

POLITECHNIKA RZESZOWSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Mgr inż. Krzysztof BARAN

**TEMPERATURA PANELU
OŚWIETLENIOWEGO ZE ŹRÓDŁAMI LED
I JEJ WPŁYW NA WYBRANE PARAMETRY
ŚWIETLNE**

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Promotor:
Dr hab. inż. Antoni RÓŻOWICZ**

**Promotor pomocniczy:
Dr inż. Henryk WACHTA**

Rzeszów 2019

Spis treści

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	4
1. WSTĘP	6
2. DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNE.....	9
2.1. Budowa oraz zasada działania diody elektroluminescencyjnej.....	9
2.1.1. Zjawisko elektroluminescencji w złączu p-n	9
2.1.2. Domieszkowanie półprzewodnikowych źródeł światła	10
2.1.3. Metody otrzymywania światła o barwie białej	11
2.2. Rodzaje diod elektroluminescencyjnych stosowanych w oprawach oświetleniowych	13
2.2.1. Diody średniej mocy	14
2.2.2. Diody dużej mocy	14
2.2.3. Diody w technologii COB.....	16
2.3. Źródła LED jako źródła ciepła	17
2.4. Wpływ temperatury złącza T_j na wybrane parametry świetlne.....	19
2.4.1. Wpływ temperatury złącza T_j na strumień świetlny Φ	19
2.4.2. Wpływ temperatury złącza T_j na temperaturę barwową T_B	20
2.4.3. Wpływ temperatury złącza T_j na wskaźnik oddawania barw Ra	21
3. CHŁODZENIE PÓLPRZEWODNIKOWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA	23
3.1. Mechanizmy przepływu ciepła w półprzewodnikowych źródłach światła	23
3.1.1. Przewodnictwo cieplne	23
3.1.2. Konwekcja	24
3.1.3. Promieniowanie cieplne	25
3.2. Układy chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła.....	25
3.3. Przegląd stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych w oprawach oświetlenia drogowego	29
4. METODY MODELOWANIA TERMICZNEGO	33

5. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU NAUKOWEGO, PRZYJĘCIE TEZY I CELU ROZPRAWY	40
5.1. Problem naukowy	40
5.2. Teza pracy.....	40
5.3. Cel pracy.....	40
6. MODELOWANIE TERMICZNE ŹRÓDEŁ LED	41
7. WEWNĘTRZNA REZYSTANCJA TERMICZNA ŹRÓDEŁ LED	49
8. ANALIZA TERMICZNA ELEMENTÓW PANELU LED	59
8.1. Sprzężenia termiczne pomiędzy źródłami LED	60
8.2. Modelowanie termiczne radiatora oraz jego wpływ na rozkład temperatury panelu LED.....	72
8.2.1. Wpływ konstrukcji radiatora.....	72
8.2.2. Wpływ materiału radiatora.....	80
8.3. Modelowanie termiczne obwodów drukowanych	83
8.4. Wpływ środowiska zewnętrznego na rozkład temperatury panelu LED	86
8.5. Podsumowanie symulacyjnych badań termicznych panelu LED.....	90
8.6. Weryfikacja wyników symulacyjnych	93
9. BADANIA WPŁYWU TEMPERATURY NA WYBRANE PARAMETRY ŚWIETLNE POJEDYNCZEGO ŹRÓDŁA LED	102
9.1. Strumień świetlny Φ	104
9.2. Temperatura barwowa T_B	107
9.3. Współczynnik oddawania barw R_a	111
9.4. Sprawność optyczna η_o	114
10. WPŁYW TEMPERATURY PANELU LED NA WYBRANE PARAMETRY ŚWIETLNE	118
11. APLIKACJA OPRACOWANEGO MODELU TERMICZNEGO DO BUDOWY OPRAWY OŚWIETLENIOWEJ	127
12. PODSUMOWANIE	136
LITERATURA	139

Zestawienie ważniejszych oznaczeń

A_{RA}	- powierzchnia radiatora,
A_z	- powierzchnia pojedynczego żebra radiatora,
c	- prędkość światła,
CFD	- obliczeniowa mechanika płynów (ang. <i>Computational Fluid Dynamics</i>),
C_p	- pojemność cieplna,
CTE	- współczynnik rozszerzalności cieplnej,
C_{th_cum}	- skumulowana pojemność cieplna,
d	- odległość pomiędzy źródłami LED,
D_p	- długość panelu LED,
D_R	- długość radiatora,
d_z	- odległość pomiędzy żebrami radiatora,
FEM	- metoda elementów skończonych (ang. <i>Finite Element Method</i>),
g	- przyspieszenie ziemskie,
Gr	- liczba Grashofa,
g_z	- grubość żebra radiatora,
h	- współczynnik przenikania ciepła,
h_p	- stała Plancka,
I_F	- prąd przewodzenia źródła LED,
I_H	- prąd grzewczy,
k	- współczynnik przewodzenia ciepła,
n	- liczba żeber radiatora,
Nu	- liczba Nusselta,
$MCPCB$	- obwód drukowany z metalowym rdzeniem,
p	- ciśnienie powietrza,
P_e	- moc elektryczna,
P_H	- moc cieplna,
P_o	- moc optyczna,
Pr	- liczba Prandtla,
Ra	- współczynnik oddawania barw,

- Ra_{panel_LED} - współczynnik oddawania barw panelu LED,
- Rth_cum - skumulowana rezystancja termiczna,
- Rth_{j-c} - rezystancja termiczna pomiędzy złączem a obudową źródła LED,
- Rth_{MCPCB} - rezystancja termiczna obwodu drukowanego MCPCB ,
- Rth_{RAD} - rezystancja termiczna radiatora,
- S_p - szerokość panelu LED,
- S_R - szerokość radiatora,
- T_B - temperatura barwowa,
- T_{Bpanel_LED} - temperatura barwowa panelu LED,
- T_j - temperatura złącza,
- T_o - temperatura otoczenia,
- T_p - temperatura modułu Peltiera,
- T_s - temperatura miejsca lutowania źródła LED do podłoża płytki obwodu drukowanego,
- u - prędkość płynu,
- U_F - napięcie przewodzenia źródła LED,
- v - prędkość wiatru,
- W_p - wysokość panelu LED,
- W_{PR} - wysokość podstawy radiatora,
- W_z - wysokość żebra radiatora,
- Q - strumień przepływu ciepła,
- η - skuteczność świetlna ,
- η_{panel_LED} - skuteczność świetlna panelu LED ,
- η_o - sprawność optyczna,
- Φ - strumień świetlny,
- Φ_{panel_LED} - strumień świetlny panelu LED,
- ΔT - gradient temperatury,
- ε - współczynnik emisyjności materiału,
- λ - długość fali światła,
- ρ - gęstość,
- σ - stała Boltzmanna.

1. Wstęp

Mijający okres ostatnich dwudziestu lat był czasem, kiedy półprzewodnikowe źródła światła LED stopniowo zrewolucjonizowały obszar techniki świetlnej. Mimo, że już początkiem lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku Nick Holonyak Jr wykonał udane eksperymenty związane z emisją światła widzialnego z wykorzystaniem GaAsP, to jednak największy przełom związany z możliwością wykorzystania półprzewodnikowych źródeł światła do celów oświetleniowych nastąpił w 1990 r., kiedy Shuji Nakamura z Nichia Corporation skonstruował diodę opartą na GaN, która emitowała światło o barwie niebieskiej. O wielkości i znaczeniu tego odkrycia świadczy nagroda Nobla, która została mu przyznana w 2014 r. z dziedziny fizyki. Wspomniane odkrycie umożliwiło powstanie diod elektroluminescencyjnych emitujących światło białe, mających szerokie zastosowanie do celów oświetleniowych [40, 128].

Wysoka skuteczność świetlna, energooszczędność oraz długa żywotność spowodowały, że źródła światła LED zaczęły być szeroko stosowane w technice świetlnej, równocześnie będąc skutecznymi zamiennikami dotychczas stosowanych żarowych oraz wyładowczych źródeł światła [85]. Wymienione cechy oraz coraz niższe ceny spowodowały, że według prognoz półprzewodnikowe źródła światła staną się dominującą technologią na rynku oświetleniowym. Potwierdza to raport „Lighting the way: Perspectives on the global lighting market” opracowany w 2012 r. przez firmę doradczą McKinsey & Company. Według danych przedstawionych w raporcie, udział półprzewodnikowych źródeł światła w rynku oświetleniowym w 2011 r. wynosił 12%. Na kolejne lata prognozowany jest gwałtowny wzrost, przy którym w 2020 r. oświetlenie w technologii LED stanowić będzie 63% udziału w globalnym rynku oświetleniowym [44].

Wśród dostępnych obecnie na rynku wielu rodzajów półprzewodnikowych źródeł światła, do celów oświetleniowych najczęściej są stosowane diody dużej mocy. Diody takie charakteryzują się mocą od kilku do kilkunastu watów i generują strumień świetlny Φ o wartości umożliwiającej zastosowanie ich do prostych zadań oświetleniowych [117, 125]. Pojedyncza dioda emituje jednak zbyt małą wartość strumienia świetlnego Φ , by mogła indywidualnie spełnić wymagania w bardziej zaawansowanych obszarach oświetleniowych, m.in. w oświetleniu ulicznym czy przemysłowym, gdzie płaszczyzna pracy wzrokowej jest oddalona od oprawy oświetleniowej o kilka lub kilkanaście metrów, następstwem czego powinna się ona charakteryzować dużą mocą świetlną [18]. Półprzewodnikowe źródła światła, aby mogły

spełnić dane kryteria, łączone są ze sobą w zespoły, tworząc tzw. panele lub matryce LED. Panele takie zawierają w swojej strukturze kilkanaście lub kilkadziesiąt półprzewodnikowych źródeł światła, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie wymaganej wartości strumienia świetlnego Φ [7, 35, 38, 39].

Źródła LED, mimo stałego i dynamicznego rozwoju technologicznego w zakresie uzyskiwania lepszych parametrów energetyczno-fotometrycznych, posiadają również pewne ograniczenia związane głównie z temperaturą złącza półprzewodnikowego T_j . Struktura fizyczna oraz geometria warstw materiału LED powodują wewnętrzne odbicia oraz załamania promieniowania optycznego, co skutkuje tym, że tylko część energii zostaje wypromieniowana na zewnątrz. Pozostała część jest natomiast tracona w postaci ciepła P_H , w materiale półprzewodnikowym. Coraz wyższe oferowane przez producentów moce źródeł LED oraz stosunkowo mała powierzchnia złącza powodują występowanie dużych gęstości cieplnych, czyli także problemów z odprowadzaniem ciepła do otoczenia, konsekwencją czego jest wzrost temperatury złącza T_j materiału półprzewodnikowego [33, 35]. Wzrost temperatury T_j powoduje spadek wartości emitowanego strumienia świetlnego Φ , zmianę długości fali dominującej, jak również spadek żywotności źródła LED. Przekroczenie deklarowanej przez producentów maksymalnej temperatury złącza T_j może nieodwracalnie uszkodzić półprzewodnikowe źródło światła [10, 12, 51, 115].

Ograniczenie temperatury złącza T_j , zapewniające stałość parametrów świetlnych oraz dłuższą żywotność, jest obecnie jednym z kluczowych elementów projektowania opraw oświetleniowych z diodami elektroluminescencyjnymi. Oprócz zjawiska samonagrzewania złącza półprzewodnikowego, związanego bezpośrednio z mocą cieplną P_H pojedynczej diody w panelach LED, należy również uwzględnić wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy wieloma źródłami zainstalowanymi na wspólnym radiatorze. Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na warunki termiczne pracy oprawy jest uwzględnienie warunków środowiskowych, które w zależności od rodzaju zastosowanej oprawy mogą się zmieniać w bardzo szerokich granicach.

Wymienione problemy termiczne są związane z koniecznością stosowania w oprawach oświetleniowych ze źródłami LED układu chłodzenia (radiatora), którego zadaniem jest jak najefektywniejsze odprowadzanie ciepła z elementów półprzewodnikowych do otoczenia. Wśród dostępnych obecnie na rynku rozwiązań zdecydowaną większość stanowią systemy pasywne. Prawidłowy dobór geometrii radiatora nie jest zadaniem prostym, dlatego system radiacyjny powinien być projektowany indywidualnie dla danej oprawy i zadania oświetle-

niowego. Trudności te powodują, że wśród oferowanych przez producentów opraw oświetleniowych można spotkać oprawy, w których są sztucznie zawyżane gabaryty oraz masa układu chłodzenia.

Konsekwencją takiego działania jest z reguły duża masa oraz powierzchnia oprawy oświetleniowej, która jednak nie przynosi znaczącej poprawy wydajności odprowadzania ciepła [35]. Praktyką spotykaną również wśród producentów opraw oświetleniowych, jest „sztuczne” podnoszenie parametrów świetlnych oprawy przez stosowanie zawyżonej liczby źródeł LED, tak aby dioda pracując poniżej wartości mocy znamionowej, wydzielala mniejszą ilość ciepła, co przekłada się na temperaturę złącza T_j . Rozwiązanie takie powoduje zwiększenie gabarytów oprawy oraz jej ceny [126].

Biorąc pod uwagę wymienione problemy, uznano za celowe podjęcie tematyki pracy związanej z modelowaniem termicznym panelu LED, analizą czynników kształtujących temperaturę źródeł i jej wpływu na wybrane parametry świetlne. Do wyznaczenia temperatury złącza T_j i określenia wspomnianego wpływu opracowano model termiczny uwzględniający: budowę źródeł LED, wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy nimi, budowę obwodu drukowanego oraz układ odprowadzania ciepła. Analiza termiczna uwzględnia wszystkie aspekty związane z przepływem ciepła na drodze złącze-obwód drukowany-radiator-otoczenie. Wyznaczona temperatura złącza T_j źródeł panelu umożliwiła określenie jej wpływu na wybrane parametry świetlne. Opracowany model termiczny oraz wyniki badań symulacyjnych związanych z kształtowaniem temperatury panelu LED posłużyły do konstrukcji oprawy oświetleniowej.

2. Diody elektroluminescencyjne

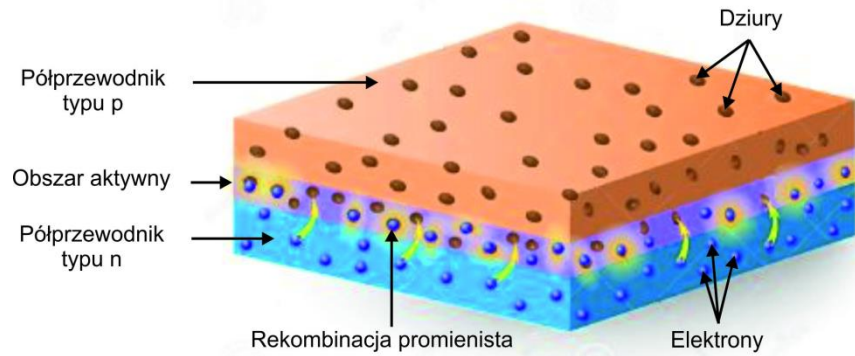
Półprzewodnikowe źródła światła, dzięki osiągnięciom w dziedzinie materiałów półprzewodnikowych oraz ciągłym postępom technologicznym, stają się dominującą i najefektywniej rozwijaną technologią oświetleniową. Intensywny rozwój i prace zespołów naukowych sprawiły, że półprzewodnikowe źródła światła ewoluowały od monochromatycznych emiterów o wąskim zakresie widmowym, do białych źródeł LED dużej mocy, o skuteczności świetlnej η przekraczającej wartość 200 lm/W [110]. W dalszym ciągu istnieją jednak pewne ograniczenia wpływające na jeszcze bardziej dynamiczny rozwój technologii LED, a jednym z głównych problemów występujących szczególnie w źródłach światła dużej mocy jest wysoka temperatura złącza T_j , wpływająca na parametry świetlne [23, 36, 62, 70, 76, 115].

2.1. Budowa oraz zasada działania diody elektroluminescencyjnej

Odkrycie zjawiska elektroluminescencji zapoczątkowało intensywny okres badań nad materiałami półprzewodnikowymi, mogącymi mieć własności optoelektroniczne. Odpowiedni dobór i domieszkowanie pierwiastków umożliwiły powstanie monochromatycznych emiterów światła o różnej barwie. Jednak dopiero wynalezienie diody elektroluminescencyjnej emitującej światło niebieskie umożliwiło powstanie źródła LED o barwie białej i zapoczątkowało gwałtowny rozwój oraz możliwość wykorzystania technologii półprzewodnikowej do celów oświetleniowych [40].

2.1.1. Zjawisko elektroluminescencji w złączu p-n

Zasada działania półprzewodnikowych źródeł światła opiera się na zjawisku elektroluminescencji, stąd często używana nazwa - diody elektroluminescencyjne. Diody te są zbudowane z warstwy materiału półprzewodnikowego typu p oraz warstwy materiału półprzewodnikowego typu n, sumarycznie noszącej nazwę złącza p-n. Warstwa typu p posiada w swojej strukturze nadmiar dziur w paśmie walencyjnym, natomiast warstwa typu n - nadmiar elektronów. Spolaryzowanie diody w kierunku przewodzenia, czyli przyłożenie napięcia o znaku dodatnim do warstwy p, a o znaku ujemnym do warstwy n, powoduje ruch elektronów z półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p. W obszarze aktywnym złącza p-n elektrony rekombinują z dziurami, przechodząc z wyższego poziomu energetycznego na niższy, natomiast nadmiar energii zostaje wypromieniowany w postaci fotonu (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Zjawisko rekombinacji promienistej w złączu p-n

Energia fotonu, zgodnie z zasadą zachowania energii jest w przybliżeniu równa energii przerwy energetycznej E_g pomiędzy poziomem wzbudzenia a poziomem podstawowym. Długość fali wyemitowanego kwantu światła jest uzależniona od wartości przerwy energetycznej, zgodnie z prawem Plancka-Einsteina oraz zasadą zachowania energii [5]:

$$\frac{h_P \cdot c}{\lambda} = E_g \quad (2.1)$$

gdzie: h_P – stała Plancka ($\sim 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), c – prędkość światła ($\sim 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), λ – długość fali światła (nm).

Wartość przerwy energetycznej jest uzależniona od materiału i dla półprzewodników przyjmuje wartość z zakresu od 0 do 5 eV. W związku z możliwością wytwarzania materiałów półprzewodnikowych o dopasowanym udziale procentowym poszczególnych pierwiastków istnieje możliwość konstrukcji diod elektroluminescencyjnych o przerwie energetycznej odpowiadającej energii fal świetlnych, w zakresie od ultrafioletu po głęboką czerwień [62].







2.1.2. Domieszkowanie półprzewodnikowych źródeł światła

W drugiej połowie XX w. rozpoczęto intensywne badania, związane z możliwością wykorzystania właściwości optycznych materiałów półprzewodnikowych z III-V grupy układu okresowego pierwiastków. Odpowiedni dobór procentowy pierwiastków pozwalał na tworzenie związków półprzewodnikowych o właściwościach elektrycznych zbliżonych do znanych już półprzewodników, takich jak krzem czy german, jednak związki te charakteryzowały się znacznie lepszymi parametrami optycznymi. Szeroka różnorodność pierwiastków z grup III-V, jak również możliwość tworzenia związków potrójnych oraz poczwórnych z odpowiednimi domieszkami innych pierwiastków pozwalały teoretycznie na stworzenie materiału o dowolnej szerokości przerwy energetycznej, decydującej o barwie emitowanego światła. Wytworzenie zaprojektowanych związków okazało się jednak znacznie trudniejsze, a nau-

kowcy na tym etapie musieli zmierzyć się z wieloma wyzwaniami, takimi jak uzyskanie odpowiedniej czystości materiałów, utworzenie podłoża o pożądanych cechach, występujące dyslokacje w materiale czy naprężenia pomiędzy poszczególnymi warstwami.

Lata badań pozwoliły ustalić, że nie wszystkie związki pierwiastków z grup III-V potwierdziły swoją przydatność w dziedzinie optoelektroniki, tylko część opracowanych materiałów znalazła zastosowanie przy produkcji emiterów światła. W tabeli 2.1 przedstawiono przykładowe związki materiałów półprzewodnikowych wykorzystywanych do produkcji diod elektroluminescencyjnych.

Tabela 2.1. Zestawienie wybranych materiałów półprzewodnikowych wraz z odpowiadającą im długością fali oraz barwą emitowanego światła [7, 26, 77]

	<i>Material półprzewodnikowy</i>	<i>Długość emitowanej fali [nm]</i>	<i>Barwa</i>
	AlGaAs, GaAs	$\lambda > 760$	podczerwona
	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP	$610 < \lambda < 760$	czerwona
	GaAsP, AlGaInP, GaP	$590 < \lambda < 610$	pomarańczowa
	GaAsP, AlGaInP, GaP	$570 < \lambda < 590$	żółta
	InGaN, GaP, AlGaInP, AlGaP, AlGaInN	$500 < \lambda < 570$	zielona
	ZnSe, InGaN, GaN, SiC, Si	$450 < \lambda < 500$	niebieska
	InGaN	$400 < \lambda < 450$	fioletowa
	AlGaInN	$\lambda < 400$	ultrafioletowa

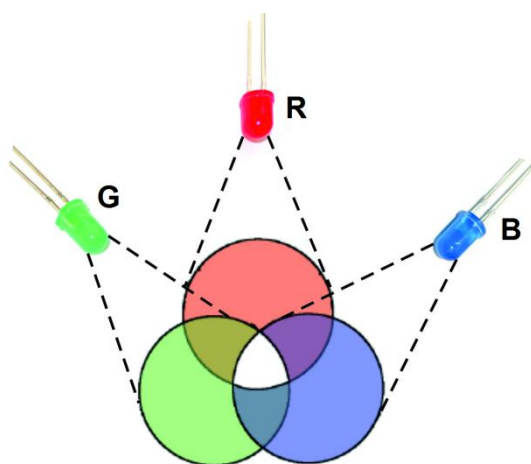
Szczególne znaczenie dla rozwoju i szerokiego zastosowania źródeł LED do celów oświetleniowych miało odkrycie i zastosowanie azotku galu (GaN) do produkcji diody emitującej światło o barwie niebieskiej, która była podstawą powstania źródła LED emitującego światło o barwie białej.

2.1.3. Metody otrzymywania światła o barwie białej

W zastosowaniach oświetleniowych najczęściej są wykorzystywane źródła światła o barwie białej. Diody elektroluminescencyjne emitują światło monochromatyczne o bardzo wąskim zakresie spektralnym. W celu uzyskania barwy białej w półprzewodnikowych źró-

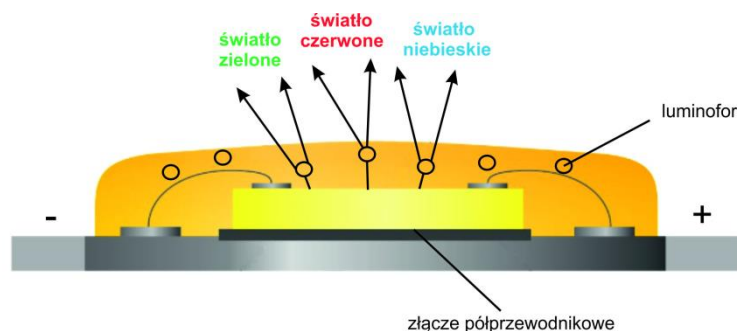
dłach światła stosuje się metody związane z mieszaniem trzech barw podstawowych, z trzech niezależnych źródeł LED lub wykorzystanie luminoforu do konwersji widma wypromiowanego światła [40, 71].

W metodzie związanej z addytywnym sumowaniem podstawowych barw (RGB), przez regulację mocy świetlnej każdego ze źródeł można uzyskać światła białe o odpowiednich współrzędnych trójchromatycznych. Wymienione rozwiązanie umożliwia sterowanie temperaturą barwową T_B , jak również współczynnikiem oddawania barw Ra . Wadą tego rozwiązania jest złożony układ zasilająco-sterujący, gdzie każde źródło wymaga oddzielnego obwodu, umożliwiającego ustalenie odpowiedniego punktu pracy.



Rys. 2.2. Otrzymywanie światła o barwie białej metodą sumowania barw podstawowych [33, 40]

Inną metodą umożliwiającą otrzymanie światła o barwie białej jest metoda wykorzystująca luminofor, który pokrywa diodę elektroluminescencyjną świecącą w paśmie ultrafioletu. Luminofor składa się z trzech barw RGB, umożliwiając konwersję światła z pasma niewidzialnego na światło o barwie białej.

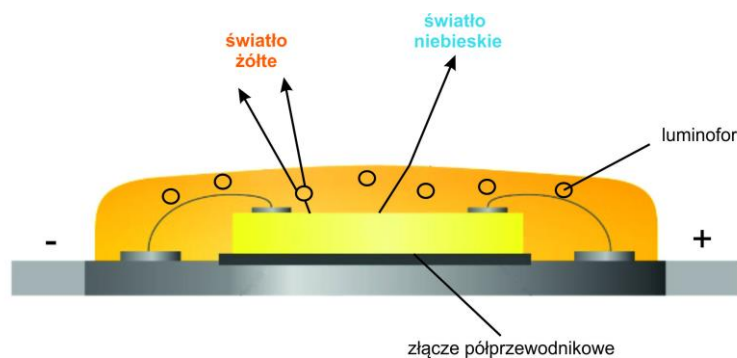


Rys. 2.3. Schemat struktury generującej światło białe z diodą elektroluminescencyjną, emitującą światło ultrafioletowe i luminoforem RGB [33, 40]

Wymienione rozwiązanie charakteryzuje się stosunkowo niskim kosztem, co jest związane z prostym układem zasilającym i dość prostą technologią produkcji źródła LED.

Konwersja światła w pasmowym luminoforze generuje jednak znaczące straty strumienia świetlnego, co przekłada się na małą efektywność energetyczną. Dodatkową wadą w tym rozwiązaniu jest możliwość przedostania się szczątkowego promieniowania UV przez warstwy luminoforu.

Trzecią metodą wytwarzania światła o barwie białej jest metoda hybrydowa, gdzie zastosowano diodę elektroluminescencyjną o barwie niebieskiej i żółty luminofor. Część wypromieniowanego światła ze złącza półprzewodnikowego ulega konwersji w luminoforze na światło o barwie żółtej, natomiast pozostała część nie ulega konwersji i zostaje bezpośrednio wypromieniowana w postaci światła o barwie niebieskiej. Następnie obydwie barwy ulegają zmieszaniu, konsekwencją czego jest wypadkowe światło o barwie białej. Schemat przedstawiający ideę działania omawianej metody zobrazowano na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Schemat struktury generującej światło białe z diodą elektroluminescencyjną emitującą światło niebieskie i żółtym luminoforem [33, 40]

Metoda hybrydowa dzięki prostocie realizacji, wyższej efektywności energetycznej, jak również braku emisji promieniowania UV jest najszerzej stosowana i w dalszym ciągu technologicznie rozwijana.

2.2. Rodzaje diod elektroluminescencyjnych stosowanych w oprawach oświetleniowych

Rozwój technologii półprzewodnikowej, technologii luminoforu czy technologii pakowania umożliwił zastosowanie źródeł LED do oświetlenia ogólnego. Źródła te stosowane w oprawach oświetleniowych powinny umożliwiać uzyskanie wypadkowej wartości strumienia świetlnego Φ , którego wartość jest powiązana z mocą P_e i skutecznością świetlną η poszczególnych źródeł LED. Wśród dostępnych obecnie wielu rozwiązań technologicznych i konstrukcyjnych, do zastosowań w oprawach oświetleniowych największe znaczenie mają źródła LED średniej mocy (ang. *Mid Power LED*), dużej mocy (ang. *High Power LED*) oraz źródła LED w technologii COB (ang. *Chip On Board*) [16, 40].

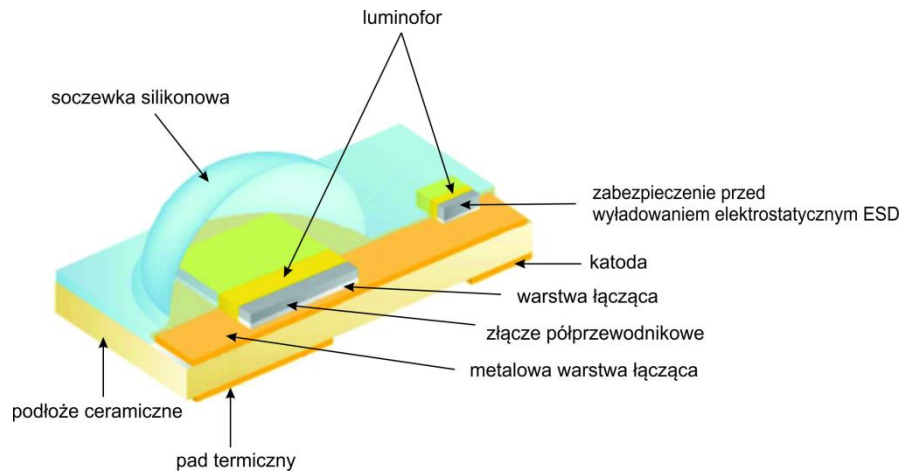
2.2.1. Diody średniej mocy

Źródła LED średniej mocy są to źródła, których moc elektryczna P_e w większości przypadków zawiera się w przedziale 0,2–1 W [24, 89, 99, 102, 109]. Spotykane są pojedyncze źródła o mocy dochodzącej do 1,5 W [31]. Zarządzanie ciepłem i skuteczne jego odprowadzanie ze złącza półprzewodnikowego ma znaczenie w efektywnej pracy źródeł LED. Wpływ temperatury złącza T_j na żywotność i parametry świetlne jest jednak dużo mniejszy niż w przypadku źródeł LED dużej mocy, co jest związane m.in. z mniejszymi wartościami gęstości cieplnej. W związku z tym rozpatrywane problemy termiczne oraz przeprowadzone w dalszej części pracy badania będą dotyczyły półprzewodnikowych źródeł LED dużej mocy.

2.2.2. Diody dużej mocy

Do źródeł LED dużej mocy są zaliczane półprzewodnikowe źródła światła, których prąd przewodzenia I_F wynosi co najmniej 350 mA, a całkowita moc elektryczna P_e zawiera się w przedziale od jednego do kilku, a nawet kilkunastu watów [40, 61]. Ciepło w złączu diody musi być w sposób szybki i efektywny odprowadzone do otoczenia, w przeciwnym wypadku temperatura złącza T_j wzrasta, przekładając się na spadek wydajności rekombinacji elektronów w warstwie aktywnej i obniżenie wewnętrznej wydajności kwantowej.


W 1998 roku firma Lumileds wyprodukowała diodę dużej mocy o nazwie Luxeon, w której złącze półprzewodnikowe połączono przez lutowie z wewnętrznym radiatorem (ang. *heat slug*), wykonanym z miedzi o wysokiej przewodności cieplnej k . Zastosowanie wewnętrznego radiatora o dość znacznych wymiarach wpłynęło na obniżenie wewnętrznej rezystancji termicznej, przekładając się tym samym na poprawę warunków odprowadzania ciepła. Przedstawione rozwiązanie w sposób znaczący rozwiązywało problemy termiczne, jednak gabaryty wewnętrznego radiatora wpłynęły na zwiększenie objętości i masy źródła LED, co stanowiło istotne ograniczenie w możliwości jego stosowania. Problem ten został częściowo zminimalizowany w rozwiązaniu firmy Cree, która do budowy źródła LED wykorzystywała podłoże ceramiczne. Firma Lumileds po pierwszej serii Luxeon zaprezentowała jej rozwinięcie o nazwie Rebel, gdzie podobnie jak w przypadku firmy Cree zostało zastosowane podłoże ceramiczne [40, 100, 115]. Budowę wymienionego źródła przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Źródło LED Luxeon Rebel firmy Lumileds - budowa [100]

Źródła LED dużej mocy są obecnie jednymi z najbardziej popularnych rodzajów półprzewodnikowych źródeł światła stosowanych do celów oświetleniowych. Stosunkowo duża moc P_e z pojedynczego źródła, wysoka skuteczność świetlna η , jak również duży wybór układów soczewkowych formujących wymagany rozsył strumienia świetlnego sprawiły, że źródła te są szeroko stosowane w oprawach oświetleniowych. Zastosowanie źródeł LED wymusza uwzględnienie w konstrukcji oprawy oświetleniowej układu radiacyjnego, którego zadaniem jest efektywne odprowadzanie ciepła, prowadzące do ograniczenia temperatury złącza T_j .

Tabela 2.3. Przykładowe źródła LED wysokiej mocy i ich podstawowe parametry [90, 98, 103, 106]

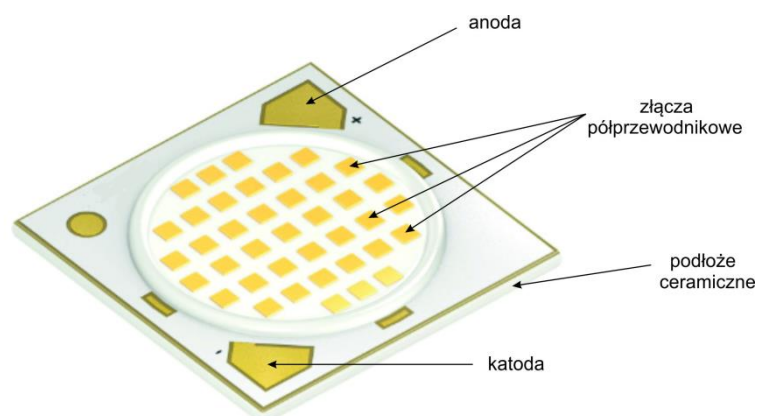
				
Producent	Cree	Lumileds	Osram	Samsung
Model	XLamp XP-G2	LUXEON T	OSLO Square	LH351B
Maksymalny prąd przewodzenia I_F [mA]	2000	1050	1800	1500
Typowe napięcie przewodzenia U_F [V]	2,8 $T_j = 85^\circ\text{C}$ $I_F = 350 \text{ mA}$	2,8 $T_j = 85^\circ\text{C}$ $I_F = 700 \text{ mA}$	2,8 $T_j = 85^\circ\text{C}$ $I_F = 700 \text{ mA}$	2,89 $T_j = 85^\circ\text{C}$ $I_F = 700 \text{ mA}$
Maksymalna temperatura złącza T_j [$^\circ\text{C}$]	150	150	135	150
Typowy strumień świetlny Φ [lm]	139-164 $T_j = 85^\circ\text{C}$ $I_F = 350 \text{ mA}$	117-136 $T_j = 85^\circ\text{C}$ $I_F = 350 \text{ mA}$	280-340 $T_s = 85^\circ\text{C}$ $I_F = 700 \text{ mA}$	140-160 $T_j = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 350 \text{ mA}$
Temperatura barwowa T_B [K]	2700-7000	2700-6500	3000-6500	2200-6500

W tabeli 2.3 przedstawiono podstawowe parametry źródeł LED dużej mocy kilku producentów. W odróżnieniu do źródeł LED średniej mocy maksymalna wartość prądu przewodzenia I_F jest niemal dziesięciokrotnie wyższa i dochodzi do $I_F = 2000 \text{ mA}$, a skuteczność

światlna η wynosi od 120 do 170 lm/W, w zależności od producenta i wartości parametrów T_j i I_F , dla których została wyznaczona wartość strumienia świetlnego Φ .

2.2.3. Diody w technologii COB

Innym rodzajem półprzewodnikowych źródeł światła dużej mocy są diody wykonane w technologii COB (ang. *Chip on Board*) [16, 34]. Źródła te zawierają w swojej strukturze wiele złącz półprzewodnikowych połączonych w struktury równoległo-szeregowo. Wszystkie złącza znajdują się na jednym podłożu ceramicznym, posiadają również jeden wspólny obwód sterujący. Źródła COB mogą zawierać w swojej strukturze kilkadziesiąt lub nawet kilkaset zintegrowanych ze sobą pojedynczych złącz półprzewodnikowych, tworząc w ten sposób pojedyncze źródło światła o sumarycznej mocy P_e , dochodzącej do kilkuset watów. Przykładowe źródło w technologii COB, zawierające w swojej strukturze 39 pojedynczych złącz półprzewodnikowych przedstawiono na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Źródło LED w technologii COB – Osram Soleriq S 13 [104]

Wadą przedstawionego rozwiązania są problemy związane z efektywnym chłodzeniem i silny wpływ temperatury złącza T_j na parametry świetlne i elektryczne. W stosunku do pojedynczych źródeł LED o mocy kilku watów, w technologii COB występują wyższe wartości gęstości cieplnej, które skutkują trudnością z szybkim i efektywnym odprowadzaniem ciepła ze złącza półprzewodnikowego, przekładając się na stosunkowo wysoką temperaturę złącza T_j . Inną niedogodnością źródeł COB jest trudność w projektowaniu układów soczewkowych realizujących złożone rozsyły strumienia świetlnego. W związku z tą trudnością źródła LED w technologii COB znalazły głównie zastosowanie w oprawach oświetleniowych niewymagających złożonych rozsyłów światłości.

2.3. Źródła LED jako źródła ciepła

W źródłach światła LED tylko część mocy jest wypromieniowana w postaci strumienia świetlnego Φ , natomiast pozostała część tracona jest w postaci ciepła P_H , określonego wzorem [54]:

$$P_H = (1 - \eta_o) \cdot P_e \text{ [W]} \quad (2.2)$$

gdzie: P_H – moc cieplna, η_o – sprawność optyczna, P_e – moc elektryczna.

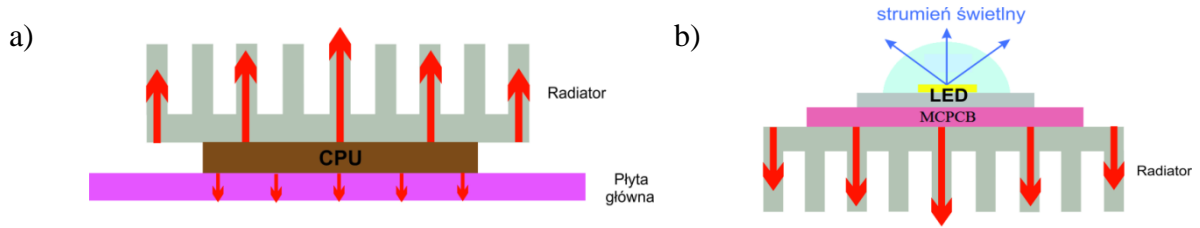
Obecnie, w wielu pozycjach literaturowych sprawność optyczna źródeł LED η_o jest deklarowana na poziomie 15–35% [23, 28, 54, 55, 61, 72, 78, 79], można jednak spotkać pojedyncze pozycje, gdzie sprawność η_o jest nieco większa [76]. Również badania własne autora przedstawione w rozdz. 9. potwierdziły możliwość uzyskania wyższych wartości η_o , przy ograniczeniu temperatury złącza T_j . W tabeli 2.4 zestawiono procentowy udział mocy dla tradycyjnych oraz półprzewodnikowych źródeł światła o barwie białej [45, 55].

Tabela 2.4. Procentowy udział mocy w tradycyjnych oraz półprzewodnikowych źródłach światła,
* - wartość deklarowana na podstawie literatury [47, 55], badania autora wskazują na możliwość występowania wyższych wartości dla wybranych źródeł LED

	Źródła żarowe [%]	Źródła fluorescencyjne [%]	Źródła metalohalogenkowe [%]	Źródła LED [%]
Promieniowanie widzialne	8	21	27	15 – 35 *
Promieniowanie podczerwone	73	37	17	0
Promieniowanie ultrafioletowe	0	0	19	0
Ciepło (konwekcja + kondukcja)	19	42	37	65 – 85
Suma	100	100	100	100

Typowa powierzchnia złącza w źródłach LED dużej mocy wynosi około 1 mm², a wartość prądu przewodzenia I_F może dochodzić do 2000 mA, co skutkuje występowaniem dużych gęstości cieplnych na poziomie 300–500 W/cm², podczas gdy typowa wartość strumienia cieplnego dla procesora jest mniejsza niż 100 W/cm² [23, 75].

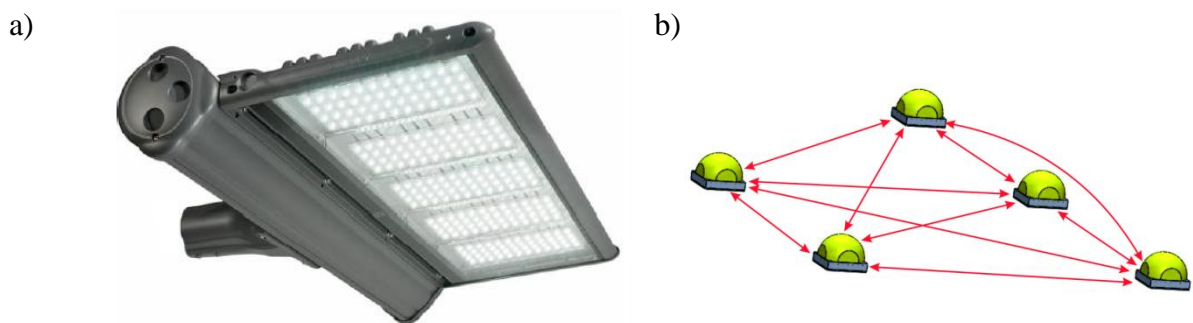
W porównaniu z innymi układami elektronicznymi dużej mocy, odmienna jest również droga przepływu ciepła, co przedstawiono na rys. 2.8.



Rys. 2.8. Typowa droga przepływu ciepła: a) w procesorze, b) w źródle LED [25]

W przypadku układów elektronicznych dużej mocy np. procesora, odbiór ciepła odbywa się na ogół dwiema drogami: przez płytę główną, na której został zainstalowany i przez radiator, który jest mocowany z drugiej strony procesora. W źródłach LED istnieje tylko jedna główna droga przepływu ciepła przez radiator instalowany do podłoża źródła LED.

Dodatkowym zjawiskiem cieplnym występującym w wieloźródłowych panelach LED jest zjawisko wzajemnego oddziaływania cieplnego pomiędzy półprzewodnikowymi źródłami światła [6, 22, 58]. W panelach, gdzie w bliskim sąsiedztwie na wspólnym podłożu może być zainstalowanych kilkadziesiąt lub nawet kilkaset źródeł LED dużej mocy [80], występują wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy źródłami, skutkując wzrostem temperatury złącza T_j poszczególnych źródeł LED. Przykład oprawy oświetleniowej o takim rozwiązaniu przedstawiono na rys. 2.9, gdzie w bliskim sąsiedztwie zainstalowano 240 źródeł LED o sumarycznej mocy oprawy wynoszącej 390 W [107].



Rys. 2.9. Wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy źródłami LED: a) na przykładzie oprawy drogowej [107], b) szkic obrazujący zjawisko

Przedstawione zagadnienia termiczne w półprzewodnikowych źródłach światła, zwłaszcza źródłach dużej mocy, mają decydujący wpływ na wartość temperatury złącza T_j . Długotrwale utrzymująca się wysoka temperatura złącza T_j może prowadzić do degradacji cech materiałów złącza i znacząco wpływać na skrócenie długości życia źródeł światła [47]. Ponadto podwyższona temperatura może indukować naprężenia termiczne, związane z niedopasowaniem współczynnika rozszerzalności cieplnej materiałów, gdzie szczególnie wrażliwa jest warstwa aktywna złącza, której grubość wynosi zazwyczaj tylko kilkadziesiąt nanome-

trów (rozdz. 6.). W przypadku większości półprzewodnikowych źródeł światła dużej mocy temperatura złącza T_j nie może przekroczyć 150°C [90, 98, 103, 106], dlatego szybkie odprowadzanie ciepła ze złącza półprzewodnikowego, czyli ograniczanie wzrostu temperatury są kluczowe dla utrzymania wydajności i stałości parametrów świetlnych w czasie.

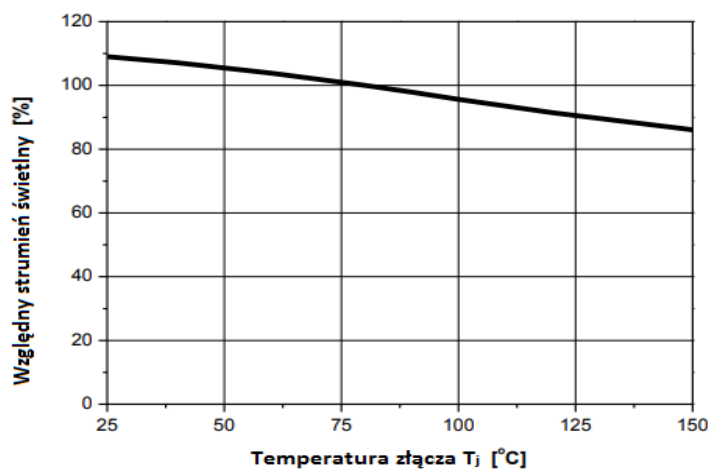
2.4. Wpływ temperatury złącza T_j na wybrane parametry świetlne

Wzrost temperatury złącza T_j , oprócz wspomnianego wcześniej destrukcyjnego wpływu na cechy materiału złącza półprzewodnikowego, oddziałuje również na wartość parametrów świetlnych takich jak strumień świetlny Φ , temperatura barwowa T_B czy współczynnik oddawania barw Ra [23, 36, 62, 70, 76, 115].

2.4.1. Wpływ temperatury złącza T_j na strumień świetlny Φ

Wzrost temperatury złącza T_j przekłada się na spadek wartości strumienia świetlnego Φ półprzewodnikowych źródeł światła. Spadek ten ma zazwyczaj charakter liniowy, a jego wartość jest uzależniona od prądu przewodzenia I_F (rozdz. 9.). Producenci zazwyczaj przedstawiają w kartach katalogowych procentowy spadek strumienia świetlnego Φ , który zostaje określony dla jednej wartości prądu przewodzenia I_F , w odniesieniu do temperatury złącza T_j wynoszącej 25°C lub 85°C [90, 98, 103, 106].

Na rysunku 2.10 przedstawiono katalogowy spadek strumienia świetlnego Φ dla źródła LED dużej mocy firmy Seoul Semiconductor. Procentowy spadek wartości został określony dla prądu przewodzenia $I_F = 350\text{ mA}$, w odniesieniu do temperatury złącza $T_j = 85^\circ\text{C}$ [111].



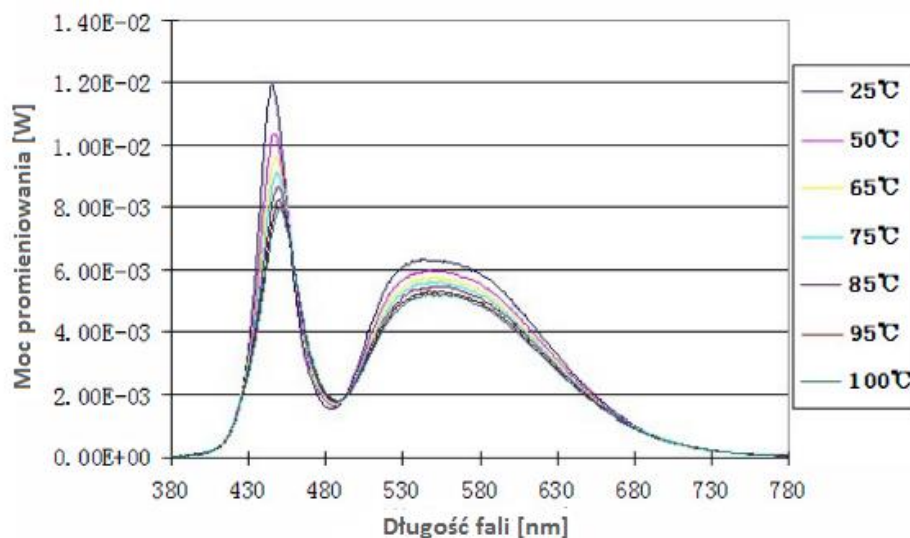
Rys. 2.10. Katalogowy spadek wartości strumienia świetlnego Φ w funkcji temperatury złącza T_j dla przykładowego źródła LED wysokiej mocy [111]

W literaturze [23, 76] najczęściej są spotykane wyniki badań wpływu temperatury na wartość strumienia świetlnego Φ . Przedstawiany spadek wartości strumienia świetlnego Φ , przy wzroście temperatury z 25 do 85–100°C wynosił od kilku do dwudziestu procent. W zależności od producenta i modelu źródła LED, przy tej samej wartości temperatury oraz prądu przewodzenia I_F , różnice wynoszą nawet kilkadziesiąt procent.

2.4.2. Wpływ temperatury złącza T_j na temperaturę barwową T_B

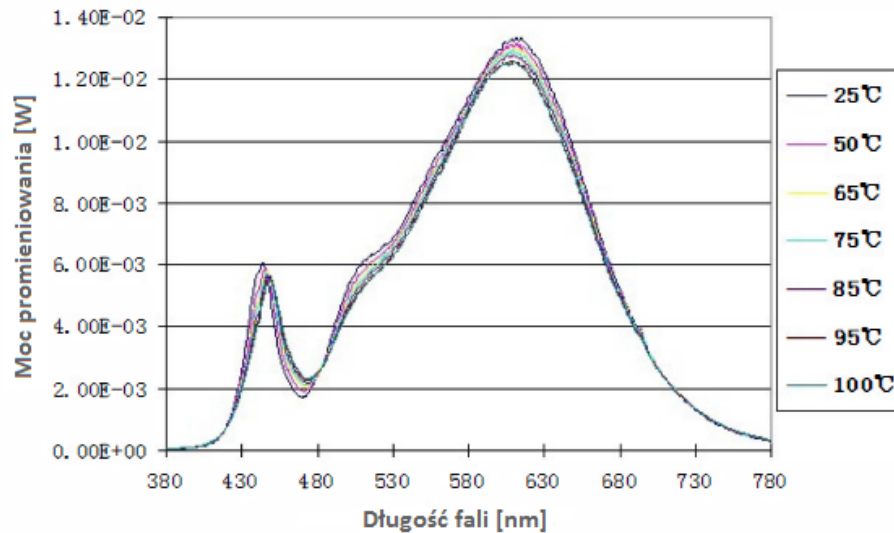
Kolejnym parametrem, który jest zależny od wartości temperatury złącza T_j jest temperatura barwowa T_B [36, 62, 70, 76]. Wpływ temperatury złącza T_j jest bardziej znaczący w przypadku źródeł LED, w których barwa biała jest tworzona z wykorzystaniem źródła o barwie niebieskiej i żółtego luminoforu. Rozkład widmowy w tym przypadku zależy od temperatury złącza T_j , czego przykład przedstawiono na rys. 2.11.

Wraz ze wzrostem temperatury zauważalny jest spadek wartości amplitudy zarówno dla barwy białej, jak i żółtej. Dodatkowo następuje przesunięcie długości fali dominującej w kierunku długofalowym [11, 23, 33, 76].



Rys. 2.11. Wpływ temperatury złącza T_j na rozkład widmowy przykładowego źródła LED, gdzie do otrzymania barwy białej wykorzystano metodę hybrydową [23]

Zmiana rozkładu widma wpływa bezpośrednio na temperaturę barwową T_B źródeł LED i dla większości przypadków przekłada się na jej wzrost. Wartość wzrostu jest uzależniona od wartości prądu przewodzenia I_F , od nominalnej temperatury barwowej, jak również od konkretnego modelu źródła LED. Wzrost ten na ogół zawiera się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu procent w stosunku do wartości nominalnej, określonej przeważnie dla temperatury $T_j = 25^\circ\text{C}$.



Rys. 2.12. Wpływ temperatury złącza T_j na rozkład widmowy przykładowego źródła LED, gdzie do otrzymania barwy białej wykorzystano luminofor czerwony oraz zielony [23]

Mniejszy wpływ temperatury złącza T_j na rozkład widmowy i temperaturę barwową T_B występuje w źródłach LED, gdzie zamiast pojedynczego żółtego luminoforu zastosowano luminofor czerwony i zielony. Amplituda widma czerwonego i zielonego jest mniej czuła na zmianę temperatury, w stosunku do amplitudy widma pojedynczego koloru żółtego (rys. 2.12). Wymienione źródła LED charakteryzują się jednak dużo mniejszą sprawnością, związaną z większymi stratami strumienia świetlnego Φ w dwuwarstwowym luminoforze, przez co rozwiązanie to jest mniej popularne od metody hybrydowej z pojedynczym żółtym luminoforem.

2.4.3. Wpływ temperatury złącza T_j na wskaźnik oddawania barw R_a

Podobnie jak w przypadku temperatury barwowej T_B zmiana rozkładu widma spowodowana wzrostem temperatury złącza T_j wpływa na wskaźnik oddawania barw R_a [33, 76]. Dla większości półprzewodnikowych źródeł światła dużej mocy, gdzie barwa biała jest tworzona z wykorzystaniem niebieskiego emitera i żółtego luminoforu, wzrost temperatury złącza T_j przekłada się na wzrost wartości wskaźnika R_a . Wzrost ten jest również uzależniony od wartości prądu przewodzenia I_F i może wynosić nawet 10%.

W literaturze przedmiotu liczba publikacji związana ze wspomnianą tematyką jest stosunkowo niewielka, a dostępne pozycje skupiają uwagę na badaniach pojedynczych źródeł LED [33, 36, 51, 76]. W związku z tym, w rozdz. 9. niniejszej pracy autor przedstawił szczegółowe wyniki własnych badań wpływu temperatury złącza T_j na parametry świetlne wybranych źródeł LED wysokiej mocy. Uzyskane wyniki posłużyły do dalszych badań związanych z wpływem temperatury złącza T_j na parametry świetlne panelu LED. Podczas wyznaczania

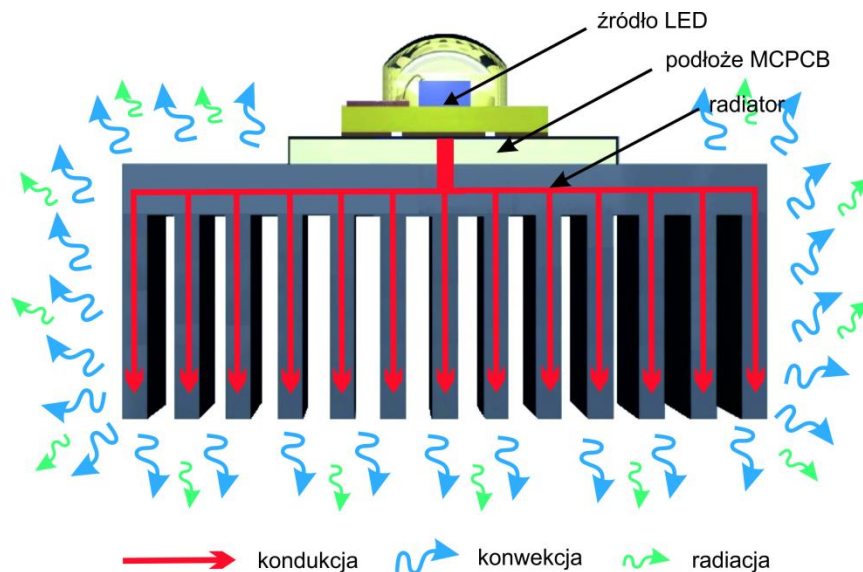
temperatury złącza T_j źródeł panelu uwzględniono składowe elementy kształtujące jej wartość, tj. budowę źródła LED, obwodu drukowanego, układu odprowadzania ciepła, jak również sprzężenia termiczne pomiędzy źródłami i warunki środowiskowe.

3. Chłodzenie półprzewodnikowych źródeł światła

Przeważająca część mocy P_e w źródłach LED jest tracona w postaci ciepła P_H . Charakterystyczne są również, w porównaniu z innymi układami elektronicznymi wysokiej mocy, występujące duże wartości gęstości cieplnej [23, 75]. Sprawia to, że w celu poprawnej pracy półprzewodnikowych źródeł światła konieczne jest zastosowanie układu radiacyjnego, którego zadaniem jest odbiór ciepła ze złącza półprzewodnikowego.

3.1. Mechanizmy przepływu ciepła w półprzewodnikowych źródłach światła

Na rysunku 3.1 przedstawiono typową strukturę półprzewodnikowego źródła światła z układem chłodzenia oraz zobrazowano drogi przepływu ciepła.



Rys. 3.1. Mechanizmy przepływu ciepła w półprzewodnikowych źródłach światła

Ciepło generowane przez złącze półprzewodnikowe, w pierwszej kolejności przez przewodnictwo cieplne (kondukcję), przepływa do radiatora, skąd przez konwekcję i radiację (promieniowanie cieplne) zostaje przekazane do otoczenia [27, 28, 69, 115].

3.1.1. Przewodnictwo cieplne

W źródłach LED ciepło przepływa od złącza półprzewodnikowego, przez wewnętrzną strukturę źródła, płytkę obwodu drukowanego (ang. *MCPCB*, *Metal Core Printed Circuit*

Board) do radiatora. Zdolność przepływu ciepła w danym materiale charakteryzuje współczynnik przewodzenia ciepła k , a ilość ciepła przekazana przez przewodzenie jest opisana wzorem [27, 33, 35, 115]:

$$Q_{kond.} = k \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} [W] \quad (3.1)$$

gdzie: $Q_{kond.}$ – ciepło przewodzone, k – współczynnik przewodzenia ciepła, A – pole przekroju poprzecznego materiału, przez które przepływa ciepło, ΔT – gradient temperatury w materiale, Δx – odległość, jaką musi pokonać ciepło.

3.1.2. Konwekcja

W półprzewodnikowych źródłach światła konwekcja ma decydujące znaczenie w wymianie ciepła pomiędzy radiatorem a otoczeniem. Występują dwa rodzaje konwekcji: swobodna (naturalna) oraz wymuszona [27, 33, 35, 115]. Konwekcja naturalna występuje bez sztucznego źródła ruchu powietrza, a ruch cząsteczek odbywa się w związku z występującą różnicą temperatur pomiędzy ciałem stałym a otoczeniem. Konwekcja wymuszona charakteryzuje się zastosowaniem dodatkowego, sztucznego źródła wymuszającego ruch cząsteczek gazu, np. przez zastosowanie wentylatora. Ilość ciepła przekazana przez konwekcję może zostać wyznaczona na podstawie prawa chłodzenia Newtona [33]:

$$Q_{konw.} = h \cdot A \cdot \Delta T [W] \quad (3.2)$$

gdzie: $Q_{konw.}$ – ilość ciepła przekazana przez konwekcję, h – współczynnik przenikania ciepła, A – powierzchnia materiału, ΔT – gradient temperatury, zazwyczaj pomiędzy powierzchnią materiału a temperaturą otoczenia.

Decydującym czynnikiem przy wyznaczaniu ciepła transportowanego poprzez konwekcję jest poprawne oszacowanie współczynnika przenikania ciepła h . Wartość tego współczynnika może się znacznie różnić w zależności od wielu czynników, m.in. warunków brzegowych, geometrii materiału czy rodzaju. Dla konwekcji naturalnej współczynnik h zawiera się zazwyczaj w przedziale 5-20 W/m²·K, podczas gdy dla konwekcji wymuszonej może dochodzić nawet do 100 W/m²·K [35]. W celu wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła h dla złożonych geometrii są stosowane zaawansowane metody numeryczne m.in. obliczeniowa mechanika płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics-CFD*) [5, 15, 63, 73].

3.1.3. Promieniowanie cieplne

W pojedynczych półprzewodnikowych źródłach światła promieniowanie cieplne stanowi znikomy udział w ogólnym transporcie ciepła ze złącza półprzewodnikowego, jednak w oprawkach ze źródłami LED, gdzie powierzchnia radiatora jest znaczna, promieniowanie cieplne odbywa się w sposób naturalny i nie może być pominięte [73]. Wielkość przenoszenia ciepła poprzez radiację jest uzależniona od współczynnika emisyjności materiału ε , który charakteryzuje powierzchnię materiału w stosunku do ciała doskonale czarnego. Ilość ciepła przekazywana przez promieniowanie cieplne jest opisana zależnością [27, 33, 35]:

$$Q_{rad.} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_A^4 - T_o^4) \text{ [W]} \quad (3.3)$$

gdzie: $Q_{rad.}$ – ilość ciepła przekazana przez radiację, ε – współczynnik emisyjności materiału, σ – stała Boltzmanna ($5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²·K⁴]), A – powierzchnia materiału, T_A – temperatura powierzchni materiału, T_o – temperatura otoczenia.

3.2. Układy chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła

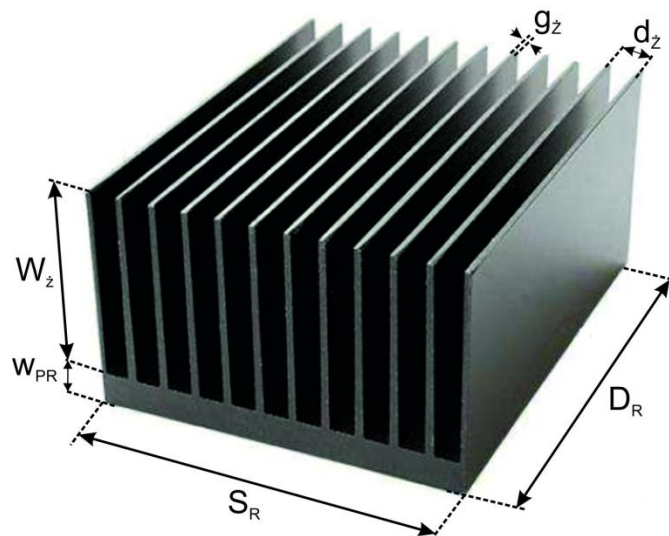
W układach elektronicznych można wyróżnić dwa podstawowe układy chłodzenia: pasywne oraz aktywne [35, 63]. W układach pasywnych wymiana ciepła odbywa się w sposób naturalny, bez użycia zewnętrznych sił i dodatkowego zużycia energii. W układach aktywnych do chłodzenia są wykorzystywane dodatkowe czynniki zewnętrzne, gdzie do najczęściej stosowanych można zaliczyć m.in. chłodzenie wymuszonym obiegiem powietrza czy cieczą.

W półprzewodnikowych źródłach światła, jak również w oprawkach z wymienionymi źródłami, aktywne układy chłodzenia nie znalazły szerszego zastosowania. Jest to związane z większą awaryjnością, generowaniem hałasu czy trudnymi warunkami otoczenia. Chłodzenie aktywne szeroko stosowane w układach elektronicznych dużej mocy, w źródłach LED jest używane sporadycznie, głównie do zadań specjalnych, gdzie niemożliwe było zastosowanie radiatora z konwekcją swobodną, np. z powodu ograniczeń gabarytowych [32, 35, 40].

Inną rozpatrywaną w literaturze metodą chłodzenia było wykorzystanie ogniwa Peltiera. Pomimo opublikowanych wyników badań wskazujących na możliwość zastosowania tej metody do obniżenia temperatury złącza T_j źródeł [17, 64], często moc do zasilenia ogniwa była wyższa od mocy samych półprzewodnikowych źródeł światła, co sprawiało, że rozwiązanie to nie było efektywne energetycznie. Dodatkowym ograniczeniem tego rozwiązania jest również wysoki koszt ogniwa Peltiera [3].

W związku z danymi ograniczeniami, do odprowadzania ciepła zarówno w źródłach LED, jak i oprawach z wymienionymi źródłami, szeroko stosowane są układy pasywne. Podstawowym rozwiązaniem tego rodzaju chłodzenia jest radiator składający się z podstawy oraz żeber, a głównym mechanizmem przepływu ciepła jest konwekcja naturalna [28]. Zgodnie z prawem chłodzenia Newtona (zależność 3.2), współczynnik przenikania ciepła h oraz powierzchnia wymiany ciepła A są kluczowymi elementami wpływającymi na intensywność wymiany ciepła przez konwekcję naturalną. W celu poprawy wydajności rozpraszania ciepła są stosowane dodatkowe żebra, zwiększające sumaryczną powierzchnię wymiany ciepła. Analizowana jest również, pod kątem zwiększenia efektywności radiatora, odległość pomiędzy żebrami, jak również ich wysokość [38, 57].

Na rysunku 3.2 przedstawiono widok przykładowego radiatora z żebrami.



Rys. 3.2. Widok radiatora pasywnego z podstawowymi wymiarami

Całkowita moc cieplna radiatora Q_R , która może zostać przyjęta i oddana do otoczenia jest wyrażona wzorem:

$$Q_R = Q_{PR} + Q_Z \text{ [W]} \quad (3.4)$$

gdzie: Q_{PR} - ciepło rozpraszane przez odsłoniętą podstawę radiatora (wzór 3.5), Q_Z - ciepło rozpraszane przez żebra radiatora;

$$Q_{PR} = h_{PR} \cdot (n - 1) \cdot \Delta T \cdot A_{PR} \text{ [W]} \quad (3.5)$$

gdzie: h_{PR} - współczynnik przenikania ciepła podstawy radiatora, n - liczba żeber, ΔT - przyrost temperatury radiatora ponad temperaturę otoczenia, A_{PR} - powierzchnia odsłoniętej podstawy radiatora;

$$A_{PR} = d_z \cdot D_R \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.6)$$

gdzie: d_z - odległość pomiędzy żebrami, D_R - długość żebra;

$$Q_{\dot{z}} = h_{\dot{z}} \cdot \Delta T \cdot A_{\dot{z}} \text{ [W]} \quad (3.7)$$

gdzie: $h_{\dot{z}}$ - uśredniony współczynnik przenikania ciepłego żebra, $A_{\dot{z}}$ - powierzchnia pojedynczego żebra;

$$A_{\dot{z}} = 2(W_{\dot{z}} \cdot g_{\dot{z}} + D_R \cdot W_{\dot{z}} + D_R \cdot \frac{g_{\dot{z}}}{2}) \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.8)$$

gdzie: $W_{\dot{z}}$ - wysokość żebra, $g_{\dot{z}}$ - grubość żebra.

W celu wyznaczenia uśrednionego współczynnika przenikania ciepła h należy wyznaczyć współczynnik dla podstawy radiatora h_{PR} oraz dla żeber radiatora h_z . Współczynnik h jest funkcją liczby Nusselta Nu , która charakteryzuje stosunek konwekcji do przewodzenia na granicy ciało stałe-gaz.

W przypadku gdy stosunek odległości pomiędzy żebrami d_z do wysokości żeber W_z jest mniejszy niż 0,28, przepływ wewnątrz żeber jest zamkniętą przestrzenią naturalnej konwekcji. W tym przypadku charakterystycznym wymiarem jest wysokość zamkniętej przestrzeni W_z ;

$$Nu_{PR} = 1 + 1.44 \cdot \left(1 - \frac{1708}{Ra_{PR}}\right) + \left[\left(\frac{Ra_{PR}}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right] \quad (3.9)$$

gdzie: Ra_{PR} - liczba Raleigha charakteryzująca przenoszenie ciepła w płynach, będąca iloczynem liczby Grashofa Gr opisującej zależność pomiędzy siłami wyporu a siłami bezwładności w płynach oraz liczby Prandtla Pr opisującej relacje pomiędzy lepkością a ich temperaturą;

$$Ra_{PR} = Gr_{PR} \cdot Pr_{PR} \quad (3.10)$$

$$Gr_{PR} = g \cdot CTE \cdot \Delta T \cdot W_z^3 / \nu_{PR}^2 \quad (3.11)$$

gdzie: ν_{PR} - średnia lepkość kinematyczna powietrza wokół podstawy radiatora, CTE - współczynnik rozszerzalności cieplnej, g - przyspieszenie ziemskie.

W przypadku gdy stosunek odległości pomiędzy żebrami d_z do wysokości żeber W_z jest większy niż 0,28, zakłada się konwekcję naturalną w dużej przestrzeni, a za charakterystyczny wymiar przyjmuje się $(d_z + D_R)/2$.

Liczba Grashofa jest wyrażona następująco:

$$Gr_{PR} = g \cdot CTE \cdot \Delta T \cdot ((d_z + D_R)/2)^3 / \nu_{PR}^2 \quad (3.12)$$

Jeśli na podstawie równania (3.10) $Ra_{PR} < 2 \cdot 10^4$, to:

$$Nu_{PR} = 1 \quad (3.13)$$

Jeśli $2 \cdot 10^4 < Ra_{PR} < 8 \cdot 10^6$, wtedy:

$$Nu_{PR} = 0,54 \cdot Ra_{PR}^{1/4} \quad (3.14)$$

Jeśli $8 \cdot 10^6 < Ra_{PR} < 10^{11}$, wówczas:

$$Nu_{PR} = 0,15 \cdot Ra_{PR}^{1/3} \quad (3.15)$$

Uśredniony współczynnik przenikania ciepła dla podstawy radiatora h_{PR} może zostać zapisany następująco:

$$h_{PR} = Nu_{PR} \cdot k_{PR} / l_{PR} \quad (3.16)$$

gdzie: k_{PR} - przewodność cieplna podstawy radiatora, l_{PR} - charakterystyczny wymiar podstawy radiatora.

Dla żeber radiatora, w przypadku gdy stosunek odległości pomiędzy żebrami d_z do wysokości żeber W_z jest mniejszy niż 0,28, jako wymiar charakterystyczny przyjmuje się połowę odległości pomiędzy żebrami $d_z/2$.

W tym przypadku liczba Grashofa jest opisana zależnością:

$$Gr_z = g \cdot CTE \cdot \left(\frac{Q_z}{2 \cdot W_z \cdot D_R} \right) \cdot \left(\frac{d_z}{2} \right)^4 / (k_p \cdot \nu_z^2) \quad (3.17)$$

gdzie: k_p - przewodność cieplna powietrza wokół żeber radiatora, ν_z - średnia lepkość kinematyczna powietrza wokół żeber radiatora.

Ciepło rozproszone przez pojedyncze żebro jest wyrażone następująco:

$$Q_z = k_z \cdot \Delta T \cdot A_{p_z} \cdot m \cdot \tanh(m \cdot W_z), [W] \quad (3.18)$$

gdzie: k_z - przewodność cieplna żebra, A_{p_z} - pole przekroju żebra ($A_{p_z} = W_z \cdot g_z$), m - parametr żebra, który może być zapisany jako: ($m = (h_z \cdot \frac{P}{k_z} \cdot A_{p_z})^{\frac{1}{2}}$, h_z - uśredniony współczynnik przenikania ciepła dla żebra, P - obwód przekroju poprzecznego żebra ($P = 2 \cdot (W_z + g_z)$)).

Liczba Raleigha dla żebra jest zdefiniowana w następujący sposób:

$$Ra_z = Gr_z \cdot Pr_z \quad (3.19)$$

gdzie: Pr_z - liczba Prandtla dla powietrza wokół powierzchni żebra.

Jeśli na podstawie równania (3.19) $Ra_z < 10^4$, wtedy:

$$Nu_z = 1 \quad (3.20)$$

Jeśli $10^4 < Ra_z < 10^7$, wówczas:

$$Nu_z = 0,42 \cdot Ra_z^{\frac{1}{4}} \cdot Pr_z^{0,012} \cdot \left(\frac{W_z}{s} \right)^{-0,3} \quad (3.21)$$

Jeśli $10^7 < Ra_z < 10^9$, wtedy:

$$Nu_z = 0,46 \cdot Ra_z^{1/3} \quad (3.22)$$

W przypadku gdy stosunek odległości pomiędzy żebrami d_z do wysokości żeber W_z jest większy niż 0,28, jako charakterystyczny wymiar jest przyjmowana wysokość żeber W_z .

Liczba Grashofa jest wyrażona wzorem:

$$Gr_z = g \cdot CTE \cdot \left(\frac{Q_z}{2 \cdot W_z \cdot D_R} \right) \cdot (W_z)^4 / (k_p \cdot \nu_z^2) \quad (3.23)$$

Liczbę Raleigha wyznacza się na podstawie równania (3.19).

Wtedy:

$$Nu_z = 0,6 \cdot Ra_z^{1/5} \quad (3.24)$$

Ostatecznie uśredniony współczynnik przenikania ciepła dla żeber h_z może zostać zapisany jako:

$$h_z = Nu_z \cdot k_z / l_z \quad (3.25)$$

gdzie: l_z - charakterystyczny wymiar żebra.

Pasywne układy radiacyjne znalazły szerokie zastosowanie do chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła i obecnie stanowią najczęściej stosowaną metodę odprowadzania ciepła ze złącza półprzewodnikowego do otoczenia. Do ich zalet można zaliczyć m.in. stosunkowo prostą strukturę, wysoką niezawodność, łatwość produkcji, brak emitowanego hałasu czy zużycia dodatkowej energii elektrycznej oraz relatywnie niski koszt. Radiatory pasywne są wykorzystywane zarówno w pojedynczych źródłach LED, jak również w oprawach oświetleniowych z wieloma źródłami wysokiej mocy [28].

Na rysunku 3.3 przedstawiono przykład zastosowania układów pasywnych do chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła.

a)



b)



Rys. 3.3. Przykład zastosowania pasywnych układów chłodzenia w: a) zamienniku klasycznej żarówki [124], b) oprawie przemysłowej typu High Bay [120]

W przedstawionych przykładach ciepło ze źródeł LED jest odbierane przez pasywny układ chłodzenia, a następnie w sposób konwekcyjny przekazywane do otoczenia.

3.3. Przegląd stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych w oprawach oświetlenia drogowego

Jednym z rodzajów oświetlenia użytkowego, gdzie półprzewodnikowe źródła światła znalazły szerokie zastosowanie jest oświetlenie drogowe. Dostępne coraz wyższe moce źródeł LED, wysoka skuteczność świetlna czy szeroki wybór układów soczewkowych, formujących

wymagany rozsył światłości sprawiły, że oprawy oświetleniowe w technologii LED zaczęły zastępować dotychczas stosowane oprawy z sodowymi i metalohalogenkowymi źródłami światła [9].

Charakterystyczna dla opraw oświetlenia drogowego ze źródłami LED jest ich duża moc P_e , zawierająca się zazwyczaj w przedziale od kilkudziesięciu do kilkuset watów. Wymieniona moc opraw, jest związana z charakterystyką oświetlenia ulicznego, gdzie oprawa zawieszona na dużej wysokości (6–12 m) powinna zapewniać równomierny rozkład luminancji na powierzchni drogi w przedziale 0,3–2,0 cd/m², w zależności od jej klasy oświetleniowej [84].

Znaczna część mocy P_e jest tracona w postaci ciepła P_H (pkt 2.3), dlatego konstrukcja oprawy i systemu radiacyjnego powinna zapewniać efektywne odprowadzanie ciepła ze złącza źródeł LED, niezależnie od zmieniających się warunków otoczenia w cyklu rocznym.

Typowa budowa oprawy oświetlenia drogowego zawiera komorę optyczną, w której znajdują się źródła LED wraz z układem soczewkowym oraz komorę zasilania, w której znajduje się zasilacz i opcjonalnie układ sterowania.

Konstrukcja oprawy, w której cały korpus aluminiowy pełni jednocześnie funkcję radiatora, stanowi rozwiązanie często stosowane przez producentów opraw oświetlenia drogowego (rys. 3.5). W przedstawionych oprawach zastosowano źródła LED dużej mocy. Ciepło ze złącza źródeł jest przewodzone do podłoża obwodu drukowanego MCPCB, a następnie do aluminiowego korpusu oprawy, skąd przez konwekcję naturalną jest oddawane do otoczenia.

a)



b)



Rys. 3.5. Oprawa drogowa: a) Teceo [108], b) Urbino [97]

W przedstawionym rozwiązaniu korpus oprawy stanowi równocześnie system radiacyjny. Jednocześnie korpus bez dodatkowych żeber radiacyjnych charakteryzuje się znacz-

nymi gabarytami i ciężarem, podnosząc całkowity koszt oprawy i skutkując potrzebą stosowania odpowiednio wytrzymałych słupów. W tabeli 3.1 zestawiono masę oraz podstawowe wymiary dla wybranych opraw czołowych producentów oświetlenia drogowego.

Tabela 3.1. Masa oraz podstawowe wymiary przykładowych opraw oświetlenia drogowego [97, 105, 108]

Producent	Model	Znamionowa moc oprawy P_e [W]	Wymiary [mm]	Masa [kg]
Schreder	Teceo	27	607 x 318 x 113	9,6
		55	607 x 318 x 113	9,6
		86	788 x 439 x 119	17,5
Lug	Urbino	28	550 x 250 x 100	6,8
		55	550 x 250 x 100	6,8
		81	550 x 250 x 100	6,8
Philips	Unistreet	25	630 x 270 x 98	6,1
		51	630 x 270 x 98	6,3
		83	755 x 355 x 98	8,6

Inne spotykane rozwiązania konstrukcyjne układów odprowadzania ciepła w oprawach oświetlenia drogowego przedstawiono na rys. 3.6.

a)



b)



Rys. 3.6. Oprawy oświetlenia drogowego z różnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi układu radiacyjnego: a) z zewnętrznymi żebrami radiacyjnymi [122], b) z układem radiacyjnym wewnątrz korpusu [88]

W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 3.6a obudowa oprawy jest wyposażona w dodatkowe żebra radiacyjne, zainstalowane na zewnątrz korpusu, bezpośrednio nad źródłami LED. Rozwiązanie takie umożliwi zwiększenie powierzchni radiacyjnej oprawy, przy jednoczesnym zmniejszeniu całkowitej masy oprawy (rys. 3.6). W oświetleniu drogowym, gdzie otoczenie oprawy charakteryzuje się dużym stopniem zanieczyszczenia, wymieniona powyżej konstrukcja posiada znaczne ograniczenia związane z osiadaniem zabrudzeń w przestrzeni pomiędzy żebrami. Prowadzi to do znacznego pogorszenia warunków konwekcyjnej

wymiany ciepła pomiędzy radiatorem a otoczeniem, wpływając na termiczne warunki pracy półprzewodnikowych źródeł światła.

W innym przedstawionym rozwiązaniu (rys. 3.6b) źródła LED zostały wyposażone w niezależny układ radiacyjny odseparowany od korpusu oprawy [88]. Wewnętrzny radiator z żebrami poprzez kondukcję odbiera ciepło ze złącza źródeł LED. Jednocześnie ma utrudnioną możliwość konwekcyjnej wymiany ciepła z otoczeniem, co wynika z odseparowania go od środowiska zewnętrznego przez zamknięty korpus.

Na podstawie przeglądu dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych związanych z odprowadzaniem ciepła w oprawach oświetlenia drogowego można jednoznacznie stwierdzić, że większość stanowią rozwiązania, w których ciepło jest odprowadzane przez cały korpus oprawy. Aluminiowy korpus, stanowiący równocześnie układ radiacyjny oprawy, charakteryzuje się zazwyczaj opływowym kształtem, zapobiegającym osiadanemu na stałe zabrudzeń mogących utrudnić konwekcję naturalną. Wymieniona konstrukcja charakteryzuje się zazwyczaj znacznymi gabarytami oraz dużą masą. W innych przedstawionych rozwiązaniach występowały dodatkowe problemy związane z wymianą ciepła poprzez konwekcję naturalną.

Autor niniejszej pracy, na podstawie przeglądu dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych dotyczących układów chłodzenia w oprawach oświetlenia drogowego, stwierdza, że możliwe są działania modelowe, a następnie konstrukcyjne, poprawiające efektywność dotychczas stosowanych układów chłodzenia. Zastosowanie nowego rozwiązania opartego na otwartej konstrukcji systemu chłodzenia będzie umożliwiać swobodny przepływ powietrza wokół powierzchni radiatora, przyczyniając się do efektywniejszego odprowadzania ciepła z radiatora i ze złącza źródeł LED. Rozwiązanie to umożliwi zredukowanie całkowitej masy systemu chłodzenia i oprawy oświetleniowej, przy jednoczesnym zapewnieniu efektywnego odprowadzania ciepła, przekładając się tym samym na ograniczenie wpływu temperatury złącza T_j źródeł LED na podstawowe parametry świetlne.

4. Metody modelowania termicznego

Tematyka modelowania i obliczeń cieplnych obejmuje szeroki zakres problemów spotykanych w elektrotechnice. Zagadnienia termiczne dotyczące odprowadzania ciepła i ograniczenia temperatury wpływającej na parametry elektryczne są rozpatrywane od dawna, m.in. w maszynach elektrycznych, takich jak transformatory czy silniki. Do opisu zjawisk cieplnych tworzone są modele termiczne, które z odpowiednim przybliżeniem umożliwiają ocenę temperaturowych warunków pracy [1, 43, 48, 50].

Problemy cieplne dotyczą również układów elektronicznych, w których temperatura wpływa na wyjściowe parametry. Rozwój technologii tranzystorów i układów scalonych ewoluował w kierunku coraz większych mocy i miniaturyzacji wielkości układów. Przełożyło się to na problemy temperaturowe, do których opisu są wykorzystywane modele umożliwiające wyznaczenie maksymalnej temperatury i oceny jej wpływu na pracę układu [60, 74].

Gwałtowny rozwój półprzewodnikowych źródeł światła, ich duża moc oraz mała powierzchnia chipu sprawiły, że problemy termiczne, analizowane dotychczas w innych dziedzinach elektrotechniki, stały się aktualne również w technice świetlnej. Temperatura złącza T_j , odgrywająca kluczową rolę w wydajności źródeł i wpływająca na parametry świetlne (rozdz. 2.), powinna być analizowana na etapie projektowania. Do jej wyznaczania zaczęto dostosowywać modele termiczne wykorzystywane dotychczas w innych obszarach. Modele te aplikowane do źródeł LED nie zawsze uwzględniają wszystkie procesy termiczne i składowe czynniki wpływające na temperaturę złącza źródeł LED, przez co charakteryzują się małą dokładnością wyników.

Ze względu na przyjęte liczne uproszczenia, wymienione modele mogą być stosowane jedynie do przybliżonej oceny temperaturowych warunków pracy źródeł LED. Uproszczenia te są związane m.in. z możliwością analizy prostej geometrii źródeł i systemów radiacyjnych, z jednowymiarowym przepływem ciepła lub brakiem uwzględnienia w obliczeniach niektórych procesów termicznych, np. promieniowania cieplnego, co może prowadzić finalnie do znacznych błędów obliczeniowych [73].

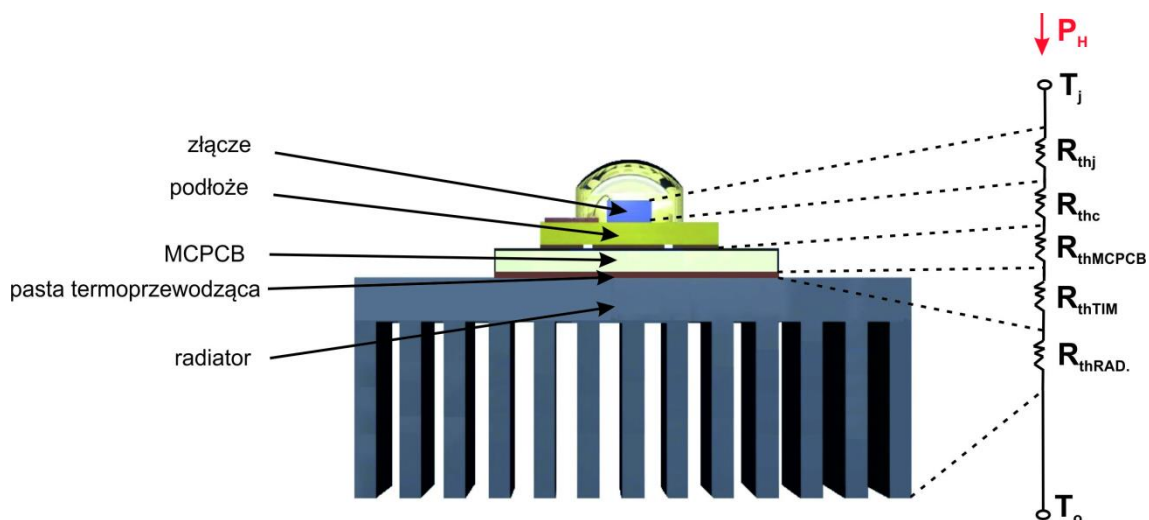
Dostępny w literaturze model termiczny dla pojedynczego źródła LED jest zbudowany z rezystancji termicznych R_{th} głównych elementów, wchodzących w skład całego systemu

z półprzewodnikowym źródłem światła [35, 45]. Całkowita rezystancja cieplna $Rth_{calc.}$ jest sumą poszczególnych rezystancji składowych, zgodnie z równaniem:

$$Rth_{calc.} = Rth_j + Rth_c + Rth_{MCPCB} + Rth_{TIM} + Rth_{RAD} \quad (4.1)$$

gdzie: $Rth_{calc.}$ – całkowita rezystancja termiczna obwodu termicznego, Rth_j – rezystancja termiczna złącza półprzewodnikowego, Rth_c – rezystancja termiczna podłoża, Rth_{MCPCB} – rezystancja termiczna obwodu drukowanego MCPCB, Rth_{TIM} – rezystancja termiczna pasty termoprzewodzącej, Rth_{RAD} – rezystancja termiczna radiatora.

Schemat obrazujący wymienione składowe rezystancje termiczne przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Składowe elementy obwodu termicznego z półprzewodnikowym źródłem światła

Rezystancja termiczna złącza Rth_j oraz rezystancja termiczna podłoża Rth_c jest określana w sposób uproszczony, gdzie jest przyjmowana jednowymiarowa oporność termiczna dla przewodzenia w płaskiej ścianie. Postać obu równań przedstawiono poniżej:

$$Rth_j = \frac{g_j}{k_j \cdot A_j} \quad (4.2)$$

$$Rth_c = \frac{g_c}{k_c \cdot A_c} \quad (4.3)$$

gdzie: $g_{j,c}$ – grubość, $k_{j,c}$ – współczynnik przewodzenia ciepła, $A_{j,c}$ – pole powierzchni dla odpowiedniej warstwy.

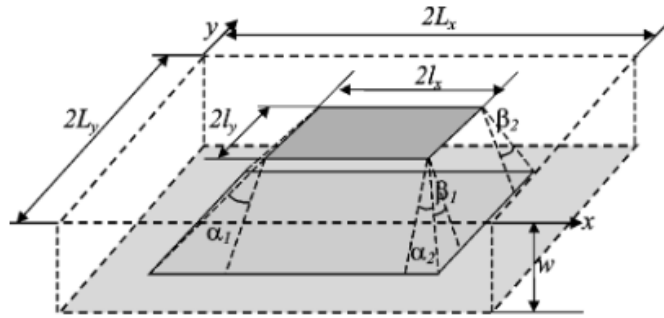
Wartość rezystancji termicznych Rth_j oraz Rth_c jest zazwyczaj wyznaczana dla jednej warstwy materiału dominującego w analizowanej strukturze. Brak dokładnych danych odnośnie budowy źródeł powoduje, że do obliczeń jest przyjmowana ogólna budowa dostępna

w literaturze, nieodzwierciedlająca struktury źródła. Badania przeprowadzone na stanowisku z mikroskopem skaningowym wykazały złożoność struktury źródeł LED (rozdz. 6.), dla której wartość rezystancji termicznej powinna być rozpatrywana w układzie wielowarstwowym.

Obwód drukowany MCPCB zbudowany jest zazwyczaj z trzech warstw materiałowych (aluminium, dielektryk oraz miedź). Opór cieplny $R_{thMCPCB}$ wyznacza się dla wszystkich warstw razem, z uwzględnieniem zjawiska rozpraszania ciepła. Dodatkowo, rezystancja termiczna materiału termoprzewodzącego R_{thTIM} powinna być uwzględniona razem z obwodem drukowanym, tworząc czterowarstwową strukturę [45].

Wśród dostępnych pozycji literaturowych dotyczących rozprzestrzeniania się ciepła, dla układu wielowarstwowego nie ma wielu dostępnych rozwiązań. Rozwiązanie analityczne dla struktury czterowarstwowej wyprowadził Palisoc [52, 53], jednak rozwiązanie to jest bardzo złożone, wymagające dużej ilości obliczeń. Dodatkowo, problem jest analizowany dla nieskończonej płyty, a rozwiązanie nie uwzględnia efektu skończonego rozmiaru podłoża.

Do wyznaczenia rezystancji termicznej R_{th} w układzie czterowarstwowym, zastosowane może być rozwiązanie analityczne Masana [41, 42], które nie jest ograniczone liczbą warstw. Związane jest jednak z uproszczeniami dotyczącymi pominięcia współczynnika przenikania ciepła h oraz sprzężeń termicznych pomiędzy wewnętrznymi warstwami. Ogólna postać rozwiązania jest następująca:



Rys. 4.2. Schemat rozwiązania Masana [41]

$$R_{th} = \frac{1}{4kl_x} \frac{1}{(\gamma_e \tan \alpha - \tan \beta)} \ln \frac{l_x + w \tan \alpha}{l_x + w \tan \beta / \gamma_e} \quad (4.4)$$

$$(\tan \alpha)_i = \frac{(\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2)_i}{2} = \left(1 + \frac{1 - \rho_L}{1 + \rho_L} \frac{l_{xn}}{\varepsilon_x^2}\right) \frac{w_n + \left[\frac{\rho_s}{1 + \rho_s}\right] l_{xn}}{w_n + \left[\frac{1}{1 + \rho_s}\right] l_{xn}} \Big|_i \quad (4.5)$$

$$(\tan \beta)_i = \frac{(\tan \beta_1 + \tan \beta_2)_i}{2} = \left(1 + \frac{1 - \rho_L}{1 + \rho_L} \frac{l_{xn}}{\varepsilon_y^2} \frac{\gamma_e}{\gamma_s}\right) \frac{w_n + \left[\frac{\rho_s}{1 + \rho_s}\right] l_{xn} \gamma_e}{w_n + \left[\frac{1}{1 + \rho_s}\right] l_{xn} \gamma_e} \Big|_i \quad (4.6)$$

$$\rho_s = \frac{k_i}{k_{i+1}}; \quad \rho_L = \frac{k_i}{k_L} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sqrt{L_{x1}L_{x2}}}{L_x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\sqrt{L_{y1}L_{y2}}}{L_y} \quad (4.8)$$

gdzie: $\gamma_e = \frac{l_y}{l_x}$, $\gamma_s = \frac{L_y}{L_x}$, $l_{xn} = \frac{l_x}{L_x}$, $w_n = \frac{w}{L_x}$, k_i i k_{i+1} - współczynnik przewodzenia ciepła obecnej i następnej warstwy, k_L - współczynnik przewodzenia ciepła ostatniej warstwy analizowanego układu.

Rezystancja termiczna radiatora R_{thRAD} wyznaczana jest na podstawie:

$$R_{thRAD.} = \frac{1}{\delta_0 h A_{RAD.}} \quad (4.9)$$

$$\delta_0 = 1 - \left(\frac{n A_z}{A_{PR}}\right)(1 - \delta_z) \quad (4.10)$$

$$A_{RAD.} = n A_z + A_{PR.} \quad (4.11)$$

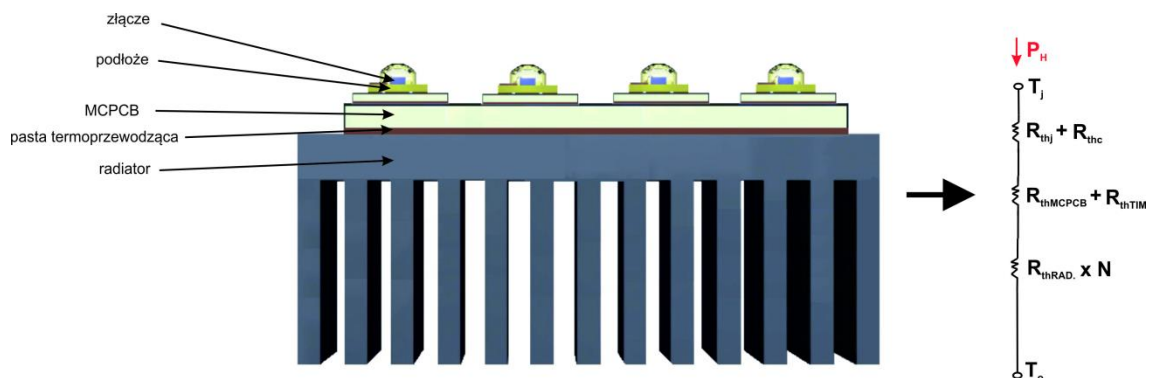
$$\delta_z = \tanh(m W_c) / m W_c \quad (4.12)$$

$$W_c = W_z + g_z / 2 \quad (4.13)$$

$$m = \left(\frac{2h}{k g_z}\right)^{1/2} \quad (4.14)$$

gdzie: h - współczynnik przenikania ciepła dla radiatora (opisany w pkt 3.2.1), A_{RA} - powierzchnia radiatora, A_z - powierzchnia pojedynczego żebra radiatora, A_{PR} - powierzchnia podstawy radiatora, n - liczba żeber, W_z - wysokość żebra, g_z - grubość żebra (rys. 3.2).

Literaturowy model temperaturowy wieloźródłowego panelu LED, uwzględniający sprzężenia termiczne pomiędzy źródłami [58] został przedstawiony na rys. 4.3.

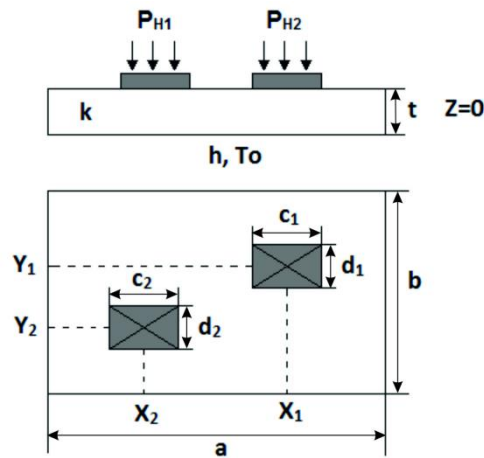


Rys. 4.3. Składowe elementy obwodu termicznego z wieloma półprzewodnikowymi źródłami światła

Na wspólnym podłożu obwodu drukowanego MCPCB oraz wspólnym radiatorze jest zainstalowanych N źródeł LED, o jednakowej mocy cieplnej każdego źródła wynoszącej P_H . Opór cieplny całego systemu jest wyznaczany na podstawie:

$$Rth_{całk.} = Rth_j + Rth_c + Rth_{MCPCB} + Rth_{TIM} + N \cdot Rth_{RAD} \quad (4.15)$$

gdzie: Rth_j oraz Rth_c wyznacza się za pomocą równania (4.1), a Rth_{MCPCB} i Rth_{TIM} na podstawie równania (4.4). Największą trudność stanowi wyznaczenie rezystancji termicznej radiatora $N \cdot Rth_{RAD}$, gdzie należy uwzględnić opór cieplny związany z rozmieszczeniem źródeł LED. Do jej określenia jest stosowane rozwiązanie Muzychka [46, 58]:



Rys. 4.4. Schemat rozwiązania Muzychka dla płyty z dwoma źródłami ciepła [46, 58]

Rozkład temperatury na powierzchni radiatora jest uzyskiwany z wykorzystaniem metody superpozycji. Dla N zainstalowanych źródeł ciepła rozkład temperatury na powierzchni przedstawiają zależności:

$$T(x, y, 0) - T_o = \sum_{i=1}^N \theta_i(x, y, 0) \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \theta_i(x, y, 0) = & A_0^i + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^i \cos(\lambda x) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^i \cos(\delta y) + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn}^i \sum_{m=1}^{\infty} A_m^i \cos(\lambda x) \cos(\delta y) \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$A_m^i = \frac{2P_{Hi} [\sin(\frac{(2x_i+c_i)}{2}\lambda_m) - \sin(\frac{(2x_i-c_i)}{2}\lambda_m)]}{abc_i k \lambda_m^2 \varphi(\lambda_m)} \quad (4.18)$$

$$A_n^i = \frac{2P_{Hi} [\sin(\frac{(2y_i+d_i)}{2}\delta_n) - \sin(\frac{(2y_i-d_i)}{2}\delta_n)]}{abd_i k \delta_n^2 \varphi(\delta_n)} \quad (4.19)$$

$$A_{mn}^i = \frac{16Q_i \cos(\lambda_m x_i) \sin(\frac{1}{2}\lambda_n c_i) \cos(\delta_n y_i) \sin(\frac{1}{2}\delta_n d_i)}{abc_i d_i k \beta_{mn} \lambda_m \delta_n \varphi(\beta_{mn})} \quad (4.20)$$

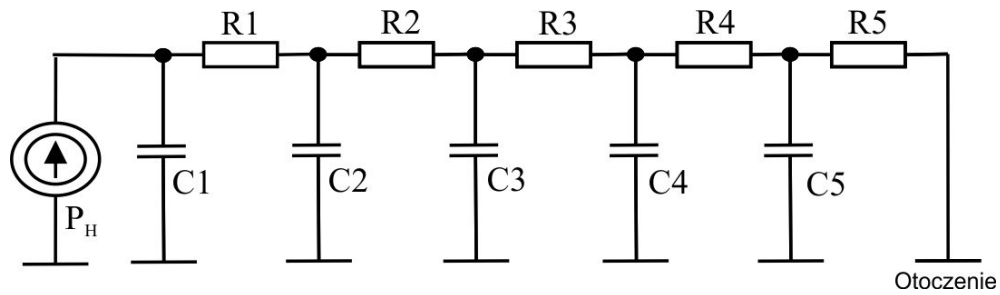
gdzie: $\lambda = \frac{m\pi}{a}$, $\delta = \frac{n\pi}{b}$, $\beta = \sqrt{\lambda^2 + \delta^2}$, $\varphi(\omega) = \frac{\omega \sinh(\omega t) + \frac{h}{k} \cosh(\omega t)}{\omega \cosh(\omega t) + \frac{h}{k} \sinh(\omega t)}$ i ω jest zastępowana odpowiednio przez λ , δ i β .

Ponieważ głównym celem analizy jest oszacowanie maksymalnej temperatury złącza T_j , zazwyczaj lokalizacja x, y jest umieszczona w centrum środkowego źródła na radiatorze, a maksymalna wartość $N \cdot Rth_{RAD}$ wyznaczana na podstawie wzoru:

$$N \cdot Rth_{RAD} = \frac{T(x,y,0)}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (4.21)$$

Przedstawione rozwiązania analityczne stanowią uogólniony opis procesów cieplnych i mogą być wykorzystane w technice świetlnej jedynie do niezłożonej analizy temperaturowej źródeł LED. Modele termiczne oparte na danych rozwiązaniach zawierają znaczące uproszczenia, ograniczające możliwość ich stosowania w złożonych strukturach. Do obliczeń temperaturowych jako główny mechanizm przepływu ciepła jest przyjmowana kondukcja. W obliczeniach nie jest uwzględnione promieniowanie cieplne, którego pominięcie dla opraw oświetleniowych może prowadzić do istotnych błędów obliczeniowych [73]. Możliwość definiowania prostej geometrii źródeł ciepła (zazwyczaj prostokąt lub koło) czy układu radiacyjnego stanowi kolejne poważne ograniczenie związane z zastosowaniem rozpatrywanych modeli do obliczeń termicznych. W związku z tym należy stwierdzić, że stosowanie wymienionych modeli ogranicza się do przybliżonej oceny warunków temperaturowych w nieskomplikowanych układach, charakteryzujących się prostą geometrią i podstawowymi mechanizmami wymiany ciepła.

Inną metodą wykorzystywaną w niezłożonych układach ze źródłami LED jest zastosowanie kompaktowego modelu termicznego (ang. *Compact Thermal Model*) [35, 67, 68]. Wymieniony model opiera się na podobieństwie matematycznym obwodu elektrycznego z obwodem termicznym i jest zbudowany z ograniczonej liczby rezystorów, stanowiących rezystancję termiczną Rth oraz kondensatorów stanowiących pojemność cieplną C_p . Elementy te są ze sobą łączone w strukturę drabinkową, tworząc sieć Fostera lub Cauera (rys. 4.5). Wartości elementów RC są wyznaczone na podstawie matematycznej analizy zarejestrowanych krzywych grzewczych [65], których procedura pomiarowa została opisana w międzynarodowych standardach pomiarowych JEDEC [82]. Określona w ten sposób struktura elementów RC tworzy kompaktowy model termiczny, umożliwiając wyznaczenie przejściowej temperatury złącza T_j , po zadaniu wymuszenia w postaci mocy grzewczej P_H . W przypadku analizy termicznej stanu ustalonego stosowany jest kompaktowy model termiczny 2R [35, 83].



Rys. 4.5. Sieć RC Cauera [67]

Wymienione modele termiczne mogą być sprzężone ze standardowymi symulatorami SPICE, z uwzględnieniem dodatkowo zjawisk elektrycznych i optycznych [21,49]. Zastosowanie wymienionego modelu termicznego dotyczy głównie prostych, małogabarytowych układów, zawierających w swojej strukturze zazwyczaj jedno lub kilka źródeł światła. W przypadku wieloźródłowych opraw oświetleniowych o złożonej geometrii model ten nie znajduje zastosowania, jednak może być wykorzystany w zaawansowanych metodach numerycznych do odtworzenia struktury półprzewodnikowego źródła światła [35].

Na podstawie przeglądu literaturowego opisane metody modelowania termicznego źródeł LED stanowią uproszczone sposoby analizy termicznej półprzewodnikowych źródeł światła. Metody te odnoszą się głównie do nieskomplikowanych układów o prostej strukturze. W przypadku paneli czy opraw oświetleniowych do wiarygodnej analizy termicznej uwzględniającej wszystkie czynniki wpływające na wartość temperatury złącza T_j jest wymagany model termiczny umożliwiający definiowanie złożonej geometrii struktury materiałowej złącza półprzewodnikowego, obwodów drukowanych i systemu radiacyjnego. Model ten powinien uwzględniać wszystkie mechanizmy transportu ciepła.

5. Sformułowanie problemu naukowego, przyjęcie tezy i celu rozprawy

5.1. Problem naukowy

Problem naukowy obejmuje związane ze sobą dwa zagadnienia: badania wpływu czynników konstrukcyjnych i środowiskowych na temperaturowe warunki pracy źródeł panelu LED oraz skalę oddziaływania temperatury złącza na wybrane parametry świetlne.

5.2. Teza pracy

Możliwe są działania w obszarze modelowania i konstrukcji panelu ze źródłami LED, zmierzające do uzyskania jak najniższej temperatury złącza, przy ograniczonej masie panelu, a tym samym wpływające na poprawę parametrów świetlnych.

5.3. Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie szczegółowego modelu termicznego panelu LED, dokonanie na jego podstawie analizy wpływu czynników konstrukcyjnych i warunków środowiskowych na temperaturę złącza źródeł panelu oraz ocena jej wpływu na wybrane parametry świetlne.

6. Modelowanie termiczne źródeł LED

Wyznaczenie rozkładu temperatury panelu LED i określenie temperatury złącza T_j poszczególnych źródeł wiąże się z uwzględnieniem wielu czynników wpływających na jej wartość. Pierwszym i zarazem głównym elementem decydującym o dokładności wyników jest struktura półprzewodnikowego źródła światła. Kolejnymi elementami modelu termicznego jest podłoże MCPCB oraz system radiacyjny. Czynniki decydującymi o dokładności uzyskanych wyników jest poprawne zdefiniowanie mocy cieplnej P_H badanego źródła LED oraz określenie warunków środowiskowych. Uwzględnienie tych elementów daje możliwość pełnej analizy zjawiska odprowadzania ciepła na drodze złącze–otoczenie środowiskowe. Przeprowadzone badania symulacyjne na podstawie wyznaczonego modelu termicznego będą prowadzić do konstrukcji panelu umożliwiającego uzyskanie jak najmniejszej temperatury złącza T_j zainstalowanych źródeł, wpływając tym samym na poprawę wartości parametrów świetlnych panelu.

Przedstawione w rozdz. 4. temperaturowe modele półprzewodnikowych źródeł światła stanowią uproszczoną metodę oceny termicznych warunków pracy źródeł. Modele te charakteryzują się licznymi uproszczeniami i ograniczeniami, związanymi m.in. z prostą geometrią źródeł czy niezłożoną strukturą badanego układu. W przypadku analizy termicznej z wieloma źródłami LED, gdzie pożądanym jest trójwymiarowy rozkład temperatury na całej powierzchni badanego panelu czy oprawy oświetleniowej, mogą zastosowane być zaawansowane narzędzia obliczeniowe, oparte m.in. na metodzie elementów skończonych (ang. *Finite Element Method-FEM*) czy obliczeniowej mechanice płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics-CFD*).

Do zaawansowanych obliczeń inżynierskich związanych z temperaturowymi warunkami pracy półprzewodnikowych źródeł światła można zastosować narzędzia komputerowe opierające się na metodzie elementów skończonych [13, 29, 59]. Zastosowanie FEM pozwala na tworzenie zaawansowanych modeli termicznych, składających się z setek tysięcy elementów, dzięki czemu jest możliwe uzyskanie dokładnych wyników temperaturowych w wielu miejscach analizowanego układu [37, 59]. Głównym założeniem metody jest podział ciągłego modelu geometrycznego na podobszary, tzw. elementy skończone, które łączą się w węzłach, tworząc dyskretny model geometryczny. Umożliwia to tworzenie złożonych konstrukcji geometrycznych za pomocą prostych geometrycznie składowych elementów. W przypadku anali-

zy termicznej temperatura jako parametr jest definiowana w każdym węźle siatki obliczeniowej, a następnie aproksymowana za pomocą wielomianu, wyznaczonego na podstawie węzłowych wartości temperatury, z uwzględnieniem zachowania ciągłości na granicy elementów. Aby wyznaczone wartości temperatury odpowiadały w jak największym stopniu wartościom rzeczywistym, realizowana jest minimalizacja funkcjonału, odpowiadająca różniczkowemu równaniu przewodzenia ciepła Fouriera [13]:

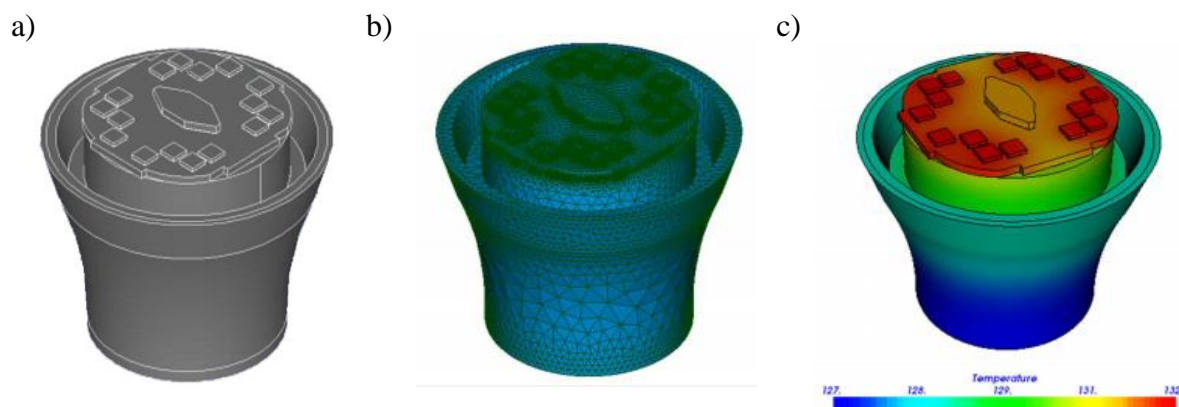
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(t) \frac{\partial t}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (6.1)$$

gdzie: $k_x(t)$, $k_y(t)$, $k_z(t)$ - anizotropowe współczynniki przewodzenia ciepła w zależności od temperatury t , Q - strumień przepływu ciepła.

Obecne aplikacje obliczeniowe oparte na metodzie elementów skończonych zazwyczaj składają się z trzech współpracujących ze sobą modułów [13]:

- preprocesora służącego m.in. do przygotowania lub importu modelu geometrycznego, podziału na dyskretne elementy skończone czy zdefiniowania warunków brzegowych,
- solvera służącego do budowy oraz rozwiązania układu równań w celu wyznaczenia poszukiwanych parametrów,
- postprocesora służącego do prezentacji oraz edycji uzyskanych wyników obliczeń.

Na rysunku 6.1 na przykładzie półprzewodnikowego zamiennika klasycznej żarówki przedstawiono etapy wyznaczania rozkładu temperatury z wykorzystaniem FEM.



Rys. 6.1. Analiza termiczna półprzewodnikowego zamiennika klasycznej żarówki: a) model geometryczny, b) siatka obliczeniowa, c) końcowy rozkład temperatury [37]

Aby uzyskane wyniki były obarczone jak najmniejszym błędem i odpowiadały wartościom rzeczywistym, bardzo ważne jest, aby tworząc model komputerowy szczegółowo odwzorować geometrię obiektu rzeczywistego. Następnie należy sparametryzować materiały

wchodzące w skład modelu, określając m.in. współczynnik przewodzenia ciepła k . W półprzewodnikowych źródłach światła istotne jest dokładne określenie mocy cieplnej P_H poszczególnych źródeł LED wchodzących w skład panelu (pkt 2.3). Kolejny krok stanowi określenie warunków brzegowych i występujących mechanizmów przepływu ciepła. Finalnie jest tworzony model dyskretny przez podział modelu geometrycznego na mniejsze podobszary tworzące siatkę obliczeniową. Zaawansowane aplikacje posiadają wbudowane narzędzia do optymalizacji siatki obliczeniowej, zapewniające jej dokładne dopasowanie do geometrii modelu, co zapewnia uzyskanie wyników z jak najmniejszym błędem obliczeniowym.

W przypadku narzędzi opartych na metodzie elementów skończonych, podstawowym analizowanym mechanizmem transferu ciepła jest przewodzenie. Jeżeli w obliczeniach uwzględnione ma być również zjawisko konwekcyjnej wymiany ciepła, wówczas należy indywidualnie określić współczynnik przenikania ciepła h . Dla prostej geometrii obiektu i konwekcji naturalnej wartość powyższego współczynnika zawiera się w przedziale 5–15 W/m²·K. W przypadku złożonych geometrii i konwekcji wymuszonej wyznaczenie współczynnika h niezbędnego do wiarygodnych wyników symulacji stanowi istotną trudność. Do wyznaczenia rozkładu temperatury oprawy oświetleniowej ze źródłami LED może być wówczas zastosowane oprogramowanie opierające się na obliczeniowej mechanice płynów, które w obliczeniach uwzględnia wszystkie trzy rodzaje transportu ciepła: przewodzenie, konwekcję oraz promieniowanie [2, 5, 56, 57, 73, 93].

Użycie CFD umożliwia uwzględnienie złożonych mechanizmów wymiany ciepła, m.in. konwekcji wymuszonej czy radiacji, która w przypadku opraw o znacznej powierzchni radiatora nie powinna być pominięta [73]. Obliczeniowa mechanika płynów opiera się na rozwiązaniu równania Naviera-Stokesa, które są sformułowaniami praw zachowania masy, pędu i energii dla przepływów płynu [93]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\rho u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i U_i + Q_H \quad (6.4)$$

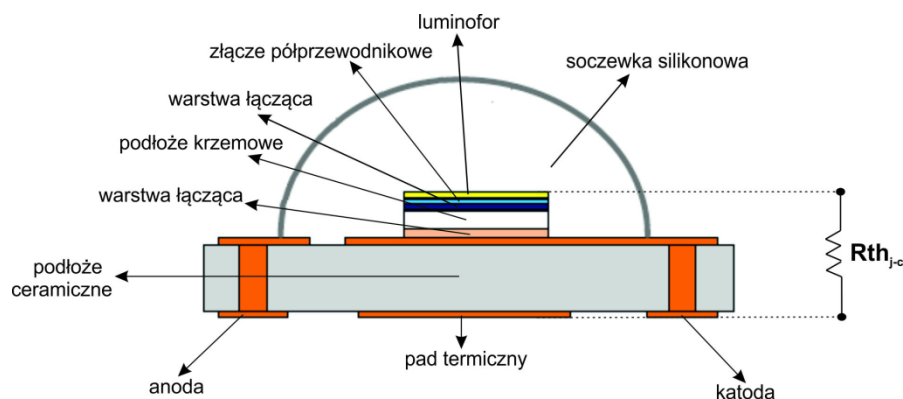
$$H = h_e + \frac{u^2}{2} \quad (6.5)$$

gdzie: u - prędkość płynu, ρ - gęstość płynu, S_i - rozłożona masowo siła zewnętrzna związana z odpornością na porowate media, h_e - entalpia termiczna, Q_H - źródło ciepła, τ_{ik} - lepkościowy tensor naprężeń stycznych, q_i - dyfuzyjny strumień ciepła.

Analiza termiczna oprawy ze źródłami LED, podobnie jak w przypadku metody elementów skończonych, jest związana ze szczegółowym modelem geometrycznym oprawy, szczegółowym określeniem wymaganych wartości parametrów materiałowych, definicją warunków brzegowych oraz wyznaczeniem siatki obliczeniowej na podstawie dyskretyzacji modelu geometrycznego. Większość oprogramowania opartego na CFD do tworzenia siatki obliczeniowej wykorzystuje metodę objętości skończonych.

Warunkiem wiarygodnej analizy termicznej, a zatem wyznaczenia temperatury złącza T_j poszczególnych źródeł LED, jest skonstruowanie poprawnego modelu termicznego półprzewodnikowych źródeł światła. Istotą wiarygodnej analizy termicznej panelu ze źródłami LED opierającej się na metodzie FEM czy CFD jest dobra znajomość struktury materiałowej półprzewodnikowego źródła światła. Ponadto, modelowanie musi także uwzględniać dokładne odwzorowanie geometrii wszystkich warstw materiałowych wchodzących w skład źródła LED, jak również poprawnie zdefiniowane ich parametry fizyczne i cieplne. Metoda modelowania termicznego półprzewodnikowych źródeł światła obarczona jest jednak znaczną trudnością związaną z dokładnym odtworzeniem struktury materiałowej i sparametryzowaniem złącza półprzewodnikowego, co wiąże się z tajemnicą technologiczną, czyli z trudnością uzyskania danych dotyczących budowy źródła LED.

Rysunek 6.2 przedstawia typową budowę półprzewodnikowego źródła światła dużej mocy, które na podstawie konwersji światła niebieskiego z zastosowaniem luminoforu emituje światło białe [69].

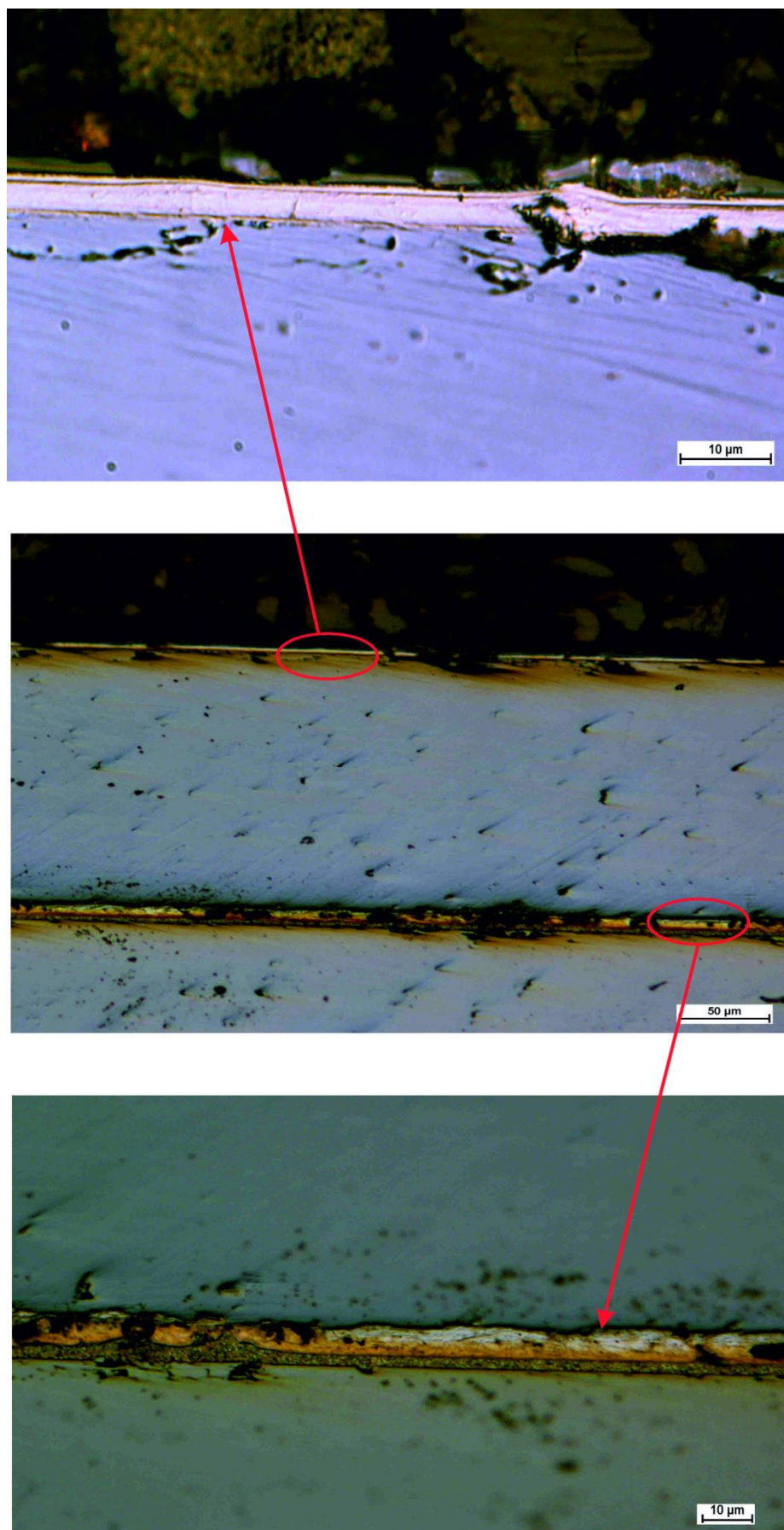


Rys. 6.2. Typowa konstrukcja źródła LED wysokiej mocy

Górną warstwę chipu stanowi złącze półprzewodnikowe. W przypadku źródeł LED emitujących światło białe najczęściej jest to azotek galu GaN, emitujący światło o barwie niebieskiej. Złącze półprzewodnikowe jest pokryte warstwą żółtego luminoforu, umożliwiającą konwersję światła niebieskiego na światło białe. Złącze półprzewodnikowe jest osadzone na substracie, który najczęściej stanowi krzem Si lub węgiel krzemu SiC. Pomiędzy warstwą złącza półprzewodnikowego a podłożem krzemowym znajduje się pośrednia eutektyczna warstwa łącząca. Substrat krzemowy jest połączony z podłożem rozpraszającym ciepło, przez warstwę łączącą w postaci lutowia (najczęściej cyna Sn z dodatkiem innych pierwiastków). Główne podłoże rozpraszające ciepło, na którym jest osadzony chip, składa się zazwyczaj z trzech warstw, odpowiednio z warstwy miedzi Cu, warstwy dielektryka oraz warstwy aluminium Al lub warstwy miedzi Cu.

W literaturze brakuje szczegółowych danych fizycznych tych wielkości, w związku z tym przeprowadzono badania morfologiczno-fizyczne struktury LED. Przedstawiony na rys. 6.3 przekrój poprzeczny chipu źródła LED wykonano na stanowisku badawczym z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego.

Wyznaczone cechy morfologiczno-fizyczne potwierdziły złożoność oraz trudną do dokładnego odtworzenia strukturę półprzewodnikowych źródeł światła. Grubość warstwy złącza półprzewodnikowego jest rzędu kilkunastu mikrometrów. Podobną grubością charakteryzuje się warstwa łącząca złącze z substratem. Największy udział powierzchniowy chipu stanowi warstwa podłoża, najczęściej w postaci krzemu Si, którego grubość jest rzędu kilkuset mikrometrów.



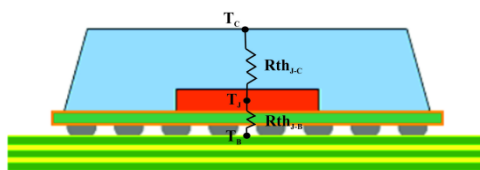
Rys. 6.3. Obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego przedstawiający przekrój poprzeczny chipu

Dostępne w literaturze przedmiotu symulacje termiczne, opierają się na ogólnie przyjętej budowie półprzewodnikowych źródeł światła, nie zawsze odzwierciedlających właściwą budowę źródeł LED [14, 30, 37, 72, 73, 78]. Brak rzetelnych informacji odnośnie struktury materiałowej źródeł LED, warstwy o grubości rzędu kilkunastu mikrometrów czy różnica w budowie pomiędzy źródłami różnych producentów sprawiają, że szczegółowe odtworzenie geometrii i parametrów poszczególnych warstw stanowi dużą trudność.

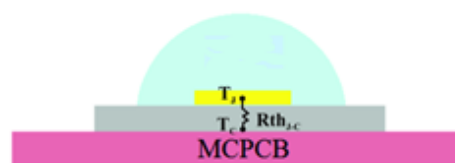
W związku z wymienionymi trudnościami w odtworzeniu struktury źródła LED, do szczegółowych badań termicznych zostanie wykorzystany model temperaturowy, opierający się na wartości rezystancji termicznej pomiędzy złączem a obudową $R_{th_{j-c}}$ (rys. 6.2) [4, 35, 67, 68, 82]. Do analizy zostanie uwzględniona rzeczywista wartość rezystancji $R_{th_{j-c}}$ badanego źródła LED, która najczęściej niejednoznacznie i bez podstawowych informacji jest definiowana w kartach katalogowych [90, 98, 103, 106].

Wybrany model termiczny został zdefiniowany i przedstawiony w międzynarodowym standardzie JEDEC JESD15-3 *Two-resistor compact thermal model guideline* [83]. Może być on implementowany i stosowany w trójwymiarowych narzędziach symulacyjnych, m.in. CFD. Standardowo w modelu tym, podczas wyznaczania temperatury złącza T_j są uwzględniane dwie rezystancje termiczne – $R_{th_{j-c}}$ oraz $R_{th_{j-b}}$ (*junction to case* oraz *junction to board*), występujące w typowych układach elektronicznych dużej mocy. W przypadku półprzewodnikowych źródeł światła w modelu termicznym uwzględnia się tylko jedną rezystancję $R_{th_{j-c}}$, charakteryzującą źródła LED (rys. 6.4). W przypadku źródeł LED rezystancja ta jest niejednoznacznie definiowana przez producentów. W zależności od producenta, może ona w pewnym stopniu różnić się nazwą i oznaczeniem (*junction to case*, *junction to solder pad*, *junction to metal board*). Często też w opisie brakuje podstawowych informacji, m.in. dla jakiej wartości prądu przewodzenia I_F oraz dla jakiego rodzaju mocy została wyznaczona [87, 96, 101, 104]. Wartość rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ podana bez powyższych informacji jest mało przydatna w realizacji modelu termicznego źródła LED.

a)



b)



Rys. 6.4. Charakterystyczne rezystancje termiczne: a) w typowych układach elektronicznych wysokiej mocy, b) w półprzewodnikowych źródłach światła

Autor niniejszej pracy do badań szczegółowych panelu oraz oprawy oświetleniowej z półprzewodnikowymi źródłami światła, w celu zdefiniowania wiarygodnego modelu termicznego źródeł LED, przeprowadził badania związane z wyznaczeniem rzeczywistej wewnętrznej rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ badanych źródeł światła [4, 67]. Wyznaczona wartość $R_{th_{j-c}}$ była podstawą modelu termicznego 2R [83], zaimplementowanego następnie w oprogramowaniu FloEFD 16.2 firmy Mentor Graphics [129], opartym na obliczeniowej mechanice płynów. Pozwoliło to na przeprowadzenie szczegółowych obliczeń temperaturowych dla złożonej geometrii oprawy oświetleniowej. Zastosowanie modelu termicznego źródła opartego na wyznaczonej rzeczywistej rezystancji $R_{th_{j-c}}$ oraz szczegółowe uwzględnienie czynników wpływających na rozkład temperatury panelu (podłoże MCPCB, układ radiacyjny, warunki środowiskowe) umożliwiło wyznaczenie temperatury złącza T_j poszczególnych źródeł światła.

7. Wewnętrzna rezystancja termiczna źródeł LED

Przeprowadzone badania związane z określeniem budowy źródeł LED potwierdziły złożoność struktury i trudność w szczegółowym odtworzeniu geometrii oraz cech materiałowych (rozd. 6.). W związku z tym do budowy modelu termicznego źródeł LED zostanie wykorzystana rzeczywista wartość rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$, która decyduje o ilości ciepła wyprowadzonego ze złącza półprzewodnikowego i wpływa na wartość temperatury złącza T_j .

Badania rezystancji $R_{th_{j-c}}$ przeprowadzono dla trzech wybranych półprzewodnikowych źródeł światła dużej mocy. Źródła te zostały oznaczone odpowiednio jako A, B i C, a ich podstawowe dane katalogowe przedstawiono w tab. 7.1.

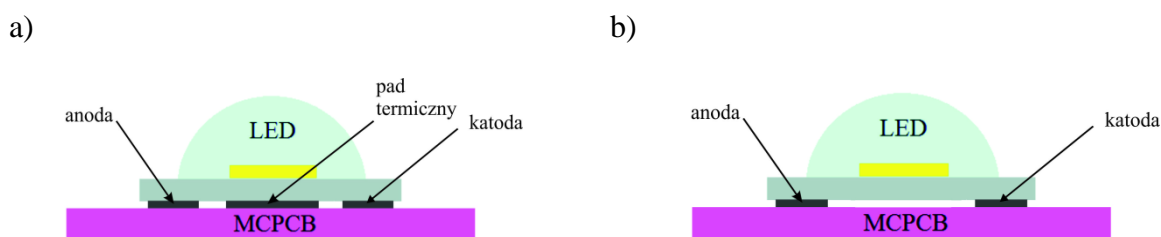
Tabela 7.1. Podstawowe dane katalogowe wybranych do badań półprzewodnikowych źródeł światła dużej mocy

Oznaczenie	LED A	LED B	LED C
Maksymalny prąd przewodzenia I_F [mA]	2000	1500	750
Typowe napięcie przewodzenia U_F [V] $I_F = 700$ mA	2,83 $T_j = 85^\circ\text{C}$	2,96 $T_j = 85^\circ\text{C}$	4,05 $T_s = 25^\circ\text{C}$
Maksymalna temperatura złącza T_j [$^\circ\text{C}$]	150	150	125
Strumień świetlny Φ [lm] $I_F = 700$ mA	317 $T_j = 85^\circ\text{C}$	258 $T_j = 85^\circ\text{C}$	150 $T_s = 25^\circ\text{C}$
Temperatura barwowa T_B [K]	5000	5300	5700
Współczynnik oddawania barw R_a	min. 70	min. 70	min. 70

Pomiary przeprowadzono opierając się na międzynarodowych standardach opracowywanych przez Komitet JEDEC JC-15 „Thermal Characterization Techniques for Semiconductor Packages”. Metoda pomiaru wewnętrznej rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ mająca zastosowanie również w przypadku półprzewodnikowych źródeł światła, została opisana m.in. w standardach JESD51-14 „Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-to-Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path” [81] oraz JESD51-51 „Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling” [82].

Metoda pomiarowa opisana w JESD51-14 zakłada dwukrotny pomiar przejściowej krzywej chłodzenia dla tego samego źródła LED, różniące się współczynnikiem przewodzenia ciepła k materiału termoprzewodzącego pomiędzy źródłem LED a radiatorem. Zastosowanie dwóch materiałów o różnych współczynnikach k umożliwi odczytanie miejsca „rozejścia się krzywych” chłodzenia, umożliwiając wyznaczenie rezystancji termicznej Rth_{j-c} .

Do badań przyjęto nieco inny sposób montażu źródeł LED, umożliwiający zarejestrowanie charakterystycznego punktu „rozejścia się” krzywych chłodzenia. Dwa analogiczne źródła LED zostały przylutowane do dwóch takich samych płytek obwodu drukowanego MCPCB [101] w dwojaki sposób – do pierwszej diody zostały przylutowane wszystkie pady (dwa elektryczne oraz jeden termiczny), do drugiej natomiast tylko pady elektryczne, bez pada termicznego (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Sposób montażu źródeł LED: a) z przylutowanymi wszystkimi padami, b) bez przylutowanego pada termicznego

Opisany sposób montażu umożliwia określenie punktu „rozejścia się” krzywych chłodzenia w miejscu zmiany drogi przepływu ciepła od złącza, przez podłoże MCPCB do otoczenia [67, 68].

Pomiary rezystancji termicznej Rth_{j-c} badanych źródeł LED wykonano za pomocą przejściowego testera termicznego T3Ster firmy Mentor Graphics [112], znajdującego się w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej. Stanowisko pomiarowe z T3Ster wraz z dedykowanym oprogramowaniem do analizy i przetwarzania danych pomiarowych stanowi profesjonalne narzędzie do badań termicznych układów elektronicznych, zgodnie z międzynarodowym standardem JEDEC JC-15. Widok panelu czołowego przejściowego testera termicznego T3Ster wraz ze stanowiskiem pomiarowym przedstawiono na rys. 7.2.

a)



b)

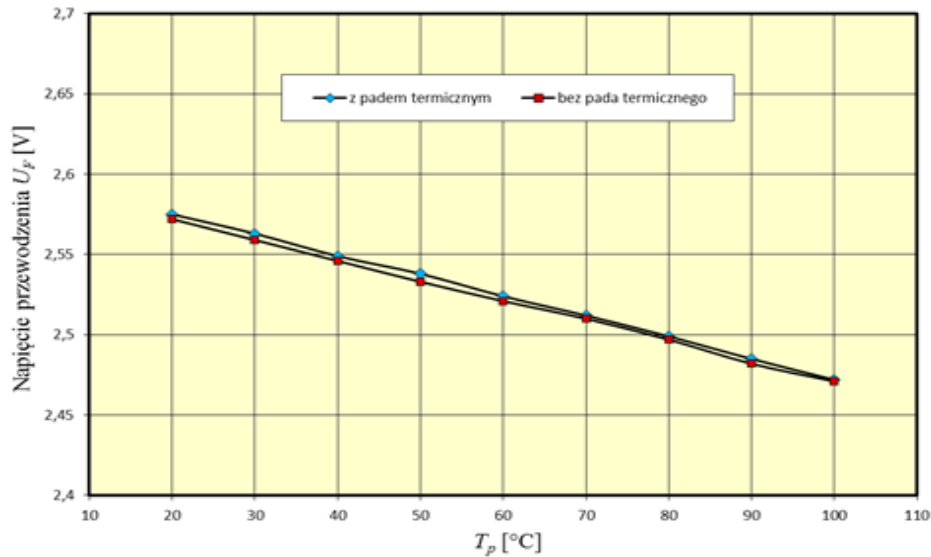


Rys. 7.2. Stanowisko pomiarowe: a) widok panelu czołowego przejściowego testera termicznego T3Ster firmy Mentor Graphics, b) stanowisko pomiarowe z T3Sterem w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej

Pomiary wewnętrznej rezystancji termicznej R_{thj-c} dla badanych źródeł LED przeprowadzono dla trzech prądów przewodzenia I_F : 350 mA, 700 mA oraz 1050 mA.

Zastosowana metoda pomiarowa wykorzystuje zależność zmiany napięcia przewodzenia diody U_F w funkcji temperatury złącza T_j . Pierwszym etapem pomiaru było wyznaczenie temperaturowego współczynnika napięcia źródła LED, stanowiącego dane kalibracyjne do wyznaczenia temperatury złącza T_j dla badanych wartości prądów I_F [81]. Pomiar został przeprowadzony zgodnie z zaleceniami, dla małej wartości prądu przewodzenia, tzw. prądu pomiarowego $I_F = I_M = 5$ mA, niepowodującego występowania zjawiska samonagrzewania źródła LED, dzięki czemu możliwe było założenie, że zadana temperatura na module Peltiera T_p była równa temperaturze złącza T_j . Badane źródła LED zostały zainstalowane na sterowanym temperaturowo module Peltiera, a po zasileniu prądem przewodzenia I_F temperatura modułu Peltiera zmieniana była w zakresie od 20 do 100°C, z krokiem 10°C. Wraz ze zmianą temperatury T_p , równocześnie był realizowany pomiar napięcia przewodzenia U_F , umożliwiający wyznaczenie temperaturowego współczynnika napięcia. Na rysunku 7.3 przedstawiono zmi-

ny napięcia przewodzenia U_F w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p dla źródła LED typu A, natomiast w tab. 7.2 - wyznaczony temperaturowy współczynnik napięcia dla wszystkich badanych źródeł.



Rys. 7.3. Napięcie przewodzenia U_F w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p - źródło LED typu A

Tabela 7.2. Wyznaczony temperaturowy współczynnik napięcia dla badanych źródeł LED

Oznaczenie		LED A	LED B	LED C
Temperaturowy współczynnik napięcia [mV/°C]	z padem termicznym	-1,29	-1,22	-1,34
	bez pada termicznego	-1,26	-1,20	-1,32

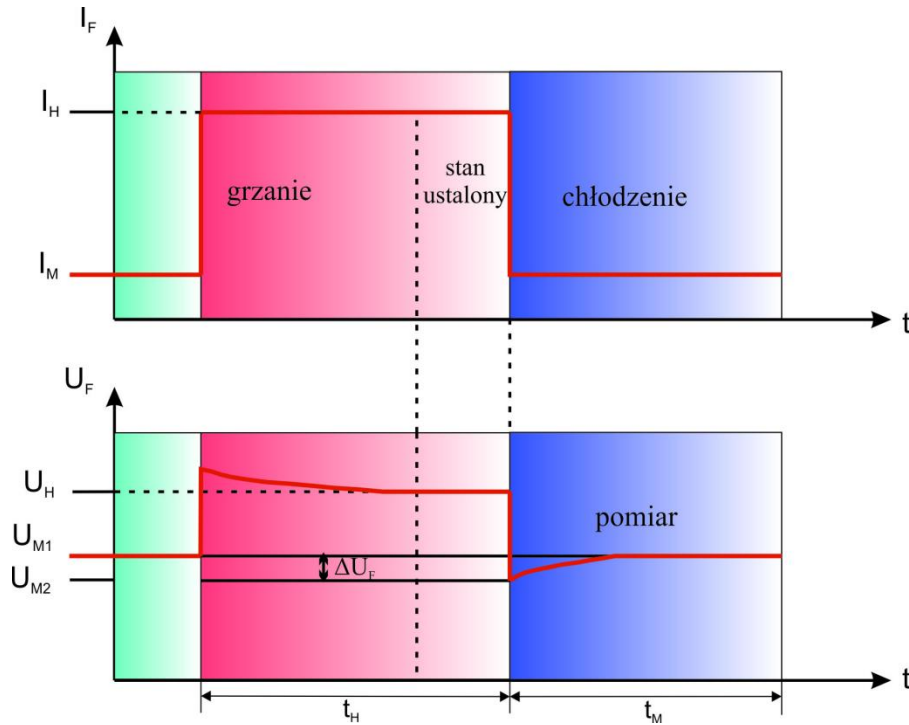
Kolejny etap wyznaczania rezystancji $R_{th_{j-c}}$ związany był z pomiarami w stanie grzania i chłodzenia badanych źródeł LED. Były one zasilane prądem grzewczym I_H , stanowiącym sumę badanego prądu przewodzenia I_F , dla którego wyznaczano rezystancję $R_{th_{j-c}}$, oraz prądu pomiarowego I_M , który służył do wyznaczenia danych kalibracyjnych, tzn. temperaturowego współczynnika napięcia [35, 81].

$$I_H = I_F + I_M \text{ [mA]} \quad (7.1)$$

gdzie: I_H – główny prąd grzewczy, I_F – badany prąd przewodzenia, I_M – prąd pomiarowy użyty do wyznaczenia danych kalibracyjnych.

Badane źródła LED zasilone zostały kolejno prądami grzewczymi I_H : 355; 705 oraz 1055 mA. Po osiągnięciu termicznego stanu stabilnego, gdy poziom ustalony osiągnęło napięcie przewodzenia U_H , odpowiadające prądowi grzewczemu I_H , następowało wyłączenie badanego prądu przewodzenia I_F , a źródło LED zostało zasilone tylko prądem pomiarowym

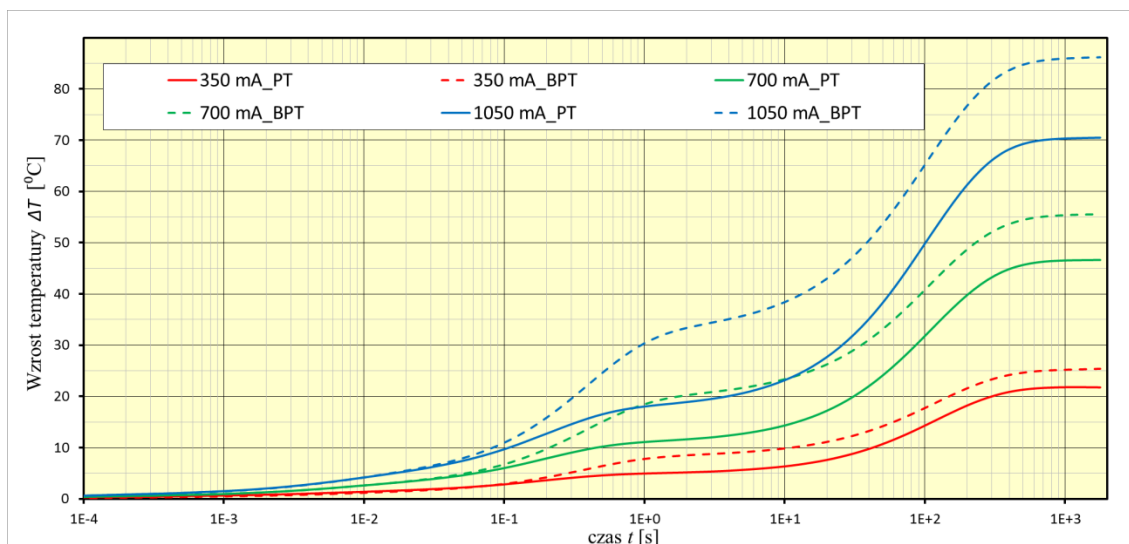
I_M , równocześnie przechodząc w stan chłodzenia. W stanie chłodzenia źródła LED, z danych kalibracyjnych była wyznaczana temperatura złącza T_j , aż do osiągnięcia stanu ustalonego, gdy napięcie przewodzenia U_{M2} osiągnęło wartość równą napięciu U_{M1} , sprzed stanu grzania źródła LED (rys. 7.4).



Rys. 7.4. Przebieg pomiarów termicznych badanych źródeł LED [79]

Wszystkie pomiary przeprowadzono przy chłodzeniu konwekcyjnym. Czas grzania oraz czas chłodzenia badanych źródeł LED wynosił ok. 30 min. Na rysunku 7.5 przedstawiono wyniki pomiarów krzywych grzewczych dla źródła LED typu A, wyznaczone przez odjęcie wartości temperatury zmierzonej w czasie chłodzenia od wartości temperatury zmierzonej w stanie ustalonym.

Krzywe grzewcze są przedstawione w postaci przyrostu temperatury ponad temperaturę otoczenia T_0 , która w trakcie pomiarów wynosiła 25°C . Linia ciągłą oznaczone zostały krzywe dla źródła LED z przyłutowanymi wszystkimi padami (opisane jako *PT*), natomiast linią przerywaną - bez przyłutowanego pada termicznego (opisane jako *BPT*).



Rys. 7.5. Zmierzone krzywe grzewcze dla trzech badanych prądów przewodzenia I_F - źródło LED typu A

Największy przyrost temperatury ΔT zarejestrowano przy badanym prądzie przewodzenia $I_F = 1050$ mA. Przyrost ten wyniósł odpowiednio $70,5^\circ\text{C}$ dla źródła LED z przylutowanymi wszystkimi padami oraz $86,2^\circ\text{C}$ - bez przylutowanego pada termicznego. Moment „rozejścia się” krzywych chłodzenia po czasie wynoszącym ok. 30 ms wskazuje miejsce, gdzie ciepło przepływa od złącza do podłoża różnymi drogami. Jest to związane z różnym sposobem montażu źródeł LED na podłożu MCPCB, co skutkuje różną drogą przepływu ciepła w tym miejscu. Powyższy sposób montażu źródeł LED i wynikające z niego „rozejście się” krzywych umożliwia wyznaczenie rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$.

Zarejestrowane krzywe grzewcze zostały przetworzone za pomocą oprogramowania implementującego metodę identyfikacji sieci przez dekonwolucję (ang. *Network Identification by Deconvolution - NID*) [67]. Przetworzenie danych dotyczących zmiany temperatury z wykorzystaniem tej metody umożliwia wyznaczenie m.in. impedancji termicznych, pulsacyjnych rezystancji termicznych czy funkcji strukturalnych. Funkcja strukturalna jest reprezentacją ścieżki przepływu ciepła w postaci dynamicznego oporu cieplnego w funkcji pojemności cieplnej dla każdej warstwy, wzdłuż ścieżki przepływu ciepła. Do wyznaczenia funkcji strukturalnej, oprócz określenia warunków brzegowych, istotne jest poprawne zdefiniowanie rozkładu mocy. Ponadto w przypadku półprzewodnikowych źródeł światła do wyznaczenia rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ należało uwzględnić moc cieplną P_H źródeł LED, zgodnie z definicją opisaną w standardzie JEDEC JESD 51-51 [81]:

$$R_{th_{j-c}} = \frac{T_j - T_c}{P_H} \text{ [}^\circ\text{C/W]} \quad (7.2)$$

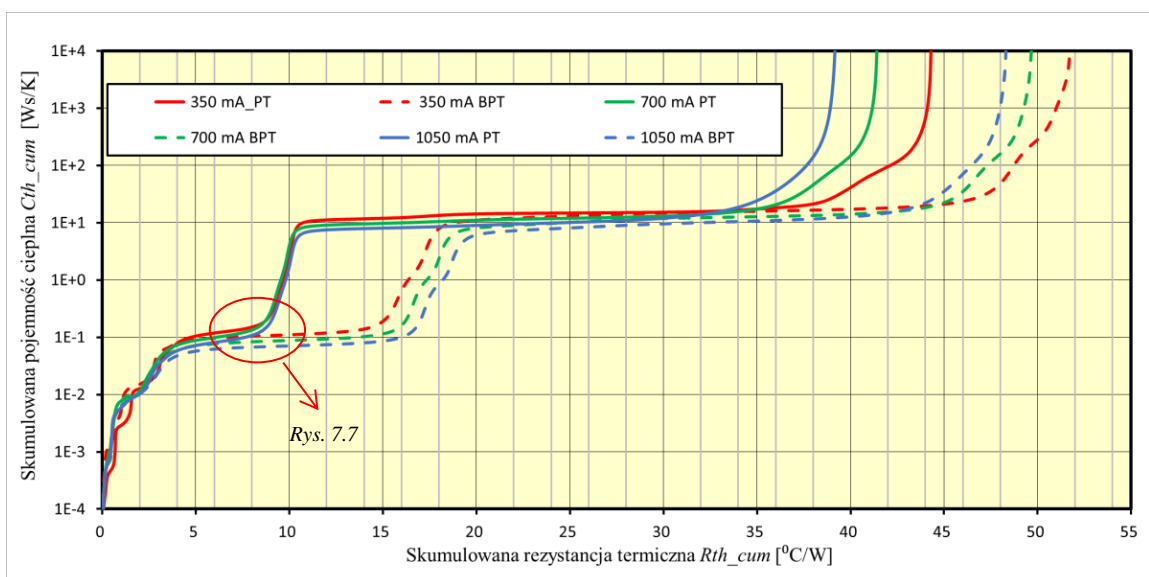
gdzie: Rth_{j-c} – rezystancja termiczna pomiędzy złączem a obudową, T_j – temperatura złącza, T_c – temperatura obudowy, P_H – moc cieplna.

Do badań przyjęto rzeczywistą wartość mocy cieplnej P_H dla badanych źródeł LED, wyznaczoną na podstawie pomiarów sprawności optycznej η_o . Wartości wymienionych parametrów zostały wyznaczone na stanowisku pomiarowym firmy GL Optic [94, 95, 119] i zostały szeroko omówione w rozdz. 9., dotyczącym badań wpływu temperatury złącza T_j na parametry świetlne. Moc cieplną P_H dla trzech różnych wartości prądu I_F przedstawiono w tab. 7.3.

Tabela 7.3. Przyjęta do obliczeń sprawność optyczna η_o oraz moc cieplna P_H badanych źródeł LED

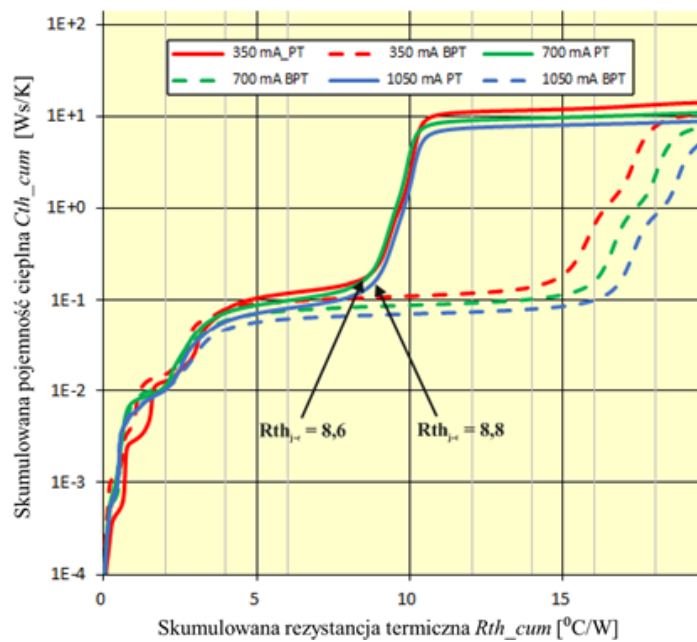
Oznaczenie		LED A	LED B	LED C
Sprawność optyczna, η_o [%]	$I_F = 350$ mA	49	46	30
	$I_F = 700$ mA	43	38	24
	$I_F = 1050$ mA	38	33	-
Moc cieplna, P_H [W]	$I_F = 350$ mA	0,50	0,55	0,76
	$I_F = 700$ mA	1,19	1,34	1,83
	$I_F = 1050$ mA	2,02	2,31	-

Wykresy skumulowanej funkcji strukturalnej dla źródła LED typu A i C przedstawiono na rys. 7.6 i 7.8. Wyznaczone funkcje strukturalne obrazują ścieżkę przepływu ciepła od złącza do otoczenia, wyrażoną zależnością pomiędzy skumulowaną rezystancją termiczną a skumulowaną pojemnością cieplną.



Rys. 7.6. Skumulowana funkcja strukturalna - źródło LED typu A

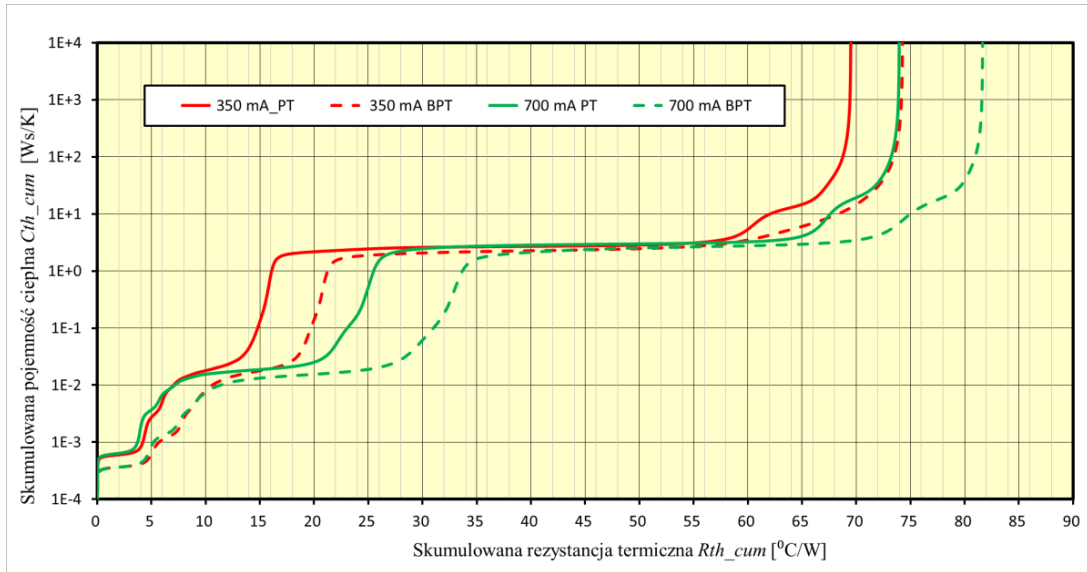
Na rysunku 7.6 linią ciągłą oznaczono krzywe dla źródła LED z przylutowanymi wszystkimi padami, natomiast linią przerywaną - bez przylutowanego pada termicznego. Linia ciągła oraz linia przerywana pokrywają się w miejscu przepływu ciepła od złącza do miejsca przepływu ciepła przez pady źródła LED. W przypadku przylutowanego pada termicznego, jak wynika z funkcji strukturalnej, ciepło szybciej przepływa do podłoża MCPCB i struktura ta charakteryzuje się mniejszym oporem cieplnym w stosunku do źródła LED bez przylutowanego pada termicznego. Miejsce „rozejścia się” linii, rzutowane na oś skumulowanej rezystancji termicznej, wskazuje wartość poszukiwanej rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ pomiędzy złączem a obudową źródła LED (rys. 7.7).



Rys. 7.7. Miejsce wyznaczenia rezystancji $R_{th_{j-c}}$ - źródło LED typu A

Wartość rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ dla prądów $I_F = 350$ mA i $I_F = 700$ mA osiągnęła taką samą wartość $R_{th_{j-c}} = 8,6^{\circ}\text{C/W}$, natomiast w przypadku $I_F = 1050$ mA wartość ta była nieznacznie wyższa i wyniosła $8,8^{\circ}\text{C/W}$. Wyższa temperatura złącza T_j dla źródła bez przylutowanego pada termicznego wynika z utrudnionych warunków przepływu ciepła od złącza do obudowy źródła LED.

W celu porównania przeprowadzono także badania pozostałych źródeł. Wykres skumulowanej funkcji strukturalnej dla źródła typu C przedstawiono na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Skumulowana funkcja strukturalna - źródło LED typu C

Wyznaczona rezystancja termiczna Rth_{j-c} dla prądu $I_F = 350$ mA wyniosła $13,6^{\circ}\text{C/W}$. W przypadku zwiększenia prądu I_F do 700 mA nastąpił wzrost rezystancji termicznej Rth_{j-c} do wartości $21,2^{\circ}\text{C/W}$. Wzrost ten był zauważalnie większy w porównaniu ze źródłem typu A. Dla prądu $I_F = 1050$ mA rezystancja Rth_{j-c} nie była wyznaczana, co jest związane z mniejszą wartością mocy maksymalnej wymienionego źródła LED.

Tabela 7.4. Wyznaczona rezystancja termiczna Rth_{j-c} dla badanych źródeł LED

Oznaczenie		LED A	LED B	LED C
Rezystancja termiczna, Rth_{j-c} [$^{\circ}\text{C/W}$]	$I_F = 350$ mA	8,6	13,5	13,6
	$I_F = 700$ mA	8,6	14,1	21,2
	$I_F = 1050$ mA	8,8	17,1	-
Katalogowa rezystancja termiczna, Rth_{j-c} [$^{\circ}\text{C/W}$]		3	3,45 przy $I_F = 700$ mA	6

W tabeli 7.4 zestawiono wyniki wyznaczonych rezystancji termicznych Rth_{j-c} dla wszystkich badanych półprzewodnikowych źródeł światła.

Wyznaczone wartości rezystancji termicznej Rth_{j-c} różniły się w zależności od producenta badanego źródła LED. Najmniejsza wartość została zmierzona dla źródła LED typu A i wynosiła ona nieznacznie poniżej 9°C/W . Charakterystyczna dla wymienionego źródła była praktycznie stała wartość Rth_{j-c} , dla wszystkich trzech badanych wartości prądu I_F . Dla źródła LED typu B zmierzona wartość rezystancji Rth_{j-c} miała wyższą wartość niż źródła

typu A o około 60%. Dla wymienionego źródła, wartość rezystancji termicznej zmieniała się również wraz ze wzrostem prądu I_F i przy wzroście wartości prądu I_F z 350 do 1050 mA wartość rezystancji $R_{th_{j-c}}$ wzrosła z 13,5°C/W do 17,1°C/W. Największy wpływ wartości prądu przewodzenia I_F na wartość rezystancji $R_{th_{j-c}}$ zaobserwowano dla źródła LED typu C, gdzie wzrost wartości prądu I_F z 350 do 700 mA, spowodował blisko 50% wzrost wartości $R_{th_{j-c}}$: z 13,6°C/W na 20,8°C/W.

Na podstawie przeprowadzonych badań rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ badanych półprzewodnikowych źródeł światła można stwierdzić, że badania związane z wyznaczaniem rezystancji $R_{th_{j-c}}$ są zagadnieniem złożonym, wymagającym indywidualnego podejścia. Wartość rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ w głównej mierze zależy od technologii, konstrukcji oraz własności materiałów użytych do budowy źródła LED. Dla dwóch badanych źródeł LED wartość rezystancji $R_{th_{j-c}}$ była uzależniona od wartości prądu przewodzenia I_F . Dodatkowo, wartość ta w dużym stopniu jest uzależniona od mocy cieplnej P_H , powiązanej bezpośrednio ze sprawnością optyczną η_o (tab. 9.2), która wraz ze wzrostem wartości prądu I_F zmienia się w sposób indywidualny, dla danego modelu półprzewodnikowego źródła światła.

Wartości rezystancji termicznej źródeł LED uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań w sposób istotny odbiegają od wartości prezentowanych w dostępnej literaturze. Wymienione różnice wynikają z faktu niejednoznacznie określonych przez producentów warunków pomiarowych, dla których została wyznaczona rezystancja termiczna. Często producenci deklarują rezystancję termiczną $R_{th_{j-c}}$ dla stosunkowo małej wartości prądu I_F , co skutkuje zaniżeniem jej wartości. Często również określana wartość rezystancji $R_{th_{j-c}}$ zostaje wyznaczona dla całkowitej mocy elektrycznej P_e , a nie dla mocy cieplnej P_H , zgodnie z założeniami standardu JEDEC JESD 51-51. Jeżeli przyjmie się do wyznaczenia rezystancji $R_{th_{j-c}}$ moc cieplną P_H dla źródła LED o sprawności optycznej na poziomie $\eta_o = 50\%$, to wyznaczona wartość rezystancji $R_{th_{j-c}}$ będzie dwukrotnie wyższa w stosunku do tego samego źródła LED i założenia do obliczeń jedynie mocy elektrycznej P_e , zgodnie ze wzorami (7.2) oraz (9.2). Analiza termiczna oparta na rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ wyznaczonej w przedstawiony sposób, jest związana z większym błędem obliczeniowym, a uzyskane wartości temperatury T_j są zaniżone w stosunku do wyników eksperymentalnych.

Wyznaczona wartość $R_{th_{j-c}}$ stanowi podstawę modelu termicznego, który umożliwia określenie temperatury złącza T_j . Model ten został zaimplementowany w oprogramowaniu CFD i posłużył do analizy termicznej panelu LED.

8. Analiza termiczna elementów panelu LED

Przeprowadzone badania i wyznaczona wartość rezystancji $R_{th_{j-c}}$ badanych źródeł (rozdz. 7.), pozwalają na dalszą rozbudowę modelu i analizę temperaturową wieloźródłowego układu, tzw. panelu LED. Panele takie mogą zawierać w swojej strukturze od kilku do nawet kilkuset pojedynczych źródeł LED, celem uzyskania oczekiwanej mocy P_e i strumienia świetlnego Φ [80].

Efektywna praca panelu LED jest związana z zapewnieniem odpowiednich warunków termicznych, umożliwiających optymalną pracę półprzewodnikowych źródeł światła. Pogłębiona analiza termiczna powinna więc uwzględniać wszystkie składowe czynniki wpływające na całościową ocenę temperaturowych warunków pracy panelu LED.

Temperatura złącza T_j półprzewodnikowych źródeł światła tworzących panel LED jest uzależniona od wielu czynników, do których w głównej mierze można zaliczyć: moc P_e każdego źródła LED, liczbę zainstalowanych źródeł, ich konfigurację czy odległości pomiędzy nimi. Kolejnym ważnym aspektem analizy termicznej jest ocena pracy układu radiacyjnego, podłoża MCPCB i określenie ich wpływu na temperaturę złącza T_j zainstalowanych źródeł światła. Analiza powinna również uwzględniać wpływ warunków środowiskowych, takich jak temperatura otoczenia T_o czy naturalny lub wymuszony przepływ powietrza.

Wzięcie pod uwagę wszystkich wymienionych czynników, mających wpływ na temperaturowe warunki pracy panelu LED i temperaturę złącza T_j zainstalowanych półprzewodnikowych źródeł światła, wymaga użycia zaawansowanego narzędzia symulacyjnego, uwzględniającego wszystkie mechanizmy transportu ciepła (rozdz. 6.). Wyznaczenie temperatury złącza T_j wszystkich źródeł LED na panelu umożliwi ocenę jej wpływu na wypadkowe parametry świetlne panelu LED.

W niniejszym rozdziale dokonano szczegółowej analizy temperaturowej przykładowego panelu LED. Analizie i ocenie poddano wszystkie wymienione czynniki, mogące mieć wpływ na temperaturę złącza T_j źródeł panelu LED. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem specjalistycznego narzędzia symulacyjnego FloEFD 16.2 firmy Mentor Graphics [129]. Wybrane narzędzie symulacyjne posiada m.in. wbudowany moduł CAD do tworzenia analizowanej trójwymiarowej geometrii oraz moduł *Flow Simulation* oparty na Obliczeniowej Mechnice Płynów, służący do zaawansowanych obliczeń termicznych, uwzględniający

wszystkie rodzaje transportu ciepła, tj. przewodzenie, konwekcję oraz radiację. Narzędzie to jest szeroko wykorzystywane w profesjonalnych badaniach zagadnień termicznych.

8.1. Sprzężenia termiczne pomiędzy źródłami LED

Instalowanie wielu źródeł LED na wspólnym radiatorze powoduje występowanie wzajemnych sprzężeń termicznych pomiędzy poszczególnymi źródłami światła. Źródła LED pracujące przy zadanej mocy P_e , oprócz zjawiska samonagrzewania, powodującego wzrost własnej temperatury złącza T_j przez występujące sprzężenia termiczne, wpływają na wzrost temperatury T_j innych źródeł zainstalowanych na wspólnym radiatorze. Skala sprzężeń termicznych pomiędzy źródłami LED może być różna i uzależniona od mocy poszczególnych źródeł LED, ich liczby oraz wzajemnego położenia (pkt 2.3).

Badania symulacyjne zrealizowano dla płyty aluminiowej (radiator) z różną liczbą zainstalowanych źródeł LED. Analizę przeprowadzono dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F : 350; 700 oraz 1050 mA. Dla konfiguracji z 36 zainstalowanymi źródłami LED analizie poddano pięć różnych odległości d pomiędzy nimi, wynoszących odpowiednio: 5; 10; 15; 20 oraz 25 mm.

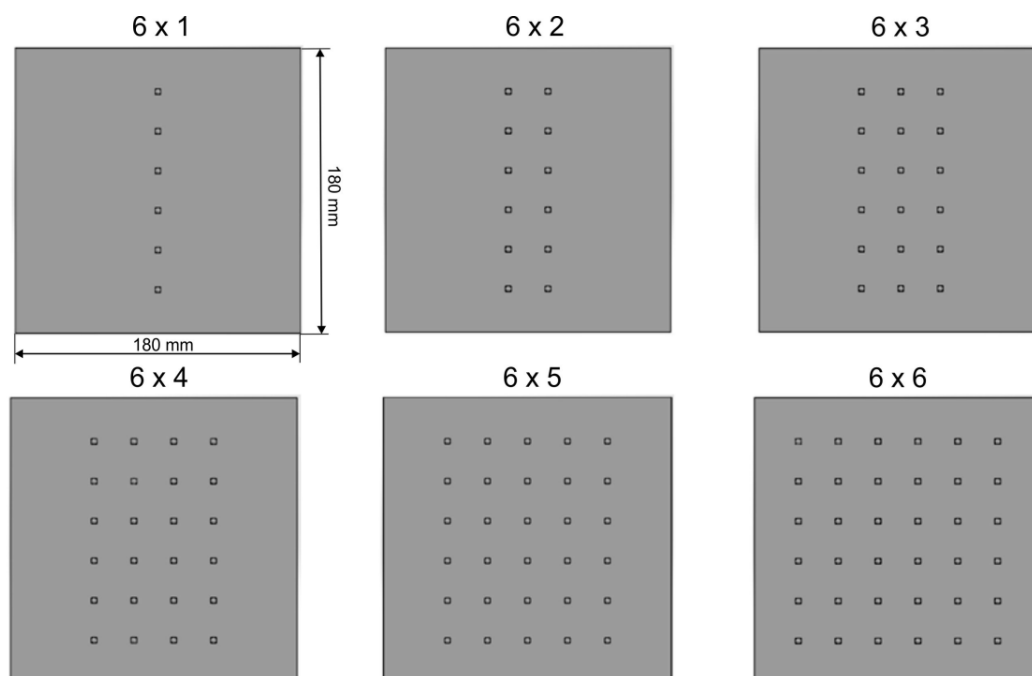
Źródła LED zostały zainstalowane na płycie obwodu drukowanego z metalowym rdzeniem (MCPCB), o wymiarach równych płycie aluminiowej (180 x 180 x 5 mm). Do obliczeń przyjęto źródła LED typu A (tab. 7.1). Do wyznaczenia temperatury złącza T_j wykorzystano model termiczny oparty na rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ pomiędzy złączem a obudową (tab. 7.4). Moc cieplną P_H dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F : 350; 700 oraz 1050 mA przyjęto na podstawie przeprowadzonych badań (tab. 7.3).

Parametry zastosowanych materiałów oraz ich cechy fizyczne przedstawiono w tab. 8.1.

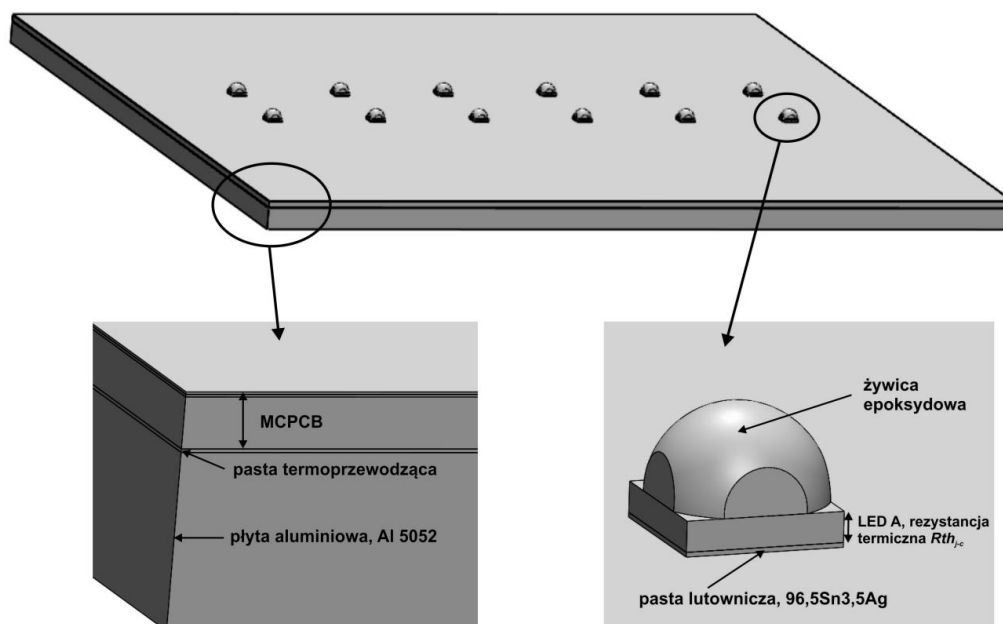
Widok wszystkich wariantów związanych ze zmienną liczbą zainstalowanych źródeł LED przedstawiono na rys. 8.1. Liczba źródeł panelu LED była zmieniana w zakresie od 6 do 36, z krokiem co 6. Panel zawierający 6 źródeł LED oznaczony został jako 6 x 1, panel zawierający 12 źródeł oznaczono jako 6 x 2 itd. Widok 3D przykładowego panelu LED 6 x 2, wraz z zaznaczoną strukturą materiałową przedstawiono na rys. 8.2.

Tabela 8.1. Panel LED - materiały oraz ich parametry cieplne [92, 123]

Warstwa	Materiał	Grubość [mm]	Przewodność cieplna k [W/m \cdot K]		
Radiator	Aluminium 5052	5	140		
Połączenie radiatora z MCPCB	Pasta termo-przewodząca	0,1	3		
Podłoże MCPCB	Miedź	0,035	400		
	Dielektryk	0,1	2		
	Aluminium 5052	1,5	140		
Pasta lutownicza	96,5Sn3,5Ag	0,1	33		
Źródło LED A	-	-	-	Rezystancja termiczna $R_{th_{j-c}}$ [°C/W]	
				$I_F = 350$ mA	8,6
				$I_F = 700$ mA	8,6
				$I_F = 1050$ mA	8,8
Soczewka LED	Żywica epoksydowa	-	0,2		



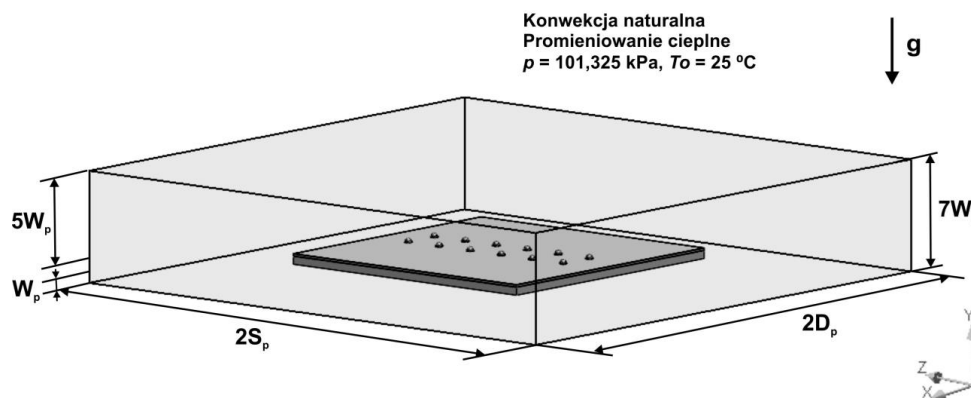
Rys. 8.1. Badane warianty panelu LED związane ze zmienną liczbą zainstalowanych źródeł LED



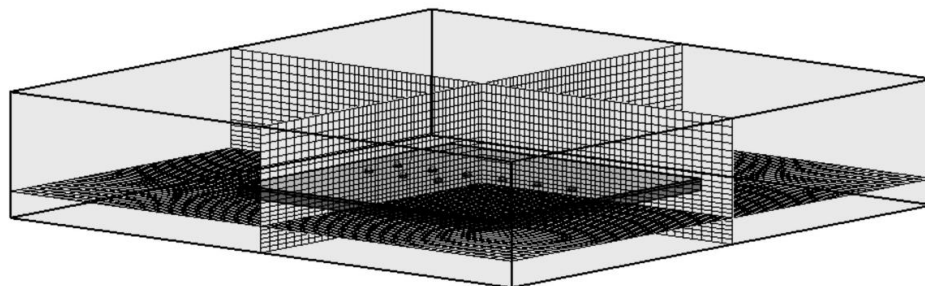
Rys. 8.2. Widok 3D panelu LED 6 x 2 z opisem struktury materiałowej

Wielkość domeny obliczeniowej dobrano na podstawie uwzględnienia charakterystyki przenoszenia ciepła oraz czasu obliczeniowego. Wysokość domeny została ustalona jako $7W_p$, szerokość i długość domeny obliczeniowej jako $2S_p$ oraz $2D_p$, gdzie W_p , S_p oraz D_p oznaczają odpowiednio wysokość, szerokość oraz długość panelu LED (rys. 8.3a).

a)



b)



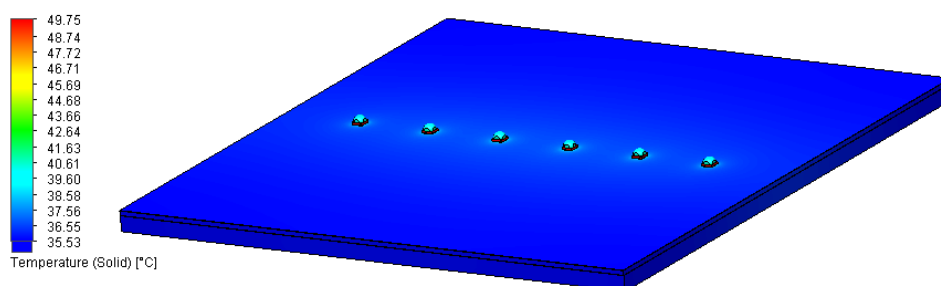
Rys. 8.3. Model symulacyjny panelu LED 6 x 2: a) domena obliczeniowa wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi, b) przekrój siatki obliczeniowej wzdłuż osi XYZ

W badaniach symulacyjnych jako warunki brzegowe założono konwekcję naturalną. Ciśnienie powietrza otaczające panel wynosiło $p = 101,325$ kPa a temperatura otoczenia $T_o = 25^\circ\text{C}$. W obliczeniach symulacyjnych uwzględniono promieniowanie cieplne, współczynnik emisyjności ε dla aluminiowej płyty wynosił 0,2. W obliczeniach założono przyspieszenie grawitacyjne $g = 9,81$ m/s², przeciwnie do kierunku osi Y.

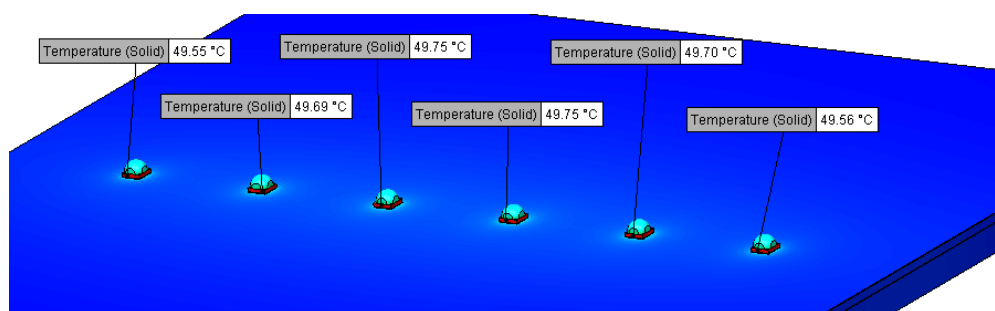
Siatka obliczeniowa została zdefiniowana z wykorzystaniem wbudowanego w oprogramowanie FloEFD 16.2, zaawansowanego modułu do tworzenia adaptacyjnej siatki numerycznej. Przekrój siatki numerycznej wzdłuż każdej z osi XYZ został przedstawiony na rys. 8.3b.

Uzyskany rozkład temperatury dla przykładowego panelu LED 6 x 1 i prądu przewodzenia $I_F = 700$ mA zilustrowano na rys. 8.4. Maksymalna temperatura złącza T_j dla tego panelu LED wyznaczona została dla środkowych źródeł i wyniosła ona $T_j = 49,75^\circ\text{C}$ (rys. 8.4). W przypadku źródeł skrajnych temperatura ta była niższa o $0,2^\circ\text{C}$. Temperatura płyty aluminiowej stanowiącej radiator charakteryzowała się równomiernym rozkładem. Średnio wynosiła ona ok. 36°C .

a)



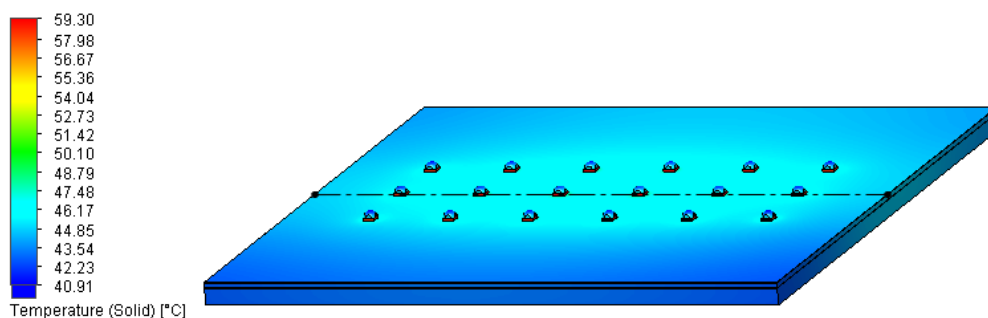
b)



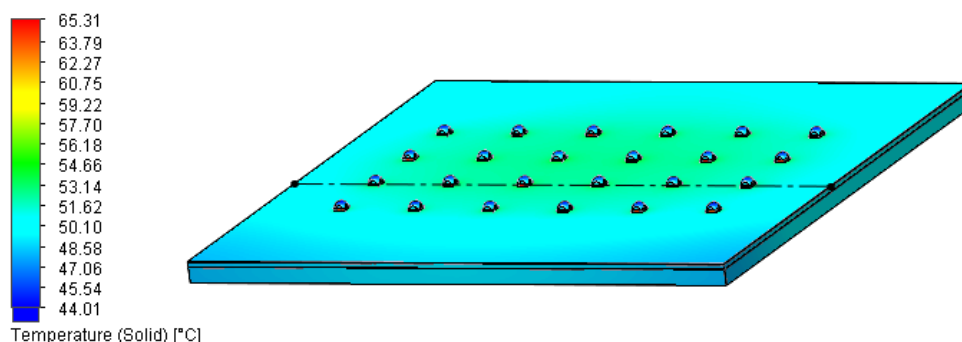
Rys. 8.4. Panel LED 6 x 1, $I_F = 700$ mA: a) rozkład temperatury dla całego panelu, b) wyznaczona temperatura złącza T_j poszczególnych źródeł LED

Rozkład temperatury dla panelu LED 3 x 6 oraz 4 x 6 przy prądzie przewodzenia $I_F = 700$ mA przedstawiono na rys. 8.5.

a)



b)

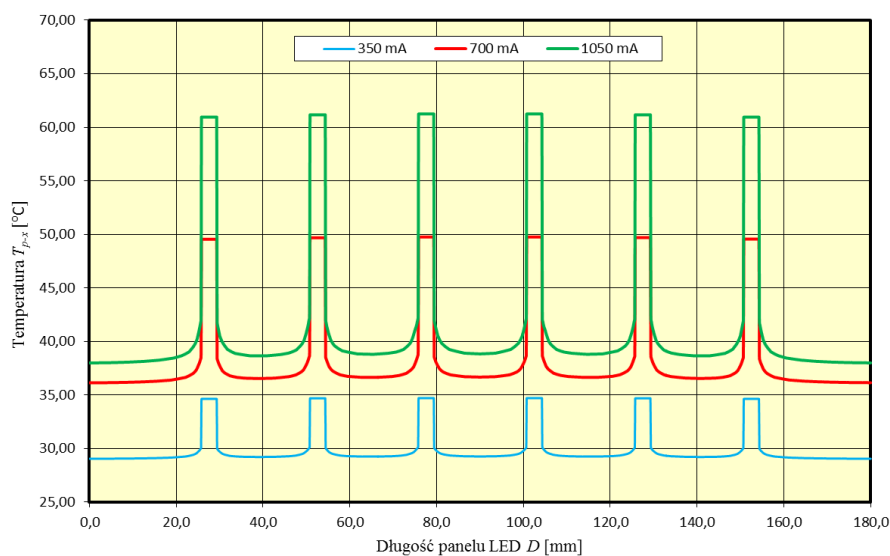


Rys. 8.5. Rozkład temperatury panelu LED przy $I_F = 700$ mA: a) 3 x 6, b) 4 x 6

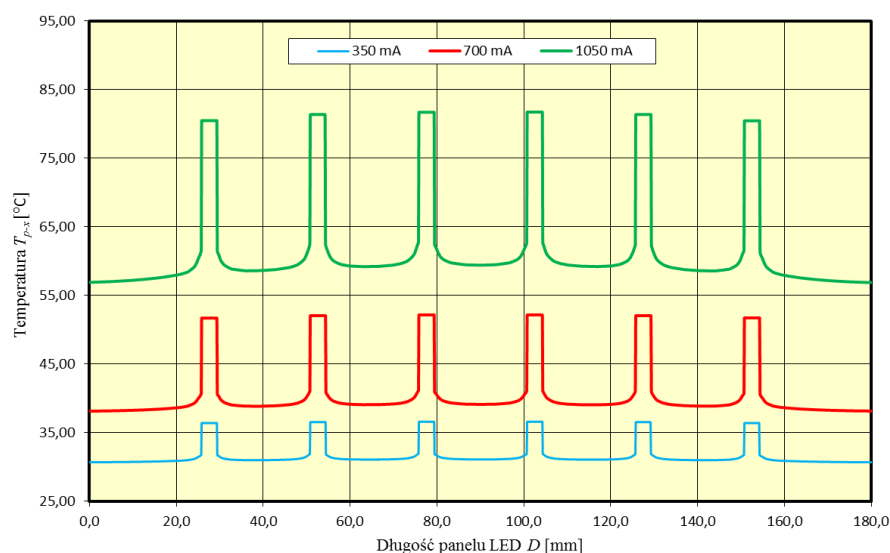
Dla panelu 3 x 6 maksymalna temperatura złącza T_j dla źródła LED znajdującego się w środku panelu wyniosła $T_j = 59,30^\circ\text{C}$, natomiast zwiększenie liczby źródeł LED do 4 x 6 skutkowało wzrostem maksymalnej temperatury T_j centralnego źródła do wartości $T_j = 65,31^\circ\text{C}$, co stanowiło wzrost o ok. 10%. Linia przerywaną (rys. 8.5) zaznaczono oś wyznaczenia rozkładu temperatury wzdłuż długości panelu LED, w miejscu występowania najwyższych temperatur T_j zainstalowanych źródeł LED. Rozkład temperatury badanych paneli LED wzdłuż osi omówionej powyżej przedstawiono na rys. 8.6 oraz 8.7.

Wzrost wartości prądu przewodzenia I_F , a więc również wzrost mocy elektrycznej P_e i wynikającej z niej mocy cieplnej P_H , skutkowało wzrostem temperatury złącza T_j poszczególnych źródeł światła. Dla panelu 1 x 6 wzrost wartości prądu I_F z 350 do 700 mA spowodował wzrost temperatury złącza T_j z 35 do 50°C (wzrost T_j o ok. 43%). Dalszy wzrost I_F z 700 do 1050 mA skutkowało wzrostem temperatury T_j z 50 do 61°C , co stanowi wzrost o 22% w stosunku do prądu $I_F = 700$ mA oraz 74% w stosunku do $I_F = 350$ mA. Dla paneli 3 x 6, 5 x 6 oraz 6 x 6 wzrost wartości prądu I_F skutkowało odpowiednio coraz wyższymi wzrostami temperatury T_j , co jest związane z większą liczbą źródeł LED zainstalowanych na wspólnym radiatorze i występowaniu sprzężeń termicznych pomiędzy nimi.

a)



b)

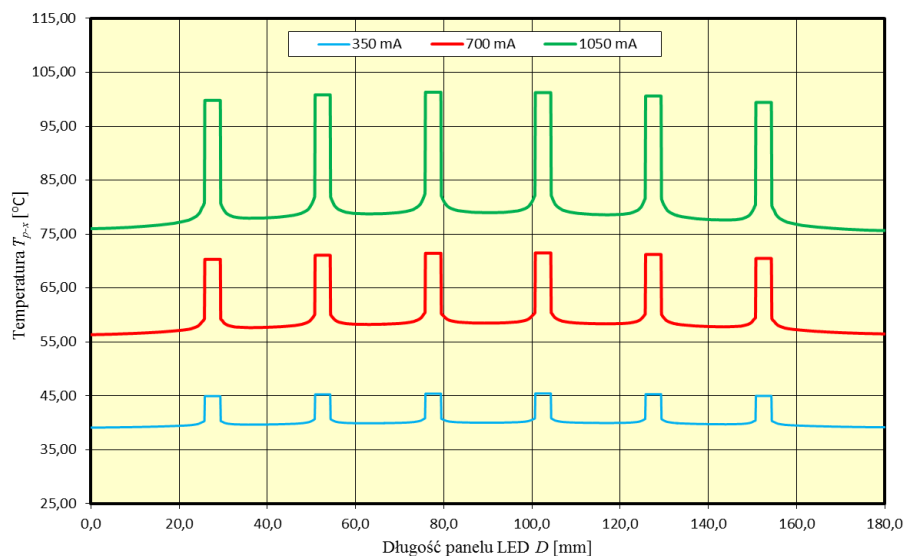


Rys. 8.6. Rozkład temperatury dla wybranych paneli i trzech wartości prądu I_F , wzdłuż osi z maksymalną temperaturą T_j źródeł LED: a) 1 x 6, b) 3 x 6

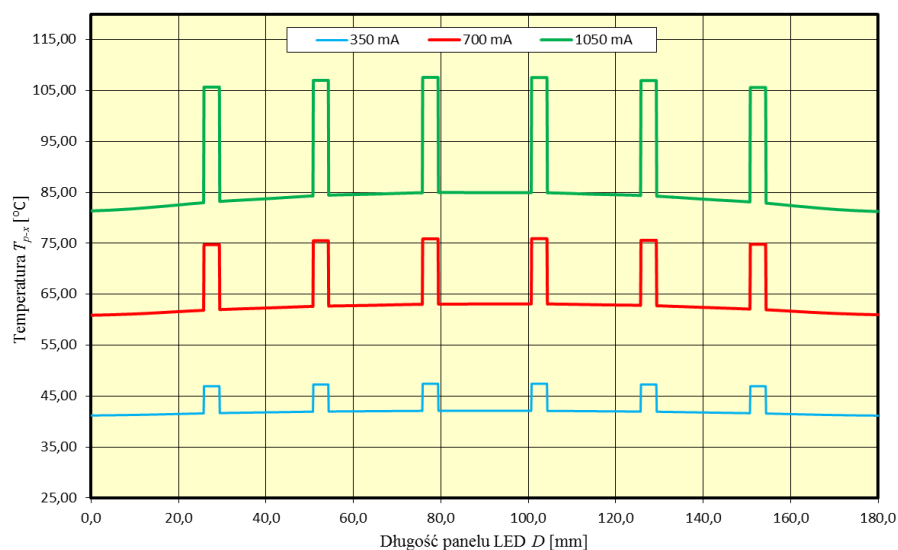
Największy przyrost temperatury złącza T_j uzyskano dla panelu LED 6 x 6, gdzie wzrost prądu przewodzenia I_F z 350 do 700 mA spowodował wzrost temperatury złącza T_j centralnego źródła LED z 47°C do 76°C, co stanowiło wzrost wynoszący 62%. Dalszy wzrost I_F z 700 do 1050 mA skutkowało kolejnym wzrostem temperatury T_j do wartości 108°C, co stanowiło wzrost o 42% w stosunku do $I_F = 700$ mA oraz 130% w stosunku do $I_F = 350$ mA. Dla panelu 5 x 6 oraz 6 x 6, przy wartości prądu $I_F = 700$ oraz 1050 mA, zauważalna jest wyższa wartość temperatury złącza T_j środkowych źródeł LED w stosunku do źródeł skraj-

nych. Analogicznie, dla opisanych przypadków w centralnej części panelu temperatura podłoża MCPCB jest wyższa niż w części skrajnej panelu.

a)



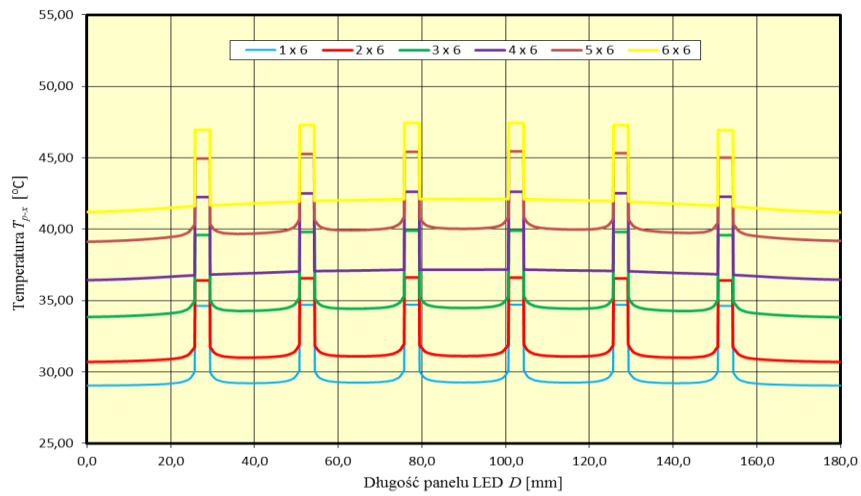
b)



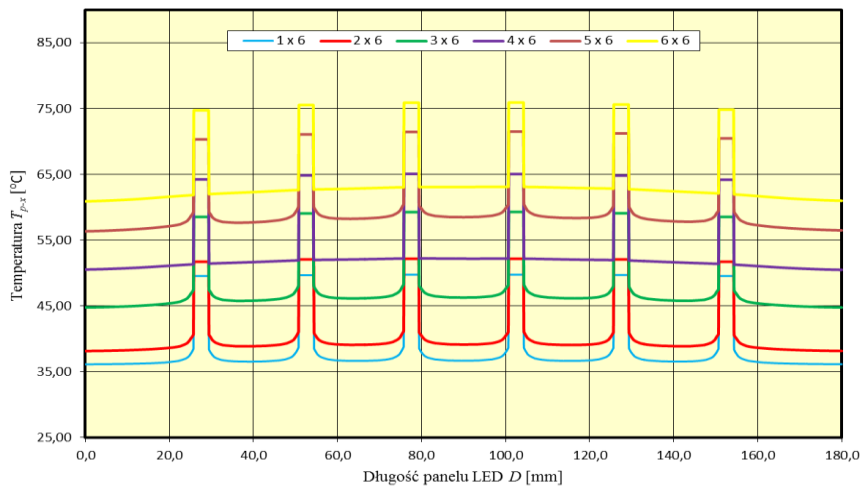
Rys. 8.7. Rozkład temperatury dla wybranych paneli i trzech wartości prądu I_F wzdłuż osi z maksymalną temperaturą T_j źródeł LED: a) 5 x 6, b) 6 x 6

Na rysunku 8.8 przedstawiono rozkład temperatury badanych paneli LED, wzdłuż osi z maksymalną temperaturą T_j zainstalowanych źródeł LED dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F . Zwiększanie liczby źródeł LED zainstalowanych na wspólnym radiatorze powodowało wzrost temperatury złącza T_j źródeł światła, co jest związane ze sprzężeniami termicznymi i współdziałaniem temperaturowym pomiędzy poszczególnymi źródłami.

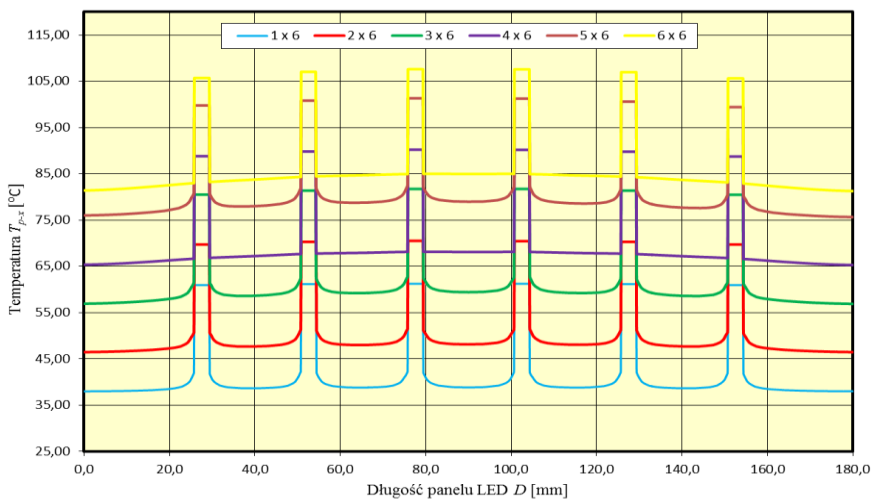
a)



b)



c)

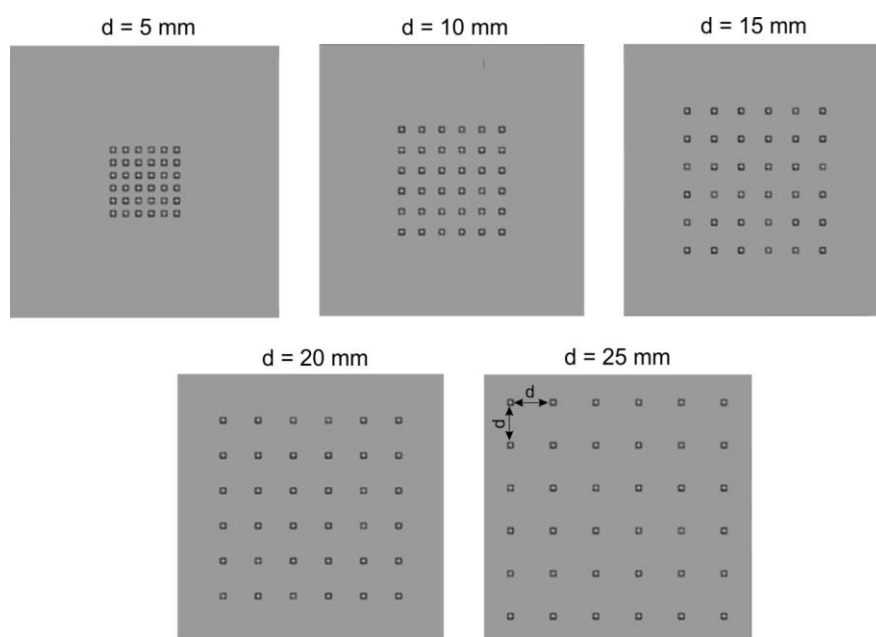


Rys. 8.8. Rozkład temperatury paneli LED wzdłuż osi z maksymalną temperaturą T_j zainstalowanych źródeł LED dla różnej konfiguracji panelu: a) $I_F = 350$ mA, b) $I_F = 700$ mA, c) $I_F = 1050$ mA

Zwiększanie sumarycznej liczby źródeł o kolejne sześć skutkowało wzrostem temperatury złącza T_j , przy czym wzrost ten był uzależniony od wartości prądu przewodzenia I_F . Najmniejszy średni wzrost temperatury złącza T_j zanotowano dla prądu $I_F = 350$ mA, gdzie dodanie kolejnego rzędu z sześcioma źródłami LED powodowało średni wzrost temperatury złącza T_j , wynoszący ok. $2,5^{\circ}\text{C}$ (6%). Dla prądu $I_F = 700$ mA średni wzrost temperatury T_j wyniósł ok. $5,2^{\circ}\text{C}$ (9%), natomiast dla prądu $I_F = 1050$ mA wzrost ten średnio przyjmował wartość ok. $9,3^{\circ}\text{C}$ (12%). Najmniejszy przyrost temperatury T_j dla prądu $I_F = 350$ oraz 700 mA zarejestrowano dla zmiany konfiguracji zainstalowanych półprzewodnikowych źródeł światła z 1×6 na 2×6 , natomiast największy przyrost temperatury T_j dla wszystkich wartości prądu I_F wyznaczono dla zmiany liczby zainstalowanych źródeł LED z 2×6 na 3×6 .

Najwyższy przyrost temperatury T_j dla konfiguracji 3×6 był związany z powstaniem centralnego rzędu źródeł LED, w którym zainstalowane źródła światła oddziałują termicznie z każdej strony, z otaczającymi je sąsiednimi źródłami. W przypadku konfiguracji 2×6 zainstalowane źródła LED z jednej strony nie oddziałują termicznie z innymi źródłami, co wpływa na mniejszą wartość temperatury złącza T_j zainstalowanych półprzewodnikowych źródeł światła.

Dla panelu LED 6×6 zbadano wpływ odległości pomiędzy zainstalowanymi źródłami LED na temperaturę złącza T_j . Odległość pomiędzy zainstalowanymi źródłami światła d była zmieniana w zakresie 5–25 mm i przyjmowała odpowiednio wartości: 5; 10; 15; 20 oraz 25 mm (rys. 8.9).

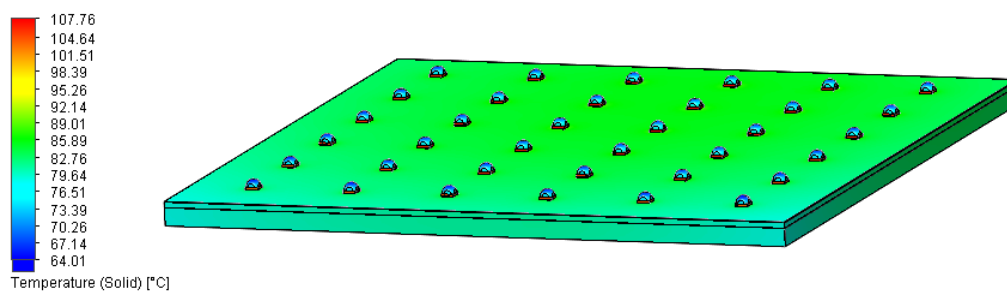


Rys. 8.9. Panel LED 6×6 ze zmienną odległością d pomiędzy zainstalowanymi źródłami LED

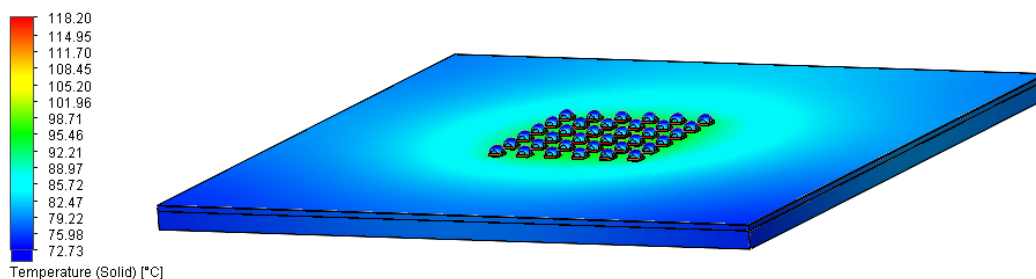
Badania symulacyjne przeprowadzono dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F : 350; 700 oraz 1050 mA, a warunki początkowe określono analogicznie jak we wcześniejszych symulacjach, tj. $T_o = 25^\circ\text{C}$, $p = 101,325 \text{ kPa}$ oraz konwekcja naturalna.

Na rysunku 8.10 przedstawiono rozkład temperatury panelu LED 6 x 6 dla dwóch skrajnych odległości pomiędzy zainstalowanymi źródłami LED, wynoszącymi odpowiednio $d = 25$ i 5 mm oraz dla maksymalnej wartości prądu przewodzenia $I_F = 1050 \text{ mA}$. Dla panelu, w którym odległość pomiędzy zainstalowanymi półprzewodnikowymi źródłami światła wynosiła $d = 25 \text{ mm}$, uzyskano równomierny rozkład temperatury na całej powierzchni panelu, natomiast wyznaczona maksymalna temperatura złącza T_j , znajdującego się w środku panelu, osiągnęła wartość powyżej 107°C . Dla analogicznego panelu, gdzie odległość pomiędzy źródłami LED została zmniejszona do $d = 5 \text{ mm}$, maksymalna temperatura złącza T_j źródła światła znajdującego się w centrum panelu wyniosła $T_j = 118,2^\circ\text{C}$.

a)



b)

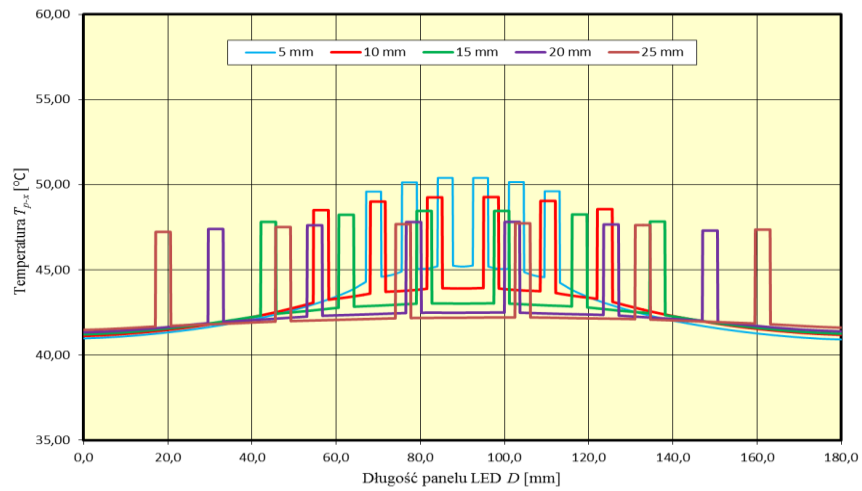


Rys. 8.10. Rozkład temperatury panelu LED przy $I_F = 1050 \text{ mA}$: a) $d = 25 \text{ mm}$, b) $d = 5 \text{ mm}$

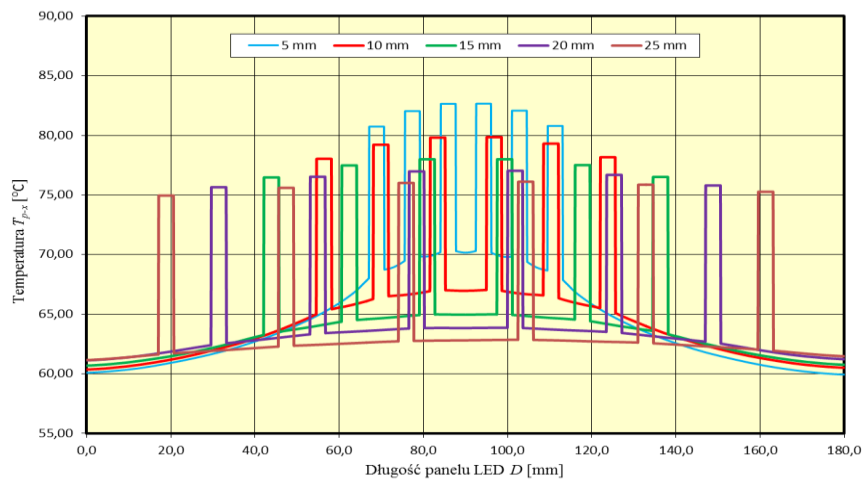
Rozkład temperatury panelu LED wzdłuż osi z maksymalną temperaturą złącza T_j zainstalowanych źródeł LED dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F przedstawiono na rys. 8.11. Dla prądu przewodzenia $I_F = 350 \text{ mA}$ zmiana odległości d pomiędzy zainstalowanymi źródłami światła w zakresie od 5 do 25 mm wpływała w niewielkim stopniu na wzrost wartości temperatury złącza T_j . Największy wzrost maksymalnej temperatury T_j został wyznaczony dla $d = 5 \text{ mm}$. Wyniósł on ok. 5% w stosunku do odległości $d = 25 \text{ mm}$. Dla odle-

głości pomiędzy źródłami wynoszącej $d = 10$ mm wzrost temperatury T_j wyniósł ok. 3%, natomiast dla odległości $d = 15$ mm oraz $d = 20$ mm wzrost ten był właściwie niezauważalny.

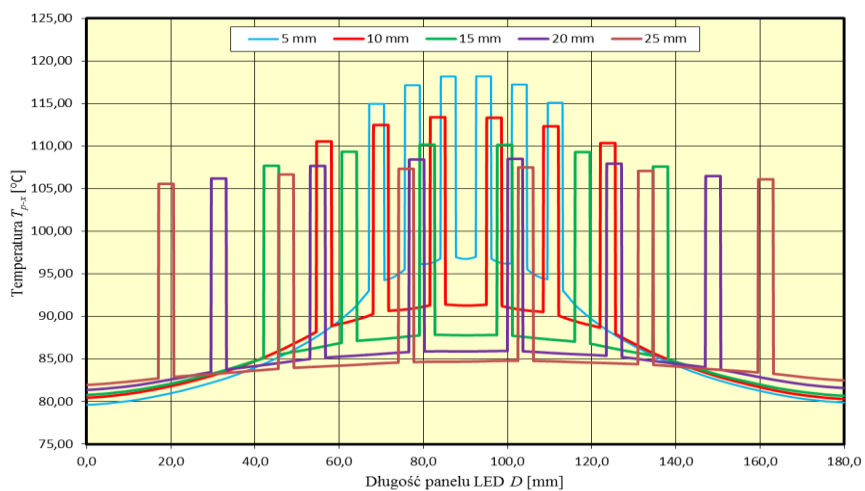
a)



b)



c)



Rys. 8.11. Rozkład temperatury paneli LED wzdłuż osi z maksymalną temperaturą T_j zainstalowanych źródeł LED dla różnej odległości pomiędzy nimi: a) $I_F = 350$ mA, b) $I_F = 700$ mA, c) $I_F = 1050$ mA

Dla prądu przewodzenia $I_F = 700$ mA oraz $I_F = 1050$ mA, zaobserwowano większy wpływ zmiany odległości d pomiędzy zainstalowanymi źródłami LED na temperaturę T_j , w porównaniu z prądem przewodzenia $I_F = 350$ mA. Dla odległości pomiędzy źródłami LED wynoszącej odpowiednio $d = 5$ mm, wzrost maksymalnej temperatury złącza T_j centralnie zainstalowanego źródła LED wyniósł 9% dla $I_F = 700$ mA oraz 10% dla $I_F = 1050$ mA, w stosunku do odległości wynoszącej $d = 25$ mm. Dla odległości $d = 10$ mm wzrost temperatury T_j wyniósł ok. 5% dla obydwu wartości I_F , natomiast dla odległości wynoszącej 15 oraz 20 mm wzrost ten nie przekroczył wartości 3%.

Temperatura złącza T_j półprzewodnikowych źródeł światła, sprzężonych ze sobą termicznie na wspólnym radiatorze, jest uzależniona od mocy elektrycznej P_e i wynikającej z niej mocy cieplnej P_H , od liczby zainstalowanych źródeł LED oraz odległości d pomiędzy nimi. Wpływ wymienionych czynników na termiczne warunki pracy panelu LED został określony na podstawie badań symulacyjnych.

Analiza otrzymanych wyników symulacyjnych wykazała, że największy wpływ na temperaturę złącza T_j źródeł LED miała wartość prądu przewodzenia I_F i wynikająca z niego moc elektryczna P_e , powiązana z nią moc cieplna P_H , dodatkowo uzależniona od sprawności optycznej η_o pracujących źródeł LED. Dla symulowanego panelu LED 1 x 6 wzrost wartości prądu I_F z 350 do 700 mA powodował zwiększenie wartości maksymalnej temperatury złącza T_j centralnego źródła LED o 43%. W przypadku wzrostu wartości prądu I_F do 1050 mA uzyskana wartość temperatury T_j wzrosła o 74% w stosunku do prądu $I_F = 350$ mA. Wraz ze wzrostem liczby zainstalowanych źródeł LED wpływ prądu przewodzenia I_F na temperaturę złącza T_j był coraz większy. W przypadku panelu 6 x 6 wzrost I_F z 350 do 700 mA skutkował wzrostem temperatury złącza T_j o 62%, natomiast dla prądu $I_F = 1050$ mA wzrost ten wyniósł aż 130%.

Temperatura złącza T_j źródeł panelu LED jest również uzależniona od liczby sprzężonych ze sobą źródeł światła. Dla badanych paneli zwiększanie o sześć sumarycznej liczby zainstalowanych źródeł LED skutkowało średnim wzrostem maksymalnej temperatury T_j o 6% przy $I_F = 350$ mA, o 9% przy $I_F = 700$ mA oraz o 12 % gdy $I_F = 1050$ mA. Najmniejszy wpływ na temperaturę złącza T_j miała zmiana liczby zainstalowanych źródeł z panelu 1 x 6 na panel 2 x 6. Największy wpływ zarejestrowano natomiast przy zmianie panelu LED z 2 x 6 na 3 x 6, co z kolei wynika z pojawienia się centralnego rzędu źródeł LED, sprzężonego termicznie z każdej strony sąsiednimi źródłami.

Zmiana odległości pomiędzy zainstalowanymi źródłami LED panelu 6 x 6 wykazywała również wpływ na temperaturę złącza T_j . W analizowanym zakresie zmiany odległości

między źródłami światła największy wpływ odnotowano dla odległości $d = 5$ mm oraz $d = 10$ mm, gdzie wzrost temperatury złącza T_j wyniósł odpowiednio 10 oraz 5% w stosunku do $d = 25$ mm, przy najwyższej wartości badanego prądu $I_F = 1050$ mA.

8.2. Modelowanie termiczne radiatora oraz jego wpływ na rozkład temperatury panelu LED

Termiczne warunki pracy źródeł tworzących panel LED, oprócz analizowanych wcześniej głównych czynników, takich jak: prąd przewodzenia I_F i wynikająca z niego moc elektryczna P_e oraz cieplna P_H , czy liczba i odległość d pomiędzy zainstalowanymi źródłami, są również uzależnione od układu radiacyjnego. Układ ten w znacznym stopniu decyduje o temperaturze złącza T_j , a jego głównym zadaniem jest odbiór ciepła ze źródeł LED i jego efektywna wymiana z otoczeniem.

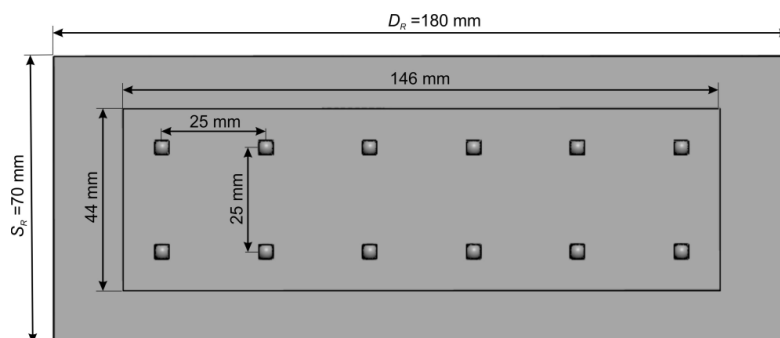
Poprawna konstrukcja radiatora ma istotne znaczenie w kontekście efektywnego odbioru ciepła ze źródeł LED, a następnie przekazania go do otaczającego środowiska. Dobór odpowiedniej wielkości radiatora, jego geometrii, jak również materiału, z którego został wykonany, ma znaczący wpływ na temperaturowe warunki pracy półprzewodnikowych źródeł światła, a w konsekwencji na ich temperaturę złącza T_j .

8.2.1. Wpływ konstrukcji radiatora

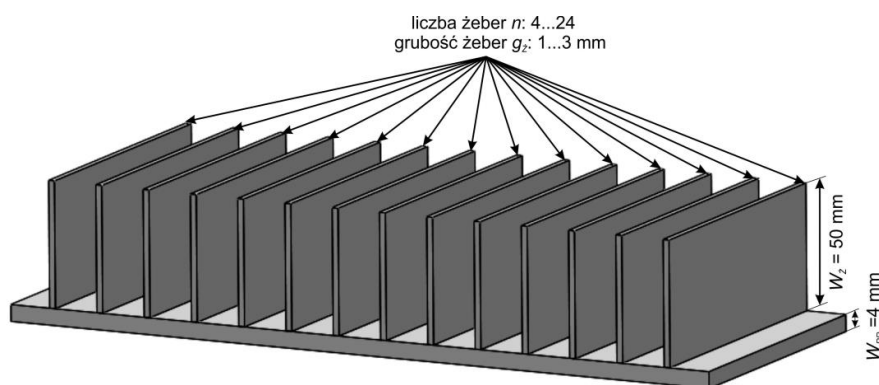
Do badań szczegółowych związanych z wpływem konstrukcji radiatora na temperaturę złącza T_j półprzewodnikowych źródeł światła przyjęto panel 2 x 6, co wynika z wcześniejszych wyników badań, związanych z wpływem liczby źródeł LED na temperaturę złącza T_j . Do symulacji przyjęto wyznaczone parametry źródła LED typu A (tab. 7.3 i 7.4), zainstalowane na podłożu MCPCB, w odległości od siebie $d = 25$ mm. Symulacje przeprowadzono dla maksymalnej badanej wartości prądu przewodzenia $I_F = 1050$ mA i odpowiadającej jej wartości mocy cieplnej P_H . Dla wymienionej wartości I_F wyznaczono najwyższe wartości mocy cieplnej P_H oraz rezystancji termicznej R_{thj-c} , co odpowiada najbardziej niekorzystnym warunkom termicznym. Wymiar obwodu drukowanego MCPCB, na którym zainstalowano źródła LED, wynosił 146 x 44 mm, natomiast wymiar podstawy radiatora to 180 x 70 x 4 mm. Pozostałe parametry cieplne modelu nie uległy zmianie w stosunku do wcześniejszych badań symulacyjnych (pkt 8.1). W celu wyznaczenia wpływu na temperaturę złącza T_j liczby żeber radiatora n i wynikającej z niej odległości pomiędzy nimi d_z , w początkowej fazie założono, że radiator ma cztery żebra, a następnie liczba ta była zwiększana do dwudziestu czterech,

z krokiem co dwa żebra. Wysokość żeber W_z była stała i wynosiła 30 mm, natomiast grubość żeber g_z zmieniano w zakresie 1–3 mm, z krokiem co 0,5 mm (rys. 8.12).

a)



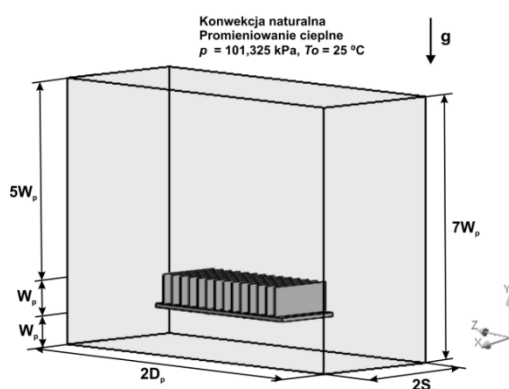
b)



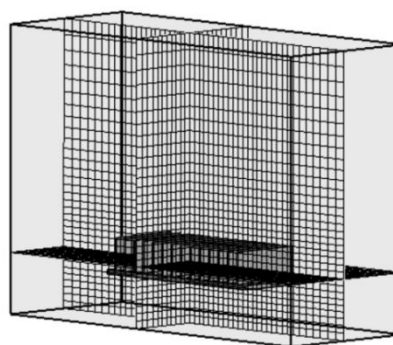
Rys. 8.12. Model badanego radiatora ze zmienną liczbą i grubością żeber: a) widok przedni, b) widok boczny

Warunki brzegowe oraz domenę obliczeniową dla badanego modelu symulacyjnego przyjęto analogicznie do wcześniejszych badań symulacyjnych i przedstawiono na rys. 8.13.

a)

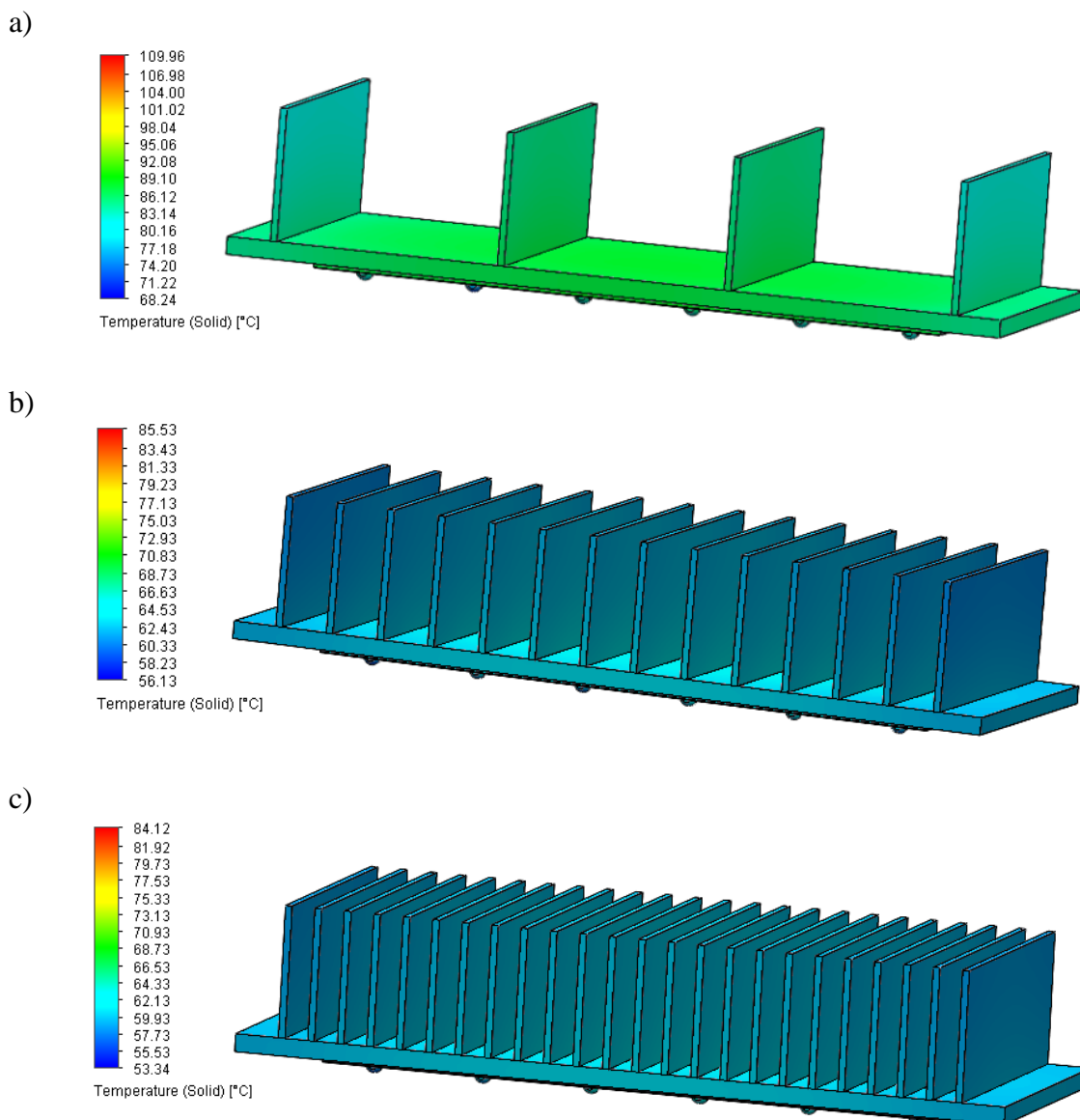


b)



Rys. 8.13. Model symulacyjny panelu LED z radiatorem z czternastoma żebrami: a) domena obliczeniowa wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi, b) przekrój siatki obliczeniowej wzdłuż osi XYZ

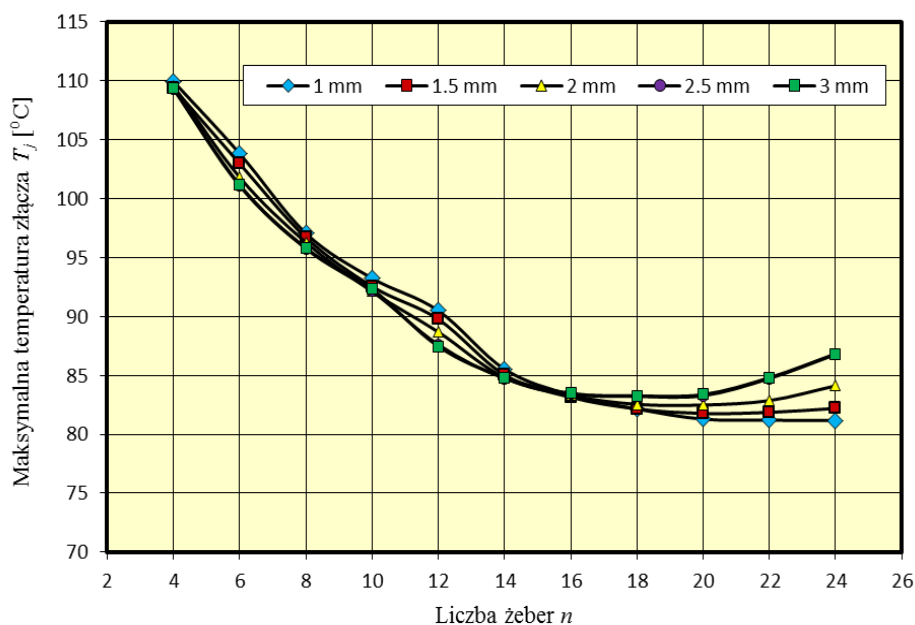
Rozkład temperatury dla panelu LED z radiatorem wyposażonym w 4, 14 oraz 24 żebra o grubości $g_z = 2$ mm i wysokości $W_z = 30$ mm przedstawiono na rys. 8.14.



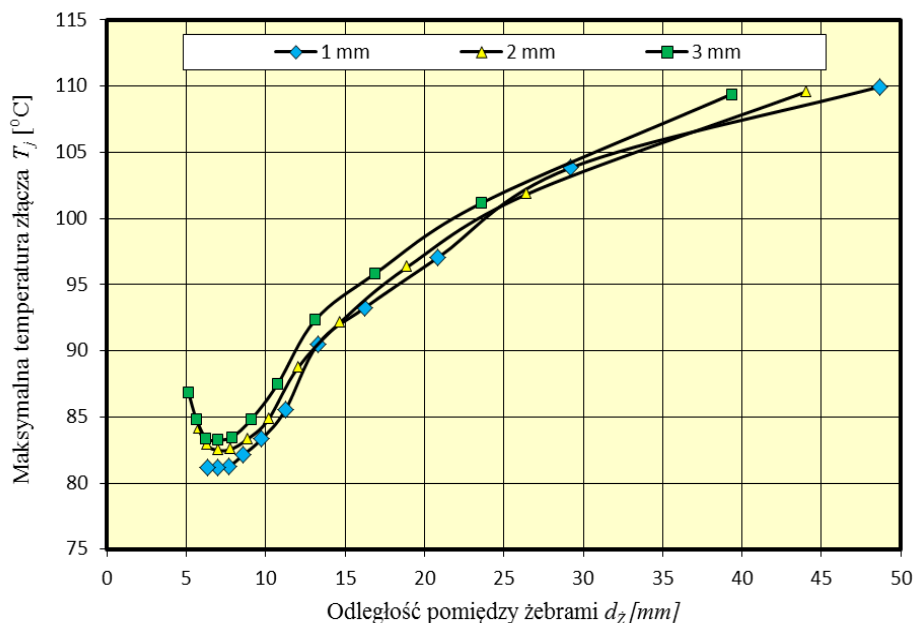
Rys. 8.14. Rozkład temperatury panelu LED z radiatorem o różnej liczbie żeber: a) 4 żebra, b) 14 żeber, c) 24 żebra

Dla radiatora z 4 żebrami maksymalna temperatura złącza T_j zainstalowanych źródeł panelu LED uzyskała wartość prawie 110°C . W przypadku radiatora z 14 żebrami maksymalna wartość temperatury złącza T_j wyniosła $85,5^{\circ}\text{C}$, co stanowiło zmniejszenie wartości o ok. 23% w stosunku do radiatora z 4 żebrami. Spadek temperatury T_j wynika ze zwiększonej powierzchni radiatora o dodatkowe żebra, konsekwencją czego jest większa sumaryczna pojemność cieplna radiatora C_p . Zwiększenie liczby żeber radiatora o kolejnych 10, do 24 nie wniosło znaczącej zmiany w stosunku do radiatora z 14 żebrami. Maksymalna temperatura złącza T_j w wymienionym przypadku była niższa tylko o niecałe 2°C i wyniosła odpowiednio $84,1^{\circ}\text{C}$.

Wpływ liczby żeber radiatora n o różnej grubości na maksymalną temperaturę złącza T_j zainstalowanych źródeł panelu LED przedstawiono na rys. 8.15. Liczbę żeber n oraz odległość pomiędzy nimi d_z rozpatrywano dla stałych wymiarów podstawy radiatora (rys. 8.12). W początkowej fazie zwiększanie sumarycznej liczby żeber radiatora do 14, skutkowało praktycznie liniowym spadkiem wartości maksymalnej temperatury złącza T_j . W wymienionym zakresie zwiększanie liczby żeber o kolejne 2, powodowało zmniejszanie maksymalnej temperatury T_j średnio o ok. 5 %, w przypadku wszystkich badanych grubości żeber g_z . Zwiększenie sumarycznej liczby żeber radiatora z 14 do 16, skutkowało już nieznacznym obniżeniem wartości temperatury złącza T_j , natomiast dalsze zwiększanie liczby żeber nie powodowało już obniżania temperatury T_j . Przy grubości żeber g_z wynoszącej 2; 2,5 oraz 3 mm skutkowało zwiększeniem temperatury złącza T_j . Na podstawie wyników badań symulacyjnych można stwierdzić, że zwiększanie liczby żeber radiatora n wpływa na obniżenie wartości temperatury T_j do pewnej granicznej liczby żeber. Instalowanie dodatkowych żeber powyżej tej liczby nie wpływa już na poprawę warunków termicznych źródeł, a nawet może je pogorszyć. Wiąże się to z małą przestrzenią pomiędzy żebrami i utrudnionymi warunkami konwekcyjnego odbioru ciepła w tej części radiatora (rys. 8.16).



Rys. 8.15. Maksymalna temperatura złącza T_j źródeł panelu LED w funkcji liczby żeber radiatora



Rys. 8.16. Maksymalna temperatura złącza T_j źródeł panelu LED w funkcji odległości pomiędzy żebrami d_z radiatora

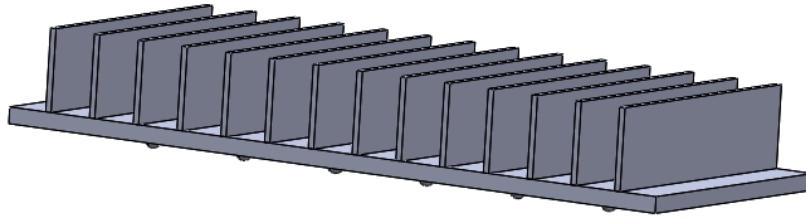
Ze zmianą liczby żeber radiatora n jest bezpośrednio związana odległość pomiędzy nimi d_z (rys. 8.16). Odległość ta powinna umożliwiać swobodny, konwekcyjny przepływ powietrza pomiędzy żebrami, zapewniając efektywny odbiór ciepła z ich powierzchni. Dla analizowanych przypadków odległość d_z zawierająca się w przedziale 6–8 mm umożliwiała uzyskanie jak najmniejszej temperatury złącza T_j .

Zmiana grubości żeber g_z nie wpływała znacząco na wartość temperatury T_j źródeł panelu LED, natomiast przy liczbie żeber n wynoszącej od 20 do 24 i grubości żeber g_z wynoszących odpowiednio 2; 2,5 oraz 3 mm można zauważyć pogorszenie termicznych warunków pracy i wzrost temperatury T_j . Jak przedstawiono wcześniej jest to związane z utrudnionym konwekcyjnym przepływem powietrza pomiędzy nimi.

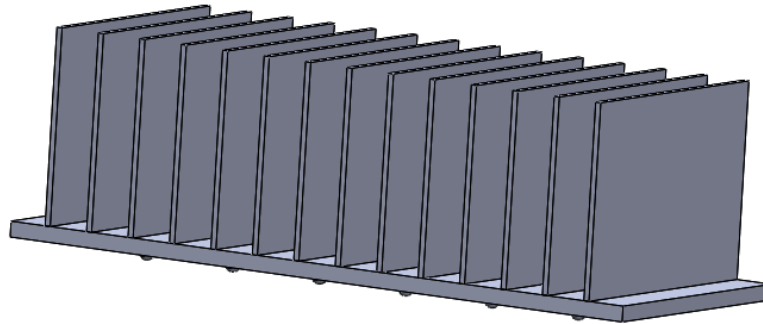
Dla analizowanego radiatora panelu LED (rys. 8.12) można przyjąć, że efektywna liczba żeber n , zapewniająca poprawne, termiczne warunki pracy źródeł LED, mieści się w przedziale od czternastu do osiemnastu.

Dla wyznaczonego powyżej przedziału, związanego z efektywną liczbą żeber radiatora, symulacyjnie zbadano wpływ wysokości żeber na temperaturę złącza T_j zainstalowanych źródeł LED. Wysokość żeber radiatora W_z zmieniana była w zakresie od 20 do 50 mm, z krokiem co 5 mm, natomiast ich grubość była stała: $g_z = 1,5$ mm.

a)

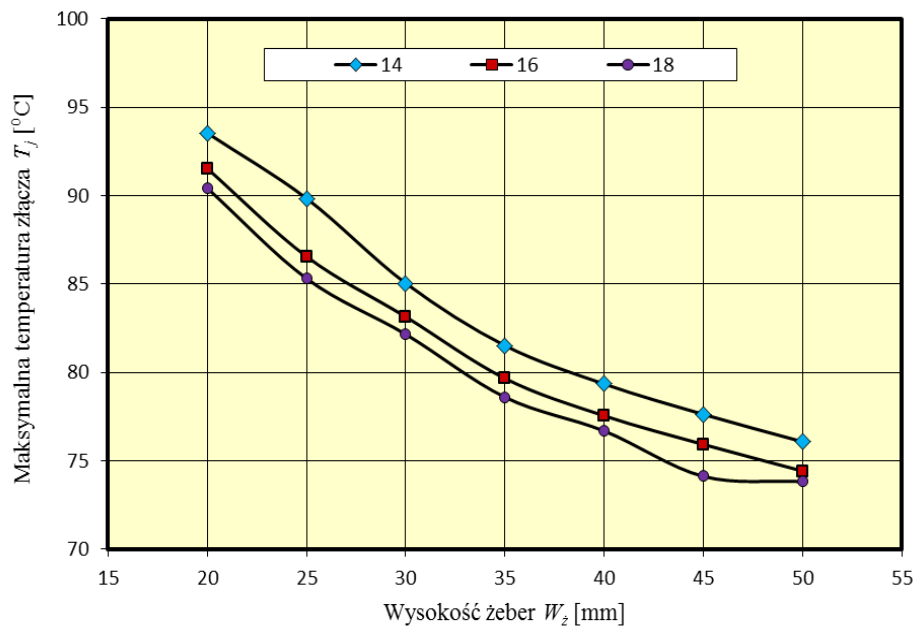


b)



Rys. 8.17. Model radiatora panelu LED z 14 żebrami i wysokością żeber:
a) $W_z = 20$ mm, b) $W_z = 50$ mm

Na rysunku 8.17 przedstawiono model badanego radiatora dla dwóch skrajnych wysokości żeber, a rys. 8.18 przedstawia wpływ wysokości żeber radiatora na maksymalną temperaturę złącza T_j zainstalowanych źródeł LED.



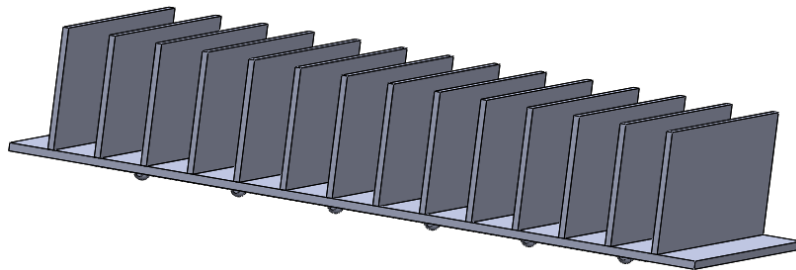
Rys. 8.18. Maksymalna temperatura złącza T_j zainstalowanych źródeł panelu LED w funkcji wysokości żeber

Najwyższa wartość temperatury złącza T_j źródeł LED została wyznaczona dla najniższej wysokości żeber wynoszącej $W_z = 20$ mm. Wraz ze stopniowym wzrostem wysokości

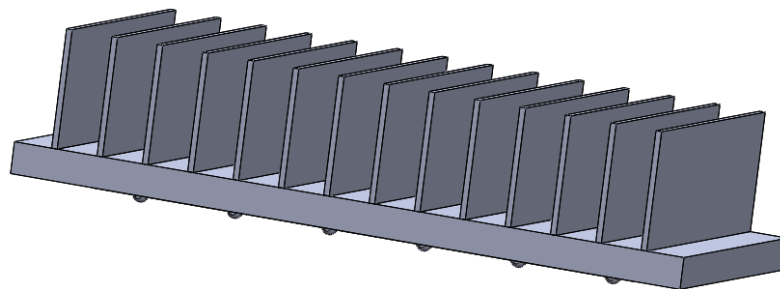
żeber o 5 mm temperatura T_j zmniejszała się, co jest związane z większą sumaryczną powierzchnią radiatora i jego większą pojemnością cieplną C_p . Średni spadek temperatury T_j wynosił ok. 5 % przy zwiększaniu wysokości do 35 mm. Powyżej tej wartości spadek maksymalnej temperatury T_j był mniejszy i wynosił ok. 2%. Dla radiatora z 18 żebrami wzrost wysokości żeber z 45 do 50 mm, nie wpłynął już na zmniejszenie wartości temperatury złącza źródeł LED, co może świadczyć o uzyskaniu granicznej wartości powierzchni radiatora, której zwiększanie, nie wpływa już w znaczącym stopniu na termiczne warunki pracy źródeł LED i ich temperaturę złącza T_j .

Kolejnym etapem związanym z modelowaniem termicznym konstrukcji radiatora było określenie wpływu grubości podstawy radiatora W_{PR} na temperaturowe warunki pracy półprzewodnikowych źródeł światła. Do badań zamodelowano radiator z zainstalowanymi jednakowymi 14 żebrami o wysokości W_z wynoszącej 30 mm i grubości $g_z = 1,5$ mm, co wynika z rezultatów wcześniejszych badań symulacyjnych. Grubość podstawy radiatora W_{PR} była zmieniana w zakresie od 2 do 8 mm, z krokiem co 1 mm. Warunki pracy źródeł światła oraz warunki brzegowe panelu LED zostały określone w sposób analogiczny do wcześniejszych badań związanych z wpływem liczby i wysokości żeber badanego radiatora.

a)



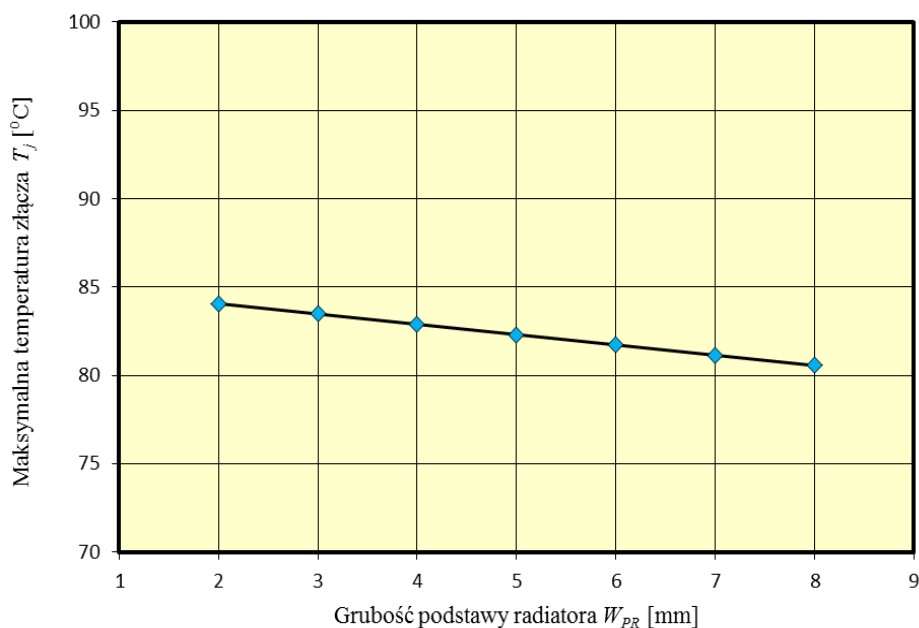
b)



Rys. 8.19. Model radiatora panelu LED z podstawą o grubości: a) $W_{PR} = 2$ mm, b) $W_{PR} = 8$ mm

Wpływ grubości podstawy radiatora na maksymalną temperaturę złącza T_j zainstalowanych źródeł LED przedstawiono na rys. 8.20. Najwyższa wartość temperatury złącza T_j wynosząca $83,9^{\circ}\text{C}$, została wyznaczona dla grubości podstawy radiatora wynoszącej

$W_{PR} = 2$ mm. Wraz ze zwiększaniem grubości podstawy radiatora odnotowano nieznaczny wpływ na maksymalną temperaturę T_j zainstalowanych źródeł LED. Przy zmianie grubości radiatora w zakresie od 2 do 5 mm praktycznie nie odnotowano zmiany wartości temperatury T_j . W zakresie od 5 do 8 mm zwiększanie grubości podstawy radiatora o 1 mm wpływało w sposób marginalny na zmniejszenie wartości temperatury T_j , gdzie wzrost grubości podstawy o 1 mm skutkowało obniżeniem maksymalnej temperatury złącza T_j zainstalowanych źródeł LED średnio o ok. 1%.



Rys. 8.20. Maksymalna temperatura złącza T_j zainstalowanych źródeł panelu LED w funkcji grubości podstawy radiatora W_{PR}

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych obrazują wpływ konstrukcji radiatora na rozkład temperatury i temperaturę złącza T_j źródeł panelu LED. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że największy wpływ na rozkład temperatury panelu LED, związany z konstrukcją radiatora, ma odpowiedni dobór liczba żeber n i odległości pomiędzy nimi d_z . Większa liczba żeber radiatora, a zatem większa jego sumaryczna powierzchnia i pojemność cieplna C_p wpływają na poprawę warunków termicznych źródeł panelu LED. Z kolei nadmierna liczba żeber radiatora, skutkująca małą odległością pomiędzy żebrami d_z , może wpływać na pogorszenie termicznych warunków pracy źródeł LED, co jest związane z utrudnionym konwekcyjnym przepływem powietrza pomiędzy nimi. Poprawę warunków termicznych panelu LED można również uzyskać, przez zwiększanie wysokości żeber radiatora W_z . Często występującym tutaj ograniczeniem są wymiary zewnętrzne radiatora. Zmiana grubości żeber g_z , jak również grubości podstawy radiatora W_{PR} , wpływała w nieznacznym stopniu na rozkład temperatury panelu LED i temperaturę złącza T_j półprzewodnikowych źródeł światła.

8.2.2. Wpływ materiału radiatora

Do produkcji radiatorów stosowanych do chłodzenia źródeł LED, tak jak w przypadku innych urządzeń elektronicznych wysokiej mocy, najczęściej są używane materiały metalowe. Dobór odpowiedniego materiału jest związany z wartościami parametrów termicznych, takich jak: współczynnik przewodzenia ciepła k czy współczynnik rozszerzalności cieplnej CTE (ang. *Coefficient of Thermal Expansion*). Przy doborze odpowiedniego materiału istotna jest również jego gęstość ρ , jak i koszt produkcji.

Najczęściej stosowanym materiałem do produkcji radiatorów jest aluminium, charakteryzujące się stosunkowo wysoką wartością przewodności cieplnej k , małą wagą oraz akceptowalnym kosztem produkcji. W związku z tym, że czyste chemicznie aluminium ma ograniczone możliwości formowania odlewniczego, konieczne jest domieszkowanie z innymi pierwiastkami, których dodanie zmienia właściwości mechaniczne oraz plastyczne stopu. Niestety, domieszkowanie jest również związane z pogorszeniem współczynnika przewodzenia ciepła k , którego wartość może być niższa nawet o jedną trzecią, w zależności od udziału procentowego domieszkowanych pierwiastków. Do produkcji radiatorów najczęściej wykorzystywany jest stop aluminium AL5052, którego domieszkowanie w głównej części stanowi magnez oraz chrom, jak również stop aluminium Al6061, domieszkowany głównie krzemem, żelazem oraz magnezem.

Popularnym materiałem o dobrych parametrach termicznych, stosowanym do produkcji radiatorów jest miedź. Charakteryzuje się ona wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła k , jednak stosunkowo duża gęstość ρ (ponad trzy razy większa od aluminium) i stosunkowo wysoki koszt produkcji sprawiają, że radiatory miedziane są wykorzystywane w zastosowaniach specjalnych i sytuacjach, gdy nie mogą być użyte radiatory ze stopów aluminiowych.

Innymi materiałami, z którymi można się spotkać przy produkcji radiatorów jest cynk oraz stop miedzi z cynkiem – mosiądz. Materiały te mają jednak marginalne zastosowanie do układów chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła. Zdecydowaną większość stanowią radiatory wykonane ze stopów aluminium i rzadziej z miedzi [19].

W 2012 roku firma Applied Nanotech opublikowała wyniki badań nad nowym materiałem, mającym oferować lepsze parametry, niż dotychczas stosowane materiały do produkcji systemów odprowadzania ciepła [116]. Materiał na bazie węgla, o nazwie CarbAl, miał być dedykowany głównie do produkcji radiatorów pasywnych i stosowany w wielu obszarach elektroniki, m.in. w rozwiązaniach radiacyjnych do półprzewodnikowych źródeł światła. De-

klarowana przewodność cieplna k nieznacznie mniejsza niż miedzi ($350 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) oraz gęstość mniejsza niż aluminium sprawiały, że z nowym materiałem wiązano duże nadzieje. Miał służyć do produkcji radiatorów o bardzo dobrych właściwościach termicznych, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji. Niestety, do dnia dzisiejszego brak jest udokumentowanych przypadków zastosowania na szerszą skalę materiału CarbAl do produkcji radiatorów.

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wyniki badań symulacyjnych obejmujących wpływ rodzaju materiału radiatora na rozkład temperatury panelu LED. Do badań wykorzystano budowę panelu LED opisaną we wcześniejszym rozdziale, dotyczącym wpływu konstrukcji radiatora na temperaturę złącza T_j zainstalowanych źródeł LED. Panel był zbudowany z 12 źródeł LED oznaczonych jako LED typu A (tab. 7.1.), a prąd przewodzenia $I_F = 1050 \text{ mA}$. Radiator posiadał 14 żeber o wysokości $W_z = 30 \text{ mm}$ oraz grubości $g_z = 1,5 \text{ mm}$, co wynikało z rezultatów wcześniejszych badań symulacyjnych. Badania przeprowadzono dla pięciu materiałów radiatora, których podstawowe parametry zostały przedstawione w tab. 8.2.

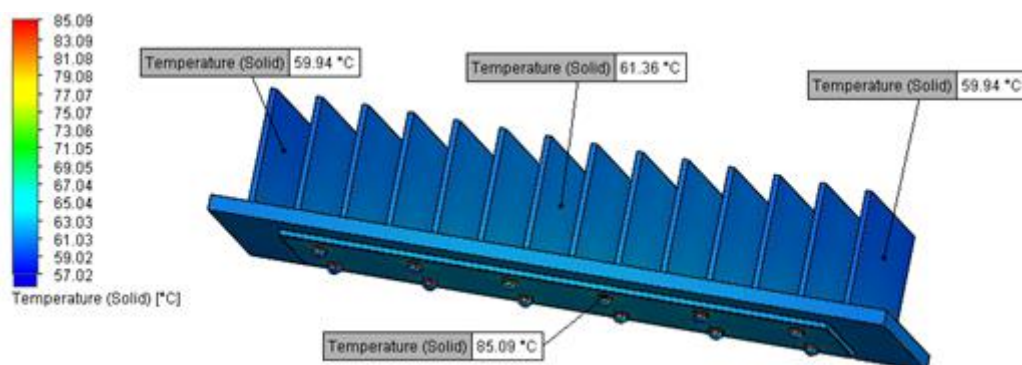
Tabela 8.2. Badane materiały radiatora oraz ich wybrane parametry cieplne i fizyczne [92, 123]

Materiał	Przewodność cieplna k [W/m·K]	Gęstość ρ [kg/m ³]
Stop aluminium Al5052	140	2680
Stop aluminium Al6061	155	2700
Miedź	400	8960
Mosiądz	110	8400
Cynk	115	7140

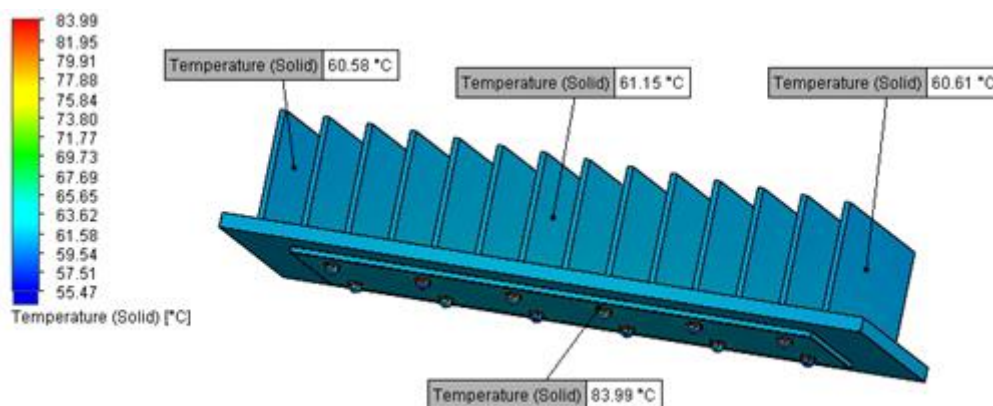
Badania zrealizowano dla warunków brzegowych analogicznych do wcześniej przeprowadzanych badań symulacyjnych, tak jak przedstawiono na rys. 8.13.

Na rysunku 8.21 przedstawiono rozkład temperatury panelu LED wraz z zaznaczonymi wybranymi punktami pomiarowymi dla radiatora wykonanego ze stopu aluminium 5052 oraz miedzi, a na rys. 8.22 maksymalną temperaturę złącza T_j zainstalowanych źródeł światła w stanie ustalonym w zależności od materiału radiatora.

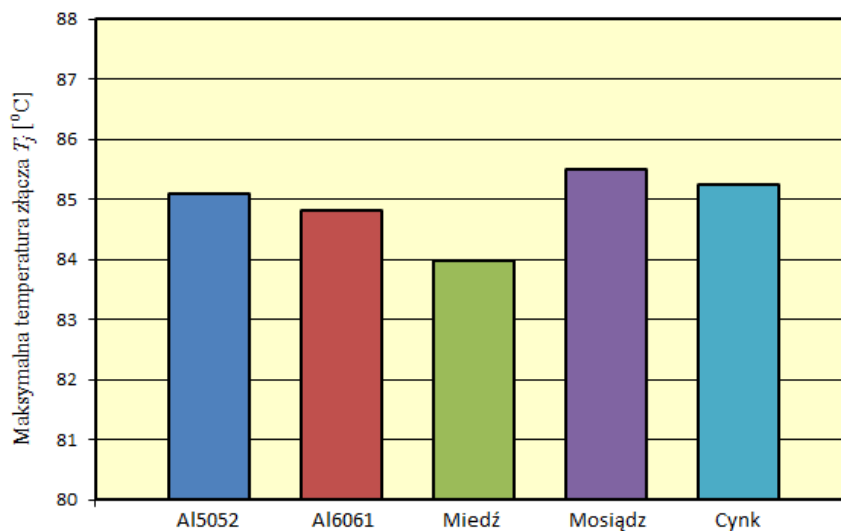
a)



b)



Rys. 8.21. Rozkład temperatury panelu LED dla radiatora wykonanego z: a) stopu aluminium Al5052, b) miedzi



Rys. 8.22. Maksymalna temperatura złącza T_j w zależności od materiału radiatora

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że materiał radiatora nie wpływał w sposób znaczący na rozkład temperatury panelu LED, jak również na temperaturę złącza zainstalowanych źródeł światła. Najniższa temperatura złącza $T_j = 84^\circ\text{C}$, została wy-

znaczona dla radiatora wykonanego z miedzi. Dla radiatora wykonanego z mosiądzu, którego współczynnik przewodzenia ciepła k jest prawie czterokrotnie niższy w stosunku do miedzi, maksymalna temperatura złącza T_j była wyższa jedynie o $1,5^\circ\text{C}$ w stosunku do radiatora miedzianego i stanowiła wzrost wynoszący niespełna 2%. Dla panelu LED z radiatorem wykonanym ze stopu aluminium, zarówno Al5052 jak i Al6061, maksymalna temperatura złącza T_j była zbliżona i wynosiła ok. 85°C .

8.3. Modelowanie termiczne obwodów drukowanych

Półprzewodnikowe źródła światła są montowane na płytkach obwodów drukowanych, umożliwiając w ten sposób zasilanie napięciowe i polaryzację w kierunku przewodzenia. Montaż na płytce obwodu drukowanego umożliwia również konfigurowanie paneli LED składających się z kilkunastu, kilkudziesięciu czy kilkuset półprzewodnikowych źródeł światła. Montaż źródeł LED odbywa się zazwyczaj w sposób powierzchniowy, gdzie do płytki drukowanej są przylutowywane wszystkie pady tj. dwa pady elektryczne (katoda, anoda) oraz pad termiczny.

Ciepło generowane przez półprzewodnikowe źródła światła P_H w pierwszej kolejności jest przewodzone do obwodu drukowanego, by następnie przez warstwę łączącą trafić do radiatora, gdzie w sposób konwekcyjny zostaje odprowadzone do otoczenia. Możliwość szybkiego odbioru ciepła przez płytkę obwodu drukowanego i dalszego, skutecznego przekazania go do radiatora ma bardzo istotne znaczenie w kontekście zarządzania ciepłem półprzewodnikowych źródeł światła, umożliwiającym efektywne temperaturowe warunki pracy źródeł LED.

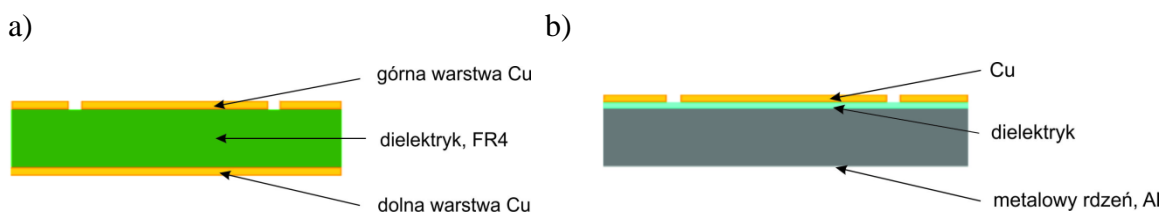
Obecnie najczęściej są spotykane dwa rozwiązania technologiczne związane z produkcją obwodów drukowanych, a mianowicie obwody z laminatem szklano-epoksydowym FR4 (ang. *Printed Circuit Board - PCB*) oraz obwody z metalowym rdzeniem (ang. *Metal Core Printed Circuit Board - MCPCB*) [115, 121]. Płytki obwodu drukowanego na bazie laminatu szklano-epoksydowego FR4 są zbudowane z górnej warstwy miedzi tworzącej ścieżki przewodzące, warstwy dielektryka stanowiącej najczęściej włókno szklane z żywicą epoksydową (FR4) oraz z dolnej warstwy miedzi. Obwody na bazie laminatu szklano-epoksydowego FR4 charakteryzują się stosunkowo prostą technologią wykonania oraz niskimi kosztami produkcji, dzięki czemu znalazły szerokie zastosowanie w układach elektronicznych. Wadą obwodów PCB jest natomiast niska wartość przewodności cieplnej, związana z wysoką wartością oporu termicznego zastosowanego laminatu FR4. Konsekwencją tego są problemy z zastoso-

waniem obwodów PCB w układach elektronicznych dużej mocy, co wiąże się z trudnością odprowadzenia ciepła z tych układów.

Lepszymi właściwościami termicznymi charakteryzują się obwody drukowane z metalowym rdzeniem (MCPCB). Podstawę w nich stanowi rdzeń metalowy, którym jest najczęściej stop aluminium, rzadziej miedź czy stal. Na rdzeniu metalowym jest naniesiona stosunkowo cienka warstwa dielektryka o przewodności cieplnej znacznie wyższej niż w przypadku laminatu szklano-epoksydowego FR4. Górną warstwę stanowią miedziane ścieżki przewodzące o ustandaryzowanej grubości. Przewodność cieplna obwodów MCPCB jest znacznie wyższa w stosunku do obwodów PCB, co jest związane z zastosowaniem cieńszej warstwy materiału dielektrycznego o znacznie lepszych parametrach termicznych.

W półprzewodnikowych źródłach światła wysokiej mocy, gdzie efektywne odprowadzanie ciepła ze złącza półprzewodnikowego ma istotne znaczenie w kontekście poprawnej pracy źródeł LED, w większości przypadków są stosowane obwody drukowane z metalowym rdzeniem MCPCB. Znacznie lepsze parametry cieplne wymienionych obwodów, w porównaniu z obwodami na bazie laminatu szklano-epoksydowego FR4, sprawiają, że ciepło ze źródeł LED jest w sposób efektywniejszy odbierane, a następnie przekazywane do radiatora. Na rysunku 8.23 przedstawiono typową strukturę obwodów drukowanych PCB oraz MCPCB, a w tab. 8.3 - przykładowe grubości warstw wraz z odpowiadającym im współczynnikiem przewodzenia ciepła.

Dla dwóch wspomnianych rodzajów obwodów drukowanych przeprowadzono badania symulacyjne. Do badań wykorzystano budowę panelu LED przedstawioną w pkt 8.2.2 dla radiatora wykonanego ze stopu aluminium Al5052. Symulację wykonano dla prądu przewodzenia źródeł LED $I_F = 1050$ mA. Wykorzystane w badaniach symulacyjnych, grubości warstw oraz parametry cieplne materiałów tworzących obwody drukowane przedstawiono w tab. 8.3. Warunki brzegowe ustalono w sposób analogiczny do zastosowanego we wcześniejszych badaniach symulacyjnych (rys. 8.13).



Rys. 8.23. Przykładowa struktura obwodów: a) PCB, b) MCPCB

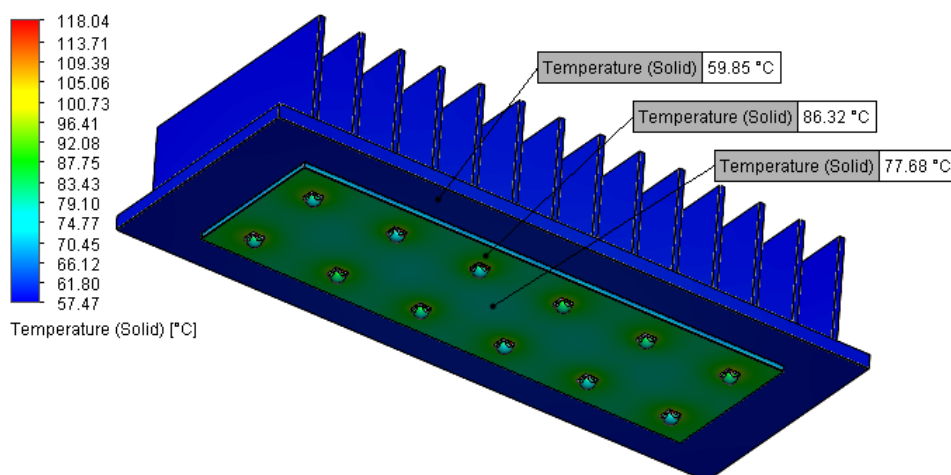
Tabela 8.3. Przykładowe zestawienie warstw i ich parametrów w obwodów drukowanych:
a) PCB, b) MCPCB [115]

	Warstwa/Materiał	Przewodność cieplna k [W/m·K]	Grubość [μm]
PCB	Górna warstwa Cu	400	70
	Dielektryk, FR4	0,2	1588
	Dolna warstwa Cu	400	70
MCPCB	Cu	400	35
	Dielektryk	2	100
	Rdzeń metalowy, Al5052	140	1500

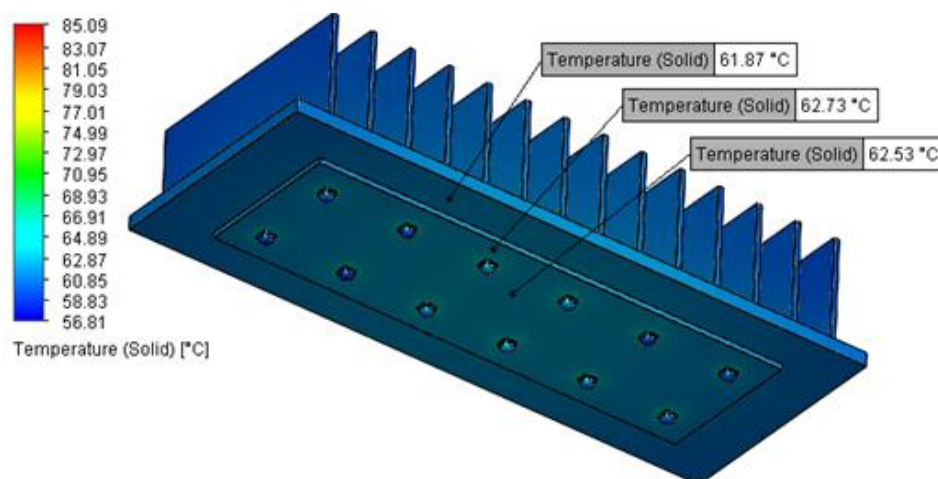
Na rysunku 8.24 przedstawiono wyniki rozkładu temperatury panelu LED, gdzie źródła LED zostały zainstalowane na obwodzie drukowanym z laminatem szklanoepoksydowym FR4 oraz na obwodzie drukowanym z metalowym rdzeniem. W przypadku zastosowania podłoża PCB maksymalna temperatura złącza T_j zainstalowanych źródeł LED była wyższa niż 118°C . Charakterystyczny w tym przypadku jest duży – wynoszący ponad 20°C – gradient temperatury pomiędzy górną stroną podłoża PCB a radiatorem, co jest związane z małą przewodnością cieplną podłoża i z trudnością efektywnego odprowadzenia ciepła do radiatora. Podłoże PCB charakteryzuje się również nierównomiernym rozkładem temperatury na swojej powierzchni. W bliskim sąsiedztwie zainstalowanych źródeł LED temperatura na powierzchni PCB jest średnio o 10°C wyższa w stosunku do środkowej części obwodu drukowanego.

Zastosowanie podłoża MCPCB w znaczący sposób poprawiło termiczne warunki pracy półprzewodnikowych źródeł światła panelu LED. Maksymalna temperatura złącza T_j w tym przypadku wyniosła 85°C i była niższa o 33°C , w stosunku do źródeł LED zainstalowanych na podłożu PCB, co stanowiło spadek o 28%. Rozkład temperatury na podłożu MCPCB jest równomierny, a gradient temperatury pomiędzy górną częścią podłoża i radiatorem nieznaczący, co świadczy o dobrym odprowadzaniu ciepła do radiatora.

a)



b)



Rys. 8.24. Rozkład temperatury panelu LED z obwodem drukowanym: a) PCB, b) MCPCB

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych potwierdzają słuszość stosowania obwodów drukowanych z metalowym rdzeniem (MCPCB) do półprzewodnikowych źródeł światła wysokiej mocy, gdzie temperaturowe warunki pracy mają kluczowe znaczenie dla stabilnej i efektywnej pracy źródeł LED. Obwody drukowane z metalowym rdzeniem w znaczący sposób poprawiają temperaturowe warunki pracy półprzewodnikowych źródeł światła w stosunku do obwodów drukowanych z laminatem szklano-epoksydowym.

8.4. Wpływ środowiska zewnętrznego na rozkład temperatury panelu LED

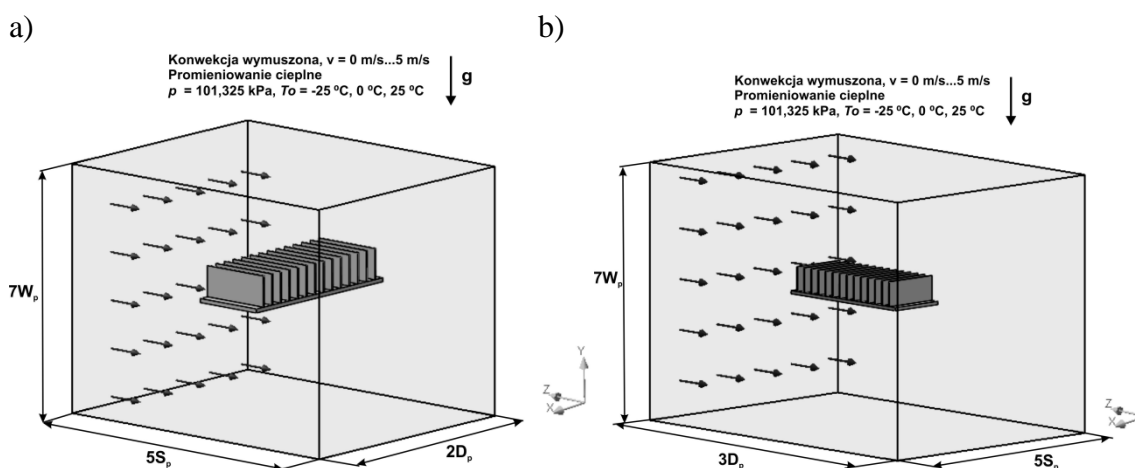
Półprzewodnikowe źródła światła często pracują w określonych warunkach środowiskowych, które wpływają na temperaturowe warunki pracy źródeł LED. Przykładem może być tutaj np. oprawa oświetlenia drogowego, pracująca przy zmieniających się warunkach

otoczenia, gdzie zarówno sezonowa, miesięczna, jak i dobowa temperatura otoczenia T_o może się zmieniać w szerokich granicach od -30 do 45°C [35].

Innym czynnikiem środowiskowym oddziałującym na termiczne warunki pracy opraw z półprzewodnikowymi źródłami światła jest wiatr. Naturalny ruch powietrza może wspomagać wymianę ciepła pomiędzy oprawą z półprzewodnikowymi źródłami światła a otoczeniem. Odpowiednia konstrukcja korpusu oprawy jak i radiatora, umożliwiająca przepływ powietrza, w sposób naturalny może się przyczyniać do poprawy termicznych warunków pracy źródeł LED. W warunkach klimatycznych Polski, średnia roczna prędkość wiatru zawiera się w przedziale od $2,8$ do $3,5$ m/s, gdzie nieco niższe wartości występują w porze letniej, a wyższe w porze zimowej [118].

W tym kontekście przeprowadzono badania symulacyjne związane z wpływem temperatury otoczenia T_o i prędkości przepływu powietrza v na rozkład temperatury i maksymalną temperaturę złącza T_j źródeł panelu LED. Symulacje zrealizowano dla panelu LED wykorzystanego do badań w pkt 8.2.2. Panel obejmował konfigurację 12 źródeł LED typu A, radiator został wykonany ze stopu aluminium Al5052 o grubości podstawy $W_{PR} = 4$ mm oraz 14 żeber o wysokości wynoszącej $W_z = 30$ mm. Źródła LED zainstalowane zostały na podłożu MCPCB, a ich prąd przewodzenia $I_F = 1050$ mA.

Symulacje przeprowadzono dla trzech wartości temperatury otoczenia T_o (-25 ; 0 oraz 25°C) oraz dla wymuszonego przepływu powietrza w zakresie od 0 do 5 m/s. Dodatkowo, kierunek przepływu powietrza został ustalony w dwojaki sposób: na wprost radiatora oraz z jego boku, tak jak przedstawiono na rys. 8.25.

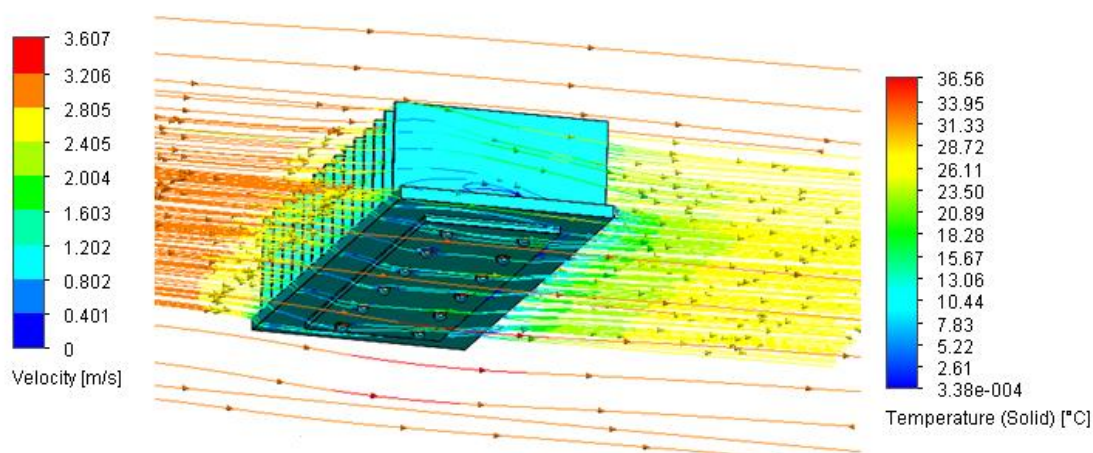


Rys. 8.25. Domena obliczeniowa panelu LED dla wymuszonego przepływu powietrza: a) z boku radiatora, b) na wprost radiatora

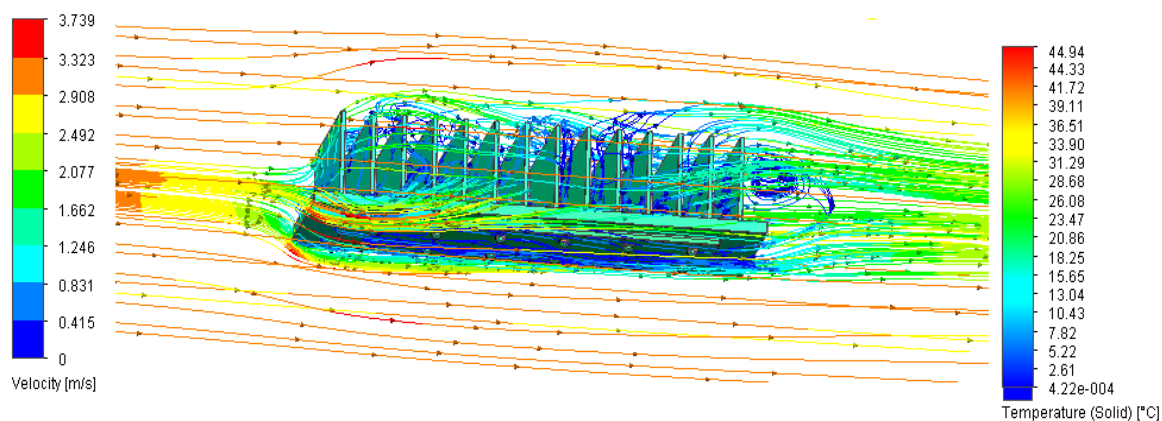
Rozkład temperatury panelu LED oraz trajektorie przepływu powietrza dla wybranych warunków zewnętrznych ($T_o = 0^\circ\text{C}$, $v = 3$ m/s) zostały przedstawione na rys. 8.26. Dla wymu-

szanego przepływu powietrza w kierunku bocznym radiatora maksymalna temperatura złącza T_j wyniosła $36,5^{\circ}\text{C}$, natomiast dla przepływu w kierunku na wprost radiatora temperatura ta była wyższa o 23% i osiągnęła wartość prawie 45°C . Niższa temperatura złącza T_j źródeł panelu LED, w którym przepływ powietrza odbywał się w kierunku bocznym radiatora, jest związana z efektywniejszym przepływem powietrza, które opływa żebra radiatora, wpływając na poprawę warunków termicznych panelu LED. W przypadku przepływu powietrza w kierunku na wprost radiatora cząsteczki powietrza mają utrudnioną drogę, uderzając w żebra radiatora, co zostało dokładnie przedstawione na rys. 8.26b.

a)



b)

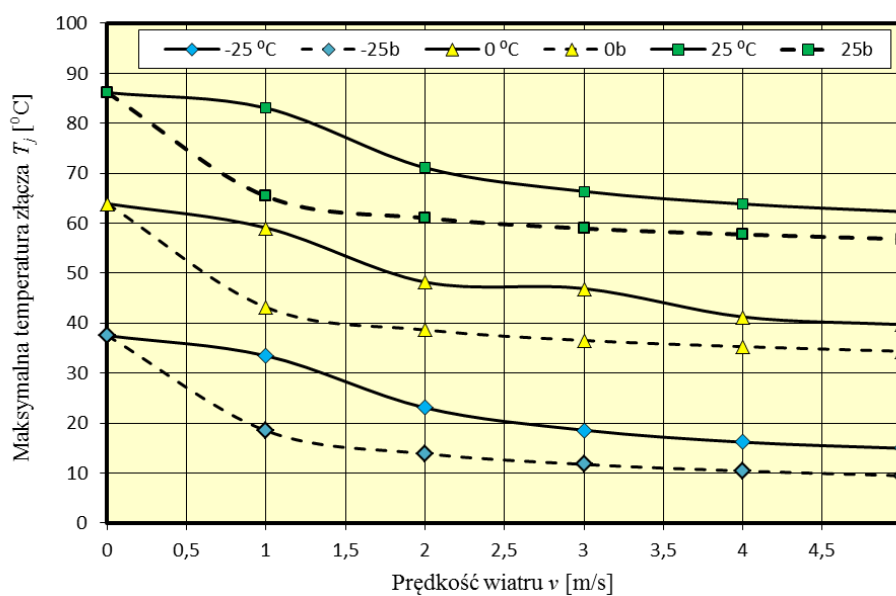


Rys. 8.26. Rozkład temperatury oraz trajektoria przepływu powietrza dla badanego panelu LED przy $T_o = 0^{\circ}\text{C}$ oraz $v = 3\text{ m/s}$: a) przepływ powietrza z boku radiatora, b) przepływ powietrza na wprost radiatora

Wpływ temperatury otoczenia T_o oraz prędkości wiatru v na maksymalną temperaturę złącza T_j źródeł panelu LED zilustrowano na rys. 8.27. Wyniki przedstawiono dla trzech wartości temperatury otoczenia $T_o = -25; 0; 25^{\circ}\text{C}$ oraz dla dwóch kierunków przepływu powietrza. Liniją przerywaną oznaczono temperaturę złącza T_j dla przypadku, gdy przepływ powietrza był ustalony w kierunku bocznym radiatora (rys. 8.25a), natomiast linią ciągłą dla kie-

runku na wprost radiatora (rys. 8.25b). Prędkość wiatru zmieniała się w zakresie od 0 do 5 m/s.

W przypadku konwekcji swobodnej ($v = 0$ m/s) zwiększanie temperatury otoczenia T_o o wartość 25°C skutkowało analogicznym wzrostem temperatury złącza T_j . Dla wymuszonego przepływu powietrza ($v = 1\text{--}5$ m/s) wzrost temperatury T_j był zbliżony do wzrostu temperatury otoczenia T_o .



Rys. 8.27. Maksymalna temperatura złącza T_j zainstalowanych źródeł panelu LED w funkcji prędkości wiatru v

Na podstawie wyników można stwierdzić, że już stosunkowo nieduża prędkość wiatru, dochodząca do 2 m/s, w znaczący sposób poprawiała temperaturowe warunki pracy źródeł panelu LED. Dla prędkości wiatru wynoszącej 1 m/s temperatura złącza T_j dla bocznego kierunku przepływu powietrza zmniejszyła się średnio dla wszystkich trzech temperatur otoczenia T_o o ok. 20°C . W przypadku kierunku przepływu powietrza na wprost, przy prędkości wiatru 1 m/s spadek temperatury złącza T_j był rzędu 4°C . Jednak przy dalszym wzroście prędkości wiatru do 2 m/s temperatura złącza T_j była już średnio mniejsza o ok. 15°C . Dalszy wzrost prędkości wiatru do 5 m/s skutkował kolejnym obniżaniem wartości temperatury złącza T_j , jednak dynamika spadku wartości temperatury T_j była już w znaczącym stopniu mniejsza niż w przedziale zmian prędkości wiatru do 2 m/s.

Uzyskane wyniki badań dowodzą, że już stosunkowo nieduża wartość prędkości wiatru, dochodząca do 2 m/s, może w znacznym stopniu poprawić temperaturowe warunki pracy źródeł panelu LED. W wymienionym przedziale prędkości wiatru odnotowano największy spadek wartości temperatury złącza T_j . Dalszy wzrost prędkości wiatru już w mniejszym

stopniu oddziaływał na temperaturowe warunki pracy źródeł LED. Przy prędkości wiatru wynoszącej 5 m/s temperatura złącza T_j źródeł LED praktycznie nie zmieniła już swojej wartości w stosunku do prędkości wiatru wynoszącej 4 m/s. Można więc założyć, że dalszy wzrost prędkości wiatru nie wpływałby już na termiczne warunki pracy półprzewodnikowych źródeł światła.

W kontekście wietrznych warunków Polski, gdzie roczna średnia prędkość wiatru zawiera się w przedziale od 2,8 do 3,5 m/s, można stwierdzić, że wymienione prędkości wiatru mogą być wykorzystane do poprawy termicznych warunków pracy źródeł panelu LED, co potwierdziły wyniki przedstawionych badań symulacyjnych. W oprawach pracujących w warunkach zewnętrznych, m.in. oprawy drogowe czy iluminacyjne, dzięki odpowiedniej konstrukcji obudowy i radiatora, umożliwiającej swobodny przepływ powietrza, możliwe jest efektywne wykorzystanie naturalnych ruchów powietrza, co znacznie poprawia termiczne warunki pracy półprzewodnikowych źródeł światła.

8.5. Podsumowanie symulacyjnych badań termicznych panelu LED

Wyznaczona rzeczywista rezystancja termiczna $R_{th_{j-c}}$ badanych źródeł światła (rozdz. 7.) dała podstawę modelu termicznego panelu LED. Wartość tej rezystancji stanowi kluczowy czynnik wpływający na wyjściową temperaturę złącza T_j . Do oceny temperaturowych warunków pracy panelu LED konieczne jest jednak uwzględnienie wpływu pozostałych elementów na drodze przepływu ciepła: złącze - podłoże - radiator - otoczenie.

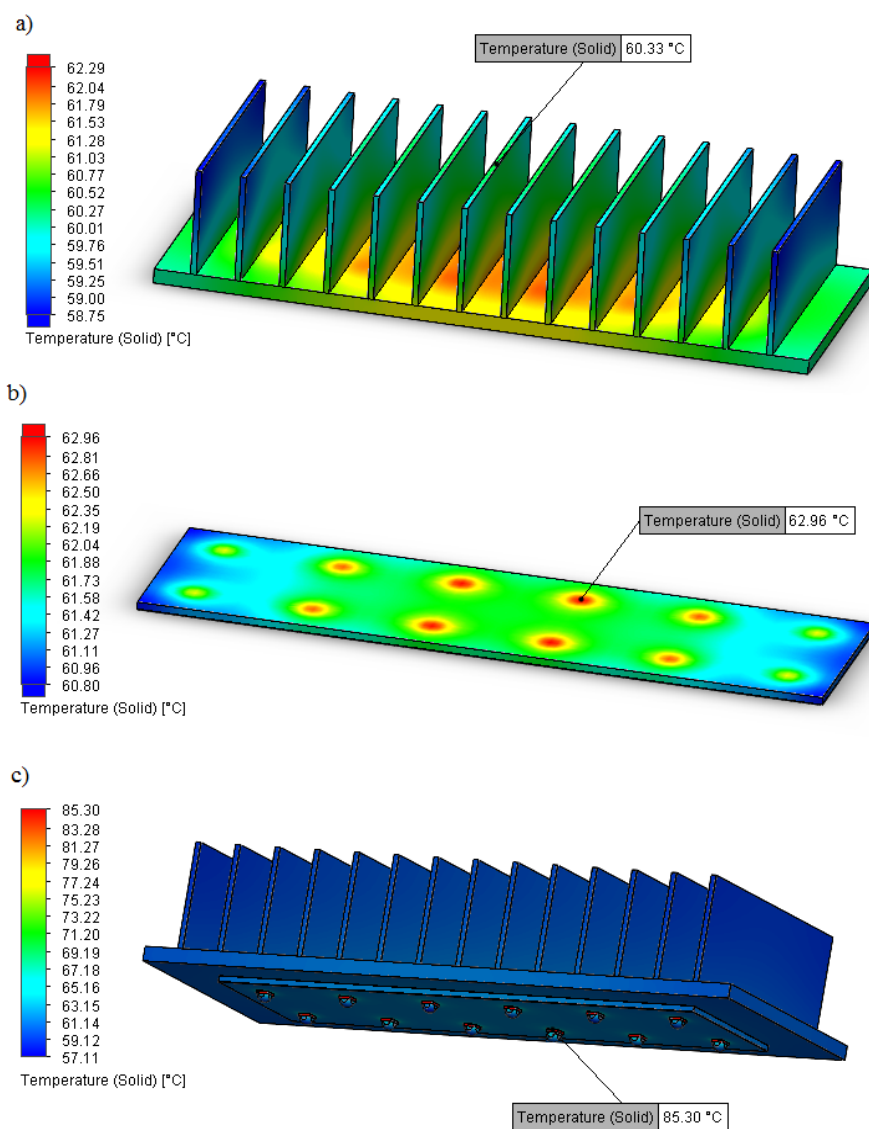
Przeprowadzone badania sprzężeń termicznych pomiędzy źródłami LED (pkt 8.1) wykazały dużą współzależność prądu przewodzenia I_F , liczby zainstalowanych źródeł i wzajemnego położenia względem siebie. Na podstawie uzyskanych wyników badań, do budowy szczegółowego panelu LED wybrano układ źródeł 2 x 6, charakteryzujący się najkorzystniejszymi temperaturowymi warunkami pracy.

Symulacyjne badania termiczne zostały zrealizowane dla płytki obwodu drukowanego i radiatora, których konstrukcja w znaczący sposób wpływa na temperaturę źródeł panelu LED. Wśród dostępnych technologii produkcji obwodów drukowanych (z metalowym rdzeniem MCPCB oraz z laminatem szklano-epoksydowym FR4) zdecydowanie lepszymi właściwościami termicznymi charakteryzowało się podłoże z metalowym rdzeniem MCPCB (pkt 8.3). Szczegółowa analiza termiczna konstrukcji radiatora, związana m.in. z badaniem wpływu liczby żeber i odległości pomiędzy nimi, ich wysokości oraz grubości podstawy ra-

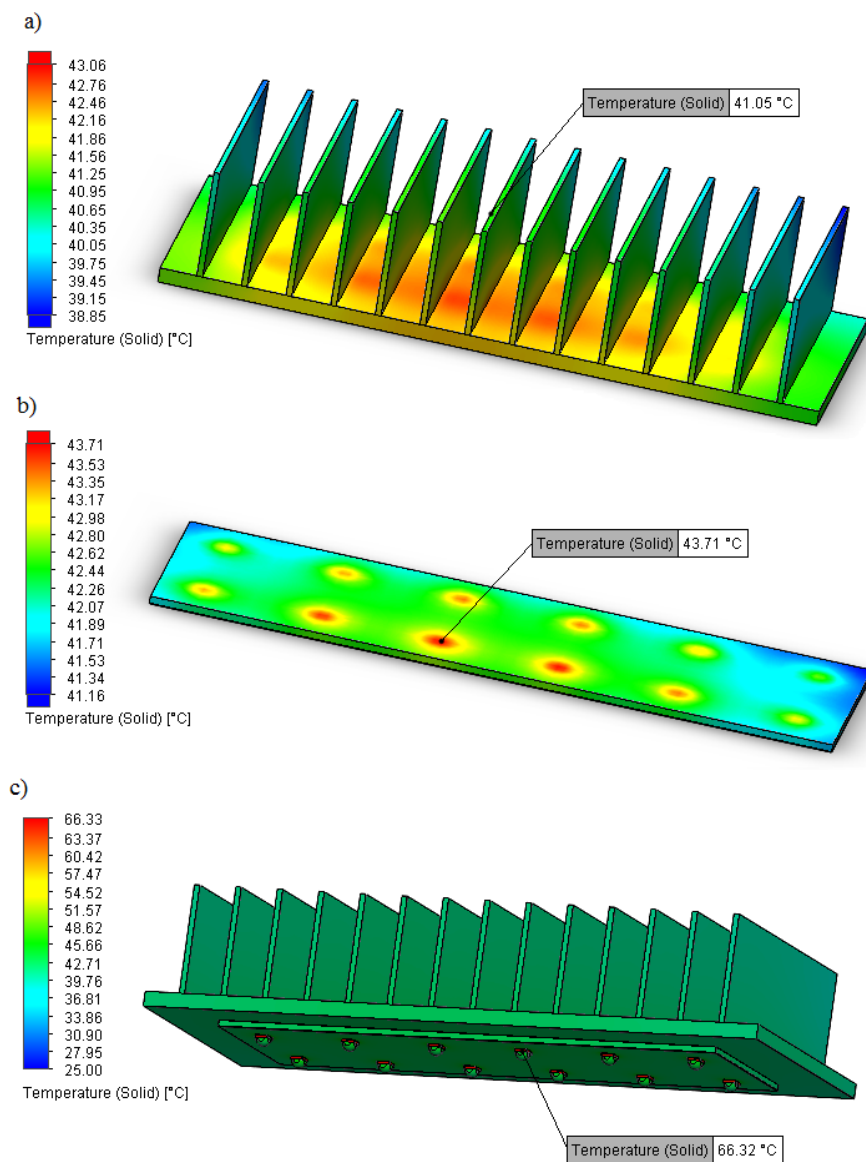
diatora, umożliwiła powstanie modelu radiatora ograniczającego temperaturę złącza źródeł panelu LED (pkt 8.2).

Badania wpływu czynników środowiskowych wykazały możliwość znacznego obniżenia temperatury panelu LED z wykorzystaniem naturalnych ruchów powietrza. Już przy niedużej prędkości wiatru v wynoszącej 1 m/s uzyskano obniżenie maksymalnej temperatury złącza T_j o ponad 20% (pkt 8.4).

Na rysunkach 8.28–8.29 przedstawiono rozkład temperatury głównych elementów panelu LED, wpływających na temperaturę złącza T_j .



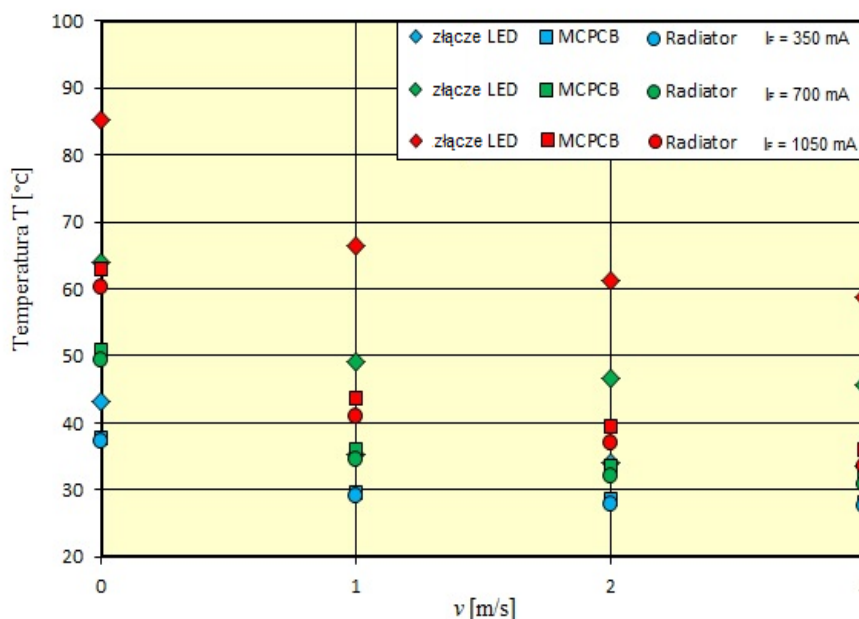
Rys. 8.28. Rozkład temperatury oraz maksymalna temperatura (konwekcja swobodna):
a) radiatora panelu LED, b) podłoża MCPCB, c) złącza źródeł LED



Rys. 8.29. Rozkład temperatury oraz maksymalna temperatura (konwekcja wymuszona, $v = 1$ m/s):
a) radiatora panelu LED, b) podłoża MCPCB, c) złącza źródeł LED

Rozkład temperatury przedstawiono dla konwekcji swobodnej (rys. 8.28) oraz konwekcji wymuszonej, dla $v = 1$ m/s oraz bocznego kierunku wiatru (rys. 8.25a i 8.29). Badania symulacyjne przeprowadzono dla $I_F = 1050$ mA oraz $T_o = 25^\circ\text{C}$. Dodatkowo na rozkładach zaznaczono maksymalną temperaturę złącza T_j , podłoża MCPCB po stronie dolnej oraz górnej części żeber radiatora.

Maksymalną temperaturę na wymienionych elementach panelu LED (rys. 8.28 i 8.29) zestawiono na rys. 8.30, dla wszystkich trzech badanych wartości prądu I_F przy konwekcji swobodnej oraz wymuszonej.



Rys. 8.30. Maksymalna temperatura głównych elementów panelu LED

Przeprowadzone w niniejszym rozdziale badanie symulacyjne dało podstawę opracowania modelu termicznego panelu LED ograniczającego temperaturę złącza źródeł. Maksymalna temperatura złącza T_j dla najbardziej krytycznych warunków termicznych ($I_F = 1050$ mA, $v = 0$ m/s) wyniosła 85°C . W przypadku prądu $I_F = 700$ mA temperatura ta osiągnęła wartość 64°C , a dla $I_F = 350$ mA wyniosła 43°C . Maksymalna temperatura podłoża MCPCB była nieznacznie większa od maksymalnej temperatury żeber radiatora, co świadczy o efektywnym odbiorze ciepła przez układ radiacyjny. Konstrukcja radiatora umożliwia cyrkulacyjny ruch powietrza wokół jego powierzchni, a jego przepływ o wartości $v = 1$ m/s skutkowało obniżeniem temperatury złącza T_j o ponad 20%.

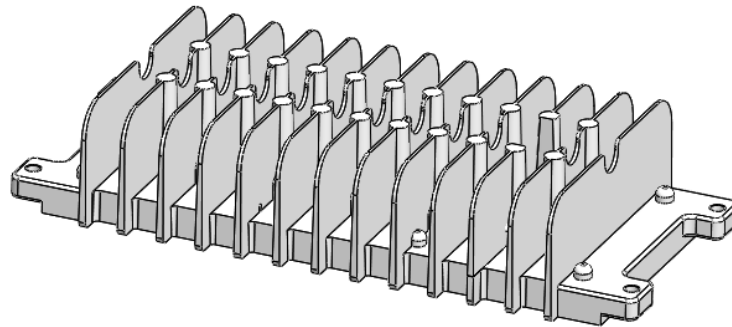
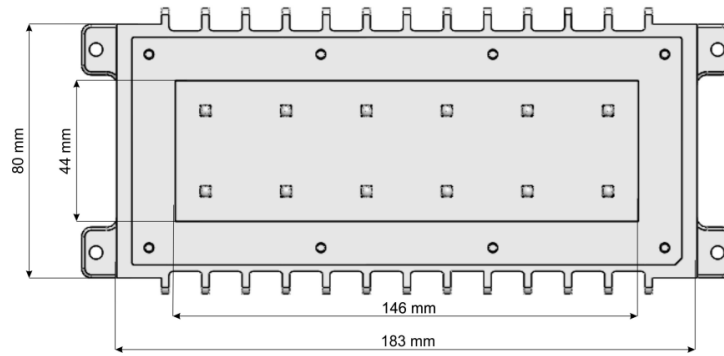
Uzyskane wyniki badań potwierdziły słuszność założeń związanych z konstrukcją panelu LED. Maksymalna temperatura złącza T_j w przypadku najtrudniejszych warunków termicznych ($v = 0$ m/s, $I_F = 1050$ mA) osiągnęła wartość 85°C , co można uznać za wynik w pełni zadowalający i spełniający założenia odnośnie do uzyskania jak najmniejszej wartości temperatury złącza T_j .

Na podstawie wyników badań modelowych opracowano i zbudowano prototyp panelu LED.

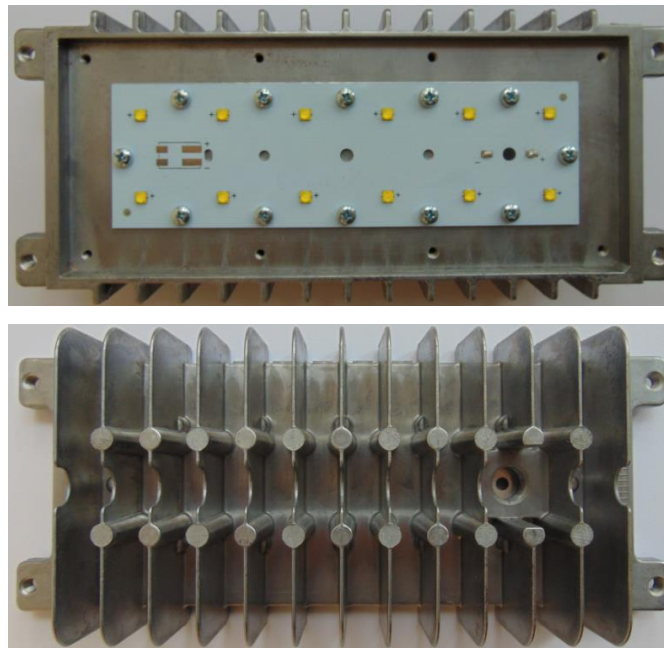
8.6. Weryfikacja wyników symulacyjnych

Opracowany model radiatora z pkt 8.2, uzyskany na podstawie badań symulacyjnych, został w niewielkim stopniu zmodyfikowany, ze względu na technologię wykonania odlewu aluminiowego i jego dalszą obróbkę mechaniczną.

a)



b)



Rys. 8.31. Widok badanego panelu LED: a) model komputerowy, b) prototyp

Radiator panelu LED został wykonany ze stopu aluminium Al5052. Jego podstawa ma wymiary 183 x 80 mm oraz grubość $W_{PR} = 4$ mm. Na górnej powierzchni podstawy uformowanych zostało 13 żeber o wysokości wynoszącej $W_z = 29$ mm. Dodatkowo, wszystkie żebra, oprócz żeber skrajnych, posiadają odkształcenia w postaci walców. W celu wyjęcia radiatora

z formy odlewniczej bez ryzyka uszkodzenia, grubość żeber zmniejsza się od podstawy radiatora ku górnej jego części z 2 do 1 mm, a średnica walców z 8 do 6 mm.

Do budowy panelu LED wykorzystano 12 takich samych półprzewodnikowych źródeł światła, oznaczonych jako LED typu A (tab. 7.1). Omówiono je szczegółowo we wcześniejszych rozdziałach niniejszej pracy. Źródła LED zostały zainstalowane na podłożu MCPCB o wymiarach 146 x 44 mm, o grubości rdzenia aluminiowego wynoszącego 1,5 mm oraz warstwy dielektryka o grubości 0,1 mm.

Do pomiaru rzeczywistej temperatury panelu LED wykorzystano 8-kanałowy laboratoryjny miernik temperatury L200-TC firmy Labfacility (rys. 8.32). Miernik posiada 8 niezależnych wejść na termopary (typu J, K, T, E, N, R), a dołączone oprogramowanie umożliwia rejestrację i zapis zmierzonych wartości.

a)



b)



Rys. 8.32. Laboratoryjny miernik temperatury L200-TC: a) widok z przodu, b) widok z tyłu [96]

Do współpracy z miernikiem L200-TC wybrano 8 czujników termoelektrycznych firmy Termoaparatura, oznaczonych symbolem TTE426-K-2x0.20-1000-1GLGL. Wymienione czujniki są termoparami typu K o wymiarach 2 x 0,2 mm², długości 100 cm i izolacji przewodu wykonanej z włókna szklanego. Maksymalny dopuszczalny błąd wskazania miernika wyniósł $\pm 1,3$ K, natomiast maksymalny błąd przetwarzania termopary $\pm 1,5$ K [114, 122].

W tabeli 8.4 zestawiono wartości całkowitego błędu dopuszczalnego maksymalnego oraz niepewność standardową oszacowaną metodą typu B, w odniesieniu do pomiarów eksperymentalnych.

Tabela 8.4. Całkowity błąd dopuszczalny maksymalny oraz niepewność standardowa, oszacowana metodą typu B

Całkowity błąd dopuszczalny maksymalny, [K]	Niepewność standardowa, typu B, $U_C(T)$, [K]
2,8	1,2

Całkowity błąd dopuszczalny został wyznaczony jako suma błędów miernika temperatury oraz czujnika w postaci termopary. Całkowitą niepewność standardową $U_c(T)$ wyznaczono w następujący sposób [86]:

$$U_c(T) = \sqrt{U_{B,m}(T)^2 + U_{B,cz}(T)^2} \quad [\text{K}] \quad (8.1)$$

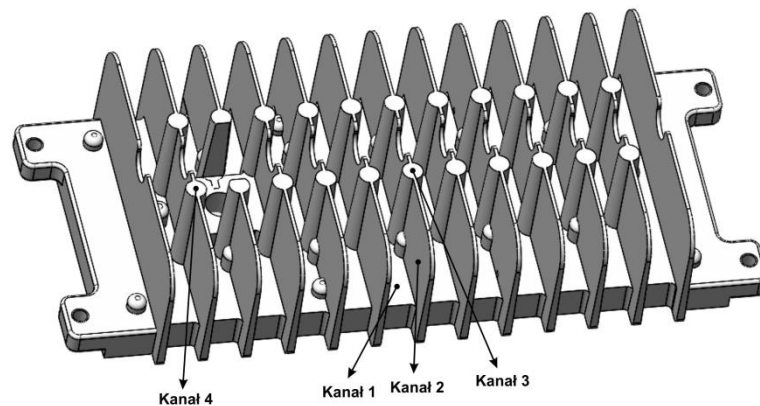
$$U_{B,m}(T) = \frac{\text{Maksymalny błąd dopuszczalny miernika}}{\sqrt{3}} \quad [\text{K}] \quad (8.2)$$

$$U_{B,cz}(T) = \frac{\text{Maksymalny błąd dopuszczalny termopary}}{\sqrt{3}} \quad [\text{K}] \quad (8.3)$$

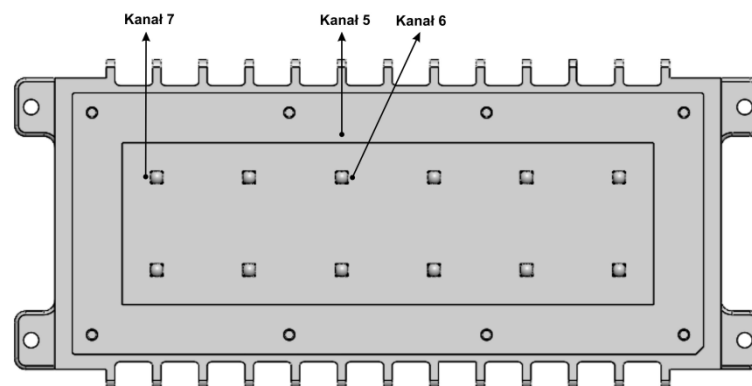
gdzie: $U_c(T)$ – całkowita niepewność standardowa typu B, $U_{B,m}(T)$ – niepewność standardowa typu B dla miernika temperatury, $U_{B,cz}(T)$ – niepewność standardowa typu B dla czujnika temperatury.

Na radiatorze oraz podłożu MCPCB zostało zainstalowanych 7 kanałów pomiarowych, z czujnikiem temperatury w postaci termopary typu K. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na panelu LED zostało przedstawione na rys. 8.33.

a)



b)



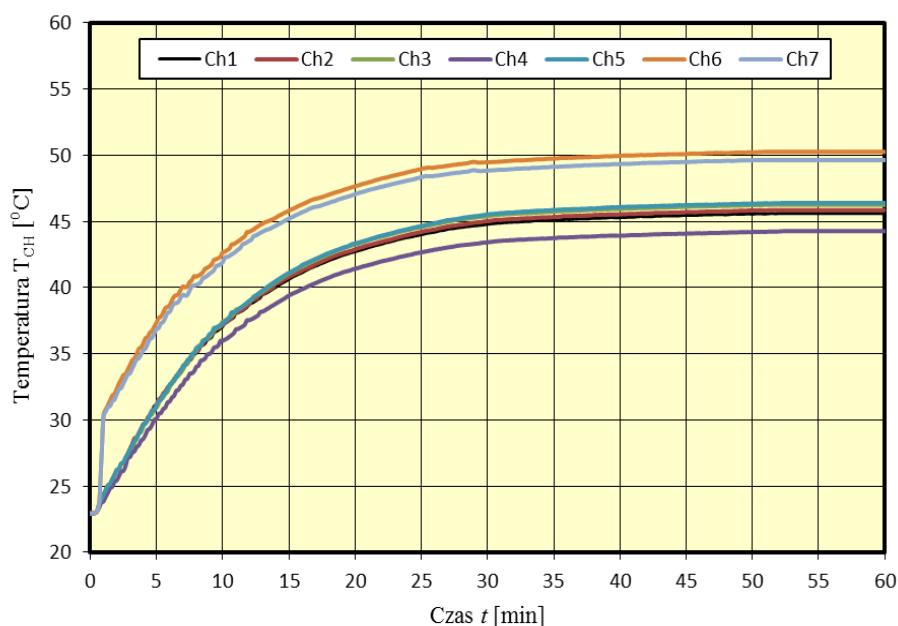
Rys. 8.33. Rozmieszczenie kanałów pomiarowych na prototypie panelu LED: a) punkty pomiarowe zlokalizowane na powierzchni radiatora, b) punkty pomiarowe zlokalizowane w bliskim sąsiedztwie źródeł LED

Punkty pomiarowe panelu LED zostały zlokalizowane: na górnej podstawie w centralnej części radiatora (1), na centralnym żebrze radiatora (2), na zgrubieniu żebra nad środkowym źródłem LED (3), na zgrubieniu żebra nad skrajnym źródłem LED (4), na dolnej podstawie radiatora (5), na podłożu MCPCB w odległości 1 mm od środkowego źródła LED (6) oraz na podłożu MCPCB w odległości 1 mm od skrajnego źródła LED (7).

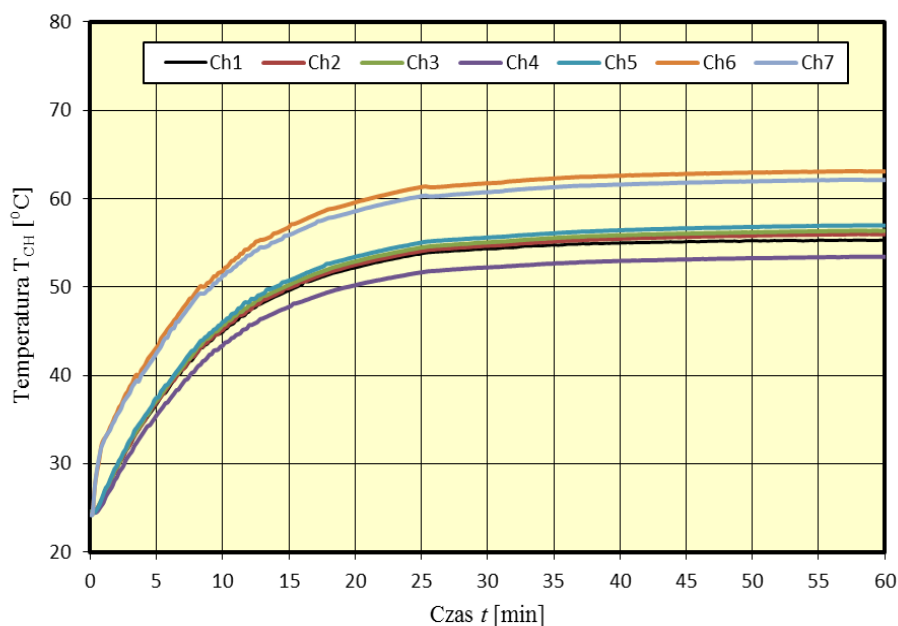
Pomiary temperatury w wyznaczonych punktach pomiarowych, zostały przeprowadzone dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F : 350; 700 oraz 1050 mA. W trakcie pomiarów panel LED został podwieszony w pozycji poziomej, a wymiana ciepła z otoczeniem następowała przez konwekcję swobodną. Ostatni, ósmy kanał pomiarowy miernika temperatury został wykorzystany do pomiaru temperatury otoczenia T_o . Wartości temperatury były automatycznie zapisywane z krokiem co 10 s. Czas pomiaru ustalono na 1 godz., tak aby temperatura dla wszystkich kanałów pomiarowych osiągnęła wartość ustaloną. Na rysunku 8.34 przedstawiono przebieg wartości temperatury siedmiu kanałów pomiarowych, dla dwóch badanych wartości prądu przewodzenia I_F .

Temperatura otoczenia T_o podczas pomiarów wynosiła 24°C. Najszybszy przyrost temperatury następował w pierwszych dziesięciu minutach. Po czasie wynoszącym ok. 45 min. temperatura osiągała stan ustalony. Na powierzchni radiatora zarejestrowano równomierny rozkład temperatury. Jej wartość zarejestrowana w punktach pomiarowych nie wykazywała dużych różnic, jedynie w punkcie pomiarowym nr 4, zlokalizowanym na skrajnym żebrze radiatora, temperatura była nieznacznie niższa. Najwyższa wartość temperatury została zmierzona dla punktów pomiarowych nr 6 oraz nr 7 zlokalizowanych na podłożu MCPCB, w bliskim sąsiedztwie półprzewodnikowych źródeł światła.

a)



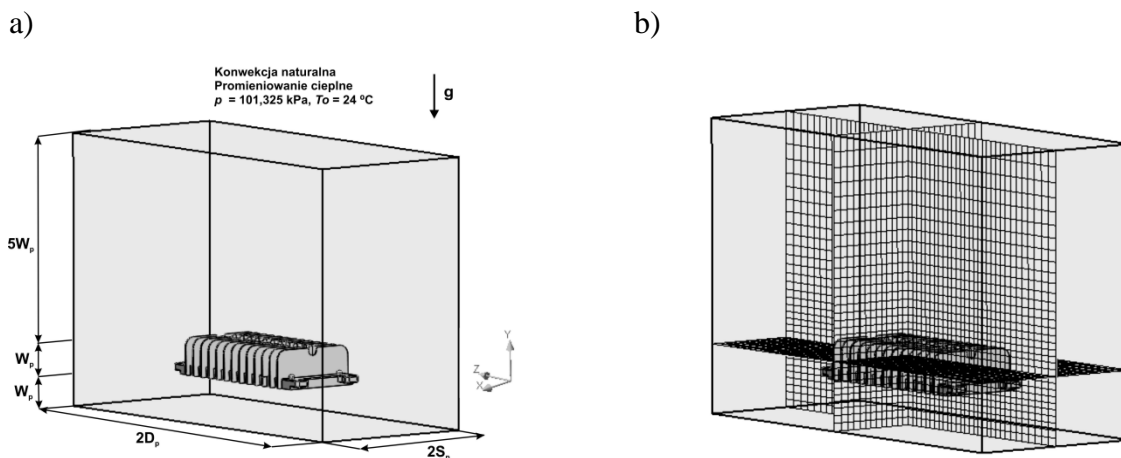
b)



Rys. 8.34. Przebieg temperatury w siedmiu punktach pomiarowych panelu LED dla prądu przewodzenia I_F :
a) 700 mA, b) 1050 mA

Dla takich samych warunków zewnętrznych, dla których były wykonywane rzeczywiste pomiary temperatury panelu LED, przeprowadzono komputerowe badania symulacyjne (konwekcja naturalna, $T_o = 24^\circ\text{C}$). Wykorzystane do symulacji parametry źródła LED typu A (sprawność optyczna η_o , moc cieplna P_H oraz rezystancja termiczna Rth_{j-c}) użytego do budowy prototypu zostały wyznaczone w rozdziale 7 niniejszej pracy (tab. 7.3 i 7.4). Struktura oraz materiałowe parametry cieplne prototypu panelu LED, a następnie modelu symulacyjne-

go były takie same jak przedstawione w tab. 8.1, wykorzystane podczas wcześniejszych badań symulacyjnych, związanych ze sprzężeniami termicznymi pomiędzy źródłami LED.



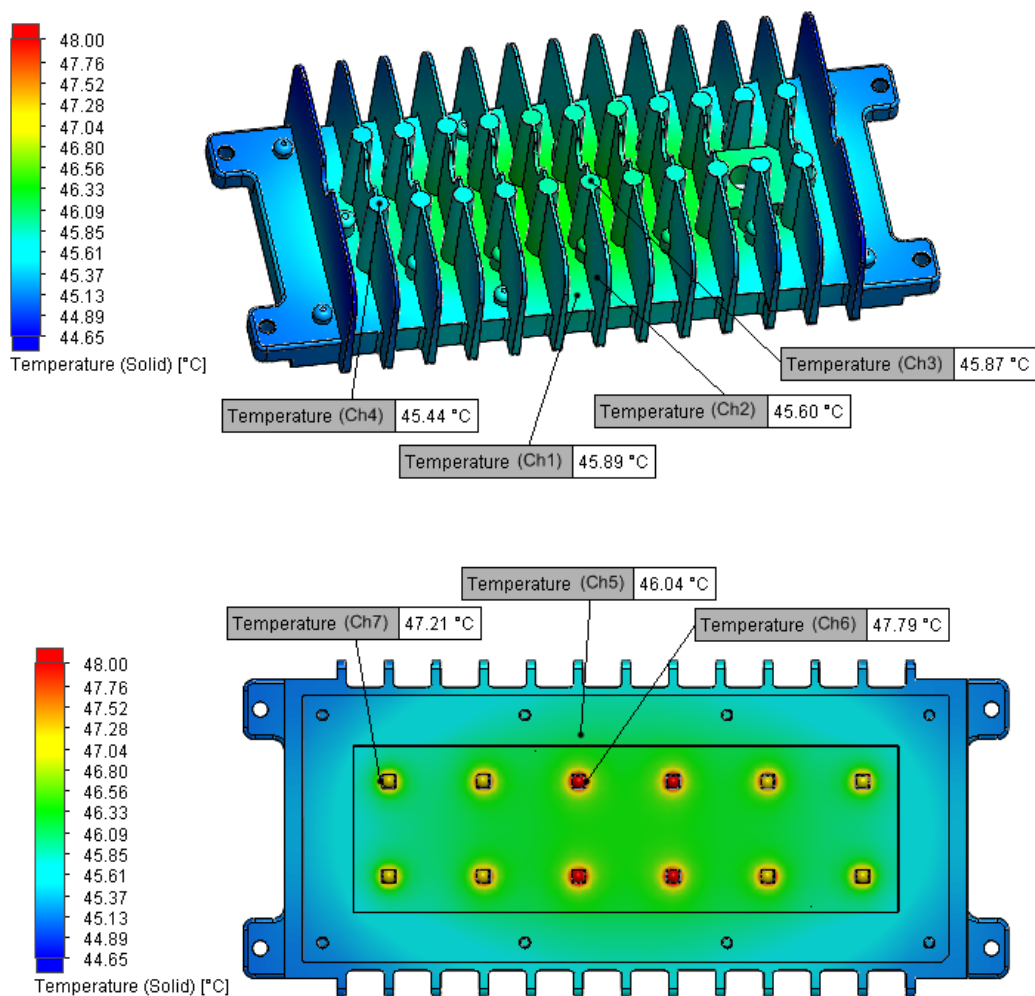
Rys. 8.35. Model symulacyjny panelu LED: a) domena obliczeniowa wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi, b) przekrój siatki obliczeniowej wzdłuż osi XYZ

Na rysunku 8.35 przedstawiono komputerowy model symulacyjny panelu LED wraz z domeną obliczeniową, a na rys. 8.36 - symulacyjny rozkład temperatury panelu LED dla prądu przewodzenia $I_F = 700 \text{ mA}$.

Rzeczywiste wyniki pomiarów temperatury oraz wyniki badań symulacyjnych zostały zestawione w tab. 8.5. Błąd względny wyników symulacji został wyznaczony z zależności [86]:

$$\text{Błąd względny} = \frac{|\text{Wynik symulacji} - \text{Pomiar rzeczywisty}|}{\text{Pomiar rzeczywisty}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (8.1)$$

Uzyskano wysoką zgodność wyników symulacyjnych i rzeczywistych. Największy błąd odnotowano w szóstym i siódmym punkcie pomiarowym, zlokalizowanym bezpośrednio przy półprzewodnikowych źródłach światła. Jego wartość nie przekraczała 5% dla wszystkich trzech badanych wartości prądu przewodzenia I_F . Wyższa różnica pomiędzy wynikami symulacyjnymi i eksperymentalnymi w wymienionych punktach pomiarowych może być związana ze stosunkowo największym gradientem temperatury w bliskim sąsiedztwie źródeł LED. Nawet niewielkie przesunięcie punktu pomiarowego w wymienionym obrębie może wpływać na różnicę w odczycie wartości temperatury.



Rys. 8.36. Rozkład temperatury panelu LED dla $I_F = 700 \text{ mA}$ wraz z zaznaczonymi kluczowymi punktami pomiarowymi

W przypadku pozostałych pięciu punktów pomiarowych, zlokalizowanych w zdefiniowanych miejscach na powierzchni radiatora, wartość błędu oscylowała w zakresie 1–3 %. Na powierzchni radiatora występował równomierny rozkład temperatury. Nieznaczne przesunięcie punktów pomiarowych w tym miejscu nie powodowało znaczącej różnicy w odczytach wartości temperatury.

Tabela 8.5. Porównanie rzeczywistych oraz symulacyjnych wyników temperatury, w kluczowych punktach pomiarowych badanego panelu LED

I_F [mA]		Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7
350	Pomiar rzeczywisty [°C]	35,53	35,66	35,75	34,76	35,74	37,46	37,3
	Wynik symulacji [°C]	34,99	34,86	35,02	34,87	35,09	35,90	35,61
	Błąd względny [%]	1,52	2,25	2,05	0,32	1,82	4,17	4,54
700	Pomiar rzeczywisty [°C]	45,62	45,86	46,25	44,27	46,4	50,26	49,65
	Wynik symulacji [°C]	45,89	45,60	45,87	45,44	46,04	47,79	47,21
	Błąd względny [%]	0,60	0,57	0,83	2,65	0,78	4,92	4,92
1050	Pomiar rzeczywisty [°C]	55,31	56,04	56,43	53,46	57,02	63,14	62,2
	Wynik symulacji [°C]	55,98	55,49	56,14	55,40	56,45	60,2	59,1
	Błąd względny [%]	1,22	0,99	0,52	3,63	1,00	4,66	4,92

Niewielka wartość błędu – nieprzekraczająca 5%, świadczy o dokładnym odwzorowaniu modelu termicznego symulowanego panelu LED. Kluczowe znaczenie w uzyskaniu tak dużej zbieżności wyników symulacyjnych i rzeczywistych miało doświadczalne wyznaczenie sprawności optycznej η_o , mocy cieplnej P_H oraz rezystancji termicznej Rth_{j-c} dla badanego źródła LED (rozd. 7 – tab. 7.3 i 7.4, rozdz. 9 – tab. 9.2). Podobne wartości błędu dla wszystkich trzech badanych wartości prądu przewodzenia I_F świadczą o poprawnym wyznaczeniu zmian sprawności optycznej η_o i wynikającej z niej zmiany mocy cieplnej P_H w funkcji prądu przewodzenia I_F (tab. 7.3 i 9.2). Bardzo ważne również, w kontekście uzyskania wiarygodnych wyników symulacyjnych, było szczegółowe odwzorowanie geometrii radiatora, jak również prawidłowe sparametryzowanie i określenie właściwości cieplnych wszystkich elementów składowych panelu LED.

Przedstawione porównanie wyników rzeczywistych oraz symulacyjnych świadczy o dużej zgodności modelu termicznego panelu LED ze zbudowanym prototypem.

9. Badania wpływu temperatury na wybrane parametry świetlne pojedynczego źródła LED

Badania wpływu temperatury T_j na parametry świetlne pojedynczego źródła LED są punktem wyjściowym do badań związanych z oceną wpływu temperatury na parametry świetlne panelu LED. Badania przeprowadzono dla źródeł LED typu A, B i C (rozdz. 7.) oraz dodatkowo dla czwartego źródła, oznaczonego jako LED typu D. Parametry badanych źródeł LED przedstawiono w tab. 9.1.

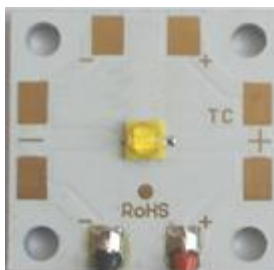
Tabela 9.1. Zestawienie źródeł światła dużej mocy wybranych do badań półprzewodnikowych

Oznaczenie	LED A	LED B	LED C	LED D
Maksymalny prąd przewodzenia I_F [mA]	2000	1500	750	1800
Typowe napięcie przewodzenia U_F [V] $I_F = 700$ mA	2,83 $T_j = 85^\circ\text{C}$	2,96 $T_j = 85^\circ\text{C}$	4,05 $T_s = 25^\circ\text{C}$	2,80 $T_s = 85^\circ\text{C}$
Maksymalna temperatura złącza T_j [$^\circ\text{C}$]	150	150	125	150
Strumień świetlny Φ [lm] $I_F = 700$ mA	317 $T_j = 85^\circ\text{C}$	258 $T_j = 85^\circ\text{C}$	150 $T_s = 25^\circ\text{C}$	300 $T_s = 85^\circ\text{C}$
Temperatura barwowa T_B [K]	5000	5300	5700	5000
Współczynnik oddawania barw R_a	Min.70	Min.70	Min.70	Min.70

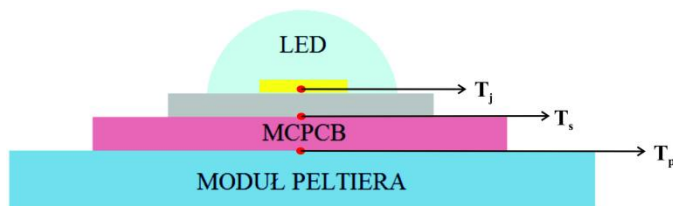
Napięcie przewodzenia U_F oraz strumień świetlny Φ są podane dla prądu przewodzenia $I_F = 700$ mA oraz temperatury złącza $T_j = 85^\circ\text{C}$. W przypadku diod oznaczonych jako typu C i D, parametry te określono dla temperatury T_s (rys. 9.1b), która odpowiada temperaturze miejsca lutowania diody do obwodu drukowanego.

Wszystkie wybrane do badań źródła LED danego typu zostały przylutowane do płytki drukowanej z metalowym rdzeniem (MCPCB) o wymiarach 25 x 25 x 1,6 mm (rys. 9.1a).

a)



b)



Rys. 9.1. Badana dioda typu B przylutowana do podłoża MCPCB (a), charakterystyczne temperatury badanych półprzewodnikowych źródeł światła: T_j – temperatura złącza, T_s – temperatura w miejscu lutowania diody do podłoża MCPCB, T_p – temperatura modułu Peltiera (b)

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym firmy GL Optic (rys. 9.2), w skład którego wchodziła kula całkująca GL Opti Sphere o średnicy 500 mm [94], spektrometr GL Spectis 6.0 [95], programowalny zasilacz prądu stałego TDK-Lambda GENH300-2.5 [113] oraz moduł Peltiera z kontrolerem temperatury 5305 TECSource firmy Arroyo Instruments [87].



Rys. 9.2. Stanowisko pomiarowe firmy GL Optic [119]

Wybrane do badań półprzewodnikowe źródła światła były instalowane na powierzchni modułu Peltiera (rys. 9.1b), na którym ustalano zadaną temperaturę T_p . Pomiar przeprowadzono dla czterech zadanych temperatur T_p : 25; 45; 65; 85°C oraz dla trzech wartości prądów przewodzenia I_F : 350; 700 oraz 1050 mA. Wymienione wartości prądu przewodzenia I_F obejmują zakres wartości najczęściej stosowanych do zasilania źródeł dużej mocy. Również zakres wybranych do badań temperatur T_p obejmuje w głównej mierze temperatury, przy których w rzeczywistych warunkach pracują źródła LED.

W celu konwersji temperatury modułu Peltiera T_p na temperaturę złącza T_j należy dodatkowo uwzględnić rezystancję termiczną podłoża MCPCB Rth_{MCPCB} oraz rezystancję termiczną pomiędzy złączem a obudową Rth_{j-c} badanego źródła LED, zgodnie ze wzorem:

$$T_j = T_p + (Rth_{MCPCB} + Rth_{j-c}) \cdot P_H \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.1)$$

gdzie: T_j – temperatura złącza źródła LED, T_p – temperatura modułu Peltiera, Rth_{MCPCB} – rezystancja termiczna podłoża MCPCB, Rth_{j-c} – rezystancja termiczna pomiędzy złączem a obudową źródła LED, P_H – moc cieplna źródła LED.

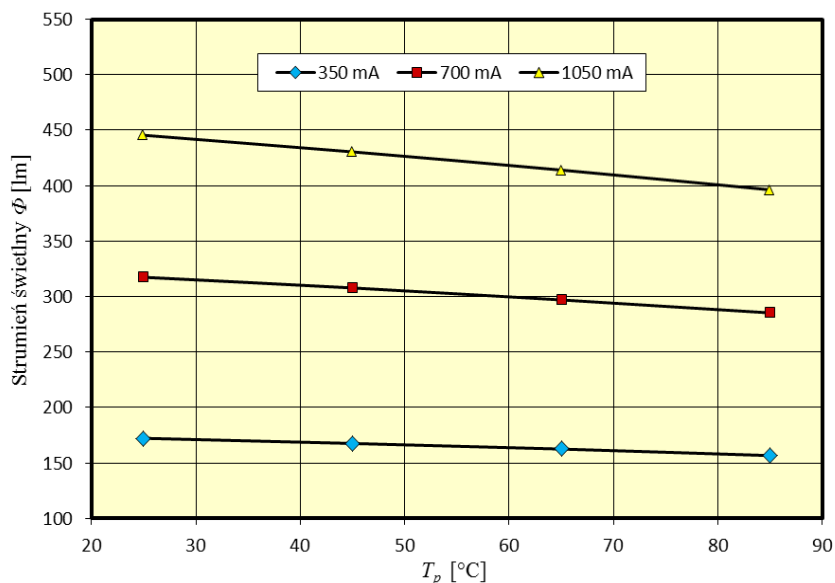
Moc cieplną P_H oraz rezystancję termiczną Rth_{j-c} dla badanych źródeł LED wyznaczono oraz omówiono w rozdz. 7. (tab. 7.3-7.4). Rezystancja termiczna podłoża MCPCB Rth_{MCPCB} wynosiła 0,45 °C/W i stanowiła znikomą część sumarycznej rezystancji termicznej (wzór 9.1) [101].

Dla wymienionych parametrów przeprowadzono pomiary parametrów świetlnych: strumienia świetlnego Φ , temperatury barwowej T_B , współczynnika oddawania barw Ra , rozkładu widmowego oraz mocy promieniowania P_o . Deklarowana niepewność pomiaru wielkości fotometrycznych nie przekraczała wartości 4%, a w przypadku pomiarów radiometrycznych niepewność była mniejsza niż 3% [95].

9.1. Strumień świetlny Φ

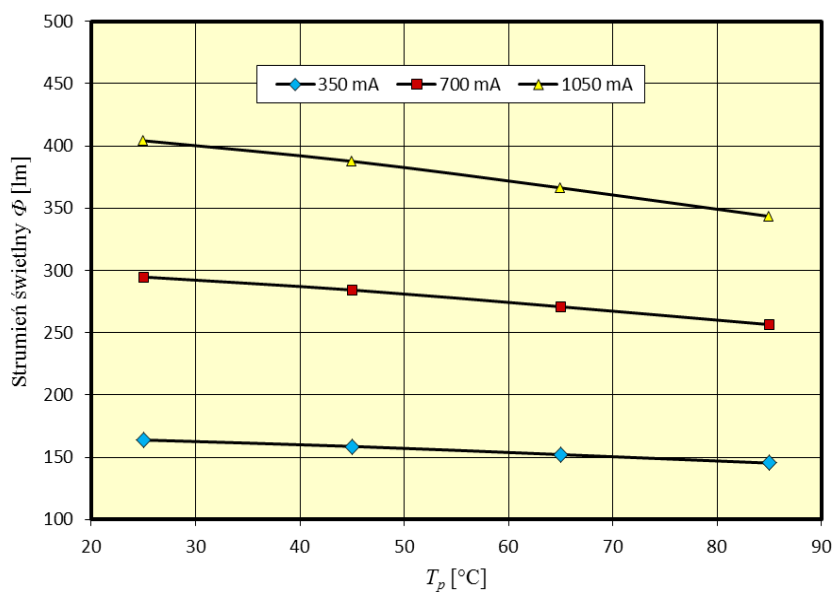
Pomiar strumienia świetlnego Φ jest jednym z głównych parametrów fotometrycznych, pozwalających ocenić efektywność oraz skuteczność świetlną η badanego źródła LED. Parametr ten jest w głównej mierze uzależniony od wartości prądu przewodzenia I_F , jak również temperatury pracy diody. Pomiary przeprowadzono dla wymienionych wcześniej trzech wartości prądu I_F , po ustabilizowaniu się zadanej temperatury T_p na module Peltiera.

Wyniki z przeprowadzonych badań dla źródła typu A przedstawiono na rys. 9.3. Otrzymane wyniki wskazują, że decydującym parametrem wpływającym na wartość strumienia świetlnego Φ była wartość prądu przewodzenia I_F . Dwukrotne zwiększenie wartości prądu I_F powodowało również prawie dwukrotny wzrost wartości strumienia świetlnego Φ przy zadanej temperaturze T_p . Wraz ze wzrostem temperatury T_p wartość strumienia świetlnego zmniejszała się liniowo dla wszystkich trzech wartości prądu przewodzenia I_F . Dla prądu $I_F = 350$ mA i $T_p = 85^\circ\text{C}$ spadek strumienia świetlnego Φ wyniósł 9%, w porównaniu z $I_F = 350$ mA i $T_p = 25^\circ\text{C}$. W przypadku prądu $I_F = 700$ mA oraz $I_F = 1050$ mA spadek ten wyniósł odpowiednio 10 oraz 11%.



Rys. 9.3. Strumień świetlny Φ w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu A

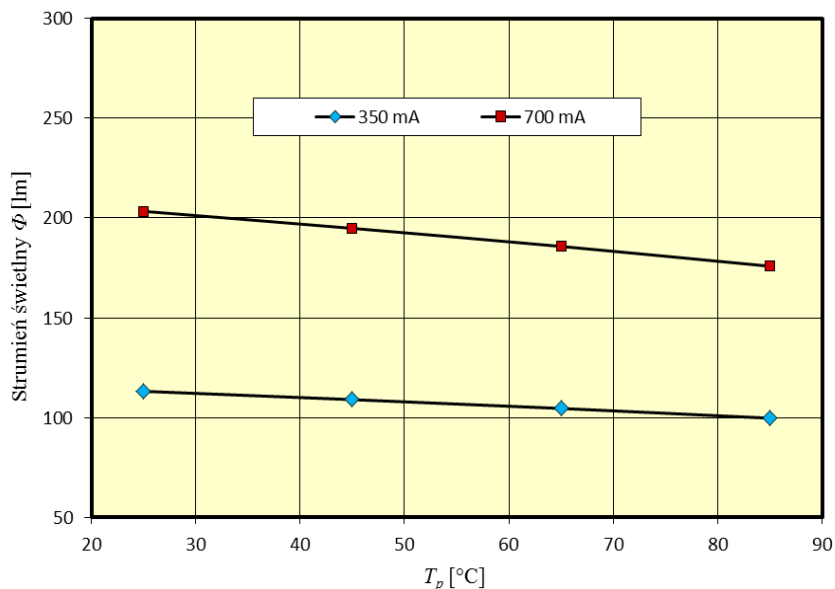
Analogiczne badania przeprowadzono dla źródeł LED typu B, C i D, a wyniki tych badań przedstawiono na rys. 9.4 – 9.6. Dla źródła typu B, podobnie jak w przypadku diody typu A, wzrost temperatury T_p skutkował liniowym zmniejszeniem wartości strumienia Φ , przy czym procentowy spadek wartości był większy i wyniósł 11, 13 oraz 15%, odpowiednio dla prądów I_F : 350; 700 oraz 1050 mA (rys. 9.4)..



Rys. 9.4. Strumień świetlny Φ w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu B

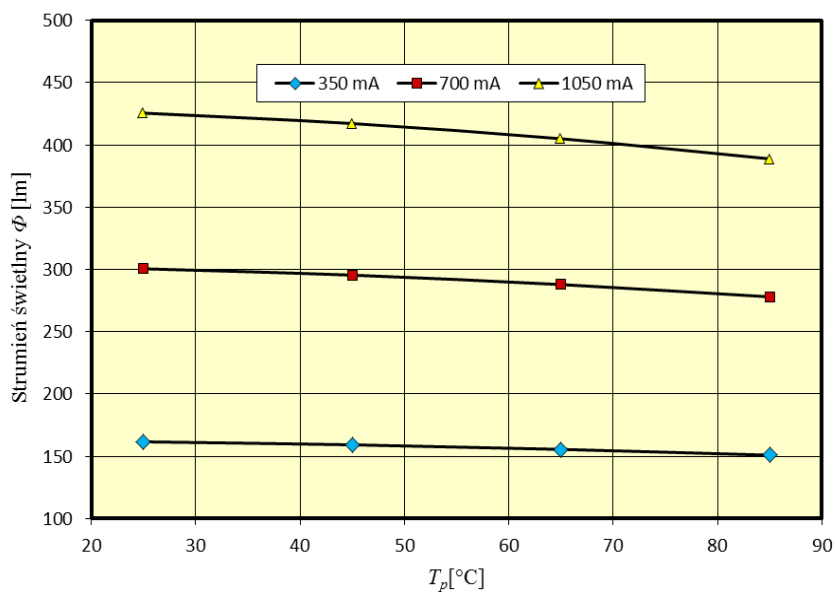
Źródło LED typu C badano dla wartości prądu przewodzenia I_F : 350 oraz 700 mA, co wynikało z mniejszej mocy badanego źródła. Podobnie jak w przypadku wcześniejszych ba-

danych półprzewodnikowych źródeł światła obserwowano także liniowy spadek wartości strumienia świetlnego Φ w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p (rys. 9.5). Spadek ten wyniósł 12 oraz 14%, odpowiednio dla prądu $I_F = 350$ oraz 700 mA.



Rys. 9.5. Strumień świetlny Φ w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu C

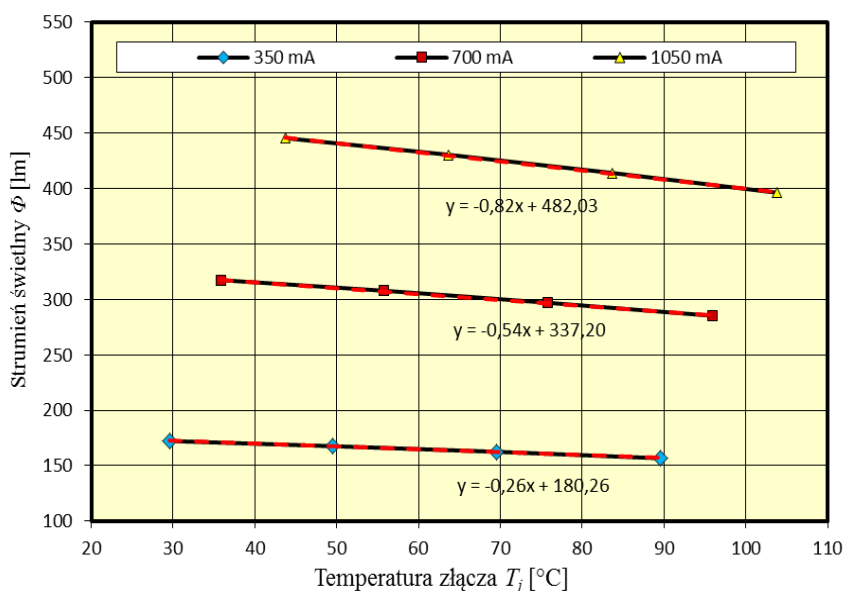
Najmniejszy procentowy spadek wartości strumienia świetlnego Φ został zmierzony dla półprzewodnikowego źródła światła typu D (rys. 9.6). Spadek ten wyniósł odpowiednio 7; 8 oraz 9% dla trzech badanych prądów I_F . Zmiana strumienia świetlnego Φ w funkcji temperatury T_p , podobnie jak w przypadku badanych wcześniej źródeł, miała charakter liniowy.



Rys. 9.6. Strumień świetlny Φ w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu D

Dla wszystkich badanych źródeł LED (rys. 9.3-9.6) spadek strumienia świetlnego Φ w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p ma charakter liniowy. Spadek ten, w zależności od typu oraz wartości prądu przewodzenia I_F , wyniósł od kilku do kilkunastu %, dla granicznych zadanych temperatur T_p na module Peltiera (25 - 85°C). Źródła LED typu A, B oraz D charakteryzowały się zbliżoną wartością strumienia świetlnego Φ dla takich samych wartości prądu przewodzenia I_F , natomiast w przypadku źródła typu C wartości były znacząco niższe.

Wykresy zmiany strumienia świetlnego Φ w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p (rys. 9.3-9.6), zostały transformowane w funkcję temperatury złącza T_j , zgodnie z równaniem (9.1). Przykładowy wykres dla źródła typu A wykorzystanego do budowy panelu LED (rozdz. 8.) przedstawia rys. 9.7.



Rys. 9.7. Wykres zależności strumienia świetlnego Φ w funkcji temperatury złącza T_j – źródło typu A

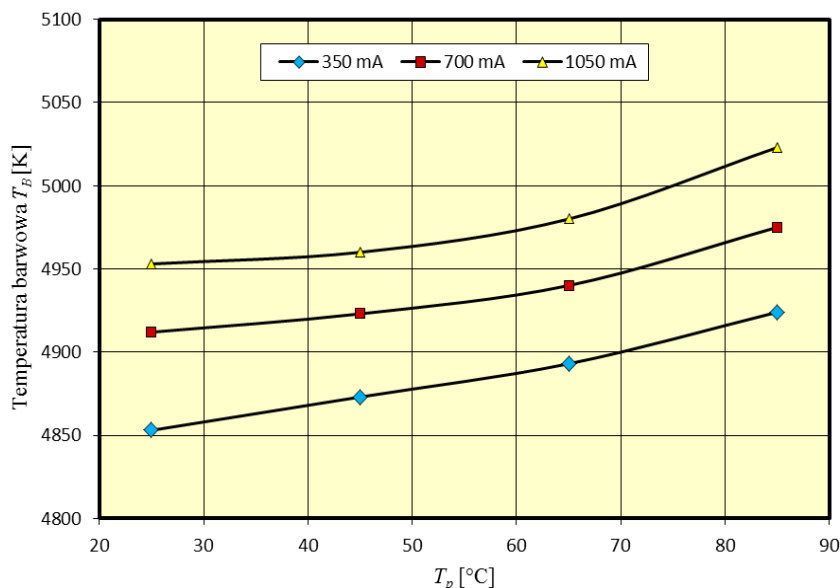
Wykres zmiany strumienia świetlnego Φ w funkcji temperatury złącza T_j został aproksymowany równaniem prostej (rys. 9.7) za pomocą czerwonej, przerywanej linii. Wyznaczone w ten sposób równanie zostało wykorzystane do określenia sumarycznego strumienia świetlnego panelu LED (rozdz. 10.).

9.2. Temperatura barwowa T_B

Pomiar temperatury barwowej T_B został przeprowadzony w analogiczny sposób do pomiaru strumienia świetlnego Φ , dla prądu przewodzenia I_F : 350; 700 i 1050 mA oraz temperatur T_p na module Peltiera: 25; 45; 65 i 85°C. Źródła LED według danych katalogowych

charakteryzowały się temperaturą barwową T_B : 5000 K dla źródeł typu A i D, 5300 K dla źródeł typu B oraz 5700 K dla źródeł typu C.

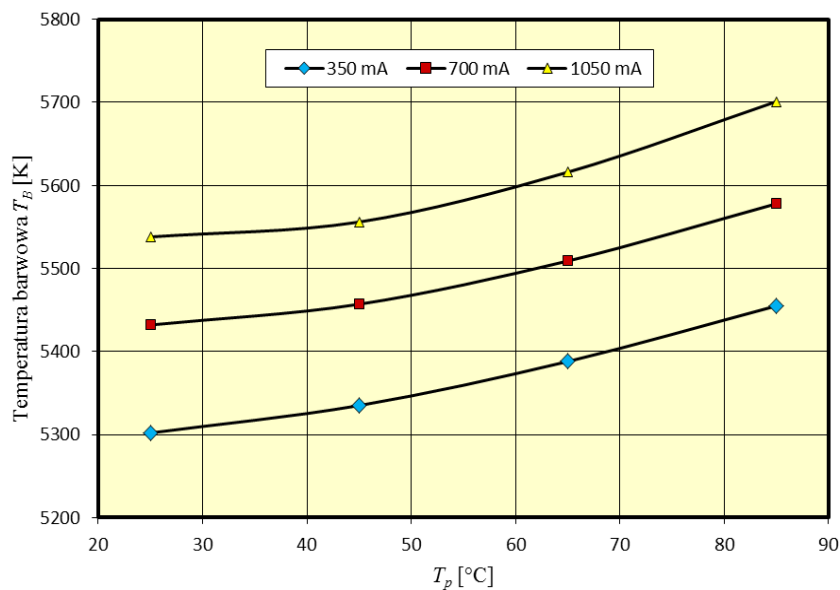
Wyniki badań temperatury barwowej T_B w funkcji zmian temperatury modułu Peltiera T_p i prądu przewodzenia I_F dla źródeł typu A przedstawiono na rys. 9.8.



Rys. 9.8. Temperatura barwowa T_B w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu A

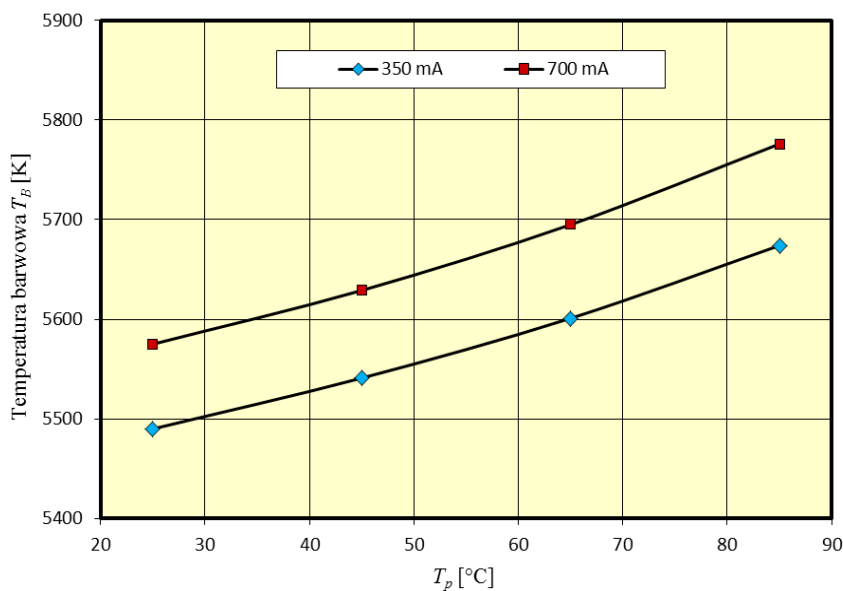
Uzyskane wyniki badań (rys. 9.8) wskazują że temperatura barwowa T_B zależy od wartości prądu przewodzenia I_F oraz od temperatury T_p . Wzrost wartości prądu przewodzenia I_F powodował wzrost temperatury barwowej T_B . Przy prądzie $I_F = 350$ mA i $T_p = 25^\circ\text{C}$ temperatura T_B wyniosła 4853 K, a przy prądzie $I_F = 1050$ mA wzrosła do 4953 K. Z kolei wzrost temperatury T_p z 25 do 85°C na module Peltiera powodował wzrost temperatury barwowej T_B o około 70 K dla badanych prądów przewodzenia I_F .

W przypadku źródła LED typu B wzrost wartości prądu przewodzenia I_F oraz temperatury modułu Peltiera T_p powodował około dwukrotnie większy wzrost wartości temperatury barwowej T_B w stosunku do źródła typu A (rys. 9.9). Wzrost temperatury modułu Peltiera T_p z 25 do 85°C powodował wzrost temperatury barwowej T_B o 150 K dla wszystkich badanych prądów przewodzenia I_F .

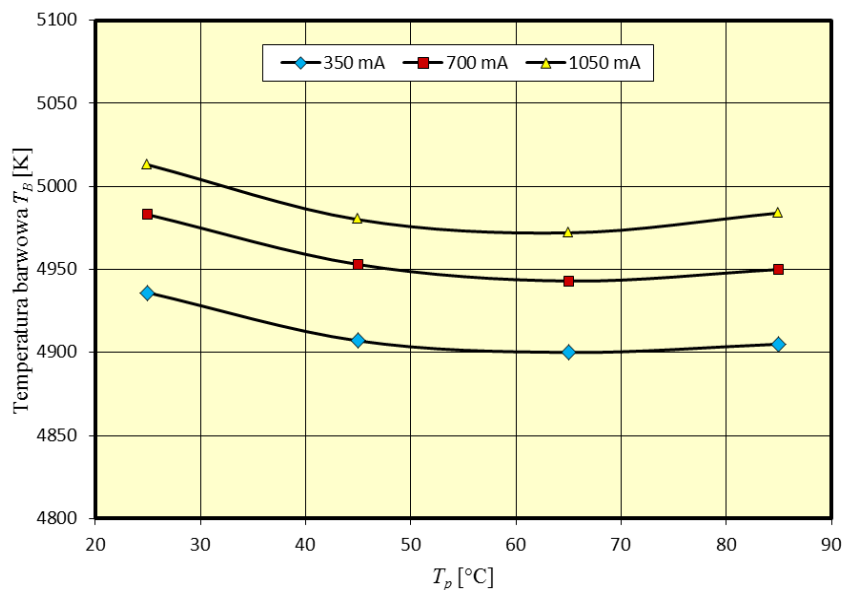


Rys. 9.9. Temperatura barwowa T_B w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu B

W przypadku źródeł typu C wzrost temperatury T_p , podobnie jak w przypadku źródła typu A oraz B, powodował zwiększenie wartości temperatury barwowej T_B . Wzrost ten był największy spośród wszystkich badanych półprzewodnikowych źródeł światła (rys. 9.10). Zwiększenie temperatury T_p z 25 do 85°C skutkowało wzrostem temperatury barwowej T_B o około 200 K w przypadku obydwu badanych prądów przewodzenia I_F .



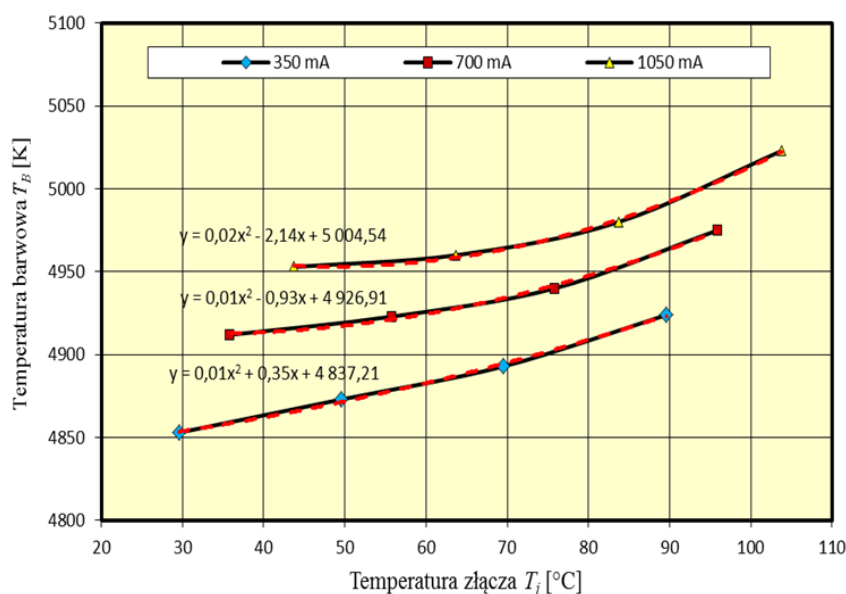
Rys. 9.10. Temperatura barwowa T_B w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu C



Rys. 9.11. Temperatura barwowa T_B w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu D

Dla ostatniego z badanych półprzewodnikowych źródeł światła – źródła typu D, początkowy wzrost temperatury T_p powodował obniżenie wartości temperatury barwowej T_B (rys. 9.11). Zmiana temperatury T_p z 25 do 65°C skutkowałą zmniejszeniem wartości temperatury barwowej o około 45 K, w przypadku wszystkich trzech prądów przewodzenia I_F . Dalsze zwiększenie T_p do 85°C skutkowało wzrostem temperatury barowej T_B o kilka Kelvinów.

Dla zadanych temperatur T_p , zmiana temperatury barwowej T_B , w zależności od typu źródła, zawierała się w przedziale od kilkudziesięciu do kilkuset Kelvinów, jednak zmiana ta, nie była na tyle znacząca, aby zmienić postrzeganie danej barwy.

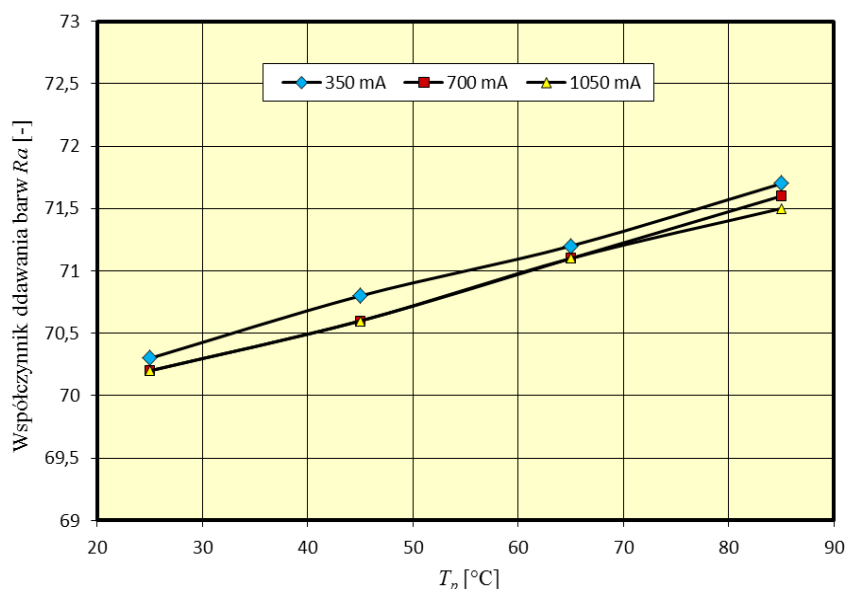


Rys. 9.12. Wykres zależności temperatury barwowej T_B w funkcji temperatury złącza T_j – źródło LED typu A

Podobnie jak w przypadku wykresu zmian strumienia świetlnego Φ (rys. 9.7), wykres zmian temperatury barwowej T_B w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p transformowano w funkcję temperatury złącza T_j . Przedstawiony wykres zmian $T_B = f(T_j)$ aproksymowano równaniem funkcji kwadratowej. Przykład dla źródła typu A zilustrowano na rys. 9.12.

9.3. Współczynnik oddawania barw Ra

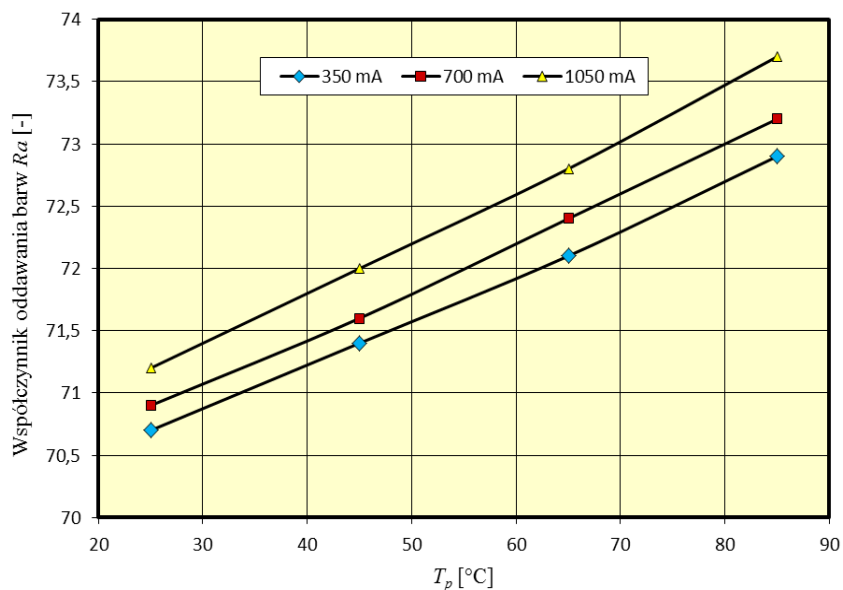
Pomiar współczynnika oddawania barw Ra przeprowadzono na opisanym wcześniej stanowisku badawczym (rys. 9.2), przyjmując warunki jak przy pomiarach strumienia świetlnego Φ . Wyniki przeprowadzonych badań dla źródeł LED od typu A do D przedstawiono na rys. 9.13-9.16.



Rys. 9.13. Współczynnik oddawania barw Ra w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu A

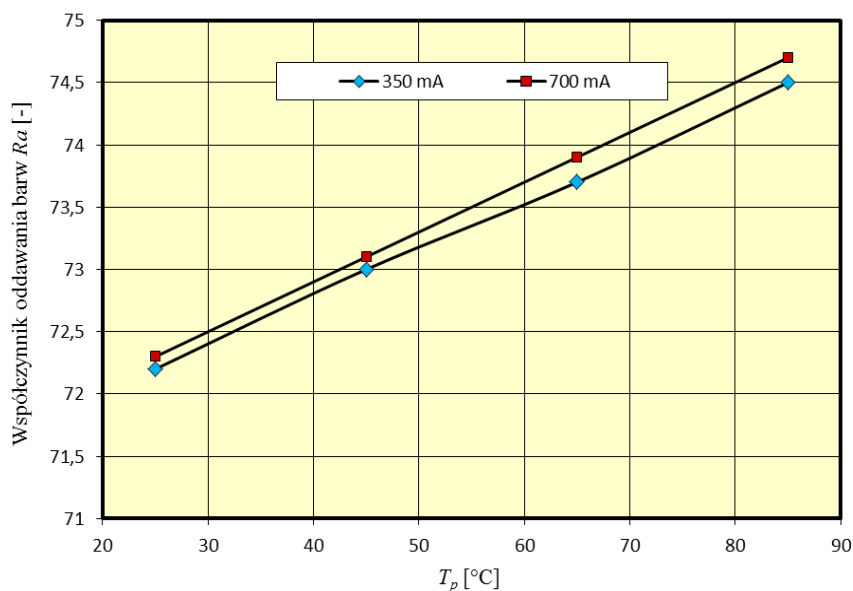
Dla źródła światła LED typu A wzrost temperatury na module Peltiera T_p powodował wzrost wartości współczynnika oddawania barw Ra (rys. 9.13). Wzrost ten miał charakter liniowy. Przy wzroście T_p z 25 do 85°C wartość Ra zmieniła się średnio z 70,2 na 71,6, przy czym dla prądu przewodzenia $I_F = 350$ mA wartość ta była nieznacznie wyższa.

W przypadku półprzewodnikowego źródła światła typu B odnotowano wyższy wpływ temperatury T_p na wartość współczynnika oddawania barw Ra , w porównaniu ze źródłem typu A (rys. 9.14). Zwiększenie temperatury T_p z 25 do 85°C powodowało wzrost wartości Ra o ponad 2 dla wszystkich trzech badanych prądów przewodzenia I_F .



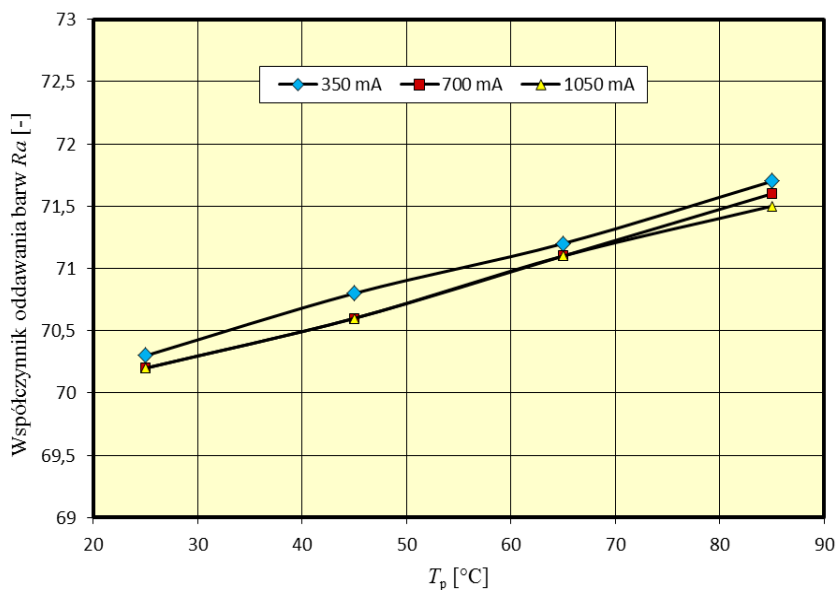
Rys. 9.14. Współczynnik oddania barw R_a w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu B

Dla źródła światła typu C, podobnie jak w przypadku wcześniej badanych półprzewodnikowych źródeł światła, wzrost temperatury T_p powodował liniowy wzrost wartości współczynnika oddawania barw R_a (rys. 9.15). Wzrost ten, analogicznie do przypadku źródła światła typu B, wyniósł ponad 2 przy zadanych zmianach temperatury T_p (25-85°C).



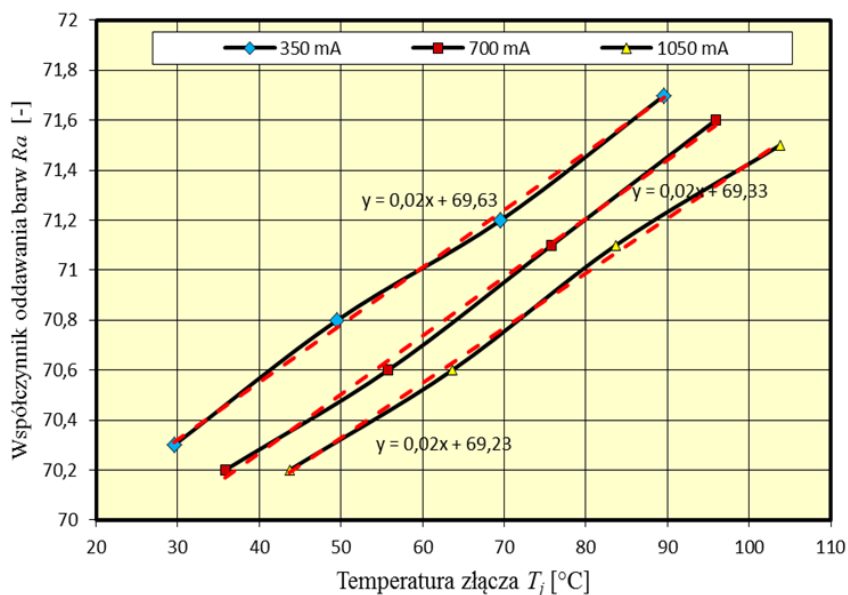
Rys. 9.15. Współczynnik oddania barw R_a w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu C

Dla ostatniego z badanych źródeł LED – źródła typu D, wpływ temperatury T_p na współczynnik oddawania barw R_a był analogiczny do źródła światła typu A (rys. 9.16). Wzrost temperatury T_p z 25 do 85°C powodował wzrost wartości współczynnika R_a o około 1,5, a zmiana wartości prądu przewodzenia I_F nie wpływała znacząco na jego wartość.



Rys. 9.16. Współczynnik oddawania barw R_a w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu D

Dla wszystkich badanych półprzewodnikowych źródeł światła wzrost temperatury pracy powodował niewielki wzrost wartości współczynnika oddawania barw R_a . Przykładowy wykres zmian współczynnika oddawania barw R_a w funkcji temperatury złącza T_j dla źródła LED typu A przedstawiono na rys. 9.17. Funkcja zmian $R_a = f(T_j)$ została opisana równaniem prostej i zaznaczona czerwoną, przerywaną linią.



Rys. 9.17. Wykres zależności współczynnika oddawania barw R_a w funkcji temperatury złącza T_j – źródło LED typu A

9.4. Sprawność optyczna η_o

W kontekście wyznaczania temperatury złącza T_j półprzewodnikowych źródeł światła jednym z istotnych elementów decydujących o dokładności obliczeń jest poprawne oszacowanie mocy cieplnej P_H źródeł LED (rozdz. 7.). Moc ta definiowana jest w sposób następujący [54]:

$$P_H = P_e - P_o \text{ [W]} \quad (9.2)$$

gdzie: P_H – moc cieplna, P_e – moc elektryczna, P_o – moc optyczna.

Z mocą cieplną P_H półprzewodnikowych źródeł światła, bezpośrednio związana jest sprawność optyczna η_o , definiowana wzorem:

$$\eta_o = \frac{P_e - P_H}{P_e} \cdot 100\% = \frac{P_o}{P_e} \cdot 100\% \text{ [%]} \quad (9.3)$$

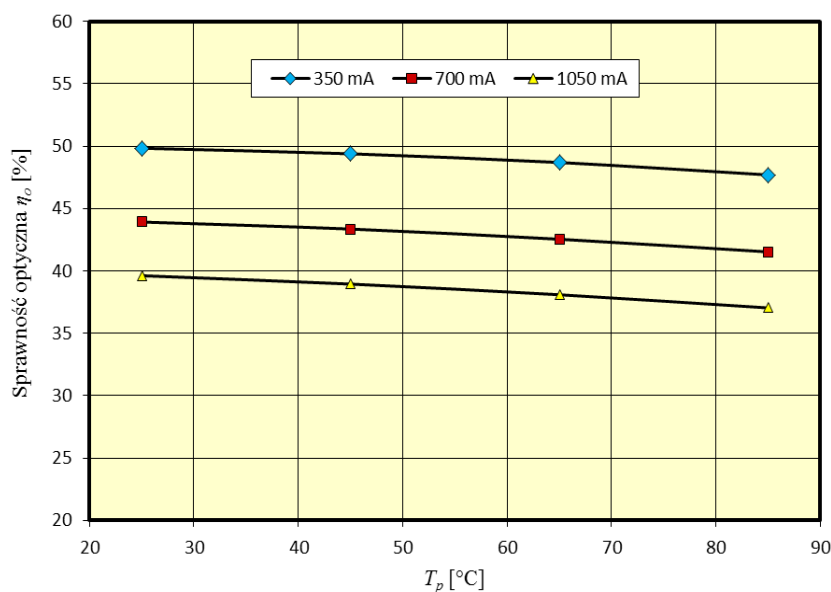
Sprawność optyczna η_o w wielu publikacjach naukowych [23, 28, 54, 55, 61, 72, 78, 79] jest na poziomie 10-35%, jednak ciągły rozwój, postęp technologiczny i coraz lepsze parametry osiągnięte przez źródła LED sprawiają, że sprawność ta może osiągać nieco wyższe wartości.

Dla badanych półprzewodnikowych źródeł światła wyznaczono moc elektryczną P_e , moc cieplną P_H , moc optyczną P_o oraz sprawność optyczną η_o . Pomiarów przeprowadzono w sposób analogiczny do wcześniejszych pomiarów tj. dla $I_F = 350; 700$ i 1050mA oraz $T_p = 25; 45; 65$ i 85°C .

Tabela 9.2. Moc elektryczna P_e , moc optyczna P_o , moc cieplna P_H oraz sprawność optyczna η_o dla źródła LED A

Prąd I_F [mA]	Temperatura T_p [$^\circ\text{C}$]	Moc elektryczna P_e [W]	Moc optyczna P_o [W]	Moc cieplna P_H [W]	Sprawność optyczna η_o [%]
350	25	1,01	0,50	0,51	49,83
	45	0,99	0,49	0,50	49,39
	65	0,98	0,48	0,50	48,69
	85	0,97	0,46	0,51	47,70
700	25	2,13	0,94	1,19	43,92
	45	2,10	0,91	1,19	43,36
	65	2,08	0,88	1,20	42,54
	85	2,06	0,85	1,18	41,52
1050	25	3,35	1,33	2,02	39,62
	45	3,30	1,29	2,01	38,94
	65	3,26	1,24	2,02	38,09
	85	3,22	1,19	2,03	37,04

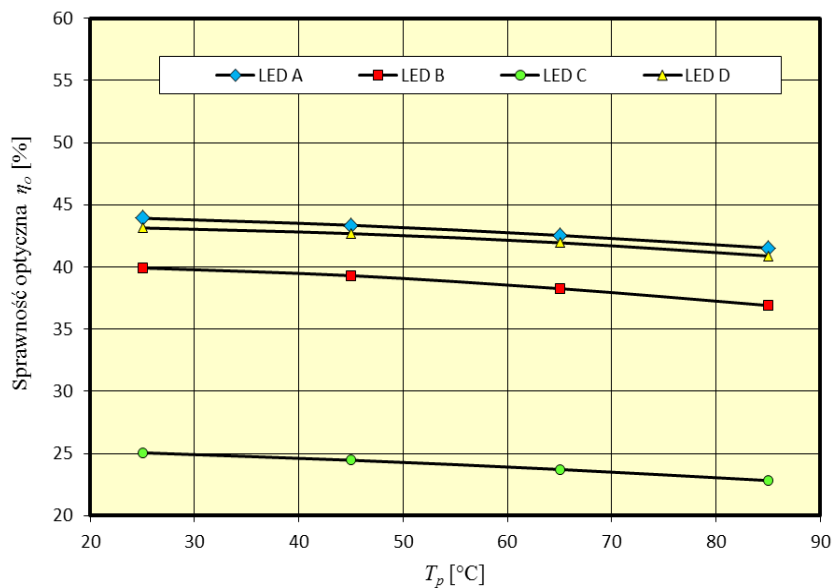
W tabeli 9.2 przedstawiono wyniki badań mocy P_e , P_o , P_H oraz sprawności optycznej η_o (rys. 9.18) dla źródła LED typu A. Decydującym czynnikiem wpływającym na sprawność optyczną η_o była wartość prądu przewodzenia I_F . Wraz ze wzrostem wartości prądu I_F sprawność optyczna η_o malała i przy $T_p = 25^\circ\text{C}$ wyniosła 50% dla prądu $I_F = 350$ mA, 44% dla $I_F = 700$ mA oraz 40% dla $I_F = 1050$ mA. Wzrost temperatury pracy źródeł LED wpływał na obniżenie sprawności optycznej η_o w mniejszym stopniu, zmiana temperatury T_p z 25 na 85°C skutkowała obniżeniem sprawności optycznej η_o dla wszystkich trzech badanych prądów I_F średnio o ok. 2%.



Rys. 9.18. Sprawność optyczna η_o w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – źródło LED typu A

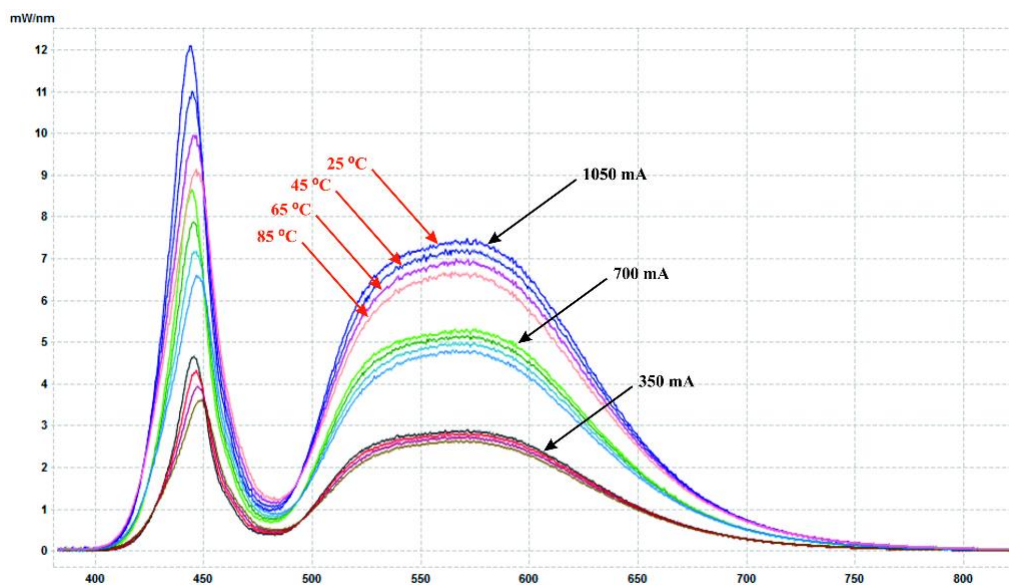
Sprawność optyczną η_o w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p dla wszystkich czterech badanych źródeł LED, przy prądzie przewodzenia $I_F = 700$ mA, przedstawia rys. 9.19.

Źródła LED typu A i D charakteryzowały się zbliżoną wartością sprawności optycznej η_o wynoszącej średnio ok. 42% dla badanego zakresu temperatury T_p . Sprawność optyczna η_o źródła LED typu B była niższa o kilka % w stosunku do wymienionych wcześniej dwóch źródeł LED i wynosiła ok. 38%. Najniższa wartość sprawności optycznej η_o została zmierzona dla diody C, sprawność η_o wynosiła „tylko” ok. 24% i w znaczący sposób odbiegała od sprawności optycznej η_o wymienionych wcześniej półprzewodnikowych źródeł światła.



Rys. 9.19. Sprawność optyczna η_o w funkcji temperatury modułu Peltiera T_p – badane źródła LED, $I_F = 700 \text{ mA}$

Temperatura pracy półprzewodnikowych źródeł światła wpływa również na rozkład widmowy analizowanych źródeł LED. Na rysunku 9.20 przedstawiono rozkład widmowy źródła LED typu A dla badanych wartości prądu przewodzenia I_F oraz temperatury T_p . Wzrost wartości temperatury modułu Peltiera T_p powodował obniżenie amplitudy rozkładu widmowego przy danej wartości prądu I_F . Wraz ze wzrostem temperatury T_p zauważalne było również przesunięcie długości fali dominującej w kierunku długofalowym.



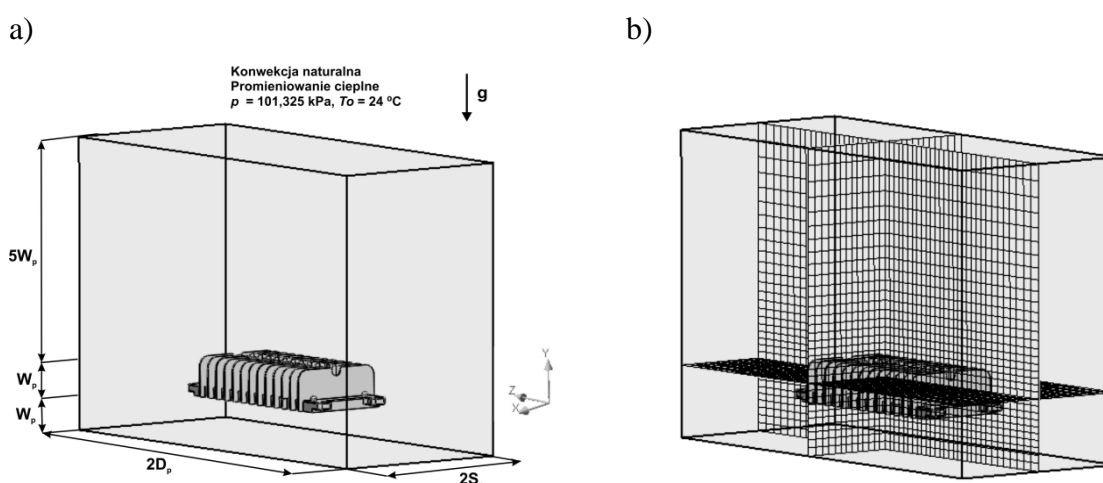
Rys. 9.20. Rozkład widmowy źródła LED typu A dla badanych prądów $I_F = 350, 700, 1050 \text{ mA}$ i badanych temperatur $T_p = 25, 45, 65, 85 \text{ °C}$

Badane półprzewodnikowe źródła światła charakteryzowały się sprawnością optyczną η_o zawierającą się średnio w przedziale 30-50%. Decydujący wpływ na wartość sprawności optycznej η_o miała głównie wartość prądu przewodzenia I_F . Wzrost temperatury T_p w nieznacznym stopniu wpływał na obniżenie sprawności optycznej η_o .

10. Wpływ temperatury panelu LED na wybrane parametry świetlne

Uzyskane wyniki badań dla pojedynczego źródła LED (rozd. 9.), stały się podstawą do modelowania wpływu zmian temperatury panelu LED na jego wybrane parametry świetlne (strumień świetlny Φ , temperatura barwowa T_B oraz współczynnik oddawania barw R_a). Do badań wykorzystano panel LED ze źródłami typu A, którego model termiczny został zweryfikowany pomiarami eksperymentalnymi (pkt 8.6).

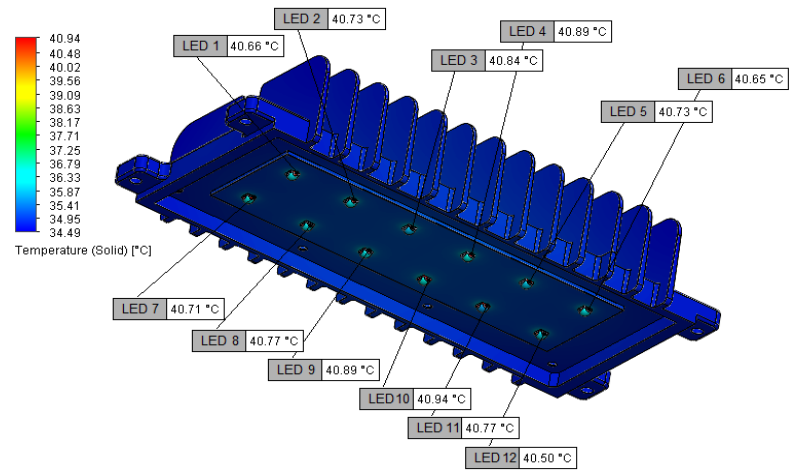
Badania symulacyjne panelu LED przeprowadzono dla trzech wartości temperatury otoczenia T_o : 0; 24 oraz 50°C. Do weryfikacji wybrano temperaturę otoczenia $T_o = 24^\circ\text{C}$, ze względu na taką samą wartość temperatury panującej w laboratorium, w którym przeprowadzono pomiary eksperymentalne. Temperatura złącza T_j poszczególnych źródeł panelu LED została wyznaczona dla prądu przewodzenia I_F : 350; 700 oraz 1050 mA. Warunki brzegowe oraz domenę obliczeniową dla badanego panelu LED przedstawiono na rys. 10.1.



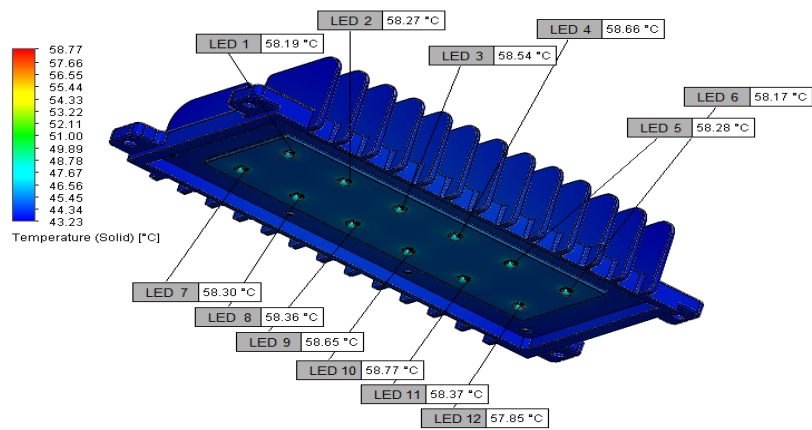
Rys. 10.1. Model symulacyjny panelu LED: a) domena obliczeniowa wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi, b) przekrój siatki obliczeniowej wzdłuż osi XYZ

Na rysunku 10.2 przedstawiono rozkład temperatury panelu oraz temperaturę złącza T_j poszczególnych źródeł panelu LED dla badanych wartości prądu przewodzenia I_F . Na podstawie uzyskanych wartości temperatury złącza T_j źródeł LED, wyznaczono parametry świetlne, opierając się na wyznaczonych zależnościach: $\Phi = f(T_j)$, $T_B = f(T_j)$ i $R_a = f(T_j)$ (rozd. 9).

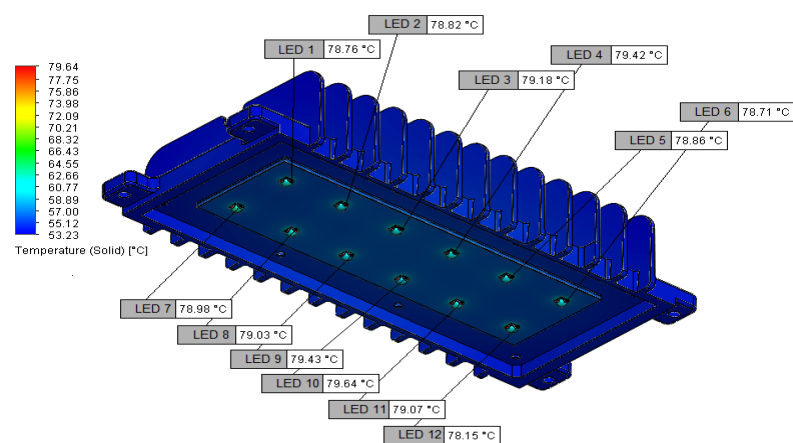
a)



b)



c)



Rys. 10.2. Wyznaczona temperatura złącza T_j poszczególnych źródeł dla panelu LED przy prądzie przewodzenia I_F : a) 350 mA, b) 700 mA, c) 1050 mA

W tabelach 10.1-10.3, przedstawiono obliczone parametry świetlne dla poszczególnych źródeł LED oraz parametry świetlne panelu LED, które zostały wyznaczone następująco:

$$\Phi_{panel_LED} = \Phi_{LED1} + \Phi_{LED2} + \dots + \Phi_{LED12} \text{ [lm]} \quad (10.1)$$

$$T_{B\ panel_LED} = \frac{T_{B\ LED1} + T_{B\ LED2} + \dots + T_{B\ LED12}}{12} \text{ [K]} \quad (10.2)$$

$$Ra_{panel_LED} = \frac{Ra_{LED1} + Ra_{LED2} + \dots + Ra_{LED12}}{12} \text{ [-]} \quad (10.3)$$

$$\eta_{panel_LED} = \frac{\Phi_{panel_LED}}{P_{el_panel_LED}} \text{ [lm/W]} \quad (10.4)$$

gdzie: Φ_{panel_LED} – strumień świetlny panelu LED, Φ_{LED} – strumień świetlny źródła LED, $T_{B\ panel_LED}$ – temperatura barwowa panelu LED, $T_{B\ LED}$ – temperatura barwowa źródła LED, Ra_{panel_LED} – wskaźnik oddawania barw panelu LED, Ra_{LED} – wskaźnik oddawania barw źródła LED, $P_{el_panel_LED}$ – moc elektryczna panelu LED.

Tabela 10.1. Wyznaczone parametry świetlne źródeł oraz panelu LED dla $T_o = 0^\circ\text{C}$

	$I_F = 350 \text{ mA}$					$I_F = 700 \text{ mA}$					$I_F = 1050 \text{ mA}$				
	$T_j [^\circ\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$R_a [-]$		$T_j [^\circ\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$R_a [-]$		$T_j [^\circ\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$R_a [-]$	
LED 1	16,96	175,81	4845,24	69,86		35,46	317,96	4912,60	70,25		55,04	436,31	4954,30	70,42	
LED 2	16,98	175,80	4845,25	69,86		35,56	317,91	4912,62	70,25		55,99	435,53	4954,65	70,45	
LED 3	17,09	175,78	4845,32	69,87		35,83	317,76	4912,65	70,25		56,62	435,02	4954,90	70,46	
LED 4	17,12	175,77	4845,34	69,87		35,94	317,70	4912,67	70,25		56,45	435,16	4954,83	70,46	
LED 5	16,99	175,80	4845,26	69,86		35,56	317,91	4912,62	70,25		56,00	435,52	4954,65	70,45	
LED 6	16,92	175,82	4845,22	69,86		35,46	317,96	4912,60	70,25		55,93	435,58	4954,62	70,44	
LED 7	17,01	175,80	4845,27	69,86		35,55	317,91	4912,61	70,25		55,62	435,84	4954,51	70,44	
LED 8	17,03	175,79	4845,28	69,87		35,65	317,86	4912,63	70,25		55,74	435,74	4954,55	70,44	
LED 9	17,15	175,76	4845,35	69,87		35,92	317,71	4912,67	70,25		56,36	435,23	4954,79	70,45	
LED 10	17,19	175,75	4845,38	69,87		36,04	317,65	4912,69	70,26		56,21	435,35	4954,73	70,45	
LED 11	17,04	175,79	4845,29	69,87		35,67	317,85	4912,63	70,25		55,79	435,70	4954,57	70,44	
LED 12	16,79	175,85	4845,14	69,86		35,14	318,13	4912,56	70,24		55,72	435,75	4954,54	70,44	
Panel LED	-	2109,51	4845,28	69,87		-	3814,32	4912,63	70,25		-	5226,73	4954,64	70,45	
Skuteczność świetlna η [lm/W]: 174,05					Skuteczność świetlna η [lm/W]: 151,36					Skuteczność świetlna η [lm/W]: 131,99					

 $T_o = 0^\circ\text{C}$

Tabela 10.2. Wyznaczone parametry świetlne źródeł oraz panelu LED dla $T_o = 24^{\circ}\text{C}$

		$I_F = 350 \text{ mA}$					$I_F = 700 \text{ mA}$					$I_F = 1050 \text{ mA}$				
		$T_j [^{\circ}\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$Ra [-]$		T_j	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$Ra [-]$		$T_j [^{\circ}\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$Ra [-]$	
$T_o = 24^{\circ}\text{C}$		LED 1	40,66	169,69	4867,97	70,44	58,19	305,78	4906,65	70,49	78,76	417,45	4960,06	70,81		
		LED 2	40,73	169,69	4867,97	70,44	58,27	305,78	4906,65	70,49	78,82	417,45	4960,06	70,81		
		LED 3	40,84	169,69	4867,97	70,44	58,54	305,78	4906,65	70,49	79,18	417,45	4960,06	70,81		
		LED 4	40,89	169,69	4867,97	70,44	58,66	305,78	4906,65	70,49	79,42	417,45	4960,06	70,81		
		LED 5	40,73	169,69	4867,97	70,44	58,28	305,78	4906,65	70,49	78,86	417,45	4960,06	70,81		
		LED 6	40,65	169,69	4867,97	70,44	58,17	305,78	4906,65	70,49	78,71	417,45	4960,06	70,81		
		LED 7	40,71	169,69	4867,97	70,44	58,30	305,78	4906,65	70,49	78,98	417,45	4960,06	70,81		
		LED 8	40,77	169,69	4867,97	70,44	58,36	305,78	4906,65	70,49	79,03	417,45	4960,06	70,81		
		LED 9	40,89	169,69	4867,97	70,44	58,65	305,78	4906,65	70,49	79,73	417,45	4960,06	70,81		
		LED 10	40,94	169,69	4867,97	70,44	58,77	305,78	4906,65	70,49	79,64	417,45	4960,06	70,81		
		LED 11	40,77	169,69	4867,97	70,44	58,37	305,78	4906,65	70,49	79,07	417,45	4960,06	70,81		
		LED 12	40,50	169,69	4867,97	70,44	57,85	305,78	4906,65	70,49	78,15	417,45	4960,06	70,81		
Panel LED	-	2035,96	4868,09	70,45	-	3668,18	4906,70	70,50	-	5006,71	4960,33	70,81				
		Skuteczność świetlna η [lm/W]: 171,36					Skuteczność świetlna η [lm/W]: 146,96					Skuteczność świetlna η [lm/W]: 129,57				

Tabela 10.3. Wyznaczone parametry świetlne źródeł oraz panelu LED dla $T_o = 50^{\circ}\text{C}$

	$I_F = 350 \text{ mA}$						$I_F = 700 \text{ mA}$						$I_F = 1050 \text{ mA}$					
	$T_j [^{\circ}\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$R_a [-]$	$T_j [^{\circ}\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$R_a [-]$	$T_j [^{\circ}\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$R_a [-]$	$T_j [^{\circ}\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_B [\text{K}]$	$R_a [-]$		
LED 1	66,81	162,87	4891,24	71,29	85,73	291,04	4957,11	71,65	104,88	395,48	5026,86	71,63	104,88	395,48	5026,86	71,63		
LED 2	66,84	162,87	4891,27	71,29	85,80	291,00	4957,23	71,65	105,88	394,66	5029,45	71,64	105,88	394,66	5029,45	71,64		
LED 3	66,95	162,84	4891,41	71,29	86,10	290,84	4957,72	71,66	106,47	394,18	5031,00	71,65	106,47	394,18	5031,00	71,65		
LED 4	67,00	162,82	4891,48	71,29	86,23	290,77	4957,93	71,66	106,27	394,34	5030,47	71,65	106,27	394,34	5030,47	71,65		
LED 5	66,84	162,87	4891,27	71,29	85,85	290,98	4957,31	71,65	105,81	394,72	5029,26	71,64	105,81	394,72	5029,26	71,64		
LED 6	66,79	162,88	4891,21	71,29	85,71	291,05	4957,08	71,65	105,76	394,76	5029,13	71,64	105,76	394,76	5029,13	71,64		
LED 7	66,86	162,86	4891,30	71,29	85,84	290,98	4957,29	71,65	105,46	395,01	5028,35	71,64	105,46	395,01	5028,35	71,64		
LED 8	66,89	162,85	4891,34	71,29	85,92	290,94	4957,42	71,65	105,64	394,86	5028,82	71,64	105,64	394,86	5028,82	71,64		
LED 9	67,01	162,82	4891,49	71,29	86,21	290,78	4957,90	71,66	106,24	394,37	5030,39	71,65	106,24	394,37	5030,39	71,65		
LED 10	67,06	162,81	4891,55	71,29	86,34	290,71	4958,11	71,67	106,04	394,53	5029,87	71,65	106,04	394,53	5029,87	71,65		
LED 11	66,90	162,85	4891,35	71,29	85,95	290,92	4957,47	71,65	105,55	394,93	5028,59	71,64	105,55	394,93	5028,59	71,64		
LED 12	66,65	162,91	4891,03	71,28	85,39	291,22	4956,56	71,64	105,52	394,96	5028,51	71,64	105,52	394,96	5028,51	71,64		
Panel LED	-	1954,25	4891,33	71,29	-	3491,26	4957,43	71,65	-	4736,81	5029,22	71,64	-	4736,81	5029,22	71,64		
$T_o = 50^{\circ}\text{C}$																		
			Skuteczność świetlna η [lm/W]: 166,18			Skuteczność świetlna η [lm/W]: 141,23			Skuteczność świetlna η [lm/W]: 124,13									

Na podstawie wyznaczonych parametrów świetlnych poszczególnych źródeł LED określono parametry świetlne panelu LED. Strumień świetlny panelu LED Φ_{panel_LED} został wyznaczony jako suma strumieni świetlnych $\Sigma \phi_{LED1...LED12}$ poszczególnych źródeł LED (wzór 10.1). W przypadku temperatury barwowej T_{Bpanel_LED} oraz współczynnika oddawania barw Ra_{panel_LED} panelu LED wymienione parametry zostały wyznaczone jako średnia arytmetyczna T_{BLEED} oraz Ra_{LED} wszystkich źródeł LED, zgodnie ze wzorami (10.2) oraz (10.3).

Parametry świetlne panelu LED określono dla trzech wartości temperatury otoczenia T_o (0; 24 i 50°C) oraz prądu przewodzenia I_F : 350; 700 i 1050 mA. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że największy wpływ na zmianę wartości parametrów świetlnych panelu LED ma wartość prądu przewodzenia I_F , wraz z którą zmienia się proporcjonalnie temperatura złącza T_j . Wraz ze wzrostem wartości prądu przewodzenia I_F z 350 do 1050 mA, następował wzrost temperatury złącza T_j źródeł LED o ok. 40°C. Zwiększenie wartości I_F oraz T_j powodowało wzrost temperatury barwowej T_{Bpanel_LED} o ponad 100 K oraz współczynnika oddawania barw Ra_{panel_LED} o ok. 0,5. Wartość skuteczności świetlnej η jest z kolei odwrotnie proporcjonalna do wartości prądu przewodzenia I_F . Jego wzrost z 350 do 1050 mA skutkuje obniżeniem skuteczności świetlnej η o ponad 40 lm/W.

Zmiana temperatury otoczenia T_o , a tym samym zmiana temperatury złącza źródeł T_j wpływa ma zmianę wartości parametrów świetlnych panelu LED. Jej wzrost o 50°C, a tym samym przybliżony wzrost temperatury T_j , skutkuje niewielkim wzrostem temperatury barwowej T_{Bpanel_LED} i współczynnika oddawania barw Ra_{panel_LED} . Wzrost ten wpływa jednak na znaczne obniżenie wartości skuteczności świetlnej η , średnio o ok. 10 lm/W.

Opracowany i zbudowany prototyp panelu LED (rys. 8.31) posłużył do weryfikacji wyników badań symulacyjnych. Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, w skład którego wchodziła kula Ulbrichta o średnicy 2 m oraz spektrometr CS-2000 firmy Konica Minolta [91, 127] (rys. 10.3).

Na stanowisku badawczym dokonano pomiarów: strumienia świetlnego Φ , temperatury barwowej T_B oraz współczynnika oddawania barw Ra . Pomiarów przeprowadzono dla prądu przewodzenia I_F : 350; 700 oraz 1050 mA. Pomiar parametrów świetlnych następował po ustabilizowaniu termicznym panelu LED po czasie wynoszącym $t = 60$ min. W trakcie trwania badań w laboratorium temperatura otoczenia $T_o = 24$ °C.

a)



b)



Rys. 10.3. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru parametrów świetlnych panelu LED: a) kula całkująca o średnicy 2 m, b) spektrometr CS-2000

W tabeli 10.4 zestawiono uzyskane wyniki z pomiarów oraz wyniki badań symulacyjnych (tab. 10.2). Względna niepewność pomiaru parametrów świetlnych nie przekraczała wartości 4% [91, 127]. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych (strumień świetlny Φ , temperatura barwowa T_B , współczynnik oddawania barw R_a , skuteczność świetlna η) wykazują dużą zgodność - wartość błędu nie przekroczyła 4,8%. Najmniejszy błąd wyznaczono dla prądu przewodzenia $I_F = 350$ mA, natomiast największy dla prądu $I_F = 1050$ mA.

Tabela 10.5. Zestawienie symulacyjnych i rzeczywistych wyników badań

		Strumień świetlny Φ [lm]	Temperatura barwowa T_B [K]	Współczynnik oddawania barw Ra [-]	Skuteczność świetlna η [lm/W]
$I_F = 350$ mA	Badania symulacyjne	2035,96	4868,09	70,45	171,36
	Badania rzeczywiste	2011,43	4998	70,24	168,32
	Błąd względny [%]	1,22	2,60	0,30	1,81
$I_F = 700$ mA	Badania symulacyjne	3668,18	4906,70	70,50	146,96
	Badania rzeczywiste	3569,09	5051	70,29	142,59
	Błąd względny [%]	2,78	2,86	0,30	3,07
$I_F = 1050$ mA	Badania symulacyjne	5006,71	5029,22	70,81	129,57
	Badania rzeczywiste	4797,58	5102	70,46	123,65
	Błąd względny [%]	4,40	1,43	0,50	4,79

Największy wpływ temperatura T_j wywarła na wartość strumienia świetlnego Φ : wzrost temperatury T_j o 50°C , powodował jego spadek o 10%. Wzrost T_j skutkował również obniżeniem skuteczności świetlnej η o ok. 7% (tab. 10.1-10.3). Nie obserwowano natomiast dużych zmian współczynnika oddawania barw Ra i wartości temperatury barwowej T_B wraz ze zmianą temperatury złącza T_j w tym zakresie. Jej wzrost o 50°C przy $I_F = 1050$ mA skutkował zmianą wartości temperatury barwowej T_B z 4954 na 5029 K, oraz współczynnika Ra z 70,45 na 71,64.

Jak wykazały wyniki badań (rozd. 7. i 8.), na temperaturę złącza T_j źródeł panelu LED w sposób istotny wpływają parametry konstrukcyjne i czynniki środowiskowe. O ilości ciepła dostarczonego do złącza decydują całkowita moc elektryczna P_e źródeł i wynikająca z niej moc cieplna P_H oraz rezystancja termiczna $R_{th_{j-c}}$. Pozostałe czynniki i parametry, takie jak: topologia panelu świetlnego, konstrukcja obwodu drukowanego i układu odprowadzania ciepła (radiacyjnego) oraz warunki środowiskowe, decydują natomiast o ilości ciepła oddawanego do otoczenia, a tym samym wpływają na obniżenie temperatury złącza T_j . Jak wykazano w pracy (rozd. 9. i 10.) temperatura złącza T_j w sposób istotny wpływa na wartość parametrów świetlnych.

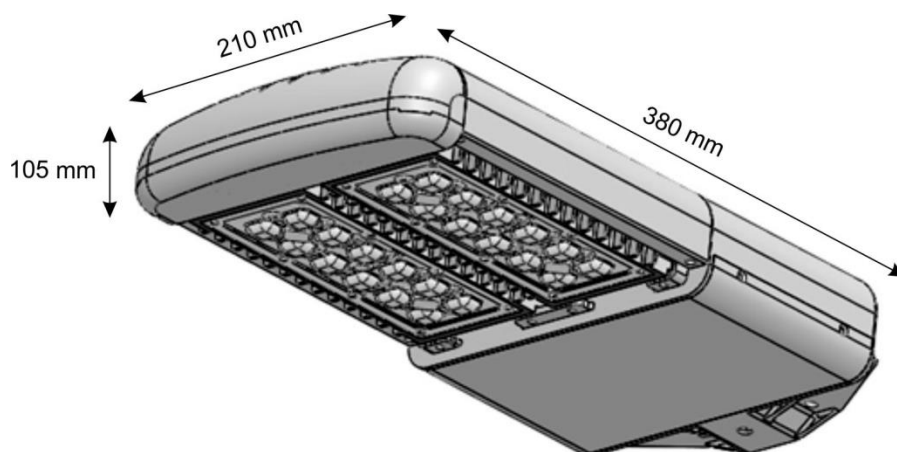
Duża zgodność wyników badań symulacyjnych z wynikami badań eksperymentalnych dowodzi o słuszności przyjętych założeń i wiarygodności opracowanego modelu, który może być wykorzystany w projektowaniu i konstrukcji opraw oświetleniowych.

11. Aplikacja opracowanego modelu termicznego do budowy oprawy oświetleniowej

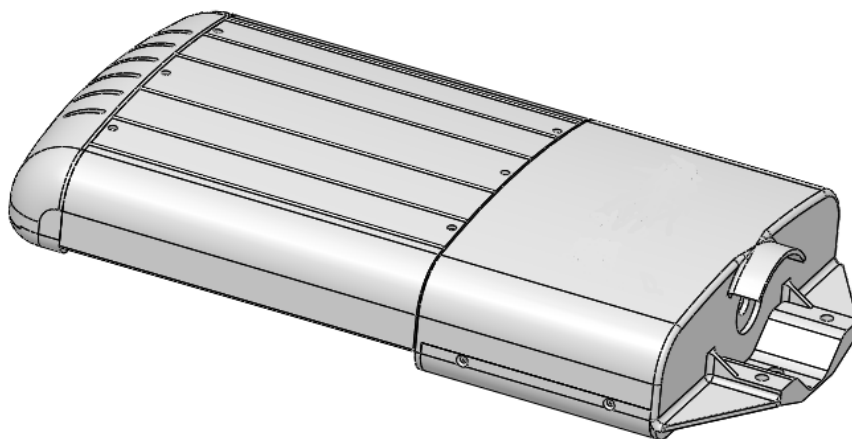
Opracowany i przedstawiony w niniejszej pracy model termiczny panelu LED został wykorzystany do budowy prototypu oprawy oświetlenia drogowego. Konstrukcja tej oprawy oraz sposób odprowadzania ciepła zostały zarejestrowane w Urzędzie Patentowym. Główną część oprawy stanowią dwa panele LED wraz z radiatorami (rys. 8.31), których badania termiczne przedstawiono w pkt 8.5 (rys. 8.36). Panele LED zostały połączone z korpusem oprawy w taki sposób, że pomiędzy korpusem a powierzchnią paneli LED znajduje się wolna przestrzeń, umożliwiająca swobodny wielokierunkowy przepływ powietrza, skutkujący zapewnieniem efektywnego chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła. Dodatkowo w czołowej części korpusu wykonanych zostało kilka równoległych otworów, wzmacniających efekt konwekcyjnego przepływu powietrza pomiędzy powierzchnią radiatorów a otoczeniem. W dolnej części oprawy wykonano komorę zasilania, w której umieszczono zasilacz i opcjonalnie układ sterowania. W celu formowania pożądanego w oświetleniu drogowym rozsyłu strumienia świetlnego, na panelach LED zostały zainstalowane układy soczewkowe o stopniu szczelności IP67, stanowiące równocześnie zabezpieczenie źródeł LED przed czynnikami środowiskowymi. Na rysunku 11.1 zaprezentowano perspektywiczne widoki projektowanej oprawy drogowej, jak również przekrój poprzeczny obrazujący wolną przestrzeń pomiędzy radiatorami a korpusem oprawy.

Dla przedstawionego modelu oprawy oświetlenia drogowego, przeprowadzono symulacyjne badania termiczne dla prądu przewodzenia I_F pojedynczego źródła LED (350; 700 oraz 1050 mA). Parametry modelu termicznego oprawy zostały określone w sposób analogiczny do modelu termicznego badanego wcześniej panelu LED (tab. 7.4, 8.1 i 9.2). Dodatkowo sparametryzowany został korpus oprawy, wykonany z wysokociśnieniowego odlewki aluminiowego. Badania symulacyjne wykonano dla temperatury otoczenia $T_o = 25^\circ\text{C}$ oraz przy założeniu konwekcji naturalnej.

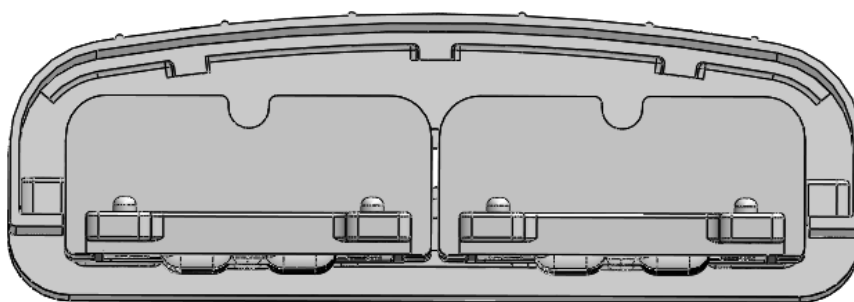
a)



b)



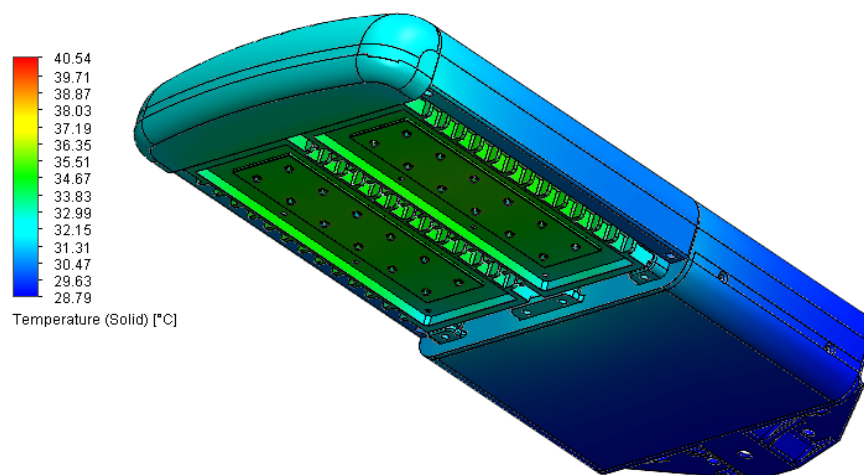
c)



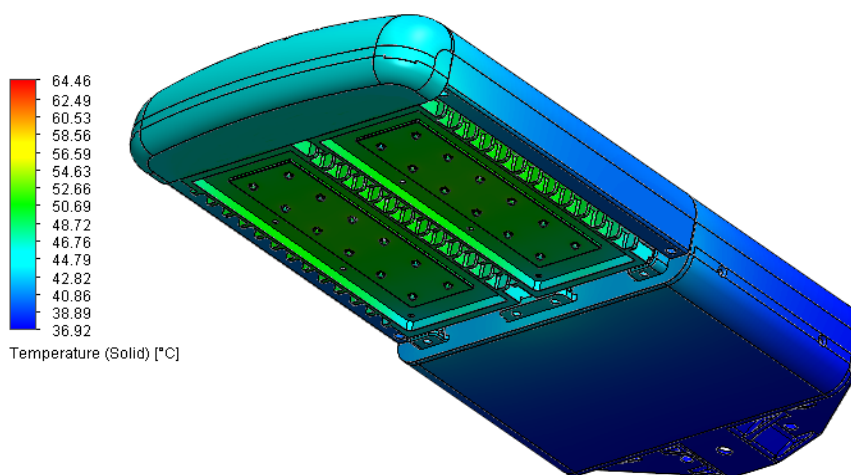
Rys. 11.1. Model 3D oprawy oświetlenia drogowego: a) widok perspektywiczny od dołu, b) widok perspektywiczny z góry, c) przekrój poprzeczny

Na rysunku 11.2 przedstawiono symulacyjny rozkład temperatury oprawy oświetleniowej w stanie ustalonym dla trzech badanych wartości prądu przewodzenia I_F .

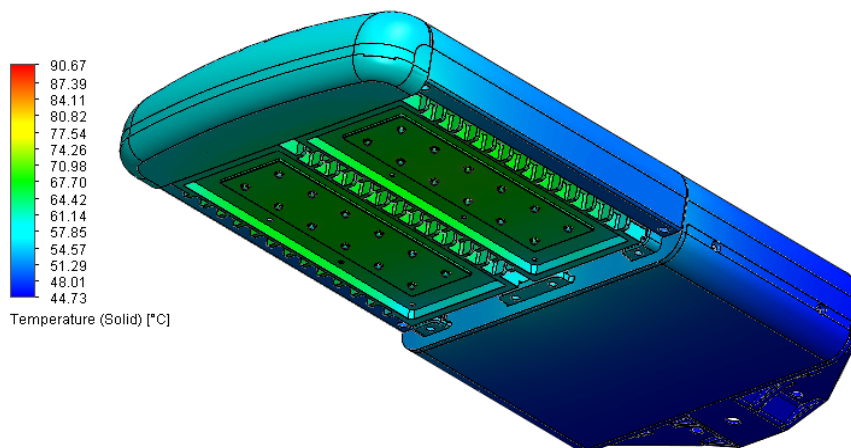
a)



b)



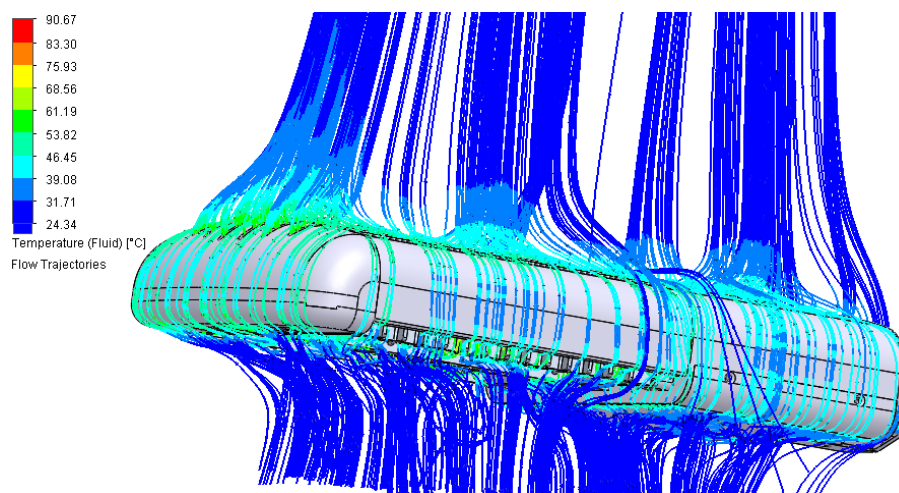
c)



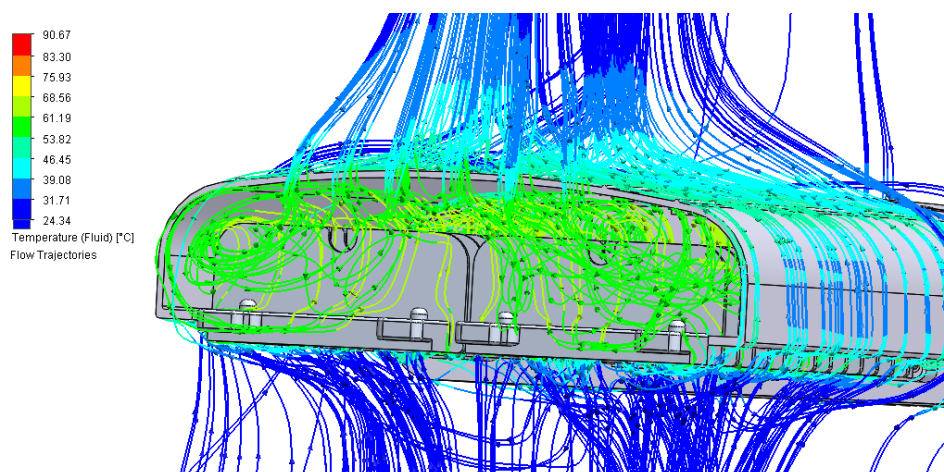
Rys. 11.2. Rozkład temperatury oprawy oświetlenia drogowego, przy prądzie I_F pojedynczego źródła LED wynoszącym odpowiednio: a) 350 mA, b) 700 mA, c) 1050 mA

Maksymalna temperatura złącza T_j zainstalowanych źródeł LED wyniosła ok. 40,5; 64,5 oraz 90,5°C, odpowiednio dla prądu I_F wynoszącego: 350; 700 oraz 1050 mA. Temperatura ta była wyższa o kilka °C w stosunku do temperatury T_j pojedynczego panelu LED (rys. 10.3, tab. 10.2), co jest związane z zainstalowanymi dwoma panelami LED na wspólnym korpusie i występującymi wzajemnymi sprzężeniami termicznymi pomiędzy źródłami światła. Wykorzystanie opracowanej konstrukcji radiatora (rozd. 8.), dało podstawę do konstrukcji oprawy z otwartą przestrzenią pomiędzy powierzchnią paneli LED a korpusem. Rozwiązanie takie umożliwia swobodny przepływ powietrza wokół powierzchni radiatorów, przyczyniając się do równomiernego rozkładu temperatury na powierzchni paneli LED (rys. 11.3).

a)



b)

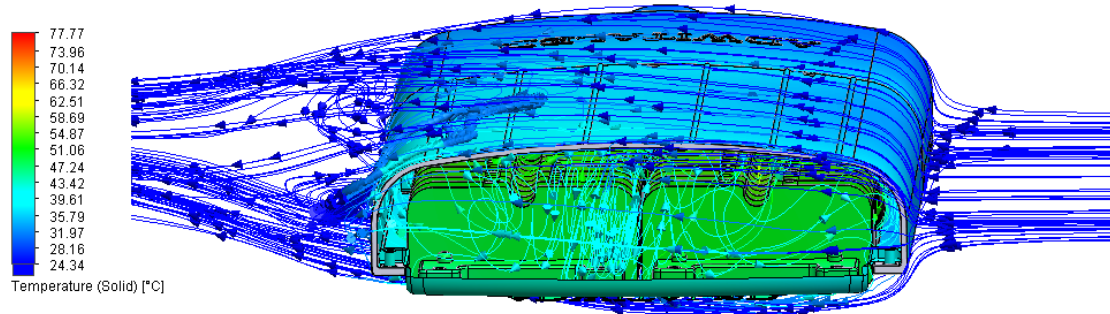


Rys. 11.3. Trajektoria oraz temperatura przepływającego powietrza ($I_F = 1050$ mA): a) wokół powierzchni korpusu oprawy, b) pomiędzy korpusem a powierzchnią radiatorów

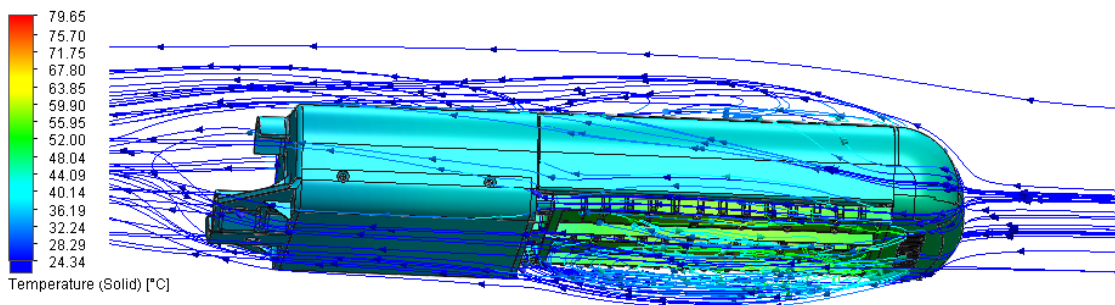
Rysunek 11.4 przedstawia rozkład temperatury badanej oprawy oświetleniowej przy wymuszonym przepływie powietrza. Prędkość wiatru wynosiła $v = 1$ m/s, a jego kierunek

został ustalony z boku i na wprost oprawy. Prąd przewodzenia I_F , dla którego przeprowadzono badania symulacyjne, wynosił 1050 mA.

a)



b)



Rys. 11.4. Rozkład temperatury oraz trajektoria przepływu powietrza dla badanej oprawy oświetleniowej przy $v = 1$ m/s: a) przepływ powietrza prostopadle do dłuższego boku oprawy, b) przepływ powietrza prostopadle do krótszego boku oprawy

Uzyskane wyniki badań, związane z konstrukcją układu radiacyjnego i możliwością wykorzystania wymuszonego przepływu powietrza do ograniczenia temperatury złącza źródeł panelu (rozdz. 8), zostały wykorzystane do konstrukcji oprawy. Przeprowadzone badania potwierdziły założenia konstrukcyjne i nieduża prędkość wymuszonego przepływu powietrza ($v = 1$ m/s), spowodowała znaczne obniżenie maksymalnej temperatury złącza T_j źródeł LED w stosunku do rozkładu temperatury przy konwekcji swobodnej. Spadek ten wyniósł 12,9 oraz 11°C, co stanowiło obniżenie temperatury złącza T_j o 14 i 12%, odpowiednio dla przepływu z boku i na wprost oprawy. Efekt wymuszonego powietrza przepływającego przez oprawę został dodatkowo wzmocniony konstrukcją oprawy, gdzie pomiędzy powierzchnią radiatorów a korpusem oprawy zastosowano wolną przestrzeń, umożliwiającą przepływ powietrza wokół powierzchni radiatorów, wspomagającą wymianę ciepła pomiędzy powierzchnią radiatorów a otoczeniem (rys. 11.3 i 11.4).

W tabeli 11.1 zestawiono wyznaczoną symulacyjnie temperaturę złącza T_j oraz strumień świetlny Φ poszczególnych źródeł LED dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F przy

konwekcji swobodnej. Strumień świetlny Φ został wyznaczony na podstawie równań przedstawionych w rozdz. 9. (rys. 9.7).

Tabela 11.1. Wyznaczona symulacyjnie temperatura złącza T_j i strumień świetlny Φ poszczególnych źródeł LED

	$I_F = 350 \text{ mA}$		$I_F = 700 \text{ mA}$		$I_F = 1050 \text{ mA}$	
	$T_j [^\circ\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_j [^\circ\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$	$T_j [^\circ\text{C}]$	$\Phi [\text{lm}]$
LED 1	39,94	169,88	63,01	303,17	88,34	409,59
LED 2	40,45	169,74	64,20	302,53	90,29	407,99
LED 3	40,54	169,72	64,42	302,41	90,64	407,71
LED 4	40,38	169,76	64,05	302,61	90,02	408,21
LED 5	40,08	169,84	63,23	303,06	88,75	409,26
LED 6	39,37	170,02	61,57	303,95	86,04	411,48
LED 7	39,99	169,86	63,10	303,13	88,55	409,42
LED 8	40,46	169,74	64,27	302,49	90,36	407,93
LED 9	40,54	169,72	64,46	302,39	90,67	407,68
LED 10	40,39	169,76	64,08	302,60	90,07	408,17
LED 11	40,10	169,83	63,29	303,02	88,85	409,17
LED 12	39,41	170,01	61,65	303,91	86,22	411,33
LED 13	39,84	169,90	62,95	303,21	87,88	409,97
LED 14	40,3	169,78	64,1	302,59	89,71	408,47
LED 15	40,38	169,76	64,32	302,47	90,00	408,23
LED 16	40,28	169,79	63,96	302,66	89,48	408,66
LED 17	39,99	169,86	63,17	303,09	88,33	409,60
LED 18	39,34	170,03	61,56	303,96	85,79	411,68
LED 19	39,81	169,91	62,88	303,24	87,75	410,08
LED 20	40,31	169,78	64,09	302,59	89,71	408,47
LED 21	40,4	169,76	64,35	302,45	90,01	408,22
LED 22	40,3	169,78	63,98	302,65	89,52	408,62
LED 23	40,01	169,86	63,2	303,07	88,36	409,57
LED 24	39,32	170,04	61,53	303,97	85,75	411,72
	$\Sigma\Phi = 4076,14 \text{ lm}$		$\Sigma\Phi = 7271,23 \text{ lm}$		$\Sigma\Phi = 9821,23 \text{ lm}$	

Opierając się na przedstawionym modelu symulacyjnym zbudowano prototyp oprawy oświetlenia drogowego. Widok prototypu został przedstawiony na rys. 11.5.

a)



b)



Rys. 11.5. Widok prototypu oprawy oświetlenia drogowego: a) widok dołu oprawy, b) widok góry oprawy

Na prototypie zostały przeprowadzone badania fotometryczne, gdzie wyznaczono krzywą rozsyłu światłości, strumień świetlny Φ oraz skuteczność świetlną η . Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym z wykorzystaniem goniometru BIG 128 firmy Spectrocolor, gdzie deklarowana dokładność nastaw kątów w osiach C- γ wynosiła $0,2^{\circ}$, a niepewność pomiarów fotometrycznych nie przekraczała wartości 5% [127]. Na rysunku 11.6 przedstawiono stanowisko pomiarowe z goniometrem i z zainstalowanym prototypem badanej oprawy oświetleniowej.



Rys. 11.6. Prototyp oprawy oświetlenia drogowego na stanowisku badawczym z goniometrem w Laboratorium Techniki Świetlnej Politechniki Rzeszowskiej

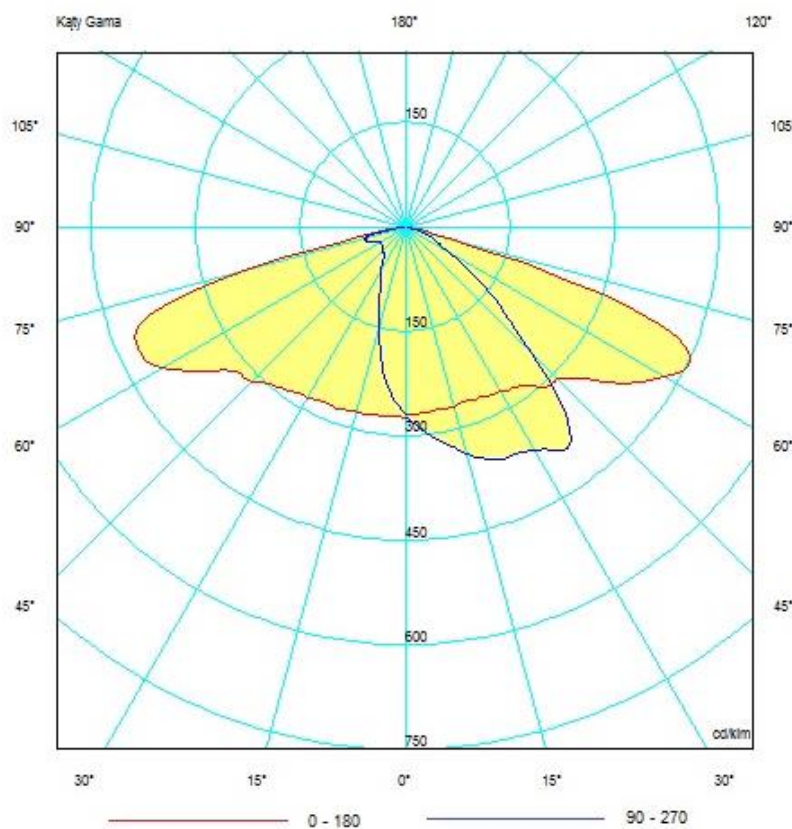
W tabeli 11.2 zestawiono wyznaczone podstawowe parametry badanej oprawy oświetleniowej dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F . Oprawa była zasilana regulowanym zasilaczem stałoprądowym firmy Mean Well o deklarowanej sprawności $\eta_z = 91\%$. Układ formujący rozsył strumienia świetlnego stanowił układ soczewkowy firmy Ledil o sprawności $\eta_s = 94\%$. Błąd względny strumienia świetlnego Φ wyznaczonego symulacyjnie nie przekroczył wartości 5%, dla wszystkich trzech wartości prądu przewodzenia I_F .

Dzięki zaprojektowaniu odpowiedniej konstrukcji radiatorów paneli LED, jak również zastosowaniu otwartej przestrzeni pomiędzy powierzchnią radiatorów a korpusem oprawy, sumaryczna waga oprawy została zminimalizowana do wartości wynoszącej 3,38 kg, jednocześnie zapewniając efektywne, termiczne warunki pracy źródeł LED, co przełożyło się na wysokie wartości skuteczności świetlej η .

Tabela 11.2. Wyznaczone podstawowe parametry świetlne badanej oprawy oświetleniowej dla trzech wartości prądu przewodzenia I_F

Prąd przewodzenia I_F pojedynczego źródła LED [mA]	Moc oprawy P_{opr} [W]	Strumień świetlny Φ [lm]		Skuteczność świetlna oprawy η [lm/W]	Waga oprawy [kg]
		z układem soczewkowym	bez układu soczewkowego		
350	26,4	3741	3980	141,7	3,38
700	54,3	6574	6994	121,1	
1050	81,8	8767	9376	107,2	

Na rysunku 11.7 przedstawiono wyznaczoną przykładową bryłę fotometryczną dla prądu przewodzenia $I_F = 700$ mA.



Rys. 11.7. Wyznaczona bryła fotometryczna badanej oprawy drogowej przy $I_F = 700$ mA

Zaprezentowana konstrukcja oprawy oświetlenia drogowego, jak również zastosowany w niej sposób odprowadzania ciepła, zostały zgłoszone we wniosku do Urzędu Patentowego o udzielenie patentu na przedstawiony wynalazek. Zgłoszenie pt. „Oprawa oświetleniowa z półprzewodnikowymi źródłami światła LED” zostało zarejestrowane numerem P.421711.

12. Podsumowanie

W niniejszej rozprawie analizowano kształtowanie się temperatury złącza panelu świetlnego ze źródłami LED i jej wpływ na wybrane parametry świetlne dla różnych konstrukcji i budowy układu. Przeprowadzono badania symulacyjne, których wyniki zostały zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym.

Złożoność struktury źródeł LED została potwierdzona badaniami z zastosowaniem skaningu elektronowego. Dla realizacji założonego celu pracy niezbędne było wyznaczenie rzeczywistej rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$, która determinuje wartość temperatury złącza T_j . Rezystancja $R_{th_{j-c}}$ została wyznaczona na podstawie międzynarodowego standardu JESD51-14, a jej uzyskana wartość posłużyła do opracowania modelu termicznego diod.

Do wyznaczenia temperatury złącza T_j pojedynczej diody lub wielu diod zamontowanych na panelu oprawy oświetleniowej opracowano model termiczny uwzględniający: model termiczny diody, budowę i geometrię zastosowanych diod, prąd przewodzenia I_F i wynikającą z niego moc cieplną P_H . Model uwzględniał również wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy diodami na panelu oraz system radiacyjny, zapewniający efektywne odprowadzanie ciepła i ograniczający wpływ temperatury T_j na parametry świetlne.

Opracowany model symulacyjny uwzględnia składowe elementy oprawy decydujące o temperaturze złącza źródeł panelu LED, tj. źródło ciepła – obwód drukowany – układ odprowadzania ciepła. Umożliwia analizę temperatury złącza T_j dla szerokiego zakresu zmian czynników i parametrów elementów układu. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych stanowiły podstawę zaprojektowanego i wykonanego panelu oświetleniowego ze źródłami LED, którego założeniem było uzyskanie jak najniższej temperatury złącza T_j . W każdym kroku badań symulacyjnych przyjmowano wartość prądu przewodzenia I_F , która odpowiadała krytycznym warunkom termicznym. Elementem który w sposób istotny wpływa na temperaturę złącza T_j jest układ odprowadzania ciepła. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych jednoznacznie wskazują, że kształt i geometria układu odprowadzania ciepła w sposób istotny wpływają na temperaturę złącza T_j . Jest to związane głównie z cyrkulacją powietrza na powierzchni radiatora. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano nowatorską konstrukcję układu chłodzenia. Opracowane rozwiązanie w sposób istotny wpływa na obniżenie temperatury złącza T_j , a tym samym na poprawę parametrów świetlnych.

Uzyskane wyniki z badań modelowych posłużyły do opracowania i zbudowania prototypu panelu oprawy oświetleniowej. Przeprowadzone zostały dla niego badania eksperymentalne, związane z rozkładem temperatury i jej wpływem na strumień świetlny Φ , temperaturę barwową T_B oraz współczynnik oddawania barw Ra .

Różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi z badań symulacyjnych a wynikami eksperymentalnymi nie przekroczyły w żadnym przypadku wartości 5%, co potwierdza poprawność opracowanego modelu termicznego. Prototypowa oprawa oświetleniowa ma znacznie mniejszą masę w stosunku do podobnych na rynku opraw oświetleniowych, a mimo to charakteryzuje się dobrym sposobem odprowadzania ciepła, ograniczając tym samym temperaturę złącza diod. Zmniejszenie temperatury złącza wpływa na poprawę parametrów świetlnych. Uzyskane wyniki wskazują, że cel pracy został osiągnięty, a teza udowodniona.

Do głównych osiągnięć autor zalicza:

1. Wyznaczenie rzeczywistej wewnętrznej rezystancji termicznej $R_{th_{j-c}}$ dla półprzewodnikowych źródeł światła.
2. Określenie czynników wpływających na temperaturę złącza T_j oraz rozkład temperatury panelu LED.
3. Opracowanie modelu i wyznaczenie temperatury złącza T_j sprzężonych ze sobą termicznie źródeł panelu LED.
4. Wyznaczenie wpływu temperatury złącza T_j na wybrane parametry świetlne (strumień świetlny Φ , temperatura barwowa T_B , współczynnik oddawania barw Ra) dla wybranych źródeł dużej mocy.
5. Budowa prototypu oprawy oświetleniowej z efektywnym układem odprowadzania ciepła, ograniczającym wpływ temperatury na wybrane parametry świetlne.
6. Zbudowany prototyp stał się podstawą do zgłoszenia patentowego pt.: „Oprawa oświetleniowa z półprzewodnikowymi źródłami światła”, o numerze P.421711 z 26 maja 2017 r.

Uzyskane przez autora wyniki badań nie zamykają tematyki związanej z kształtowaniem temperatury w źródłach LED. Obecnie w literaturze przedmiotu pojawiają się szątkowe informacje odnośnie możliwości wykorzystania grafenu do odprowadzania ciepła z układów elektronicznych [8]. Naniesienie na aluminiowym radiatorze dodatkowej warstwy składającej się z cząsteczek tlenku grafenu GO lub warstwy cząsteczek tlenku grafenu GO i czą-

steczek miedzi Cu, daje możliwość obniżenia oporu cieplnego radiatora nawet o kilkadziesiąt procent. Aktualność zagadnienia związanego z chłodzeniem półprzewodnikowych źródeł światła i nowe technologie z zakresu inżynierii materiałowej sprawiają, że autor pracy ma nadzieję kontynuować i w dalszym ciągu rozwijać podjętą tematykę.

Literatura

Publikacje

- [1] Albarbar A., Batunlu C.: *Thermal Analysis of Power Electronic Devices Used in Renewable Energy Systems*. Manchester Metropolitan University, United Kingdom, 2018.
- [2] Andersson B., Andersson R., Hakansson L., Mortensen M., Sudiyo R., Wachem B.: *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge University Press, 2012.
- [3] Badalan N., Svasta P.: *Peltier Elements vs. Heat Sink in Cooling of High Power LED*. 38th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 2015, str.125-128.
- [4] Baran K., Wachta H., Leško M., Różowicz A.: *Research on thermal resistance Rthj-c of high power semiconductor light sources*.15th Conference on Computational Technologies in Engineering, AIP Conference Proceedings 2078, str. 020047-1 - 020047-6.
- [5] Baran K., Wachta H., Leško M., Różowicz A.: *Thermal modeling and simulation of high power LED module*. Proceedings of the 15th Conference on Computational Technologies in Engineering TKI 2018, AIP Conference Proceedings 2078, 2018, str. 020048-1 - 020048-8.
- [6] Baran K.: *Oddziaływanie termiczne półprzewodnikowych źródeł światła dużej mocy*. TTS 10/2013, str. 2123-2132.
- [7] Barroso A., Dupuis P., Alonso C., Jammes B., Segquier L., Zissis G.: *A characterization framework to optimize LED luminaire's luminous efficacy*. Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE, str. 905-913.
- [8] Beo R., Hana M., Koa K., Leeb K., Cuonga T. i inni: *Reduced thermal resistance of heat sink using graphene oxide decorated with copper nanoparticles*. Materials Research Bulletin 110, 2019, str. 76-81.
- [9] Bommel W.: *Road Lighting. Fundamentals, Technology and Application*. Springer, 2015.
- [10] Bridges J.: *Extend the life of LEDs through thermal design*. LEDs Magazine, April 2015, str. 84-86.
- [11] Budzyński Ł.: *Influence of junction temperature on the spectral power distribution of Light Emitting Diodes*. Challenges of Modern Technology, Vol. 6, No. 4, 2015, str.3-7.
- [12] Chajed S., Xi Y., Li Y., Gessmann T., Schubert E.: *Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes*. Journal of Applied Physics 97, 2005.
- [13] Chen X., Liu Y.: *Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench*. CRC Press, 2015.
- [14] Cheng T., Luo X., Huang S., Gan Z., Liu S.: *Simulation on Thermal Characteristics of LED Chips for Design Optimization*. International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2008, str. 1-4.

- [15] Deepak G., Vignesh V., Rakesh N.: *CFD&Thermal Analysis of Heat Sink and its Application in CPU*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol.4, Issue 8, 2014, str. 198-202.
- [16] Dieker H., Miesner C., Püttjer D., Bachl B.: *Comparison of different LED packages*. Proc. SPIE, Vol. 6797, 2007, str. 67970I-1-67970I-12.
- [17] Domke K., Skrzypczak P.: *Analiza cieplna układu: elektroluminescencyjna dioda mocy - element Peltiera - radiator*. Przegląd elektrotechniczny 2009, nr 10, str. 101-103.
- [18] Dybczyński W., Oleszński T., Skonieczna M.: *Projektowanie opraw oświetleniowych*. WPB, Białystok 1996.
- [19] Ekpu M., Bhatti R., Ekere N., Mallik S.: *Advanced Thermal Management Materials for Heat Sinks used in Microelectronics*. 18th European Microelectronics & Packaging Conference, 2011, str. 1-8.
- [20] Górecki K., Górecka K.: *Wpływ zjawisk cieplnych na właściwości diody LED mocy*. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 87, No. 7, 2011, str. 144-147.
- [21] Górecki K.: *Electrothermal Model of A Power LED for Spice*, International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 25, 2012, str. 39-45.
- [22] Górecki K.: *The influence of mutual thermal interactions between power LEDs on their characteristics*. 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems Thermic, Berlin 2013, str. 188-193.
- [23] Guo Y., Pan K., Ren G., Yuan F.: *Research on LED Temperature Characteristic and Thermal Analysis at Low Temperatures*. International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2012, str.1411-1415.
- [24] Guoqiao T.: *Reliability Excellence in SSL Manufacturing*. 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA), 2015, str. 71-74.
- [25] Ha M., Graham S.: *Development of a thermal resistance model for chip-on-board packaging of high power LED arrays*. Microelectronics Reliability 52, 2012, str. 836-844.
- [26] Held G.: *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*. CRC Press, 2009.
- [27] Holman J.: *Heat Transfer*. Higher Education the McGraw-Hill Companies, 10th Edition, 2010.
- [28] Huaiyu Y., Kohl S., Zeijl H., Gielen A.: *A review of passive thermal management of LED module*. Journal of Semiconductors, Vol. 32, No. 1, 2011, str. 014008-1 - 014008-4.
- [29] Hutton D.: *Fundamentals of Finite Element Analysis*. Higher Education, Mc Graw Hill, 2004.
- [30] Iaronka O., Bender V., Marchesan T.: *Finite Element Analysis of a Closed Cooling System Applied to Thermal Management*. IEEE Brazilian Power Electronics Conference, 2013, str. 1153-1159.
- [31] Jianlin H., Dušan S., Sau K., Daoguo Y., Xiupeng Li., Xuejun Fan., Guoqi Z.: *Degradation Mechanism Decoupling of Mid-Power White-Light LEDs by SPD Simulation*, IEEE Transaction on electron devices, Vol. 63, No. 7, 2016, str. 2807-2814.

- [32] Jing W., Xin J., Yi-Xi C., Chun Z., Wei-Wei B.: *Thermal Model Design and Analysis of High-Power LED Headlamp Cooling Device Based on the Thermoelectric Effect*. IEEE Journals & Magazines, Vol. 5, Issue 5, str. 641-649.
- [33] Khanh T.Q., Bodrogi P., Vinh Q.T., Winkler H.: *LED Lighting. Technology and Perception*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Germany 2015.
- [34] Labau S., Picard N., Gasse A., Bernabe S., Grosse P., Ribot H.: *Chip on board packaging of light emitting diodes and thermal characterizations*. Proc. Electron. Compon. Technol. Conf, 2009, str. 848–853.
- [35] Lasance C.J.M., Poppe A.: *Thermal Management for LED Applications*. Springer Science, Business Media, New York 2014.
- [36] Lei L., Daoguo Y., Zhang G., You Z., Hou F., Liu D.: *Thermal Performance Analysis of Photoelectric Parameters on High-power LEDs Packaging Modules*. 12th. Int. Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE, 2011, str. 1-5.
- [37] Leng L., Retnasamy V., Sauli Z., Vairavan R., Shahimin M., Ong N., Kiritsaeng S.: *Finite Element Modelling of thermal performance of LED Lamp using open source software - Salome and Elmer*. IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), 2017, str. 65-68.
- [38] Leško M., Baran K., Wachta H., Różowicz A.: *A Concept of an Adaptive Luminaire with Variable Luminous Intensity Distribution*. VII Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), 2018, str. 1-4.
- [39] Leško M., Różowicz A., Baran K., Wachta H.: *A luminaire with variable light distribution*. E3S Web of Conferences 49, Solina, 2018, str. 1-9.
- [40] Liu S., Luo X.: *LED packaging for lighting applications. Design, manufacturing and testing*. John Wiley & Sons Pte Ltd, Singapore 2011.
- [41] Masana F.: *A new approach to the dynamic thermal modelling of semiconductor packages*. Microelectronics Reliability, Vol. 41, 2001, str. 901-912.
- [42] Masana F.: *A closed form solution of junction to substrate thermal resistance in semiconductor chips*. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A, Vol. 19, 1996, str. 539-545.
- [43] Mason P., Tixador P., Ordonez C., Morega A., Luongo C.: *Electro-Thermal Model for HTS Motor Design*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2007, Vol.17, No. 2, str. 1529 - 1532.
- [44] McKinsey & Company: *Lighting the way: Perspectives on the global lighting market*. Second edition, 2012.
- [45] Min S.: *Thermal analysis of high power LED arrays*. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2009.
- [46] Muzychka Y., Culham R., Yovanovich M.: *Thermal spreading resistance of eccentric heat sources on rectangular flux channels*. ASME J. Electron. Packag. nr 125, 2003, str. 178-185.
- [47] Nadarajah N., Yimin G.: *Life of LED-Based White Light Sources*. Journal of Display Technology, Vol.1, No. 1, 2005, str. 167-171.

- [48] Namburi W., Barton T.: *Thermal Modelling of an Induction Motor*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1983, Issue 8, str. 2636 - 2639.
- [49] Negrea C., Svasta P., Rangu M.: *Electro-Thermal Modeling of Power LED Using SPICE Circuit Solver*. 35th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 2012, str. 329-334.
- [50] Odendaal N., Ferreira J.: *A Thermal Model for High-Frequency Magnetic Components*. IEEE Transactions on Industry 1999, Vol. 35, No. 4 str. 924 – 931.
- [51] Oleksy M., Kraśniewski J., Janke W.: *Wpływ temperatury na charakterystyki optyczne i elektryczne diod LED mocy*. Przegląd Elektrotechniczny nr. 9/2014, str. 83-85.
- [52] Palisoc A., Lee C.: *Exact Thermal Representation of Multilayer Rectangular Structures by Infinite-Plate Structures Using the Method of Images*. Journal of Applied Physics, Vol. 64, 1988, str. 6851-6857.
- [53] Palisoc A., Lee C.: *Thermal-Properties of the Multilayer Infinite-Plate Structure*. Journal of Applied Physics, Vol. 64, 1988, str. 410-415.
- [54] Poppe A., Lasence C.: *On the standardization of thermal characterization of LEDs*. 25th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2009, str. 151-158.
- [55] Pounds D., Bonner R.: *High heat flux heat pipes embedded in metal core printed circuit boards for LED thermal management*. 14th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2014, str. 267-271.
- [56] Różowicz A., Baran K., Wachta H.: *Influence of luminaire aiming on LED sources junction temperature*. IEEE Conference Publications, Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Rzeszow 2016, str.1-4.
- [57] Różowicz A., Baran K., Wachta H.: *Radiation Studies of the Illumination Lighting Luminaires with LED Technology*, IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Karpacz 2016, str. 1-4.
- [58] Różowicz A., Baran K.: *Oddziaływanie termiczne pomiędzy źródłami HP LED zainstalowanymi na wspólnym radiatorze*. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 266, 2014, str. 87-97.
- [59] Różowicz A., Baran K.: *Rozkład temperatury wieloźródłowej oprawy oświetleniowej w technologii LED*. The 12th Conference on Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics WZEE'2015, Kielce 2015, str. 296-299.
- [60] Sabry M.: *Compact Thermal Models for Electronic Systems*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 2003, Vol. 26, No. 1 str. 179–185.
- [61] Scheepers G., Visser J.: *Detailed thermal modeling of high powered LEDs*. 25th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2009, str. 87-91.
- [62] Schubert Fred E.: *Light-emitting diode*. Cambridge University Pres, Second Edition, 2006.
- [63] Shen Q., Sun D., Xu Y., Jin T., Zhao X. : *Orientation effects on natural convection heat dissipation of rectangular fin heat sinks mounted on LEDs*. International Journal of Heat and Mass Transfer 75, 2014, str. 462-469.

- [64] Skrzypczak P.: *Analiza układów chłodzenia diod elektroluminescencyjnych dużej mocy z wykorzystaniem ogniw Peltiera*. Rozprawa doktorska, 2012.
- [65] Szekely V.: *New Evaluation Method Thermal Transient Measurement Result*. Microelectronics Journal, Vol. 28, 1997, str. 277-292.
- [66] Tang W., Wu Q., Richardson Z.: *A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal-Electric Analogy*. IEEE Transactions on Power Delivery 2004, Vol. 19, No. 3 str. 1112–1119.
- [67] Torzewicz T., Baran K., Raszkowski T., Samson A., Wachta H., Napieralski A.: *Compact thermal modelling of power LED light source*. IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL), Serbia, 2017, str. 157-160.
- [68] Torzewicz T., Janicki M., Napieralski A.: *Experimental Determination of Junction-to-Case Thermal Resistance in LED Compact Thermal Models*. 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2018, str. 768 -772.
- [69] Vakrilov N., Stoyanova A., Kafadarova N.: *Application of CFD Modeling to Solve Problems in Thermal Design of LED Applications in the Initial Project Phase*. 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2017, str. 1-6.
- [70] Wiczyński G.: *Wpływ temperatury na widmo optyczne diody LED*. Elektronika, nr 6, 2008, str. 211-213.
- [71] Wiśniewski A.: *Źródła światła*. COSIW SEP, 2013.
- [72] Yaoyao N., Yang D., Miao C., Dongjing L., Yuezhu M.: *Thermal modeling and analysis on a novel no-substrate LEDCOB module*. 17th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2016, str. 592-596.
- [73] Ye1 H., Gielen A., Zeijl H., Werkhoven R., Zhang G.: *Numerical modeling of thermal performance: natural convection and radiation of solid state lighting*. 12th Intl. Conf. on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2011, str. 1-6.
- [74] Yun C., Malberti P., Ciappa M., Fichtner W.: *Thermal Component Model for Electro-thermal Analysis of IGBT Module Systems*. IEEE Transactions on Advanced Packaging 2001, Vol. 24, No. 3 str. 401–406.
- [75] Yung K., Liem H., Choy H., Lun W.: *Thermal performance of high brightness LED array package on PCB*. International Communications in Heat and Mass Transfer 37, 2010, str. 1266–1272.
- [76] Yurtseven MB., Mete S., Onaygil S.: *The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available high-power white LEDs*. Lighting Research Technology 2016, Vol. 48, str. 943–965.
- [77] Zhang W., Liang C.: *Progress in visible LED*. Semiconductor Information, 43(3), 1997, str. 1-9.
- [78] Zheng H., Yang H., Yi X., Wang L., Li J.: *The Thermal Simulation of High Power Density LED Light Source*. 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS), 2017, str. 175-178.

- [79] Zheng J., Dasong G., Junhui L.: *The analysis of heat pipe cooling in high power LED lighting system*. International Conference on Electronic Packaging Technology, 2015, str. 480-482.
- [80] Żagan W.: *Oprawy oświetleniowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2012.

Normy oraz standardy pomiarowe

- [81] JEDEC STANDARD: *Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling*. JESD51-51, 2012.
- [82] JEDEC STANDARD: *Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-to-Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path*. JESD51-14, 2010.
- [83] JEDEC STANDARD. *Two-resistor compact thermal model guideline*. JESD15-3, 2008.
- [84] PN-EN 13201:2016: *Oświetlenie dróg*.
- [85] PN-90/E01005: *Technika świetlna, Terminologia*.
- [86] Przewodnik. wyd. Główny Urząd Miar, 1999: *Wyrażanie niepewności pomiaru*.

Karty katalogowe oraz dane techniczne

- [87] *5305 TECSorce Arroy Instruments*:
<http://www.arroyoinstruments.com/products/5305#tabs>
- [88] *Astreet LED*:
http://www.intelight.pl/UserFiles/files/Astreet_LED.pdf
- [89] *Cree J Series 2835*:
<http://www.cree.com/led-components/media/documents/data-sheet-JSeries-2835-value-9v.pdf>
- [90] *Cree Xlamp XP-G2*:
<http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampXPG2.pdf>
- [91] *Cs-2000 Konica Minolta*:
http://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/display/pdf/cs2002_catalog_eng.pdf
- [92] *FloEFD Engineering Database*
- [93] *FloEFD, Technical Reference, Software Version 16, Mentor Graphics, 2016*.
- [94] *GL Opti Spheres*:
http://www.gloptic.com/wp-content/uploads/2018/08/200931_Technical-Datasheet_SPHERES.pdf
- [95] *GL Spectis 6,0*:
http://www.gloptic.com/wp-content/uploads/2018/08/200930_Technical-Datasheet_SPECTIS-6-0.pdf
- [96] *L200-TC Labfacility*:
http://www.labfacility.com/media/attachment/file/1/a/lab080-1216_1200_2.pdf

- [97] *Lug Urbino:*
http://www.lug.com.pl/pl/produkty/print/pdf/produkty/oswietlenie_zewnetrzne/11_Oswietlenie_uliczne_i_parkowe/LUG_URBINO_LED_PL.pdf
- [98] *Lumileds Luxeon T:*
<http://www.lumileds.com/uploads/382/DS106-pdf>
- [99] *LUXEON Lumileds 3535L:*
<http://www.lumileds.com/uploads/402/DS203-pdf>
- [100] *Luxeon Rebel:*
<http://www.luxeonstar.com/assets/downloads/rd07.pdf>
- [101] *MCPCB Berquist:*
<http://www.dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/274-Henkel%20Bergquist%20LED%20Thermal%20Solutionspdf>
- [102] *Osram Osconiq S3030:*
http://www.dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-7474946/GW%20QSLR31.PM_EN.pdf
- [103] *Osram Oslon Square:*
http://www.dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-8076421/GW%20CSSRM2.PM_EN.pdf
- [104] *Osram Soleriq S13:*
<http://www.dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-4486438/GW%20KAGMB5.BM.pdf>
- [105] *Philips Unistreet:*
<http://www.lighting.philips.pl/prof/oswietlenie-zewnetrzne/oswietlenie-drogowe-i-uliczne/oprawy-drogowe-i-uliczne/unistreet>
- [106] *Samsung LH351B:*
http://www.cdn.samsung.com/led/file/resource/2019/03/Data_Sheet_LH351B_Rev.25.2.pdf
- [107] *Schreder Akila:*
<http://www.schreder.com/SiteCollectionDocuments/Products/AKILA/AKILA-English-Brochure-V2.pdf>
- [108] *Schreder Teceo:*
http://www.schreder.com/globalassets/_schrederpoland/products/teceo/teceo_pl.pdf?download=1
- [109] *Seoul Semiconductor 3528 Series:*
http://www.seoulsemicon.com/upload2/181022_3528_STW8A12D_Rev2.0.pdf
- [110] *Seoul Semiconductor Acrich MJT - 5050 Series:*
[http://www.seoulsemicon.com/upload2/\[Specification\]SAW0L60A_R4.0_1904%20\(1\).pdf](http://www.seoulsemicon.com/upload2/[Specification]SAW0L60A_R4.0_1904%20(1).pdf)
- [111] *Seoul Semiconductor Z5-M2:*
http://www.seoulsemicon.com/upload2/2019033_SZ5_M2_WX_XX_Rev7.0_119022.pdf
- [112] *T3Ster, Mentor Graphics:*
<http://www.mentor.com/products/mechanical/products/upload/micred-hardware->

products-thermal-transient-test-and-measurement-18fcbdfa-d43f-46ce-95ca-920bd098a0d0

- [113] *TDK-Lambda GENH300-2.5:*
<http://www.us.tdk-lambda.com/hp/pdfs/data%20sheets/93507100.pdf>
- [114] *Czujnik pomiarowy TTE 426:*
http://www.termoaparatura.com.pl/files_mce/czujniki_temperatury/tc_kablowe/tte426_v2016_x14.pdf
- [115] *Thermal Management of Cree XLamp LEDs:*
<http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>

Odnosiniki internetowe

(aktualizacja 12 marca 2019 r.)

- [116] *Appliednanotech CarbAl:*
<http://www.appliednanotech.net/thermal-management/?/>
- [117] *Cree Products:*
<http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products>
- [118] *Dane Klimatyczne Polski:*
<http://www.danepubliczne.imgw.pl>
- [119] *Gl Optic:*
<http://www.gloptic.com>
- [120] *High Bay AGCLED:*
<http://www.agcled.com/products/led-high-bay-light/hicap.html>
- [121] *Insulated Metal Substrate NCAB Group:*
http://www.ncabgroup.com/wp-content/uploads/2015/10/07-NCAB_Group_Seminars_IMS_2_0_150930.pdf
- [122] *Lumos Street Light:*
<http://www.halonix.co.in/products/street-lighting-luminaies-led/lumos-led-street-light/>
- [123] *Material Properties Database:*
<http://www.engineeringtoolbox.com>
- [124] *SenoLED:*
<http://www.senoled.com>
- [125] *Seoul Semiconductor Products:*
<http://www.seoulsemicon.com/en/html/product/power.asp?gubun=3>
- [126] *Solow Xled Thorlux:*
<http://www.thorlux.co.uk/luminaires/solow-xled>
- [127] *Spectro Color:*
<http://www.spectrcolor.pl> (aktualizacja 18 czerwca 2017r.)
- [128] *The Nobel Prize:*
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/popular-physicsprize2014.pdf

Narzędzia obliczeniowe

[129] FloEFD 16.2, Mentor Graphics.