

Promieniowanie rezonansowe UV w funkcji częstotliwości prądu w obwodzie lampy oraz warunków środowiska pracy

Streszczenie: Artykuł przedstawia badania wartości emisji promieniowania rezonansowego par rtęci UV w niskociśnieniowych rtęciowych lampach wyładowczych. Przeanalizowany został wpływ różnych czynników, takich jak ciśnienie pary rtęci, temperatura otoczenia i częstotliwość prądu, na luminancję energetyczną głównych linii rezonansowych. Wyniki badań eksperymentalnych były zgodne z modelem matematycznym opracowanym na potrzeby analizy. Stwierdzono, że temperatura otoczenia i częstotliwość prądu mają istotny wpływ na luminancję energetyczną. Obserwowano zmianę wartości luminancji energetycznej wraz ze zmianą temperatury otoczenia pracy oraz zwiększenie luminancji wraz ze wzrostem częstotliwości prądu w zakresie od 1 kHz do 20 kHz. Opracowany model matematyczny umożliwia prognozowanie luminancji, a więc intensywności promieniowania rezonansowego UV w zależności od warunków pracy. Wyniki badań mają istotne znaczenie dla optymalizacji pracy lampy i jej zastosowań w różnych dziedzinach.

Abstract: The most important parameter determining the magnitude of visible radiation emitted by a low-pressure mercury discharge lamp is the resonance radiation of mercury vapor. Its intensity depends on various factors, such as the pressure of mercury vapor, the type of auxiliary gases, the current density, and the length of the discharge tube. The results of conducted research and analysis have shown that the parameters affecting the intensity of ultraviolet resonance radiation can be implemented in a mathematical model that correlates the output radiation value with the lamp and operating environment parameters. (**Resonant UV radiation as a function of the frequency of the current in the lamp circuit and the working environment conditions**)

Słowa kluczowe: promieniowanie rezonansowe, lampa wyładowcza, rtęć, luminancja energetyczna, model matematyczny.

Keywords: Resonance radiation, mercury discharge lamps, energy luminance, mathematical model, lamp operation optimization

Wstęp

Promieniowanie rezonansowe par rtęci jest najważniejszym parametrem decydującym o wielkości emitowanego promieniowania w paśmie widzialnym przez niskociśnieniową rtęciową lampę wyładowczą. Jego intensywność zależy od różnych czynników, takich jak ciśnienie par rtęci, rodzaj gazów pomocniczych, gęstość prądu i długość rury wyładowczej. Wyniki przeprowadzonych badań i analiz wykazują, że parametry wpływające na intensywność promieniowania rezonansowego UV można zastosować w modelu matematycznym, który uwzględni wartość promieniowania wyjściowego w zależności od parametrów lampy i warunków pracy.

Promieniowanie rezonansowe UV

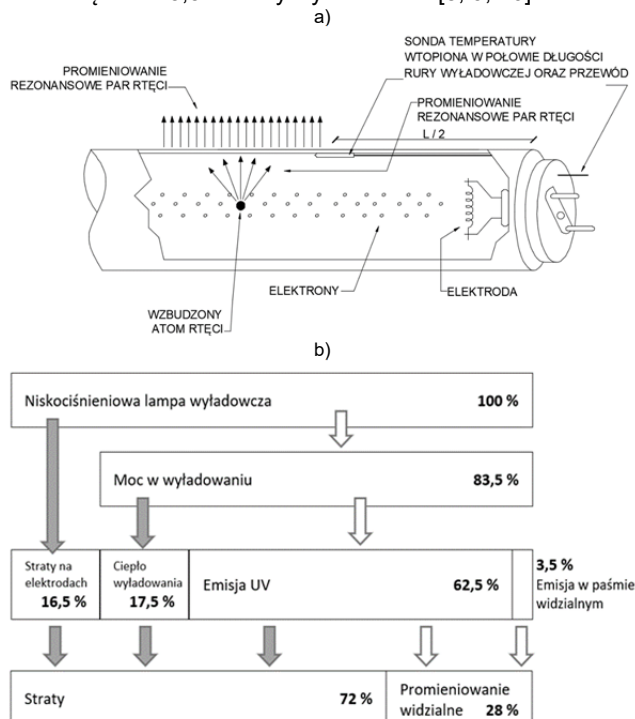
W niskociśnieniowych lampach wyładowczych z rtęcią, energia elektryczna jest przekształcana w różne formy energii (rys. 1a). Proces konwersji jest złożony i obejmuje różnorodne mechanizmy [1, 2]. Przykładowy schemat konwersji mocy w lampach został przedstawiony na rysunku 1b. Wartości procentowe podane w diagramie są uśrednione, jednak proporcje mogą nieznacznie różnić się w zależności od mocy lampy (związanej z stratami na elektrodach) oraz warunków zewnętrznych, takich jak temperatura.

W promieniowaniu rezonansowym par rtęci przy temperaturze otoczenia +30°C dominującą rolę odgrywiają dwie główne linie rezonansowe: $\lambda = 184,9$ nm oraz $\lambda = 253,7$ nm. Rozkład widmowy promieniowania emitowanego przez lampę w tej temperaturze i przy częstotliwości prądu w obwodzie lampy wynoszącej 50 Hz został przedstawiony na rysunku 2a.

Rozkład widmowy promieniowania rezonansowego par rtęci wynika z mechanizmu generacji poszczególnych linii rezonansowych [3, 4]. Przy ciśnieniu $p \approx 0,8$ Pa atomy rtęci mają określone poziomy energetyczne, które mogą zostać osiągnięte poprzez wzbudzenie po zderzeniu z elektronem. Na rysunku 2b przedstawiono ważniejsze poziomy energetyczne, przejścia między nimi oraz pasma emisji.

Najważniejszą rolę w pierwotnym promieniowaniu wyładowań w lampach zawierających parę rtęci przy niskim

ciśnieniu odgrywiają widma promieniowania rezonansowego o długości fali $\lambda = 184,9$ nm i $\lambda = 253,7$ nm. Wartość całkowita energii dla linii $\lambda = 184,9$ nm wynosi 11%, a dla linii $\lambda = 253,7$ nm wynosi 85,5% całkowitej mocy wyładowania [5, 6, 7]. Pozostałe linie rezonansowe stanowią około 3,5% mocy wyładowania [8, 9, 10].

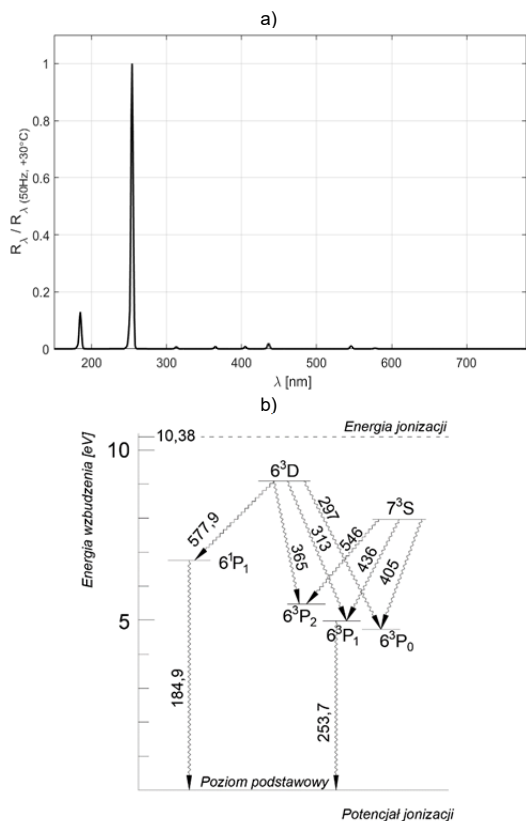


Rys.1. a) Niskociśnieniowa rtęciowa lampa wyładowcza bez luminoforu z wtopioną sondą temperaturową, b) Bilans energetyczny niskociśnieniowej rtęciowej lampy wyładowczej

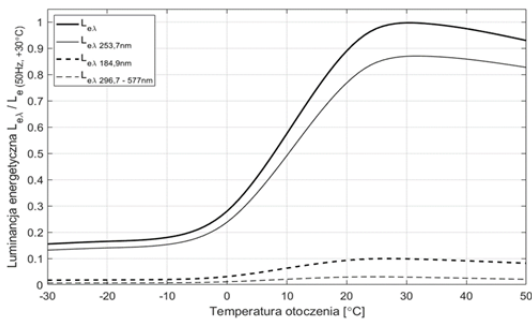
Parametry określające promieniowanie rezonansowe UV

Parametry dotyczące promieniowania rezonansowego UV są najczęściej podawane w literaturze dla temperatury +40°C wewnątrz rury wyładowczej [11, 12]. Badania wpływu zmian temperatury otoczenia (a zatem także zmian

temperatury wewnątrz rury wyladowczej) na intensywność promieniowania rezonansowego pary rtęci zostały przeprowadzone w celu zrozumienia tego zjawiska.



Rys.2. a) Widmo promieniowania par rtęci dla częstotliwości prądu w obwodzie lampy 50 Hz, w temperaturze otoczenia +30°C, b) ważniejsze poziomy energetyczne rtęci z pasmami emisji promieniowania



Rys. 3. Zależność luminancji energetycznej linii rezonansowych UV par rtęci od zmian temperatury otoczenia przy częstotliwości prądu w obwodzie lampy 50 Hz

W temperaturze otoczenia wynoszącej 0°C luminancja energetyczna osiąga wartość około 28% wartości maksymalnej (w temperaturze +30°C). Dalszy spadek temperatury otoczenia do -30°C powoduje spadek luminancji energetycznej do około 17,5% wartości maksymalnej (w temperaturze +30°C). W niskich temperaturach otoczenia wynoszących około -30°C ciśnienie par rtęci osiąga bardzo małe wartości i wzbudzenie atomów rtęci jest niewielkie.

Natomiast wzrost temperatury otoczenia od +30°C do +50°C powoduje spadek luminancji energetycznej do poziomu około 92% wartości maksymalnej osiąganey przy temperaturze otoczenia +30°C. Zmniejszenie luminancji energetycznej linii rezonansowych $\lambda = 184,9$ nm oraz $\lambda =$

253,7 nm wraz ze wzrostem temperatury powyżej +30°C powodowane jest wzrostem ciśnienia par rtęci wewnątrz rury wyladowczej. Przy wyższych ciśnieniach par rtęci zmniejsza się efektywna średnia droga swobodna fotonu w efekcie zwiększenia wpływu samoabsorpcji promieniowania rezonansowego, co skutkuje zmniejszeniem emisji promieniowania rezonansowego UV.

Przedstawione wyniki odnoszą się do lampy o mocy 38 W. W celu zbadania wpływu mocy lampy na luminancję energetyczną głównych linii rezonansowych, przeprowadzono badania na lampach o mocach 23 W i 38 W. Wyniki tych badań wskazują, że maksymalne wartości luminancji energetycznej dla głównych linii rezonansowych $\lambda = 184,9$ nm i $\lambda = 253,7$ nm występują w temperaturze otoczenia od +29,8°C do +30°C. Oznacza to, że niezależnie od mocy lampy, maksymalne wartości luminancji energetycznej są osiągane w tej samej temperaturze. Istnieje niewielkie przesunięcie charakterystyki luminancji energetycznej w zależności od temperatury otoczenia dla lamp o różnych mocach, wynoszące około 1% w skrajnym przypadku. Ten wynik wskazuje, że wartość luminancji energetycznej praktycznie nie zależy od mocy lampy.

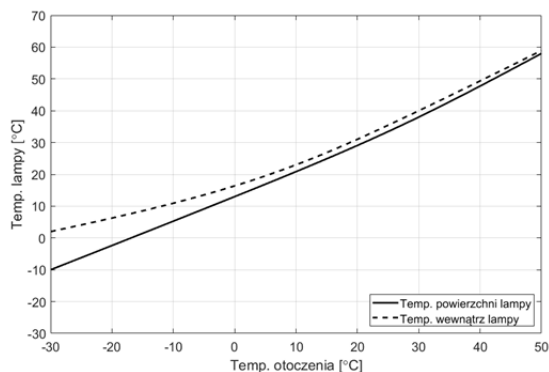
Wartość ciśnienia par rtęci w lampie jest funkcją temperatury najzimniejszego punktu rury wyladowczej (jego położenie przyjmuje się w połowie długości rury).

Zależność temperatury, ciśnienia oraz objętości gazu doskonałego została opisana równaniem Clapeyrona. Równanie to stosuje się m.in. do opisu gazów rzeczywistych i ma ono postać [14]:

$$(1) \quad p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

gdzie: p – ciśnienie [Pa], V – objętość [m³], n – liczba moli gazu, R – uniwersalna stała gazowa, $R = 8,314$ J/(mol·K), T – temperatura [K].

W trakcie badań zauważono dość istotne różnice pomiędzy temperaturą rury wyladowczej a temperaturą otoczenia (w zakresie zmian temperatury otoczenia od -30°C do +50°C). Największe różnice występują przy niskich temperaturach otoczenia i maleją wraz ze wzrostem temperatury otoczenia. W związku z tym dokonano pomiarów wpływu zmian temperatury otoczenia na temperaturę wewnątrz rury wyladowczej. Przykładowe wyniki badań zależności temperatury powierzchni lampy, temperatury wnętrza lampy w funkcji temperatury otoczenia dla lampy o mocy 38 W przedstawiono na rysunku 4.

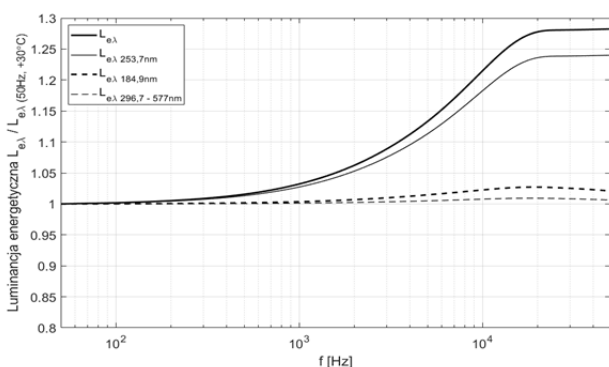


Rys. 4. Wpływ temperatury otoczenia na temperaturę powierzchni rury i temperaturę wnętrza rury

Jak wskazuje analiza otrzymanych wyników (rys. 4), temperatura na powierzchni ścianki rury jest zależna od temperatury otoczenia. Przy niskich temperaturach otoczenia wynoszących -30°C temperatura ścianki rury jest wyższa o około 20°C, różnica zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury otoczenia. Natomiast zmienia się także temperatura wnętrza rury. W temperaturze otoczenia

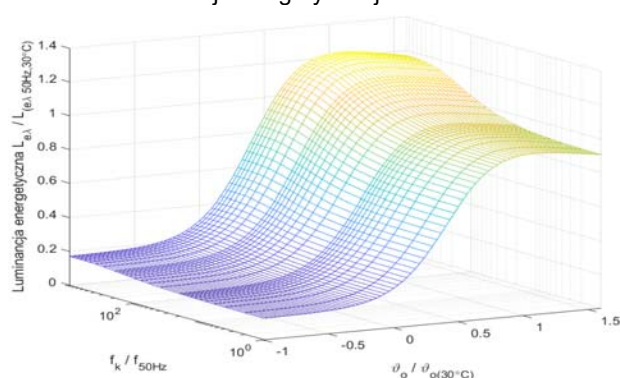
-30°C różnica pomiędzy temperaturą ścianki rury wyładowczej a temperaturą wnętrza wynosi około 11°C, wraz ze wzrostem temperatury otoczenia maleje różnica pomiędzy temperaturą rury wyładowczej, a temperaturą jej wnętrza. W temperaturze otoczenia +12°C różnica ta wynosi poniżej 1,5°C i maleje wraz ze wzrostem temperatury do 0,5°C. Jak wynika z powyższych danych, temperatura otoczenia decyduje o temperaturze wewnątrz rury wyładowczej oraz ciśnieniu par rtęci, a więc decyduje również o intensywności emisji promieniowania UV.

Aby ocenić wpływ zmiany częstotliwości prądu w obwodzie lampy na emisję promieniowania rezonansowego UV, zmieniano częstotliwość prądu w zakresie od 50 Hz do 50 kHz, a następnie mierzono luminancję energetyczną dla głównych linii rezonansowych $\lambda = 184,9$ nm i $\lambda = 253,7$ nm. Przykładowe wyniki badań w temperaturze +30°C zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Zależność luminancji energetycznej głównych linii rezonansowych od częstotliwości prądu w obwodzie lampy w zakresie od 50 Hz do 50 kHz przy temperaturze otoczenia +30°C

Wyniki przeprowadzonych badań w temperaturze otoczenia +30°C, przedstawione na rysunku 5, wykazują istotny wpływ częstotliwości prądu (f) w obwodzie lampy na wartość luminancji energetycznej dla głównych linii rezonansowych $\lambda = 184,9$ nm i $\lambda = 253,7$ nm. Obserwuje się wzrost luminancji energetycznej wraz z wzrostem częstotliwości prądu. W zakresie częstotliwości od 50 Hz do 1 kHz wzrost ten jest względnie niewielki, wynoszący około 3%. Jednak w przedziale częstotliwości od 1 kHz do około 20 kHz obserwuje się znaczący wzrost luminancji energetycznej o około 25-27% w porównaniu z częstotliwością 50 Hz. Dalsze zwiększanie częstotliwości prądu w obwodzie lampy skutkuje jedynie niewielkim wzrostem luminancji energetycznej o około 1-2%.



Rys. 6. Wyniki z badań modelowych luminancji energetycznej głównych linii rezonansowych od temperatury otoczenia oraz od częstotliwości prądu w obwodzie lampy dla lampy o mocy 38 W

Wyniki badań wskazują, że wartość luminancji energetycznej głównych linii rezonansowych $\lambda = 184,9$ nm oraz $\lambda = 253,7$ nm (rys. 3, 4) zależy od częstotliwości prądu w obwodzie lampy oraz temperatury otoczenia. Opisano tę zależność matematycznie jako funkcję częstotliwości prądu w obwodzie lampy i temperatury otoczenia. Do tego celu wykorzystano moduł Curve Fitting Toolbox w programie Matlab [13]. Po przetestowaniu wielu wariantów dopasowania, dokonano analizy współczynnika determinacji R^2 dla każdego wariantu. Uzyskano dopasowanie o wartości $R^2 = 0,975$, a otrzymaną charakterystykę przedstawiono na rysunku 6.

Podsumowanie

Wyniki analizy luminancji energetycznej lampy, uzyskane z zastosowania opracowanego modelu matematycznego (rys. 6), są zgodne z wynikami badań eksperymentalnych (rys. 3, 4). Obserwowany błąd względny mieści się w zakresie od około 0,2% do nieco poniżej 5%. Warto zauważyć, że błąd przyjmuje niższe wartości dla niskich temperatur i niskiej częstotliwości prądu, natomiast dla wyższych temperatur powyżej +30°C i wyższych częstotliwości wartości błędów są wyższe.

Przedstawione wyniki badań jednoznacznie wskazują na silną zależność intensywności promieniowania rezonansowego UV od częstotliwości prądu zasilającego oraz temperatury otoczenia pracy. Ta zależność ma istotne konsekwencje dla optymalizacji pracy lampy i jej wykorzystania w różnych zastosowaniach.

Podsumowując, badania potwierdzają, że wartości luminancji energetycznej dla głównych linii rezonansowych zależą od mocy lampy, temperatury otoczenia i częstotliwości prądu w obwodzie lampy. Opracowany model matematyczny umożliwia prognozowanie tych wartości w zależności od warunków pracy. Praca nad optymalizacją lampy może prowadzić do poprawy wydajności i efektywności jej działania w różnych dziedzinach zastosowań.

Autorzy: dr hab. inż. Antoni Różowicz, prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25 – 314 Kielce, e – mail: rozowicz@tu.kielce.pl;

dr inż. Mariusz Deląg, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25 – 314 Kielce, e – mail: mdelag@tu.kielce.pl.

LITERATURA

- [1]. Mayer Ch.: Nienhuis H., Discharge lamps, Philips Technical Library 1988.
- [2]. Mayer Ch.: Discharge lamps, Deventer, Antwerpen 1988.
- [3]. Musiał E.: Przegląd elektrycznych źródeł światła. Główne właściwości i tendencje rozwojowe, Biuletyn SEP, Oddział Gdański.
- [4]. Waymouth J.: Electric discharge lamps, The M. I. T. Press, Cambridge, England 1971.
- [5]. Corliss Ch., Bozman W.: Prawdopodobieństwa przejść i siły oscylatorów 70 pierwiastków, Wydawnictwo Mir, Moskwa 1968.
- [6]. Landsberg G. S.: Tablice linii spektralnych, Moskwa 1977.
- [7]. Sawieliew I. W.: Fizyka atomowa, PWN Warszawa 1989.
- [8]. Bekefi G.: Radiation Processes in Plasmas, 1966.
- [9]. Lochte-Holtgreven W.: Plasma Diagnostics, Nort-Holland Publishing Company, Amsterdam 1968.
- [10]. Wichman E.: Fizyka kwantowa, PWN, Warszawa 1975.
- [11]. Kim J.: Luminescence analysis of fluorescent lamps, Ice CapInc 9/20/2002.
- [12]. Lighting Technology Course, Gas discharges and low pressure I and II.
- [13]. Curve Fitting Toolbox for Use with MATLAB-User's Guide, The MathWorks 2019.
- [14]. Encyklopedia fizyki, PWN Warszawa 1974.