

BARAN Krzysztof

ODDZIAŁYWANIE TERMICZNE PÓŁPRZEWODNIKOWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA DUŻEJ MOCY

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań pola temperaturowego wybranych modułów LED dużej mocy. Analizę termiczną wykonano dla kilku wybranych modułów, zainstalowanych na płycie aluminiowej o różnej pojemności cieplnej pełniącej rolę radiatora. Wyznaczono rozkład pola temperaturowego wokół pojedynczego modułu, jak również wokół kilku, sąsiadujących ze sobą modułów zainstalowanych na płycie aluminiowej. Celem badań było określenie termicznych warunków pracy wybranych modułów LED dużej mocy. Pomiary wykonane zostały przy pomocy kamery termowizyjnej.

WSTĘP

Półprzewodnikowe źródła światła LED cieszą się coraz większą popularnością w technice oświetleniowej, stając się, na coraz szerszą, skalę zamiennikami tradycyjnych źródeł światła. Ciągły rozwój technologiczny powoduje, że co jakiś czas można usłyszeć o coraz to lepszych parametrach świetlnych wymienionych źródeł światła. Obecnie średnia skuteczność świetlna dostępnych na rynku lamp półprzewodnikowych wynosi około 75 lm/W [8], jednak pojawiają się już moduły o sprawności dochodzącej do 200 lm/W [11]. Wymieniona skuteczność świetlna powoduje, że LEDy stają się najbardziej energooszczędnyimi źródłami światła dostępnymi na rynku, co umożliwia uzyskanie do 80% oszczędności w zużyciu energii elektrycznej, w porównaniu do żarówek wytwarzających przybliżoną wartość strumienia świetlnego [8]. Innymi parametrami decydującymi o popularności LEDów są: długa żywotność często przekraczająca 50 000 godzin, duża odporność mechaniczna, małe wymiary oraz łatwość sterowania kolorem.

Niestety oprócz wymienionych zalet, diody LED posiadają również wady, które w znacznym stopniu ograniczają jeszcze szersze zastosowanie w technice oświetleniowej. Jedną z głównych wad źródeł opartych na diodach LED a w szczególności na diodach wysokiej mocy są problemy termiczne wpływające na podstawowe parametry świetlne, jak również na żywotność diody [2].

W artykule zostały przedstawione wyniki badań pola temperaturowego wokół półprzewodnikowych źródeł światła LED dużej mocy. Do pomiarów wybranych zostało kilka modułów o mocach od 1W do 9W, które zainstalowane były na płycie aluminiowej o różnej pojemności cieplnej, pełniącej rolę radiatora. Badania wykonano dla modułów zamocowanych pojedynczo na płycie aluminiowej, jak również dla kilku modułów, zainstalowanych w różnych odległościach od siebie. Pomiary rozkładu pola temperaturowego wykonane zostały przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej.

1. DIODA LED JAKO ŹRÓDŁO CIEPŁA

Dioda LED jest elementem półprzewodnikowym emitującym strumień świetlny. Niestety tylko część mocy zamieniana jest na strumień świetlny, natomiast pozostała część mocy wydzielana jest w postaci ciepła, co przedstawia poniższy wzór:

$$P_{th,LED} = (1-\eta)U_F \cdot I_F \quad (1)$$

gdzie: $P_{th,LED}$ – moc wydzielona w postaci ciepła, η – sprawność diody, U_F, I_F – znamionowa wartość napięcia oraz prądu zasilania diody.

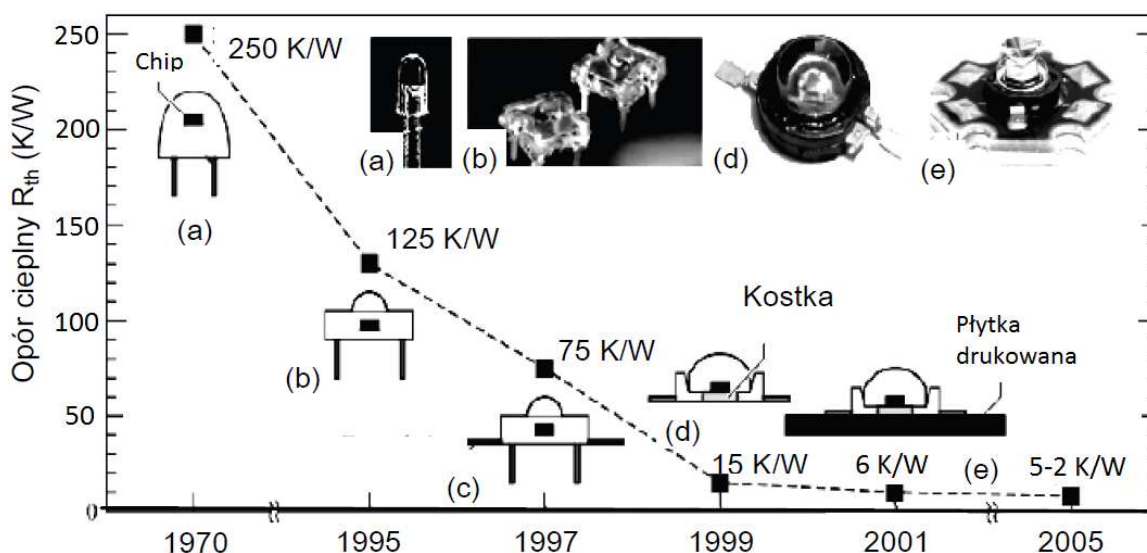
Obecnie sprawność η diody LED kształtuje się na poziomie $0,15 \div 0,3$, z czego wynika, że około 80 % mocy pobranej ze źródła zamieniane jest na ciepło, które następnie odprowadzone jest do otoczenia [2]. Zdecydowana większość ciepła wydzielana jest w złączu p-n, w trakcie przepływu przez nie prądu przewodzenia I_F . Należy zwrócić uwagę na bardzo małą powierzchnię chipu, na którym to ciepło jest wydzielane, konsekwencją czego jest bardzo duża gęstość cieplna i związane z tym problemy odprowadzenia takiej ilości ciepła do otoczenia.

W tabeli poniżej przedstawiono wybrane parametry produkowanych obecnie diod LED.

Tab. 1. Wybrane parametry półprzewodnikowych źródeł światła LED.

Typ LED	Moc całkowita $P=U_F I_F$ [W]	Sprawność energetyczna η [%]	Moc cieplna $P_{th}=(1-\eta)$ [W]	Dopuszczalna temperatura złącza T_j [°C]	Gęstość mocy $q=P_{th}/S$ [W/m ²]
C460XB900-S92XX-A	1.2	14	0.98	125	$1.4 \cdot 10^6$
Cree EZ1000	3.8	28	2.7	145	$3.1 \cdot 10^6$
OSTAR LE W E3A	27	28	19.4	150	$2.9 \cdot 10^6$

Źródło:[1]



Rys. 1. Opory cieplne diod LED a) technologia 5 mm, b) obniżone złącze, c) obniżone złącze z rozszerzonymi wyprowadzeniami, d) z radiatorem wewnętrznym, e) z radiatorem na płytce drukowanej

Źródło: [1]

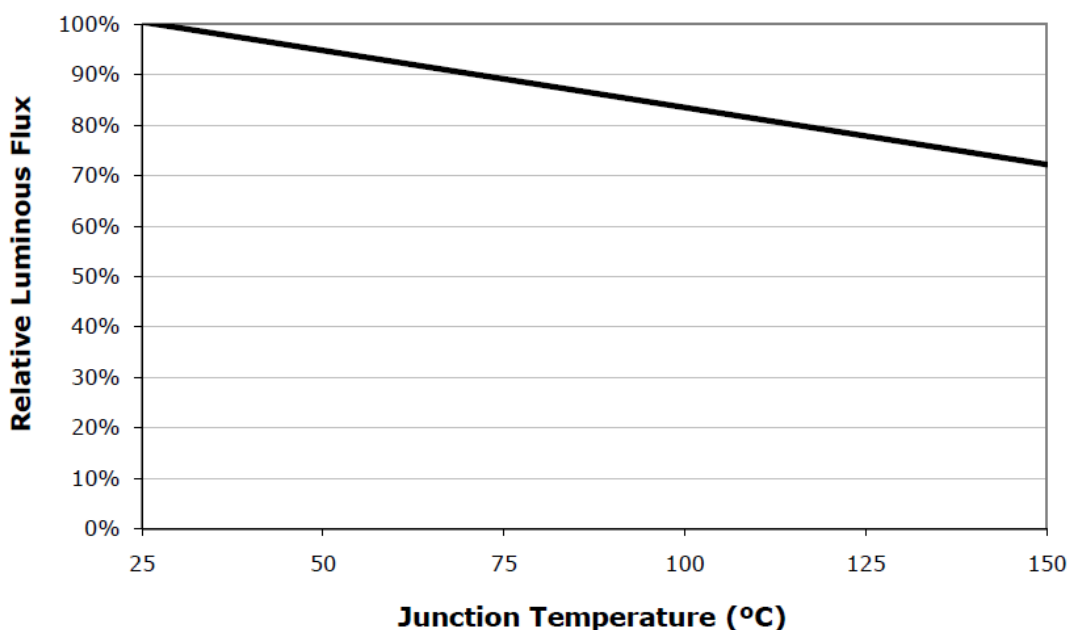
Sprawność odprowadzania ciepła z diody LED wysokiej mocy zależy od wypadkowej rezystancji termicznej całego modułu. Na sumaryczną rezystancję termiczną składa się rezystancja jaka występuje pomiędzy chipem diody i jej obudową, pomiędzy obudową a radiatorem, oraz między powietrzem a radiatorem. Każda z tych rezystancji powinna być możliwie jak najmniejsza, jednak najważniejsza i mająca największy wpływ na sumaryczną rezystancję jest rezystancja termiczna pomiędzy chipem diody, a jej obudową [12]. Na rysunku 1. został przedstawiony na przestrzeni lat, postęp technologiczny obrazujący obniżanie, wewnętrznego oporu cieplnego diody LED wraz ze wzrostem mocy diod.

2. WPŁYW TEMPERATURY NA WYBRANE PARAMETRY PÓLPRZEWODNIKOWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

W wybranych pozycjach literatury [3,4,6,7] dostępne są informacje na temat wpływu temperatury na parametry źródeł LED. Większość parametrów takich jak strumień świetlny, luminancja, widmo optyczne czy długość życia jest uzależnione zarówno od temperatury otoczenia T_a , jak również od temperatury wnętrza T_j , będącej sumą temperatury otoczenia oraz temperatury związanej z samonagrzewaniem elementu półprzewodnikowego, jak również temperatury związanej ze wzajemnym sprzężeniem termicznym między elementami umieszczonymi na wspólnej strukturze półprzewodnikowej, wspólnej obudowie lub wspólnym radiatorze [3].

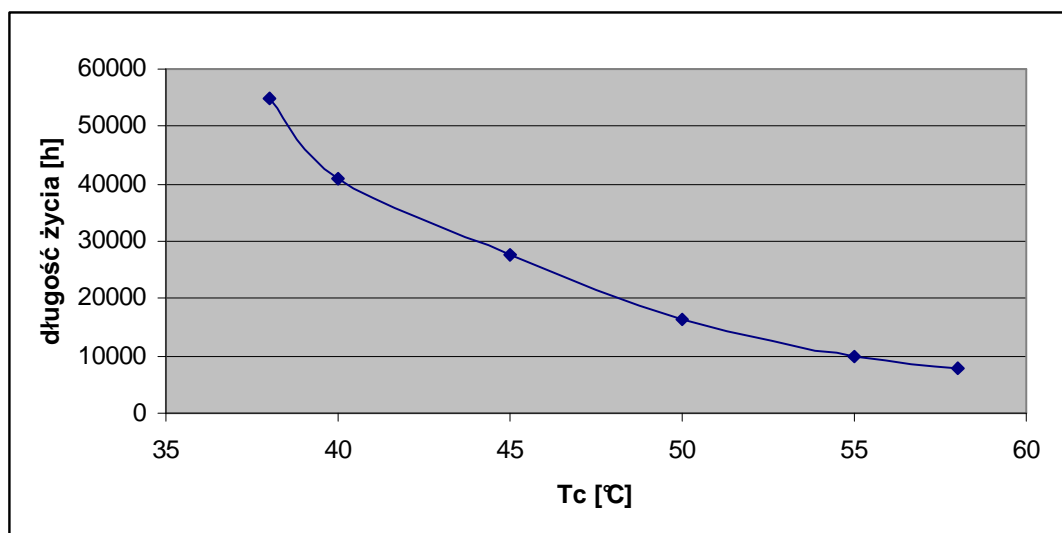
Producenci często w karcie katalogowej produktu, wartości podstawowych parametrów podają dla temperatury T_j wynoszącej 25°C . Wartości tych parametrów silnie zależą od temperatury i w rzeczywistych warunkach pracy mogą przyjmować inne wartości, niż te deklarowane w karcie produktu.

Wpływ temperatury złącza na wartość strumienia świetlnego dla przykładowej diody LED został przedstawiony na rysunku 2. Z wykresu wynika, że wartość strumienia świetlnego wraz ze wzrostem temperatury złącza T_j maleje liniowo i dla $T_j = 150^\circ\text{C}$ strumień świetlny przyjmuje 80% wartości wypadkowego strumienia dla temperatury złącza wynoszącego 25°C .



Rys. 2. Wpływ temperatury złącza T_j na wartość strumienia świetlnego
Źródło: [9]

Na rysunku 3. został przedstawiony wpływ temperatury obudowy T_c na długość życia diody. Jak można zauważyć między temperaturą na obudowie diody a długością jej życia występuje silna zależność. Dla temperatury równej 38°C długość życia wynosi ponad 50 000 godzin, natomiast dla temperatury 58°C długość życia diody jest mniejsza niż 10 000 godzin. W związku z tym aby zapewnić niezawodne działania diody, bardzo ważne jest odpowiednie chłodzenie tego elementu.



Rys. 3. Wpływ temperatury obudowy T_c na długość życia diody
Źródło: [5]

W większości pozycji literaturowych analiza termiczna półprzewodnikowych źródeł światła LED dużej mocy odbywa się na przykładzie pojedynczej diody, analizując temperaturę złącza związaną z przepływem prądu przewodzenia oraz temperaturę otoczenia. Analiza taka wydaje się być poprawna dla pojedynczych źródeł światła, jednak dla paneli oświetleniowych czy LEDowych lamp ulicznych, gdzie na małej powierzchni w bliskim sąsiedztwie zainstalowanych jest kilkadziesiąt lub nawet kilkaset źródeł światła LED dużej mocy, rozważanie termicznie każdego źródła oddzielnie i założenie, że temperatura poszczególnych diod nie wpływa na temperaturę sąsiednich wydaje się być błędne. W takim przypadku, gdy diody są umieszczone na wspólnym radiatorze czy wspólnej obudowie należy uwzględnić wzajemne sprzężenia cieplne pomiędzy diodami [3].

Na rysunku 4. została pokazana przykładowa lampa uliczna o mocy 252W, na której w bliskim sąsiedztwie zainstalowano 126 diody o mocy 2 W każda. Poprawna analiza termiczna powyższej lampy powinna uwzględniać wzajemne sprzężenie cieplne pomiędzy diodami.





Rys. 4. Przykład lampy ulicznej z zainstalowanymi diodami LED w bliskim sąsiedztwie
Źródło: [10]

3. BADANIA POLA TEMPERATUROWEGO WYBRANYCH DIOD LED DUŻEJ MOCY

Do sondażowych badań pola temperaturowego półprzewodnikowych źródeł światła wybrano przykładowe moduły LED o różnych mocach, przedstawione w tabeli 2. Moduły te zainstalowane były na płycie aluminiowej o zmiennej pojemności cieplnej. Zasilanie zrealizowano przy pomocy zasilacza stabilizowanego o regulowanej wartości napięcia i prądu. Pomiar pola temperaturowego wykonany był przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej.

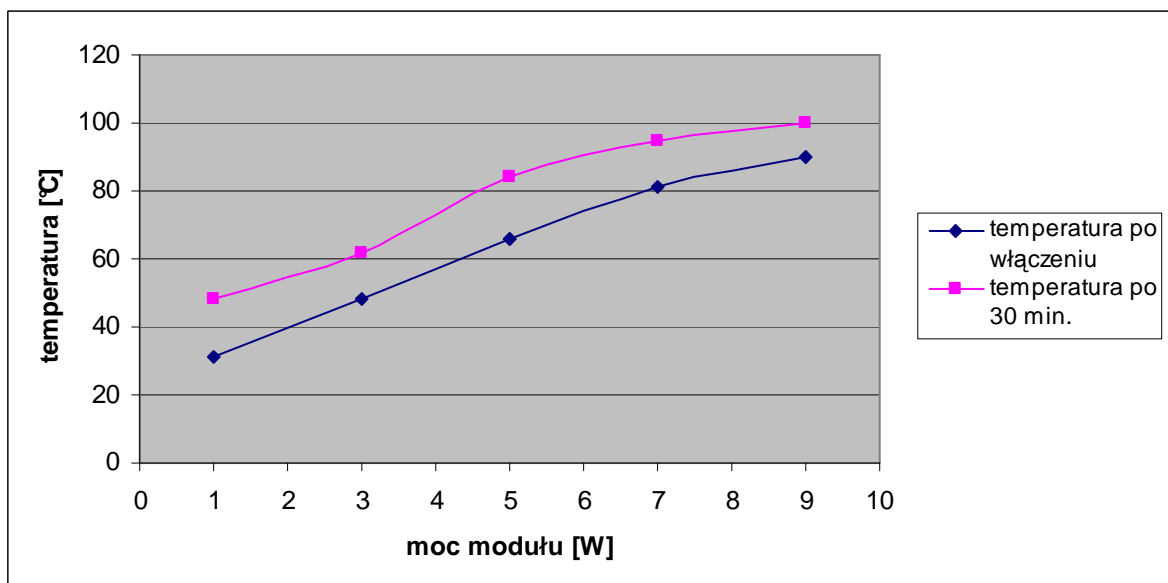
Tab. 2. Wybrane do badań moduły LED wysokiej mocy i ich podstawowe parametry

				
Moc: 1W Strumień światlny: 110 lm Napięcie przewodzenia: 3,2V Prąd przew.: 0,35 A	Moc: 3W Strumień światlny: 280 lm Napięcie przewodzenia: 9V Prąd przew.: 0,35 A	Moc: 5W Strumień światlny: 500 lm Napięcie przewodzenia: 17V Prąd przew.: 0,3 A	Moc: 7W Strumień światlny: 600 lm Napięcie przewodzenia: 21V Prąd przew.: 0,35 A	Moc: 9W Strumień światlny: 700 lm Napięcie przewodzenia: 30V Prąd przew.: 0,3 A

3.1. Wpływ mocy modułu LED na wartość pola temperaturowego

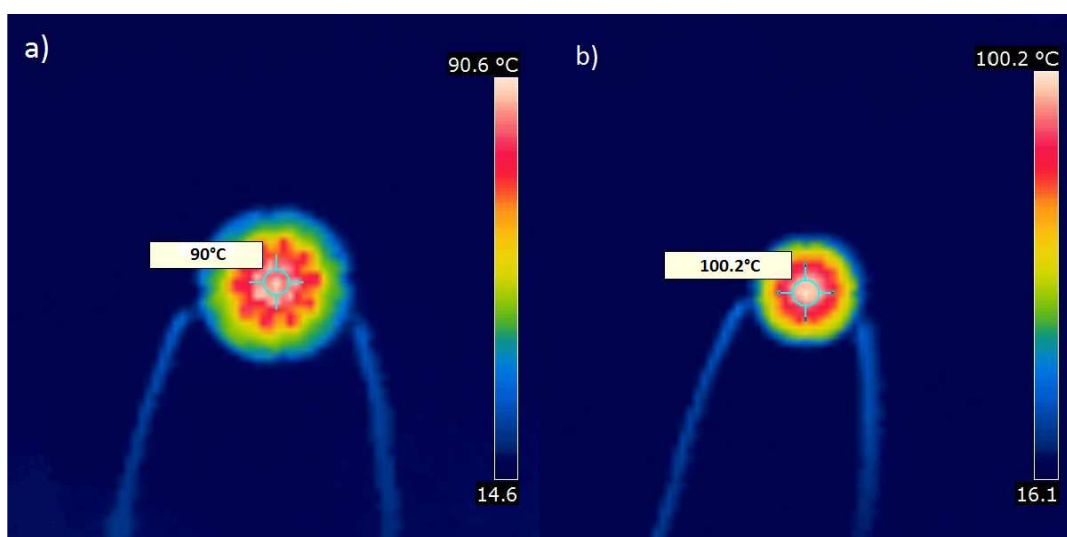
Do pomiarów wykorzystano moduły o mocach: 1W, 3W, 5W, 7W oraz 9W. Moduły te zainstalowane były na płycie aluminiowej o wymiarach 250 mm x 250 mm x 2mm. Pomiar temperatury wykonane zostały zaraz po włączeniu modułu oraz po upływie 30 minut od włączenia, gdy temperatura na powierzchni modułu miała już wartość ustaloną.

Na rysunku 5. został przedstawiony wykres maksymalnej temperatury zmierzonej na powierzchni modułu LED w funkcji jego mocy.



Rys. 5. Maksymalna temperatura zmierzona na powierzchni modułów LED, zaraz po włączeniu oraz po upływie 30 minut od włączenia

Kolorem niebieskim na wykresie zaznaczono przebieg maksymalnej temperatury zmierzonej zaraz po włączeniu modułu, natomiast kolorem różowym przebieg temperatury zmierzonej po 30 minutach od momentu włączenia modułu. Temperatura ta rośnie praktycznie liniowo wraz ze wzrostem mocy zainstalowanego modułu. Najmniejszą wartość temperatury zmierzono dla modułu o mocy 1W i wynosiła ona 31° C zaraz po włączeniu modułu oraz 48° C, po upływie 30 minut od momentu włączenia. Największą natomiast wartość temperatury zmierzono dla modułu o mocy 9W i wynosiła ona odpowiednio 90° C oraz 100,2° C. Średni przyrost temperatury dla badanych modułów od zmierzonej temperatury zaraz po włączeniu modułu, do temperatury zmierzonej po upływie 30 minut wyniósł ok. 15°C .

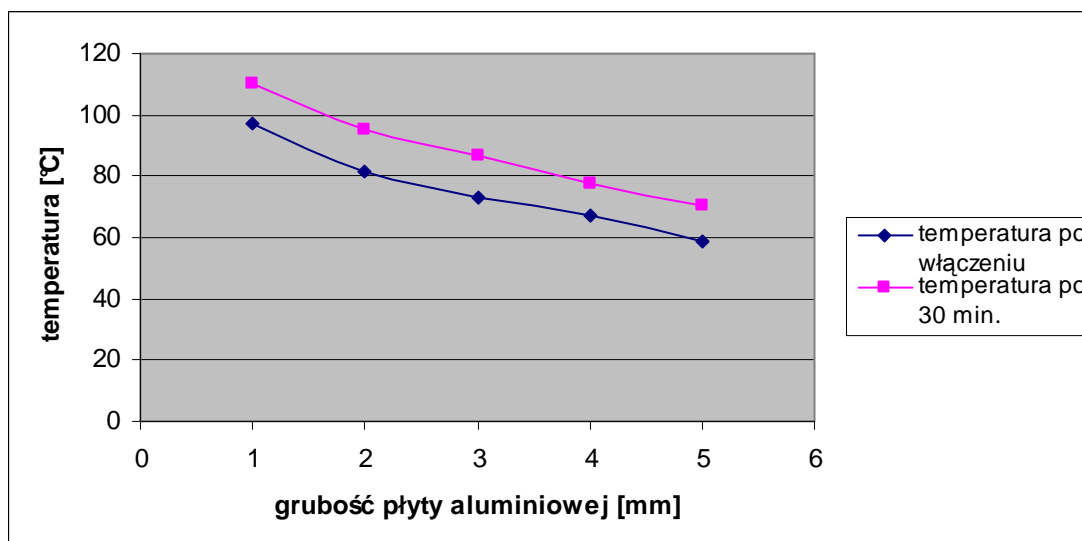


Rys. 6. Zmierzona maksymalna temperatura na powierzchni modułu o mocy 9W a) zaraz po włączeniu modułu, b) po upływie 30 minut od włączenia

Na rysunku 6. został przedstawiony pomiar termowizyjny modułu LED o mocy 9W zaraz po włączeniu modułu oraz po upływie 30 minut od włączenia, gdy temperatura osiągnęła już wartość maksymalną.

3.2. Wpływ pojemności cieplnej blachy aluminiowej na wartość temperatury modułu LED

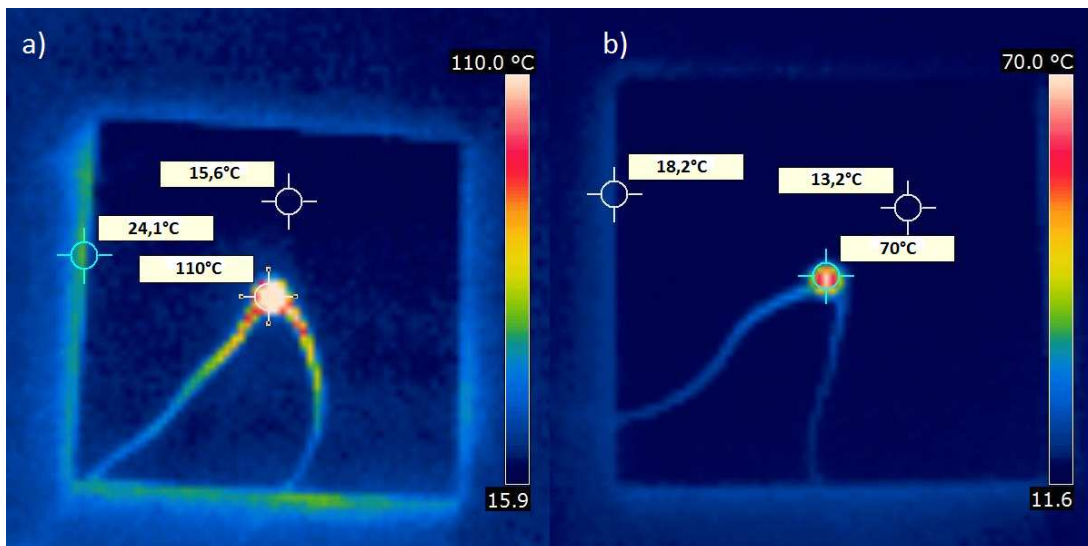
Do pomiarów został wybrany moduł LED o mocy 7W, który był zainstalowany na płycie aluminiowej o różnej wartości pojemności cieplnej. Wymiar płyty aluminiowej wynosił 250 mm x 250 mm, natomiast grubość płyty była zmieniana od 1 mm do 5 mm. Pomiar temperatury wykonywany był analogicznie jak w poprzednim przykładzie, czyli zaraz po włączeniu modułu oraz po 30 minutach od jego włączenia.



Rys. 7. Maksymalna temperatura zmierzona na powierzchni modułu LED 7W zainstalowanego na płycie aluminiowej o różnej pojemności cieplnej

Na rysunku 7. został przedstawiony wykres maksymalnej temperatury na powierzchni modułu LED w funkcji grubości płyty aluminiowej. Wraz ze wzrostem pojemności cieplnej płyty aluminiowej, temperatura na powierzchni modułu malała. Największa wartość temperatury na powierzchni modułu została zmierzona dla blachy aluminiowej o grubości 1 mm i wynosiła ona 97,2° C zaraz po włączeniu modułu oraz 110° C, po upływie 30 minut od momentu włączenia. Najmniejsza natomiast wartość temperatury na powierzchni modułu została zmierzona dla blachy aluminiowej o grubości 5 mm i wynosiła ona 58,9° C zaraz po włączeniu modułu oraz 70° C, po upływie 30 minut od momentu włączenia.

Rozkład pola temperaturowego wokół modułu LED po 30 minutach od włączenia i zamocowanego na płycie aluminiowej o grubości 1 mm oraz 5 mm przedstawiono na rysunku 8. Maksymalna temperatura na powierzchni modułu, gdy był zamocowany na płycie o grubości 1 mm wyniosła 110°C. Średnia temperatura na powierzchni płyty aluminiowej wynosiła ok. 16°C. Należy zwrócić uwagę na temperaturę panującą na brzegach płyty. Temperatura ta była wyższa od temperatury występującej na powierzchni płyty i wynosiła około 24°C. Temperatura modułu zainstalowanego na płycie aluminiowej o grubości 5 mm była niższa niż temperatura modułu, który był zainstalowany na płycie o grubości 1 mm, co związane jest z większą pojemnością cieplną płyty. Temperatura ta w maksymalnym punkcie modułu wyniosła 70°C. Na powierzchni blachy temperatura wynosiła około 13°C, natomiast na jej brzegach około 18°C.

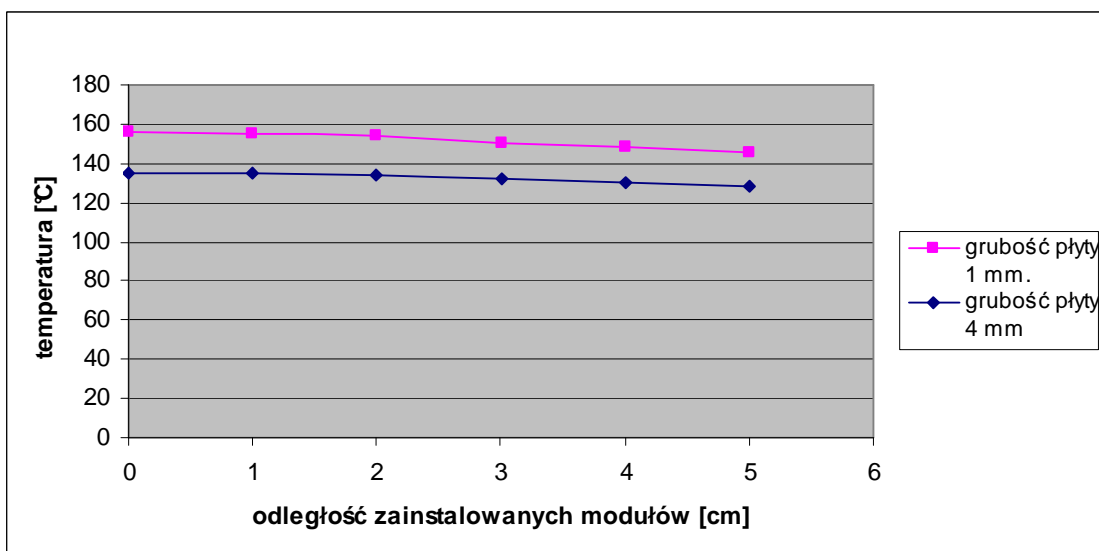


Rys. 8. Rozkład pola temperaturowego wokół modułu LED zainstalowanego na płycie aluminiowej o grubości a) 1 mm, b) 5 mm

3.3. Wpływ odległości zainstalowanych modułów na wartość pola temperaturowego

Badania pola temperaturowego wykonano dla dwóch modułów o mocy 7 W zainstalowanych na tym samym radiatorze. Moduły te zainstalowane były w odległości 5 cm od siebie, a następnie odległość ta była zmniejszana z krokiem co 1 cm. Pomiar przeprowadzono dla płyty aluminiowej o wymiarach 250 mm x 250 mm i grubości 1 mm, a następnie pomiary powtórzono dla płyty o wymiarach 250 mm x 250 mm i grubości 4 mm.

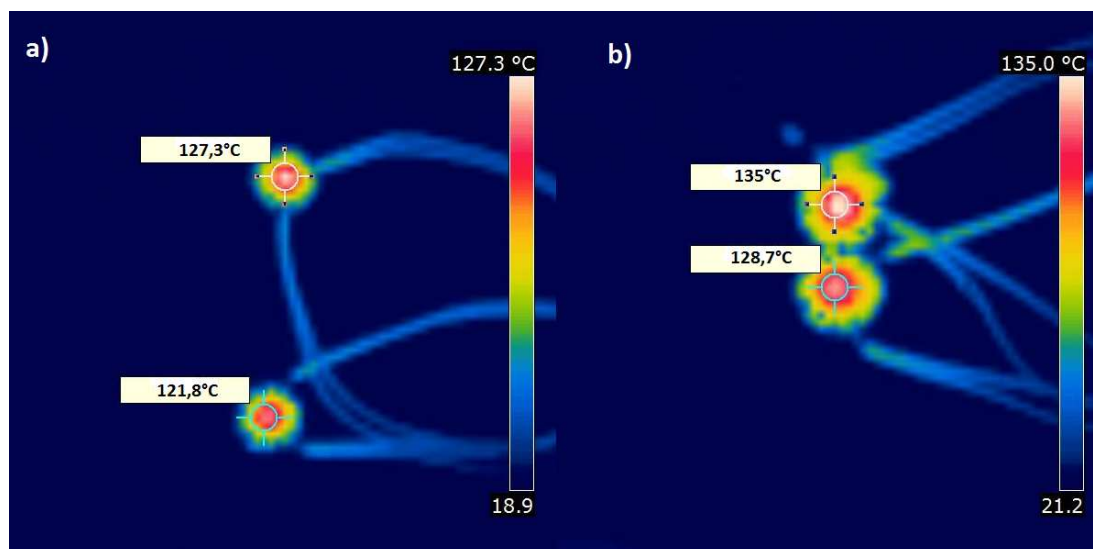
Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Maksymalna temperatura zmierzona na powierzchni dwóch modułów LED o mocy 7W, zainstalowanych na tej samej płycie aluminiowej o różnej pojemności cieplnej

Zainstalowanie dwóch modułów LED na wspólnym radiatorze, spowodowało wzrost uzyskanej temperatury, w stosunku do temperatury modułu, który był zainstalowany pojedynczo, co może świadczyć o występowaniu wzajemnego sprzężenia termicznego pomiędzy diodami.

Temperatura na powierzchni modułów, które były zainstalowane na płycie aluminiowej o wymiarach 250 mm x 250 mm i grubości 1 mm, wynosiła ok. 150° C i była większa o ok. 35° C, w stosunku do temperatury modułu, który był zainstalowany pojedynczo na radiatorze. Analogicznie temperatura zmierzona na powierzchni modułów, które były zainstalowane na płycie aluminiowej o wymiarach 250 mm x 250 mm i grubości 4 mm, wynosiła ok. 130° C i była większa o ok. 50° C, w stosunku do temperatury modułu, który był zainstalowany pojedynczo na powierzchni tej samej płyty aluminiowej. Najwyższa temperatura występowała w momencie gdy moduły graniczyły ze sobą, w miarę zwiększania odległości pomiędzy modułami temperatura malała, jednak spadek jej wartości był bardzo nieznaczny.



Rys. 10. Rozkład pola temperaturowego dwóch modułów LED 7W, zainstalowanych na płycie aluminiowej o grubości 4mm, w odległości od siebie wynoszącej: a) 5 cm, b) 0 cm

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono rozkład pola temperaturowego wokół wybranych modułów LED wysokiej mocy, zainstalowanych na płycie aluminiowej pełniącej rolę radiatora.

Zgodnie z oczekiwaniami na temperaturę zmierzoną na powierzchni modułu LED, wpływała wartość jego mocy oraz pojemność cieplna radiatora. Temperatura rosła praktycznie liniowo wraz ze wzrostem mocy modułu, przy stałej pojemności cieplnej radiatora. Analogicznie, temperatura zmierzona na powierzchni modułu praktycznie liniowo malała, wraz ze wzrostem pojemności cieplnej płyty aluminiowej. Maksymalna temperatura zmierzona podczas badań dla pojedynczego modułu, w zależności od mocy i pojemności cieplnej radiatora zmieniała się w granicach od ok. 50° C do ok. 110° C. Nie przekroczyła ona krytycznej wartości temperatury złącza, deklarowanej przez producentów na poziomie ok. 150° C, jednak była na tyle wysoka, że mogła wpływać na podstawowe parametry świetlne jak i przyczynić się do obniżenia długości życia modułu. Należy zwrócić uwagę na stosunkowo duży wymiar płyty aluminiowej a więc również stosunkowo dużą wartość pojemności cieplnej. Radiatory dostępne na rynku w sprzedaży, generalnie charakteryzują się mniejszymi wymiarami, co może skutkować jeszcze wyższą temperaturą na powierzchni modułu LED wysokiej mocy.

Instalowanie dwóch lub więcej modułów na wspólnym radiatorze, powoduje wzrost uzyskanej temperatury na powierzchni modułu LED, co związane jest z występowaniem wzajemnych sprzężeń cieplnych pomiędzy modułami. Największy wpływ na wyższą temperaturę ma sam fakt zainstalowania kilku modułów na wspólnym radiatorze, odległość

między modułami również wpływa na temperaturę na powierzchni modułów, jednak w mniej znaczącym stopniu.

BIBLIOGRAFIA

1. Domke K., *Generacja i przepływ ciepła w oprawach oświetleniowych z diodami LED jako źródłami światła*. Przegląd elektrotechniczny 2010, nr 5.
2. Domke K., Skrzypczak P., *Analiza cieplna układu: elektroluminescencyjna dioda mocy - element Peltiera – radiator*. Przegląd elektrotechniczny 2009, nr 10.
3. Górecki K., Górecka K., *Wpływ zjawisk cieplnych na właściwości diody LED mocy*. Przegląd elektrotechniczny 2011, nr 7.
4. Górecki K., Zarębski J., *Wpływ wybranych czynników na właściwości półprzewodnikowych źródeł światła*. Elektronika 2008, nr.8
5. Narendran N., Gu Y., *Life of LED-based white light sources*. Journal of Display Technology, vol. 1, no. 1, 2005, pp. 167- 171
6. Pabjańczyk W., Sikora R., Markiewicz P., Gabryjelski Z., *Wpływ warunków środowiskowych na pracę opraw z modułami LED*. Przegląd elektrotechniczny 2009, nr 11.
7. Wiczyński G., *Wpływ temperatury na widmo optyczne diody LED*. Elektronika 2008, nr 6
8. Wiśniewski A., *Lampy LED – ocena podstawowych parametrów*, Przegląd elektrotechniczny 2012, nr 5a
9. Karta katalogowa diody LED Cree XLamp X-PG.
10. Karta katalogowa lampy ulicznej LED CGA126A
11. www.cree.com/led-components-and-modules/products/xlamp/arrays-directional/xlamp-mkr
12. www.lediko.com/Zarzadzanie_cieplem_i_chlodzenie_diod_LED/

THERMAL IMPACT OF SEMICONDUCTOR HIGH POWER LIGHT SOURCES

Summary

The article presents the results of research of the temperature field of the selected high power LED modules. Thermal analysis was performed for several selected modules, installed on the aluminium plate of various heat capacity acting as the heat sink. The distribution of the temperature field around a single module was set, as well as around several neighbouring modules installed on the aluminium plate. The objective of the research was to determine thermal work conditions of the selected high power LED modules. The measurements were made using the infrared camera.

Autor:

mgr inż. **Krzysztof Baran** – Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, kbaran@prz.edu.pl