



POLITECHNIKA ŁÓDZKA

WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ,
INFORMATYKI I MATEMATYKI STOSOWANEJ

PRACA INŻYNIERSKA
kierunek: FIZYKA TECHNICZNA

Wykorzystanie oprogramowania Open Source do sterowania
pomiarami elektryczno-optycznych charakterystyk laserów
półprzewodnikowych.

Paweł Gliwny
nr albumu: 191387

Opiekun pracy:
dr inż. Michał Wasiak

Łódź, 2017

Spis treści

1. Wstęp	2
2. Komunikacja z urządzeniami pomiarowymi przy wykorzystaniu oprogramowania Open Source	3
2.1. Oprogramowanie Open Source	3
2.2. Python	3
2.3. Programowane urządzenia pomiarowe	4
2.4. Komunikacja	4
2.5. SCPI — standard komend do komunikacji z urządzeniami	4
3. Program do sterowania pomiarami charakterystyk laserów półprzewodnikowych z wykorzystaniem sprzętu Thorlabs	6
3.1. Wstęp	6
3.2. Krótki opis najważniejszych klas	6
3.3. Wersja skryptowa programu	9
3.4. Wersja okienkowa programu do pomiarów	9
4. Lasery półprzewodnikowe	12
4.1. Teoria	12
4.1.1. Teoria pasmowa	12
4.1.2. Lasery półprzewodnikowe	12
4.1.3. Laser VCSEL	13
4.1.4. Laser o emisji krawędziowej	14
4.1.5. Prąd progowy	15
4.1.6. Sprawność	16
5. Opis eksperymentu	17
5.1. Układ pomiarowy	17
5.1.1. Przebieg pomiarów	17
5.2. Eksperyment	18
5.2.1. Laser krawędziowy 635 nm (L635P003) — omówienie wyników . . .	18
5.2.2. Laser krawędziowy 850 nm (L850P010)— omówienie wyników . . .	22
5.2.3. Laser VCSEL 850 nm — omówienie wyników	26
5.2.4. Laser VCSEL 980 nm — omówienie wyników	30
5.3. Porównanie laserów	34
6. Podsumowanie	38
6.1. Rezultat pracy	38
6.2. Co dalej?	38
Bibliografia	39

1. Wstęp

Niniejsza praca dotyczy stworzenia układu pomiarowego do badania charakterystyk laserów półprzewodnikowych w laboratorium fotoniki Politechniki Łódzkiej. Celami pracy jest:

- Stworzenie interfejsu pomiarowego w laboratorium fononiki do badania charakterystyk laserów półprzewodnikowych przy wykorzystaniu oprogramowania Open Source.
- Zbadanie charakterystyk czterech laserów półprzewodnikowych.

W celu stworzenia interfejsu pomiarowego musimy potrafić sterować sprzętem laboratoryjnym za pomocą komputera. Do tego celu dobrze nadaje się oprogramowanie Open Source takie jak język programowania Python oraz system operacyjny Linux. Szukając informacji o wykorzystaniu języka Python do komunikacji ze sprzętem pomiarowym, można zauważyć pewną lukę, którą moja praca ma cel wypełnić przynajmniej w części. Na stronie firmy Thorlabs, której sprzęt jest używany w laboratorium fotoniki, brak jest programów do komunikacji ze sprzętem dla platformy Linux. Dostępne są jedynie wysokopoziomowe API(interfejs do komunikacji z danym urządzeniem, biblioteką) do systemu Windows oraz istnieje możliwość użycia środowiska LabVIEW. LabVIEW jest graficznym środowiskiem programistycznym używanym do sterowania sprzętem pomiarowym oraz do zbierania danych pomiarowych. Niestety LabVIEW jest programem płatnym. Ja w swojej pracy będę używać środowiska Linux, w którym wszystko jest plikiem, także sprzęt połączony przez USB z komputerem, dzięki czemu możemy się z nim komunikować używając standardu komend SCPI przez wykorzystanie wywołań systemowych. SCPI — jest standardem komend do urządzeń pomiarowych, dzięki którym możemy sterować danym urządzeniem.

Dzięki mojej pracy możliwe będzie wykonywanie pomiarów charakterystyk laserów półprzewodnikowych w sposób łatwy oraz w krótkim czasie. W swojej pracy przedstawiam charakterystyki laserów krawędziowych i laserów VCSEL, które zmierzylem za pomocą programów napisanych w trakcie pisanie pracy. Charakterystyki dają nam ważne informacje o laserze, dzięki nim możliwe jest między innymi wyznaczenie prądu progowego oraz określenie sprawności danego lasera.

Praca jest podzielona na dwie części: pierwsza składa się z opisu przygotowania eksperymentu, sposobu sterowania urządzeniami laboratoryjnymi za pomocą programu napisanego w języku Python dla platformy Linux(Ubuntu). Druga część pracy opisuje badanie laserów półprzewodnikowych na podstawie danych uzyskanych za pomocą programu przedstawionego w pierwszej części. Do wykreślenia charakterystyk wyjściowych oraz wyznaczenie sprawności badanych laserów używam skryptów napisanych w języku Python.

2. Komunikacja z urządzeniami pomiarowymi przy wykorzystaniu oprogramowania Open Source

2.1. Oprogramowanie Open Source

Przykładami oprogramowania Open Source, które wykorzystałem w swojej pracy są:

- System Linux (Ubuntu) — jest systemem operacyjny często wykorzystywanym w nauce.
- Język programowania Python — język obiektowy programowania wysokiego poziomu rozpowszechniany na licencji Open Source.

2.2. Python

Język Python posiada wiele bibliotek naukowych oraz systemowych, które można zastosować do komunikacji ze sprzętem pomiarowym. Posiada łatwą składnię, dzięki czemu jest łatwy w nauce, a programy pisane w nim są przejrzyste. Python jest często używany w nauce m.in. w eksperymencie mający za cel znalezienie fal grawitacyjnych. W mojej pracy wykorzystywałem ten język zarówno do pisania skryptów mających na celu komunikację i sterowanie sprzętem laboratoryjnym, jak i wykorzystywałem do analizy danych uzyskanych w wyniku pomiarów. Najważniejsze biblioteki, których użyłem do swoich celów to:

- **Matplotlib** [1] — biblioteka do sporządzania wykresów, posiada między innymi możliwość używania symboli \LaTeX . Posiada możliwość wykonywania animacji co używam do robienia wykresów w czasie rzeczywistym.
- **Scipy** [2] — biblioteka do obliczeń numerycznych, przydatna przy analizie danych.
- **OS** — biblioteka systemowa. Używana w celu komunikacji ze sprzętem pomiarowym za pomocą wywołań systemowych.
- **PyQt5** — biblioteka do tworzenia graficznego interfejsu. Użyłem ją, aby stworzyć interfejs graficzny za pomocą którego możliwe jest sterowanie sprzętem oraz wykonywanie pomiarów charakterystyk laserów półprzewodnikowych
- **Threading** — biblioteka do tworzenia wątków. Używam jej do robienia wykresów w czasie rzeczywistym. W tym celu potrzebowałem jeden wątek do komunikacji ze sprzętem, a drugi wątek w tym samym czasie na podstawie zebranych danych tworzył wykres w czasie rzeczywistym.

Połączenie bibliotek wymienionych powyżej umożliwiło stworzenie programu, który steruje sprzętem pomiarowym oraz umożliwiło analizę charakterystyk laserów. Warto jeszcze nadmienić, że aktualnie rozwijane są dwie wersje Python: Python 2.7 i Python 3. Większą przyszłość ma Python 3, więc skrypty do analizy danych były

pisane w nim. Jednakże biblioteka `matplotlib` i `PyQt5` na chwilę pisania mojej pracy lepiej współpracowała z Python 2.7.

2.3. Programowane urządzenia pomiarowe

Przez programowane urządzenia pomiarowe rozumiemy sprzęt mogący dokonywać pomiarów wielkości fizycznych, który posiada interfejs umożliwiający sterowanie nimi przy pomocy komputera. Przykładami takich urządzeń, którymi zajmuje się w swojej pracy są:

- Zasilacza diod laserowych firmy Thorlabs model LDC4005.
- Miernik mocy firmy Thorlas model PM100.

Z wyżej wymienionymi urządzeniami możliwa jest fizyczna komunikacja za pomocą interfejsu USB przy pomocy standardu komend SCPI, który zostanie opisany w dalszej części rozdziału.

2.4. Komunikacja

Podstawowa zasada w systemie Linux mówi, że wszystko jest plikiem. Linuksowy sterownik znakowy (ang. char driver) pozwala na reprezentowanie urządzenia za pomocą specjalnych plików wirtualnych, które znajdują się w przestrzeni użytkownika w katalogu `/dev/ < nazwa >`. Obsługa tych plików możliwa jest za pomocą wywołań systemowych (ang. system call), które stanowią API, za pomocą którego użytkownik może sterować sprzętem. Do używania wywołań systemowych potrzebny jest identyfikator danego urządzenia, który jest reprezentowany przez deskryptor pliku. Podstawowe wywołania systemowymi pozwalające na sterowanie sprzętem to:

- `open` — służy do połączenia z urządzeniem, zwraca deskryptor pliku.
- `write` — funkcja służąca do wysyłania komend do urządzenia.
- `read` — funkcja służąca do odczytywania danych z urządzenia.
- `close` — funkcja zamykająca połączenie.

Funkcje te mają swoją implementację w języku C w bibliotece `fcntl.h` oraz `unistd.h`, oraz w języku Python w bibliotece `os`.

2.5. SCPI — standard komend do komunikacji z urządzeniami

SCPI (ang. Standard Commands for Programmable Instruments) jest tekstowym interfejsem ASCII do programowanych urządzeń pomiarowych mający na celu standaryzację poleceń używanych w systemach pomiarowym. Zdefiniowany został 1990 roku, wedle specyfikacji IEEE 488.2. (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Dzięki temu możliwa jest obsługa urządzeń pomiarowych przy wykorzystaniu komputera. Polecenia SCPI są to ciągi tekstowe ASCII, które są wysyłane do urządzenia przez wywołanie systemowe `write`. Odpowiedź do zapytania zazwyczaj zwracana jest w postaci ciągu ASCII.

Cechą poleceń SCPI jest ich implementacja przez każde urządzenie, czyli to samo polecenie będzie działać na każdym oscyloskopie bez względu na producenta, jeśli posiada standard SCPI. Można wyróżnić dwie grupy poleceń:

- Polecenia dla każdego urządzenia pomiarowego niezależnie od jego przeznaczenia. Takimi komendami są m.in.
 - `*idn?` — odczytuje identyfikator urządzenia.
 - `*rst` — powoduje przywrócenie ustawień początkowych urządzenia.
 - `*cls` — powoduje wyzerowanie informacji o błędach.
 - `*opc?` — (ang. operation complete) jest zapytanie o zakończenie wykonania poprzedzających poleceń. W odpowiedzi na zapytanie po zakończeniu wykonywania poprzedzających poleceń urządzenie prześle wartość 1.
 - `*wai` — (ang. wait) oczekiwanie na zakończenie wykonania poprzedzających poleceń.
- Polecenia charakterystyczne dla danego urządzenia pomiarowego zgodnie z jego przeznaczeniem. Przykładowe polecenie które będzie działać na każdym zasilaczu korzystającym z standardu SCPI:
 - Ustawienie wartości prądu na 0.01 A
`SOURce : CURRent : LEVel : AMPLitude 0.01`

Fizyczne łącze komunikacyjne nie jest zdefiniowane przez SCPI. Stworzony standard IEEE-488 był dla GPIB, ale może być również używany z interfejsem RS-232, Ethernet, VXIBus, USB. W przypadku mojej pracy do komunikacji ze sprzętem używam USB. USB — jest uniwersalnym portem wykorzystanym do komunikacji między komputerem a urządzeniem, posiadającym wejście USB.

3. Program do sterowania pomiarami charakterystyk laserów półprzewodnikowych z wykorzystaniem sprzętu Thorlabs

3.1. Wstęp

W ramach pracy inżynierskiej zostały stworzone programy do sterowania pomiarami charakterystyk laserów. Program został napisany w dwóch wersjach: skryptowej oraz okienkowej. Podstawą działania programów są następujące klasy:

- `device.py` — główna klasa, zawiera funkcje: do sprawdzania dostępnych urządzeń, funkcje zwracającą instancje, czyli konkretny obiekt reprezentujący dane urządzenie, co umożliwia sterowanie urządzeniem.
- `IODevice.py` — klasa do operacji wejścia-wyjścia na programowalnych urządzeniach pomiarowych. Jest to uniwersalna klasa, która może być użyta do dowolnego urządzenia zgodnego ze standardem SCPI.
- `LDC4005.py` — klasa zawierająca funkcje do obsługi zasilacza diod laserowych Thorlabs LDC4005. Implementacja funkcji oparta jest na poleceniach SCPI dla LDC4005 [4].
- `PM100.py` — klasa zawierająca funkcje do obsługi miernika mocy Thorlabs PM100. Implementacja funkcji oparta jest na poleceniach SCPI dla PM100 [5].

3.2. Krótki opis najważniejszych klas

W tym podrozdziale przedstawię stworzone kody programów do sterowania pomiarami charakterystyk laserów półprzewodnikowych. W zaprezentowanych kodach przedstawiam tylko najważniejsze funkcje, aby ułatwić czytelność (pełny kod jest dołączony do pracy).

Listing 3.1 przedstawia klasę `IODevice.py` do operacji wejścia-wyjścia na urządzeniach programowalnych. Jest to podstawowa klasa, która następnie używana jest w klasach do sterowania zasilaczem diod laserowych `LDC4005.py` (listing 3.2) oraz do sterowania miernikiem mocy `PM100.py` (listing 3.3). Ostatni kod (listing 3.4) pokazuje przykładowy skrypt w języku Python 3, którym można wykonać pomiar charakterystyki lasera.

```

1 import os
2
3
4 class IODDevice:
5     def __init__(self, path_to_device):
6         self.device = path_to_device
7         self.file_descriptor = os.open(path_to_device, os.O_RDWR | os.O_NOCTTY)
8
9     def write(self, command):
10        os.write(self.file_descriptor, command.encode())
11
12    def read(self, length=4000):
13        return os.read(self.file_descriptor, length)
14
15    def close(self):
16        os.close(self.file_descriptor)
17
18    def __del__(self):
19        self.close()

```

Listing 3.1. IODDevice.py

```

1 from IODDevice import IODDevice
2
3 class PM100:
4     def __init__(self, path_to_usb_path):
5         self.device = IODDevice(path_to_usb_path)
6
7     def set_wavelength_in_nm(self, value):
8         self.device.write("CORRection:WAVelength " + str(value))
9
10    def get_power(self):
11        self.device.write("INITiate")
12        self.device.write("MEASure:POWEr")
13        self.device.write("FETCh?")
14        value = self.device.read(100)
15        return float(value)

```

Listing 3.2. PM100.py

```

1 from IODDevice import IODDevice
2
3
4 class LDC4005:
5     def __init__(self, path_to_usb_path):
6         self.device = IODDevice(path_to_usb_path)
7
8     def on(self):
9         self.device.write("OUTPut ON")
10
11    def off(self):
12        self.device.write("OUTPut OFF")
13
14    def set_ld_current_in_amper(self, value):
15        self.device.write("SOURce:CURRent:LEVel:AMPLitude %s" % value)
16
17    def ld_current_reading(self):
18        self.device.write("INITiate")

```



```

19     self.device.write("MEASure:CURRent")
20     self.device.write("FETCh:CURRent?")
21     value = self.device.read(100)
22     return float(value)
23
24     def ld_voltage_reading(self):
25         self.device.write("INITiate")
26         self.device.write("MEASure:VOLTage")
27         self.device.write("FETCh:VOLTage?")
28         value = self.device.read(100)
29         return float(value)

```

Listing 3.3. LDC4005.py

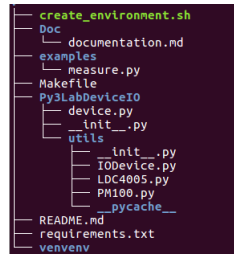
Skrypt przedstawiony na listingu 3.4 w wierszach 1–3 importuje potrzebne moduły. Ważne, aby moduły LDC4005.py oraz PM100.py znajdowały się w tym samym folderze co `measure.py`. W wierszu 6 deklarujemy tablicę 20 elementów o wartościach prądu od 0 do 0.02 A. Następnie w wierszach 8–10 deklarujemy tablicę do przechowywania danych, które zostaną zmierzone. W liniach 13–14 tworzy instancje klasy dla zasilacza i miernika. Zakładamy, że port `/dev/usbTMC0` odpowiada zasilaczowi ldc4005, a port `/dev/usbTMC1` odpowiada miernikowi mocy PM100. Nazwę, można sprawdzić za pomocą zapytania „*IDN?”. Następnie w wierszu 20 ustawiany prąd na zasilaczu, w 21 czytamy prąd z zasilacza, w 22 czytamy napięcie, a w 23 czytamy moc wyjściową na mierniku mocy. Ostatnim etapem jest zapisanie danych do pliku przedstawione w wierszach 25–26.

```

1  import numpy as np
2  from LDC4005 import LDC4005
3  from PM100 import PM100
4
5
6  set_current = np.linspace(0, 0.02, 20)
7
8  measure_current = np.zeros(len(set_current))
9  measure_voltage = np.zeros(len(set_current))
10 measure_power = np.zeros(len(set_current))
11
12 # usbtmc0 odpowiadawia ldc, a usbtmc1 pm100
13 ldc = LDC4005("/dev/usbTMC0")
14 pm100 = PM100("/dev/usbTMC1")
15
16 pm100.set_wavelength_in_nm(635)
17 ldc.on()
18
19 for i in range(0, len(set_current)):
20     ldc.set_ld_current_in_amper(set_current[i])
21     measure_current[i] = ldc.ld_current_reading()
22     measure_voltage[i] = ldc.ld_voltage_reading()
23     measure_power[i] = pm100.get_power()
24
25 np.savetxt("dane.txt", np.c_[measure_current, measure_voltage, measure_power]
26 , fmt='%1.16f', header="current [A] \t voltage [V] \t power [W]")

```

Listing 3.4. measure.py



Rysunek 3.1. Struktura programu skryptowego.

3.3. Wersja skryptowa programu

Jedną z możliwości przeprowadzania pomiarów jest wykorzystanie skryptu (wraz z innymi klasami dołączony jest do pracy). Struktura programu pokazana jest na rysunku 3.1. Aby zainstalować wszystkie niezbędne biblioteki należy w konsoli wywołać polecenie `make`.

```
1 student@ubuntu:~$ make
```

Listing 3.5. Zbudowanie środowiska.

Następnie uruchamiamy wirtualne środowisko (linia 1), które posiada wszystkie potrzebne biblioteki, następnie przechodzimy do katalogu `examples`, gdzie znajduje się plik `measure.py`, który należy użyć do przeprowadzenia pomiarów:

```
1 student@ubuntu:~$ source venvenv/bin/activate
2 student@ubuntu:~$ cd examples/
```

Listing 3.6. Przejście do katalogu z skryptem pomiarowym.

W celu przeprowadzenia pomiarów wywołujemy skrypt `measure.py` z parametrami:

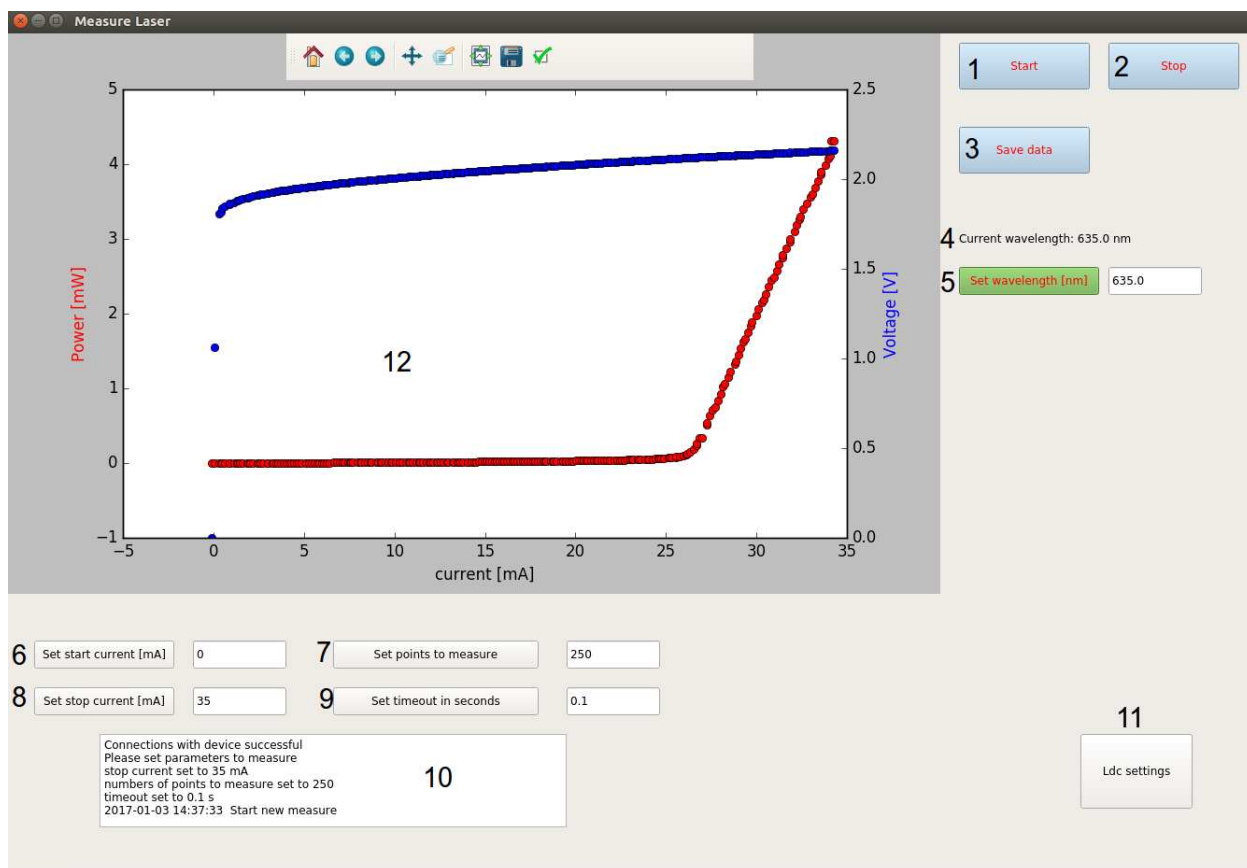
- `nr`: liczba punktów do pomiaru
- `sc`: początkowa wartość prądu w mA, od którego należy rozpocząć pomiar
- `ec`: wartość prądu w mA do którego przeprowadza się pomiar.
- `fn`: nazwa wynikowa pliku z danymi, która będzie zapisana w katalogu `output`

```
1 student@ubuntu:~$ python3 measure.py -nr 150 -sc 0 -ec 20
2 -fn dane
```

Listing 3.7. Użycie skryptu w celu przeprowadzenia pomiaru.

3.4. Wersja okienkowa programu do pomiarów

Na rysunku 3.4 przedstawiony jest okienkowy program do wykonywania charakterystyk. Program napisany jest w języku Python 2.7 z wykorzystaniem bibliotek `PyQt5`, `matplotlib`.



Rysunek 3.2. 1 — rozpoczęcie pomiarów, 2 — zatrzymanie pomiarów, 3 — zapisanie danych pomiarowych, 4 — pokazuje długość fali detektora, 5 — zmiana długości fali detektora 6 — ustawia prąd początkowy do pomiarów, 7 — ustawia ilość punktów do pomiaru, 8 — ustawia prąd końcowy do pomiarów, 9 — ustawia długość pauzy pomiędzy pomiarami, 10 — wyświetla ważne informacje o ustawieniach, 11 — ustawienie zasilacza, 12 — pokazuje charakterystykę.

- Przycisk „Start” [1] służący do rozpoczęcia pomiarów. Po jego wciśnięciu nastąpi wykonanie charakterystyki lasera na podstawie ustawionych parametrów.
- Przycisk „Stop” [2] służący do zatrzymania pomiarów. Po jego wciśnięciu nastąpi wyłączenie zasilacza.
- Przycisk „Save data” [3] służący do zapisania zebranych danych. Po wciśnięciu należy wybrać ścieżkę. Zapis dokonywany jest w pliku z rozszerzeniem .txt.
- Wyświetlacz długości fali wybranej na detektorze [4]. Długość fali wyświetlana jest w nanometrach.
- Przycisk służący do zmiany długości fali na detektorze [5]. Wartość należy wprowadzić w nanometrach i zatwierdzić.
- Przycisk „Set start current” [6] — służy do wybrania prądu, od jakiego ma się zacząć pomiar w mA.
- Przycisk „Set points to measure” [7] — służy do wybrania ilości punktów do charakterystyki.
- Przycisk „Set stop current” [8] — służy do wybrania granicy prądu w mA, do jakiego ma się odbyć pomiar.

- Przycisk „Set timeout in seconds” [9] — służy do ustawienie długości pauzy między zadaniem prądu do zasilacza a wykonaniem pomiaru.
- Okienko informacyjne [10] — wyświetla informacje o pomiarze.
- Przycisk ”Ldc settings” [11] — ustawia najważniejsze parametry zasilacza diod takie jako wartość maksymalna prądu.
- Ekran główny [12] — pokazuje w czasie rzeczywistym zależność napięcia na laserze oraz mocy wyjściowej w funkcji prądu wejściowego.

4. Lasery półprzewodnikowe

4.1. Teoria

4.1.1. Teoria pasmowa

Działanie laserów półprzewodnikowych opiera się na prawach, które opisuje teoria pasmowa. Podstawowe przewidywanie teorii pasmowej mówi, że ciało stałe składa się z szeregu pasm rozdzielonych od siebie przerwami energetycznymi o skończonych szerokościach. Najważniejszą przerwą, mającą wpływ na właściwości elektryczne ciała jest przerwa pomiędzy pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa E_g . Ze względu na szerokość przerwy wyróżniamy [7]:

- izolatory: $E_g > 3 \text{ eV}$
- półprzewodniki: $E_g = 0.1 \text{ eV}$ do 2.5 eV
- przewodniki: $E_g < 0.1 \text{ eV}$

Przybliżoną wartość przerwy energetycznej w zależności od temperatury możemy przedstawić w postaci [7]:

$$E_g(T) \approx E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (4.1)$$

gdzie: E_{g0} — wartość przerwy energetycznej w temperaturze $T = 0 \text{ K}$, Współczynniki α oraz β są dodatnimi stałymi zależnymi od rodzaju materiału. Dla $GaAs$ [7]: $\alpha = 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$, $\beta = 204 \text{ K}$. Więc im wyższa temperatura tym wartość przerwy mniejsza.

4.1.2. Lasery półprzewodnikowe

Lasery półprzewodnikowe są ważną oraz dynamicznie rozwijającą się gałęzią optoelektroniki. Cały czas są one udoskonalane, dzięki czemu obejmują coraz szerszy zakres częstości widma oraz potrafią generować promieniowanie o dużych mocach. Zaletami laserów półprzewodnikowych są:

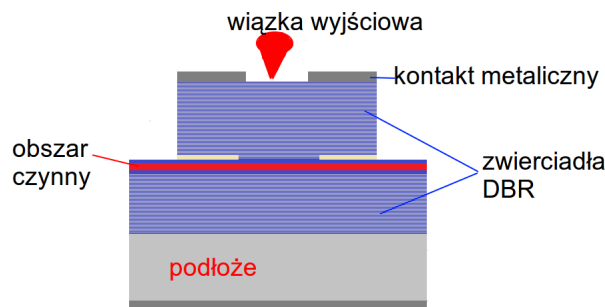
- małe wymiary,
- łatwość modulacji emitowanego promieniowania,
- niezawodność pracy,
- proste zasilanie,
- wymagane niskie napięcie zasilania,
- stosunkowo niska cena w porównaniu do innych laserów.

W laserach półprzewodnikowych ośrodkiem aktywnym jest półprzewodnik. Obszar czynny zazwyczaj ograniczony jest do wąskiego paska oraz położony jest w płaszczyźnie złącza p-i-n. Pompowanie uzyskiwane jest przez wstrzykiwanie nośników ładunku do obszaru złącza, które spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia. Aby zaszła akcja laserowa, prąd zasilający musi przekroczyć pewną wartość progową

zwaną prądem progowym I_{th} , który w dalszej części jest opisywany bardziej szczegółowo. Podstawowym zjawiskiem fizycznym, na którym swe działanie opierają lasery półprzewodnikowe, jest przejście promieniste, czyli proces rekombinacji elektronu i dziury, w wyniku którego następuje emisja promieniowania. Gdy prąd osiągnie wystarczająco dużą wartość, dochodzi do inwersji obsadzeń. Zjawisko inwersji obsadzeń pozwala wywołać akcję laserową. Wśród laserów półprzewodnikowych wyróżniamy: lasery VCSEL oraz lasery o emisji krawędziowej.

4.1.3. Laser VCSEL

Laser VCSEL (ang. Vertical Cavity Surface Emitting Laser) jest to laser z emisją powierzchniową o pionowej wnęce rezonansowej. W laserach VCSEL promieniowanie rozchodzi się w kierunku prostopadłym do krawędzi obszaru czynnego oraz wzmacniane jest jedynie wewnątrz tego obszaru [8]. Lasery tego typu zazwyczaj zbudowane są w kształcie pierścieni lub walców o średnicach rzędu μm . Lasery VCSEL, pracując w sposób naturalny na pojedynczym modzie podłużnym, charakteryzują się znacznie lepszymi parametrami emitowanej wiązki promieniowania niż klasyczne lasery krawędziowe [9]. Emitowana wiązka ma małą rozbieżność kątową.



Rysunek 4.1. Schemat budowy — laser VCSEL.

Zaletami laserów VCSEL [8] są:

- mała rozbieżność wiązki promieniowania,
- naturalna praca na pojedynczym modzie podłużnym,
- możliwość łączenia laserów w dwuwymiarowe matryce laserowe,

Wadami laserów VCSEL [8] są:

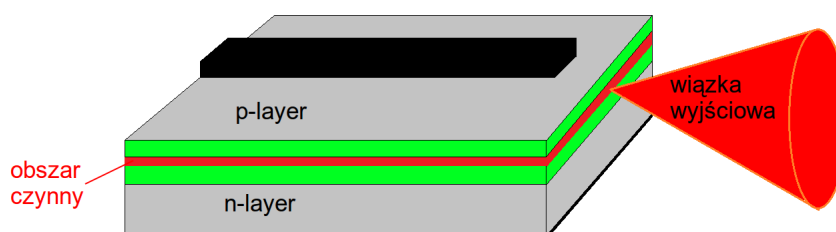
- niska moc promieniowania wyjściowego (rzędu kilku mW),
- Stosunkowo wysoka wartość oporności elektrycznej i cieplnej,
- wzbudzenie się modów poprzecznych.

Zastosowanie laserów VCSEL:

- transmisja danych drogą optyczną,
- spektroskopia absorpcyjna,
- myszki komputerowe.

4.1.4. Laser o emisji krawędziowej

Laser krawędziowy jest to laser z wnęką w płaszczyźnie warstwy aktywnej. W tego typu laserach promieniowanie wędruje w rezonatorze między jego zwierciadłami, jednocześnie cały czas znajdując się wewnątrz ośrodka czynnego. Odległości między modami jest mała. Trudne jest otrzymanie lasera krawędziowego pracującego na jednym modzie. Rezonator jest zazwyczaj w kształcie prostopadłościanu o wymiarach niecałego milimetra, zazwyczaj wykonany także w materiale półprzewodnikowym[8]. Sprężenie optyczne uzyskiwane jest przez zastosowanie pary zwierciadeł prostopadłych do płaszczyzny obszaru czynnego lub za pomocą połałdowanej specjalnie powierzchni, która jest równoległa do tego obszaru (DFB — Distributed Feed Back).



Rysunek 4.2. Schemat budowy — laser krawędziowy.

Zaletami laserów krawędziowych są:

- stosunkowo wysoka moc wiązki wyjściowej [8] (do kilkadziesiąt mW),
- stosunkowo wysoka sprawność,
- możliwe łączenie laserów w jednowymiarowe matryce laserowe.

Wadami laserów krawędziowych są [8]:

- wzbudzanie się wielu modów podłużnych,
- rozbieżna wiązka promieniowania, która wykazuje astygmatyzm, zjawisko w którym promienie wiązki lasera padające w dwóch prostopadłych płaszczyznach zostają zogniskowane w różnych punktach.

Zastosowanie laserów krawędziowych:

- w optyce światłowodowej do szybkiego przesyłania dużych ilości danych,
- odczytywanie i zapisywanie płyt DVD.

4.1.5. Prąd progowy

Charakterystyka wyjściowa lasera przedstawia zależność napięcia na laserze oraz mocy wyjściowej w funkcji prądu zasilającego. Ważnym parametrem laserów półprzewodnikowych jest prąd progowy (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 kawałka liniowego zależności prądu od mocy wyjściowej, gdzie moc wyjściowa gwałtownie rośnie, metodą najmniejszych kwadratów przy użyciu prostej (4.2) należy znaleźć parametry prostej a i b . Dla wyznaczonej prostej należy znaleźć miejsce zerowe, które będzie wyznaczoną wartością prądu progowego I_{th} (4.3).

$$P_{wy} = a \cdot I + b \quad (4.2)$$

$$I_{th} = -\frac{b}{a} \quad (4.3)$$

$$\Delta I_{th} = \left| \frac{\partial I_{th}}{\partial a} \right| \cdot \Delta a + \left| \frac{\partial I_{th}}{\partial b} \right| \cdot \Delta b \quad (4.4)$$

$$\Delta I_{th} = \left| -\frac{b}{a^2} \right| \cdot \Delta a + \left| -\frac{1}{a} \right| \cdot \Delta b \quad (4.5)$$

Dla laserów krawędziowych prąd progowy rośnie wraz z temperaturą. Zależności prądu progowego I_{th} od temperatury T wyrażamy w postaci równania:

$$I_{th} = I_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4.6)$$

Przez zlogarytmowanie wartości prądu oraz podstawienie otrzymujemy:

$$\ln(I_{th}) = \frac{T}{T_0} + \ln(I_0) \quad (4.7)$$

Wartości parametrów I_0 oraz T_0 możemy wyznaczyć na podstawie charakterystyk emisyjnych lasera w różnych temperaturach T . Parametr T_0 wyrażony w kelwinach jest to tzw. temperatura charakterystyczna [6].

Mając wartości prądu progowego w danej temperaturze można do nich dopasować funkcje liniową o parametrach k i w w postaci:

$$y = k \cdot T + w \quad (4.8)$$

gdzie:

$$y = \ln(I_{th}) \quad (4.9)$$

$$k = \frac{1}{T_0} \quad (4.10)$$

$$w = \ln(I_0) \quad (4.11)$$

Na tej podstawie możemy znaleźć poszukiwane parametry I_0 oraz T_0 :

$$I_0 = e^w \quad (4.12)$$

$$T_0 = \frac{1}{k} \quad (4.13)$$

Korzystając z metody różniczki zupełnej można obliczyć wartości błędów wyznaczonych wartości:

$$\Delta I_0 = \left| \frac{\partial I_0}{\partial w} \right| \cdot \Delta w = |e^w| \cdot \Delta w \quad (4.14)$$

$$\Delta T_0 = \left| \frac{\partial T_0}{\partial k} \right| \cdot \Delta k = \left| -\frac{1}{k^2} \right| \cdot \Delta k \quad (4.15)$$

Dla laserów VCSEL nie można zastosować zależności (4.2).

4.1.6. Sprawność

Innym ważnym parametrem, którym możemy scharakteryzować lasery półprzewodnikowe, jest ich sprawność. Mnie interesować będą następujące rodzaje sprawności:

- Sprawność różniczkowa (ang. slope efficiency) — jest zdefiniowana jako nachylenie krzywej uzyskanej przez wykreślenie zależności mocy wyjściowej P_{wy} z lasera w funkcji natężenie prądu I lub mocy dostarczonej P_{we} . Moc dostarczoną definiujemy jako:

$$P_{we} = U \cdot I \quad (4.16)$$

gdzie: U — napięcie na laserze. Sprawność różniczkowa jest pochodną mocy wyjściowej po prądzie $\frac{dP_{wy}}{dI}$ lub pochodną mocy wyjściowej po mocy wejściowej $\frac{dP_{wy}}{dP_{we}}$

- Sprawność całkowita (ang. wall-plug-efficiency) — jest zdefiniowana jako stosunek mocy wyjściowej do całkowitej mocy wejściowej lasera.

$$\eta = \frac{P_{wy}}{P_{we}} \quad (4.17)$$

Wyznacza się ją przez podzielenie mocy wyjściowej P_{wy} , czyli zmierzonej na mierniku mocy przez moc wejściową P_{we}

5. Opis eksperymentu

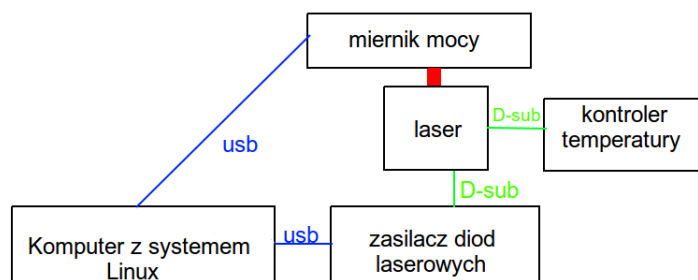
5.1. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy składał się z:

- Komputera z systemem Linux (Ubuntu) — wymagane jest, aby na komputerze zainstalowany był język Python wraz z bibliotekami: matplotlib, numpy, PyQt5. Do sterowania sprzętem przy pomocy programów opisanych w 3 rozdziale wymagane są uprawnienia administratora.
- Zasilacza diod laserowych firmy Thorlabs model LDC4005 [3] — zapewnia stabilne zasilanie prądowe lasera prądem do 5 A. Możliwe jest zasilanie ciągłe i impulsowe. Posiada interfejsem SCPI [4], umożliwiający sterowanie za pomocą komputera przez USB.
- Miernik mocy firmy Thorlabs model PM100 [5] — stworzony do mierzenia mocy wyjściowej z lasera. Pozwala operować na długościach fali od 400 nm do 1100 nm. Posiada interfejsem SCPI [5], umożliwiający sterowanie za pomocą komputera przez USB.
- Kontroler temperatury diod laserowych firmy Thorlabs — precyzyjny kontroler temperatury pozwalający na zmiany temperatury chłodniczy lasera podczas operowania prądami do 2 A.

5.1.1. Przebieg pomiarów

Laser był umieszczony w mocowaniu stabilizującym temperaturę diod laserowych połączony z zasilaczem diod laserowych oraz kontrolerem temperatury. Na wyjściu lasera umieszczony był miernik mocy. Komunikacja z zasilaczem oraz miernikiem odbywała się za pomocą standardu komend SCPI przez połączenie USB przez wykorzystanie programów opisanych w rozdziale 3. Temperatura była zmieniana manualnie na kontrolerze temperatury. Charakterystyki wyjściowe (czyli wartości prądu zasilania, napięcia na laserze oraz mocy wyjściowej) mierzone były przy pomocy zasilania ciągłego. Wyniki zapisywane były w pliku tekstowym. Schematyczny rysunek układu pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 5.1.



Rysunek 5.1. Schemat układu pomiarowego.

5.2. Eksperyment

W tej części pracy przedstawiam wyniki pomiarów charakterystyk laserów półprzewodnikowych, które dokonałem w celu przetestowania jak mój program do sterowania sprawdza się podczas pomiarów.

5.2.1. Laser krawędziowy 635 nm (L635P003) — omówienie wyników

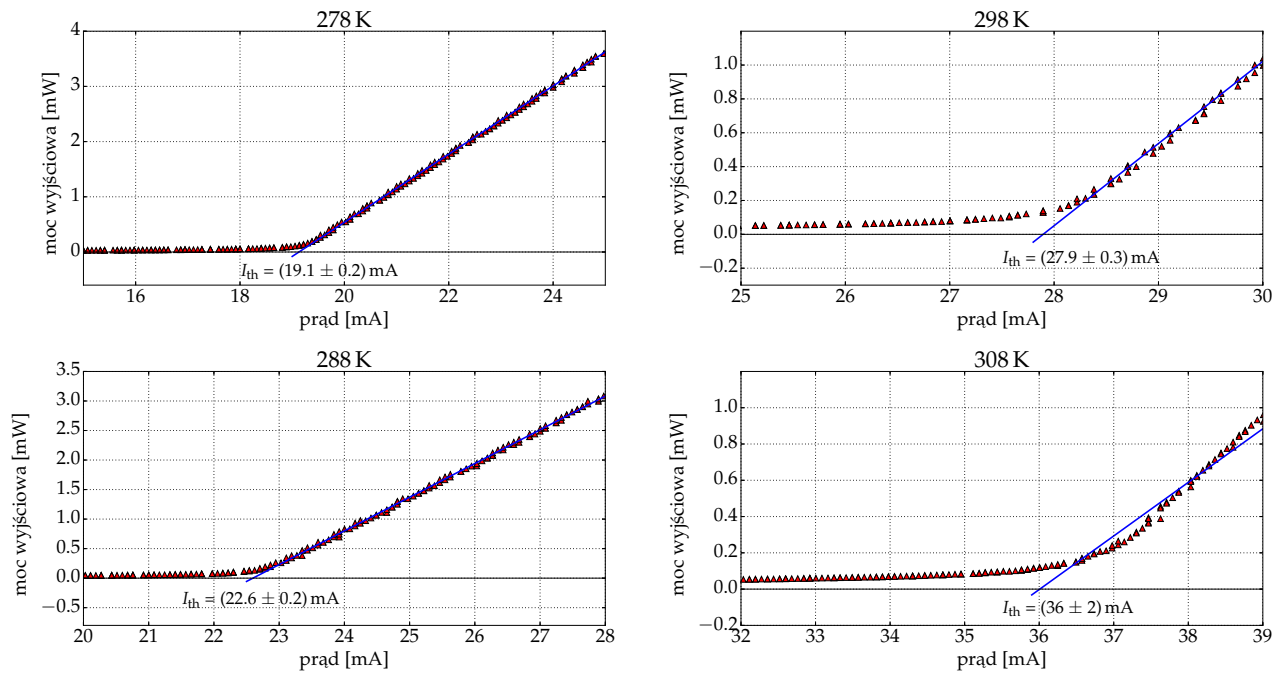
Pomiar przeprowadzony był w temperaturach chłodnicy od 278 K do 308 K, z krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli (5.1). Rysunki od (5.2) do (5.7) dotyczą lasera krawędziowego 635 nm.

- Wykres na rysunku (5.2) przedstawia sposób wyznaczania wartości prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku (5.3). Do wykreślonych wartości punktów dopasowałem funkcję (4.6). W wyniku czego otrzymałem temperaturę charakterystyczną T_0 , która wynosiła (47 ± 2) K oraz parametr I_0 o wartości (0.05 ± 0.02) mA
- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku (5.4) można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury na chłodnicy maleje opór lasera. Wraz z wyższą temperaturą chłodnicy maleje także moc wyjściowa lasera.
- Wykres na rysunku (5.5) przedstawia sprawność różniczkową lasera w funkcji prądu wejściowego w różnych temperaturach chłodnicy. W górnej części rysunku pokazana jest zależność mocy wyjściowej od prądu, do której dopasowałem funkcję kwadratową dla punktów leżących powyżej wartości prądu progowego. Dopasowana funkcja zbliżona jest do funkcji liniowej, przez co sprawność różniczkowa jest prawie stała, jednakże jak wynika z wykresu im wyższa temperatura tym sprawność lasera mniejsza, aczkolwiek zmiany na przestrzeni są małe około 0.010 W/A.
- Wykres na rysunku (5.6) przedstawia jak zmienia się sprawność lasera w zależności od temperatury chłodnicy. Funkcje, które przedstawiają sprawność zostały wyznaczone analogicznie jak te przedstawione na rysunku (5.5). Analizując ten wykres, dochodzę do wniosku, że wraz ze wzrostem temperatury sprawność różniczkowa lasera maleje.

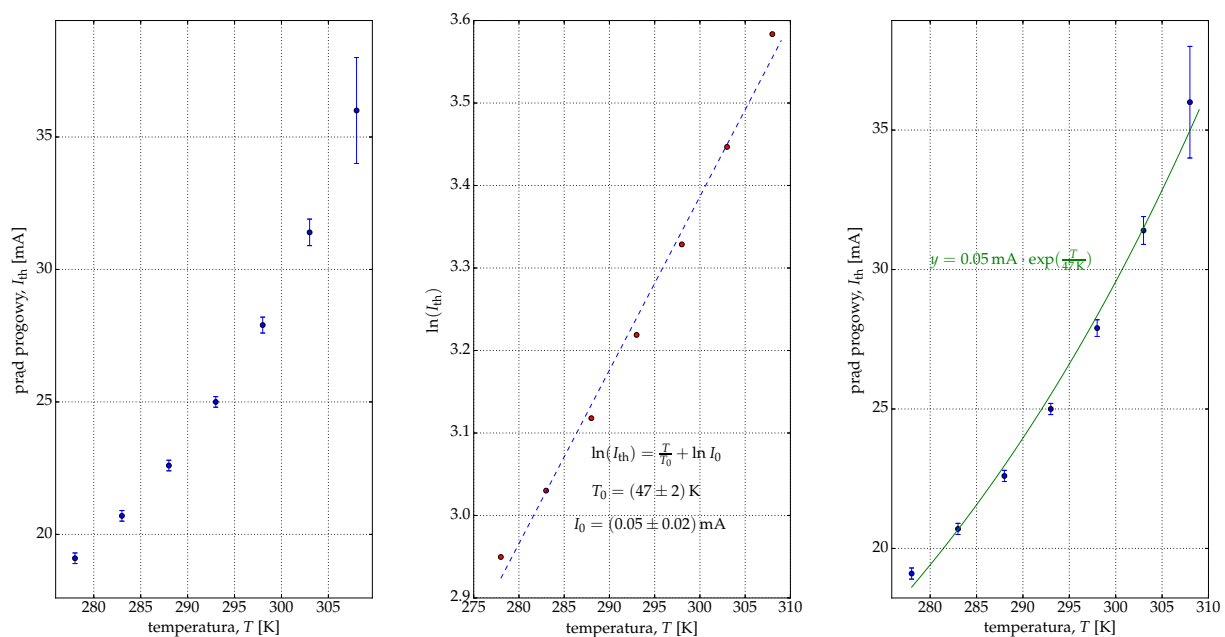
- Wykres na rysunku (5.7) przedstawia sprawność całkowitą lasera w funkcji prądu. Jak widzimy, wraz ze wzrostem temperatury sprawność całkowita mocno spada.

Tabela 5.1. Wyznaczone wartości prądu progowego I_{th} w różnych temperaturach T dla lasera krawędziowego 635 nm.

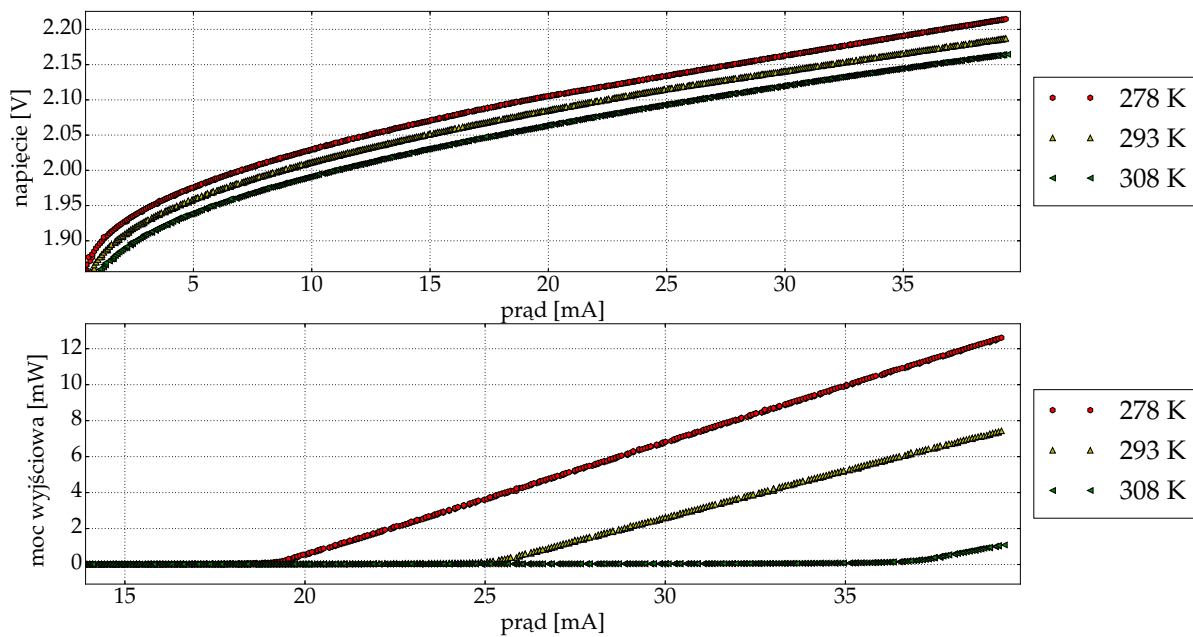
T [K]	278	283	288	293	298	303	308
I_{th} [mA]	19.1 ± 0.2	20.7 ± 0.2	22.6 ± 0.2	25.0 ± 0.2	27.9 ± 0.3	31.4 ± 0.5	36 ± 2



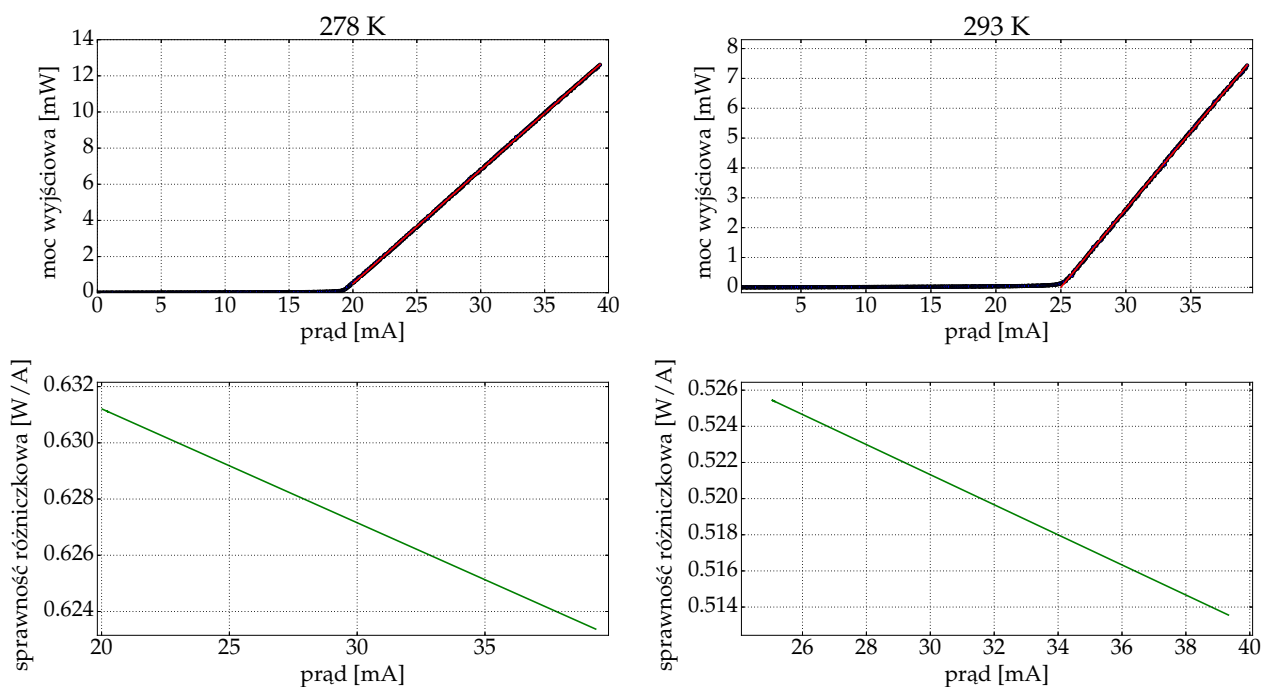
Rysunek 5.2. Wykres ilustrujący wyznaczenie prądu progowego dla lasera krawędziowego 635 nm.



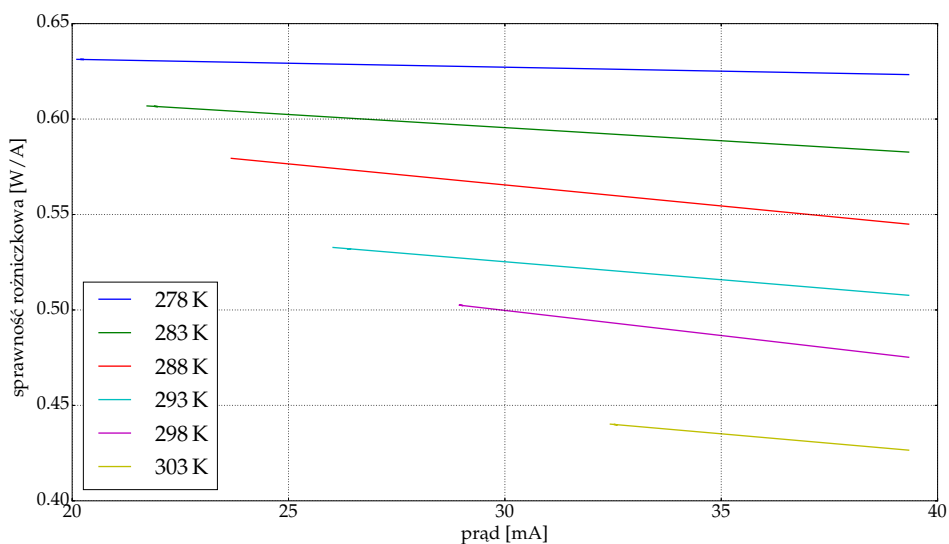
Rysunek 5.3. Wykres prądu progowego w zależności od temperatury chłodnicy z dopasowanymi wartościami I_0 i T_0 dla lasera krawędziowego 635 nm.



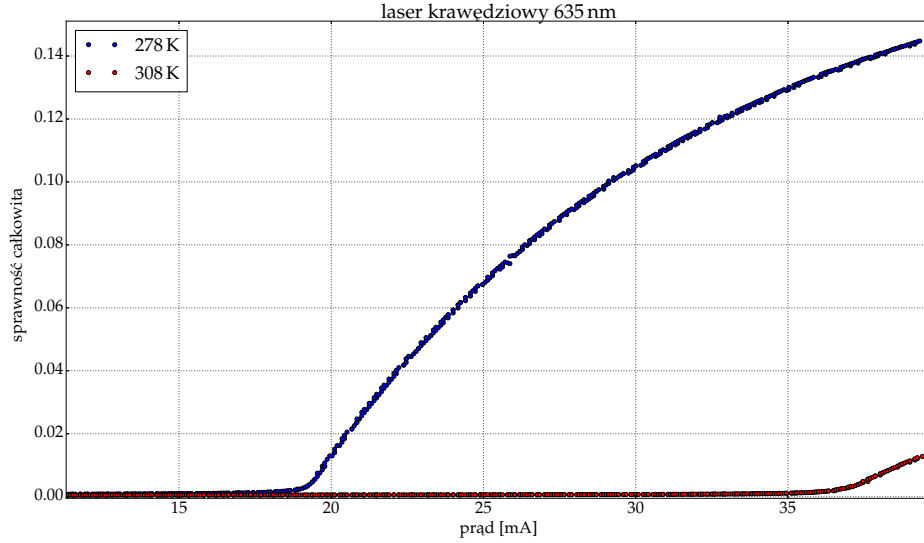
Rysunek 5.4. Wykres napięcia na laserze oraz mocy w funkcji prądu dla lasera krawędziowego 635 nm w trzech temperaturach.



Rysunek 5.5. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera krawędziowego 635 nm dla dwóch temperatur. U góry dopasowana funkcja, u dołu pochodna tej funkcji reprezentująca sprawność różniczkową.



Rysunek 5.6. Wykres sprawności różniczkowej w funkcji prądu dla lasera krawędziowego 635 nm.



Rysunek 5.7. Wykres sprawności całkowitej w funkcji prądu dla lasera krawędziowego 635 nm dla dwóch temperatur.

5.2.2. Laser krawędziowy 850 nm (L850P010)— omówienie wyników

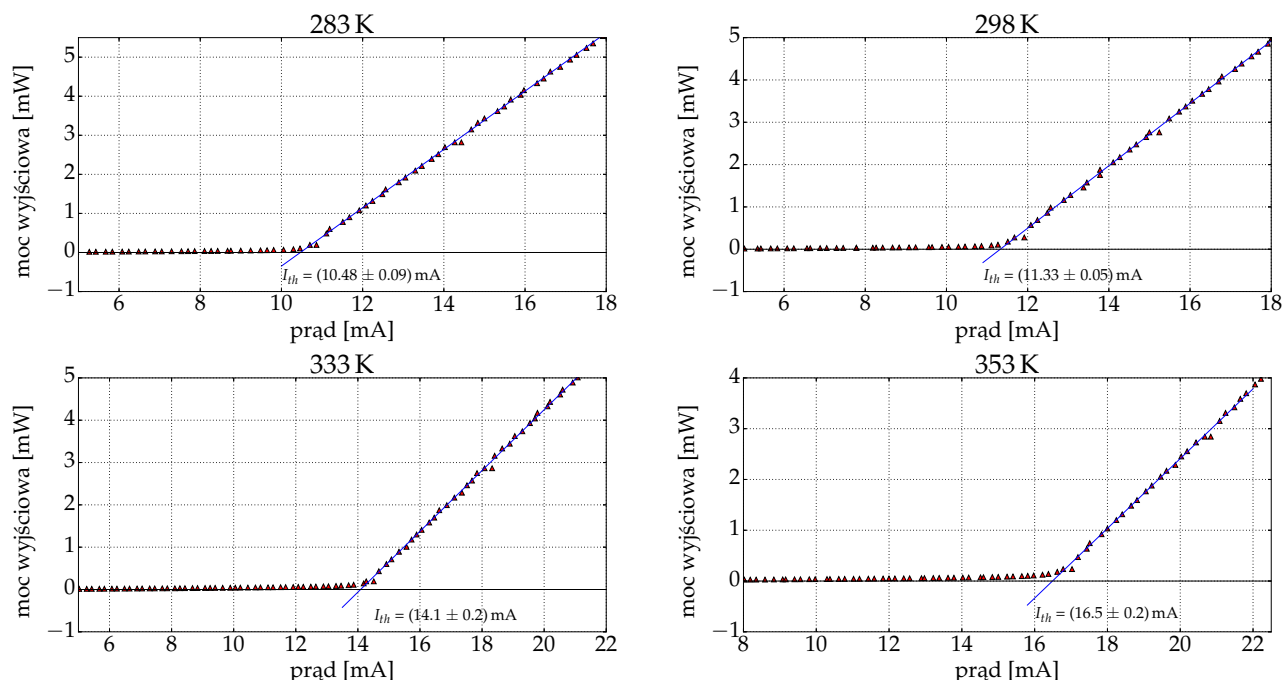
Pomiar przeprowadzany był w temperaturach chłodnicy od 283 K do 353 K z krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli (5.2). Rysunki od (5.8) do (5.13) dotyczą lasera krawędziowego 850 nm.

- Wykres na rysunku (5.8) przedstawia sposób, w jaki wyznaczana była wartość prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku (5.9). Do wykreślonych wartości punktów dopasowałem funkcję (4.6) w wyniku czego otrzymałem temperaturę charakterystyczną, T_0 , która wynosiła (157 ± 4) K oraz parametr I_0 , którego wartość wynosiła (1.7 ± 0.1) mA. Porównując wyznaczone wartości T_0 oraz I_0 dla lasera krawędziowego 850 nm z wartościami dla lasera krawędziowego 635 nm, należy zauważyć, że wartości te są większe.
- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku (5.10) można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury na chłodnicy maleje opór lasera. Wraz ze wzrostem temperaturą chłodnicy maleje także moc wyjściowa lasera.
- Wykres na rysunku (5.11) przedstawia sprawność różniczkową lasera w funkcji prądu wejściowego w różnych temperaturach chłodnicy. W górnej części rysunku pokazana jest zależność mocy wyjściowej od prądu, do której dopasowałem funkcje kwadratową dla punktów leżących powyżej wartości prądu progowego. Dopasowana funkcja zbliżona jest do funkcji liniowej, przez co sprawność różniczkowa jest prawie stała w funkcji prądu, jednakże jak wynika z wykresu im wyższa temperatura, tym sprawność różniczkowa lasera jest mniejsza, choć zmiany na są małe około 0.014 W/A dla temperatury 353 K przy zakresie prądu od 16.6 mA do 80 mA oraz 0.017 W/A dla temperatury 293 K przy zakresie prądu od 11.1 mA do 80 mA.

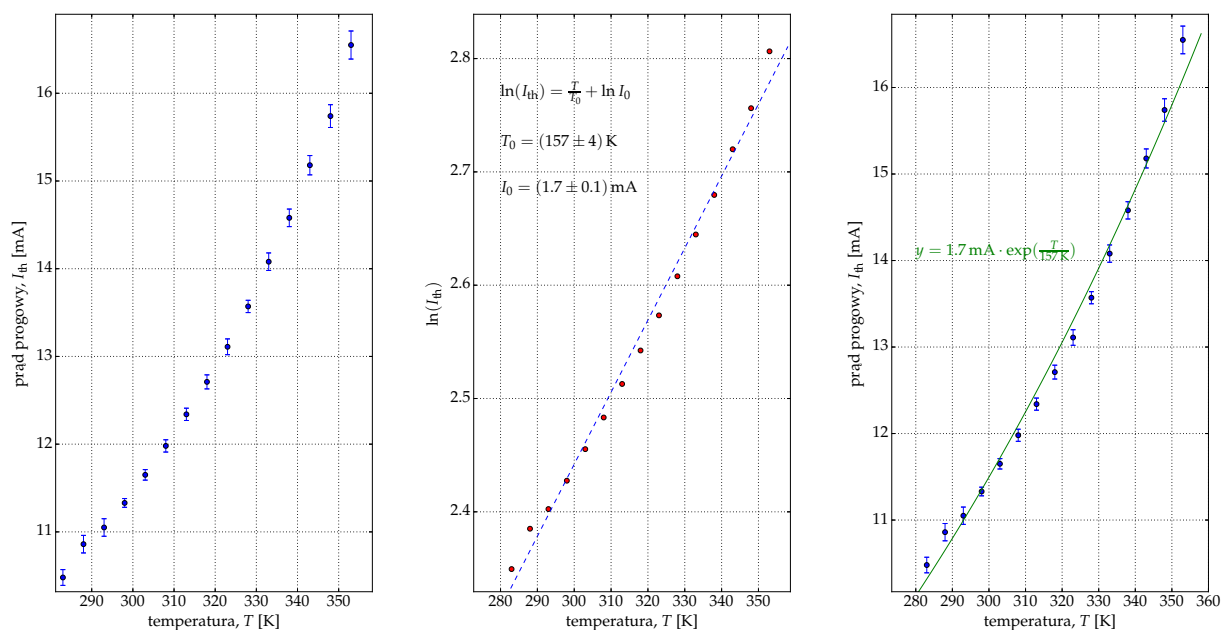
- Wykres na rysunku (5.12) przedstawia, jak zmienia się sprawność lasera od temperatury chłodnicy. Funkcje, które przedstawiają sprawność zostały wyznaczone analogicznie jak te przedstawione na rysunku (5.11). Analizując ten wykres, dochodzę do wniosku, że wraz z wyższą temperaturą sprawność różniczkowa lasera maleje dla prądu wejściowego powyżej 30 mA. Dla mniejszych wartości prądu dla temperatur 323 K oraz 333 K jest inaczej, różnica ta jest niewielka i może być spowodowana błędem wynikającym z metody najmniejszych kwadratów podczas dopasowywania funkcji (4.2).
- Wykres na rysunku (5.13) przedstawia sprawność całkowitą lasera w funkcji prądu. Jak widzimy, wraz ze wzrostem temperatury sprawność całkowita spada, choć spadek nie jest tak duży jak w przypadku lasera krawędziowego 635 nm.

Tabela 5.2. Wyznaczone wartości prądu progowego I_{th} w różnych temperaturach T dla lasera krawędziowego 850 nm.

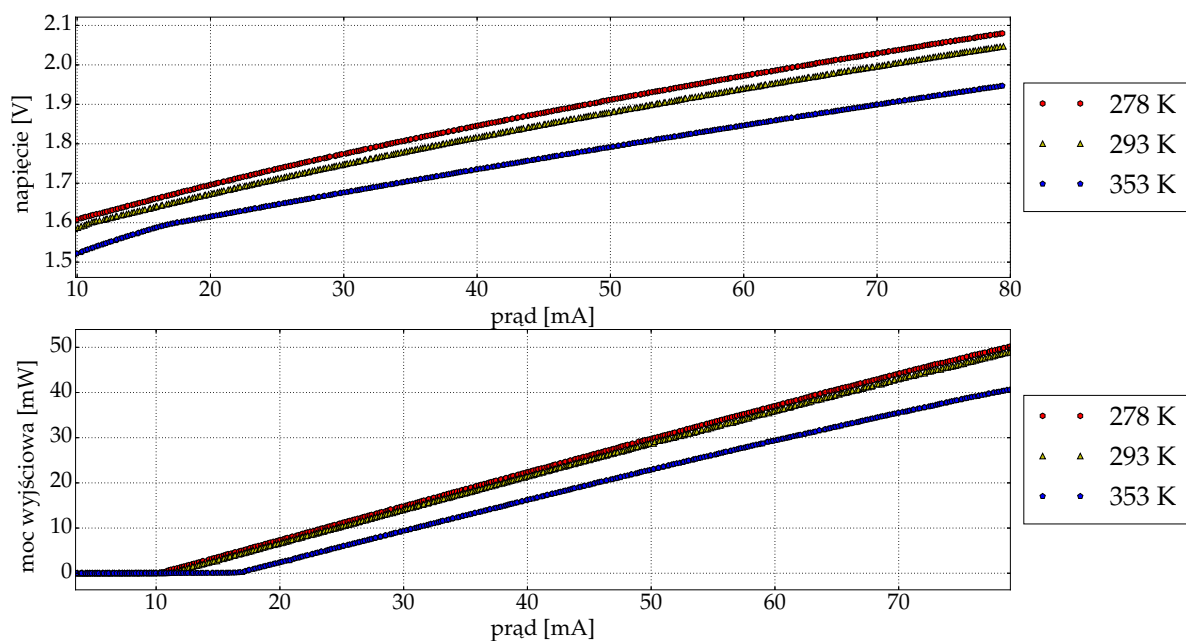
T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]
283	10.48 ± 0.09	288	10.9 ± 0.1	293	11.1 ± 0.1
298	11.33 ± 0.05	303	11.65 ± 0.06	308	11.98 ± 0.07
313	12.34 ± 0.07	318	12.71 ± 0.08	323	13.11 ± 0.09
328	13.57 ± 0.07	333	14.1 ± 0.1	338	14.6 ± 0.1
343	15.2 ± 0.2	348	15.7 ± 0.2	353	16.6 ± 0.2



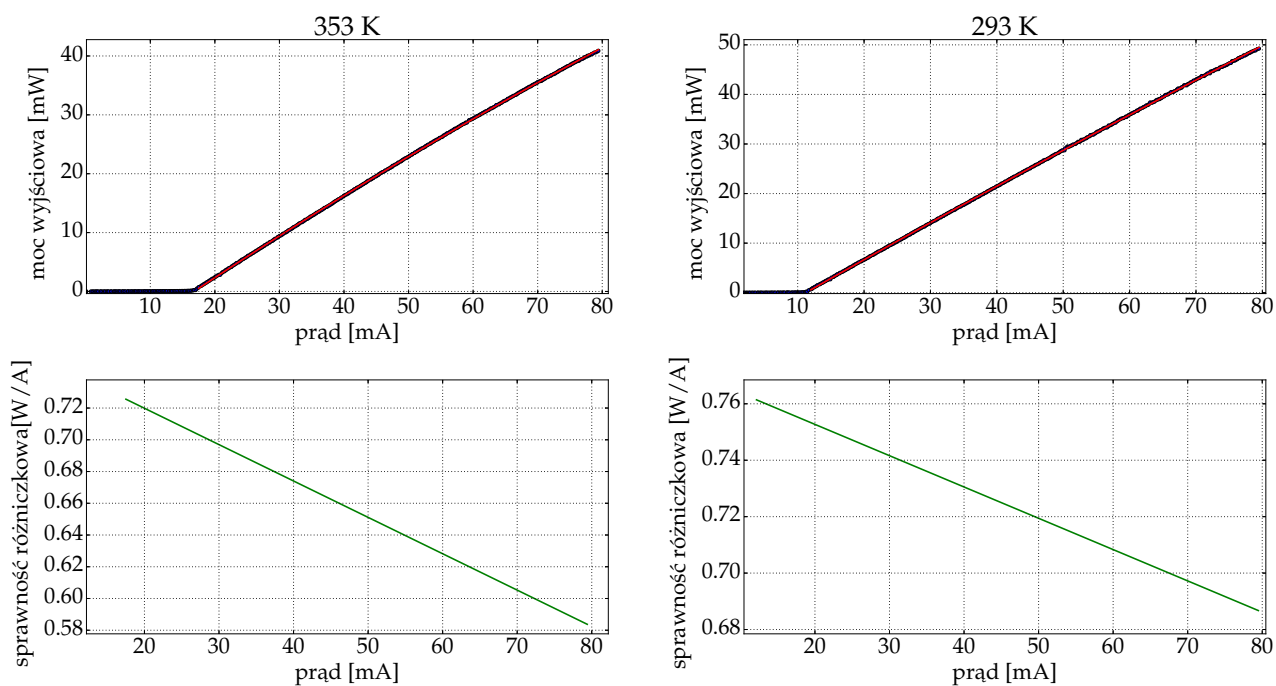
Rysunek 5.8. Wykres ilustrujący wyznaczanie prądu progowego dla lasera krawędziowego 850 nm.



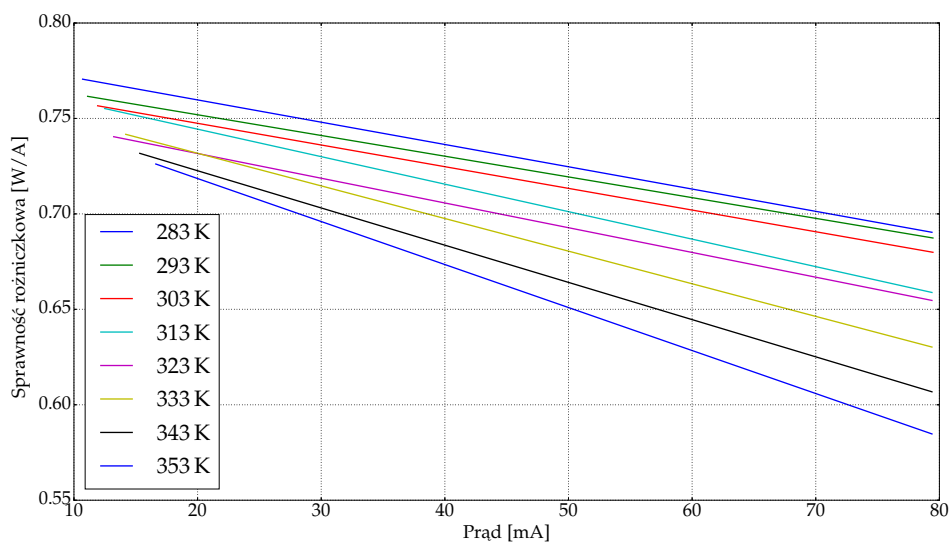
Rysunek 5.9. Wykres prądu progowego w zależności od temperatury chłodnicy z dopasowanymi wartościami I_0 i T_0 dla lasera krawędziowego 850 nm.



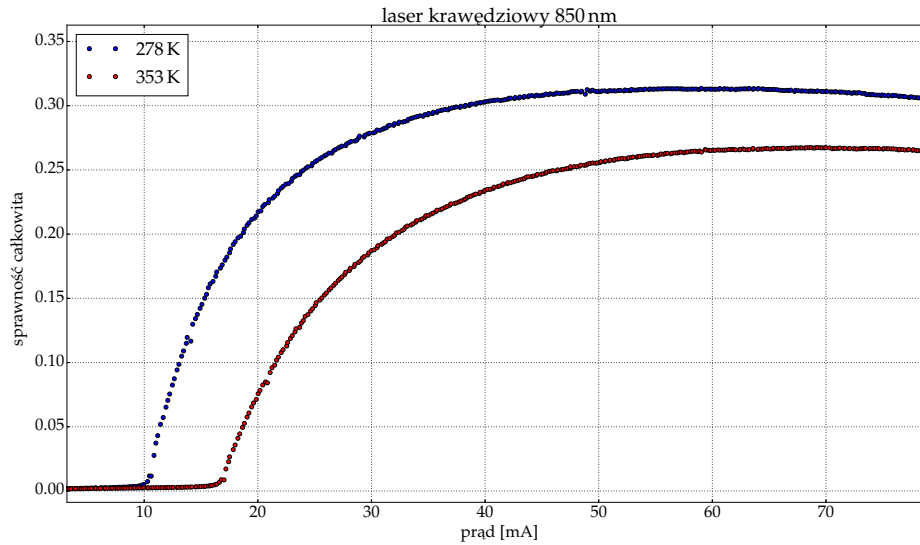
Rysunek 5.10. Wykres napięcia oraz mocy wyjściowej w funkcji prądu dla lasera krawędziowego 850 nm w różnych temperaturach.



Rysunek 5.11. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera krawędziowego 850 nm dla dwóch temperatur. U góry dopasowana funkcja, u dołu pochodna tej funkcji reprezentująca sprawność różniczkową.



Rysunek 5.12. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera krawędziowego 850 nm w różnych temperaturach.



Rysunek 5.13. Wykres sprawności całkowitej w funkcji prądu dla lasera krawędziowego 850 nm dla dwóch temperatur.

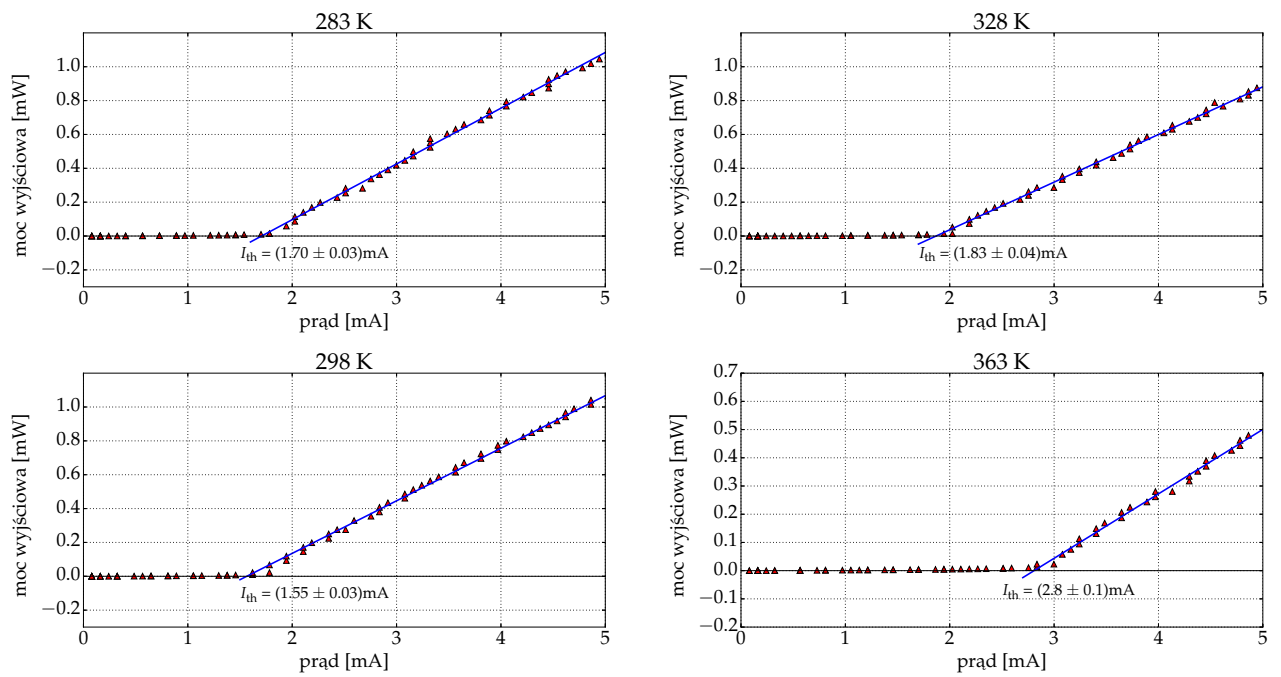
5.2.3. Laser VCSEL 850 nm — omówienie wyników

Pomiar przeprowadzany był w temperaturach chłodnicy od 283 K do 353 K z krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli (5.3). Rysunki od (5.14) do (5.19) dotyczą lasera VCSEL 850 nm.

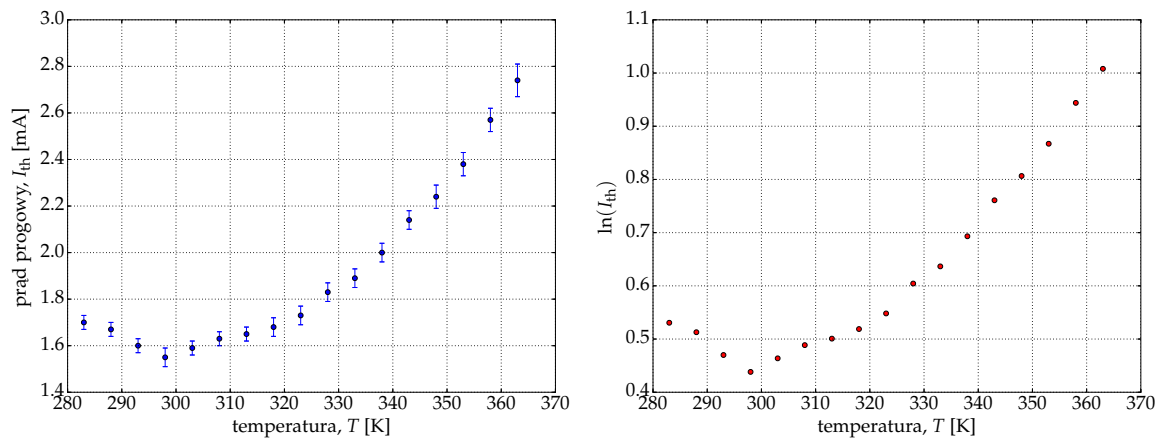
- Wykres na rysunku (5.14) przedstawia sposób wyznaczania wartości prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku (5.15). Jak widzimy, wykres ten charakteryzuje się pewnym minimum, które osiągane jest w temperaturze 298 K.
- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku (5.16) można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury na chłodnicy maleje opór lasera. Wraz ze wzrostem temperatury chłodnicy maleje, także moc wyjściowa lasera.
- Wykres na rysunku (5.17) przedstawia sprawność różniczkowa lasera w funkcji prądu wejściowego od temperatury na chłodnicy. W górnej części rysunku pokazana jest zależność mocy wyjściowej od prądu, do której dopasowałem funkcje kwadratową dla punktów leżących powyżej wartości prądu progowego. Zmiany sprawności wraz ze wzrostem prądu są dosyć duże w funkcji prądu.
- Wykres na rysunku (5.18) przedstawia, jak zmienia się sprawność lasera od temperatury chłodnicy. Funkcje, które przedstawiają sprawność zostały wyznaczone analogicznie jak te przedstawione na rysunku (5.17). Analizując ten wykres, dochodzę do wniosku, że wraz ze wzrostem temperatury sprawność lasera maleje.
- Wykres na rysunku (5.19) przedstawia sprawność całkowitą lasera w funkcji prądu. Jak widzimy, wraz ze wzrostem temperatury sprawność całkowita mocno spada.

Tabela 5.3. Wyznaczone wartości prądu progowego I_{th} w różnych temperaturach T dla lasera VCSEL 850 nm.

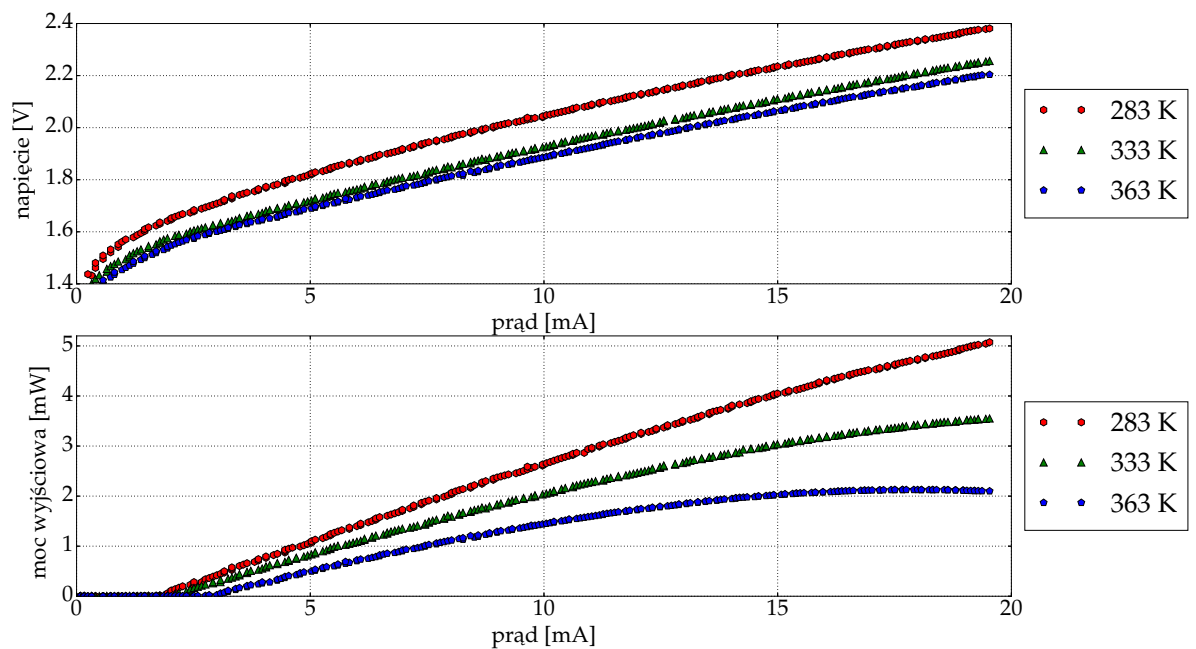
T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]
283	1.70 ± 0.03	288	1.67 ± 0.03	293	1.60 ± 0.03
298	1.55 ± 0.04	303	1.59 ± 0.03	308	1.63 ± 0.03
313	1.65 ± 0.03	318	1.68 ± 0.04	323	1.73 ± 0.04
328	1.83 ± 0.04	333	1.89 ± 0.04	338	2.01 ± 0.04
343	2.14 ± 0.04	348	2.24 ± 0.05	353	2.38 ± 0.05
358	2.57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



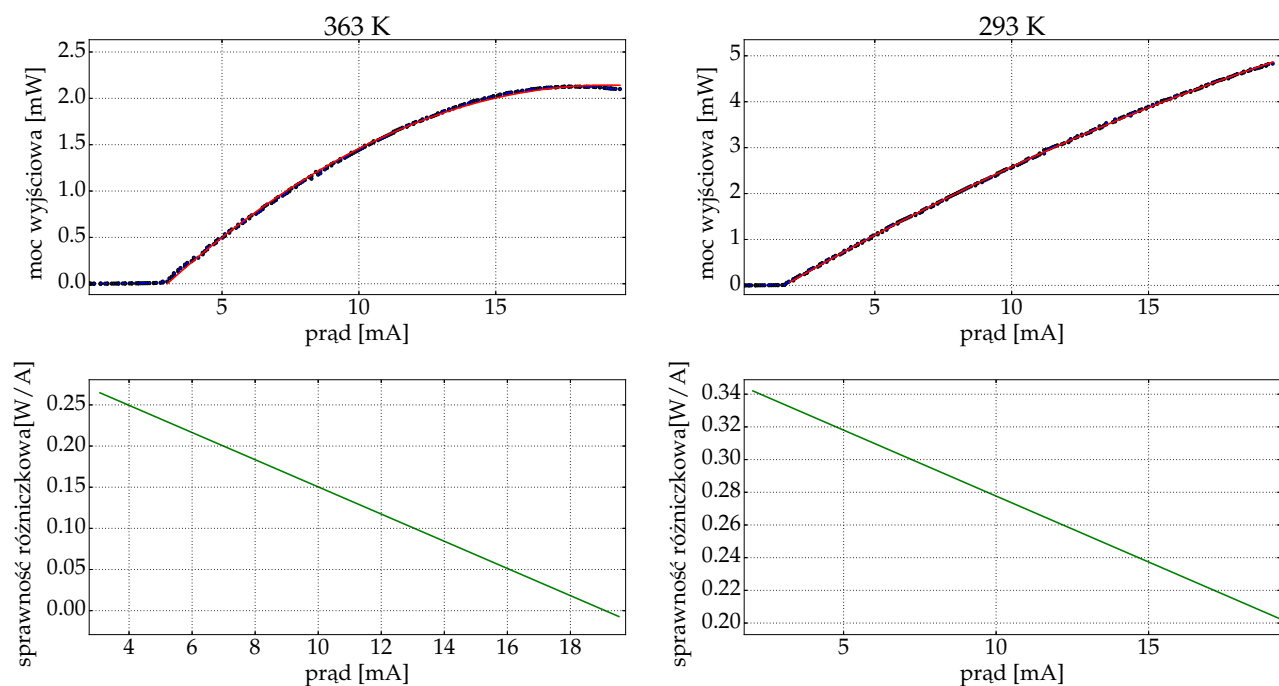
Rysunek 5.14. Wykres ilustrujący wyznaczenie prądu progowego dla lasera VCSEL 850 nm.



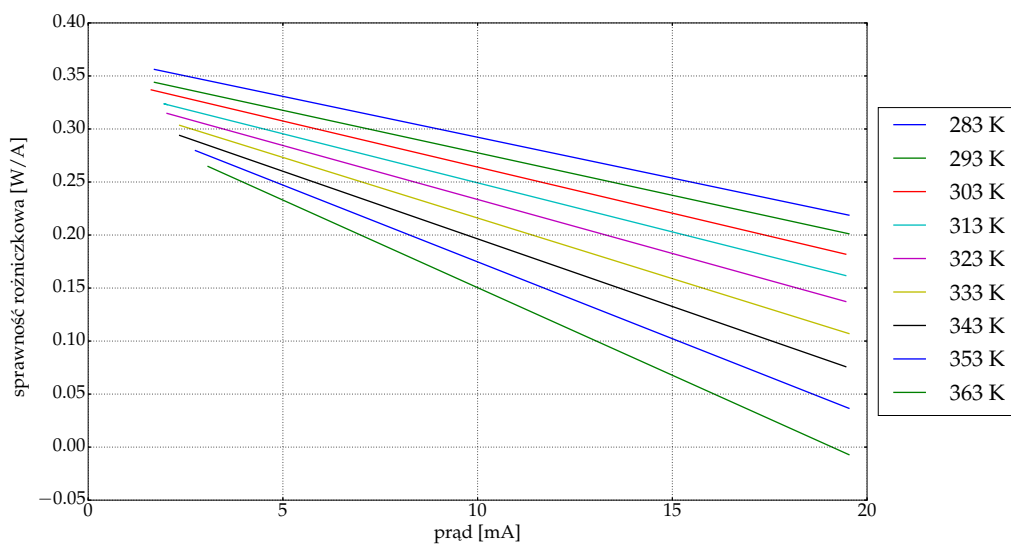
Rysunek 5.15. Wykres prądu progowego od temperatury dla lasera VCSEL 850 nm.



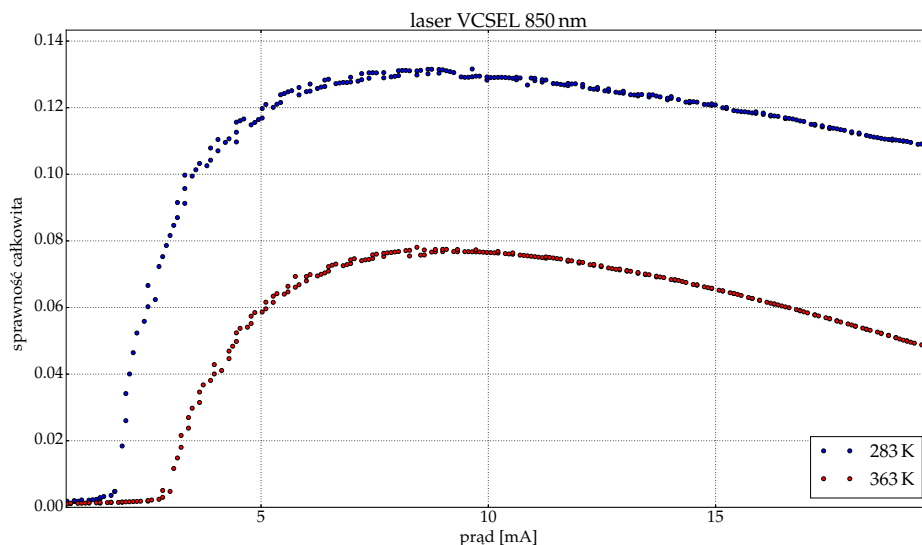
Rysunek 5.16. Wykres napięcia na laserze i mocy wyjściowej w funkcji prądu od temperatury chłodnicy dla lasera VCSEL 850 nm.



Rysunek 5.17. Sprawność różniczkowa dla lasera VCSEL 850 nm w różnych temperaturach.



Rysunek 5.18. Sprawność różniczkowa lasera VCSEL 850 w funkcji prądu dla różnych temperatur.



Rysunek 5.19. Wykres sprawności całkowitej w funkcji prądu dla lasera VCSEL 850 nm dla dwóch temperatur.

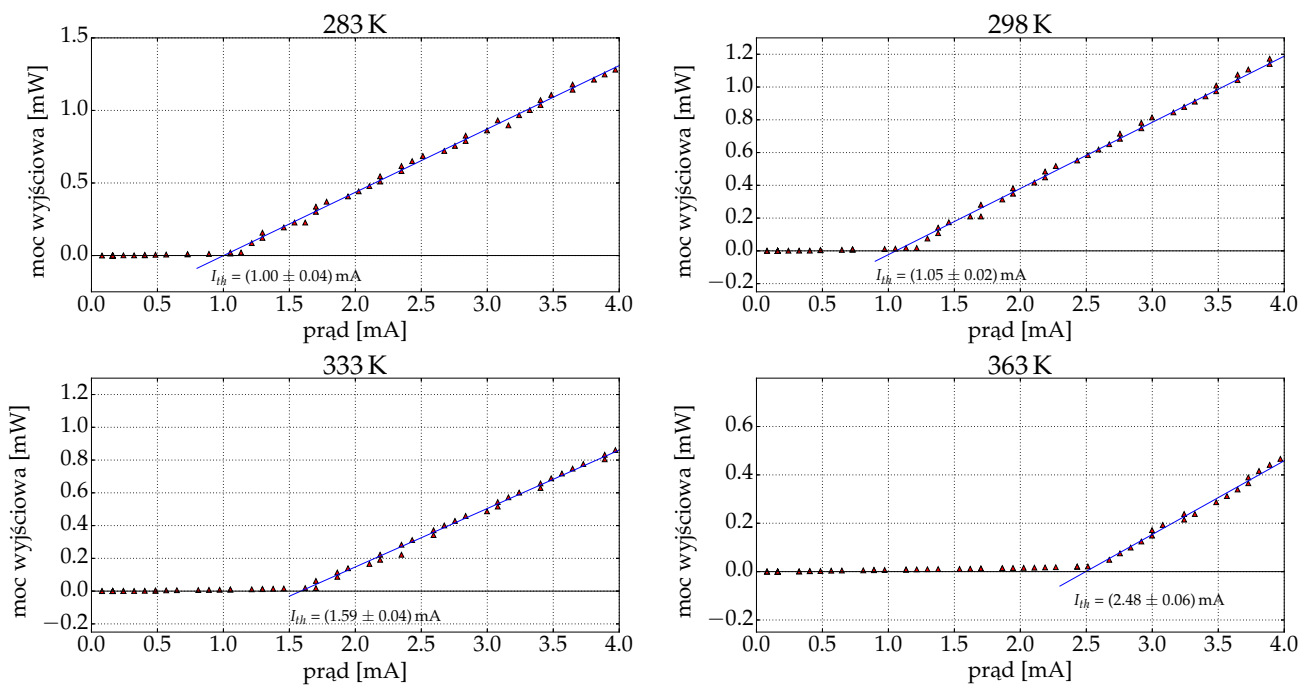
5.2.4. Laser VCSEL 980 nm — omówienie wyników

Pomiar przeprowadzany był w temperaturach chłodnicy od 283 K do 363 K z krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli (5.4). Rysunki od (5.20) do (5.25) dotyczą lasera VCSEL 980 nm.

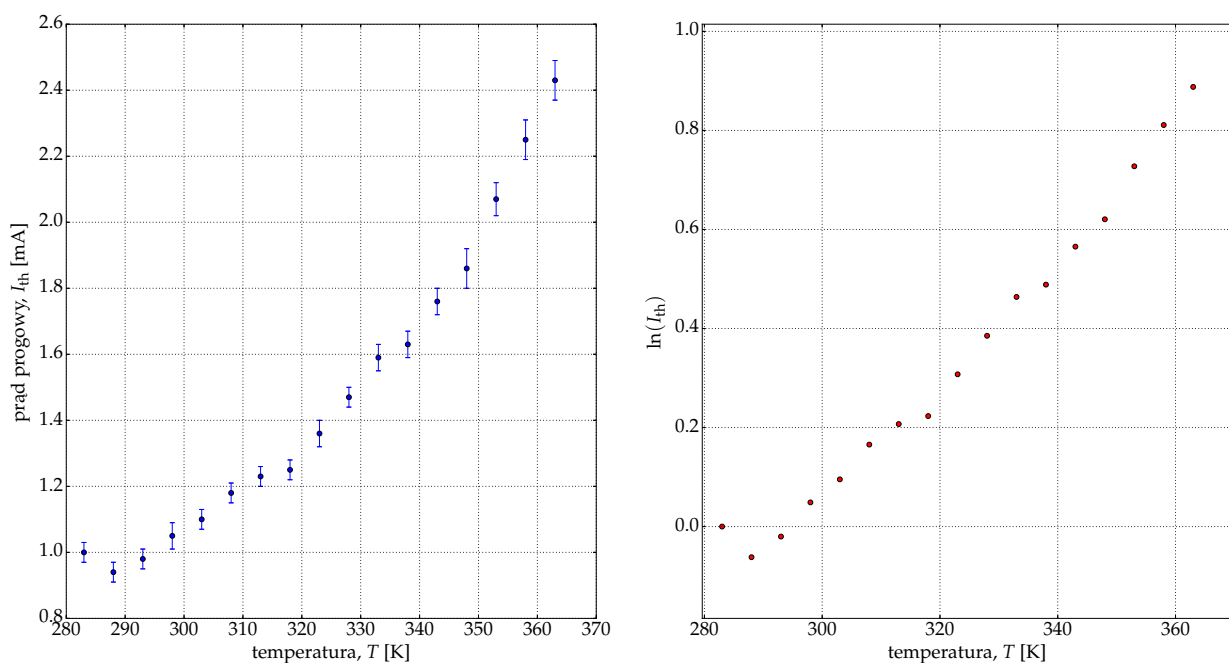
- Wykres na rysunku (5.20) przedstawia sposób wyznaczania wartości prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku (5.21). Jak widzimy wykres ten charakteryzuje się pewnym minimum osiągniętym w temperaturze 288 K.
- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku (5.22) 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 (5.23) przedstawia sprawność różniczkowa lasera w funkcji prądu wejściowego od temperatury na chłodnicy. W górnej części rysunku pokazana jest zależność mocy wyjściowej od prądu, do której dopasowałem funkcje kwadratową dla punktów leżących powyżej wartości prądu progowego. Zmiany sprawności wraz ze wzrostem prądu są dosyć duże.
- Wykres na rysunku (5.24) przedstawia, jak zmienia się sprawność lasera od temperatury chłodnicy. Funkcje, które przedstawiają sprawność zostały wyznaczone analogicznie jak te przedstawione na rysunku (5.23). Analizując ten wykres, dochodzę do wniosku, że wraz ze wzrostem temperatury sprawność lasera maleje.
- Wykres na rysunku (5.25) przedstawia sprawność całkowitą lasera w funkcji prądu. Jak widzimy, wraz ze wzrostem temperatury sprawność całkowita mocno spada.

Tabela 5.4. Wyznaczone wartości prądu progowego I_{th} w różnych temperaturach T dla lasera VCSEL 980 nm.

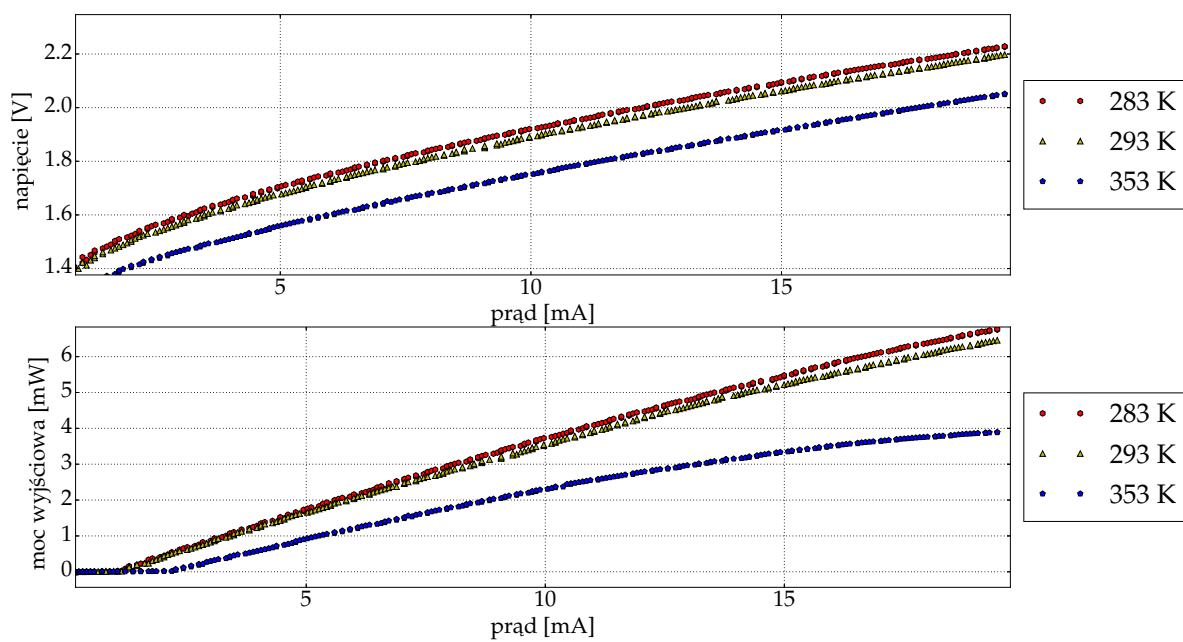
T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]
283	1.0 ± 0.04	288	0.94 ± 0.03	293	0.98 ± 0.03
298	1.05 ± 0.04	303	1.1 ± 0.03	308	1.18 ± 0.03
313	1.23 ± 0.03	318	1.25 ± 0.03	323	1.36 ± 0.04
328	1.47 ± 0.03	333	1.59 ± 0.04	338	1.63 ± 0.04
343	1.76 ± 0.04	348	1.86 ± 0.06	353	2.07 ± 0.05
358	2.25 ± 0.06	363	2.48 ± 0.06		



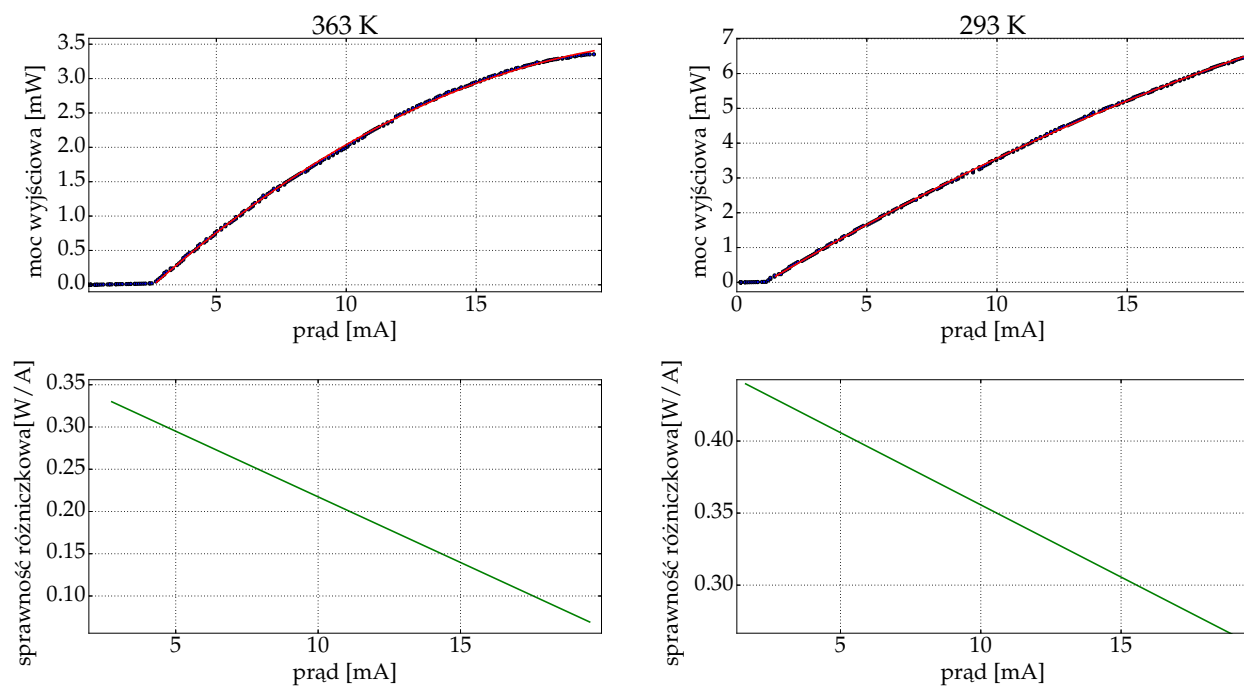
Rysunek 5.20. Wykres ilustrujący wyznaczanie prądu progowego dla lasera VCSEL 980 nm.



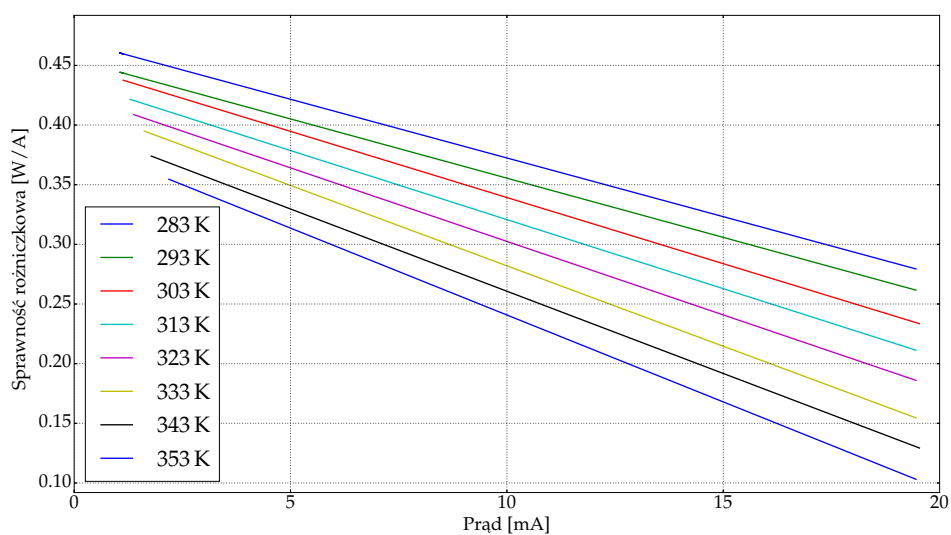
Rysunek 5.21. Wykres prądu progowego od temperatury dla lasera VCSEL 980 nm w skali liniowej oraz logarytmicznej.



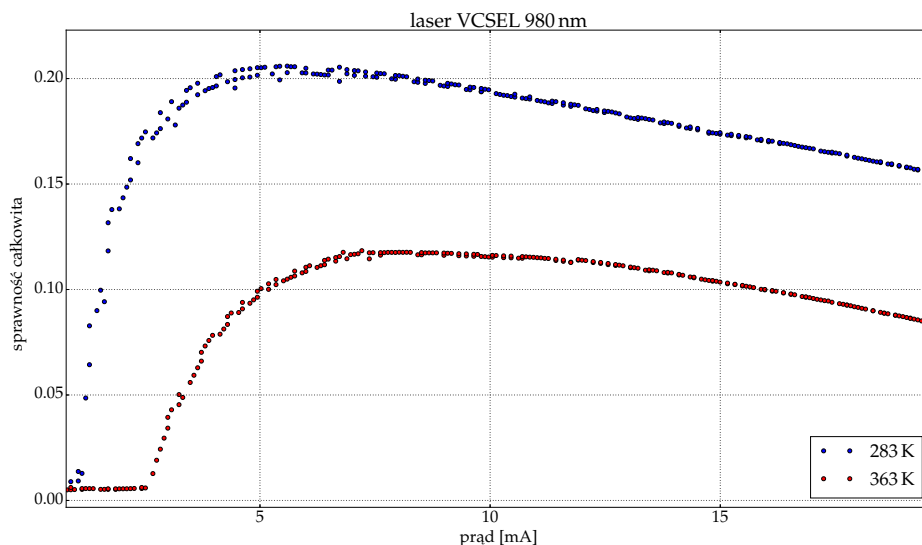
Rysunek 5.22. Wykres napięcia oraz mocy wyjściowej w funkcji prądu dla lasera VCSEL 980 nm.



Rysunek 5.23. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera VCSEL 980 nm w dwóch różnych temperaturach.



Rysunek 5.24. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera VCSEL 980 nm w różnych temperaturach.

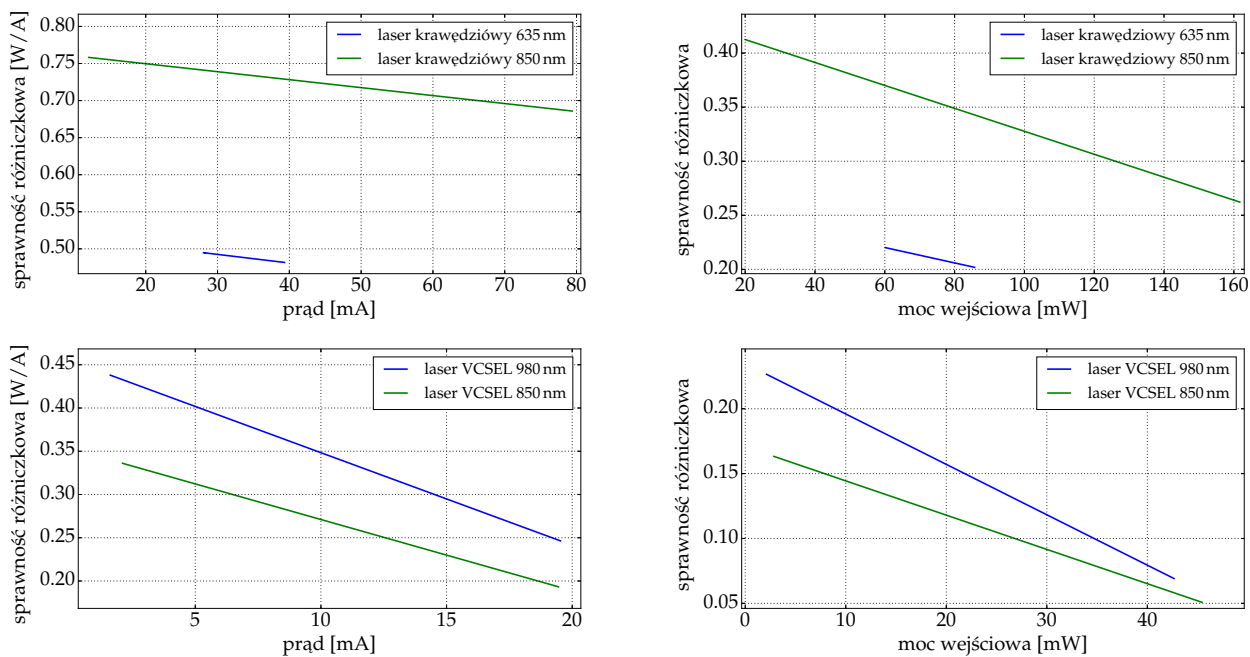


Rysunek 5.25. Wykres sprawności całkowitej w funkcji prądu dla lasera VCSEL 980 nm dla dwóch temperatur..

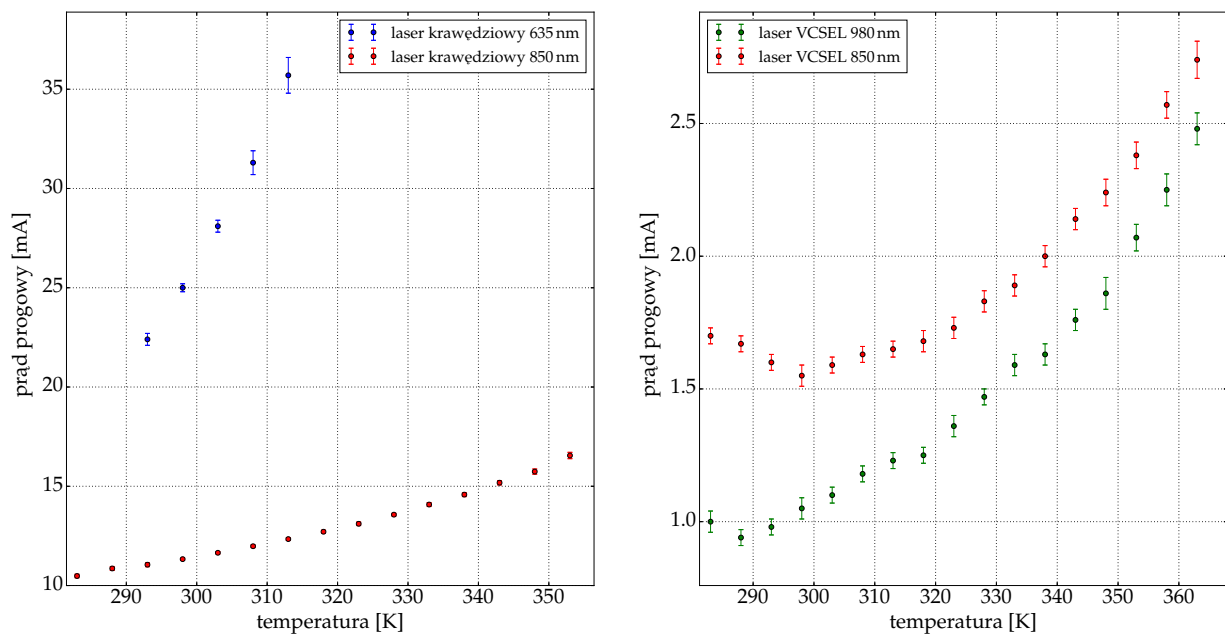
5.3. Porównanie laserów

Analizując pomiary dla 4 laserów, które przeprowadziłem, można wyciągnąć następujące wnioski:

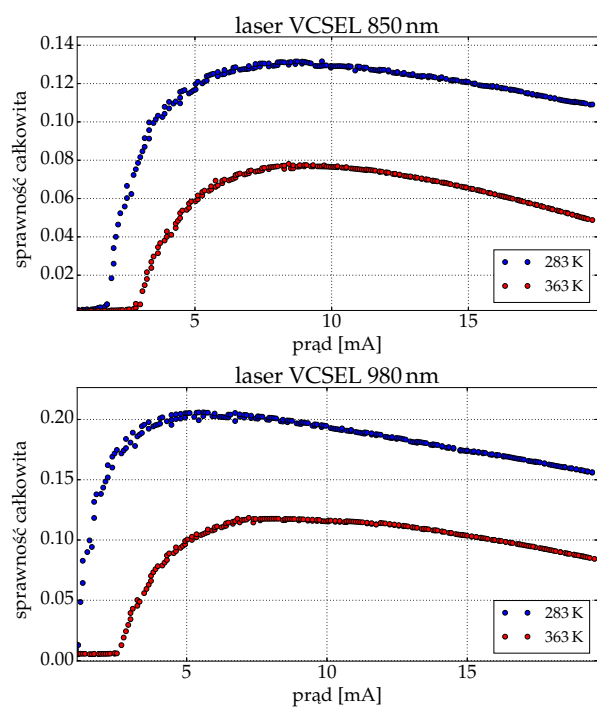
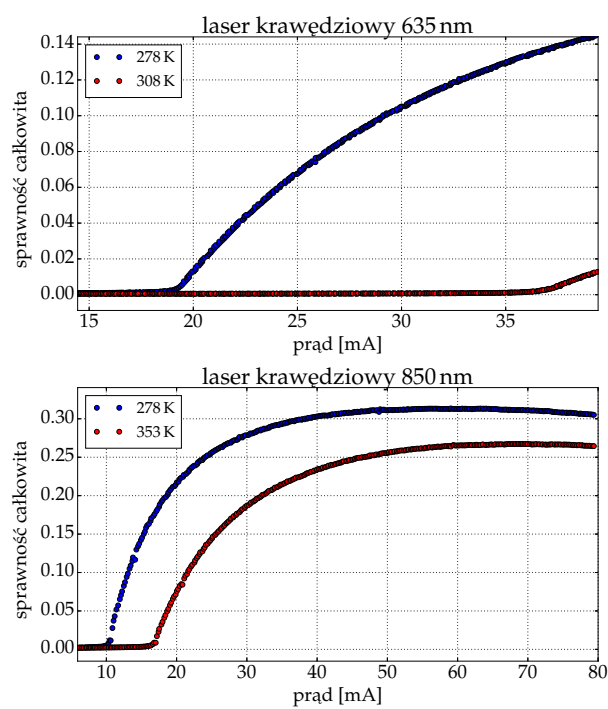
- Sprawność różniczkowa w funkcji zarówno prądu i mocy wejściowej jest większa dla laserów krawędziowych niż dla laserów VCSEL, co przedstawia wykres na rysunku 5.26.
- Prąd progowy dla laserów krawędziowych jest większy od prądu progowego dla laserów VCSEL, co przedstawia wykres na rysunku 5.27.
- Sprawność całkowita w niższych temperaturach jest większa, zarówno dla laserów VCSEL jak i krawędziowych, co przedstawia wykres przedstawionym na rysunku 5.28. Warto zauważyć, że dla laserów krawędziowych wraz ze wzrostem prądu sprawność całkowita spada, dla laserów VCSEL pozostaje ona stała.
- Tabele 5.5 - 5.8 zawierają porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności z wartościami katalogowymi firmy Thorlabs. Sprawności się zgadzają. Prąd progowy wyznaczony dla lasera krawędziowego 850 nm zgadza się. Dla laserów VCSEL wartość prądu progowego jest o 1 mA za mała, a dla lasera krawędziowego jest o 2 mA większa od maksymalnej wartości katalogowej, nie są to duże różnice, w dodatku wartość prądu progowego silnie zależy od temperatury.



Rysunek 5.26. Wykres sprawności różniczkowej w funkcji prądu oraz mocy wejściowej w temperaturze 298 K.



Rysunek 5.27. Wykres prądu progowego od temperatury.



Rysunek 5.28. Wykres sprawności całkowitej w funkcji prądu.

Tabela 5.5. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [12] w temperaturze 298 K dla lasera VCSEL 850 nm.

T [K]	Min	typowy	Max	wyznaczony
Prąd progowy [mA]	-	2.2	3	1.55 ± 0.04
sprawność [W/A] przy $I = 8$ mA	0.12	0.32	0.4	0.28 ± 0.01

Tabela 5.6. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [13] w temperaturze 298 K dla lasera VCSEL 980 nm.

T [K]	Min	typowy	Max	wyznaczony
Prąd progowy [mA]	-	2.2	3	1.05 ± 0.04
sprawność [W/A] przy $I = 8$ mA	0.12	0.32	0.4	0.37 ± 0.01

Tabela 5.7. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [14] w temperaturze 298 K dla lasera krawędziowego 850 nm.

T [K]	Min	typowy	Max	wyznaczony
Prąd progowy [mA]	10	25	40	11.33 ± 0.05
sprawność [W/A]	0.3	0.5	0.7	0.5 ± 0.1

Tabela 5.8. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [15] w temperaturze 298 K dla lasera krawędziowego 635 nm.

T [K]	Min	typowy	Max	wyznaczony
Prąd progowy [mA]	-	16	26	27.9 ± 0.3
sprawność [W/A]	0.4	0.6	1	0.8 ± 0.1

6. Podsumowanie

6.1. Rezultat pracy

W ramach pracy stworzyłem program do sterowania pomiarami charakterystyk elektryczno-optycznych laserów półprzewodnikowych. Program stworzony jest w dwóch wersjach: skryptowej oraz okienkowej. Program został napisany w języku Python w sposób obiektowy, co ułatwi pracę nad nim w przyszłości. Praca moja wypełniła lukę, którą był brak programu do sterowania sprzętem firmy Thorlabs na platformie Linux. W ramach pracy zbadałem 4 lasery półprzewodnikowe: dwa krawędziowe oraz dwa VCSEL. Wyzaczyłem dla nich wartość prądu progowego oraz sprawności, które dobrze zgadzają się z wartościami z katalogu firmy Thorlabs. Otrzymane wyniki przemawiają, za możliwością wykorzystania mojego programu do badania charakterystyk laserów.

Analizowane lasery krawędziowe charakteryzowały się dużo większą wartością prądu progowego I_{th} niż lasery typu krawędziowego. Wartość prądu progowego dla laserów krawędziowych rośnie wraz z temperaturą, zależność tą można opisać równaniem 4.6. Zjawisko wzrostu wartości prądu progowego wraz z temperaturą I_{th} spowodowane jest zjawiskami, które można wyjaśnić na podstawie teorii pasmowej ciał stałych.

Drugą badaną cechą laserów półprzewodnikowych była ich sprawność. Wraz ze wzrostem temperatury, sprawność laserów malała. Taki wynik zgodny jest z przewidywaniami. Procesy fizyczne odpowiedzialne za to zjawisko można wytłumaczyć m.in. przy pomocy rozkładu Fermiego-Diraca.

6.2. Co dalej?

Możliwa jest dalszy rozwój programu m.in. o sterowanie zasilaniem impulsowym. Dołączenie oscyloskopu do układu pomiarowego pozwoli badać więcej cech laserów półprzewodnikowych. Komunikacja z oscyloskopem będzie możliwa za pomocą klasy `IODEVICE.py`.

Bibliografia

- [1] A. Devert: matplotlib Plotting Cookbook, Packt Publising Ltd. 2014
- [2] E. Bressert: Scipy and NymPy, O'Reilly 2013
- [3] Thorlabs Manual: LDC4000 Series Operation Manual, 2016
- [4] Thorlabs Manual: Series 4000 SCPI Programmer's Reference Manual, 2015
- [5] Thorlabs Manual: Operation Manual Thorlabs Instrumentation Optical Power and Energy Meter PM100 USB, 2011
- [6] B. Ziętek: Optoelektronika, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2004
- [7] B. Ziętek: Lasery, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2009
- [8] Włodzimierz Nakwaski, Robert P. Sarzała: Lasery półprzewodnikowe Przegląd Elektrotechniczny 2015 9
- [9] Magdalena MARCINIAK, Patrycja ŚPIEWAK, Marta WIĘCKOWSKA, Robert Piotr SARZAŁA: Mody poprzeczne w azotkowym laserze typu VCSEL Przegląd Elektrotechniczny 2015 9
- [10] B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, R. E. Leibenguth, F. M. Baez, Y. H. Leec: Temperature dependence of GaAs-AlGaAs vertical cavity surface emitting lasers 1991
- [11] Michał Baranowski: Dynamika nośników w półprzewodnikowych studniach kwantowych na podłożu z GaAs, emitujących w zakresie bliskiej podczerwieni. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska Instytut Fizyki, Wrocław 2013
- [12] Thorlabs: MFG Spec, VCSEL-980-MFGSpec
- [13] Thorlabs: MFG Spec, VCSEL-980-MFGSpec
- [14] Thorlabs Spec Sheet L850P010-SpecSheet
- [15] Thorlabs Spec Sheet L635P003-SpecSheet