

KONSTRUKCJA SPRZĘTU ELEKTRONICZNEGO

**Zjawiska termiczne
w półprzewodnikach**

Podstawy fizyczne

Wszystkie parametry półprzewodników są zależne od temperatury, co oznacza, że temperatura ma istotny wpływ na zjawiska zachodzące w przyrządach półprzewodnikowych.

Podstawowe parametry zależne od temperatury:

- koncentracja dziur i elektronów
- ruchliwość dziur i elektronów
- czas relaksacji
- czas życia dziur i elektronów

Podstawowe zjawiska zależne od temperatury:

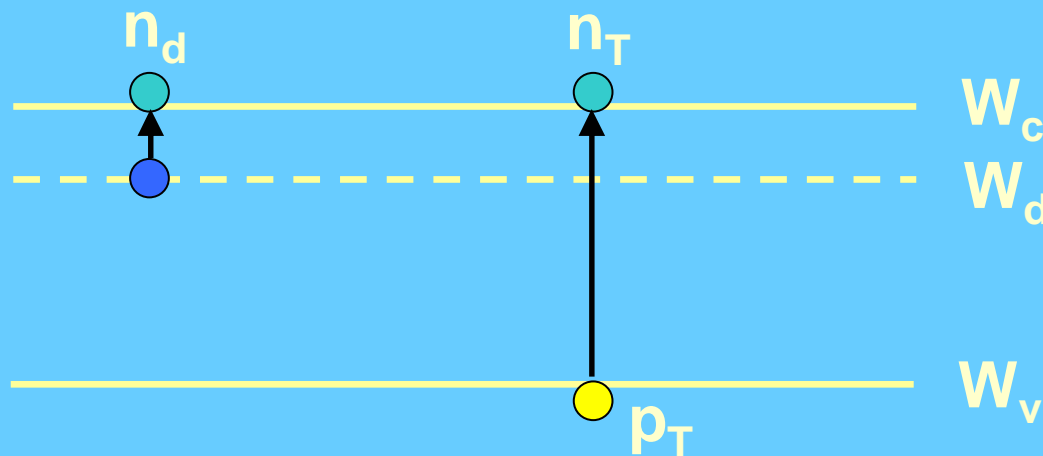
- zmiany charakterystyk I-V
- procesy przejściowe
- niezawodność (oddziaływanie długoterminowe)
- przeciążenia niszczące

Podstawy fizyczne

Generacja nośników w kryształach półprzewodnikowych może być wywołana:

- oddziaływaniami zewnętrznymi (dostarczanie energii do kryształu)
 - ✓ Zewnętrzne pole elektryczne
 - ✓ Napromieniowanie strumieniem fotonów / elektronów
- temperaturą (tzw. generacja termiczna)

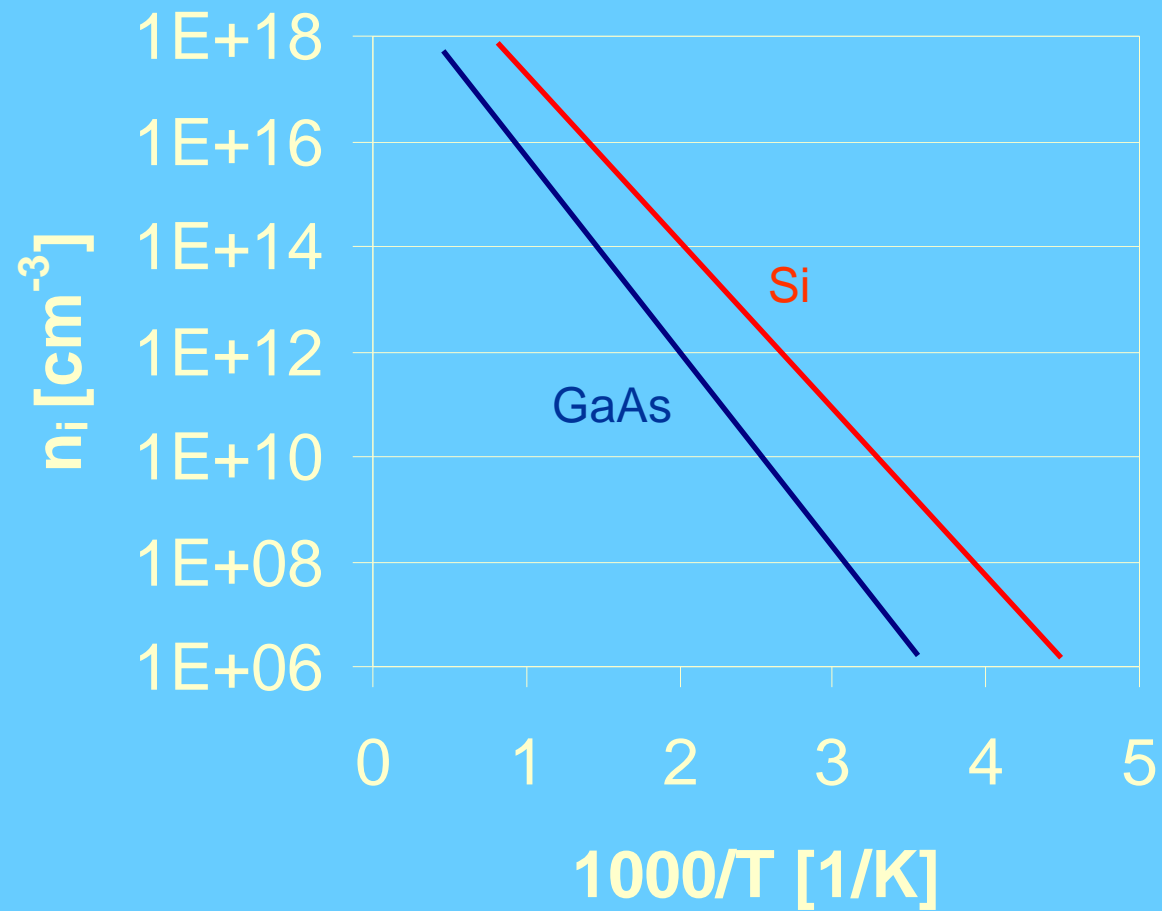
Generacja nośników w półprzewodniku domieszkowanym typu n:



- Jeżeli $n_d \gg n_T$ to $n_d + n_T \gg p_T \Rightarrow$ typ „n”
- Jeżeli $n_d \ll n_T$ to $n_d + n_T \approx p_T \Rightarrow$ typ „i”

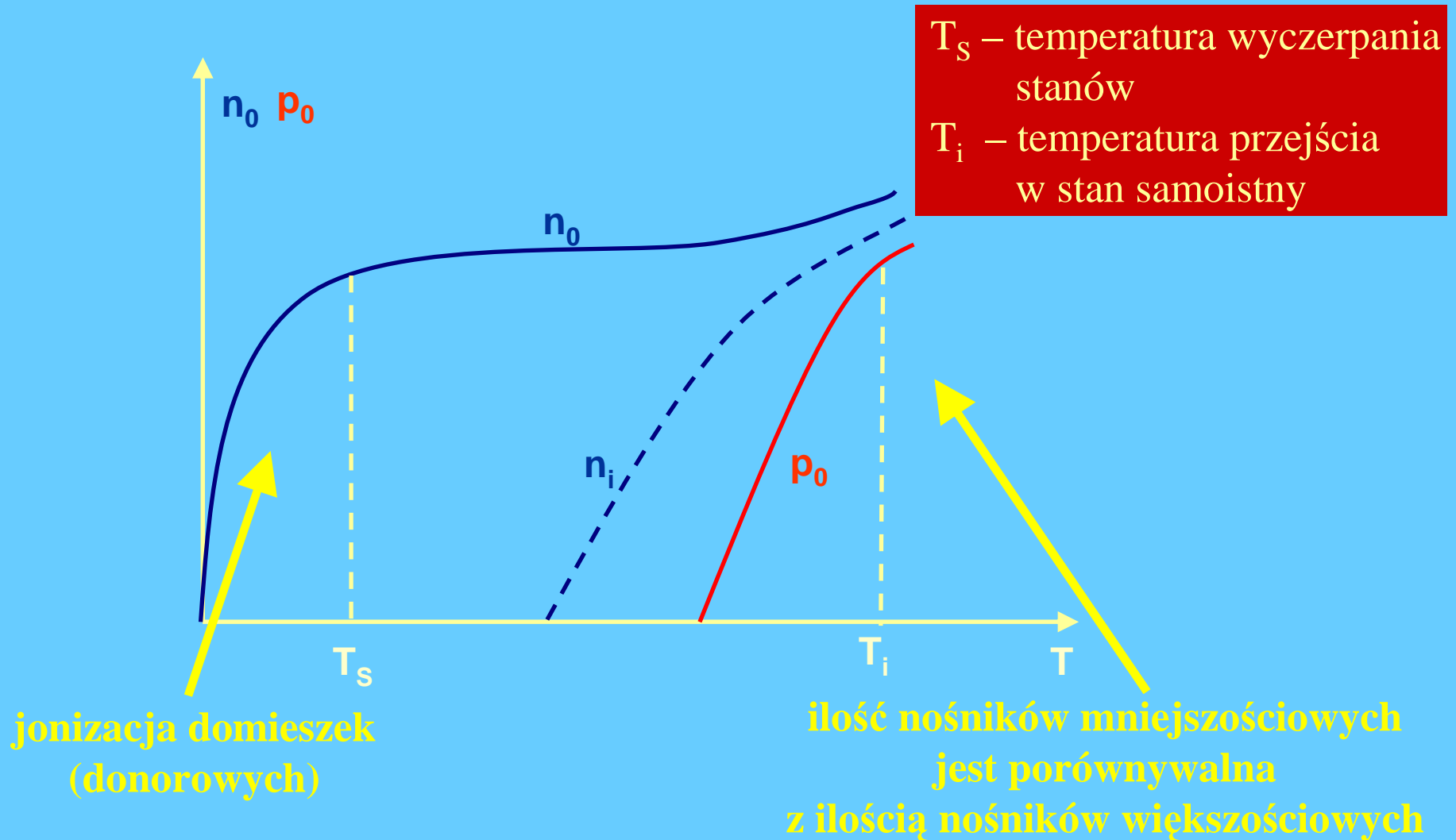
Podstawy fizyczne

Koncentracja nośników w materiale samoistnym.



Podstawy fizyczne

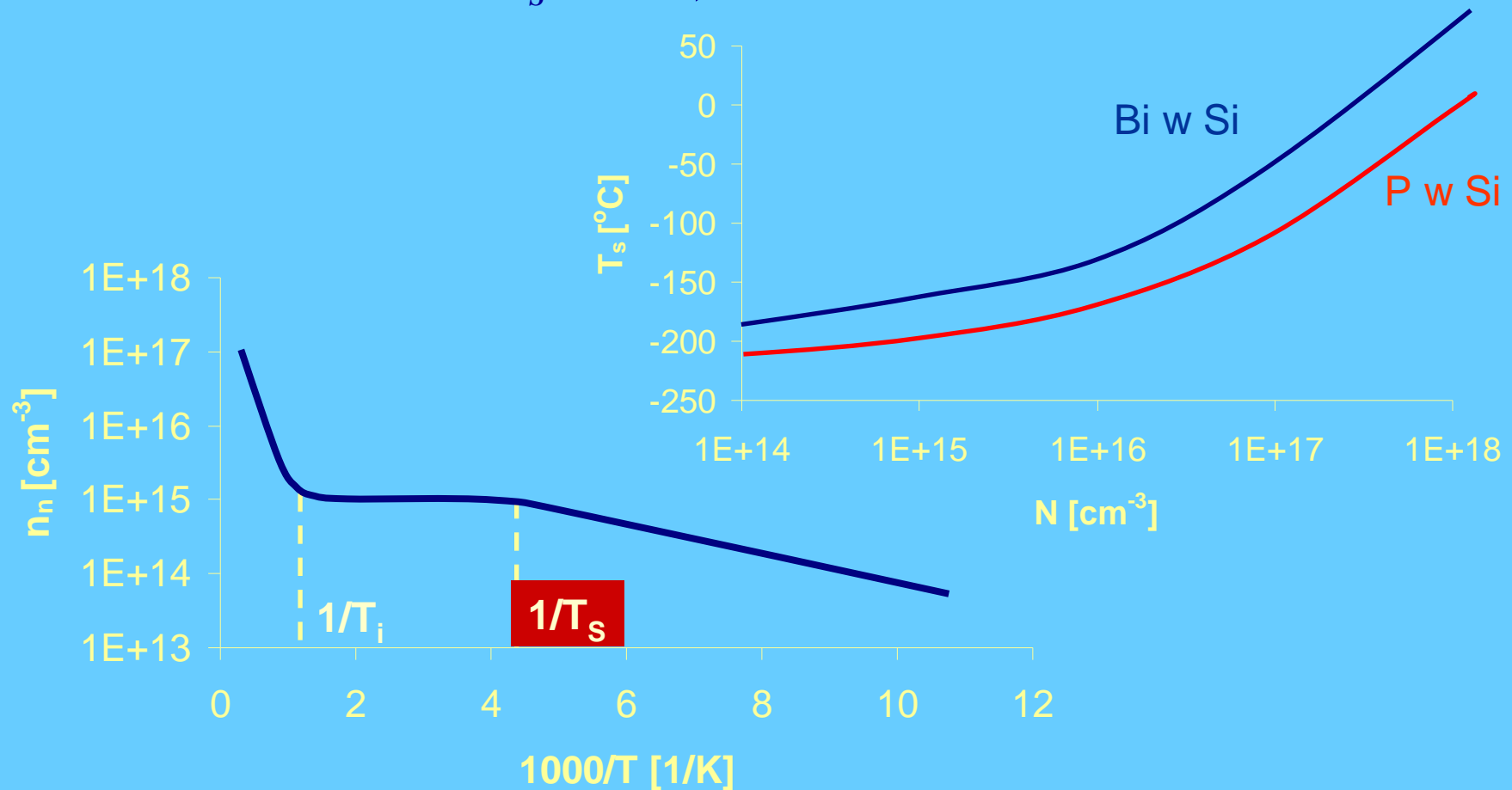
Koncentracja nośników w półprzewodniku domieszkowanym (np. typu n)



Podstawy fizyczne

Zależność koncentracji nośników większościowych od temperatury

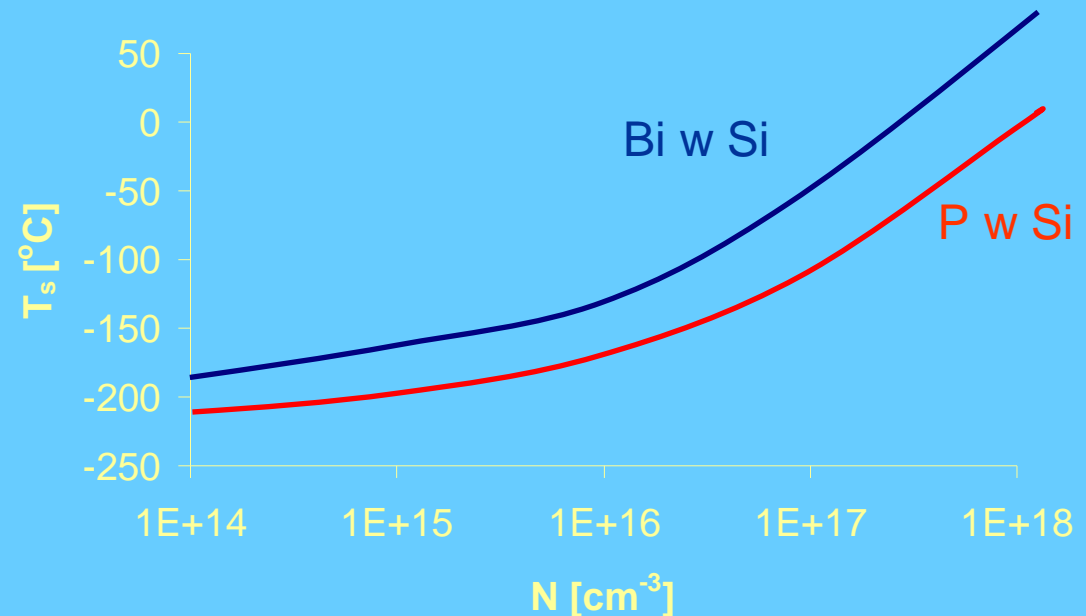
- Temperatura T_s zależy od energii jonizacji (dla typowych domieszek w Si i GaAs $100K > T_s > 200K$)



Podstawy fizyczne

Temperatura wyczerpania stanów – T_s

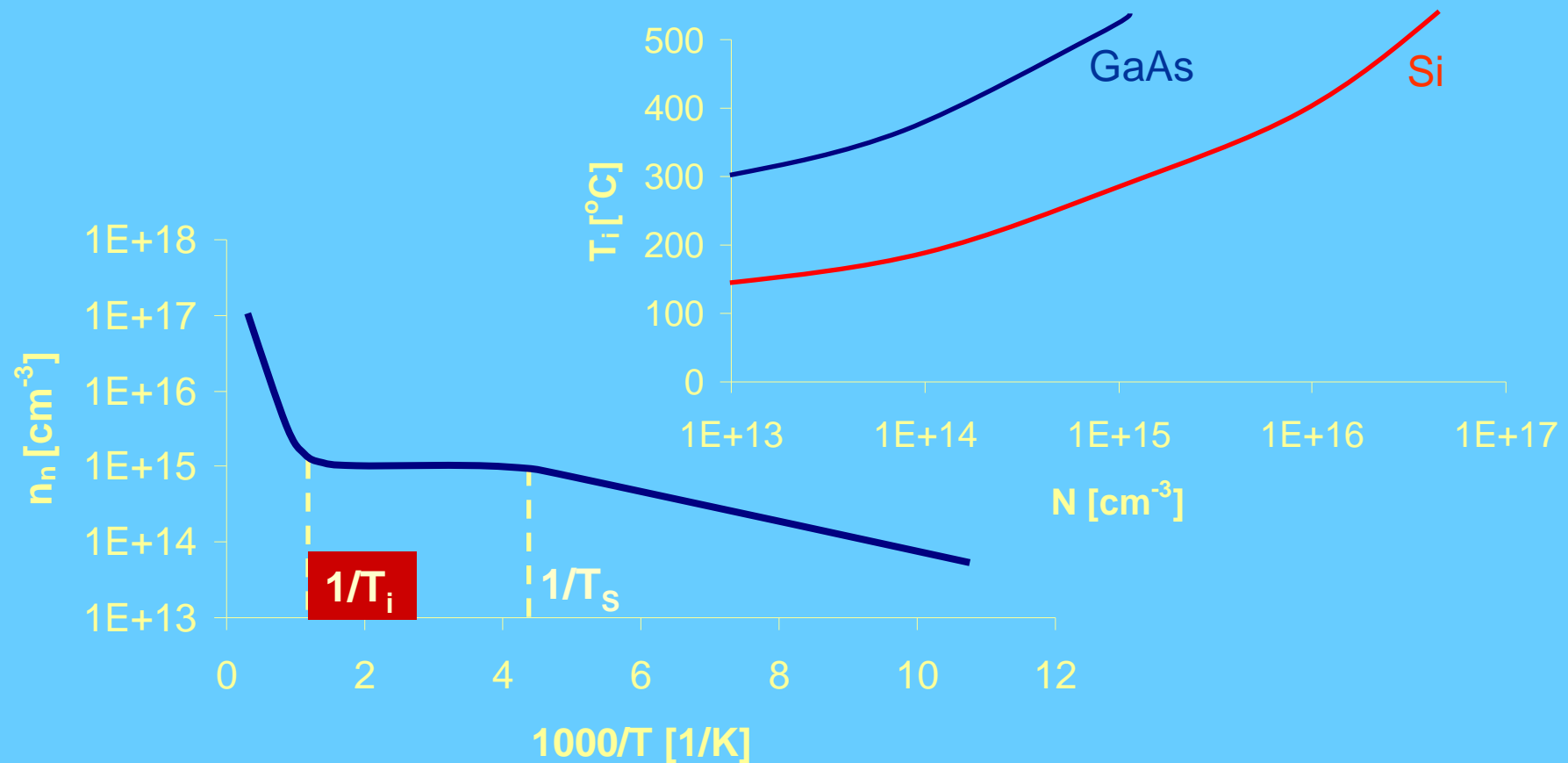
- Powszechnie uważa się że, przyrządy krzemowe zawsze pracują powyżej temperatury wyczerpania stanów
- Przy dużych koncentracjach domieszek powyższe stwierdzenie może być nieprawdziwe



Podstawy fizyczne

Zależność koncentracji nośników większościowych od temperatury

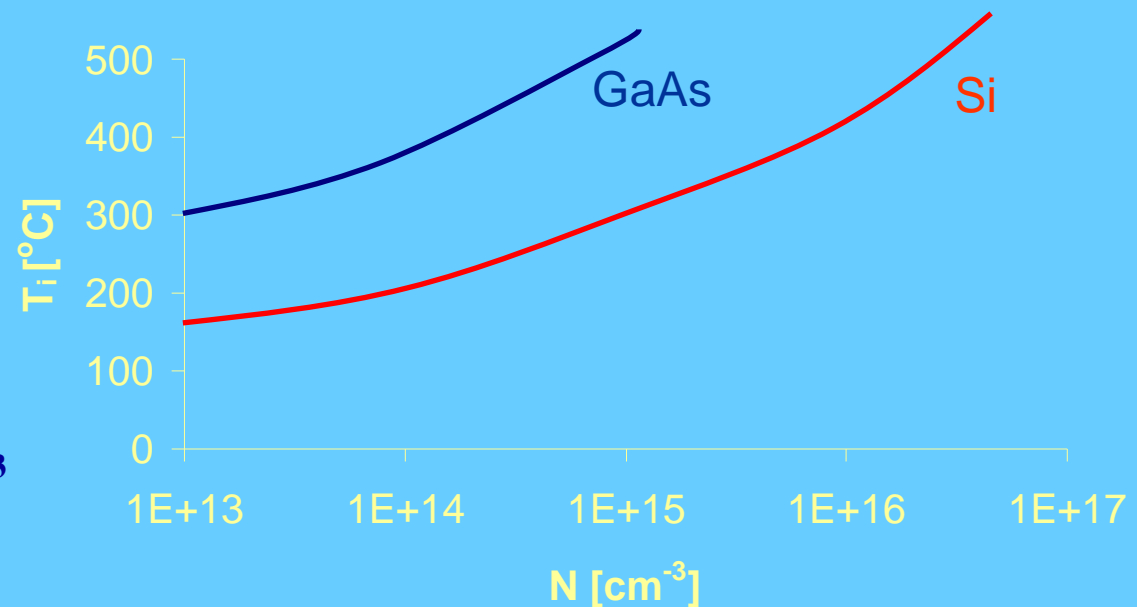
- Temperatura T_i zależy od materiału półprzewodnikowego oraz od koncentracji domieszek



Podstawy fizyczne

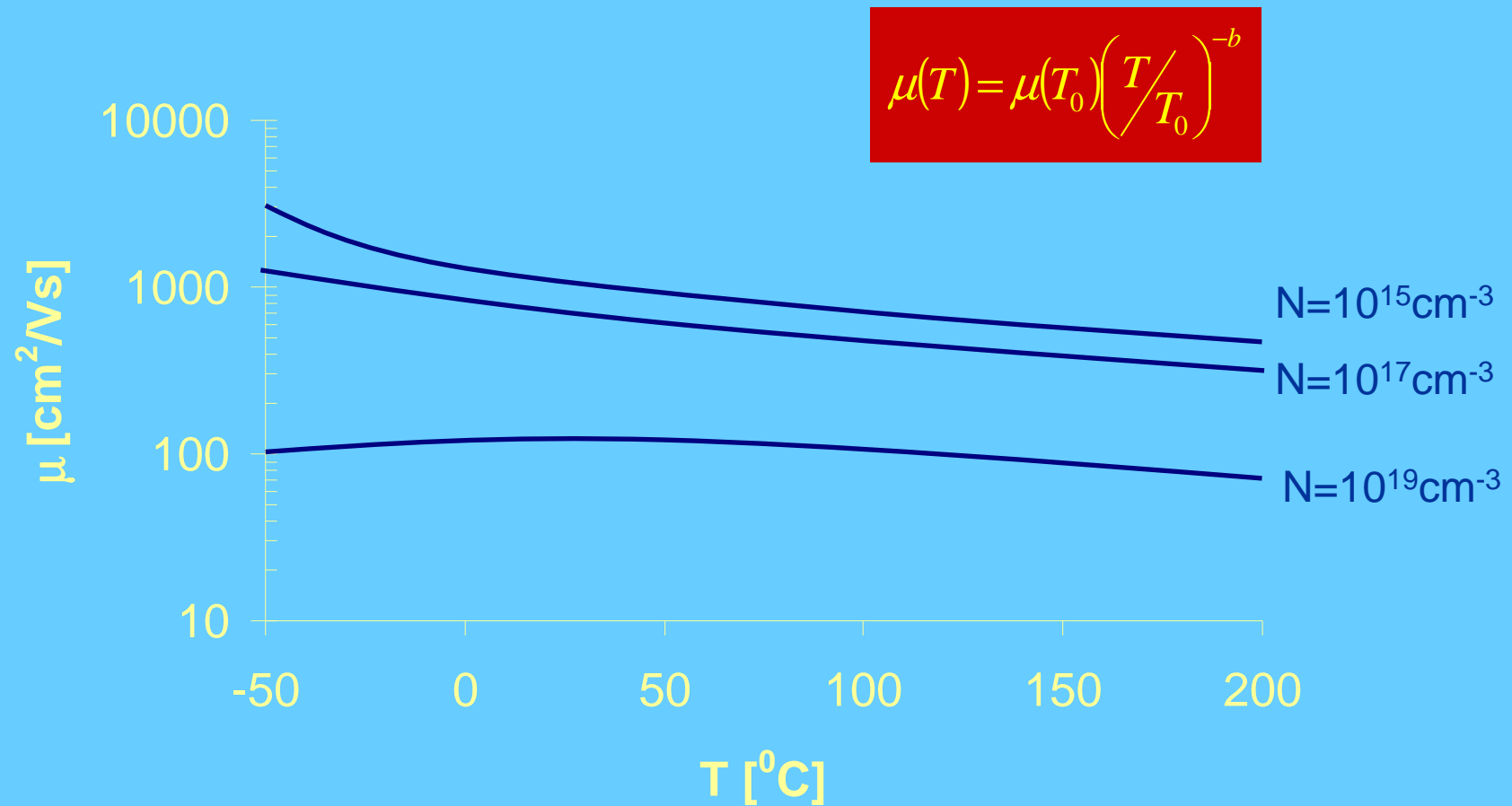
Temperatura przejścia w stan samoistny – T_i

- Temperatura T_i można określić na podstawie równości wypadkowej koncentracji domieszek i koncentracji samoistnej ($N = n_i$);
- T_i rośnie wraz ze wzrostem szerokości przerwy zabronionej oraz ze wzrostem koncentracji domieszek;
- Dla koncentracji 10^{14}cm^{-3} temperatura graniczna pracy elementu krzemowego nie powinna przekraczać 200°C a dla arsenku galu 400°C ;
- Utrata prostujących własności typowego złącza niesymetrycznego wymaga przejścia w stan samoistny materiału po obu stronach złącza.



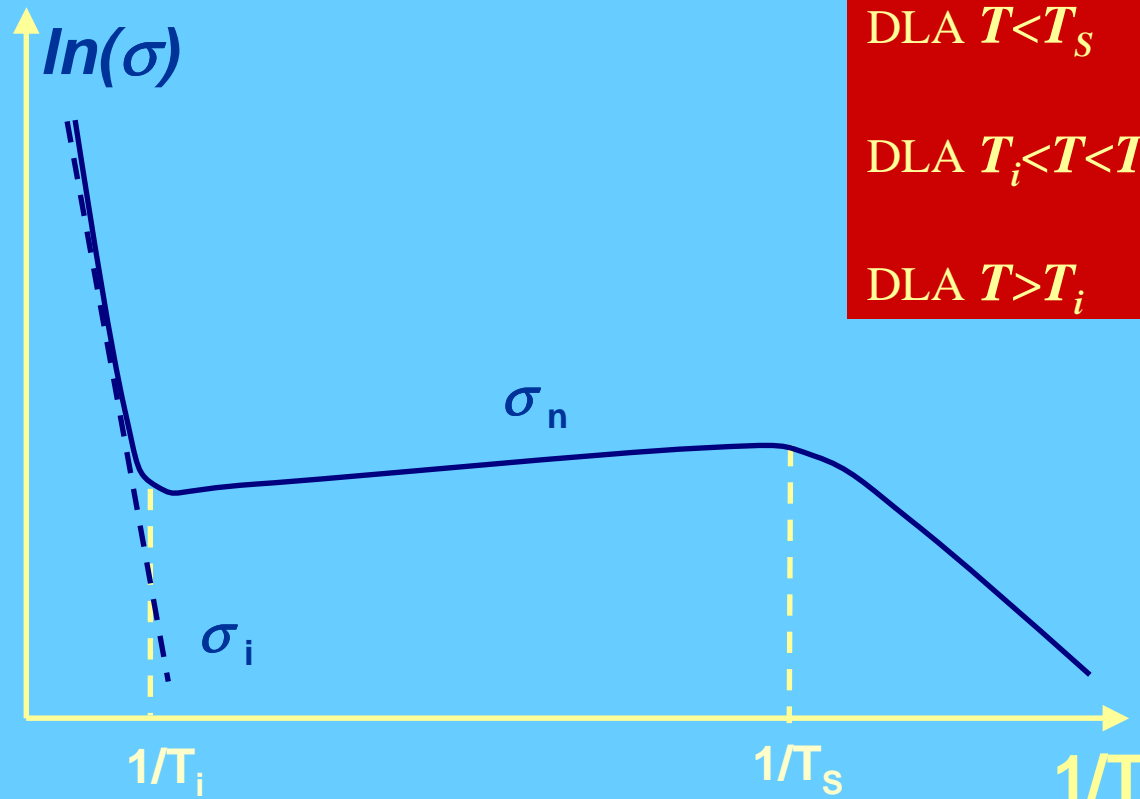
Podstawy fizyczne

Ruchliwość elektronów w Si w zależności od temperatury dla różnych koncentracji domieszek



Podstawy fizyczne

Wpływ temperatury na przewodność półprzewodnika domieszkowanego i samoistnego



DLA $T < T_s$ $n_n \uparrow$

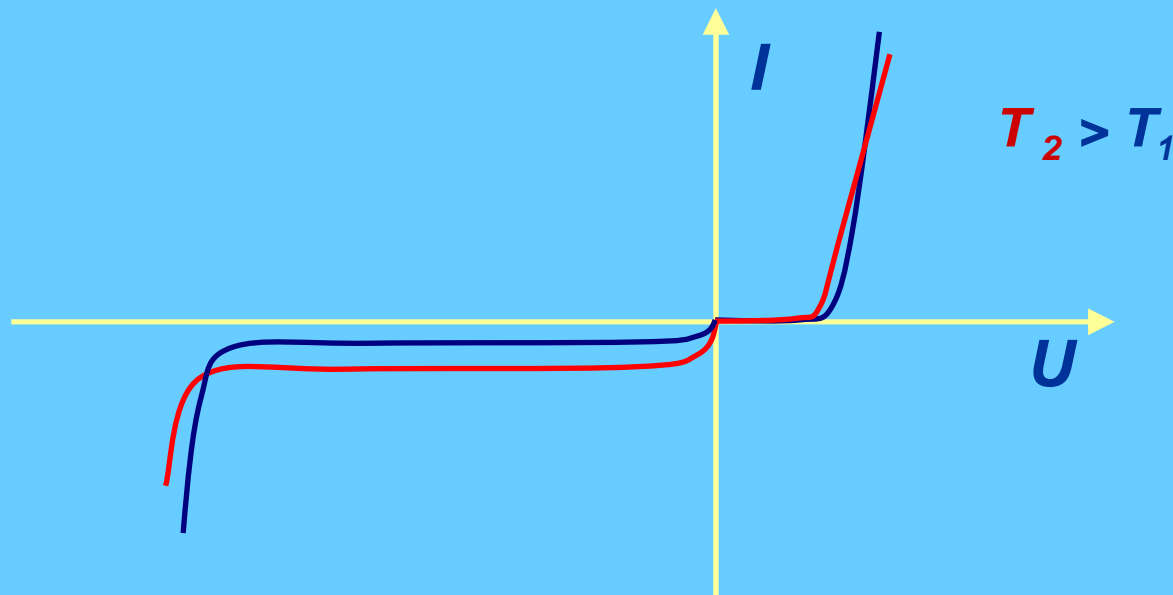
DLA $T_i < T < T_s$ $n_n \approx \text{const}$

DLA $T > T_i$ $n_i \uparrow \Rightarrow n_n \uparrow$

Efekty cieplne

Podstawowe zjawiska

Wpływ temperatury na izotermiczną charakterystykę I-U diody (moc rozpraszana w diodzie jest pomijalna)

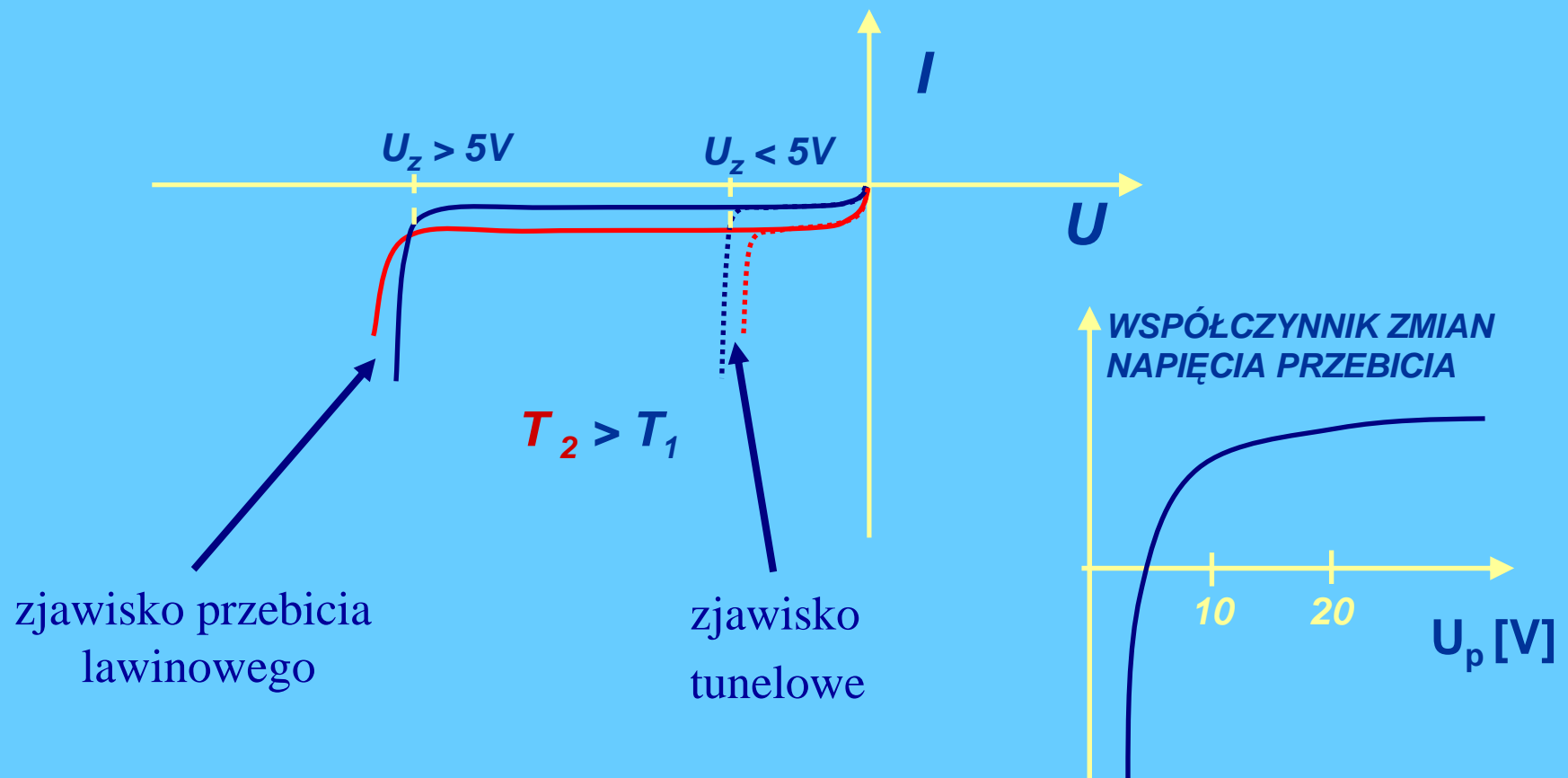


- Warunki izotermiczne (stała temperatura wewnątrz i na zewnątrz przyrządu)
- Różnicę to efekt zmian wielkości fizycznych z temperaturą

Efekty cieplne

Podstawowe zjawiska

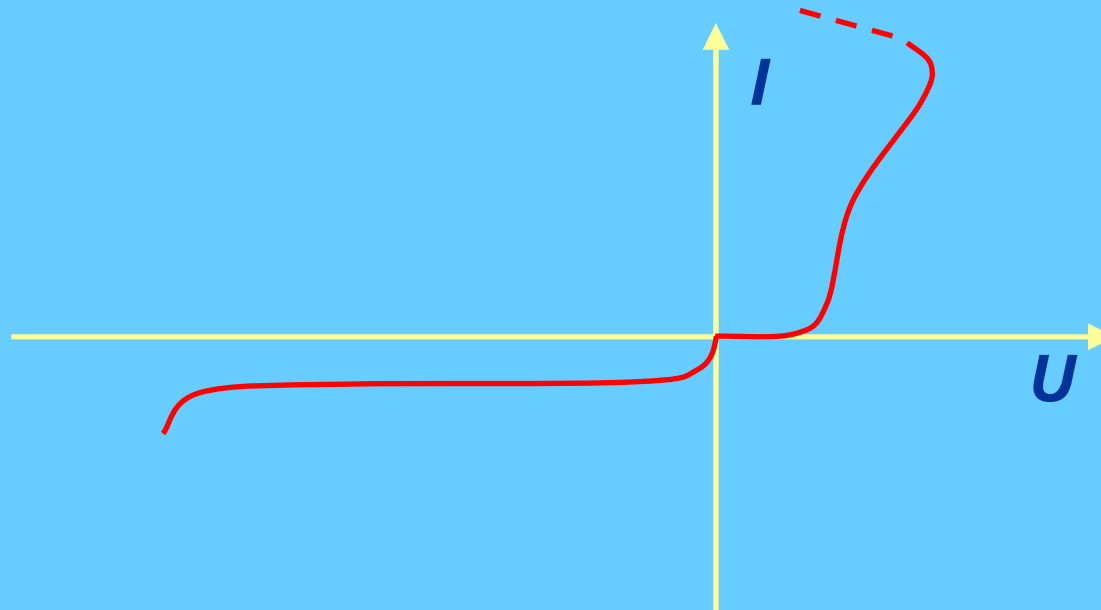
Wpływ temperatury na izotermiczną charakterystykę diod stabilizacyjnych



Efekty cieplne

Podstawowe zjawiska

Nieizotermiczna charakterystyka I-U diody p-n (moc istotnie wpływa na temperaturę wewnętrzną diody – *efekt samonagrzewania*)



Należy uwzględnić:

- Efekt samonagrzewania
- Warunki odprowadzania ciepła

Efekty cieplne

Podstawowe zjawiska

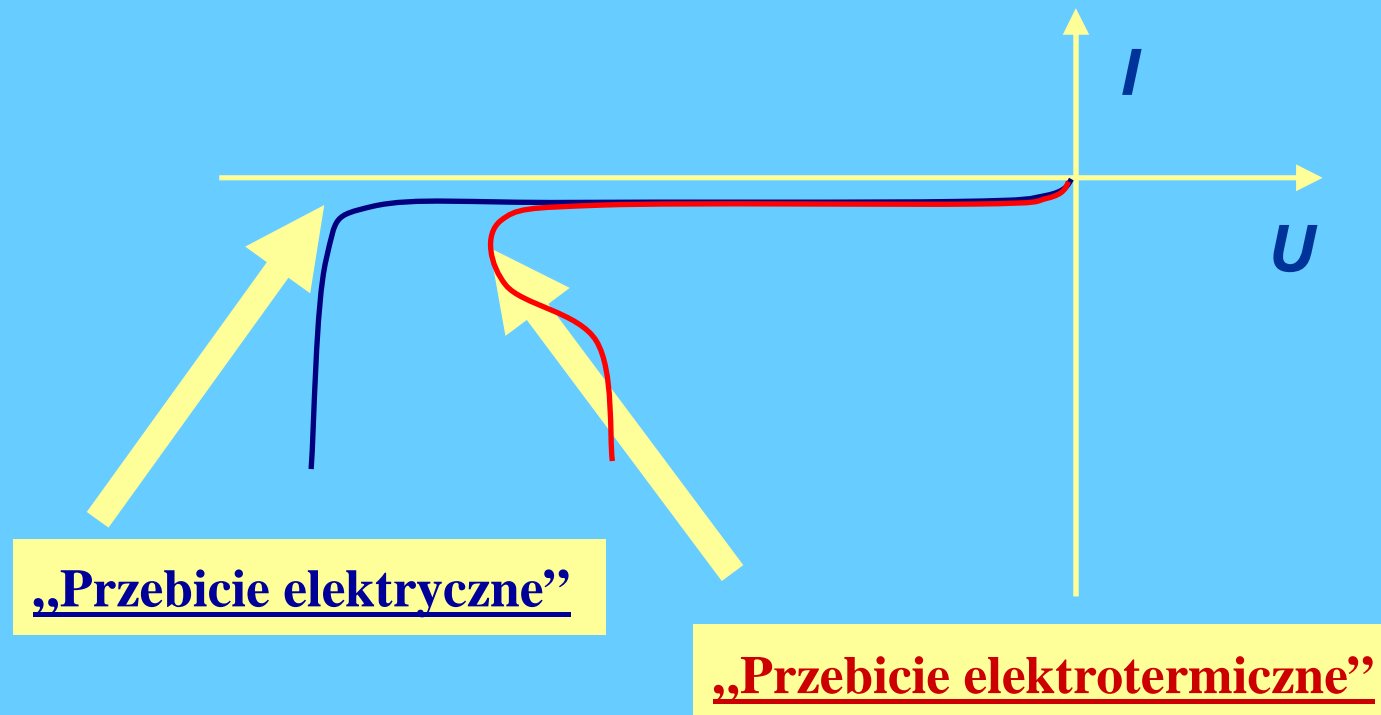
Nieizotermiczna charakterystyka I-U diod wysokonapięciowych
(kierunek zaporowy)



Efekty cieplne

Podstawowe zjawiska – zjawiska przebicia

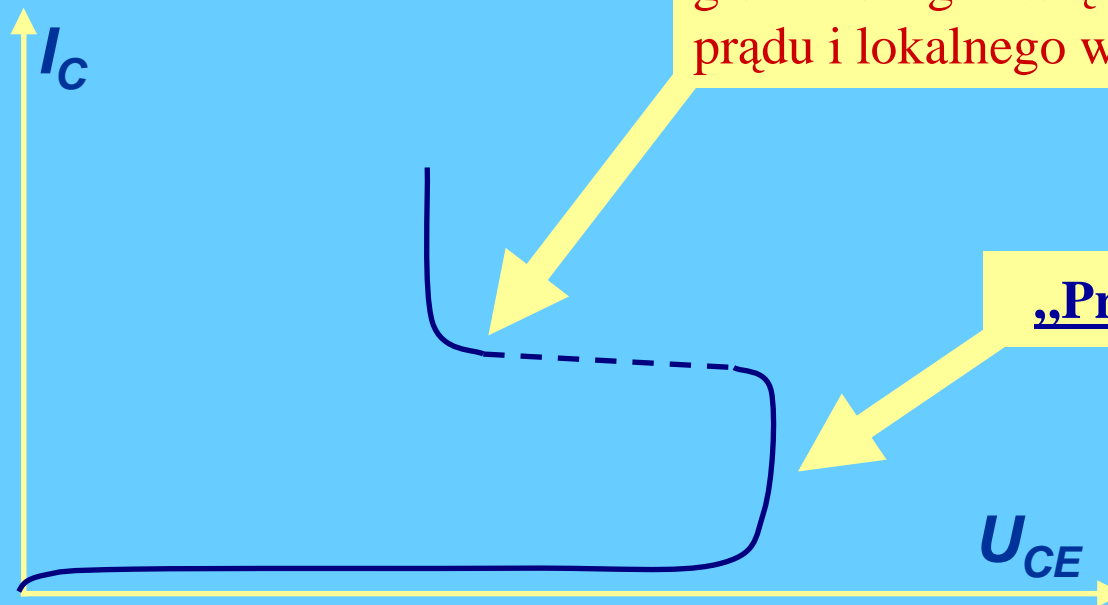
Charakterystyki wsteczne I-U diody



Efekty cieplne

Podstawowe zjawiska – zjawiska przebicia

Charakterystyki wyjściowa tranzystora bipolarnego w układzie OE



„Przebicie wtórne” – oddziaływanie elektrotermiczne prowadzące do gwałtownego zwiększenia gęstości prądu i lokalnego wzrostu temperatury

„Przebicie lawinowe”

Niezawodność

Intensywność uszkodzeń

- Temperatura wpływa na niezawodność elementów elektronicznych
- Szybkość przebiegu procesu degradacyjnego (wzór Arrheniusa):

$$S(T) = S_0 \exp\left(\frac{-W_A}{kT}\right)$$

gdzie:

- W_A – energia aktywacji procesu degradacji
- k – stała Boltzmanna
- T – temperatura bezwzględna
- S_0 – parametr procesu degradacyjnego

- Intensywność uszkodzeń zależy od temperatury zgodnie ze wzorem:

$$\lambda(T) = \lambda_0 \exp\left(\frac{-W_A}{kT}\right)$$

Niezawodność

Intensywność uszkodzeń - energie aktywacji dla różnych procesów degradacji

PROCES	ENERGIA AKTYWACJI
PENETRACJA ALUMINIUM DO KRZEMU	1,3eV
MIGRACJA ZANIECZYSZCZEŃ NA POWIERZCHNI Si	1,1eV
KOROZJA ALUMINIUM	0,8eV
POWSTAWANIE ZWIĄZKÓW INTERMETALICZNYCH ZŁOTO-ALUMINIUM	0,7eV
ELEKTROMIGRACJA ALUMINIUM	0,5eV
DEFEKTY OBJĘTOŚCIOWE KRZEMU I TLENKU	0,3eV

Intensywność uszkodzeń:

- Dla $W_A = 1,1\text{eV}$

$$\frac{\lambda(400)}{\lambda(300)} \approx 4 \cdot 10^4$$

- Dla $W_A = 0,3\text{eV}$

$$\frac{\lambda(400)}{\lambda(300)} \approx 2 \cdot 10^1$$

Temperatura graniczna

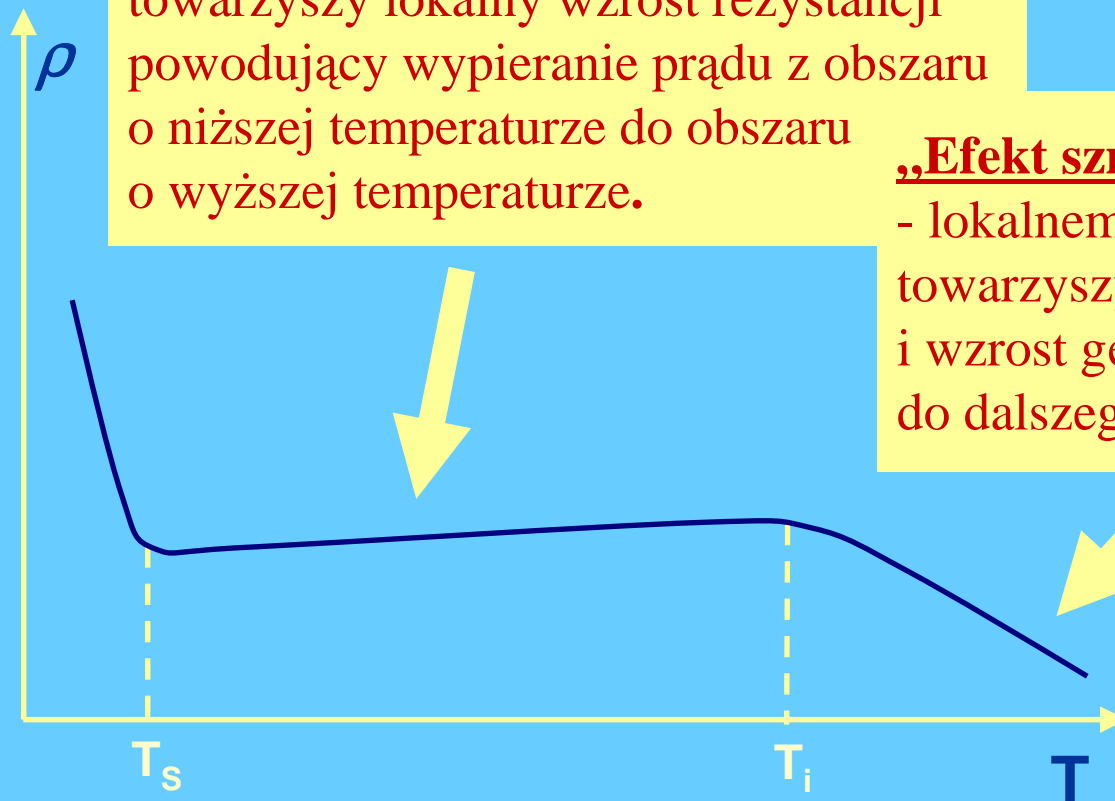
Wpływ temperatury na rezystywność półprzewodnika

„Efekt termicznej autokompensacji”

- lokalnemu wzrostowi temperatury towarzyszy lokalny wzrost rezystancji powodujący wypieranie prądu z obszaru o niższej temperaturze do obszaru o wyższej temperaturze.

„Efekt sznurowania prądu”

- lokalnemu wzrostowi temperatury towarzyszy lokalny spadek rezystancji i wzrost gęstości prądu co prowadzi do dalszego wzrostu temperatury.



Temperatura graniczna

Temperatury graniczne:

- T_{jmax} – Temperatura wnętrza elementu półprzewodnikowego
- T_a – Temperatura otoczenia
- T_{stg} – Temperatura w czasie przechowywania

Temperatury graniczne zależą od:

- Efektu samonagrzewania
- Temperatury przejścia w stan samoistny
- Wpływu prądów wstecznych złącz p-n

TEMPERATURA	PRĄD ZEROWY BJT
25 °C	100 nA
150 °C	100µA
200 °C	1mA

- Ograniczeń niezawodnościowych (T_{jmax} i T_{stg}) zależnych m.in. od technologii wytwarzania elementów półprzewodnikowych

Temperatury graniczne

Utrzymanie wewnętrznej temperatury przyrządu w odpowiednim zakresie temperatur jest konieczne dla:

- **BEZPIECZNEJ PRACY** – przekroczenie dopuszczalnej temperatury prowadzi do zniszczenia przyrządu lub jego powolnej destrukcji
- **NORMALNEJ PRACY** – parametry katalogowe są ważne do pewnej temperatury podanej w katalogu

Standardy temperaturowe dla zastosowań sprzętu elektronicznego:

ZAKRES	TEMPERATURA
KOMERCYJNY	0 ÷ 70 [°C]
PRZEMYSŁOWY	-25 ÷ 85 [°C]
PRZEMYSŁOWY ROZSZERZONY	-40 ÷ 125 [°C]
MILITARNY	-55 ÷ 125 [°C]

Parametry cieplne

Ze względu na dopuszczalne temperatury pracy elementy elektroniczne można zakwalifikować do jednej z dwóch grup:

ZAKRES		TEMPERATURA
MILITARNY		-55 ÷ 125 [°C]
ELEKTRONIKA WYSOKOTEMPERATUROWA	DOLNY ZAKRES	150 ÷ 300 [°C]
	GÓRNY ZAKRES	300 ÷ 1000 [°C]

ELEKTRONIKA WYSOKOTEMPERATUROWA (ang. High Temperature Electronics – HTE)

obejmuje wszystkie elementy i urządzenia elektroniczne przystosowane do pracy w temperaturach powyżej 150°C

Parametry cieplne

Elektronika wysokotemperaturowa

- Wysoka temperatury otoczenia
- Duże gęstości wydzielanego ciepła

Stosowane materiały:

TEMPERATURA	PRZERWA ZABRONIONA	MATERIAŁ
< 300 [°C]	$W_g \approx 1,12\text{eV}$	Si – SOI
300 ÷ 500 [°C]	$W_g < 2,3\text{eV}$	GaAs, InP, GaP
> 500 [°C]	$W_g > 2,3\text{eV}$	SiC, C-diamant, GaN, BN

KONSTRUKCJA SPRZĘTU ELEKTRONICZNEGO

Ciepłne parametry przyrządów
półprzewodnikowych

Parametry cieplne

Utrzymanie wewnętrznej temperatury przyrządu na odpowiednio niskim poziomie jest konieczne dla:

- **NORMALNEJ PRACY** – parametry katalogowe są ważne do pewnej temperatury podanej w katalogu
- **BEZPIECZNEJ PRACY** – przekroczenie dopuszczalnej temperatury prowadzi do zniszczenia przyrządu lub jego powolnej destrukcji

Parametry deklarowane przez producentów:

- T_j – **temperatura złącza** – dopuszczalna wewnętrzna temperatura przyrządu;

Dwa dodatkowe parametry termiczne:

- R_{th} – **rezystancja termiczna (cieplna)** – dla stanu ustalonego;
- Z_{th} – **impedancja termiczna (cieplna)** – dla stanu przejściowego;

Parametry cieplne

Rezystancja cieplna

Rezystancja cieplna (termiczna) – najprostszy model termiczny przyrządu półprzewodnikowego dla stanu ustalonego; wiąże temperaturę we wnętrzu przyrządu półprzewodnikowego z rozpraszaną mocą.

Rezystancja cieplna jest zdefiniowana wzorem:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{T_j - T_{odn}}{P}$$

gdzie:

- T_j – temperatura złącza odpowiadająca maksymalnej temperaturze wewnątrz przyrządu;
- T_{odn} – temperatura odniesienia – w ogólnym przypadku temperatura otoczenia;
- P – moc elektryczna rozpraszana w przyrządzie;

$$R_{th} = \left[\frac{K}{W} \right] = \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

Parametry cieplne

Rezystancja cieplna

Temperaturą odniesienia T_{odn} może być:

- T_c – temperatura obudowy (ang. case);

$$R_{thJC} = \frac{T_j - T_c}{P}$$

- T_r – temperatura radiatora (ang. radiator / sink);

$$R_{thJR} = \frac{T_j - T_r}{P}$$

- T_a – temperatura otoczenia (ang. ambient);

$$R_{thJA} = \frac{T_j - T_a}{P}$$

Parametry cieplne

Impedancja cieplna

Impedancja cieplna (termiczna) – nazwana także cieplną rezystancją przejściową jest najprostszym modelem termicznym przyrządu półprzewodnikowego dla stanu przejściowego; wiąże zmiany temperatury we wnętrzu przyrządu półprzewodnikowego z rozpraszaną mocą.

Impedancja cieplna jest zdefiniowana wzorem:

$$Z_{th} = \frac{\Delta T(t)}{P} = \frac{T_j(t) - T_{odn}}{P}$$

gdzie:

- $T_j(t)$ – zależna od czasu funkcja określająca zmiany temperatury złącza;
- T_{odn} – temperatura odniesienia – w ogólnym przypadku temperatura otoczenia;
- P – funkcja skokowa reprezentująca stałą moc rozpraszaną w przyrządzie;

$$Z_{th} = \left[\frac{K}{W} \right] = \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

Parametry cieplne

Analogia pomiędzy zjawiskami cieplnymi i elektrycznymi

Wielkości cieplne		Wielkości elektryczne	
MOC CIEPLNA	– P [W]	PRĄD ELEKTRYCZNY	– I [A]
TEMPERATURA	– T [°C]	NAPIĘCIE	– U [V]
CIEPŁO	– Q [J]	ŁADUNEK	– q [C]
REZYSTANCJA CIEPLNA	– R _{th} [K/W]	REZYSTANCJA ELEKTRYCZNA	– R [V/A=Ω]
POJEMNOŚĆ CIEPLNA	– C _{th} [J/ °C]	POJEMNOŚĆ ELEKTRYCZNA	– C [C/V=F]

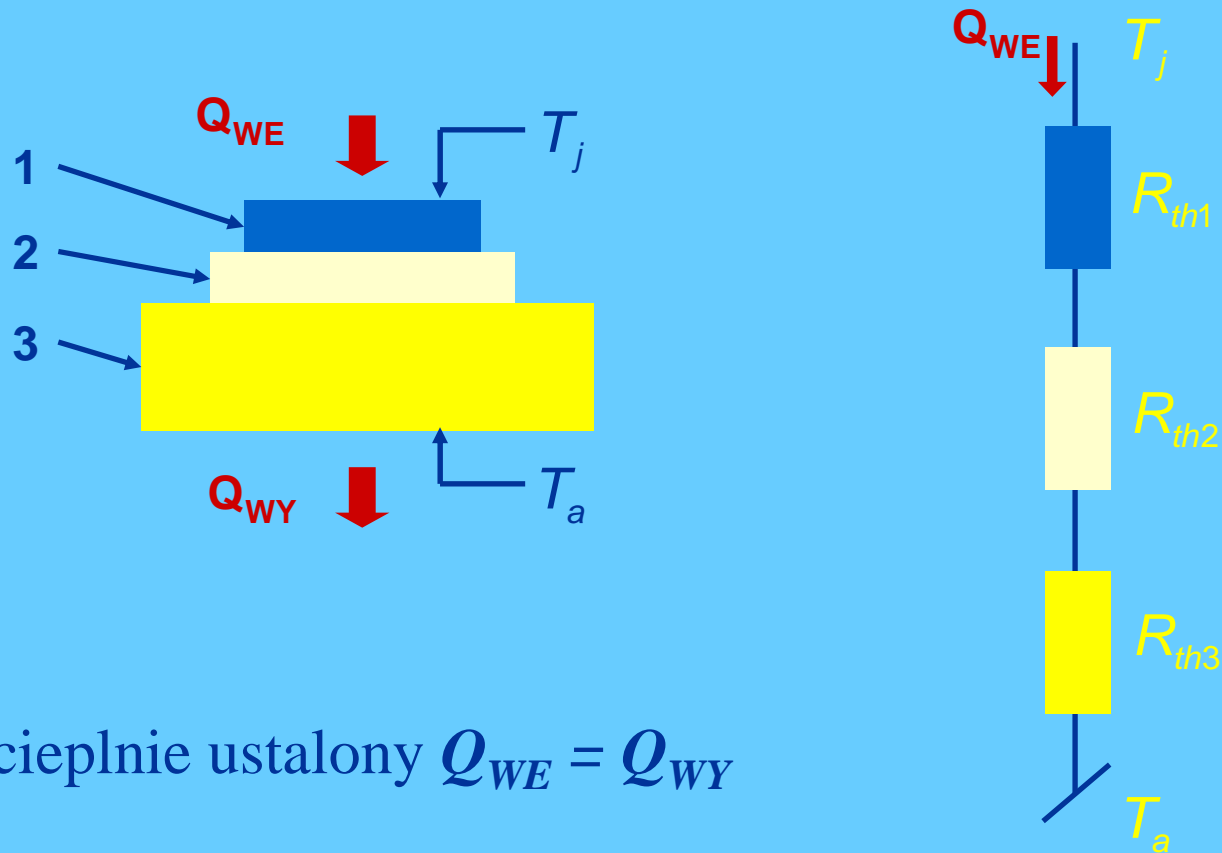
Ciepne prawo Ohma ma postać:



$$P = \frac{T_2 - T_1}{R_{th}}$$

Parametry cieplne

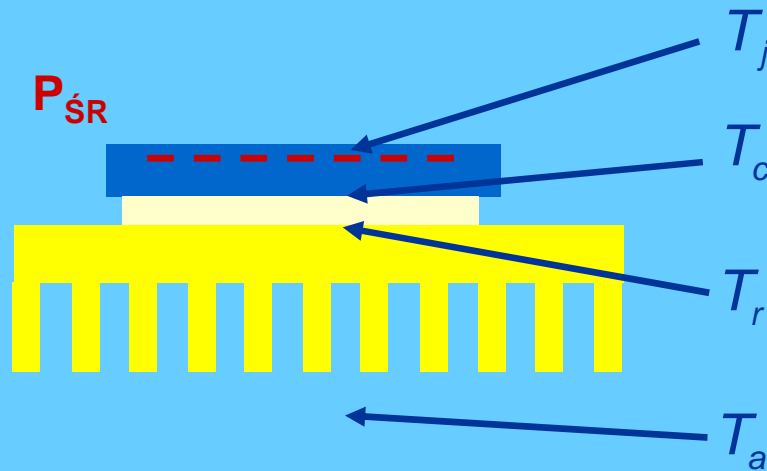
Rezystancja cieplna – schemat zastępczy



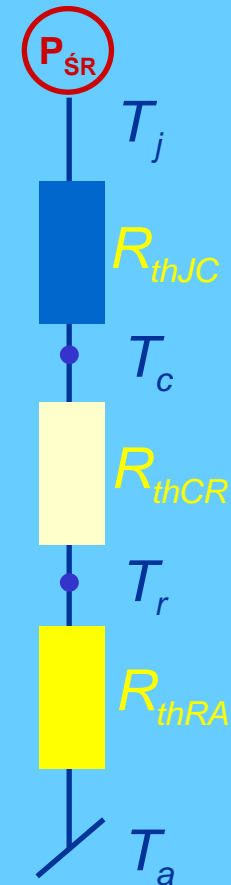
Stan cieplnie ustalony $Q_{WE} = Q_{WY}$

Parametry cieplne

Układ cieplny

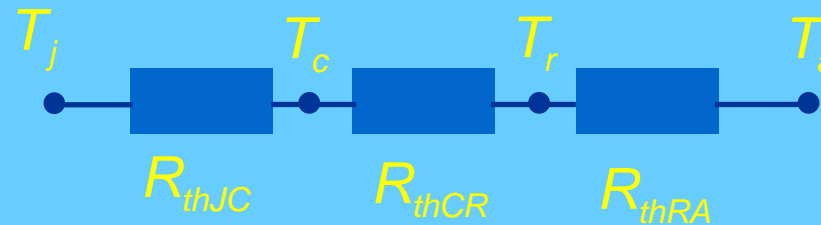


- **Rezystancja złącze – obudowa (R_{thJC})** – parametr katalogowy podawany dla każdego przyrządu indywidualnie.
- **Rezystancja obudowa – radiator (R_{thCR})** – tzw. rezystancja cieplna przejścia zależy od własności połączenia mechanicznego oraz jakości stykających się powierzchni przyrządu i radiatora.
- **Rezystancja radiator – otoczenie (R_{thRA})** – popularnie rezystancja cieplna radiatora – parametr katalogowy.



Parametry cieplne

Przepływ ciepła



Rezystancja cieplna
złącze - obudowa

$$R_{thJC} = \frac{T_j - T_c}{P}$$

Rezystancja cieplna
obudowa - radiator

$$R_{thCR} = \frac{T_c - T_r}{P}$$

Rezystancja cieplna
radiator - otoczenie

$$R_{thRA} = \frac{T_r - T_a}{P}$$

$$R_{thJA} = R_{thJC} + R_{thCR} + R_{thRA}$$

Odrowadzanie ciepła

Odrowadzanie ciepła z elementów elektronicznych

Zapewnienie bezpiecznej temperatury pracy przyrządu bądź układu elektronicznego wymaga efektywnego odrowadzenia ciepła z wnętrza struktury półprzewodnikowej do otoczenia. Ciepło od miejsca, gdzie się wydziela, jest transportowane do otoczenia na drodze:

- **PRZEWODZENIA**
- **KONWEKCJI**
- **PROMIENIOWANIA**

Odrowadzanie ciepła

Zjawiska cieplne

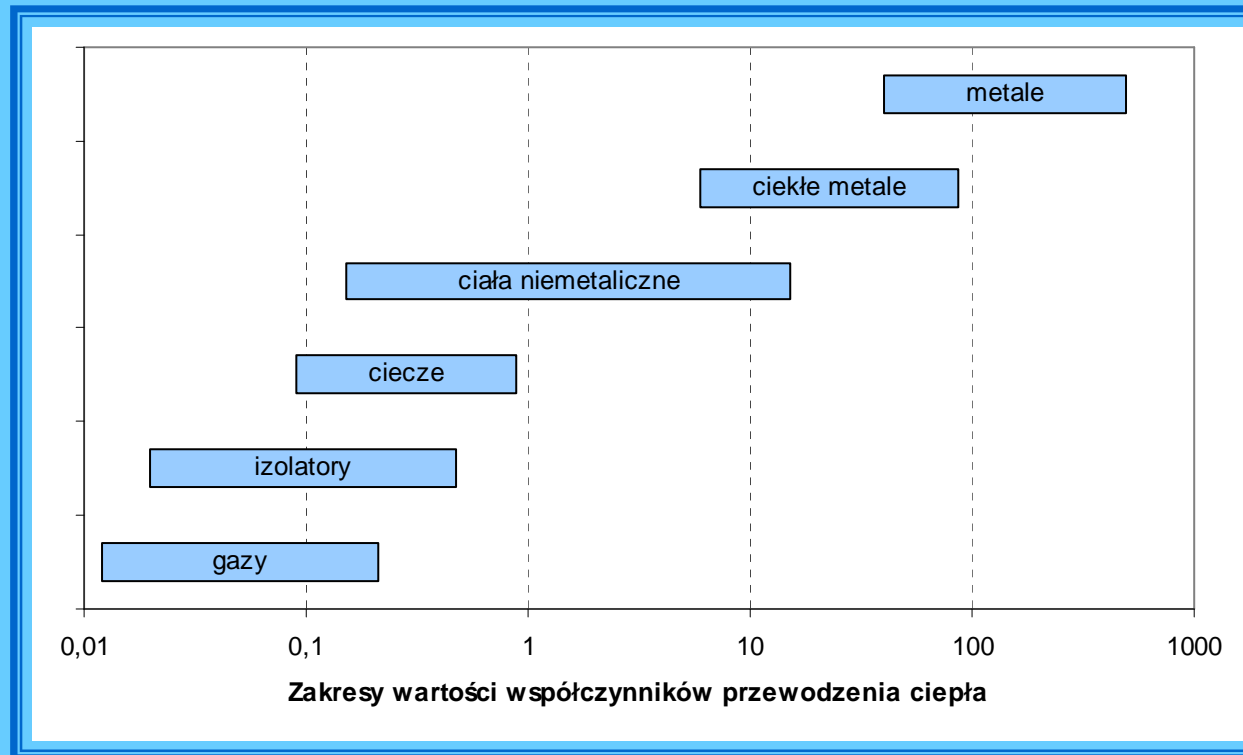
Przewodnictwo cieplne - występuje głównie w obszarze ciała stałego; polega ono na przekazywaniu energii wewnętrznej na skutek istnienia różnic temperatur. Zgodnie z prawem Fouriera:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$$

gdzie: q – strumień ciepła [W/m²]
 λ – przewodność cieplna materiału [W/mK]
 $\text{grad}(T)$ – gradient temperatury [K/m]

Odrowadzanie ciepła

Współczynnik przewodzenia ciepła



Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., Wymiana ciepła, Wyd. 5, WNT, Warszawa, 2000

Odrowadzanie ciepła

Zjawiska cieplne

Promieniowanie - w temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego, każde ciało wypromieniowuje energię; różnica ilości energii wypromieniowanej przez powierzchnię do ilości energii przez nią pochłoniętej opisana jest wzorem:

$$q = C_0 \cdot \varepsilon_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

gdzie: q – strumień ciepła [W/m^2]

T_1 – temperatura badanej powierzchni [K]

T_2 – temperatura odniesienia [K]

$C_0 = 5,6693 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$ – stała promieniowania ciała doskonale czarnego

$\varepsilon_{1,2}$ – emisyjność względna

Odrowadzanie ciepła

Emisyjność powierzchni różnych materiałów

MATERIAŁ	TEMPERATURA [°C]	WSPÓŁ. EMISYJNOŚCI
Al polerowane	200 ÷ 600	0,04 ÷ 0,06
Al oksydowane	35 ÷ 500	0,20 ÷ 0,31
Cu polerowane	80 ÷ 115	0,02 ÷ 0,023
Cu oksydowane	200 ÷ 600	0,57 ÷ 0,87
Farby matowe	100	0,92 ÷ 0,96
Sadza	95 ÷ 270	0,952
Woda	0 ÷ 100	0,95 ÷ 0,963

Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., Wymiana ciepła, Wyd. 5, WNT, Warszawa, 2000

Odrowadzanie ciepła

Zjawiska cieplne

Konwekcja – to dominujący proces transportu ciepła w obszarze płynów (np. woda, powietrze); przenoszenie ciepła zachodzi na skutek ruchu (dyfuzji) cząstek medium wynikającego z różnicy temperatur (konwekcja naturalna), lub też z zewnętrznie działających sił wymuszających ten ruch (konwekcja wymuszona).

Odrowadzanie ciepła

Zjawiska cieplne

- Przejmowanie ciepła = przewodzenie + konwekcja
Przejmowanie ciepła jest opisane prawem Newtona.

$$q = \alpha \cdot (T_s - T_p)$$

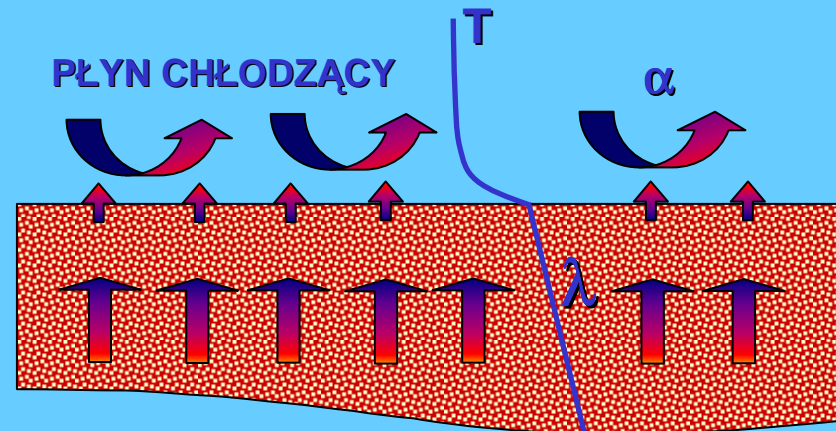
gdzie: q – strumień ciepła [W/m^2]

α – współczynnik przejmowania ciepła [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

T_s – temperatura powierzchni ciała stałego [K]

T_p – temperatura odniesienia płynu [K]

- Wnikanie ciepła
- Przenikanie ciepła



Odrowadzanie ciepła

Współczynnik przejmowania ciepła

KONWEKCJA	WSPÓŁCZYNNIK PRZEJMOWANIA CIEPŁA [W/m ² K]	
	NATURALNA	WYMUSZONA
gaz	2 ÷ 30	30 ÷ 500
olej	5 ÷ 100	30 ÷ 3 000
woda	30 ÷ 300	300 ÷ 20 000
wrząca woda	2·10 ³ ÷ 2·10 ⁴	3·10 ³ ÷ 10 ⁵

Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., Wymiana ciepła, Wyd. 5, WNT, Warszawa, 2000

KONSTRUKCJA SPRZĘTU ELEKTRONICZNEGO

Systemy chłodzenia

Chłodzenie powietrzne

Odrowadzanie ciepła z elementów elektronicznych:

Zgodnie z prawem Newtona ilość przejmowanego ciepła można obliczyć w oparciu o:

$$P = \alpha S_r (T_{\acute{S}R} - T_a)$$

gdzie:

α	– współczynnik przejmowania ciepła [W/m ² K]
S_r	– powierzchnia radiatora [m ²]
$T_{\acute{S}R}$	– temperatura średnia powierzchni radiatora [°C]
T_a	– temperatura otoczenia [°C]

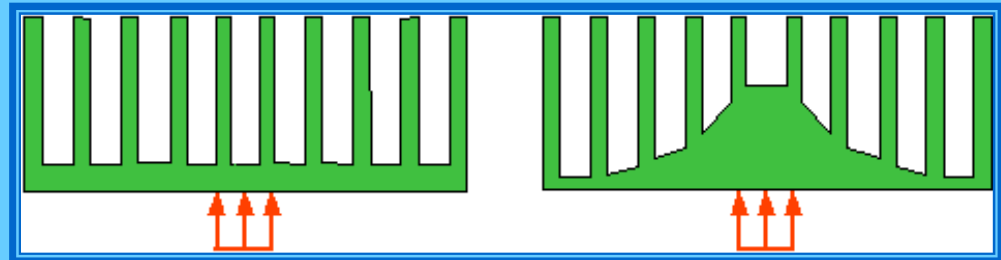
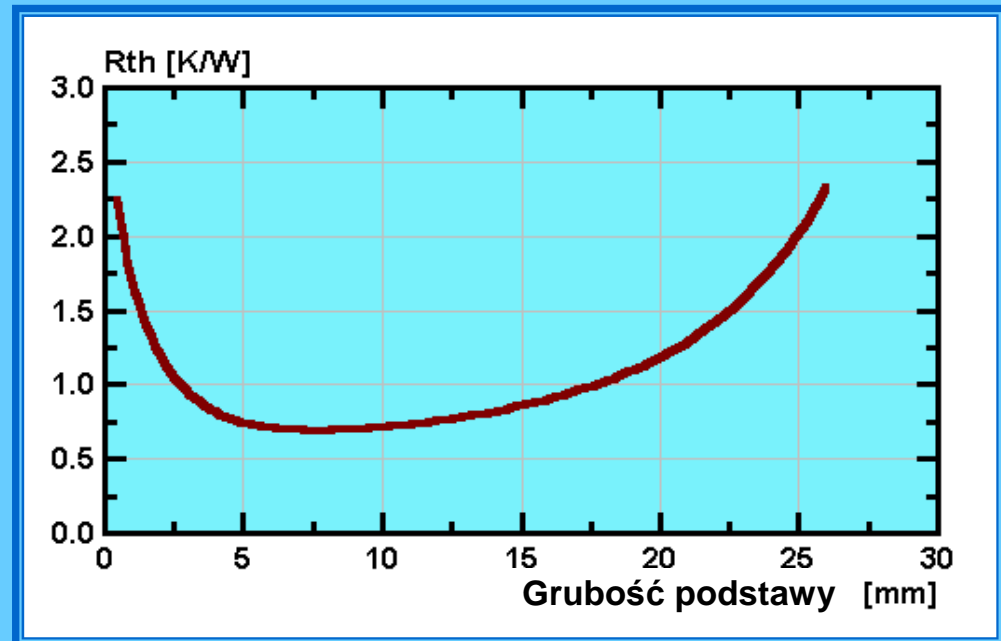
mamy wpływ na...

**OBYDWA PARAMETRY SĄ OGRANICZONE CENĄ ORAZ
MOŻLIWOŚCIAMI TECHNOLOGICZNYMI**

Chłodzenie powietrzne

Radiatory - grubość podstawy radiatora

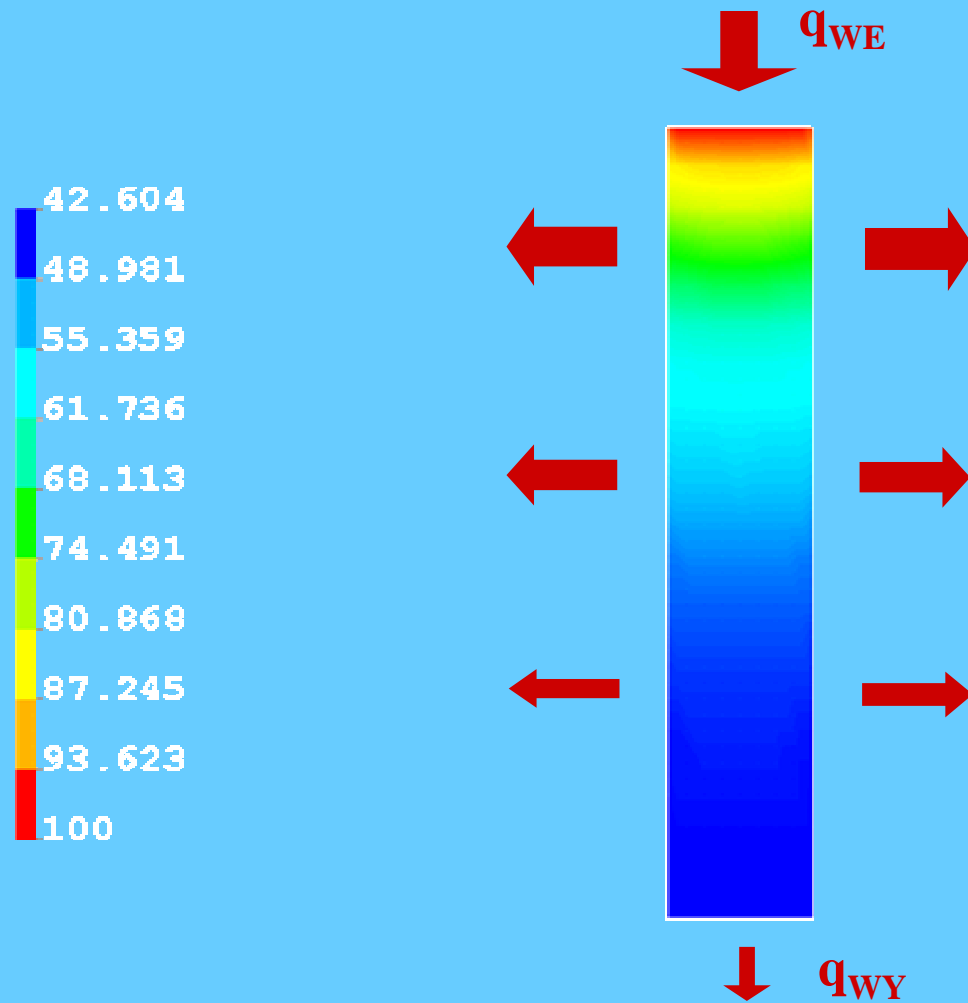
- zależy od wymagań transferu poprzecznego ciepła oraz wielkości źródła ciepła
- zależy od materiału z jakiego wykonana jest podstawa
- optymalna grubość waha się w granicach 7,5 – 15 mm
- podstawa profilowana



A. Malhammar, *Optimisation of Heat Sinks in Confined Flow*, www.coolingzone.com

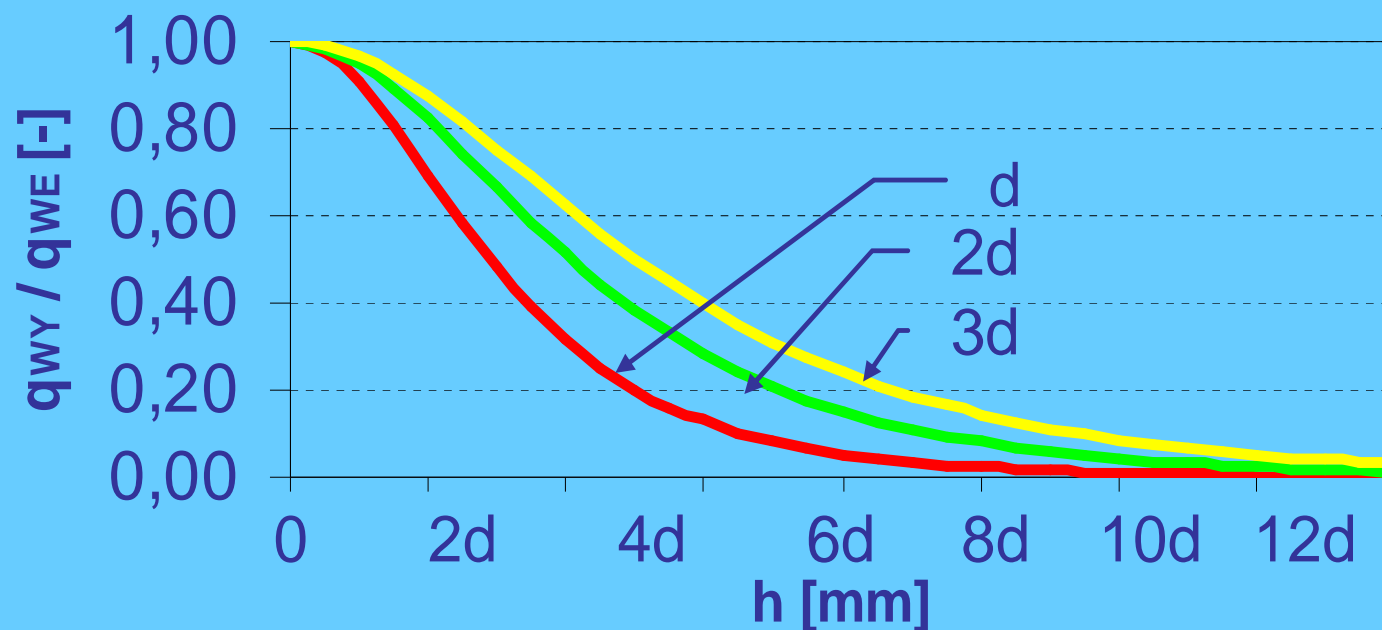
Chłodzenie powietrzne

Radiatory - zjawisko korkowania ciepła



Chłodzenie powietrzne

Radiatory - optymalne wymiary żebra



Wykres wykreślono dla wartości współczynnika przejmowania ciepła równej $20W/cm^2K$

Chłodzenie powietrzne

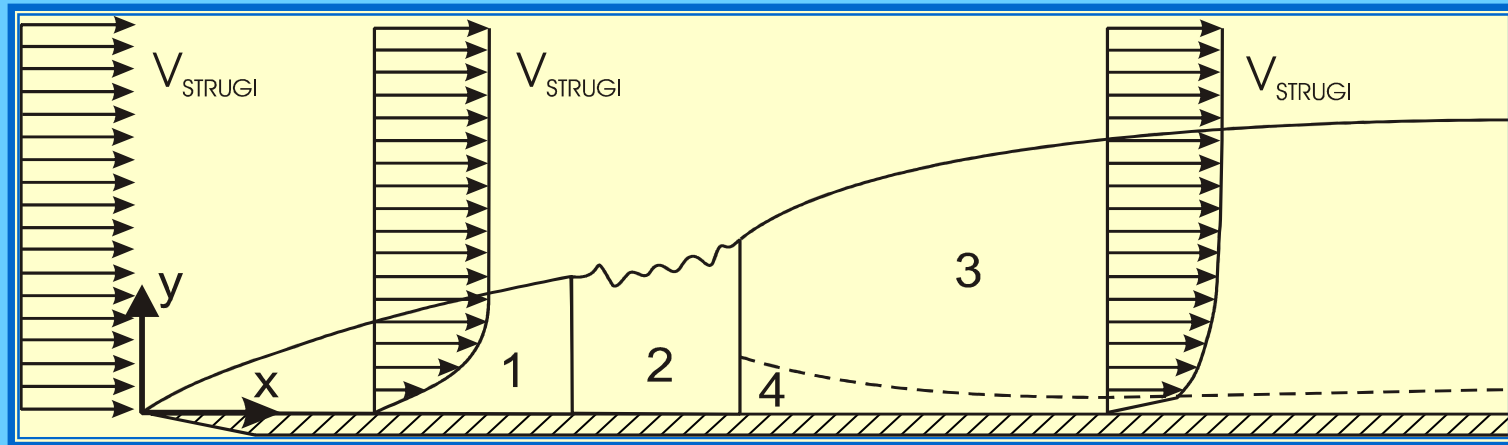
Radiatory - sprawność żebra

$$\eta_{\text{zebra}} = \frac{\tanh(mh)}{mh} \quad \text{gdzie:} \quad m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot Ob}{\lambda \cdot F}}$$

- gdzie:
- h – wysokość żebra [m]
 - α – współczynnik przejmowania ciepła [W/m²K]
 - λ – przewodność cieplna materiału żebra [W/mK]
 - Ob – obwód żebra [m]
 - F – pole przekroju poprzecznego żebra [m²]

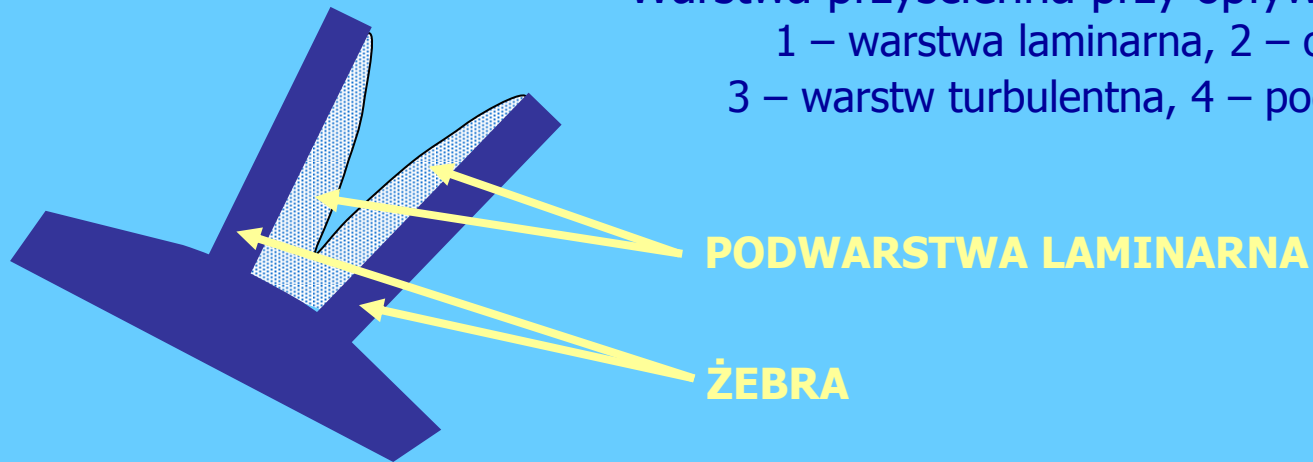
Chłodzenie powietrzne

Radiatory - odległość między żebrami



Warstwa przyścienna przy opływie płyty płaskiej:

- 1 – warstwa laminarna, 2 – obszar przejściowy,
- 3 – warstw turbulentna, 4 – podwarstw laminarna



Chłodzenie powietrzne

Wypraski

- aluminiowe bądź miedziane blaszki ponacinane i ukształtowane tak, aby zwiększyć powierzchnię kontaktu z medium chłodzącym
- stosowane do pojedynczych elementów małej mocy i średniej mocy
- rezystancja termiczna w granicach $1 \div 100$ K/W
- konwekcja naturalna
- powierzchnia radiatora poddawana obróbce wykończeniowej (oksydacja, czernienie, anodowanie)
 - ze względu na udział promieniowania spadek rezystancji cieplnej od 10% nawet do 45%
- jedno z najtańszych rozwiązań

Chłodzenie powietrzne

Radiatory wytłaczane

- wytwarzane jako profile o zadanym przekroju poprzecznym, z których odcina się kształtki o wymaganej dla danego rozwiązania długości
- najczęściej aluminiowe
- parametry:
 - min. grubość żebra około 0,64mm
(standardowa grubość żebra około 1,5mm)
 - max. stosunek wysokości żebra do odległości między żebrami 10 : 1
(standardowo 6 : 1 bądź 8:1)
- rezystancja termiczna w granicach $0,08 \div 15$ K/W
- konwekcja naturalna i wymuszona
- obróbka powierzchniowa - anodowanie
 - przy konwekcji naturalnej do 20%
 - przy konwekcji wymuszonej 4 do 8%

Chłodzenie powietrzne

Radiatory z ożebrowaniem spajaniem - radiatory blaszkowe

- otrzymywane są poprzez przymocowanie do rowkowanej podstawy żeber o przekroju prostokątnym
- **podstawa:** miedziana, aluminiowa; **żebra:** miedziane, aluminiowe; **łączenie:** klejenie (żywice epoksydowe), lutowanie
- parametry:
 - grubość żebra od 0,7 do 2,5mm
 - wysokość żeber ograniczona ich sprawnością
 - max. stosunek wysokości żebra do odległości między żebrami 30 : 1
- 2 do 3-krotne zwiększenie powierzchni czynnej w stosunku do radiatorów wytłaczanych
- rezystancja termiczna w granicach $0,01 \div 0,6 \text{ K/W}$ (konwekcja naturalna do 2 K/W)
- mogą być stosowane w przypadku strat mocy sięgających 200W
- konwekcja naturalna i wymuszona (**DEDYKOWANA**)

Chłodzenie powietrzne

Radiatory z ożebrowaniem składanym

- otrzymywane są poprzez odpowiednie wygięcie blach w kształt gęsto ustawionych żeber a następnie przymocowanie ich do podstawy, lub bezpośrednio do powierzchni chłodzonej
- **podstawa:** najczęściej aluminiowa; **żebra:** aluminium, miedź, brąz, Inconel, stal nierdzewna
- parametry: (grubość żebra od 0,5 do 1,2mm; max. stosunek wysokości żebra do odległości między żebrami 40 : 1; wysokość żebra do 100mm)
- rezystancja termiczna w granicach 0,02 ÷ 0,8K/W
- konwekcja naturalna / wymuszona
- rozwiązanie to powstało na potrzeby aplikacji militarnych oraz do zastosowań w lotnictwie
- konstrukcje wyjątkowo lekkie o dużej objętościowej wydajności cieplnej

Chłodzenie powietrzne

Radiatory odlewane

- **materiał:** stopy aluminiowe, czyste aluminium (aż do 170W/mK)
- parametry:
 - min. wymiar żebra 0,5 mm
 - max. wysokości żebra 80 x szerokość żebra
standardowo ≤ 45 x szerokość żebra
- rezystancja termiczna
 - konwekcja naturalna 1,5 ÷ 25 K/W
 - konwekcja wymuszona 0,1 ÷ 8 K/W
- konstrukcje o gęstym upakowaniu żeber o kształcie szpilkowym umożliwiające uzyskanie bardzo dobrych parametrów termicznych przy chłodzeniu „uderzeniowym”

Chłodzenie powietrzne

Zmiana współczynnika przejmowania ciepła:

Wzrost współczynnika przejmowania ciepła dla powietrza można uzyskać poprzez:

- Zastosowanie konwekcji wymuszonej.
- Zastosowanie „mechanizmu chłodzenia uderzeniowego” (ang. jet impingement)
- Zastosowanie konstrukcji szpilkowej żeber (ang. pins).
- Odpowiednie kształtowanie żeber bądź wprowadzanie dodatkowych elementów zwiększających turbulencję, - „turbulatorów”
- Turbulatory powodują zrywanie warstw cząsteczek powietrza osadzających się na powierzchni radiatora.

Chłodzenie cieczowe

Pierwsze systemy chłodzenia cieczowego:

- lata 50-te XX wieku – ENERGOELEKTRONIKA (tranzystory mocy)
– pierwsze pomysły próby zastosowania chłodzenia cieczowego
- lata 80-te XX wieku – MIKROELEKTRONIK – pierwsze próby oraz ogólna akceptacja cieczy jako chłodziwa

Chłodzenie cieczowe dzielimy na:

- **bezpośrednie** – elementy elektroniczne zanurzone są w medium chłodzącym;
- **pośrednie** – ciepło dociera do chłodzącej cieczy przepływając przez elementy konstrukcyjne umieszczone pomiędzy miejscem wydzielania ciepła, a obszarem w którym płynie chłodząca ciecz;

Chłodzenie cieczowe

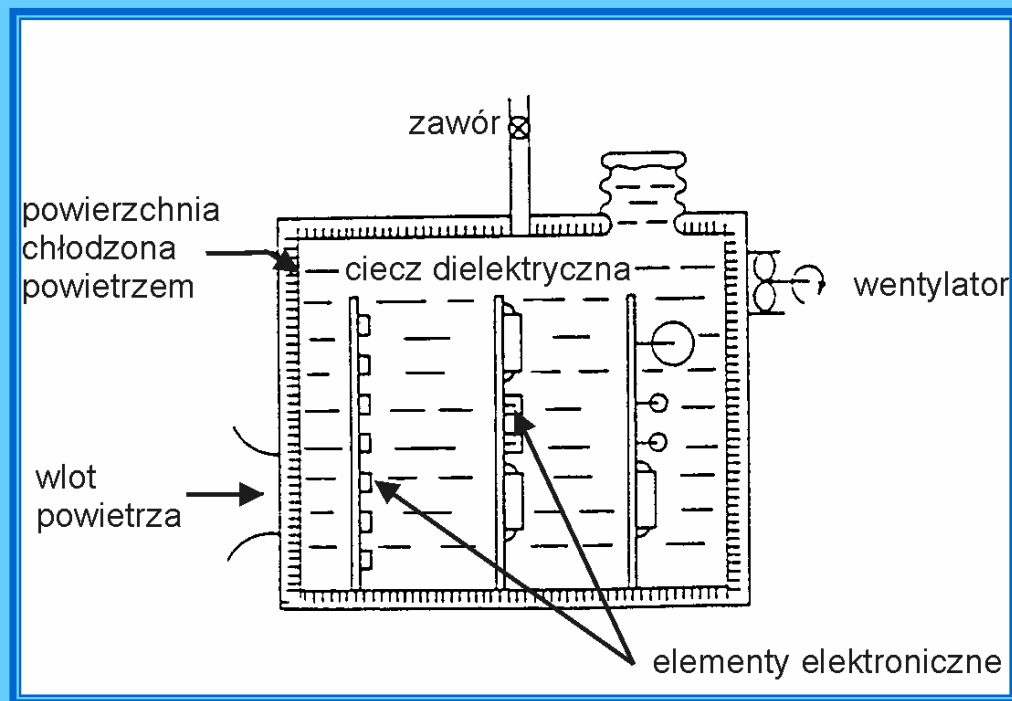
Systemy chłodzenia cieczowego w porównaniu z systemami powietrznymi charakteryzują się:

- mniejszymi wymiarami
- cichszą pracą
- znacznie większą wydajnością
 - duża pojemność cieplna cieczy
 - wysoki współczynnik przejmowania ciepła
- znaczną poprawą niezawodności całego systemu

Chłodzenie cieczowe

Chłodzenie bezpośrednie

Ciepło z elementu elektronicznego jest przekazywane bezpośrednio cieczy na drodze konwekcji naturalnej lub wymuszonej, której może towarzyszyć przemiana fazowa (parowanie)



Bergles A.E. Bar-Cohen A., Immersion Cooling of Digital Computers.
COOLING OF ELECTRONIC SYSTEMS., 1994, ed. S. KAKAC, str.539-621

Chłodzenie cieczowe

Chłodzenie pośrednie

- Ciecz chłodząca nie ma bezpośredniego kontaktu z chłodzonym elementem;
- Podstawowym elementem systemów chłodzenia pośredniego są metalowe struktury, przez które przepływa ciecz:

PŁYTY CHŁODZĄCE



<http://www.d6industries.com>

RADIATORY WODNE



<http://www.atherm.com>

Chłodzenie cieczowe

Chłodzenie pośrednie – typowa charakterystyka płyty

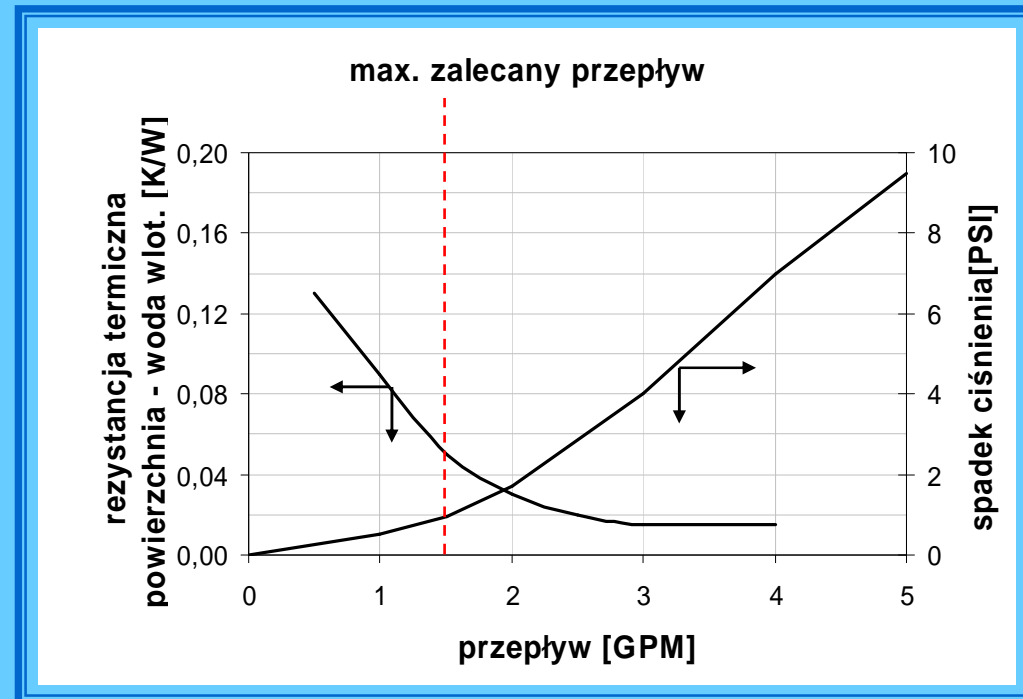
Płyta:

Hi-Contact- 2 pass



Firma:

AAVID



Chłodzenie cieczowe

Chłodzenie pośrednie – przegląd parametrów

		ilość kanałów	R_{th} [K/W]	A_{kont} [cm ²]	r_{th} [Kcm ² /W]	p_{max} [bar]
D6-Industries	Al-2P-02	2	0,0200	39	0,78	0,3
	Al-4P-06	4	0,0134	188	2,51	0,3
	Cu-450-550	2	0,0045	155	0,70	0,3
Lytron	CP10-6"	2	0,0560	131	7,35	0,2
	CP15-6"	6	0,0180	141	2,53	0,5
	CP20		0,0350	29	1,02	0,3
	CP25		0,0200	18	0,35	0,7
Dau	KL1782	2	0,0500	182 ^(*)	9,10	0,7
	KW140	4	0,0160	182 ^(*)	2,91	0,7
	KW140-T	4	0,0080	182 ^(*)	1,46	0,9
	UW140		0,0045	182 ^(*)	0,82	0,8
AAVID	Hi-Contact – 2pass	2	0,0150	32	0,49	0,5
	Hi Contact – 4pass	4	0,0125	193	2,41	0,9
Austerlitz	WK80.11-400	2	0,0050	320	1,60	?
	WK80.11-200	2	0,0075	160	1,20	?
	FK80.11-200	2	0,0100	160	1,60	?

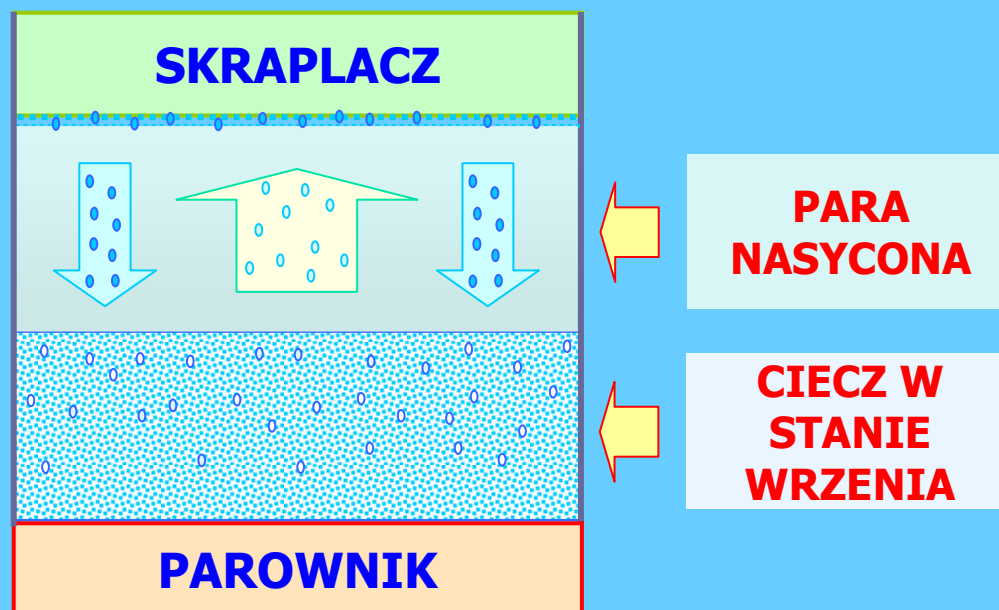
źródła: <http://www.austerlitz-electronic.de>; <http://www.aavidthermalloy.com>; <http://www.dau-at.com>; <http://www.d6industries.com>; <http://www.lytron.com>

Chłodzenie wspomagane

Systemy chłodzenia z przemianą fazową – Systemy waporowe

Zasada działania systemów chłodzenia z przemianą fazową jest oparta na:

- wymianie ciepła w procesach (zmiany stanu skupienia)
 - parowania (z fazy ciekłej na gazową)
 - skraplania (z fazy gazowej na ciekłą)



WARUNEK DZIAŁANIA:
Skraplacz musi być w stanie przejąć ciepło skraplającej się pary bez nadmiernego wzrostu temperatury!!!

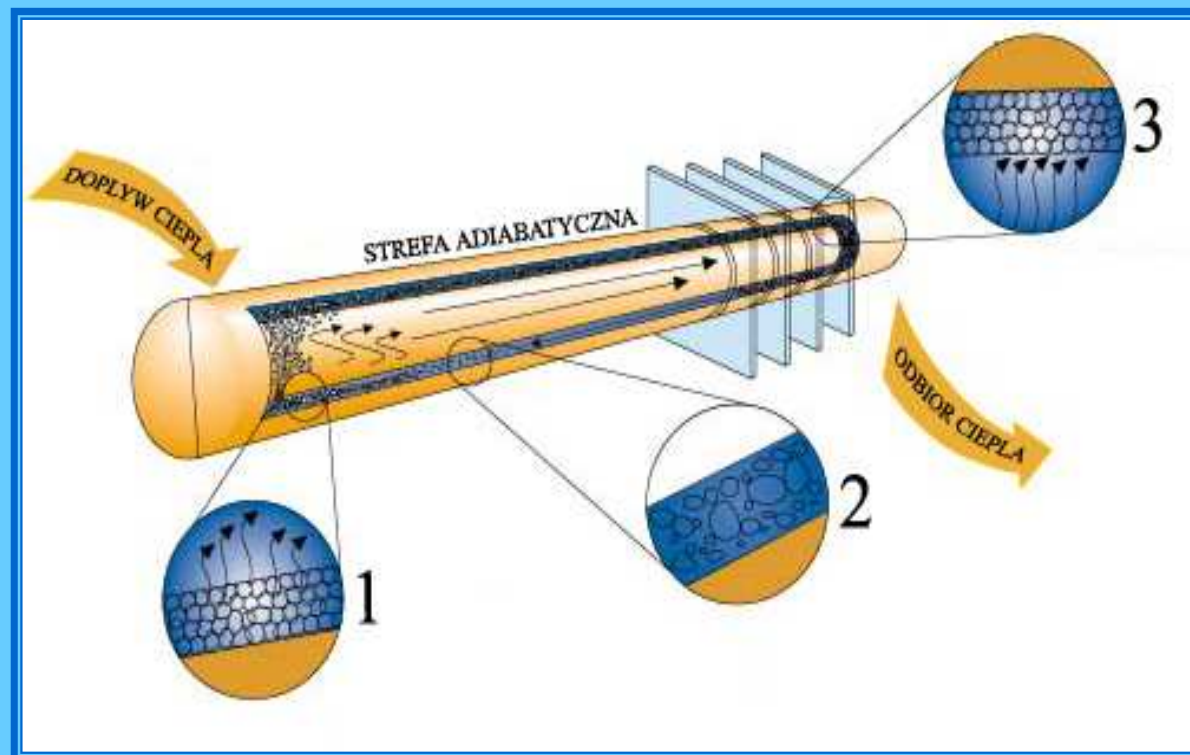
Chłodzenie wspomagane

Rury cieplne (ang. heat pipes)

1 - **PAROWNIK**

2 - **STRUKTURA
KAPILARNA**

3 - **SKRAPLACZ**



Scott D., Garner P.E., *Heat Pipes for Electronics Cooling Applications*, Electronics Cooling, vol.2, nr 3, 1996

Chłodzenie wspomagane

Systemy chłodzenia z przemianą fazową - Rury ciepłne

Kondensat z parownika do skraplacza może przemieszczać się w wyniku:

- sił kapilarnych
- siły grawitacji
- różnicy gęstości cieczy i pary
- siły odśrodkowej



www.dau-at.com

Chłodzenie wspomagane

Rury cieplne

Rury cieplne są wykorzystywane wszędzie tam gdzie:

- Wymagane są szczelnie zamknięte, izolowane obudowy (utrudniają cyrkulację powietrza i uniemożliwiają jego wymianę z otoczeniem)
 - pyłoszczelność
 - ochrona przed wilgocią
 - trudne warunki pracy
- Wymagane jest gęste upakowanie elementów elektronicznych

Chłodzenie wspomagane

Zjawiska termoelektryczne

- Zjawisko Seebecka
- Zjawisko Peltiera
- Zjawisko Thompsona

Chłodzenie wspomagane

Zjawisko Seebecka (1821)

- Polega na powstawaniu siły elektromotorycznej w obwodzie składającym się z dwóch przewodników / półprzewodników, których styki znajdują się w różnych temperaturach

$$U = S_{AB} \cdot (T_2 - T_1)$$
$$S_{AB} = S_B - S_A$$

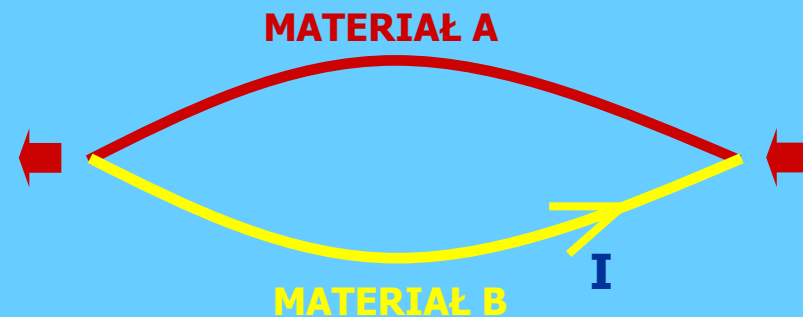


Chłodzenie wspomagane

Zjawisko Peltiera (1834)

- Polega na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła na styku dwóch przewodników / półprzewodników w wyniku przepływu prądu

$$\frac{dQ}{dt} = \Pi_{AB} \cdot I$$



Chłodzenie wspomagane

Zjawisko Thompsona (1852)

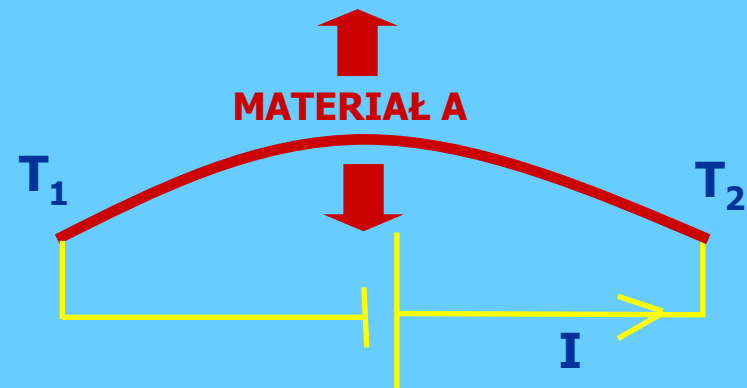
- Polega na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła w objętości przewodnika / półprzewodnika przy istnieniu gradientu temperatury podczas przepływu prądu elektrycznego

$$\frac{dQ_T}{dt} = \tau_T \cdot I \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

τ_T – współczynnik Thompsona

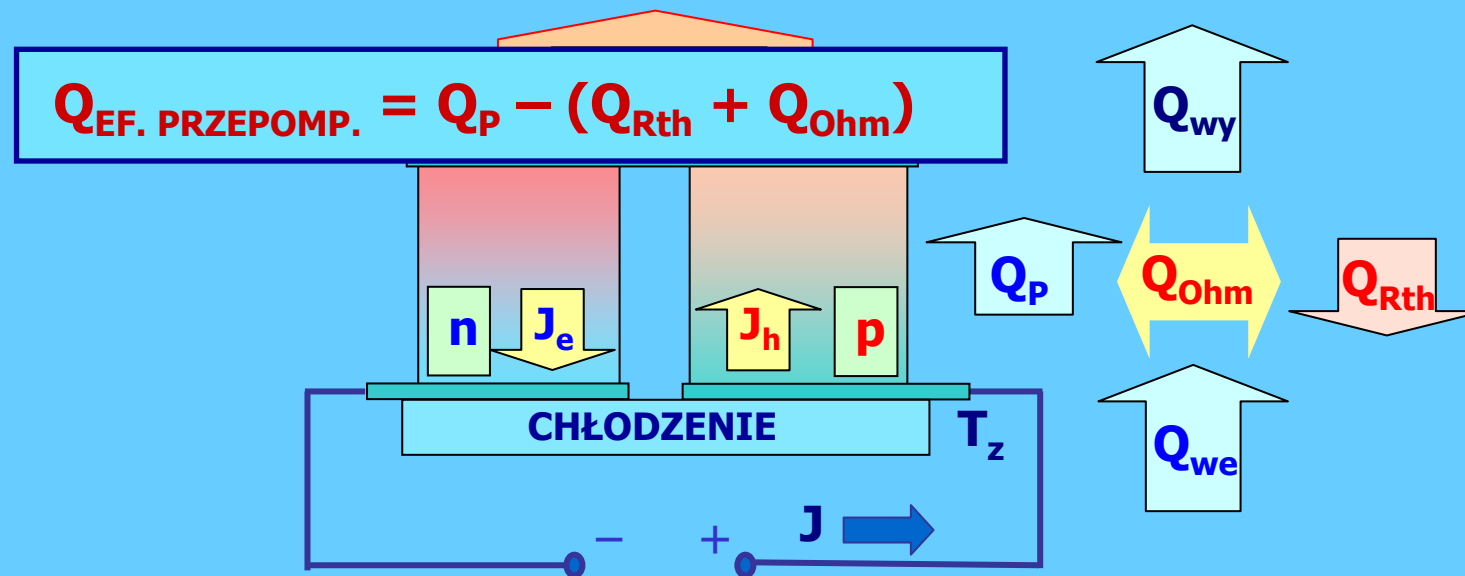
dQ_T – ilość ciepła wydzielająca się na długości dx

dT/dx – gradient temperatury na długości próbki



Chłodzenie wspomagane

Komórka Peltiera – ZASADA DZIAŁANIA



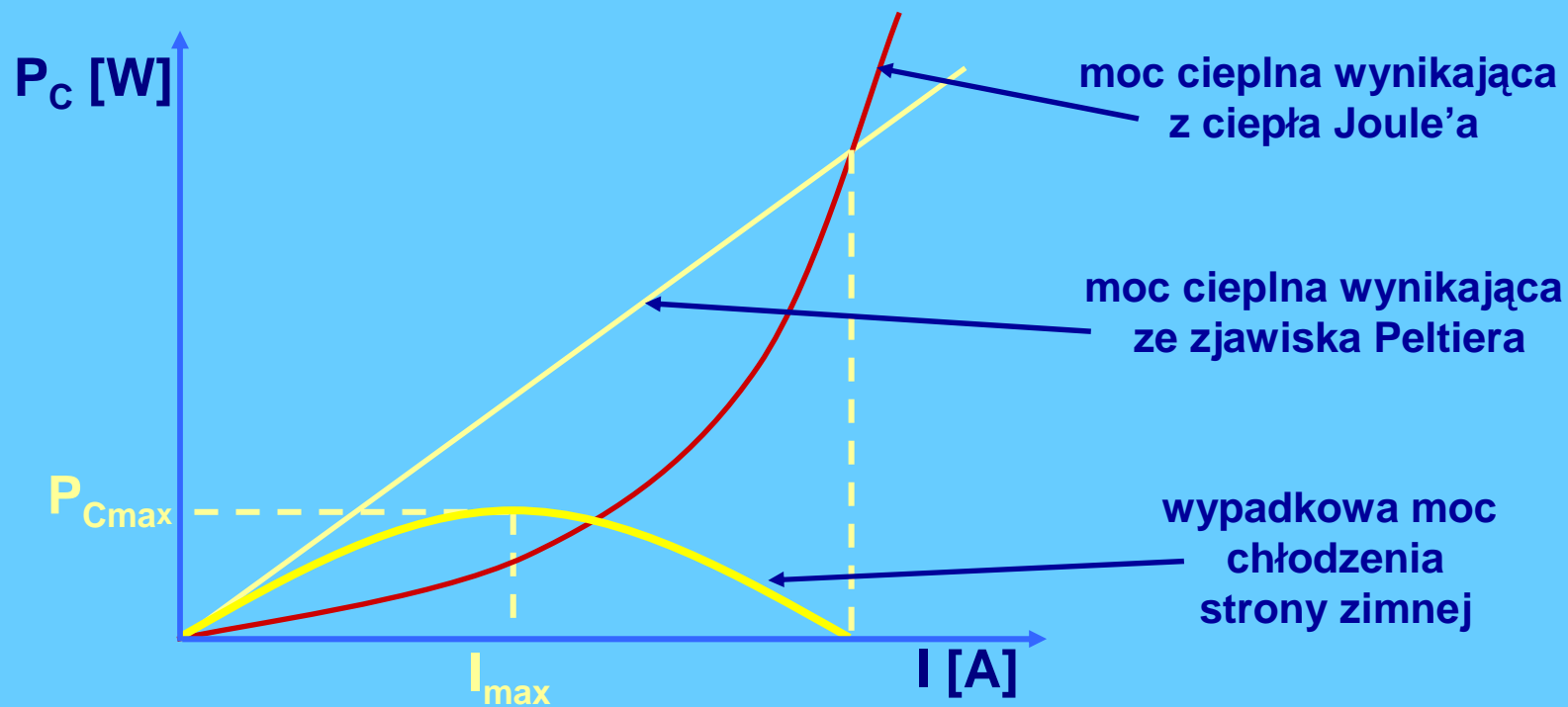
- Q_P – ciepło Peltiera (ΠI)
- Q_{Rth} – dyfuzja ciepła ($\Delta T R_{th}$)
- Q_{Ohm} – straty omowe (RI^2)
- Q_{wy} – ciepło odprowadzane z komórki Peltiera
- Q_{we} – ciepło odbierane z chłodzonego elementu

Chłodzenie wspomagane

Komórka Peltiera – CHARAKTERYSTYKA EFEKTYWNOŚCI

$$P_C = \Pi \cdot I - R \cdot I^2$$

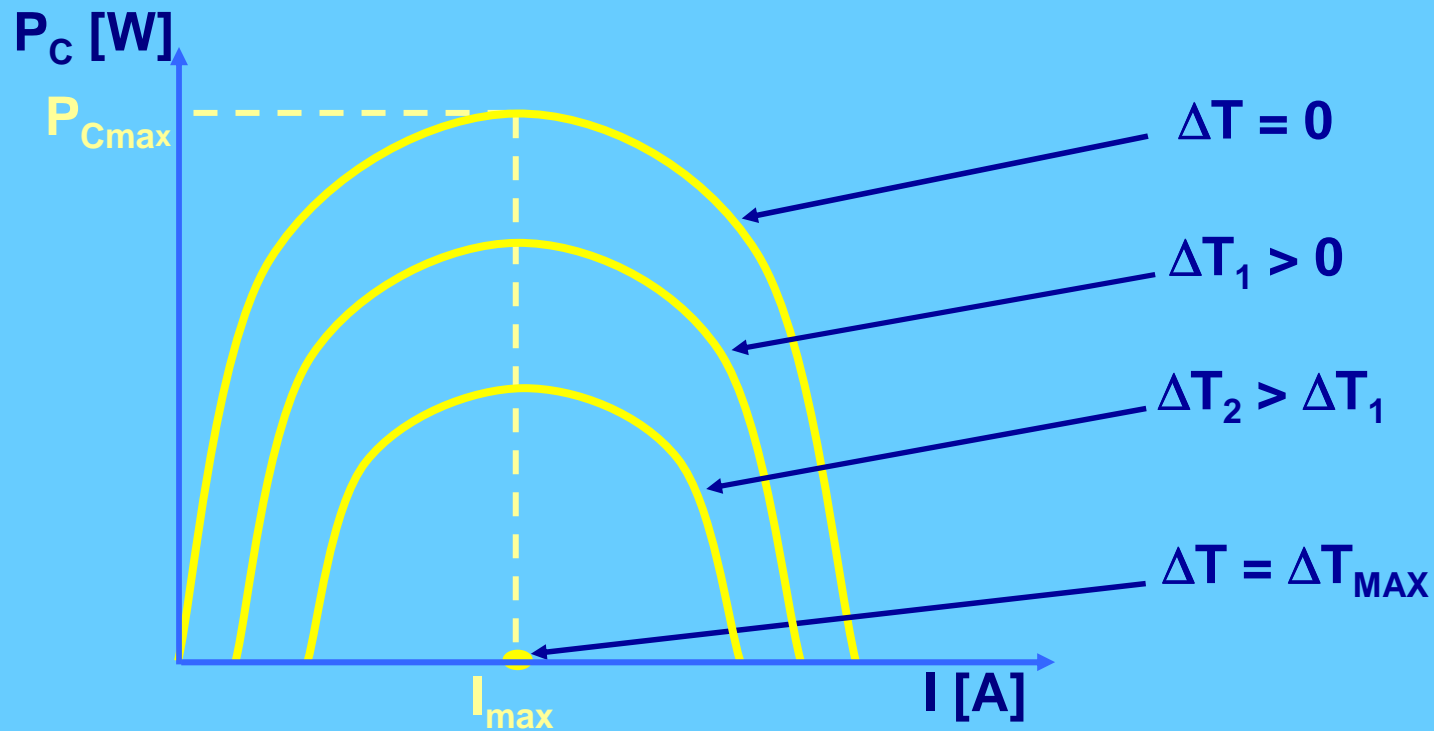
$$Q_{Rth} = 0$$



Chłodzenie wspomagane

Komórka Peltiera – CHARAKTERYSTYKA EFEKTYWNOŚCI

$$P_C = \Pi \cdot I - R \cdot I^2$$



KONSTRUKCJA SPRZĘTU ELEKTRONICZNEGO

Materiały termoprzewodzące

Rezystancja przejścia

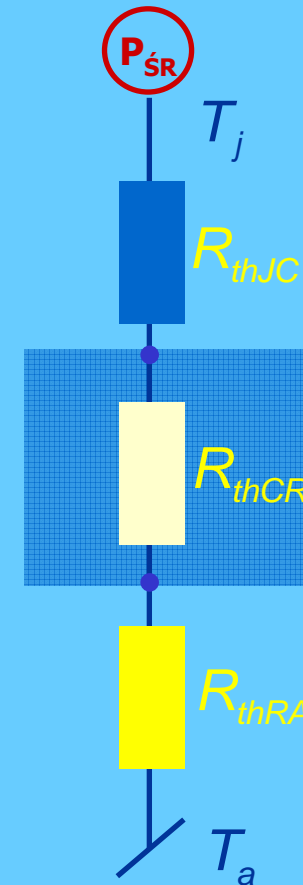
Rezystancja przejścia

$$R_{thCR} = \frac{T_c - T_r}{P_{\acute{S}R}}$$

Wielkość określona dla przyjętej metody połączenia przyrządu z radiatorem.

Jej wartość zależy od:

- **POWIERZCHNI STYKU**
- **RODZAJU STYKAJĄCYCH SIĘ POWIERZCHNI**
- **GŁADKOŚCI POWIERZCHNI**
- **SIŁY ORAZ ROZKŁADU DOCISKU POWIERZCHNI (LICZBA ŚRUB DOCISKAJĄCYCH)**



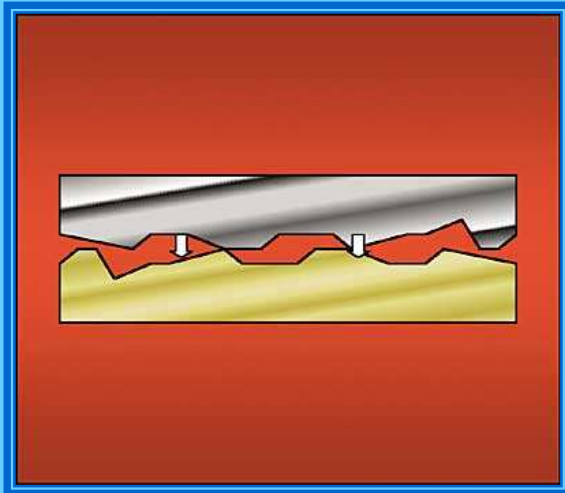
Materiały termoprzewodzące

Efektywna rezystancja przejścia

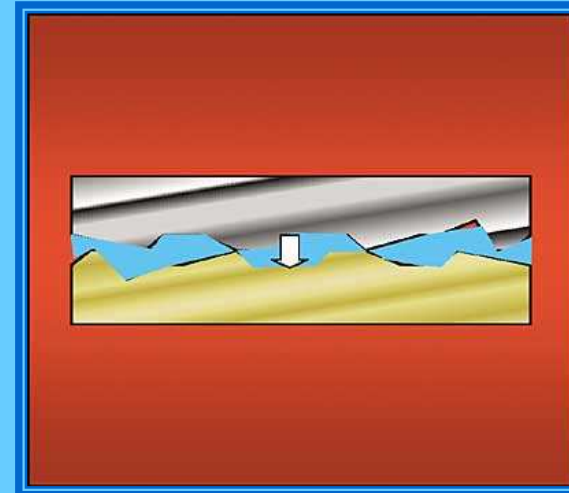
- Efektywna rezystancja termiczna materiałów termoprzewodzących (Thermal Interface Materials – TIMs) zależy od:
 1. przewodności cieplnej materiału termoprzewodzącego;
 2. rezystancji termicznej przejścia pomiędzy materiałem termoprzewodzącym a powierzchniami łączonymi;
 3. minimalnej grubości połączenia (bond line thickness - BLT)

Rezystancja przejścia

Materiały termoprzewodzące a rezystancja przejścia



D. Blazej, *Thermal Interface Materials*,
Electronics Cooling,
vol.9, nr 4, 2003



Połączenie obudowy TO-03 z radiatorem	R_{thCR} [K/W]
Połączenie bezpośrednie	0,2 ÷ 0,5
Przekładka z tlenku berylu	0,1 ÷ 0,25
Pasta silikonowa	0,015 ÷ 0,1

T. Pelc, J. Borczyński, *Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych*, WKŁ, Warszawa: 1986

Materiały termoprzewodzące

Przegląd materiałów

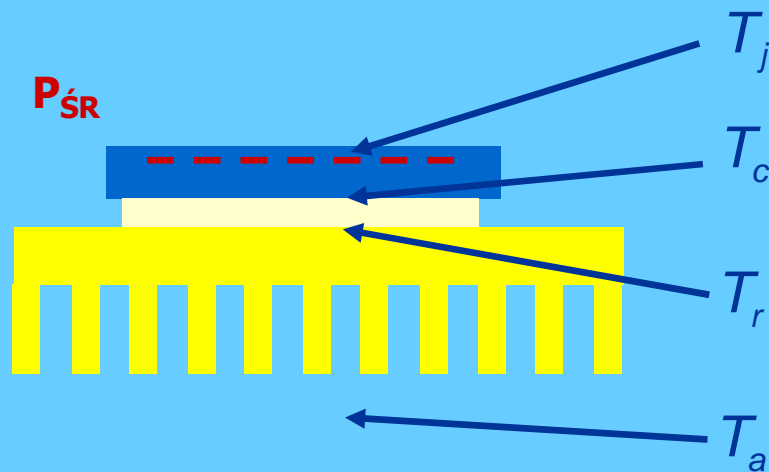
- **PASTY** – substancje o konsystencji żelu najczęściej na bazie silikonu z dodatkowymi cząsteczkami (AlN, ZnO) poprawiającymi przewodność cieplną; wprowadzone między dwie powierzchnie w celu wypełnienia mikroporów
- **MATERIAŁY Z PRZEMIANĄ FAZOWĄ** – materiały charakteryzujące się zmianą stanu skupienia na półpłynny w podwyższonej temperaturze; spełniają tą samą rolę co pasty;
- **MATERIAŁY ŁĄCZENIOWE** – materiały dobrze przewodzące ciepło wykorzystywane jako przekładki pośredniczące do połączeń pomiędzy obudową plastikową przyrządu a radiatorem lub pomiędzy elementami o tym samym potencjale;
- **MATERIAŁY WYPEŁNIAJĄCE** – materiały przeznaczone do wypełniania przestrzeni pomiędzy elementami elektronicznymi a elementami rozpraszającymi ciepło (np. elementami obudowy);

KONSTRUKCJA SPRZĘTU ELEKTRONICZNEGO

Praca z radiatorem

Dobór radiatora

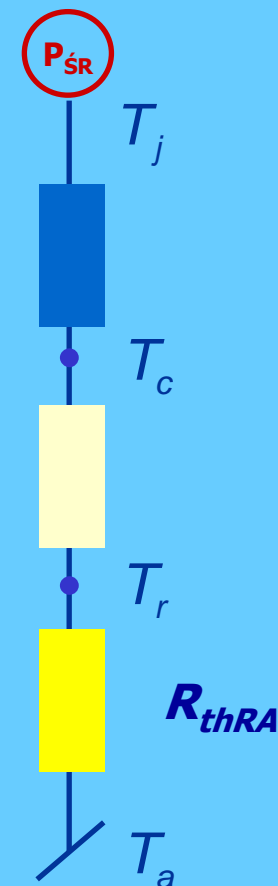
Rezystancja umowna a rezystancja rzeczywista



- Rezystancja R_{thRA} jest oparta na temperaturze w „gorącym” miejscu; jest to tzw. **rezystancja umowna**.
- Rzeczywistą rezystancję radiatora R'_{thRA} opisuje równanie:

$$R'_{thRA} = \frac{T_{SR} - T_a}{P_{SR}}$$

gdzie: T_{SR} – średnia temperatura powierzchni radiatora



Dobór radiatora

Rezystancja umowna a rezystancja rzeczywista

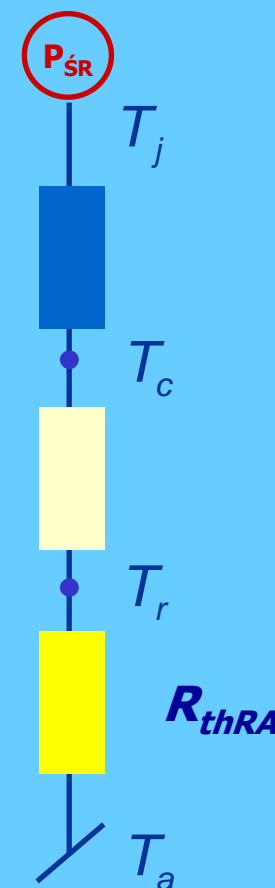
- Ponieważ $T_{\dot{S}R} < T_r$ więc $R'_{thRA} < R_{thRA}$
- Relację pomiędzy rezystancją rzeczywistą a umowną określa zależność:

$$R'_{thRA} = \eta \cdot R_{thRA}$$

gdzie: η - współczynnik korekcyjny uwzględniający nierównomierność rozkładu temperatury, kształt i materiał radiatora.

- Współczynnik korekcyjny można określić w oparciu o równanie Newtona:

$$q = \alpha(T_{\dot{S}R} - T_a)$$



Dobór radiatora

Rezystancja umowna a rezystancja rzeczywista

- Przyjmując powierzchnie radiatora S_r :

$$P_{\dot{S}R} = \alpha S_r (T_{\dot{S}R} - T_a)$$

$$P_{\dot{S}R} = \alpha S_r \eta (T_r - T_a)$$

- Po porównaniu:

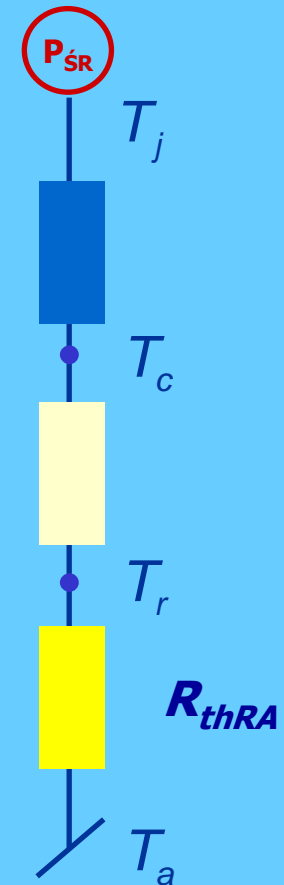
$$\eta = \frac{T_{\dot{S}R} - T_a}{T_r - T_a}$$

Ponieważ $T_{\dot{S}R} < T_r$ więc $\eta < 1$.

- Równania opisujące rezystancję rzeczywistą oraz rezystancję umowną radiatora powietrznego:

$$R'_{thRA} = \frac{T_{\dot{S}R} - T_a}{P_{\dot{S}R}} = \frac{1}{\alpha S_r \eta}$$

$$R_{thRA} = \frac{T_r - T_a}{P_{\dot{S}R}} = \frac{1}{\alpha S_r}$$



Dobór radiatora

Określanie długości radiatora

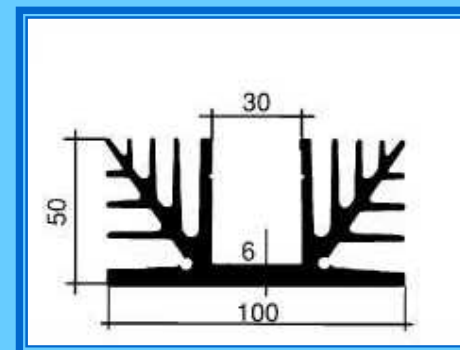
- Powierzchnia radiatora S_r :

$$S_r = \frac{1}{\alpha \eta R_{thRA}} = \frac{1}{\alpha R'_{thRA}}$$

- Długość radiatora L :

$$L = \frac{S_r - 2F}{Ob_p}$$

gdzie: F – powierzchnia przekroju poprzecznego tj. profilu radiatora
 Ob_p – obwód profilu omywany strumieniem czynnika roboczego.

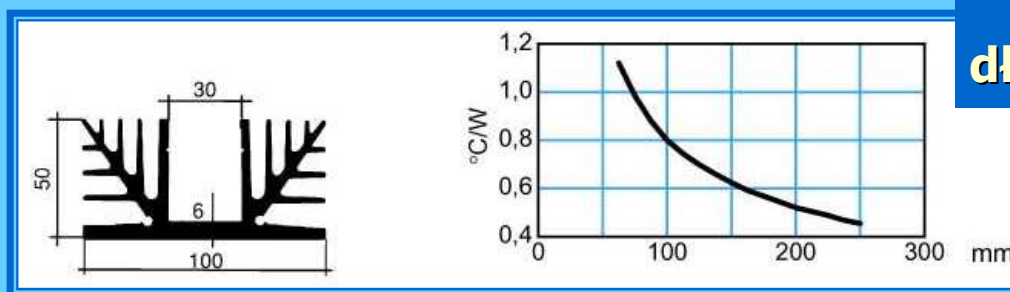


- Długość radiatora wyznaczona na podstawie danych katalogowych.

Dobór radiatora

Określanie długości radiatora

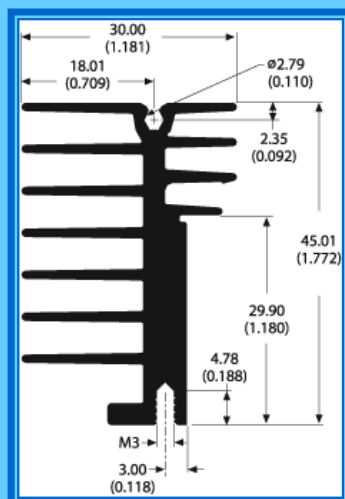
- Długość radiatora wyznaczona na podstawie danych katalogowych.
 - Firma L.D.S. System S.a.s.



radiator P77
długość do 250mm

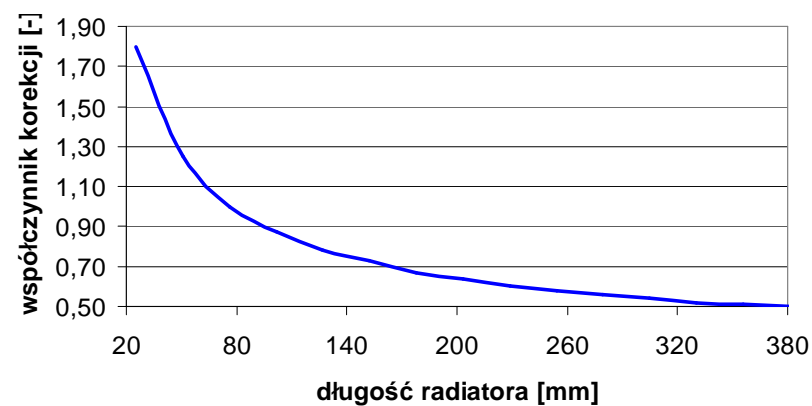
www.ldssystem.it

- Firma AAVID THERMALLOY



radiator 78060
 $R_{th} = 4,17K/W$
 $F = 108cm^2$

www.aavidthermalloy.com



Dobór radiatora

Przykład 1 – L.D.S. System S.a.s.

Dane wejściowe:

- W tranzystorze w obudowie TO-03 wydziela się 5W. Zakładając:
 - $T_a = 50^{\circ}\text{C}$
 - $T_j = 150^{\circ}\text{C}$
 - $R_{thJC} = 1\text{K/W}$
 - $R_{thCR} = 0,1\text{K/W}$
 - Konwekcja naturalna

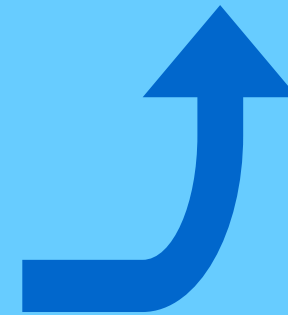


<http://www.ldssystem.it>

$$R_{thJA} = \frac{T_j - T_a}{P_{SR}} = \frac{150 - 50}{5} = 20 \text{ K/W}$$

$$R_{thRA} = R_{thJA} - R_{thJC} - R_{thCR}$$

$$R_{thRA} = 20 - 1 - 0,1 = 18,9 \text{ K/W}$$



Dobór radiatora

Przykład 2 – AVID THERMALLOY


Dane wejściowe:

- W elemencie elektronicznym w obudowie TO-220 wydziela się 5W. Zakładając:
 - $T_a = 50^{\circ}\text{C}$
 - $T_j = 150^{\circ}\text{C}$
 - $R_{thJC} = 3\text{K/W}$
 - $R_{thCR} = 0,3\text{K/W}$
 - Konwekcja naturalna

$$R_{thJA} = \frac{T_j - T_a}{P_{\dot{S}R}} = \frac{150 - 50}{5} = 20 \text{ K/W}$$

$$R_{thRA} = R_{thJA} - R_{thJC} - R_{thCR}$$

$$R_{thRA} = 20 - 3 - 0,3 = 16,7 \text{ K/W}$$



TO-220			
6094PBG	40.5	H	43
PF730G	35.8	V	65
PF732G	35.8	V	65
7178DG	35.7	V	35
6049PBG	34.1	V	43
576802V00000G	32.6	V	52
576802U00000G	32.6	V	52
576802V03100G	32.6	H	52
576802U03100G	32.6	H	52
576802V04000G	32.6	V	52
576802U04000G	32.6	V	52
577002B00000G	32.0	H-V	34
<hr/>			
530614B00000G	16.7	H-V	40
530613B00000G	16.7	H-V	40
6022PBG	16.7	V	47
6022BG	16.7	V	47
576602B00000G	16.6	V	33
576602D00000G	16.6	V	33
574902B00000G	16.0	H-V	45
574902B03300G	16.0	V	45

Dobór radiatora

Przykład 2 – AAVID THERMALLOY

574902 ($R_{th} = 16,0K/W$)
 wymiary: 35 x 22 x 9mm

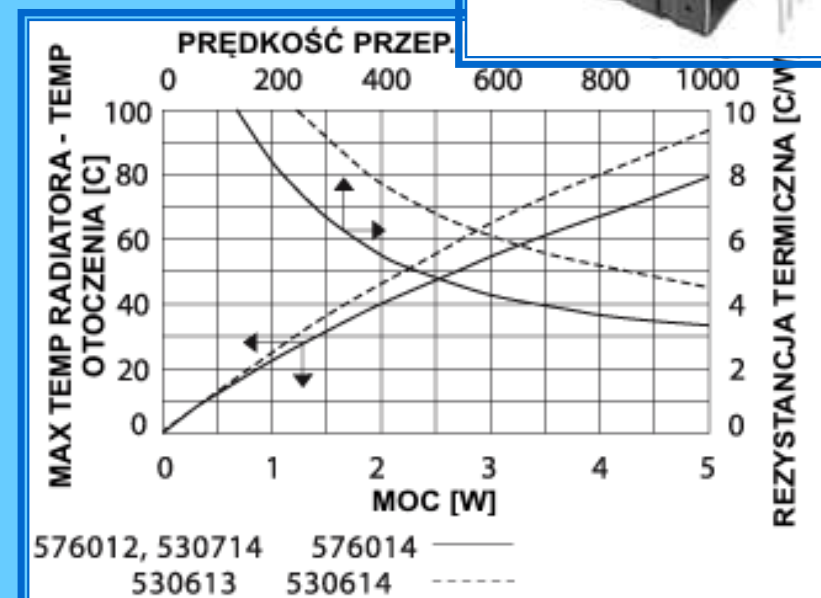
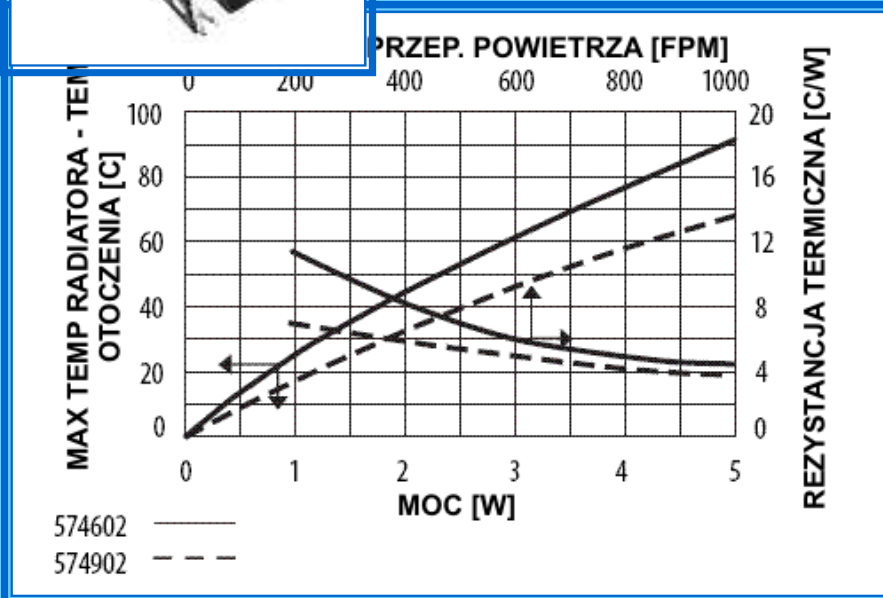


530613 ($R_{th} = 16,7K/W$)
 wymiary: 30 x 25 x 12mm



$$R_{thRA} = 16,7 K/W$$

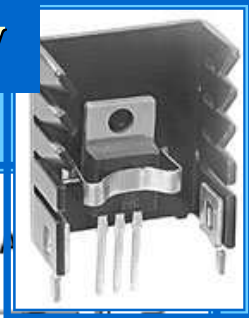
$$\Delta T_{RA} = 83,5^{\circ} C$$



Dobór radiatora

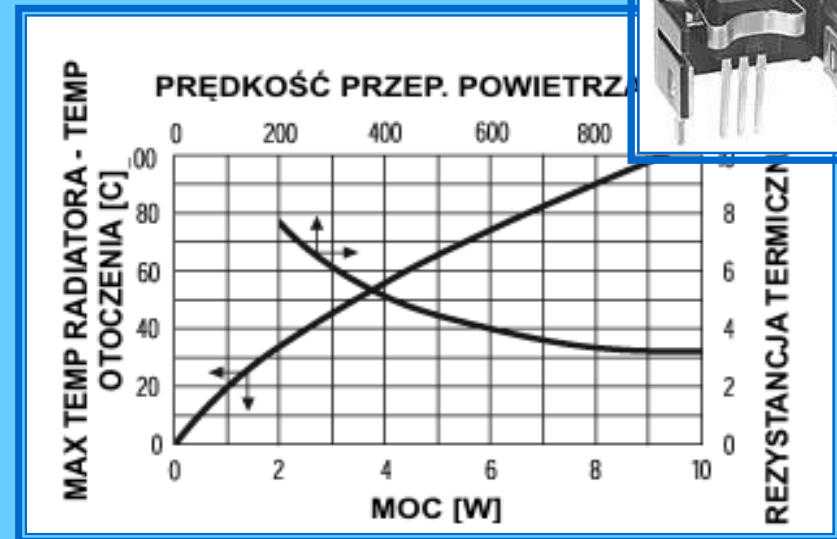
Przykład 3 – AAVID THERMALLOY

$R_{th} = 13,4K/W$



Dane wejściowe:

- W elemencie elektronicznym w obudowie TO-220 wydziela się 5W. Zakładając:
 - $T_a = 40^{\circ}C$
 - $T_j = 125^{\circ}C$
 - $R_{thJC} = 3K/W$
 - $R_{thCR} = 0,2K/W$
 - Konwekcja naturalna

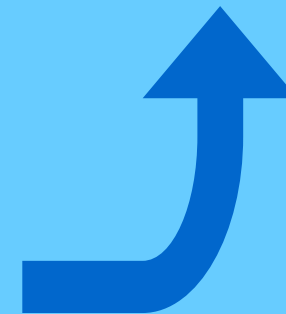


<http://www.aavid.com>

$$R_{thJA} = \frac{T_j - T_a}{P_{SR}} = \frac{125 - 40}{5} = 17 \text{ K/W}$$

$$R_{thRA} = R_{thJA} - R_{thJC} - R_{thCR}$$

$$R_{thRA} = 17 - 3 - 0,2 = 13,8 \text{ K/W}$$

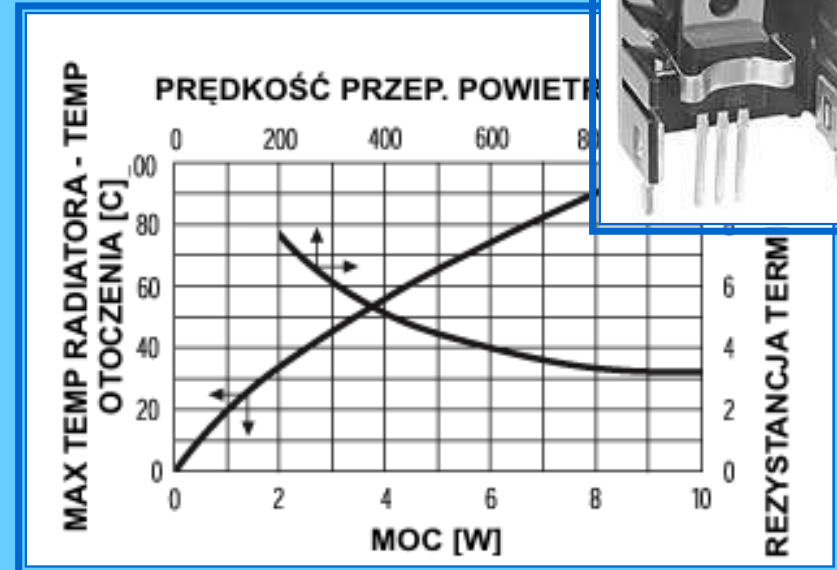


Dobór radiatora

Przykład 4 – AAVID THERMALLOY

Dane wejściowe:

- W elemencie elektronicznym w obudowie TO-220 wydziela się 10W. Zakładając:
 - $T_a = 40^{\circ}\text{C}$
 - $T_j = 125^{\circ}\text{C}$
 - $R_{thJC} = 3\text{K/W}$
 - $R_{thCR} = 0,2\text{K/W}$
 - Konwekcja wymuszona 2,3m/s

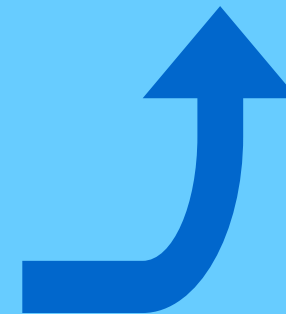


<http://www.aavid.com>

$$R_{thJA} = \frac{T_j - T_a}{P_{SR}} = \frac{125 - 40}{10} = 8,5 \text{ K/W}$$

$$R_{thRA} = R_{thJA} - R_{thJC} - R_{thCR}$$

$$R_{thRA} = 8,5 - 3 - 0,2 = 5,3 \text{ K/W}$$



Dobór radiatora

Przykład 5

Obliczyć:

długość radiatora dla diody o średnim prądzie przewodzenia 140A której napięcie progowe mieści się w granicach 0,8 – 0,9V, a R_d w granicach 0,8 – 1,2 m Ω .

Temperatura złącza $T_j \leq 150^\circ\text{C}$ a $R_{thJC} = 0,16\text{K/W}$ oraz $R_{thCR} = 0,1\text{K/W}$. Zestaw radiator dioda pracuje w układzie jednofazowym.

$$P = U_0 I_{SR} + R_d I_{SK}^2$$

$$I_{SK} = \frac{\pi}{2} I_{SR} \approx 220\text{A}$$

$$P_{\min} = 0,9 \cdot 140 + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2 = 126 + 39 = 165\text{W}$$

$$P_{\max} = 0,9 \cdot 140 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2 = 126 + 58 = 184\text{W}$$

Dobór radiatora

Przykład 5

Przyjmując $T_a = 40^{\circ}\text{C}$:

dla $P_{min} = 165\text{W}$

$$R_{thJA} = \frac{T_j - T_a}{P_{SR}} = \frac{150 - 40}{165} = 0,67 \text{ K/W}$$

$$R_{thRA} = R_{thJA} - R_{thJC} - R_{thCR}$$

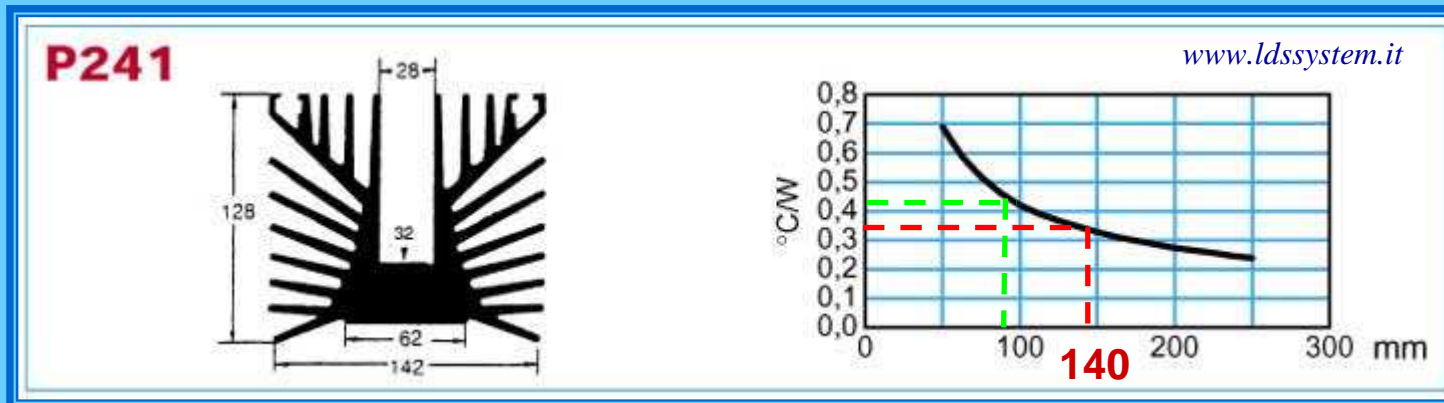
$$R_{thRA} = 0,67 - 0,16 - 0,1 = 0,41 \text{ K/W}$$

dla $P_{max} = 184\text{W}$

$$R_{thJA} = \frac{150 - 40}{184} = 0,60 \text{ K/W}$$

$$R_{thRA} = R_{thJA} - R_{thJC} - R_{thCR}$$

$$R_{thRA} = 0,60 - 0,16 - 0,1 = 0,34 \text{ K/W}$$



Dobór radiatora

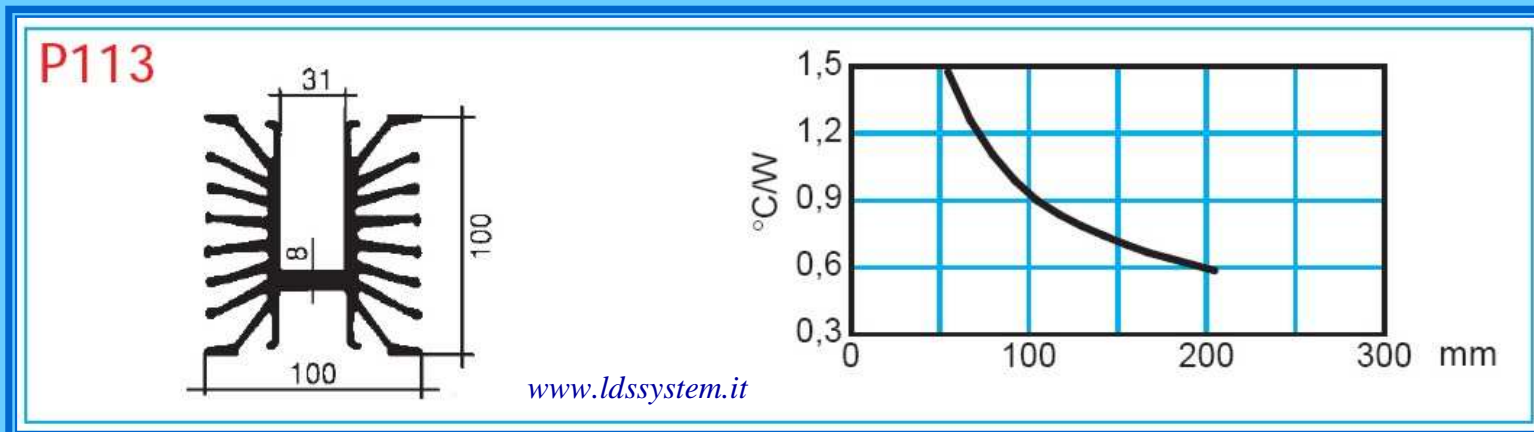
Przykład 6

Dioda ($T_{j\max} = 150^{\circ}\text{C}$) w której wydzielana jest moc 80W zamocowana jest na radiatorze P113 (L.D.S.System) o długości 100mm. Rezystancja termiczna złącze – radiator wynosi 0,5K/W a temperatura otoczenia 40°C . Sprawdź czy radiator został dobrany poprawnie.

Podejście 1: $R_{thJA} = R_{thJR} + R_{thRA} = 0,5 + 0,9 = 1,4 \text{ K/W}$

$$P = \frac{T_j - T_a}{R_{thJA}}$$

$$T_j = P \cdot R_{thJA} + T_a = 80 \cdot 1,4 + 40 = 152^{\circ}\text{C}$$



Dobór radiatora

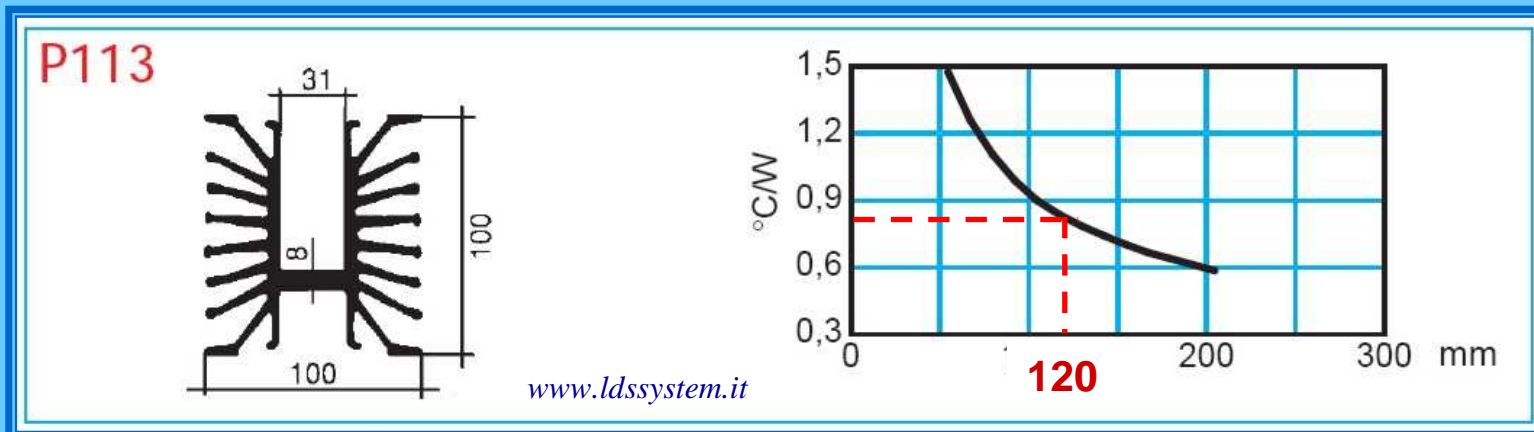
Przykład 6

Dioda ($T_{j\max} = 150^{\circ}\text{C}$) w której wydzielana jest moc 80W zamocowana jest na radiatorze P113 (L.D.S.System) o długości 100mm. Rezystancja termiczna złącze – radiator wynosi 0,5K/W a temperatura otoczenia 40°C . Sprawdź czy radiator został dobrany poprawnie.

Podejście 2:

$$P = \frac{T_j - T_a}{R_{thJA}} \quad R_{thJA} = R_{thJR} + R_{thRA}$$

$$R_{thRA} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{thJR} = \frac{150 - 40}{80} - 0,5 = 0,875 \text{ K/W}$$

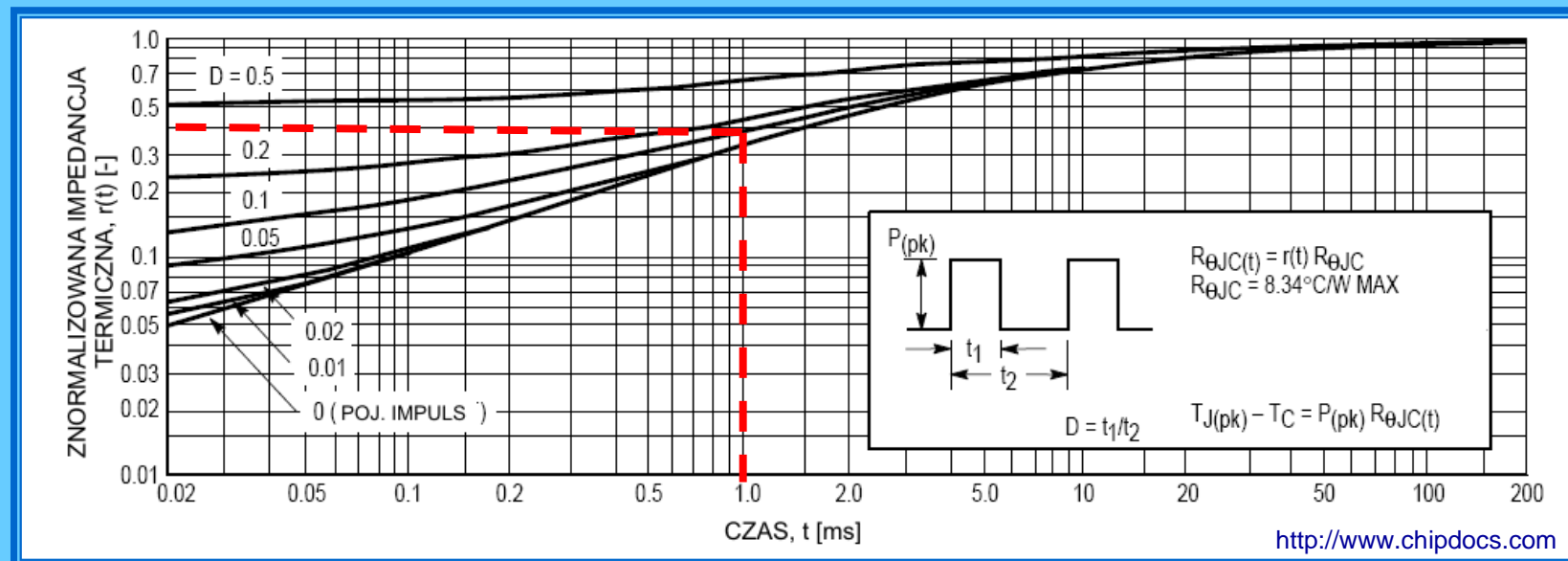


Dobór radiatora

Przykład 7

Tranzystor BD789 pracuje przy obciążeniu impulsowym ($t_1 = 1\text{ms}$; $t_2 = 10\text{ms}$; $P_{\text{ptot}} = 4\text{W}$ a $P_{\text{przel}} = 8\text{W}$). Rezystancje termiczne wynoszą odpowiednio: $R_{\text{thJC}} = 7,5\text{K/W}$, $R_{\text{thCR}} = 0,5\text{K/W}$, $R_{\text{thRA}} = 1\text{K/W}$ a temperatury $T_{\text{jmax}} = 175^\circ\text{C}$ a $T_a = 45^\circ\text{C}$. Czy spełnione są bezpieczne warunki pracy?

$$D = \frac{t_1}{t_2} = 0,1 \quad Z_{\text{thJC}} = 0,4 \cdot 8,34 = 3,34\text{K/W}$$



Dobór radiatora

Przykład 7

Tranzystor BD789 pracuje przy obciążeniu impulsowym ($t_1 = 1\text{ms}$; $t_2 = 10\text{ms}$; $P_{\text{ptot}} = 4\text{W}$ a $P_{\text{przeł}} = 8\text{W}$). Rezystancje termiczne wynoszą odpowiednio: $R_{\text{thJC}} = 8,34\text{K/W}$, $R_{\text{thCR}} = 0,5\text{K/W}$, $R_{\text{thRA}} = 1\text{K/W}$ a temperatury $T_{\text{jmax}} = 175^\circ\text{C}$ a $T_a = 45^\circ\text{C}$. Czy spełnione są bezpieczne warunki pracy?

$$D = \frac{t_1}{t_2} = 0,1 \quad Z_{\text{thJC}} = 0,4 \cdot 8,34 = 3,34\text{K/W}$$

$$T_j - T_a = P_{\text{przeł}} (Z_{\text{thJC}} + D \cdot R_{\text{thRA}}) + P_{\text{ptot}} \cdot R_{\text{thJA}}$$

$$R_{\text{thJA}} = R_{\text{thJC}} + R_{\text{thCR}} + R_{\text{thRA}} = 8,34 + 0,5 + 1 = 9,84\text{K/W}$$

$$T_j - 45 = 8(3,34 + 0,1 \cdot 1) + 4 \cdot 9,84 = 66,88^\circ\text{C}$$

$$T_j = 111,88^\circ\text{C} < 175^\circ\text{C}$$