	80 lm/W

każda w dwóch wersjach: o świetle ciepłobiałym i świetle zimnobiałym, co daje sześć różnych wykonań. Mają ogólny wskaźnik oddawania barw $R_a > 80$. Lampy wykazują małą wrażliwość na zmiany temperatury otoczenia, strumień świetlny o wartości co najmniej 95% znamionowego zachowują przy zmianach temperatury jarznika w szerokich granicach od 55°C do 125°C. Można liczyć na niezawodny zapłon w niskiej temperaturze otoczenia do – 40°C. Jak wszystkie lampy z zasilaczem zawierającym pośredniczący obwód prądu stałego, w razie potrzeby mogą być zasilane z instalacji prądu stałego.

Zminiaturyzowaną wersję Endury z kołowym jarznikiem, o mocy 40 W, zespoloną z zasilaczem 250 kHz i zaopatrzoną w trzonek z gwintem E27, oznaczoną jako Saturn 2, produkuje firma Hongyuan z Szanghaju.



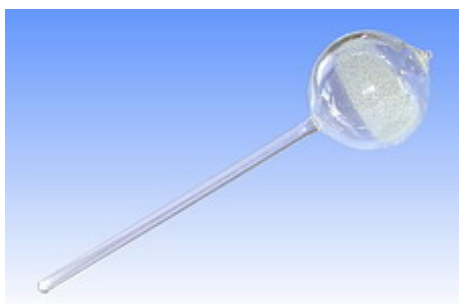
Rys. 33. Lampa indukcyjna GENURA: a) wygląd; b) budowa

W roku 1994 pojawiły się lampy indukcyjne R80 Genura firmy General Electric, różniące się od lamp QL firmy Philips przede wszystkim tym, że stanowią konstrukcję zespoloną z zasilaczem (rys. 33). Lampa o mocy 23 W wraz z zespolonym zasilaczem 2,5 MHz i jarznikiem w postaci owalnej reflektorowej bańki stanowi całość na trzonku E27; można ją wkręcić w miejsce żarówki. Skuteczność świetlna wynosi 48 lm/W, a trwałość użytkowa 10 000÷15 000 godzin.

Od roku 2000 kolejne wersje różnych lamp indukcyjnych wychodzą z firm japońskich i chińskich.

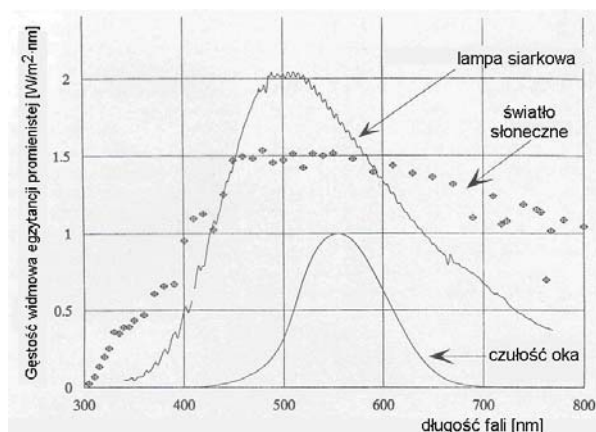
6. Bezelektrodowe lampy siarkowe

Lampa siarkowa (ang. *sulfur lamp*) jest lampą bezelektrodową wykorzystującą wyładowanie w gazie w zakresie mikrofalowym. Pomysł M. Ury'ego i Ch. Wooda z lat 80. XX wieku doczekał się prototypowej realizacji w roku 1994 w firmie Fusion Lighting (USA).



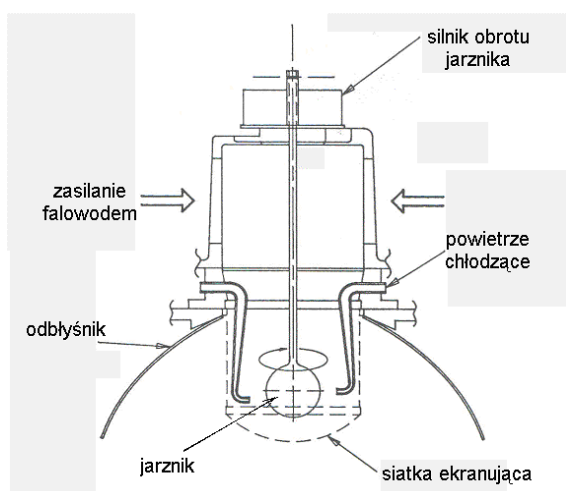
Rys. 34. Jarznik lampy siarkowej

Jarznik o bańce kwarcowej wielkości piłki golfowej na długim trzpieniu (rys. 34), zawierający siarkę i argon, jest poddany działaniu fali elektromagnetycznej o częstotliwości 2,45 GHz wytwarzanej przez magnetron, jak w kuchni mikrofalowej. Wzbudzony gaz tak silnie nagrzewa siarkę, że tworzy ona obłok plazmy świecącej jaskrawym białym światłem. Plazma siarkowa zawiera głównie cząsteczki S_2 , świeci dzięki wzbudzaniu cząsteczek dwuatomowych w atmosferze o znacznym ciśnieniu (0,5 MPa) i dzięki temu widmo promieniowania jest ciągłe. Co więcej, jest zbliżone do widma światła dziennego (rys. 35), a udział nadfioletu i podczerwieni jest znikomy.



Rys. 35. Widmo lampy siarkowej [2]

Silnie nagrzewający się jarznik wymaga chłodzenia wymuszonego, musi być wprowadzony w ruch obrotowy i owiewany strumieniem powietrza (rys. 36). Budowa kompletnej lampy jest tak skomplikowana, że jest zupełnie nieopłacalna przy małej mocy jednostkowej. Wykonania prototypowe miały moce 1,0÷5,9 kW. Są to lampy do oświetlania dużych powierzchni bezpośrednio albo za pośrednictwem rur świecących.



Rys. 36. Budowa lampy siarkowej [9]

Jarznik praktycznie nie zużywa się, bo materiały wchodzące w jego skład nie reagują ze sobą. Strumień świetlny jest stabilny w czasie, trwałość samego źródła światła ocenia się na ponad 60 000 h, ale trwałość magnetronu nie przekracza 15 000÷20 000 h. Przezornie nie wspomina się o trwałości mechanizmu obrotu jarznika.

Czas zapłonu lampy jest rzędu sekund, nawet w niskiej temperaturze otoczenia. Ściemnianie jest możliwe do poziomu 20%, ale na razie wytwórcy nie oferowali takiej możliwości. Lampa o mocy 5,9 kW ma skuteczność świetlną 80 lm/W, temperaturę barwową najbliższą 6000 K i wskaźnik oddawania barw $R_a = 79$.

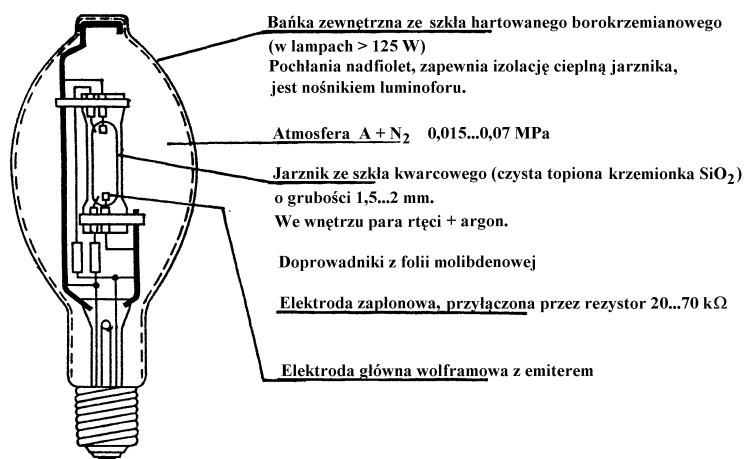
Są w świecie nieliczne instalacje prototypowe. W Waszyngtonie pojawiły się instalacje rur

świecących światłem lamp siarkowych w National Air and Space Museum: trzy długie rury świecące, każda naświetlana jednostronnie przez lampę siarkową, zainstalowano w miejsce 94 lamp metalohalogenkowych. Dwie lampy zainstalowano przy wejściu szpitala uniwersyteckiego w Lund w Szwecji. W krajach skandynawskich objawiło się największe zainteresowanie lampami siarkowymi, zapewne z tęsknoty za światłem zbliżonym do słonecznego, dostępnym przez cały rok.

Dalsze losy lamp siarkowych są niepewne. Lampy są drogie, mają skomplikowaną budowę, zawierają części ruchome obniżające trwałość i niezawodność. Nie do końca są rozwiązane problemy technologiczne i problemy kompatybilności elektromagnetycznej. Po wydaniu na badania ponad 90 mln USD firma Fusion Lighting upadła, a patent przejęły firmy LG Group i Samsung.

7. Lampy rtęciowe i rtęciowo-żarowe

Wysokoprężne lampy rtęciowe (rys. 34) są najstarszymi i najprostszymi lampami wysokoprężnymi, produkowanymi w świecie od około 1930 roku (w Polsce od 1961 r.). Zasada działania jest prosta, technologia od dawna opanowana, a możliwości rozwojowe niewielkie, by nie powiedzieć żadne.



Rys. 37. Budowa wysokoprężnej lampy rtęciowej do ogólnych celów oświetleniowych

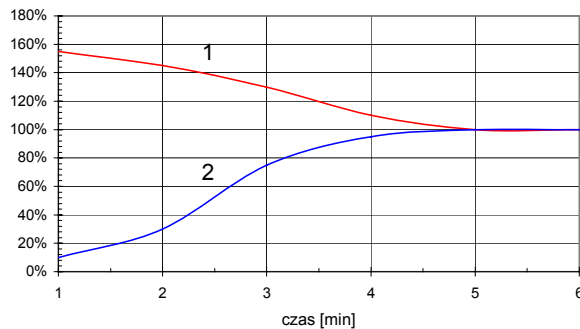
W lampach do ogólnych celów oświetleniowych wyładowanie odbywa się w nienasyconej parze rtęci o ciśnieniu 0,2÷1,5 MPa, w temperaturze 500÷750°C, w miejscowej równowadze termodynamicznej; w ustalonych warunkach pracy ciśnienie w jarzniku jest proporcjonalne do temperatury bezwzględnej.

W porównaniu z sytuacją w parze rtęci o niskim ciśnieniu (rys. 15), w miarę zwiększania ciśnienia poszczególne dyskretnie poziomy wzbudzenia atomów rtęci rozmywają się, a w widmie promieniowania coraz bardziej dominują wyższe przejścia energetyczne. Zanikają linie rezonansowe, bo odpowiadające im kwanty promieniowania są z najwyższym prawdopodobieństwem pochłaniane przez atomy niewzbudzone. W widmie wyładowania w jarzniku dominują pojedyncze linie widmowe wynikłe z wyższych przejść energetycznych 248÷365 nm (nadfiolet), 404,7/407,8 nm (barwa fioletowa), 435,8 nm (barwa niebieska), 546,1 nm (barwa zielona) i 577/579,1 nm (barwa żółta). Zwraca uwagę brak promieniowania o długości fali $\lambda > 580$ nm (barwa pomarańczowa i czerwona).

Bańka zewnętrzna rtęciówki jest pokryta luminoforem przetwarzającym promieniowanie nadfioletowe i korygującym widmo promieniowania w zakresie widzialnym. Stosuje się specjalne luminofory (zawierające krystaliczny wanadian itru aktywowany europem Eu) pozwalające zwiększyć w widmie **zawartość czerwieni** c rozumianą jako:

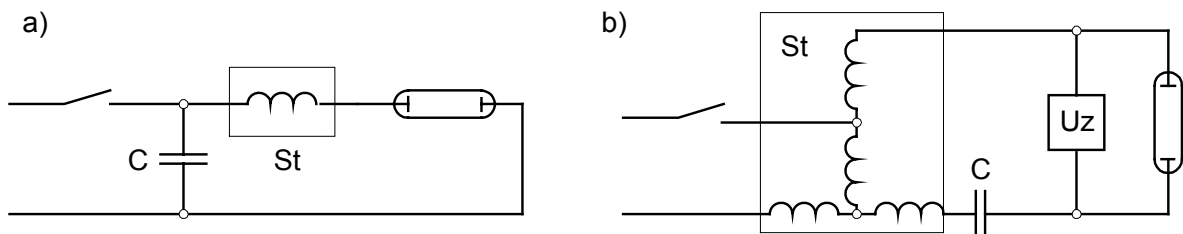
$$C = \frac{\int_{380}^{780} F_{\text{ek}} V_{\lambda} d\lambda}{\int_{380}^{780} F_{\text{ek}} V_{\lambda} d\lambda} = \frac{\Phi_{600 \div 780 \text{nm}}}{\Phi_{380 \div 780 \text{nm}}}$$

Nawet w sytuacjach, gdy rozróżnianie barw nie jest ważne, pożądana jest zawartość czerwieni w widmie $c \geq 0,05$ (5%). Dla porównania w świetle żarówki $c = 0,30$.



Rys. 38. Przebieg prądu pobieranego (1) i strumienia świetlnego (2) podczas rozświecania lampy rtęciowej wysokoprężnej (wartości względne odniesione do znamionowych)

Zapłon lampy zimnej trwa 3÷5 min i towarzyszy mu pobór zwiększonego prądu $(1,5 \div 1,6) \cdot I_n$, co należy uwzględnić przy doborze przewodów i zabezpieczeń obwodu zasilającego grupę lamp rtęciowych (rys. 38). Ponowny zapłon po krótkotrwałym zaniku napięcia trwa jeszcze dłużej, bo lampa musi ostygnąć przed wznowieniem wyładowania.

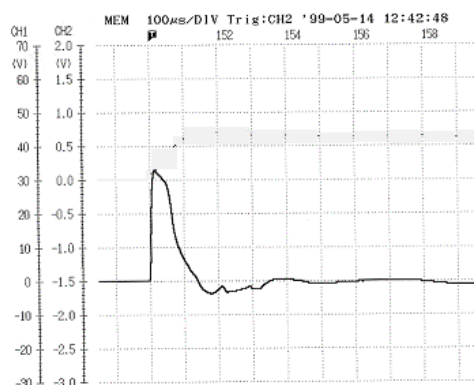


Rys. 39. Obwody lamp wyładowczych o różnym sposobie kompensacji mocy biernej: a) układ o kompensacji równoległej wykazujący duży impulsowy prąd załączeniowy; b) układ o kompensacji szeregowej nie wykazujący impulsowego prądu załączeniowego
C – kondensator, St – statecznik, Uz – układ zapłonowy

Obwody lamp wyładowczych ze statecznikiem indukcyjnym pobierają znaczną moc bierną, ich naturalny współczynnik mocy jest rzędu 0,5. Ten pobór mocy biernej na ogół ogranicza się poprzez indywidualną kompensację mocy biernej, tzn. instalowanie kondensatora w każdej oprawie oświetleniowej. Zależnie od sposobu przyłączenia kondensatora (rys. 39) zachodzi:

- **Kompensacja równoległa** z kondensatorem przy zaciskach wejściowych oprawy przyłączonym na pełne napięcie sieciowe. Załączanie oprawy oznacza również załączenie kondensatora, czemu towarzyszy duży impulsowy prąd załączeniowy (rys. 40). Tak jest w obwodach z pojedynczym dławikiem o dwóch końcówkach: w obwodach pojedynczych świetlówek, rtęciówek wysokoprężnych i wielu sodówek wysokoprężnych.
- **Kompensacja szeregowa** z kondensatorem włączanym szeregowo z indukcyjnością ograniczającą prąd załączeniowy. Przy załączaniu oprawy unika się dużego prądu załączeniowego. Tak bywa w obwodach z dławikami wielozaczebowymi: w obwodach niektórych lamp sodowych ni-

skopreżnych i lamp metalohalogenkowych.



Rys. 40. Impulsowy prąd załączeniowy lampy rtęciowej wysokopreżnej LRF 125 W z kondensatorem 30 μF o układzie połączeń, jak na rys. 39a

Podziałka czasu 100 μs /działkę
Wartość szczytowa impulsu 67 A
Całka Joule'a impulsu 0,22 A^2s

Własności barwowe światła lamp rtęciowych wysokopreżnych są mierne; ze względu na ogólny wskaźnik oddawania barw R_a od 36 do 60 przy temperaturze barwowej 3400÷4200 K lampy te nie nadają się do oświetlania wnętrz, gdzie stale przebywają ludzie. Pozostaje oświetlenie mniej ruchliwych ulic oraz oświetlenie terenów zielonych, których barwę to światło uwypukla.

Promieniowanie nadfioletowe w razie stłuczenia zewnętrznej bańki rtęciówki stanowi duże zagrożenie dla człowieka. W miarę wzrostu dawki promieniowania możliwe są: zapalenie spojówek, oparzenia skóry i nowotwór skóry. W USA od roku 1981 Bureau of Radiological Health wymaga takiego rozwiązania konstrukcyjnego lampy, które w razie stłuczenia bańki zapobiegałoby emisji nadfioletu, np. powodując odłączenie lampy spod napięcia.

Lampa rtęciowo-żarowa jest lampą rtęciową wysokopreżną, która zamiast zewnętrznego statecznika (indukcyjnego) ma wewnętrzny statecznik rezystancyjny w postaci żarnika w przestrzeni między jarznikiem a bańką zewnętrzną. Zadaniem żarnika jest uzupełnienie widma w zakresie fal dłuższych (światło pomarańczowe i czerwone), których brakuje samej rtęciówce. Konsekwencje obecności żarnika są różnorakie:

- Lampę rtęciowo-żarową można wkręcić w miejsce żarówki; przy tej samej mocy uzyskuje się strumień świetlny o 20÷50% większy, ale mniejszy niż w przypadku zwykłej rtęciówki.
- Zapłon lampy zimnej jest natychmiastowy; po załączeniu duży prąd płynący w szeregowym układzie żarnik–jarznik sprawia, że strumień świetlny jest większy niż ustalony. Zarazem żarnik ogrzewa jarznik i skraca do 2÷3 min czas jego rozgrzewu do chwili osiągnięcia ustalonych parametrów. Prąd załączeniowy jest mniejszy niż w zwykłej rtęciówce: ok. $1,3 \cdot I_n$ zamiast $1,6 \cdot I_n$.
- Ponowny zapłon lampy nagrzanej wymaga uprzedniego ostygnięcia jarznika, który blokuje przewodzenie, jak w każdej lampie wysokopreżnej,
- Bezwładność cieplna żarnika sprawia, że współczynnik tętnienia światła jest mniejszy.
- Lampa jest bardziej wrażliwa na odchylenia napięcia zasilającego.
- W razie stłuczenia bańki zewnętrznej lampa nie zagraża emisją nadfioletu, bo po wnikięciu do niej powietrza natychmiast przepala się żarnik i czynna lampa gaśnie.

Ze względu na montaż żarnika produkcję lamp rtęciowo-żarowych, podobnie jak produkcję żarówek, trudno w pełni zautomatyzować. Niektóre firmy oświetleniowe unikają tej produkcji, inne lokują ją w krajach o taniej sile roboczej skłonnej przez kilka godzin dziennie pęsetą precyzyjnie układać żarniki w podajniku automatu do montażu lamp. Zważywszy, że lampy rtęciowo-żarowe mają własności barwowe światła nieprzydatne we wnętrzach o stałym przebywaniu ludzi ($R_a = 50 \div 72$ przy $T_{cp} = 3300 \div 3700 \text{ K}$) i mizerną skuteczność świetlną 20÷26 lm/W (a lampy 100 W nawet znacznie mniej) ich zakres stosowania jest coraz bardziej ograniczony.

8. Lampy sodowe niskoprężne

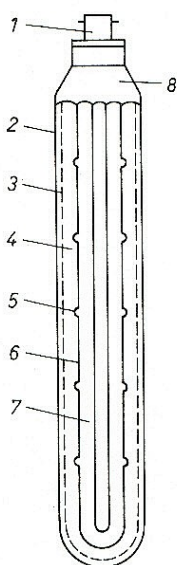
Lampy sodowe niskoprężne są źródłami światła o rekordowej skuteczności świetlnej, od 100 lm/W do nawet 200 lm/W, ale o **świecie monochromatycznym** uniemożliwiającym rozróżnianie barw. Są dziedziną skończoną, w której trudno oczekiwać jakiegokolwiek wyraźnego postępu. Prototypowe konstrukcje pojawiały się od roku 1923, ale pierwsze znaczniejsze zastosowanie praktyczne pochodzi z roku 1932, kiedy firma Philips oświetliła drogę łączącą, odległą o 6 km, dwa nieduże miasteczka w pobliżu Maastricht.

Podobnie jak lampy rtęciowe niskoprężne, wykorzystują **promieniowanie rezonansowe** i wobec tego ciśnienie cząstkowe pary sodu, podstawowego składnika atmosfery w jarzniku, wynosi ok. 1 Pa. Promieniowanie rezonansowe sodu to dwie linie widmowe usytuowane tuż obok siebie; są wynikiem przejścia atomów sodu na poziom energetyczny podstawowy:

z poziomu $3^2P_{3/2}$ (2,098 eV), co daje linię widmową $\lambda = \frac{1236}{2,098 - 0} \approx 588,99 \text{ nm} \approx 589,0 \text{ nm}$

z poziomu $3^2P_{1/2}$ (2,096 eV), co daje linię widmową $\lambda = \frac{1236}{2,096 - 0} \approx 589,59 \text{ nm} \approx 589,6 \text{ nm}$

Jest to tzw. dublet sodowy, promieniowanie monochromatyczne, światło pomarańczowe, jeśli pominąć śladowe tło widmowe.



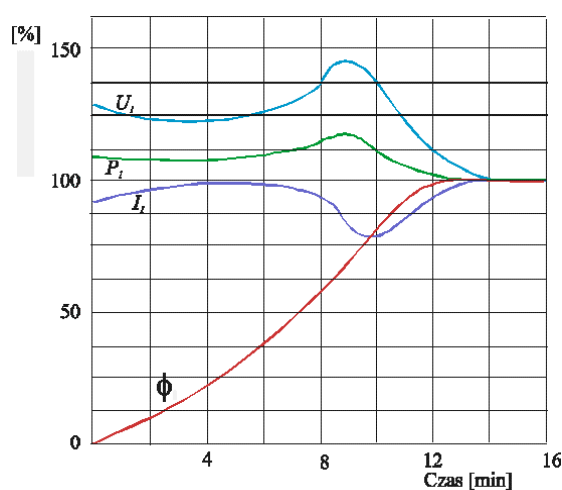
Rys. 41. Budowa lampy sodowej niskoprężnej [1]

1 – trzonek BY 22, 2 – bańka zewnętrzna, 3 – reflektor podczerwieni, 4 – próżnia, 5 – wgłębienia jarznika, miejsca kondensacji sodu, 6 – ścianka jarznika, 7 – atmosfera jarznika, 8 – getter

W porównaniu z lampą rtęciową niskoprężną (świełówką) okolicznością niezwykle korzystną jest to, że promieniowanie rezonansowe sodu leży w zakresie widzialnym, a nawet dość blisko długości fali odpowiadającej największej czułości oka. Skuteczność fotometryczna całkowitego promieniowania lampy wynosi $\eta_f = 0,68$. Nie są potrzebne luminofory, jak w świełówe. Zarazem w porównaniu ze świełówką okolicznością bardzo niekorzystną jest to, że dla uzyskania odpowiedniego ciśnienia nasyconej pary sodu, jarznik trzeba utrzymywać w temperaturze aż ok. 300°C, co – zważywszy dużą objętość jarznika, jak w każdej lampie niskoprężnej – niesie efekty niekorzystne. Występują duże straty ciepłne obniżające sprawność energetyczną lampy, a zapłon zimnej lampy trwa wyjątkowo długo: 7÷15 min. Aby traconą moc ograniczyć, rurę jarznika nadaje się kształt litery U i umieszcza się ją w „termosie”, w bańce zewnętrznej oddzielonej próżnią (rys. 41). Wewnętrzną powierzchnię bańki zewnętrznej pokrywa się powłoką (In_2O_3 lub SnO_2 lub Au lub Bi_2O_3), stanowiącą filtr interferencyjny odbijający promieniowanie podczerwone.

Jarznik ze szkła sodowo-wapniowego ma wewnątrz powłokę ze szkła boranowego, odporną na działanie pary sodu. Ścianka jarznika ma szereg wgłębień, w których wytwórnia umieszcza sól (rys. 41). Są to najchłodniejsze miejsca jarznika, w nich kondensuje się sól podczas stygnięcia wyłączonej lampy i w nich w pracującej lampie pozostaje nadmiar sodu. Gdyby tych wgłębień nie było, sól kondensowałby się na całej wewnętrznej powierzchni jarznika, tworząc zwierciadlaną powłokę odbijającą światło. Aby ograniczyć kondensację sodu w zagięciu U jarznika, które mogłoby też być jednym z najchłodniejszych miejsc, osłania się je pokrywką lub powłoką odbijającą promieniowanie podczerwone.

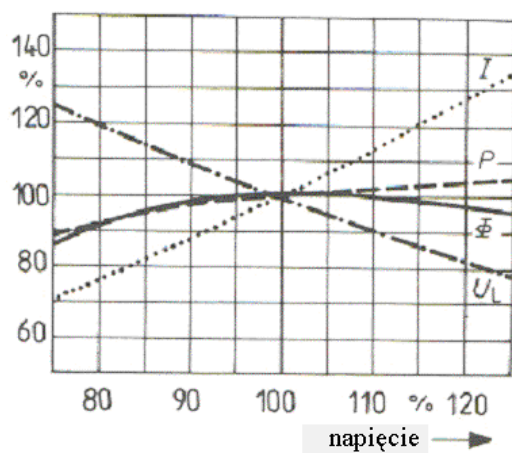
W jarzniku poza parą sodu znajduje się neon spełniający rolę gazu zapłonowego i gazu buforowego. Podczas rozgrzewu lampy zimnej wzbudzenie neonu daje czerwone światło. W warunkach ustalonych zanika ono niemal zupełnie, bo sól ma poziomy wzbudzenia i poziom jonizacji (5,12 eV) kilkakrotnie niższe niż neon. W trakcie zapłonu elektrody wolframowe z dużą ilością emitera nie są podgrzewane. Podwyższone napięcie zapłonowe (rzędu $1,4 \cdot U_n$) uzyskuje się z transformatora rozproszeniowego, układu autotransformatorowego lub układu L-C.



Rys. 42. Przebieg prądu (I_l), napięcia (U_l) i mocy (P_l) jarznika oraz strumienia świetlnego (Φ) podczas rozświetlania lampy sodowej niskoprężnej o układzie połączeń, jak na rys. 39b (wartości względne odniesione do znamionowych)

Podczas wielu minut rozgrzewu i rozświetlania lampy strumień świetlny stopniowo zwiększa się (rys. 42). Pobór prądu i mocy zmienia się w niewielkim zakresie, a w układzie z kompensacją szeregową nie ma zwiększonego prądu załączeniowego.

Lampy sodowe niskoprężne są mniej niż inne lampy wrażliwe na odchylenia napięcia zasilającego (rys. 43), co w niektórych zastosowaniach może być cenną zaletą. Ze względu na wysoką temperaturę jarznika lampa jest też mało wrażliwa na zmiany temperatury otoczenia.



Rys. 43. Wpływ względnej wartości napięcia zasilającego na względną wartość parametrów lamp sodowych niskoprężnych [7]. Oznaczenia jak na rys. 28-29.

Przydatność lamp sodowych niskoprężnych i właściwy zakres ich stosowania wzbudza emocje: od zachwytu skutecznością świetlną po potępienie za widmo światła. Nie wchodzi w rachubę jako lampy do ogólnych celów oświetleniowych we wnętrzach. Pozostaje oświetlenie dróg o słabym ruchu pieszym bądź dróg miejskich doświetlanych wystawami sklepowymi albo dróg szybkoego ruchu, również autostrad, a zwłaszcza ich węzłów, gdzie do prowadzenia wzrokowego kierowców przydaje się światło o tak wyróżniającą się barwie. Bywa, że nieorientowani w niuansach oświetleniowych kierowcy i inni użytkownicy dróg oświetlonych niskoprężnymi sodówkami w ogóle nie dostrzegają uchybień widzenia barwnego: sygnalizacja świetlna świeci własnym światłem, podobnie pobliskie wystawy sklepowe i napisy świetlne, a kierowca oświetla drogę i przeszkody na niej białym światłem własnych reflektorów.

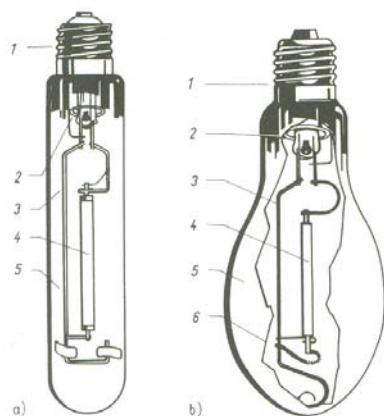
Monochromatyczne światło sodówek niskoprężnych zapewnia dużą ostrość widzenia, nawet w zamglonej lub zapyłonej atmosferze, co jest atutem w oświetleniu drogowym, a także w niektórych silnie zapyłonych pomieszczeniach przemysłowych. Przydaje się też na stanowiskach kontroli technicznej wykrywających defekty powierzchni.

Lampy sodowe niskoprężne nie nadają się do instalowania w miejscach narażonych na drgania, np. na estakadach dźwigów ani na mostach lub wiaduktach. Są wyjątkowo dużymi i ciężkimi źródłami światła i mimo stosowanych środków zaradczych łatwo ulegają wtedy uszkodzeniom mechanicznym przy trzonku.

9. Lampy sodowe wysokoprężne

Jeżeli, wychodząc z warunków panujących w lampie sodowej niskoprężnej (1 Pa), zwiększać ciśnienie cząstkowe pary sodu, to zanika promieniowanie rezonansowe sodu i skuteczność świetlna wyładowania maleje aż do ciśnienia ok. 100 Pa. Dopiero przy dalszym zwiększaniu ciśnienia, rosnący udział wyższych przejść energetycznych atomów sodu pozwala znowu uzyskać zadowalający poziom skuteczności świetlnej.

Lampa sodowa wysokoprężna (rys. 44), która to wykorzystuje, pojawiła się na rynku dopiero w roku 1962, kiedy opanowano technologię przejrzystego materiału na jarznik, wytrzymującego działanie pary sodu w temperaturze przekraczającej 750°C. Jest to **lukałoks**, tlenek glinu Al_2O_3 z ewentualnym dodatkiem tlenku magnezu MgO , polikrystaliczny o współczynniku przepuszczania do 0,96 albo monokrystaliczny o współczynniku przepuszczania do 0,98. Materiał nie jest plastyczny, wobec tego nie można zatapiać w nim doprowadników. Tnie się odcinki rurki z lukałeksu i z obu końców wprowadza do wnętrza rurki niobowe do elektrod, uszczelnione korkami ceramicznymi. Niob ma współczynnik rozszerzalności cieplnej najbardziej zbliżony do wartości charakteryzującej stosowaną tu ceramikę glinową.

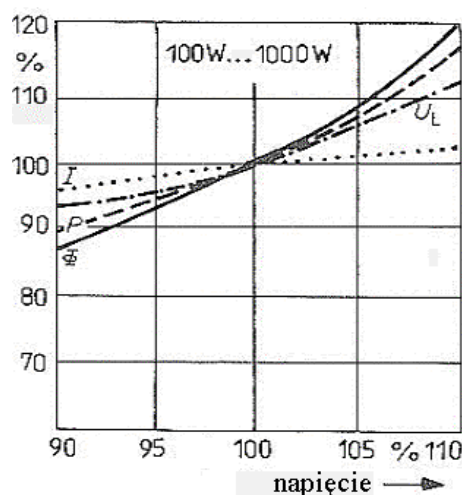


Rys. 44. Budowa lamp sodowych wysokoprężnych [1]: a) o bańce cylindrycznej przezroczystej; b) o bańce owalnej matowanej

1 – trzonek, 2 – getter (pochłaniacz gazów), 3 – doprowadnik, 4 – jarznik, 5 – bańka zewnętrzna, 6 – warstwa rozpraszająca światło

Do niedawna jarznik z reguły zawierał nasyconą parę sodu, parę rtęci jako gaz buforowy, wielokrotnie zwiększający napięcie łuku oraz gaz szlachetny (Xe, A, Ne) jako gaz zapłonowy, a przy okazji – ze względu na dużą masę atomową – ograniczający straty cieplne kolumny łukowej. Jest tendencja eliminowania rtęci (ang. *Hg-free lamps*) i używania ksenonu jako gazu buforowego.

Zapłon i rozgrzew lampy zimnej trwa 2÷5 minut. Pobierany prąd początkowo ma wartość $(1,4 \div 1,6) \cdot I_n$. Czas powtórnego zapłonu lampy nagrzanej po krótkotrwałym zaniku lub zapadzie napięcia wynosi do 6 minut, ale wprowadzenie anteny zapłonowej spieczonej z jarznikiem pozwala skrócić ten czas poniżej 1 minuty.



Rys. 45. Wpływ względnej wartości napięcia zasilającego na względną wartość parametrów lamp sodowych wysokoprężnych [7]. Oznaczenia jak na rys. 28-29.

Lampy sodowe wysokoprężne są dostępne w zakresie mocy od 35 W do 1000 W i wykazują skuteczność świetlną od 40 lm/W do 150 lm/W. Niestety własności barwowe światła większości typów sodówek wysokoprężnych nie są dobre: wskaźnik oddawania barw $R_a < 35$ przy $T_{cp} \approx 2000 \div 2100$ K, nieliczne mają wskaźnik $R_a \approx 65$ przy $T_{cp} \approx 2150$ K, nieakceptowany we wnętrzach o stałym przebywaniu ludzi. Barwa światła żółtożółta jest natomiast do przyjęcia w oświetleniu ulicznym, a pożądana do dekoracyjnego oświetlania różnych budowli, zwłaszcza wykonanych z piaskowca. Za poprawę własności barwowych do poziomu $R_a \approx 80 \div 85$ przy $T_{cp} = 2500$ K płaci się dwukrotnym obniżeniem skuteczności świetlnej, do poziomu 50÷60 lm/W. Ta dziedzina ma jeszcze znaczny potencjał rozwojowy. Trwają poszukiwania nowych rozwiązań, jeśli chodzi o skład i parametry robocze atmosfery w jarzniku. Doskonali się elektroniczne układy stabilizująco-zapłonowe gwarantujące stabilność parametrów mimo procesów starzeniowych, objawiających się zwiększaniem napięcia łuku oraz mocy pobieranej, i mimo występujących odchyłań napięcia, na które sodówki wysokoprężne są bardziej wrażliwe (rys. 45) niż sodówki niskoprężne.

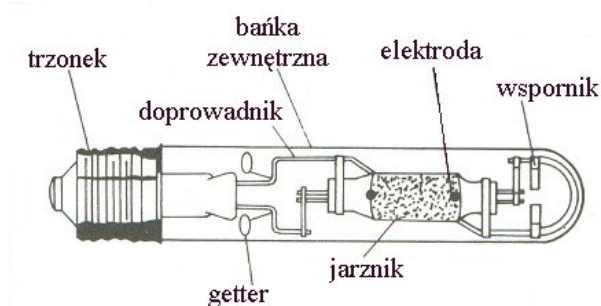
10. Lampy metalohalogenkowe

Lampy metalohalogenkowe są pomysłem z roku 1911, zrealizowanym na skalę przemysłową dopiero w roku 1962. Obejmują wiele odmian lamp do ogólnych celów oświetleniowych (rys. 46, 47) i do celów specjalnych (np. główne światła samochodowe).

Do przestrzeni wyładowania w jarzniku poza rtęcią wprowadza się również inne metale, ich atomy są wzbudzane i do wzbogacenia widma wykorzystuje się ich wyższe przejścia energetyczne, dające promieniowanie w zakresie widzialnym. Spośród ogólnej liczby osiemdziesięciu metali

wchodzi w rachubę użycie około pięćdziesięciu, które spełniają wszelkie stawiane warunki:

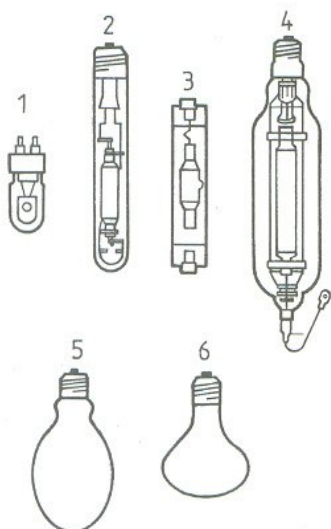
- atomy mają liczne poziomy wzbudzenia, znacznie niższe niż poziom jonizacji, łatwo wzbudzają się w atmosferze pary rtęci o dużym ciśnieniu cząstkowym, a prawdopodobieństwo ich jonizacji jest nieduże,
- w temperaturze roboczej jarznika do 1000 K tworzą lotne halogenki, a ich ciśnienie cząstkowe pary nasyconej jest rzędu 1 kPa,
- uzupełniają promieniowanie w pożądanym zakresie widma,
- ich chemiczne oddziaływanie na ścianki jarznika i elektrody nie nadweręża nadmiernie trwałości lampy.



Rys. 46. Budowa lampy metalohalogenkowej o przezroczystej bańce zewnętrznej [7]

Można użyć różnej liczby wspomnianych metali i w rozmaitych proporcjach. Liczba możliwych kombinacji rozwiązań lamp metalohalogenkowych jest nieograniczona. Wykorzystują one szczególnie skomplikowany mechanizm wytwarzania światła i nadal mają ogromne możliwości rozwojowe. W lampach seryjnie produkowanych, nie przekracza się liczby dziesięciu metali, na ogół jest ich nie więcej niż pięć. Do najczęściej wykorzystywanych należą:

- skandowce ^{21}Sc ^{66}Dy ^{67}Ho ^{69}Tm (^{58}Ce ^{63}Eu)
- potasowce ^{11}Na (^3Li ^{19}K ^{37}Rb ^{55}Cs)
- glinowce ^{49}In ^{81}Tl
- węglowce ^{50}Sn



Rys. 47. Różne kształty lamp metalohalogenkowych o bańce przezroczystej (1÷4) lub matowanej (5 i 6) [7]

Lampa 4 (E40, 2000 W i 3500 W) dwustronnie trzonkowana z odpowiednim układem zapłonowym jest przystosowana do bezzwłocznego ponownego zapłonu po krótkotrwałym zaniku napięcia

Wspomniane metale wprowadza się do jarznika nie w postaci czystej, lecz w postaci halogenków, na ogół jodków. W warunkach roboczych halogenki są lotne, a w osi jarznika, w kolumnie łukowej, dysocjują, wprowadzając tam atomy podatne na wzbudzenie.

W rozgrzanym jarzniku składnikiem o największym ciśnieniu cząstkowym (rzędu 10^5 Pa) jest

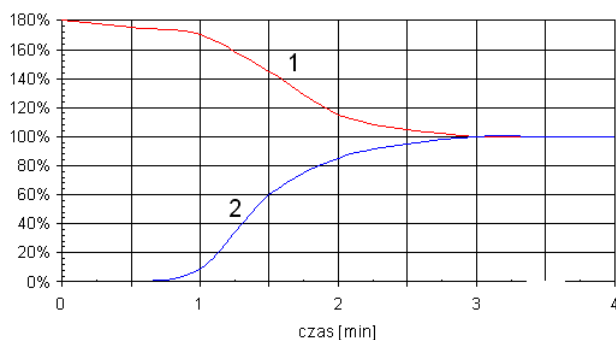
para rtęci, która nie tylko dodaje swoje linie widmowe, ale również:

- pełni rolę gazu buforowego, pozwalając uzyskać pożądany poziom napięcia łuku,
- ogranicza dyfuzję innych metali z osi kolumny łukowej w kierunku ścianek jarznika,
- wiąże nadwyżkę jodu w przezroczysty jodek rtęciowy HgJ_2 (o temperaturze wrzenia 351°C), bo sam jod silnie pochłania światło.

Przy wielu składnikach niełatwo utrzymać jednorodny skład atmosfery w całej objętości jarznika o niejednakowej temperaturze, zapobiec „rozwarstwianiu się” składników, co niekorzystnie odbija się na strumieniu świetlnym i na barwie światła. Dąży się z tego powodu do ograniczania objętości jarznika i unika się wydłużonych jarzników; powinien to być cylinder o stosunku wysokości do średnicy nie przekraczającym liczby 4, a wyjątkowo 5.

Ciśnienia cząstkowe par nasyconych użytych metali zależą od temperatury najchłodniejszego punktu jarznika. Stąd wrażliwość lamp metalohalogenkowych na odchylenia napięcia zasilającego i na odchylenia od przewidzianego przez wytwórcę położenia pracy. Końce jarznika powinny mieć temperaturę wyższą od średniej, by zapobiec tam kondensacji jodku sodu NaJ i niektórych innych halogenków.

Jarznik początkowo wykonywano z czystego kwarcu (jarznik kwarcowy), ale pozwalał on na dyfuzję składników atmosfery jarznika i stopniową degradację parametrów wyładowania; obecnie używa się również lualoksu (jarznik ceramiczny), który temu zapobiega. Lampy metalohalogenkowe z ceramicznym jarznikiem (pierwsze to *Mastercolour* w roku 1994) mają bardziej stabilne parametry barwowe i większą trwałość, a dzięki wyższej temperaturze jarznika również wyższą skuteczność świetlną. Bańka zewnętrzna ze szkła hartowanego jest przezroczysta (rys. 47) albo matowana dla zmniejszenia luminancji.

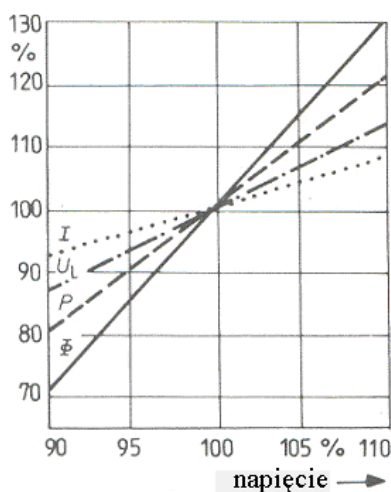


Rys. 48. Przebieg prądu pobieranego (1) i strumienia świetlnego (2) podczas rozświetlania lampy metalohalogenkowej 1000 W (wartości względne odniesione do znamionowych)

Mieszaninę Penninga ułatwiającą zapłon stanowi para rtęci oraz gazy szlachetne ($\text{Ne}+\text{A}$ lub $\text{Kr}+\text{A}$). Halogenki, obecne w postaci lotnej również w trakcie zapłonu, są elektroujemne, co niestety podnosi napięcie zapłonowe lampy. Rzadko – w przypadku lamp mniejszej mocy – wystarcza elektroda zapłonowa i układ zasilania ze statecznikiem, jak w przypadku zwykłej rtęciówki. Do zapłonu zimnej lampy jest na ogół potrzebny układ zapłonowy wytwarzający impulsy napięciowe (np. o częstotliwości 22,5 kHz) o wartości szczytowej 1,8...3 kV. Rozgrzew trwa kilka minut (rys. 48), a prąd wtedy pobierany może być blisko dwukrotnie większy niż znamionowy, co wymaga uwzględnienia przy projektowaniu instalacji. Natychmiastowy zapłon lampy nagrzanej, po krótkotrwałym zaniku lub zapadzie napięcia wymaga przyłożenia napięcia o wartości szczytowej 25÷60 kV i specjalnej konstrukcji lampy dwustronnie trzonkowanej (rys. 47). Lampy metalohalogenkowe są bardzo wrażliwe na odchylenia napięcia (rys. 49).

Dostępny asortyment lamp do ogólnych celów oświetleniowych obejmuje szeroki zakres mocy od 20 W do 2000 W przy skuteczności świetlnej od 60 lm/W do 100 lm/W, przy czym te większe wartości na ogół nie idą w parze z doskonałymi parametrami barwowymi światła. Są jednak dostępne lampy o wskaźniku $R_a > 95$ przy temperaturze barwowej $T_{cp} = 6500\text{ K}$, niezastąpione w

miejscach, gdzie są najwyższe wymagania w tym względzie i trzeba wytworzyć ogromny strumień świetlny: stadiony przystosowane do transmisji telewizyjnej.



Rys. 49. Wpływ względnej wartości napięcia zasilającego na względną wartość parametrów lamp metalohalogenkowych [7].
Oznaczenia jak na rys. 28-29.

Pojawiły się lampy Mastercolour City CDM-TT/ET o mocach 70 W, 100 W i 150 W jako bezpośrednie zamienniki lamp sodowych wysokoprężnych SON. Wymieniając same źródła światła w istniejących oprawach oświetleniowych można poprawić właściwości barwowe wytwarzanego światła. Podobnie, jak w przypadku lamp sodowych wysokoprężnych, doskonalone są elektroniczne stateczniki i regulatory strumienia świetlnego.

11. Diody elektroluminescencyjne

Diody elektroluminescencyjne (ang. *light emitting diode* – LED) są półprzewodnikowymi przyrządami optoelektronicznymi, emitującymi promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie widzialnym, jak i podczerwieni, a ostatnio również – w zakresie nadfioletu. Pojawiły się około roku 1960 jako miniaturowe półprzewodnikowe elementy nieorganiczne (mineralne) o strumieniu świetlnym, luminancji, właściwościach barwowych światła i skuteczności świetlnej na poziomie wykluczającym ich użycie do celów oświetleniowych. Były stosowane wyłącznie jako miniaturowe źródła światła do celów sygnalizacyjnych i dekoracyjnych. Od tego czasu nastąpił taki ich rozwój, a perspektywy nadal są obiecujące, że są brane pod uwagę w różnorodnych dziedzinach techniki oświetleniowej (rys. 50).



Rys. 50. Budowa jednej z odmian diod elektroluminescencyjnych

Diody wytwarzają światło na zasadzie **elektroluminescencji** (rozdz. 3). Przy przepływie prądu przewodzenia nośniki większościowe po przejściu przez złącze ulegają **rekombinacji**, czemu

towarzyszy zwrot energii uprzednio pobranej przy uwalnianiu elektronów z wiązań. Energia ta jest wyzwolana w postaci ciepła nagrzewającego złącze i w postaci promieniowania, przy czym proporcje mocy uwalnianej pod jedną i drugą postacią są bardzo różne, zależą przede wszystkim od materiału złącza. Na diody LED nadają się struktury, które wypromieniowują kilkadziesiąt procent uwalnianej mocy (rekombinacja promienista), a nie jak krzem tylko 1% i to w zakresie podczerwieni.

Wykorzystuje się **promieniowanie spontaniczne**, przejścia proste, gdy elektrony, przechodząc z wyższego poziomu energetycznego na niższy, wypromieniowują kwant energii $h \cdot \nu$. Przejścia tego rodzaju dominują w półprzewodnikach z prostym układem pasmowym, w którym minimum pasma przewodnictwa i wierzchołkowi pasma walencyjnego odpowiada ta sama wartość pędu. Takie przejścia najpierw wykryto w fosforu galu GaP oraz w arsenku galu GaAs, który ponadto odznacza się dużą sprawnością kwantową (stosunkiem liczby przejść rekombinacyjnych generujących fotony do liczby nośników ładunku przechodzących przez warstwę zaporową złącza p-n). Z obydwu powodów GaAs był początkowo podstawowym materiałem do produkcji diod LED.

Elektroluminescencja w półprzewodniku w zasadzie wymaga polaryzacji w kierunku przewodzenia. Świeci głównie warstwa p, a intensywność świecenia zależy od wartości prądu przewodzenia, przy czym zależność ta jest liniowa w dużym zakresie zmian prądu. Długość fali generowanego promieniowania monochromatycznego diody można obliczyć tak samo, jak w przypadku lamp niskoprężnych (rys. 15, rozdz. 7), jeżeli zna się wyrażoną w elektronowoltach różnicę energii poziomów, między którymi zachodzi rekombinacja ($W_c - W_v$), czyli szerokość pasma zabronionego ($W_g = W_c - W_v$):

$$\lambda = \frac{1236}{W_g} \quad [\text{nm}]$$

Poza tym dominującym promieniowaniem mogą się pojawiać również fale o innych długościach, ponieważ rekombinujące nośniki mogą mieć energie z różnych poziomów pasma przewodnictwa i przeskakiwać na różne poziomy pasma walencyjnego, ale prawdopodobieństwo takich przejść jest znacznie mniejsze.

Są też bipolarne diody elektroluminescencyjne, działające po odwróceniu biegunowości napięcia. Niektóre zmieniają wtedy barwę światła, czyli zachowują się jak dwie różne diody w jednej obudowie.

Występują straty mocy promienistej wskutek pochłaniania wewnętrznego i całkowitego wewnętrznego odbicia. Miara tych strat jest stosunek zewnętrznej do wewnętrznej sprawności kwantowej¹. O ile wewnętrzna sprawność kwantowa n_{qw} jest zależna od technologii procesu wytwarzania złącza (wskazana technika dyfuzyjna) oraz właściwości zastosowanego półprzewodnika, o tyle na zewnętrzną sprawność kwantową n_{qz} ma także wpływ kształt diody (płaska, półsferyczna).

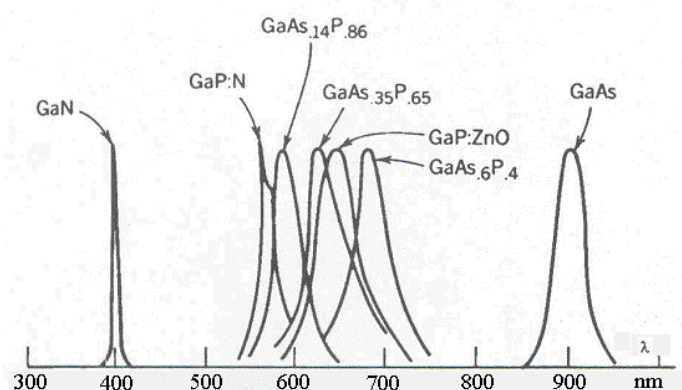
Pierwsze diody LED miały promieniowanie jednobarwne, prawie monochromatyczne i skuteczność świetlną rzędu 1 lm/W, co ograniczało ich stosowanie tylko do celów sygnalizacyjnych. Co kilka lat ogłaszano sukces w postaci uzyskania kolejnej barwy (tabl. 4, rys. 51) w wyniku wypróbowania nowej kompozycji materiałów i procedury ich domieszkowania, po czym trwały prace nad poprawą skuteczności świetlnej nowej diody. Barwy kolorowe diod są barwami widmowymi albo bardzo do nich zbliżonymi, sytuują się na linii barw widmowych układu xyz albo tuż przy tej linii [6].

¹ Zewnętrzna sprawność kwantowa – stosunek liczby fotonów wyemitowanych przez diodę do liczby nośników przepływających przez złącze. Wewnętrzna sprawność kwantowa – stosunek liczby wygenerowanych fotonów do liczby rekombinujących par elektron-dziura.

Tablica 4. Przykłady diod elektroluminescencyjnych o różnych barwach

Barwa	Długość fali promieniowania nm	Napięcie progowe V	Zastosowany półprzewodnik/ /domieszkowanie
IR (podczerwień)	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1,63$	AlGaAs – arsenian galu/glin
Czerwona	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta V < 2,03$	AlGaAs – arsenian galu/glin GaAsP – arsenian/fosforek galu
Pomarańczowa	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta V < 2,10$	GaAsP – arsenian/fosforek galu
Żółta	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta V < 2,18$	GaAsP – arsenian/fosforek galu
Zielona	$500 < \lambda < 570$	$2,18 < \Delta V < 2,48$	GaN – azotek galu GaP – fosforek galu
Niebieska	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta V < 2,76$	ZnSe – selenek cynku InGaN – azotek galu/ind SiC – węgiel krzemu
Fioletowa	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta V < 3,1$	
UV (nadfiolet)	$\lambda < 400$	$\Delta V > 3,1$	C – diament
Biała		$\Delta V = 3,5$	

W miarę poprawiania skuteczności świetlnej diod rozważano ich użycie do celów oświetleniowych, ale konieczna była poprawa własności barwowych i uzyskanie światła białego. Najpierw czyniono to łącząc trzy diody R, G i B w jednej obudowie. Wyniki były mierne, jeśli chodzi o powtarzalność parametrów, nawet przy łączeniu ich na poziomie matryc diodowych.



Rys. 51. Widmo promieniowania diod wykonanych z różnych materiałów

W końcu opanowano produkcję białych diod w formie pojedynczej struktury. Początkowo diody niebieskie domieszkowano fosforem, co dawało światło białe o temperaturze barwowej około 4000 K i wskaźniku oddawania barw R_a do 75, ale parametry te nie były stabilne. Nowsza technologia polega na wykorzystaniu diod wytwarzających promieniowanie nadfioletowe, następnie przetwarzane przez luminofor. Takie diody są odmianą fluorescencyjnych źródeł światła i roją duże nadzieje; wystarczy opanować technologię diod UV o wysokiej sprawności, które będą źródłem światła o dość dowolnej barwie określonej przez zastosowany luminofor, który też musi się odznaczać jak najwyższą sprawnością energetyczną.

Skuteczność świetlna mniejszych diod aktualnie osiąga wartości: $10\div 20$ lm/W w przypadku diod niebieskich, zielonkawych i białych, $20\div 40$ lm/W – żółtych i czerwonych, a diod dużej mocy – 100 lm/W.

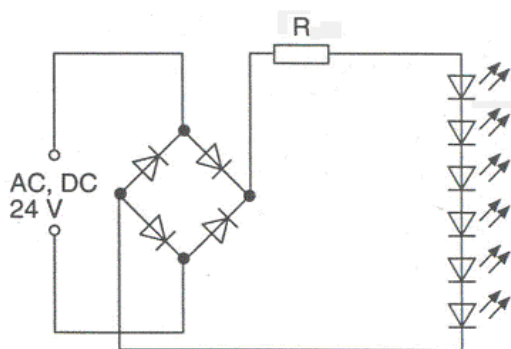
Pojawienie się ostatnio diod dużej mocy (ang. *power LED*) przyspieszy oświetleniowe zastosowania diod LED. Mają one moc: 1 W (350 mA), 2,5 W (700 mA) i 5 W (1,4 mA), emitują światło o różnej barwie: białe, ciepłobiałe, bursztynowe, czerwone, zielone, niebieskie, niebieskozielone. Wymagają dobrego odprowadzania ciepła przez radiatory, których temperatura nie powinna przekraczać na przykład 80°C . Przegrzewanie grozi pogorszeniem parametrów fotometrycznych i znacznym obniżeniem trwałości złącza.

Diody elektroluminescencyjne charakteryzuje się, podobnie jak inne źródła światła, zarówno parametry elektryczne, jak i fotometryczne. Główne parametry elektryczne to: dopuszczalny prąd przewodzenia (zwykle $10\div 300$ mA) i spadek napięcia przy przewodzeniu ($1,5\div 3,5$ V). Natomiast do parametrów fotometrycznych należą:

- moc promienista (zwykle rzędu miliwatów) i strumień świetlny,
- widmo promieniowania i właściwości barwowe światła: temperatura barwowa ($2800\div 5500$ K) i ogólny wskaźnik oddawania barw ($70\div 90$ dla diod białych),
- rozsył światłości, najlepiej w postaci wykresu biegunowego, a co najmniej kąta rozsyłu (diody o rozsyśle wąskokątnym, np. 10° , szerokokątnym, np. 60° i więcej).

Rozsył światłości jest zależny od budowy matrycy diodowej emitującej światło, ale może być także kształtowany dzięki kształtom jej obudowy i właściwościom materiałów, z których jest ona zbudowana. Obudowy matryc powodują wprawdzie pogorszenie niektórych właściwości związane np. ze zmianą warunków termicznych pracy złącza półprzewodnikowego, wpływającą na stabilność parametrów, ale w zamian mogą pełnić rolę elementu optycznego kształtującego bryłę światłości.

Obudowy bywają cylindryczne o półsferycznym zakończeniu, o średnicy 3, 5, 8 i 10 mm, cylindryczne o płaskim zakończeniu, prostokątne, a także do montażu przewlekane lub powierzchniowe.



Rys. 52. Przykład zasilania diod elektroluminescencyjnych

Diody elektroluminescencyjne są wrażliwe na temperaturę złącza, najsilniej reagują na nią diody czerwone, najsłabiej niebieskie. Ze wzrostem temperatury maleje strumień świetlny (np. o 40% przy wzroście temperatury o 50 K dla wrażliwszych), a zwiększa się długość fali, której odpowiada maksimum mocy promienistej. W konsekwencji nawet większa zmiana temperatury otoczenia, w której pracuje lampa o świetle białym z matrycami RGB, wpływa na temperaturę barwową emitowanego światła. Zapobieganie temu wymaga stosowania układów elektronicznych, które tak sterują rozplywem prądu przez diody, że barwa wymieszanego światła jest stała.

Oprócz światłości od temperatury otoczenia zależy również szerokość pasma zabronionego pomiędzy pasmami przewodnictwa w półprzewodniku. Prowadzi to do zmiany długości emitowanych fal świetlnych (zmienia się barwa światła) oraz do zmiany napięcia przewodzenia. Zmiany te

są na ogół niewielkie, ale w niektórych zastosowaniach należy również o nich pamiętać, gdyż niewielkie zmiany napięcia zasilającego diody prowadzą do znaczącego wzrostu prądu diody.

Trwałość użytkowa diod wynosi 60 000÷100 000 h, co praktycznie oznacza, że źródła światła w ogóle się nie wymienia. Są to konstrukcje zwarte i zamknięte, o niedużych wymiarach, bardzo niezawodne, odporne na narażenia mechaniczne i inne. Diody są zasilane napięciem bardzo niskim 6 V, 12 V lub 24 V (rys. 52), na przykład ze źródła bezpiecznego SELV, co rozwiązuje wszelkie problemy ochrony przeciwporażeniowej. Nie wykazują zwiększonego prądu załączeniowego. W porównaniu z innymi źródłami światła ich bezpośrednie i pośrednie zagrożenie dla środowiska jest wyjątkowo małe; zwiększy się nieco w razie upowszechnienia diod z luminoforem. Zatem diody LED mają wiele ważnych zalet w porównaniu z innymi źródłami światła.

Aktualne ich zastosowania są różnorodne. Nadal rozszerzają się ich zastosowania w roli świateł sygnalizacyjnych:

- samochodowych (światła kierunkowskazów, hamowania, pozycyjne, obrysowe, tablice rejestracyjne, wnętrza, wskaźniki),
- ulicznych (oprawy w nawierzchni wyznaczające pasy ruchu lub torowiska, sterowanie ruchem),
- nawigacyjnych (pasy startowe lotnisk),
- przeszkodowych (na wysokich obiektach),
- osobistych (pieszych, rowerzystów, motocyklistów),
- ciągów komunikacyjnych w budynkach (schody i inne przeszkody, drogi ewakuacyjne) i innych znaków ułatwiających orientację w pomieszczeniach z wygaszonym oświetleniem podstawowym.

Do oświetlania wnętrz są dostępne diodowe oprawy sufitowe i przenośne lampy do oświetlenia miejscowego. W oświetleniu zewnętrznym można wskazać liczne aplikacje: oprawy parkowe, ogrodowe, uliczne i dekoracyjne, oznaczenia przeszkód lub tras, oświetlenie elewacji budynków.

Kanadyjski operator sieci elektroenergetycznej Hydro-Quebec ocenia roczne zużycie energii elektrycznej przez sygnalizację uliczną w prowincji Quebec na 58 700 000 kWh, co odpowiada zużyciu przez 2400 gospodarstwa domowe. Zastąpienie żarówek sygnalizacyjnych (o trwałości 8000 h i skuteczności świetlnej 10 lm/W) przez diody LED (o trwałości co najmniej 60 000 h i skuteczności świetlnej co najmniej 40 lm/W) pozwoli kilkakrotnie zmniejszyć koszty energii i w stopniu jeszcze większym koszty wymiany źródeł światła. Na niekorzyść diod przemawiają koszty inwestycyjne: żarówka kosztuje tylko kilka euro, a równoważna matryca diodowa 60 euro. Szacunkowo można przyjąć koszt diod jako bliski 10 centów/lumen i dopóki nie zmaleje on kilkakrotnie, dopóty będzie głównym hamulcem w ich masowym stosowaniu.



Rys. 53. Wyświetlacz LED na gmachu giełdy NASDAQ w Nowym Jorku

Na fasadzie nowojorskiego gmachu giełdy papierów wartościowych NASDAQ (ang. *National Association of Securities Dealers Automated Quotations*), pierwszej całkowicie elektronicznej giełdy na świecie, zamontowano ogromny wyświetlacz z dziesiątków tysięcy diod elektroluminescencyjnych podający bieżąco najważniejsze informacje giełdowe (rys. 53).

Na dworcu lotniczym w Detroit ćwierćkilometrowy tunel dla pieszych oświetlono diodami LED. Sufit i ściany, wyłożone rzeźbionym szkłem i przezroczystym plastykiem, są ekranami dla sterowanych komputerowo widowisk światła i dźwięk odtwarzanych za pomocą tysięcy diod.

Podobne przykłady można by mnożyć. Są one wskazówką, że w nadchodzących kilku latach to zapewne diody elektroluminescencyjne dokonają największej ekspansji w technice oświetleniowej. Oczywiście nie z punktu widzenia wytwarzanej ilości światła, czy udziału w bilansie zapotrzebowanej mocy i zużywanej energii na cele oświetleniowe.

Niedługo po pojawieniu się diod o dużej światłości (HB-LED) światowe obroty nimi zwiększają się corocznie o ponad 20%. W roku 2002 osiągnęły 1,8 mld USD, z czego 40% przypadło na wyświetlacze telefonów komórkowych i innych aparatów przenośnych, 23% na duże tablice świetlne, 18% na oświetlenie samochodowe, tylko 5% na ogólne cele oświetleniowe i 2% na tradycyjną sygnalizację, a pozostałe 12% na liczne inne drobne aplikacje. W roku 2005 wyniosły 3,4 mld USD i przewiduje się, że osiągną 4,4 mld USD w roku 2007, z czego 45% przypadnie na telefony komórkowe, ale do 11% wzrośnie udział ogólnych zastosowań oświetleniowych (z tego 1/3 na diody o białym świetle)

Studium sporządzone dla amerykańskiego departamentu energetyki prognozuje, że po upowszechnieniu do ogólnych celów oświetleniowych białych diod drugiej generacji światowe zużycie energii elektrycznej udałoby się zredukować o 10%, co odpowiada rocznej oszczędności 100 mld USD.



Rys. 54. Giętki ekran OLED z organicznych diod elektroluminescencyjnych

Nowym produktem, który w przyszłości może zaważyć na rynku diod, są diody elektroluminescencyjne o złączach ze związków organicznych OLED (ang. *organic light emitting diode*), patent Kodaka z roku 1987, wdrożony ponad 10 lat później (rys. 54). Na razie są u progu rozwoju, mają niezadowalającą trwałość i skuteczność świetlną. Jednym z pierwszych (2004/2005) zastosowań przemysłowych są wyświetlacze (OLED screen) przenośnych odtwarzaczy mp3. Mogą w przyszłości wyprzeć wyświetlacze LCD. Przewiduje się ich zastosowania oświetleniowe po roku 2010 w postaci powierzchniowych źródeł światła, takich jak pokrycia sufitowe i kotary świetlne.

L i t e r a t u r a

1. Baer R. : Beleuchtungstechnik. Grundlagen. Verlag Technik, Berlin-München, 1990.
2. Florentine F. A. i inni: Lighting high bay areas with electrodeless lamps. Journal of the Illumi-

- nating Society, Winter 1997, s. 27-34.
3. Gündel H., Sonnenburg R.: Frequenzverhalten von Leuchtstofflampen. *Elektrie*, 1989, nr 1, s. 8-10.
 4. Kiefer G.: VDE 0100 und die Praxis. VDE Verlag, Berlin, 1992.
 5. Litvinov V. S., Rochlin G. N.: Teplovye istočniki optičeskogo izlučeniya. *Ènergija*, Moskva, 1975.
 6. Musiał E.: Podstawowe pojęcia techniki oświetleniowej. *Biuletyn SEP „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”*, 2005, nr 75, s. 3-38.
 7. Ris H.R.: Beleuchtungstechnik für Praktiker. VDE-Verlag, Berlin-Offenbach, 1992.
 8. Roth H.: Sachgerechter Einsatz von Kompaktleuchtstofflampen. *Elektropraktiker*, 1994, nr 2, s. 128-130, nr 3, s. 231-233.
 9. Turner B.P. i inni: Sulfur lamps – progress in their development. *Journal of the Illuminating Society*, Winter 1997, s. 10-16.
 10. Directive 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on energy efficiency requirements for ballasts for fluorescent lighting.
 11. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 14 czerwca 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań w zakresie efektywności energetycznej dla stateczników do lamp fluorescencyjnych. Dz.U.05.110.929. Rozporządzenie wprowadzające Dyrektywę 2000/55/EC.
 12. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. (Directive RoHS)
 13. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 6 października 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących ograniczenia wykorzystywania w sprzęcie elektronicznym i elektrycznym niektórych substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko. Dz.U.04.229.2310. Rozporządzenie wprowadzające Dyrektywę RoHS.

Dane bibliograficzne:

Musiał E.: **Przegląd elektrycznych źródeł światła. Główne właściwości i tendencje rozwojowe.** *Biul. SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”*, 2006, nr 79, s. 3–66.