

## 0.1. Teoria

### 0.1.1. Prąd progowy

Wśród laserów półprzewodnikowych możemy wyróżnić lasery krawędziowe oraz lasery o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową tzw. Lasery VCSEL (ang. Vertical Cavity Surface Emitting Laser) będące obiektem moich badań. Aby scharakteryzować lasery, można wykonać ich charakterystyki, które przedstawiają, jak zmienia się moc wyjściowa oraz napięcie lasera w funkcji zadanego prądu.

Ważnym parametrem laserów półprzewodnikowych jest prąd progowy (z ang. threshold current) który określa wartość prądu, przy którym zaczyna zachodzić akcja laserowa, czyli rośnie gwałtownie natężenie promieniowania i maleje szerokość linii emisyjnej. W celu wyznaczenia prądu progowego należy sporządzić wykres zależności mocy wyjściowej lasera od prądu zasilającego. Następnie dla prądu gdzie zaczyna się akcja laserowa dla odcinka liniowego należy metodą najmniejszych kwadratów przy użyciu wielomianu pierwszego stopnia znaleźć parametry krzywej. Dla wyznaczonej krzywej należy znaleźć miejsce zerowe, które będzie wyznaczonym prądem progowym.

$$P = a \cdot I + b \quad (1)$$

$$I_{th} = -\frac{b}{a} \quad (2)$$

$$\Delta I_{th} = \left| \frac{\partial I_{th}}{\partial a} \right| \cdot \Delta a + \left| \frac{\partial I_{th}}{\partial b} \right| \cdot \Delta b \quad (3)$$

$$\Delta I_{th} = \left| -\frac{b}{a^2} \right| \cdot \Delta a + \left| -\frac{1}{a} \right| \cdot \Delta b \quad (4)$$

Dla laserów krawędziowych prąd progowy rośnie wraz z temperaturą, co może być scharakteryzowany za pomocą parametru  $T_0$  wyrażonego w kelwinach. Dla laserów krawędziowych zależności prądu progowego  $I_{th}$  od temperatury  $T$  wyrażamy w postaci równania:

$$I_{th} = I_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (5)$$

Wartości parametrów  $I_0$  oraz  $T_0$  możemy wyznaczyć na podstawie charakterystyk emisyjnych lasera w różnych temperaturach  $T$ .

Przez zlogarytmowanie wartości prądu oraz podstawienie otrzymujemy:

$$\ln(I_{th}) = \frac{T}{T_0} + \ln(I_0) \quad (6)$$

Mając wartości prądu progowego w danej temperaturze można do nich dopasować funkcje liniową w postaci:

$$y = a \cdot T + b \quad (7)$$

Gdzie:

$$y = \ln(I_{th}) \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{T_0} \quad (9)$$

$$b = \ln(I_0) \quad (10)$$

Na tej podstawie możemy znaleźć poszukiwane parametry  $I_0$  oraz  $T_0$ :

$$I_0 = e^b \quad (11)$$

$$T_0 = \frac{1}{a} \quad (12)$$

Korzystając z różniczki zupełnej można obliczyć wartości błędów wyznaczonych wartości:

$$\Delta I_0 = \left| \frac{\partial I_0}{\partial b} \right| \cdot \Delta b = |e^b| \cdot \Delta b \quad (13)$$

$$\Delta T_0 = \left| \frac{\partial T_0}{\partial a} \right| \cdot \Delta a = \left| -\frac{1}{a^2} \right| \cdot \Delta a \quad (14)$$

Dla laserów VCSEL nie można zastawać powyższej zależności, ponieważ zależności prądu progowego od temperatury charakteryzuje się pewnym minimalnym prądem progowym, gdzie w niższych i wyższych temperaturach wartość prądu progowego jest większa.

#### 0.1.2. Sprawność

Innym ważnym parametrem, którym możemy scharakteryzować lasery półprzewodnikowe jest ich sprawność. Można wyróżnić następujące sprawności:

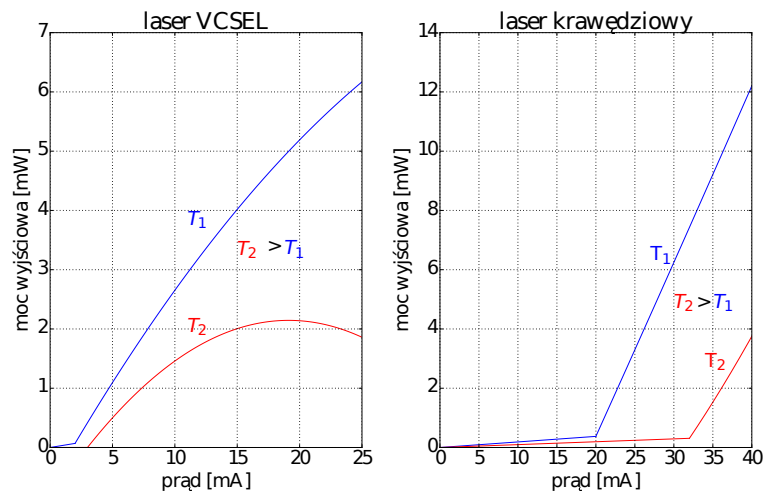
- Sprawność różniczkowa (ang. slope efficiency) — jest zdefiniowana jako nachylenie krzywej uzyskanej przez wykreślenie zależności mocy wyjściowej z lasera versus energii dostarczonej do lasera (natężenie prądu lub moc dostarczona).
- Sprawność całkowita (ang. Wall-plug-efficiency) — jest zdefiniowana jako stosunek mocy wyjściowej do całkowitej mocy wejściowej lasera.

#### 0.1.3. Wpływ temperatury chłodnicy lasera na jego parametry

Wraz ze wzrostem temperatury wartość prądu progowego  $I_{th}$  rośnie, natomiast sprawność różniczkowa  $\eta$  maleje. Jest to spowodowane przez:

- W wyższych temperaturach funkcja Fermiego-Diraca, która opisuje prawdopodobieństwo zajmowania stanów energetycznych staje się bardziej "rozmarzana". Przez co obrządzenie poziomów energetycznych jest bliższe powłoce przewodzenia dla elektronów oraz bliższe powłoce walencyjnej dla dziur. Dzięki temu możliwość wzmocnienia promieniowania lasera na długości fali emitowanej jest zredukowane.
- Dodatkowo w podwójnym aktywnym regionie heterostruktury, rozkład energii elektronów i dziur w wyższych temperaturach jest przesunięty dalej od krawędzi pasma, przez co zwiększa się prawdopodobieństwo pobytu ładunków w aktywnym regionie, co powoduje obniżenie sprawności  $\eta$
- Wraz ze wzrostem temperatury rośnie współczynnik Auger, obniżając wydajność i czas życia ładunku podczas przejścia promienistego, co zwiększa wartość prądu progowego  $I_{th}$ .

Sprawność różniczkowa zarówno dla laserów VCSEL i krawędziowych zwiększa się wraz z spadkiem temperatury chłodnicy lasera. Jest to spowodowane wyostrzaniem (ang. sharpening) się widma wzmocnienia na skutek zwięzania się funkcji rozkładu Fermiego.



Rysunek 1. Teoria.

#### 0.1.4. Funkcja Fermiego

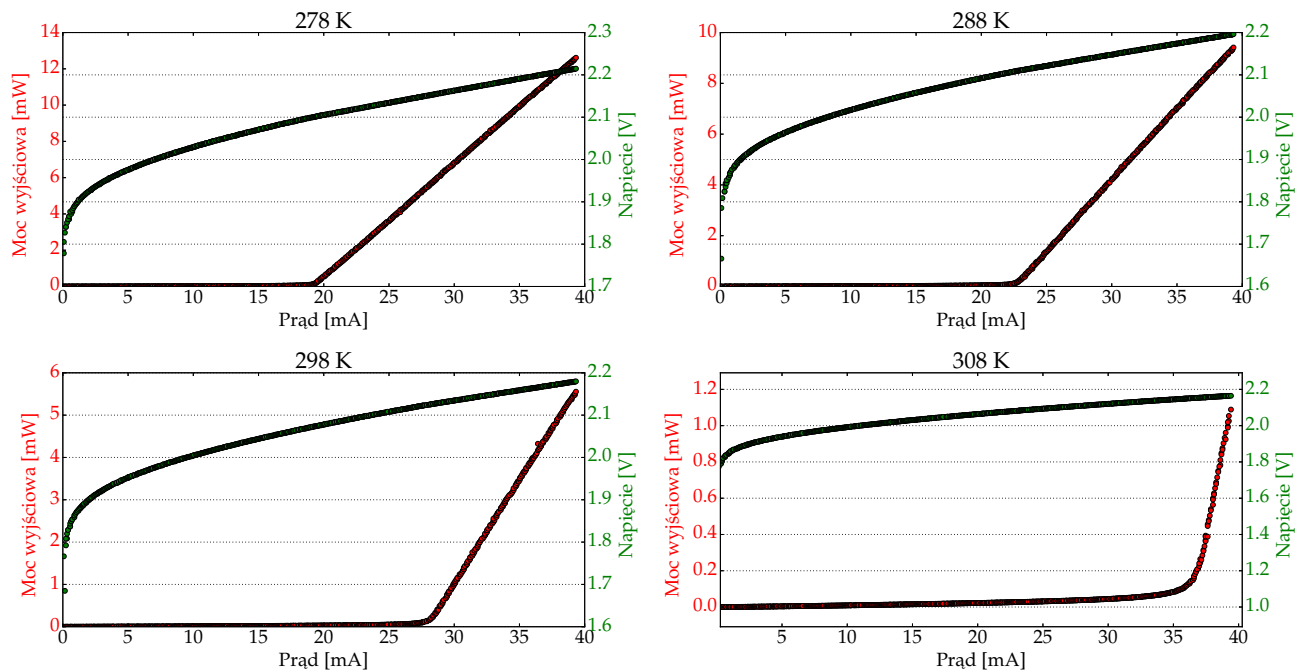
Na wygląd charakterystyk laserów półprzewodnikowych duży wpływ ma funkcja rozkładu Fermiego-Diraca, który opisuje własności półprzewodników jest ona zależna od temperatury.

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (15)$$

Poziom fermiego reprezentuje średnią pracę którą należy wykonać aby usunąć elektron z materiału.

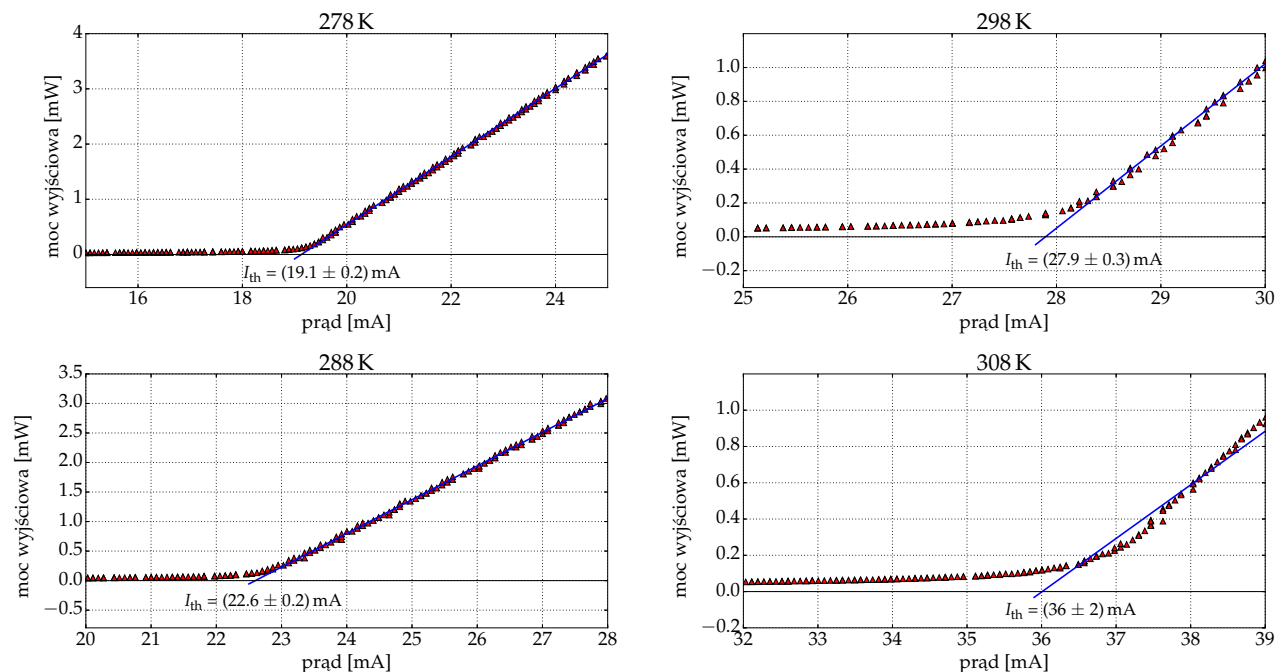
Tabela 1. Wyznaczone wartości prądu progowego  $I_{th}$  w różnych temperaturach  $T$  dla lasera krawędziowego 635 nm.

$T$ [K]	278	283	288	293	298	303	308
$I_{th}$ [mA]	$19.1 \pm 0.2$	$20.7 \pm 0.2$	$22.6 \pm 0.2$	$25.0 \pm 0.2$	$27.9 \pm 0.3$	$31.4 \pm 0.5$	$36 \pm 2$

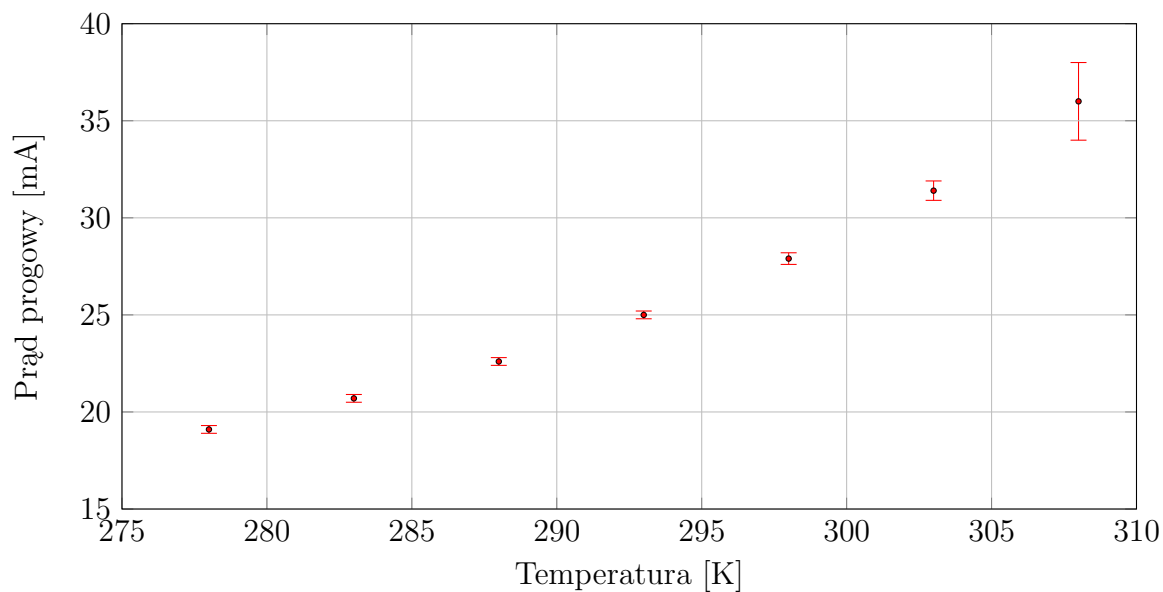


Rysunek 2. Wykres napięcia i mocy od prądu dla lasera krawędziowego 635 nm.

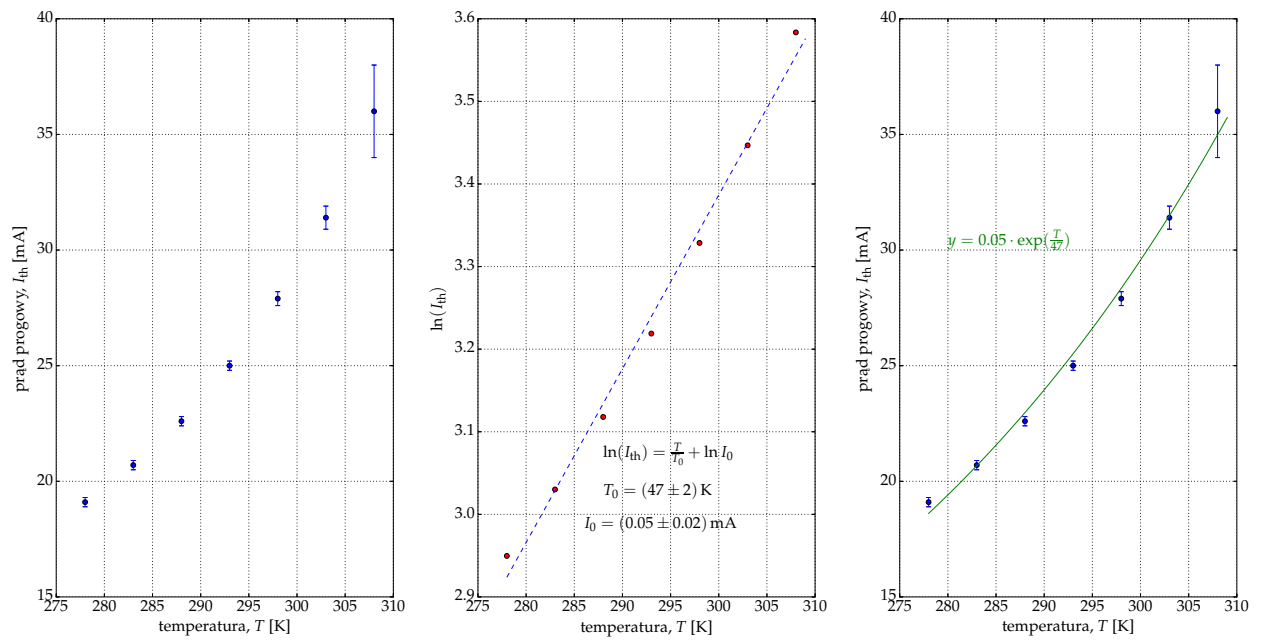
## 0.2. Laser 635 nm



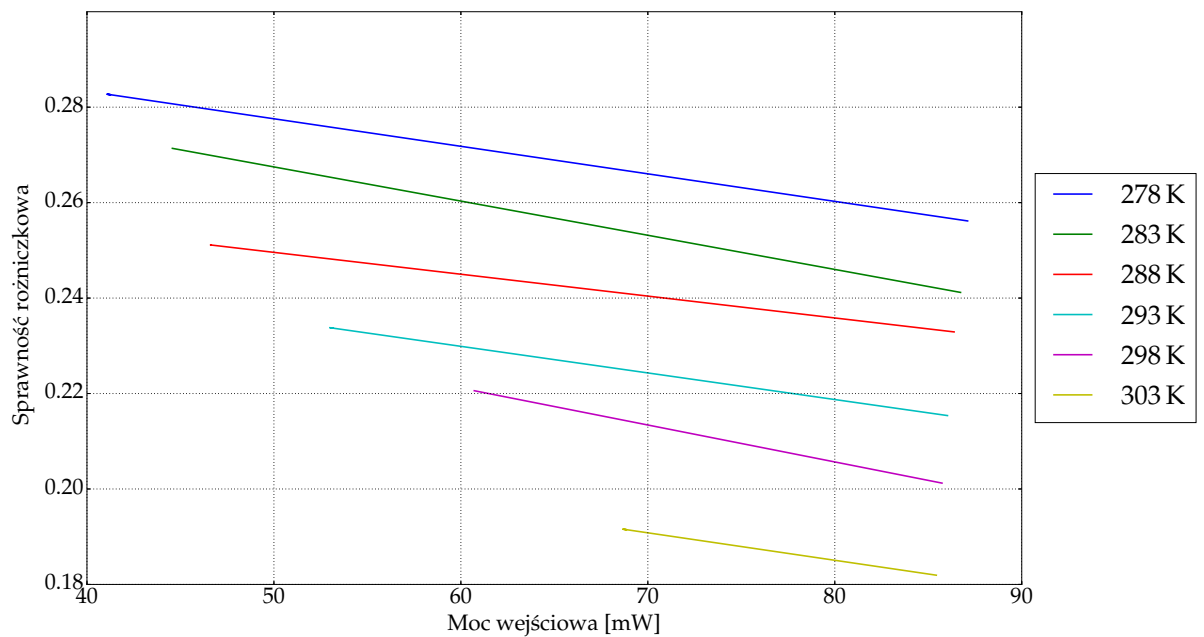
Rysunek 3. Wykres prądu progowego dla lasera krawędziowego 635 nm.



Rysunek 4. Wykres prądu progowego od temperatury dla lasera krawędziowego 635 nm.



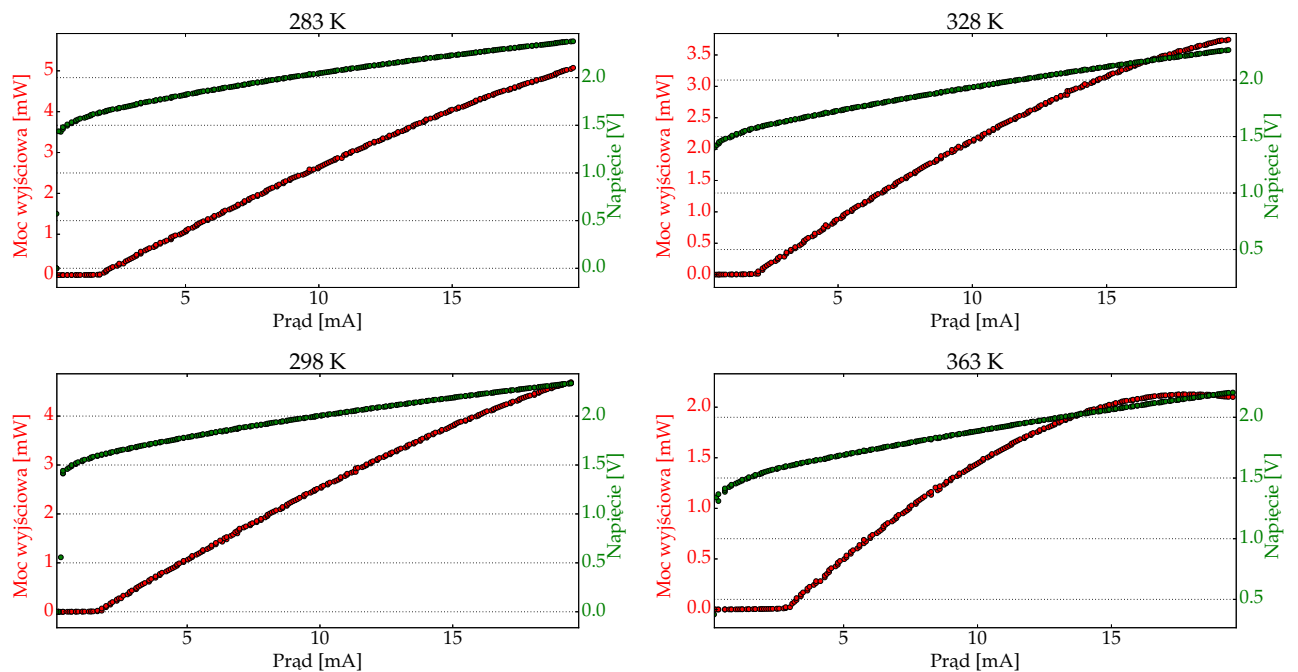
Rysunek 5. Wykres prądu progowego z dopasowanymi wartościami  $I_0$  i  $T_0$  dla lasera krawędziowego 635 nm.



Rysunek 6. Wykres sprawności w funkcji mocy wejściowej dla lasera krawędziowego 635 nm.

Tabela 2. Wyznaczone wartości prądu progowego  $I_{th}$  w różnych temperaturach  $T$  dla lasera VCSEL 850 nm.

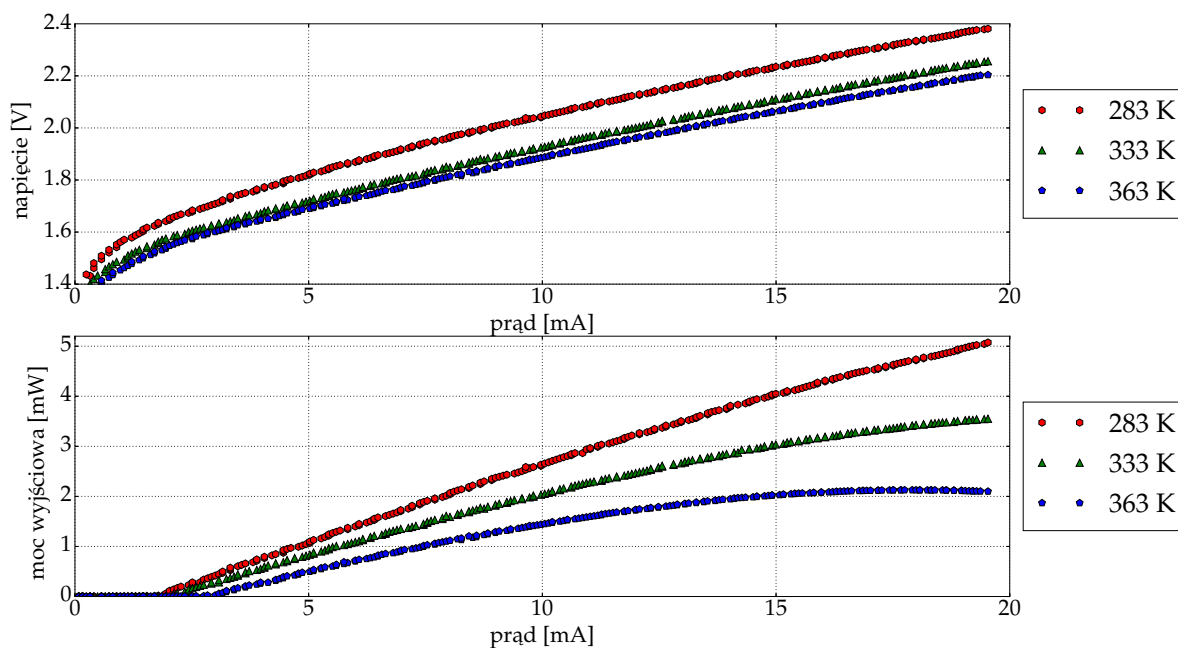
$T$ [K]	$I_{th}$ [mA]	$T$ [K]	$I_{th}$ [mA]	$T$ [K]	$I_{th}$ [mA]
283	$1.70 \pm 0.03$	288	$1.67 \pm 0.03$	293	$1.60 \pm 0.03$
298	$1.55 \pm 0.04$	303	$1.59 \pm 0.03$	308	$1.63 \pm 0.03$
313	$1.65 \pm 0.03$	318	$1.68 \pm 0.04$	323	$1.73 \pm 0.04$
328	$1.83 \pm 0.04$	333	$1.89 \pm 0.04$	338	$2.01 \pm 0.04$
343	$2.14 \pm 0.04$	348	$2.24 \pm 0.05$	353	$2.38 \pm 0.05$
358	$2.57 \pm 0.05$	363	$2.74 \pm 0.07$		



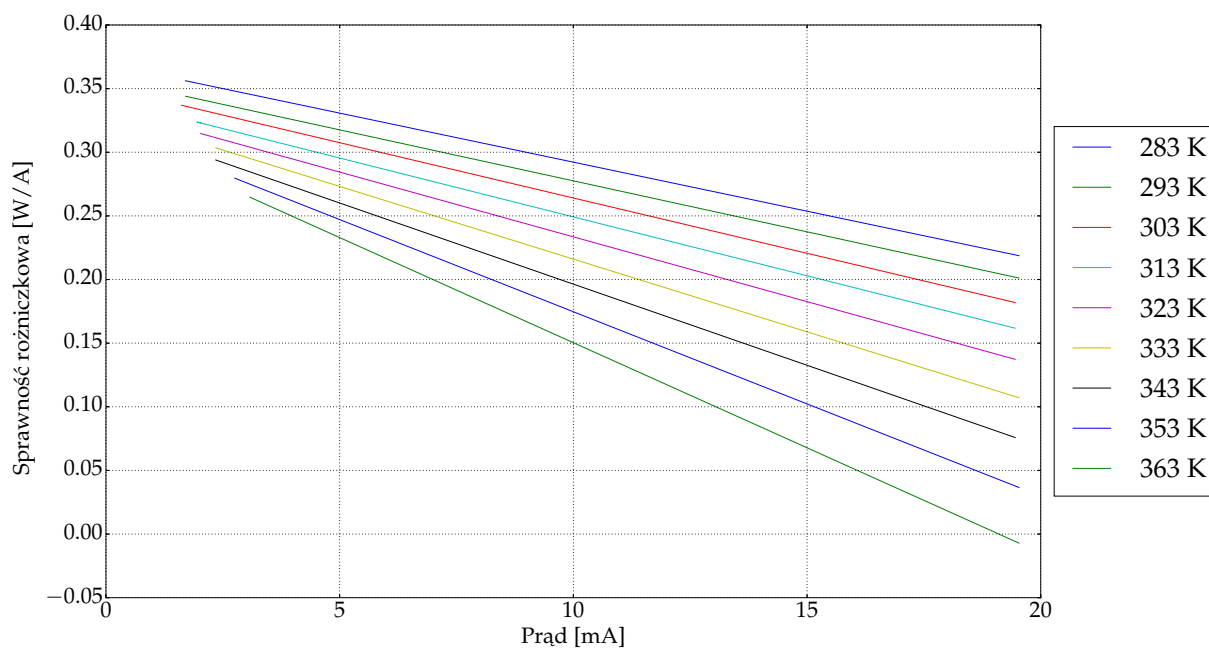
Rysunek 7. Sprawność VCSEL 850.

### 0.3. Laser VCSEL 850 nm

Rysunki 7 – 13 przedstawiają wykresy dla lasera VCSEL 850 nm.

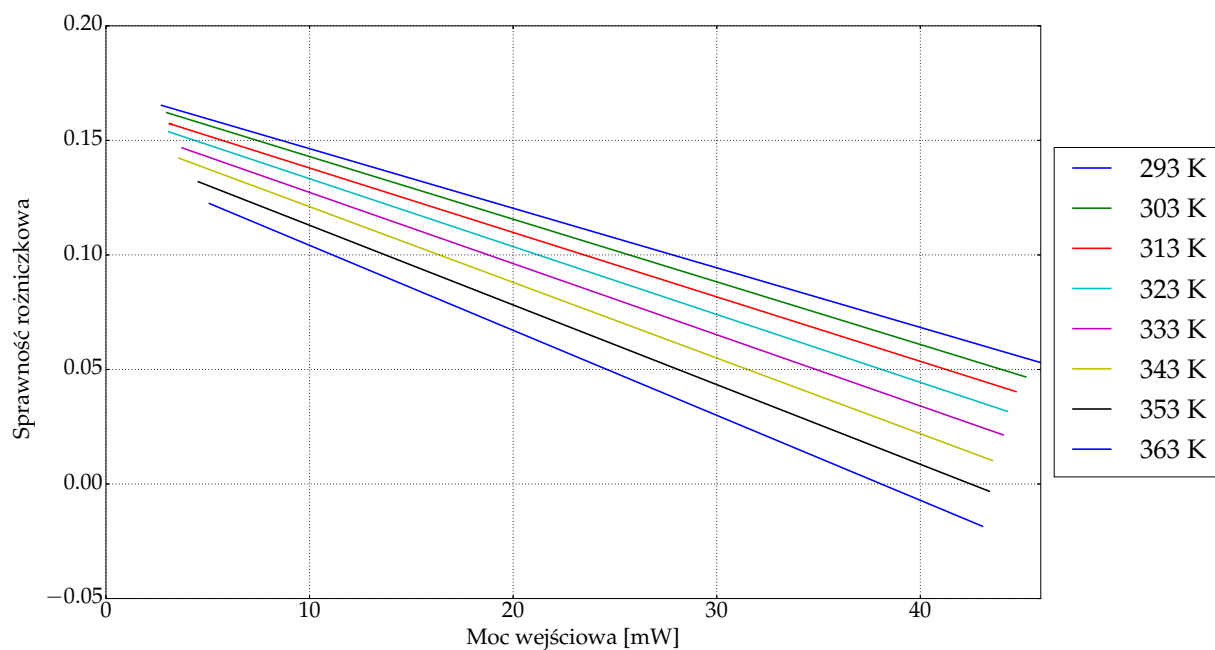


Rysunek 8. Wykres napięcia na laserze i mocy wyjściowej w funkcji prądu od temperatury chłodnicy dla lasera VCSEL 850 nm.

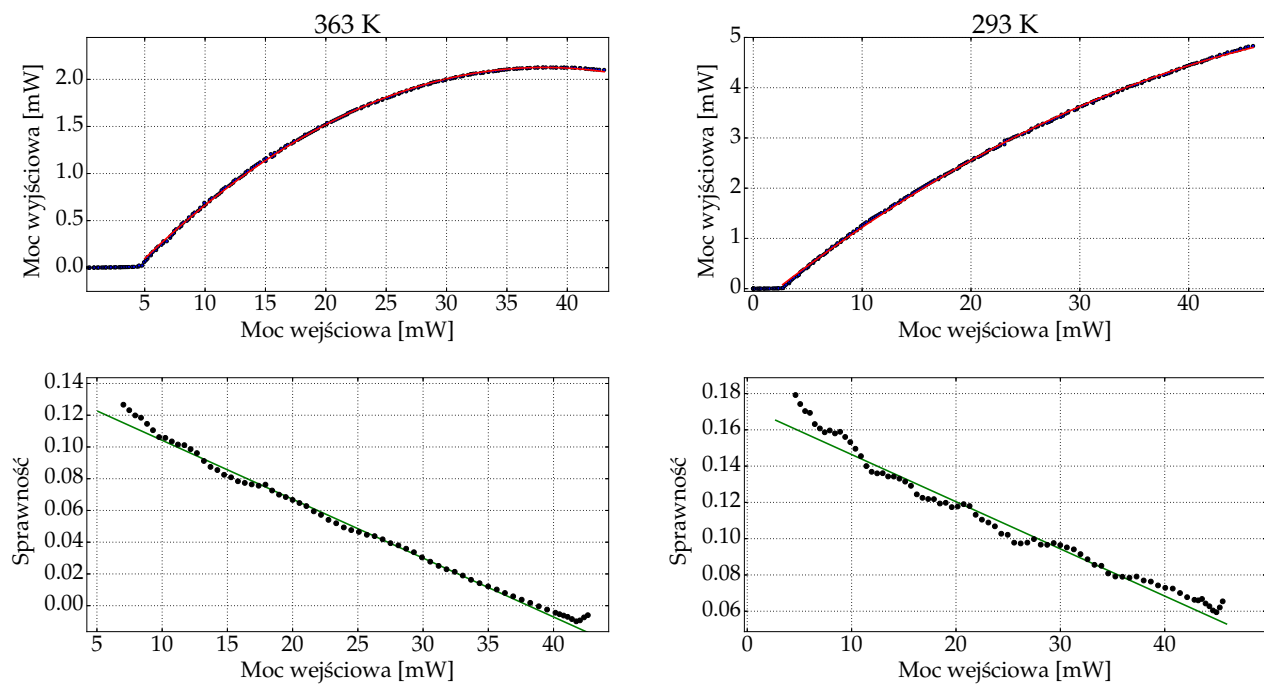


Rysunek 9. Sprawność VCSEL 850 w funkcji prądu.

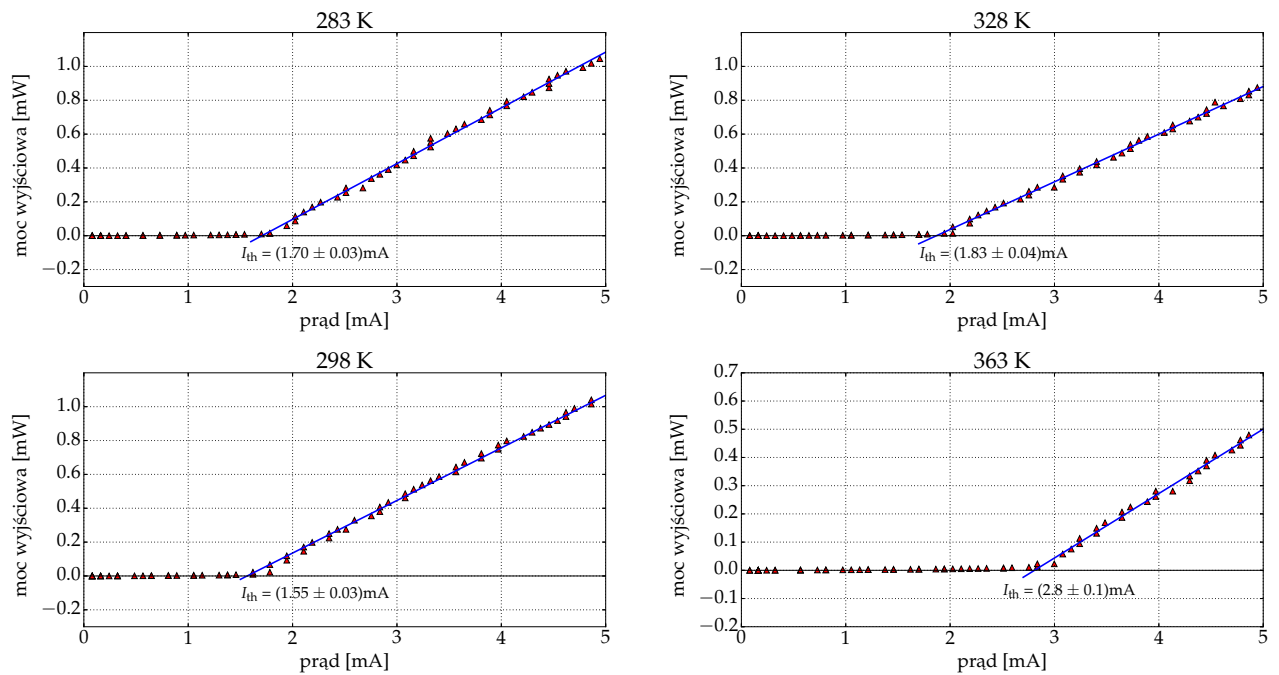




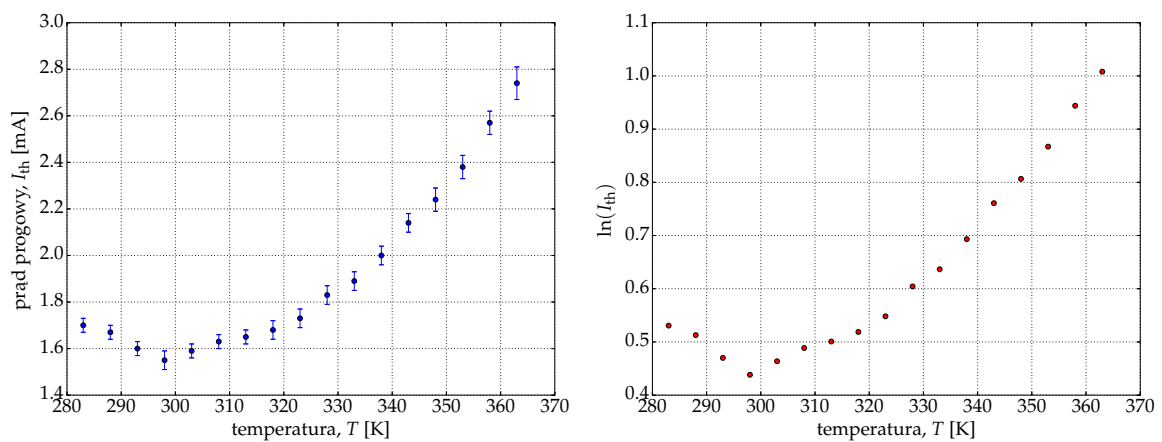
Rysunek 10. Sprawność VCSEL 850 w funkcji mocy wejściowej.



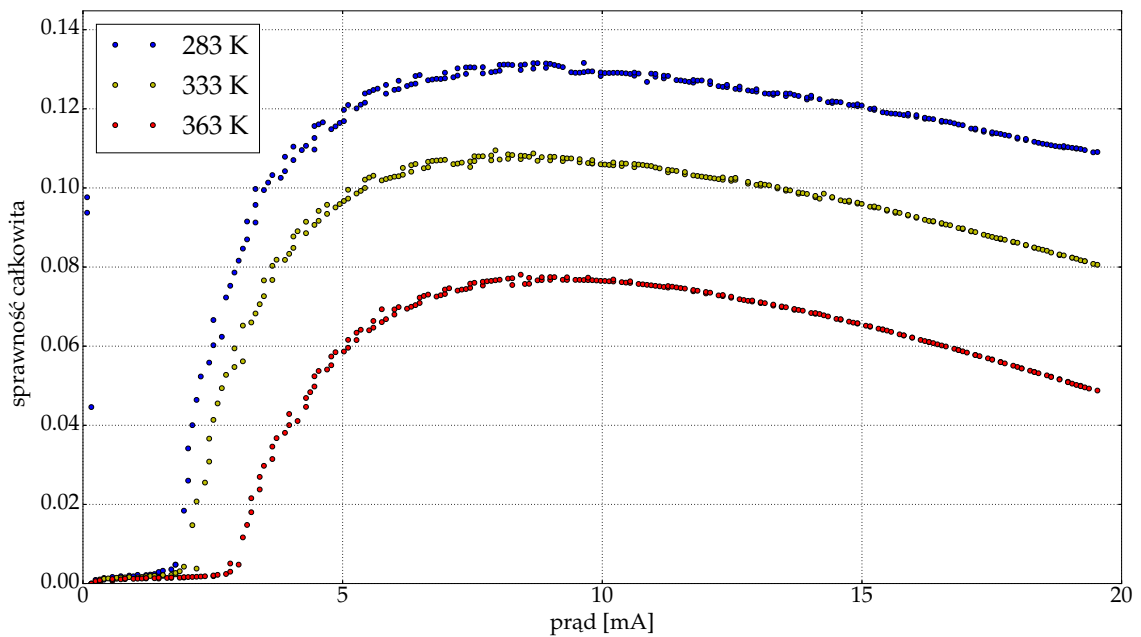
Rysunek 11. Sprawność VCSEL 850 dla temperatury 293 K i 363 K.



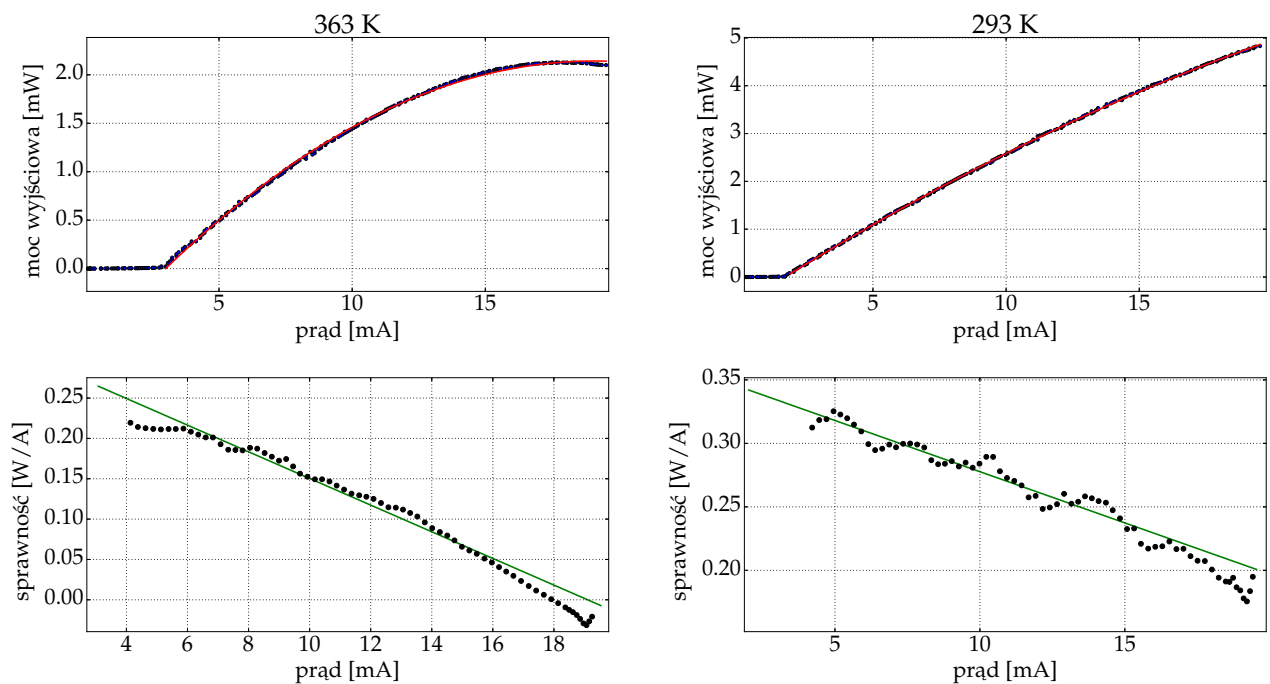
Rysunek 12. Wykres prądu progowego od temperatury z wyznaczonymi progami prądu dla lasera VCSEL 850 nm.



Rysunek 13. Wykres prądu progowego od temperatury dla lasera VCSEL 850 nm.



Rysunek 14. Sprawność całkowita dla lasera VCSEL 850 nm w różnych temperaturach.



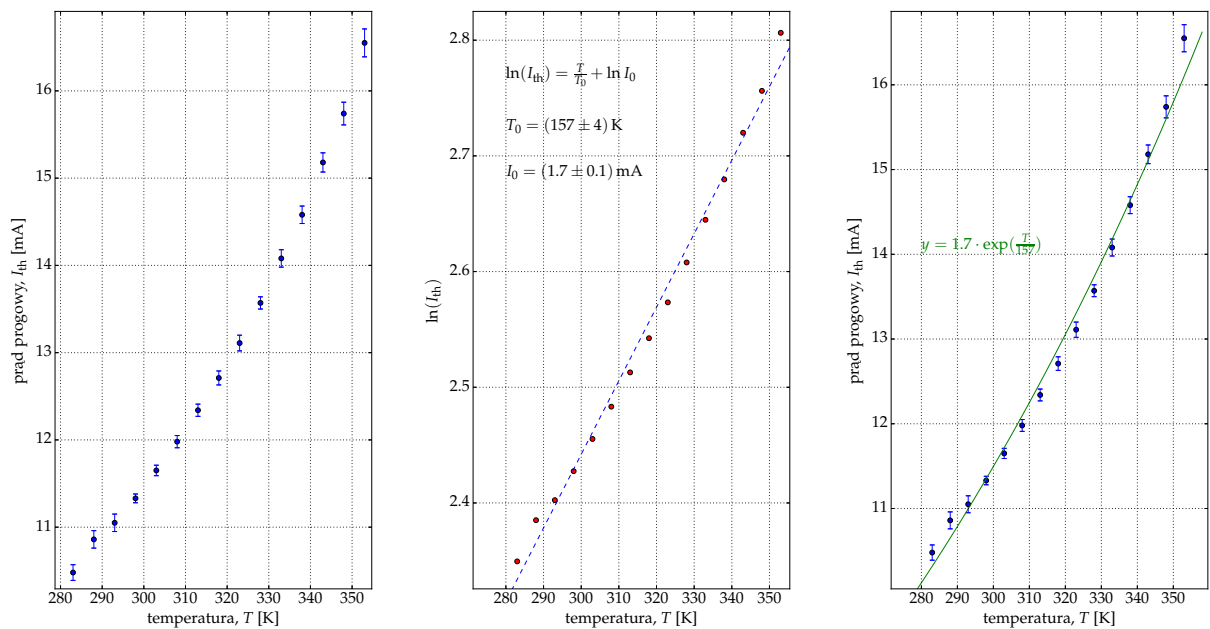
Rysunek 15. Sprawność różniczkowa dla lasera VCSEL 850 nm w różnych temperaturach.

## 0.4. Omówienie wyników

Dzięki analizie sporządzonych wykresów można dojść do następujących konkluzji:

- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku 7 oraz 8 można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury na chłodnicy maleje opór lasera. Także, wraz z wyższą temperaturą chłodnicy maleje moc wyjściowa lasera.
- Wykres na rysunku 9 przedstawia sprawność różniczkowa lasera w funkcji prądu wejściowego od temperatury na chłodnicy, jak wynika z wykresu im wyższa temperatura tym sprawność lasera mniejsza.
- Wykres na rysunku 10 przedstawia sprawność różniczkowa lasera w funkcji mocy wejściowej od temperatury na chłodnicy, jak wynika z wykresu im wyższa temperatura tym sprawność lasera mniejsza.
- Wykres na rysunku 11 przedstawia w górnej części zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej.
- Wykres na rysunku 13 pokazuje zależności prądu progowego od temperatury. Jak widzimy przy temperaturach (280-300) K wraz ze wzrostem temperatury maleje wartość prądu progowego, natomiast dla temperatur  $> 300$  K im wyższa temperatura to zwiększa się wartość prądu progowego.
- Wykres na rysunku 14 przedstawia sprawność całkowitą lasera dla trzech temperatur: 283 K, 333 K, 363 K. Analizując ten wykres dochodzę do wniosku, że im wyższa temperatura tym sprawność mniejsza.
- Wykres na rysunku 15 przedstawia sprawności różniczkowe dla dwóch temperatur. W górnej części przedstawiona jest charakterystyka wyjściowa z dopasowaną funkcją w postaci wielomianu stopnia drugiego. Pochodna tej funkcji jest sprawnością różniczkową. Na dolnym wykresie przedstawiona jest sprawność w postaci prostej będącej pochodną dopasowanej funkcji. Natomiast czarne kropki przedstawiają sprawność powstałą w wyniku obliczenia pochylenia 10 punktów przefiltrowanych co 3 punkty.

## 0.5. Laser krawędziowy 850 nm



Rysunek 16. Wykres napięcia i mocy od prądu dla lasera krawędziowego 850 nm.