

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ,
INFORMATYKI I MATEMATYKI STOSOWANEJ

PRACA INŻYNIERSKA
kierunek: FIZYKA TECHNICZNA

Wykorzystanie oprogramowania open source do sterowania
pomiarami charakterystyk elektryczno-optycznych 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 — idealne narzędzie dla fizyka	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	13
4.1.5. Prąd progowy	14
4.1.6. Sprawność	15
4.1.7. Funkcja Fermiego	16
5. Opis eksperymentu	17
5.1. Układ pomiarowy	17
5.1.1. Przebieg pomiarów	17
5.2. Eksperyment	19
5.2.1. Laser krawędziowy 635 nm — omówienie wyników	19
5.2.2. Laser krawędziowy 850 nm — omówienie wyników	22
5.2.3. Laser VCSEL 850 nm — omówienie wyników	26
5.2.4. Laser VCSEL 980 nm — omówienie wyników	29
5.3. Porównanie laserów	33
6. Podsumowanie	36
6.1. Rezultat pracy	36
6.2. Co dalej?	36
Bibliografia	37

1. Wstęp

Niniejsza praca dotyczy zakresu inżynierii oprogramowania sprzętu pomiarowego w celu wykorzystania go w badaniu 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 chrakterystyk 4 laserów półprzewodnikowych.

W ostatnich latach obserwuje się gwałtowny rozwój wykorzystania oprogramowania open source w codziennej pracy naukowej. Coraz większą popularność zdobywa język Python. Od dawna podstawowym systemem operacyjnym używanym przez naukowców są różne odmiany systemu Unix. Jest to spowodowane dostępnością wielu narzędzi (C, Python, Gnuplot) których naturalnym środowiskiem jest środowisko Linux, ułatwiającym pracę naukową. Inną zaletą środowiska Unix jest możliwością korzystanie z linii poleceń, która ułatwia wiele zadań. Szukając informacji o wykorzystaniu języka Python do komunikacji ze sprzętem pomiarowym można zauważyć pewną lukę, którą moja praca ma cel wypełnić. Korzystając z strony oraz dokumentacji firmy Thorlabs, której sprzęt jest używany w laboratorium fononiki, należy zauważyć brak programów do komunikacji ze sprzętem na platformie Linux. Dostępne są jedynie wysokopoziomowe API do systemu Windows oraz możliwość użycia LabVIEW. Minusów środowiska Windows nie sposób wymienić w kilku zdaniach. Program LabVIEW jest programem płatnym. Rozwiązaniem wszystkich problemów jest użycie środowiska Linux, gdzie 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. Dzięki temu mamy możliwość dostępu do wszystkich możliwych funkcji sprzętu pomiarowego bez ponoszenia kosztów. Umożliwia nam to sterowanie sprzętu za pomocą komputera oraz wizualizację i analizę danych w sposób, jaki potrzebujemy. A wszystko to dzięki połączeniu możliwości środowiska Linux oraz języka Python

Dzięki mojej pracy możliwe będzie wykonywanie w szybki sposób charakterystyk laserów półprzewodnikowych. Charakterystyki te dają nam ważne informacje o laserze, dzięki nim możliwe jest określenie prądu progowego dla laserów krawędziowych, określenie ich sprawności.

Praca jest podzielona na dwie części: jedna składa się z opisu przygotowania eksperymentu, komunikacji oraz sterowaniem urządzeniami laboratoryjnymi za pomocą programu napisanego w języku Python. Druga część pracy opisuje badanie laserów półprzewodnikowych na podstawie danych uzyskanych za pomocą programu przedstawionego w pierwszej części programu. Do wykreślenia charakterystyk wyjściowych oraz wyznaczenia sprawności badanych laserów używam skryptów napisanych w języku Python.

2. Komunikacja z urządzeniami pomiarowymi przy wykorzystaniu oprogramowania open source

2.1. Oprogramowanie open source

Otwarte oprogramowanie (ang. open source) jest odłamem ruchu darmowego oprogramowania (ang. free software), którego głównym celem jest możliwość swobodnego dostępu do oprogramowania dla wszystkich. Jawny musi być kod źródłowy. Przykładami takiego oprogramowania, które wykorzystuje w swojej pracy jest:

- System Linux (Ubuntu)
- Język programowania Python

2.2. Python — idealne narzędzie dla fizyka

Język Python jest jednym z najpopularniejszych języków używanych w nauce. Jest on projektem Open Source. Posiada łatwą składnię, dzięki czemu jest się łatwy w nauce, a programy pisane w nim są przejrzyste. Dzięki ogromnej ilości modułów, możliwe jest wykonywanie niemalże każdej czynności jakom się potrzebuje. Python używany jest między innymi w eksperymencie mający za cel znalezienie fal grawitacyjnych. W mojej pracy wykorzystywałem ten język zarówno do pisania skryptów mających na celu komunikację i sterowaniem sprzętem laboratoryjnym, jak i wykorzystywałem do analizy danych uzyskanych w wyniku pomiarów. Najważniejsze biblioteki, które użyłem do swoich celów to:

- **Matplotlib** [1] — bibliotek do sporządzania wykresów, posiada między innymi możliwość używania symboli \LaTeX . Możliwość wykonywania animacji co używane do robienia wykresów w czasie rzeczywistym.
- **Scipy** [2] — bibliotek do obliczeń numerycznych. Funkcje z niej używałem w celu dopasowywania funkcji dla zebranych danych aby wyznaczyć wartość prądu progowego oraz sprawności.
- **OS** — bibliotek 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 się ze sprzętem, a drugi w tym samym czasie na podstawie zebranych danych tworzył wykres w czasie rzeczywistym.

Python posiada także biblioteki (np. **Shutil**) do operowania plikami (jak przenoszenie, usuwanie) co jest często przydatne. Połączenie bibliotek wymienionych powyżej

umożliwiło stworzenia programu, który komunikuje i steruje sprzętem. 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 współpracowały z Python 2.7, więc interfejs pomiarowy został napisany w Python 2.7.

2.3. Programowane urządzenia pomiarowe

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

- Zasilacza diód laserowych firmy Thorlabs model LDC4005.
- Miernik mocy firmy Thorlabs 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

W systemach Unix z którego dziedziczy system Linux, 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 użytkownicy może sterować sprzętem. Do używania wywołań systemowych potrzebny jest identyfikator do danego urządzenia, który jest reprezentowany przez deskryptor pliku, będący liczbą całkowitą. 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 buffora 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) — międzynarodowa organizacja stowarzyszeń inżynierów elektryków i

elektroników. 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`. Polecenia są serią jednego lub więcej słów, przy czym wiele z nich używa dodatkowych parametrów. Odpowiedzi do zapytania polecenia są zazwyczaj ciągami ASCII. W przypadku danych masowych mogą być zwracane także formaty binarne.

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

- Polecenia dla każdego urządzenia pomiarowego nie zależnie 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:
 - Służące do 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, USB. W przypadku mojej pracy, do komunikacji ze sprzętem używam 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 danego urządzenia, co umożliwia sterowanie danym 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. Do jej obsługi wymagane jest podanie ścieżki do urządzenia.
- `LDC4005.py` — klasa zawierająca funkcje od obsługi zasilacza diód laserowych Thorlabs LDC4005. Implementacja funkcji oparta jest na poleceniach SCPI dla LDC4005 [4].
- `PM100.py` — klasa zawierająca funkcje do obsługi detektora 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).

Pierwszy 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

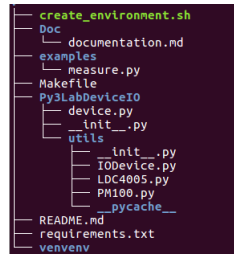
Skrypt przedstawiony na listingu 4 w liniach 1-3 importuje potrzebne moduły, ważne, aby moduły LDC4005.py oraz PM100.py znajdowały się w tym samym folderze co `measure.py`. W linii 6 deklarujemy tablicę 20 elementów o wartościach prądu od 0 do 0.02 A. Następnie w liniach 8-10 deklarujemy tablice do przechowywania 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. Następnie w linii 20 ustawiamy prąd na zasilaczu, w 21 czytamy prąd z zasilacza, w 22 czytamy napięcie, a w 23 czytamy moc wyjściową na mierniku mocy. Ostatni etapem jest zapisanie danych do pliku tekstowego w linii 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.

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.

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

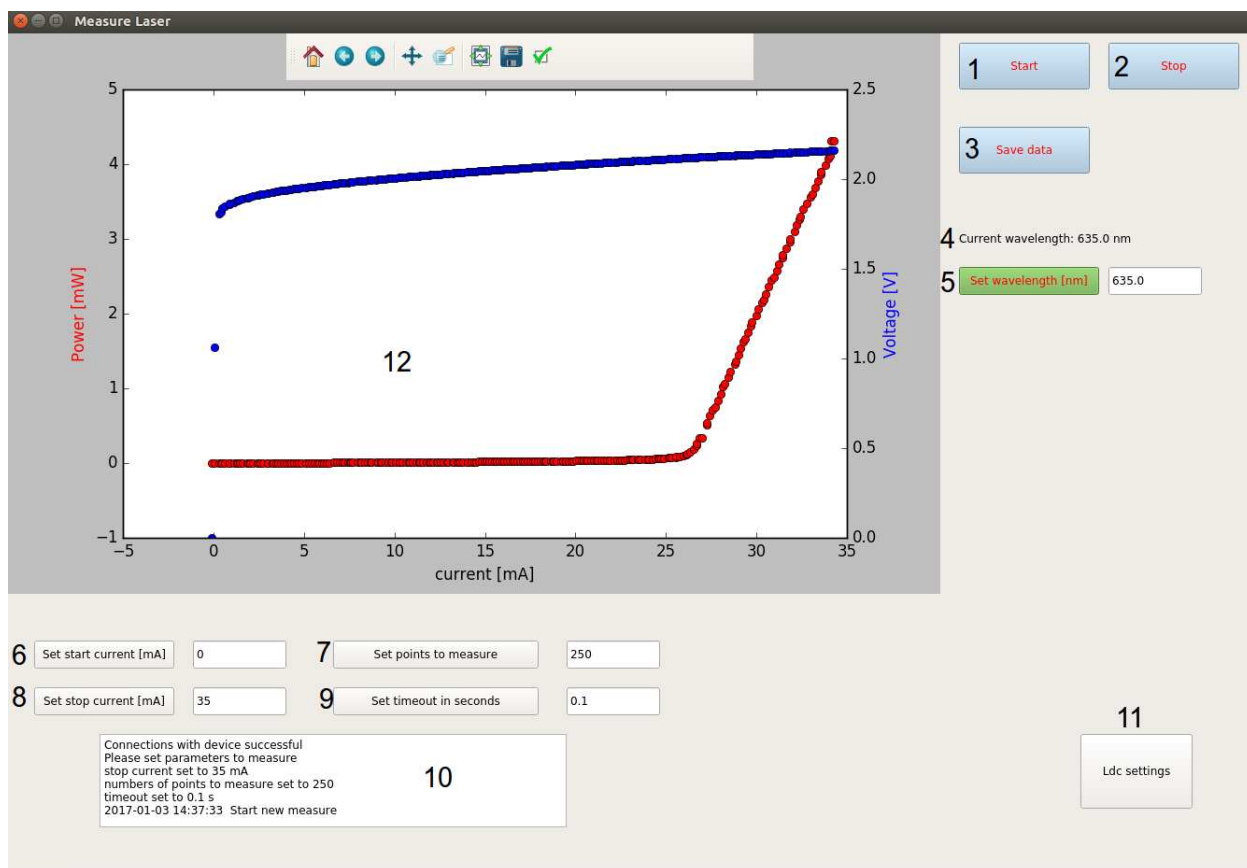
- nr: liczba punktów do pomiaru
- sc: początkowa wartość prądu w mA, od którego należy rozpocząć pomiar
- ec: wartość prądu w mA do którego przeprowadza się pomiar.
- fn: nazwa wynikowa pliku z danymi, która będzie zapisana w katalogu `output`

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

Listing 3.7.

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 formacie 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, do jakiego ma się odbyć pomiar w mA.

- 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 wyrażanych w eV. Najważniejszą przerwą, która ma wpływ na właściwości elektryczne ciała jest przerwa pomiędzy pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa tzw. przerwa energii wzbronione E_g . Ze względu na szerokość przerwy wyróżniamy [7]:

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

Wartość przerwy energetycznej maleje z temperaturą według zależności [7]:

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

gdzie: E_{g0} — wartość przerwy energetycznej w temperaturze $T = 0 \text{ K}$,
 $\alpha = 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$. Wartość parametru β jest dodatnia i zależy od rodzaju półprzewodnika, 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 częstotliwości widma oraz potrafią generować promieniowanie o dużych mocach. Aby móc udoskonalać potrzebne są prace zarówno teoretyczne, jak i doświadczalne. Praca ta skupia się na części doświadczalnej. Lasery półprzewodnikowe znajdują zastosowanie w telekomunikacji, zapisie informacji. Zalety laserów półprzewodnikowych:

- małe wymiary
- łatwość modulacji emitowanego promieniowania
- niezawodność pracy
- proste zasilanie

Lasery półprzewodnikowe inaczej nazywane kwantowe generatory optyczne są laserami złączowymi. Lasery te są źródłem monochromatycznego oraz skolimowanego promieniowania spójnego. W tego typu laserach ośrodkiem aktywnym jest półprzewodnik. Obszar czynny zazwyczaj ograniczony jest do wąskiego paska oraz położony jest w płaszczyźnie złącza p-n. Pompowanie uzyskiwane jest przez wstrzykiwanie mniejszościowych nośników ładunku do obszaru p-n, które spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia. Rezonator jest zazwyczaj w kształcie prostopadłościanu o wymiarach ułamków 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). 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 których 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, czyli stanu w którym liczba cząstek o wyższej energii jest większa niż cząstek o energiach niższych. Zażęcie inwersji obsadzeń pozwala wywołać akcję laserową. Emitowana wiązka światła charakteryzuje się niewielką rozbieżnością kątową (kilku stopni). Wśród laserów półprzewodnikowych wyróżniamy: lasery VCSEL oraz lasery o emisji krawędziowej.

W półprzewodniku występuje także wiele mechanizmów rekombinacji niepromienistej [10], w których energia wzbudzenia zamieniana jest na drgania sieci krystalicznej, jednym z takich procesów jest rekombinacja Auger. W procesie rekombinacji Auger energia, która powstała na skutek rekombinacji elektronu z dziurą jest przekazywana trzeciej cząstce: elektronowi lub dziurze, która wzbudzana jest na wyższy poziom w obrębie swojego pasma. Wzbudzona w ten sposób cząstka na skutek relaksacji emituje fonony, wraz ze wzrostem temperatury emisja fononów jest większa. Proces ten ma duże znaczenie dla sprawności laserów półprzewodnikowych oraz dla wartości prądu progowego.

4.1.3. Laser VCSEL

Lasery 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]. Zaletami laserów VCSEL [8] są

- mała rozbieżność wiązki promieniowania,
- naturalna praca na pojedynczym modzie podłużnym

Wadami laserów VCSEL [8] są

- bardzo niskia moc promieniowania wyjściowego
- Stosunkowa wysoka wartość oporności elektrycznej i cieplnej

4.1.4. Laser o emisji krawędziowej

Laser krawędziowy są to laser z wnętrza w płaszczyźnie warstwy aktywnej. W tego typach laserów promieniowanie wędruje w rezonatorze między jego zwierciadłami,

jednocześnie cały czas znajdując się wewnątrz ośrodka czynnego. Zaletami laserów krawędziowych są:

- Stosunkowa wysoko moc wiązki wyjściowej[8],
- Stosunkowa wysoka sprawność.

Wadami laserów krawędziowych są [8]:

- wzbudzenie się wielu modów podłużnych,
- rozbieżna wiązka promieniowania, która wykazuje astygmatyzm.

4.1.5. Prąd progowy

Charakterystyka wyjściowa lasera przedstawia zależność napięcia na laserze oraz mocy wyjściowej w funkcji aplikowanego 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(4.2) znaleźć parametry prostej o parametrach a i b . Dla wyznaczonej krzywej należy znaleźć miejsce zerowe, które będzie wyznaczonym prądem progowym 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, co może być scharakteryzowane za pomocą parametru T_0 wyrażonego w kelwinach tzw. temperatury charakterystycznej [6]. Dla laserów krawędziowych zależności prądu progowego I_{th} od temperatury T wyrażamy w postaci równania:

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

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 .

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

$$y = a \cdot T + b \quad (4.8)$$

Gdzie:

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

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

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

Na tej podstawie możemy znaleźć poszukiwane parametry I_0 oraz T_0 :

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

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

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

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

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

Dla laserów VCSEL nie można zastować powyżej zależności (4.2).

4.1.6. Sprawność

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

- Sprawność różniczkowa (ang. slope efficiency) — jest zdefiniowana jako nachylenie krzywej uzyskanej przez wykreślenie zależności mocy wyjściowej P_{wy} z lasera versus energii dostarczonej do lasera w postaci 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.

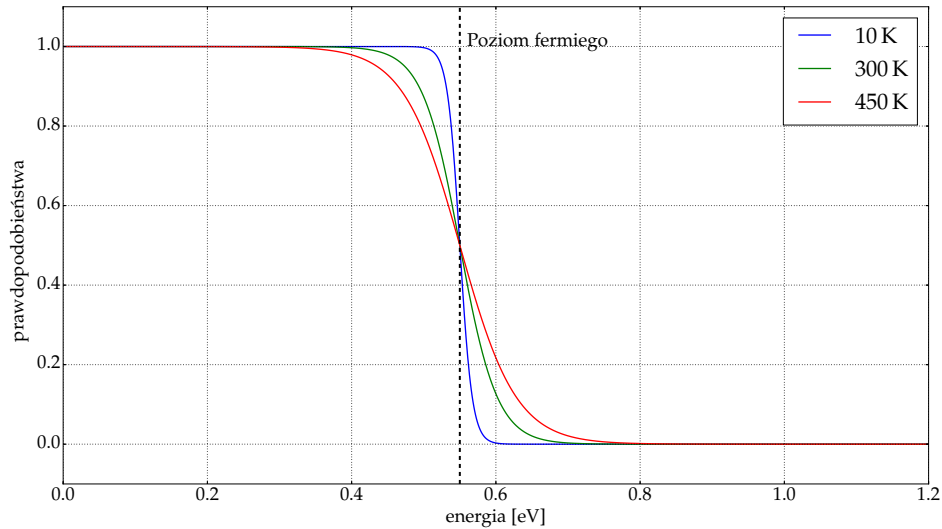
4.1.7. Funkcja Fermiego

Na sprawność laserów półprzewodnikowych duży wpływ ma funkcja rozkładu Fermiego-Diraca przedstawiony na rysunku 4.1. Funkcja Fermiego-Diraca opisuje prawdopodobieństwo obsadzenia przez elektron poziomu energetycznego E przy temperaturze T

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (4.17)$$

gdzie: E_f — energia Fermiego.

Energia Fermiego — jest to energia najwyższego obrózanego pasma w temperaturze 0 K. Reprezentuje średnią pracę jaką należy wykonać, aby usunąć elektrony z materiału. W temperaturze 0 K poziom energii Fermiego dla samoistnego półprzewodnika znajduje się pośrodku pasmo walencyjnego i pasmo przewodnictwa. Wraz ze wzrostem temperatury przesuwa się w kierunku pasmo przewodnictwa, gdy jest przewodnictwo elektronowe lub w kierunku pasmo walencyjnego dla przewodnictwa dziurowego. Zgodnie z równaniem 4.17 wraz ze wzrostem temperatury rośnie prawdopodobieństwo obsadzenia wyższych stanów energetycznych przez elektron. Ma to negatywny wpływ na sprawność różniczkową lasera półprzewodnikowego. Ponieważ gdy temperatura rośnie, to więcej stanów o wyższych energiach jest obsadzane, konsekwencją tego faktu jest mniejsza energia emitowanego promieniowania powstającego na skutek rekombinacji promienistej.



Rysunek 4.1. Rozkład fermiego dla różnych temperatur T .

5. Opis eksperymentu

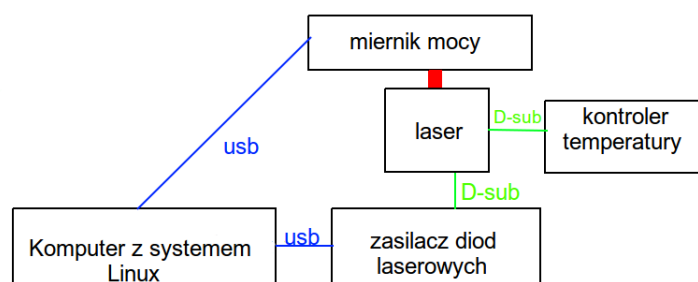
5.1. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy składał się z:

- Komputera z systemem Linux (Ubuntu) — wymagany 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 diód laserowych firmy Thorlabs model LDC4005 [3] — zapewnia stabilne zasilanie prądowe laserów prądem do 5 A. Możliwe jest zasilanie ciągłe i impulsywne. Posiada interfejsem SCPI [4], umożliwiającą 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], umożliwiającą sterowanie za pomocą komputera przez USB.
- Kontroler temperatury diód 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 diód laserowych połączonych z zasilaczem diód 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



Rysunek 5.1. Schemat układu pomiarowego.

laserze oraz mocy wyjściowej) mierzone były pod falą ciągłą prądu. Wyniki zapisywane były w pliku tekstowym.

5.2. Eksperyment

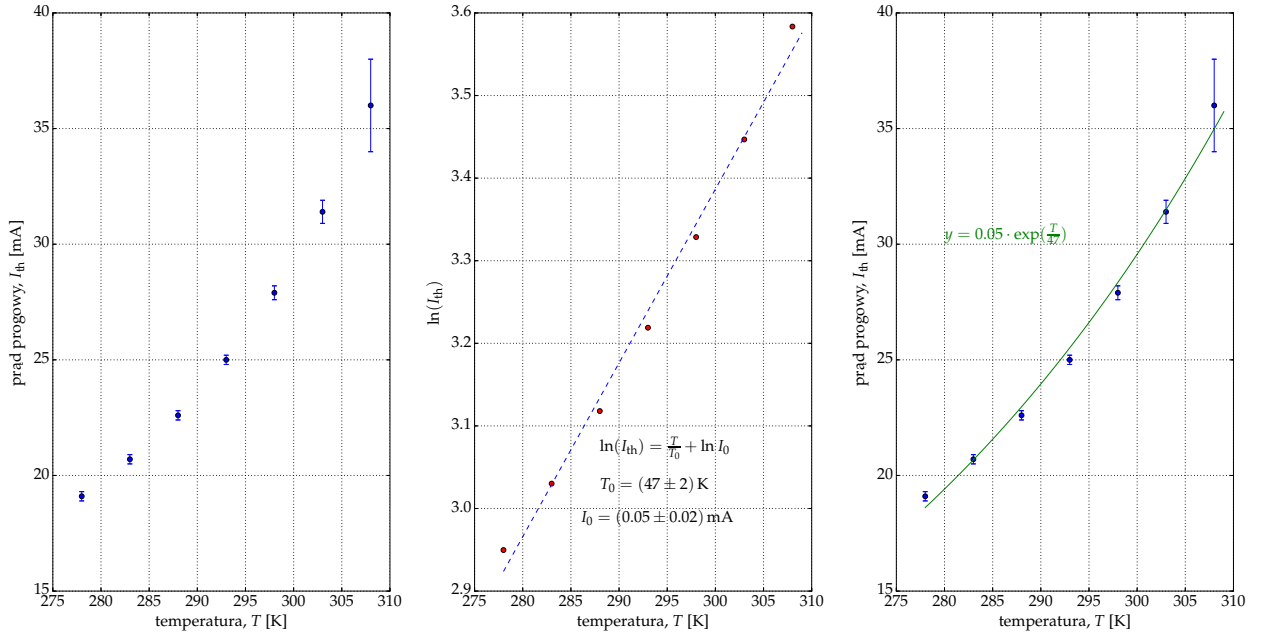
5.2.1. Laser krawędziowy 635 nm — omówienie wyników

Pomiar przeprowadzany był w temperaturach chłodnicy od 278 K do 308 K, krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli 5.2.1. Rysunki od 5.2 do 5.6 dotyczą lasera krawędziowego 635 nm.

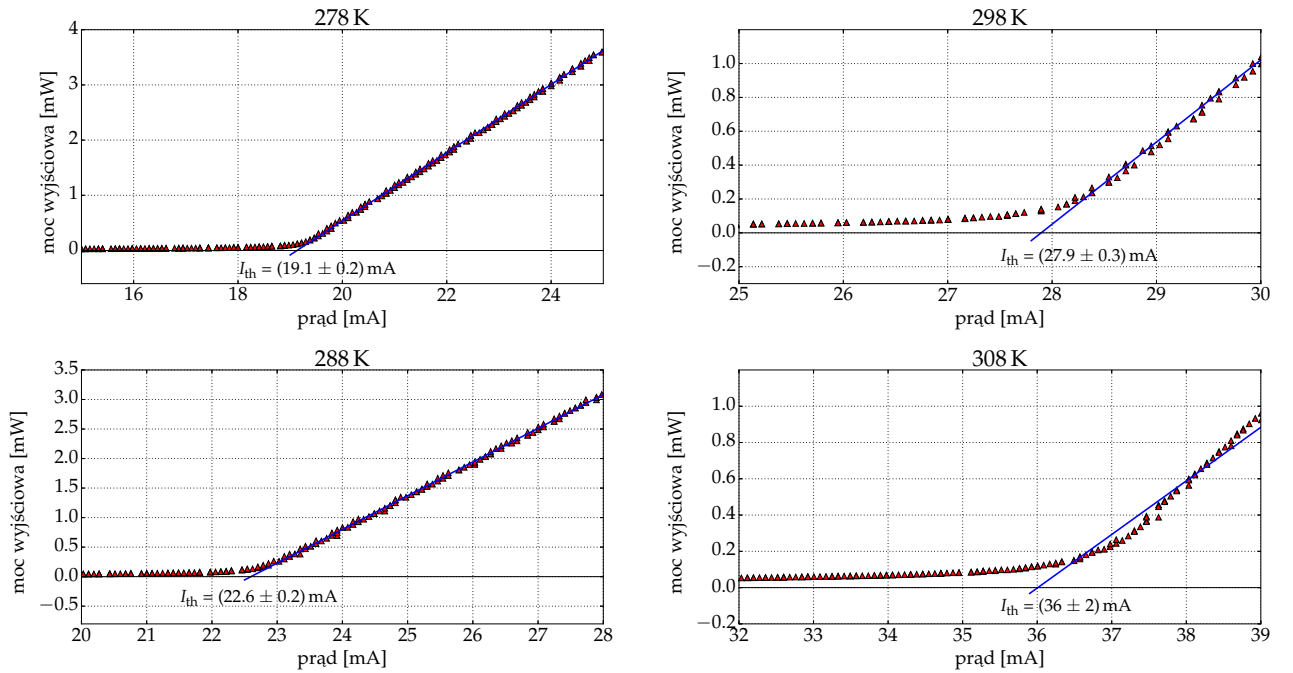
- Wykres na rysunku 5.2 przedstawia sposób wyznaczania wartości prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze, sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku 5.3. Do wykreślonych wartości punktów dopasowałem funkcję 4.6 w wyniku 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 5.2.1 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 5.5 przedstawia sprawność różniczkowa 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, choć zmiany na przestrzeni są małe rzędu 0.010 W/A.
- Wykres na rysunku 5.6 przedstawia jak zmienia się sprawność lasera 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 z wyższą temperaturą sprawność różniczkowa lasera maleje.

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

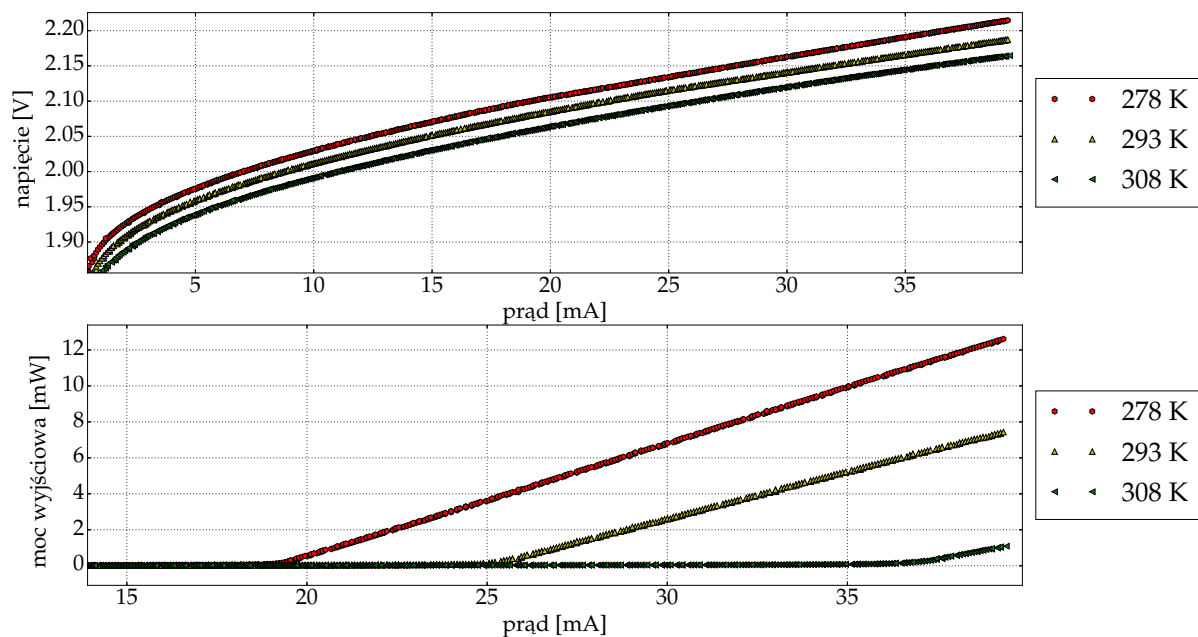
T [K]	278	283	288	293	298	303	308
I_{th} [mA]	19.1 ± 0.2	20.7 ± 0.2	22.6 ± 0.2	25.0 ± 0.2	27.9 ± 0.3	31.4 ± 0.5	36 ± 2



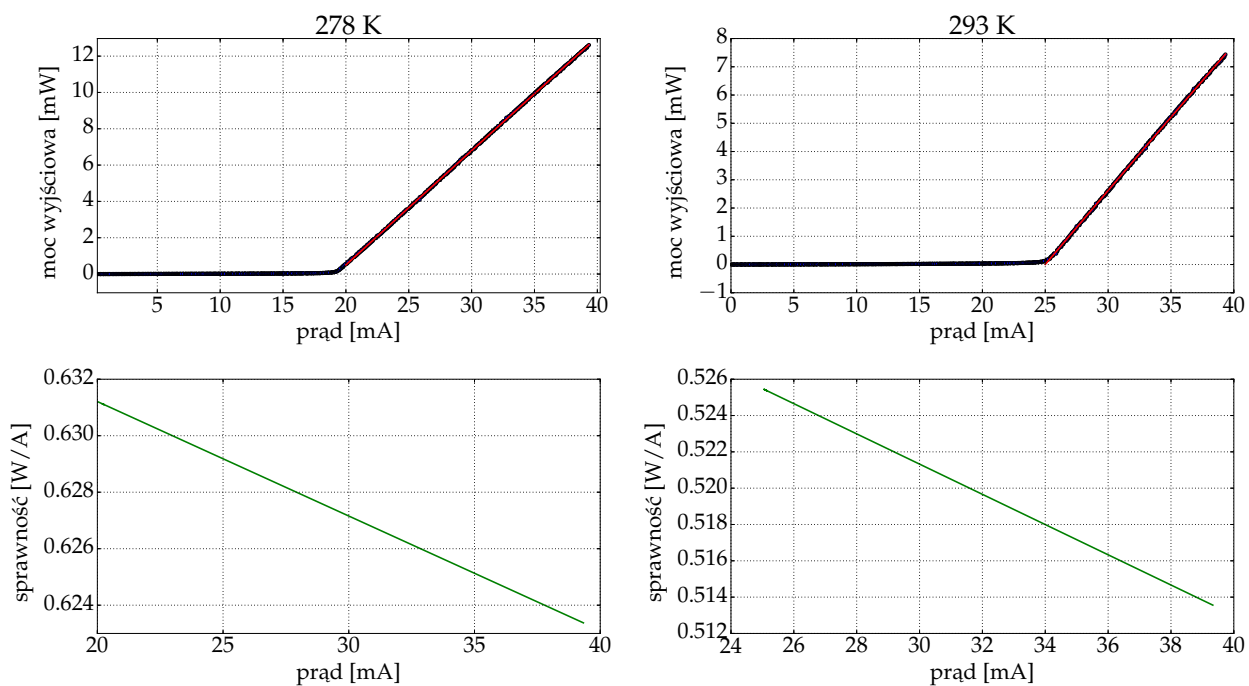
Rysunek 5.3. Wykres prądu progowego w zależności od temperatury chłodziwa z dopasowanymi wartościami I_0 i T_0 dla lasera krawędziowego 635 nm.



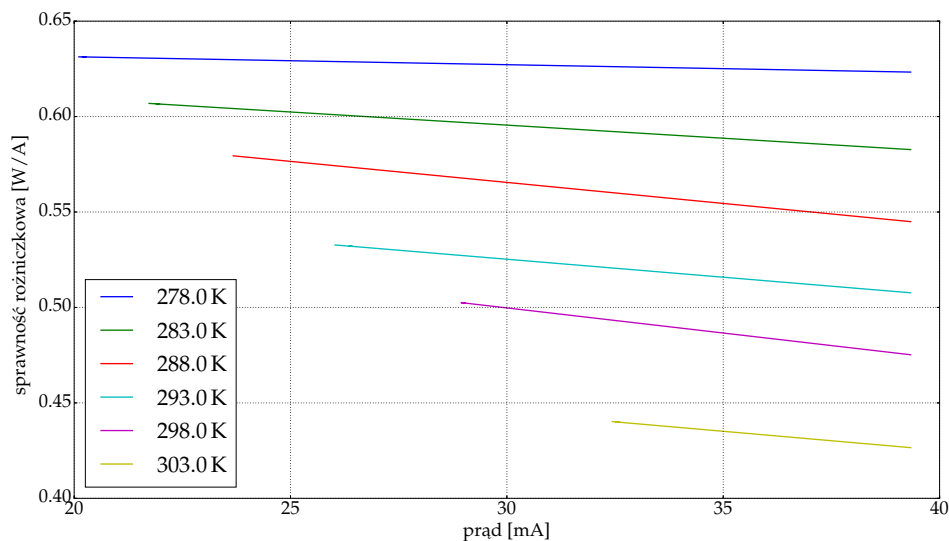
Rysunek 5.2. Wykres ilustrujący wyznaczenie prądu progowego dla lasera krawędziowego 635 nm.



Rysunek 5.4. Wykres napięcia na laserze oraz mocy w funkcji prądu dla lasera krawędziowego 635 nm w 3 temperaturach.



Rysunek 5.5. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera krawędziowego 635 nm dla dwóch temperatur.



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

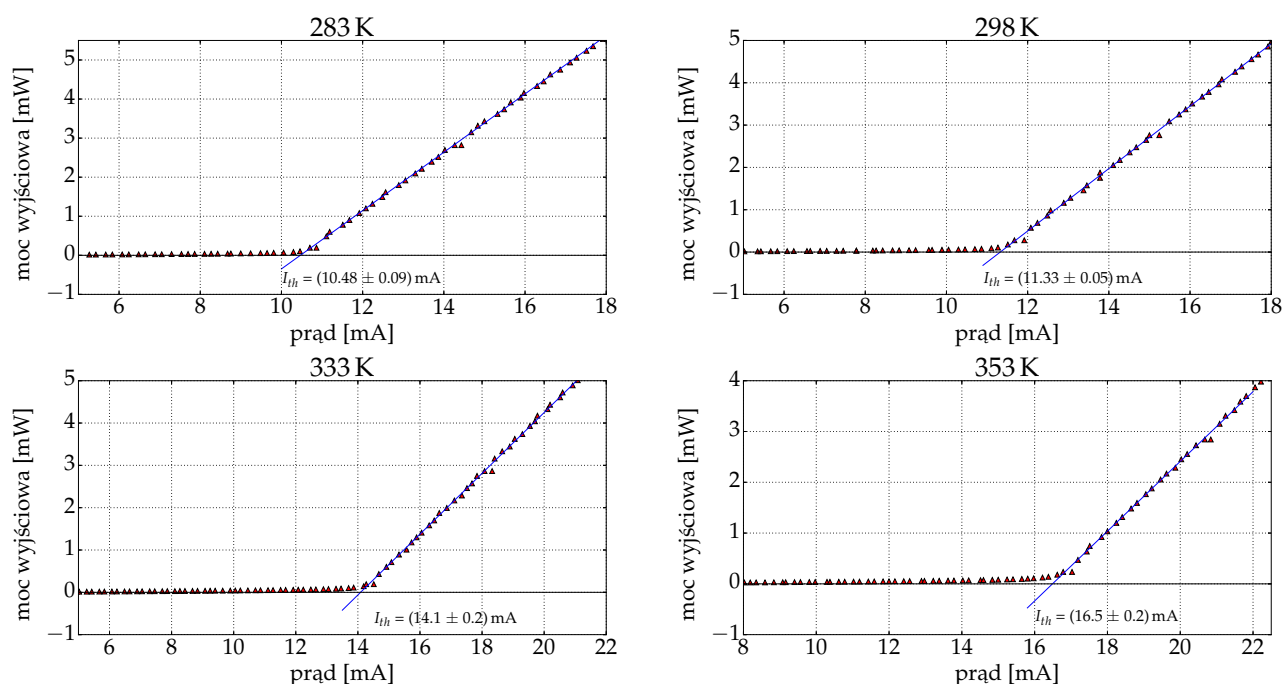
5.2.2. Laser krawędziowy 850 nm — omówienie wyników

Pomiar przeprowadzany był w temperaturach chłodnicy od 283 K do 353 K, krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli 5.2.2. Rysunki od 5.7 do 5.11 dotyczą lasera krawędziowego 850 nm.

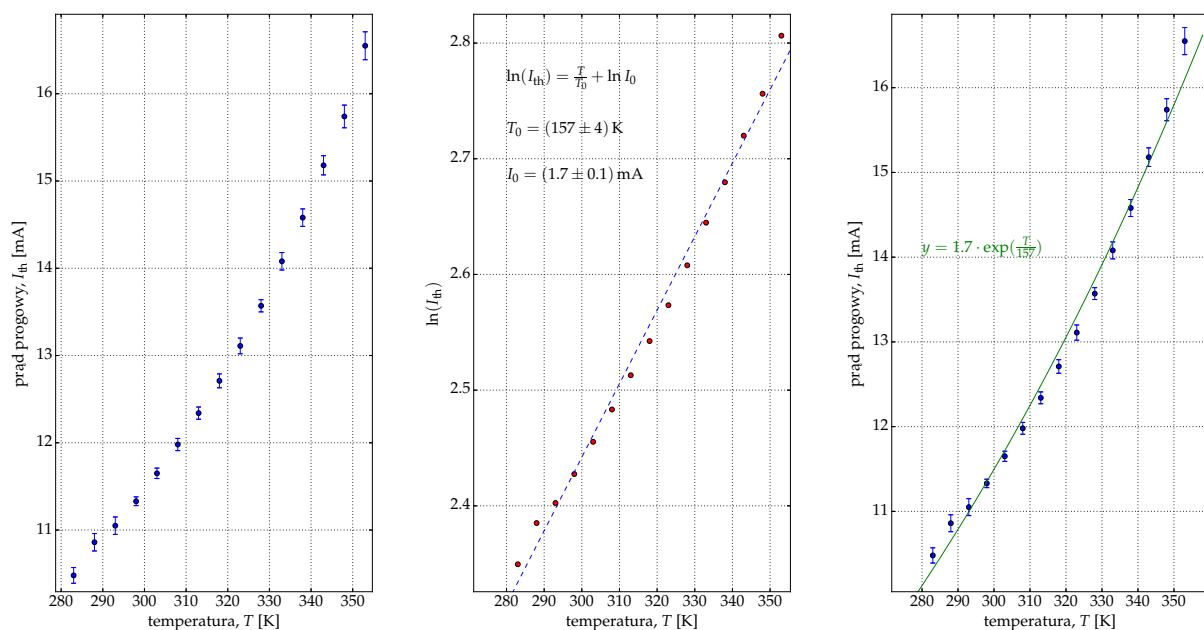
- Wykres na rysunku 5.7 przedstawia sposób wyznaczania wartości prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze, sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku 5.8. Do wykreślonych wartości punktów dopasowałem funkcję 4.6 w wyniku otrzymałem temperaturę charakterystyczną, T_0 , która wynosiła (157 ± 4) K oraz parametrem I_0 o wartości (1.7 ± 0.1) mA
- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku 5.9 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 5.10 przedstawia sprawność różniczkowa 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, choć zmiany na przestrzeni od są małe rzędu $(0.014 - 0.018)$ W/A.
- Wykres na rysunku 5.11 przedstawia jak zmienia się sprawność lasera od temperatury chłodnicy. Funkcje, które przedstawiają sprawność zostały wyznaczone analogicznie jak te przedstawione na rysunku 5.10. Analizując ten wykres, dochodzę do wniosku, że wraz z wyższą temperaturą sprawność różniczkowa lasera maleje.

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

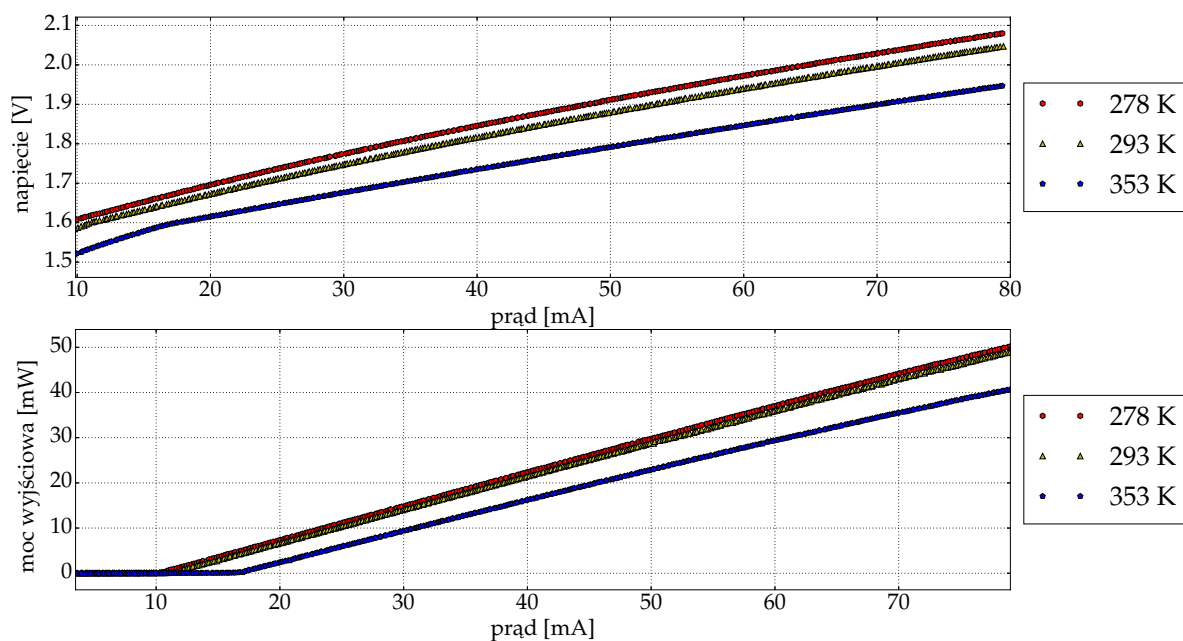
T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]
283	10.48 ± 0.09	288	10.9 ± 0.1	293	11.1 ± 0.1
298	11.33 ± 0.05	303	11.65 ± 0.06	308	11.98 ± 0.07
313	12.34 ± 0.07	318	12.71 ± 0.08	323	13.11 ± 0.09
328	13.57 ± 0.07	333	14.1 ± 0.1	338	14.6 ± 0.1
343	15.2 ± 0.2	348	15.7 ± 0.2	353	16.6 ± 0.2



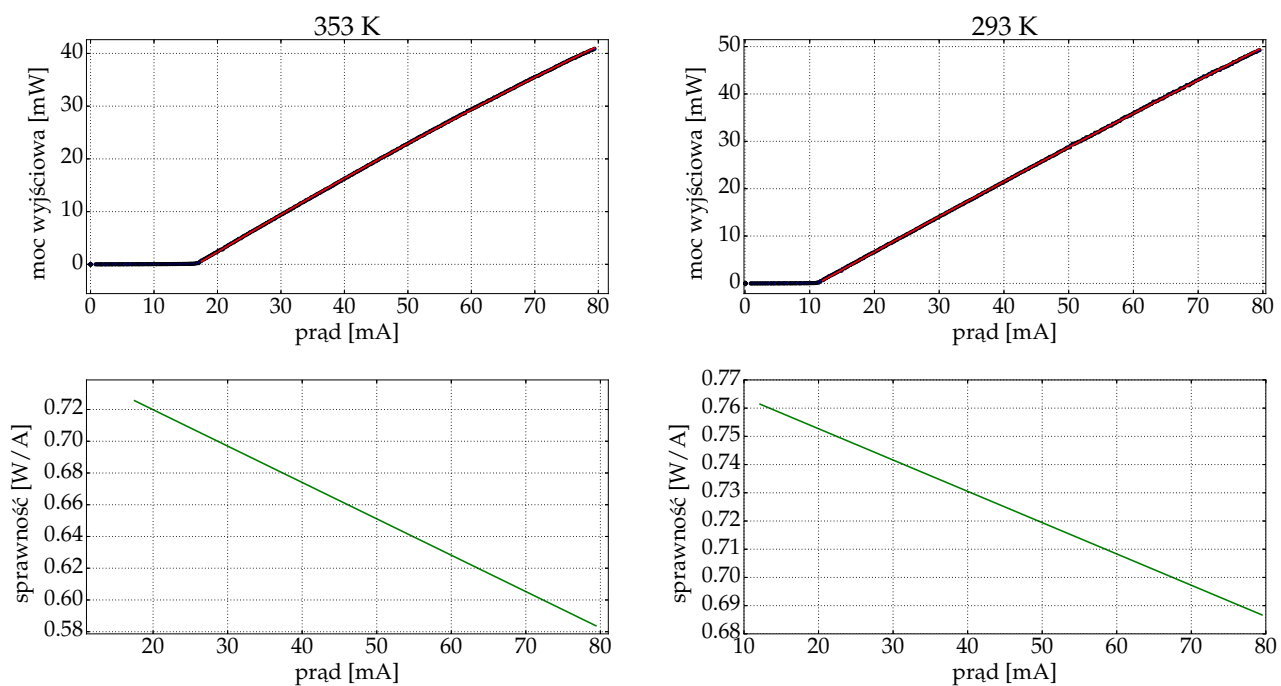
Rysunek 5.7. Wykres ilustrujący wyznaczanie prądu progowego dla lasera krawędziowego 850 nm.



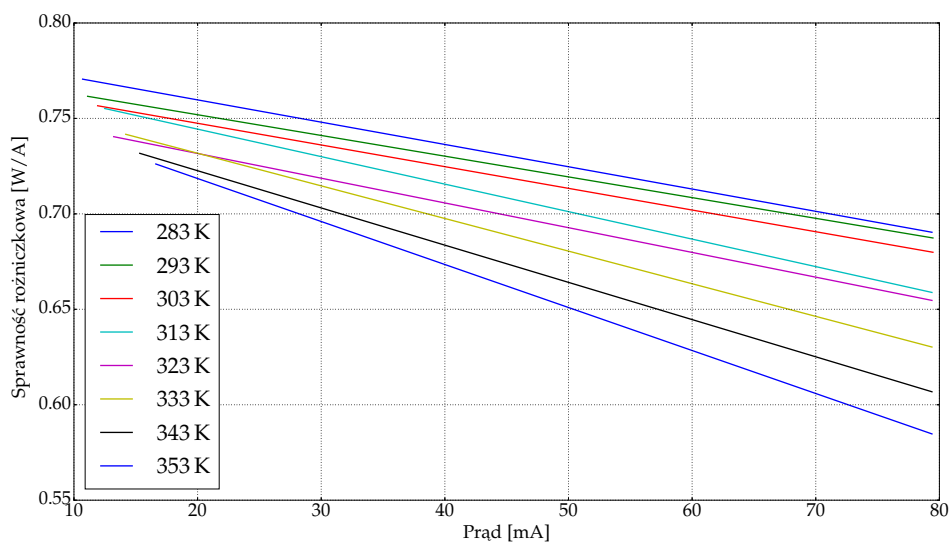
Rysunek 5.8. Wykres prądu progowego w zależności od temperatury chłodnicy z dopasowanymi wartościami I_0 i T_0 dla lasera krawędziowego 850 nm.



Rysunek 5.9. Wykres napięcia oraz mocy wyjściowej w funkcji prądu dla lasera krawędziowego 850 nm w różnych temperaturach.



Rysunek 5.10. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera krawędziowego 850 nm w dwóch temperaturach. U góry dopasowanie funkcji, na dole pochodna tych funkcji.



Rysunek 5.11. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera krawędziowego 850 nm w różnych temperaturach.

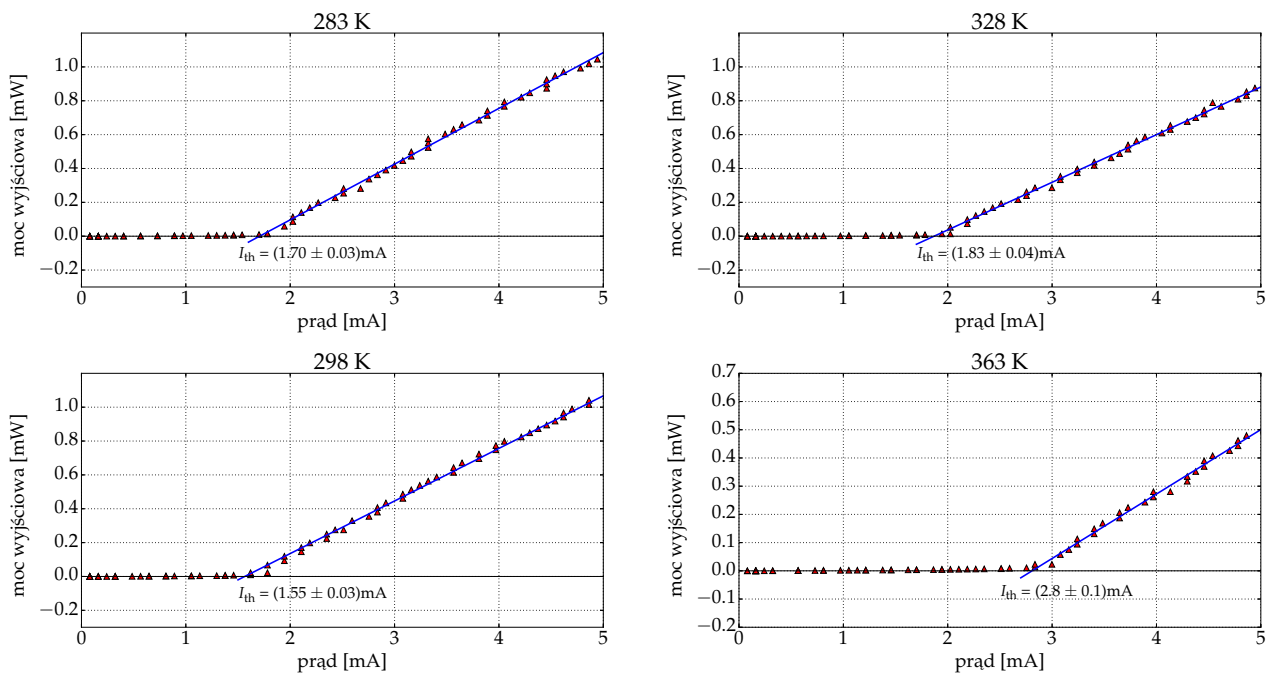
5.2.3. Laser VCSEL 850 nm — omówienie wyników

Pomiar przeprowadzany był w temperaturach chłodnicy od 283 K do 353 K, krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli 5.2.3. Rysunki od 5.12 do 5.16 dotyczą lasera VCSEL 850 nm.

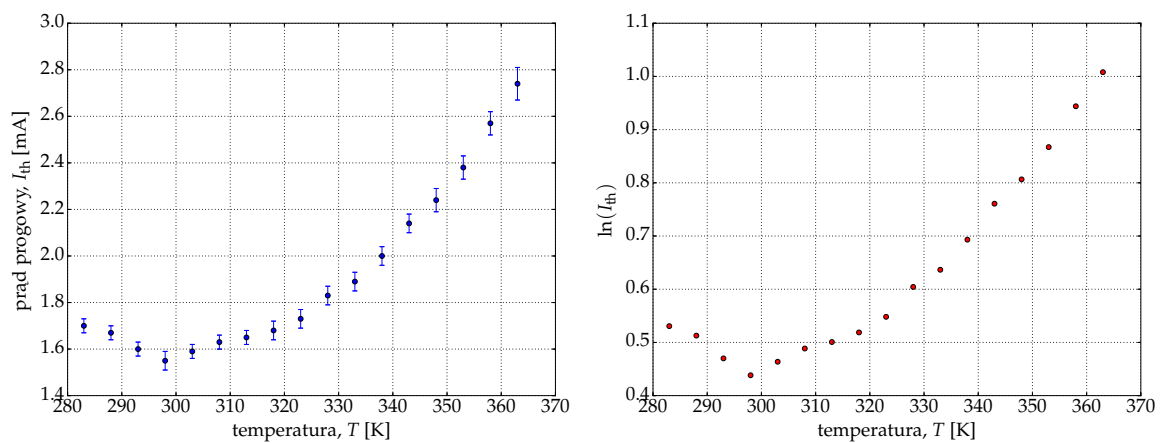
- Wykres na rysunku 5.12 przedstawia sposób wyznaczana wartość prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze, sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku 5.13. Jak widzimy wykres ten charakteryzuje się pewnym prądem minimalnym osiągniętym w temperaturze 298 K.
- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku 5.14 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 5.15 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 funkcję kwadratową dla punktów leżących powyżej wartości prądu progowego. Dopasowana funkcja zbliżona jest do funkcji kwadratowej, przez co zmiany sprawności wraz z wzrostem prądu jest dosyć duża.
- Wykres na rysunku 5.16 przedstawia jak zmienia się sprawność lasera od temperatury chłodnicy. Funkcje, które przedstawiają sprawność zostały wyznaczone analogicznie jak te przedstawione na rysunku 5.15. Analizując ten wykres, dochodzę do wniosku, że wraz z wyższą temperaturą sprawność lasera maleje.

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

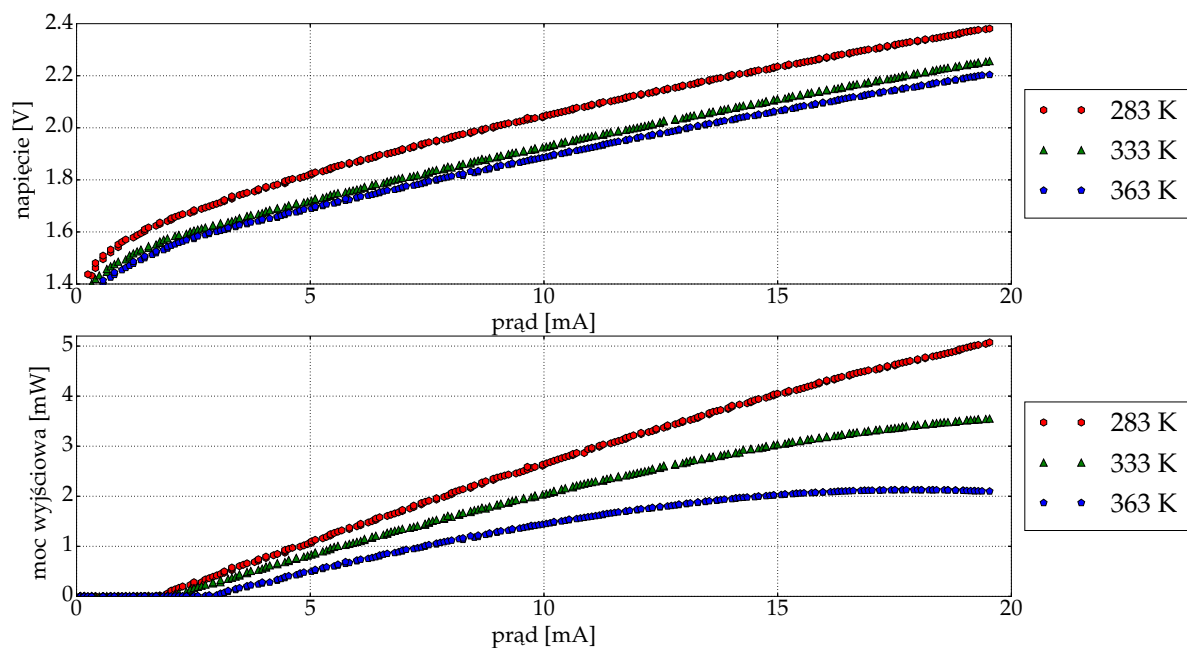
T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]
283	1.70 ± 0.03	288	1.67 ± 0.03	293	1.60 ± 0.03
298	1.55 ± 0.04	303	1.59 ± 0.03	308	1.63 ± 0.03
313	1.65 ± 0.03	318	1.68 ± 0.04	323	1.73 ± 0.04
328	1.83 ± 0.04	333	1.89 ± 0.04	338	2.01 ± 0.04
343	2.14 ± 0.04	348	2.24 ± 0.05	353	2.38 ± 0.05
358	2.57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



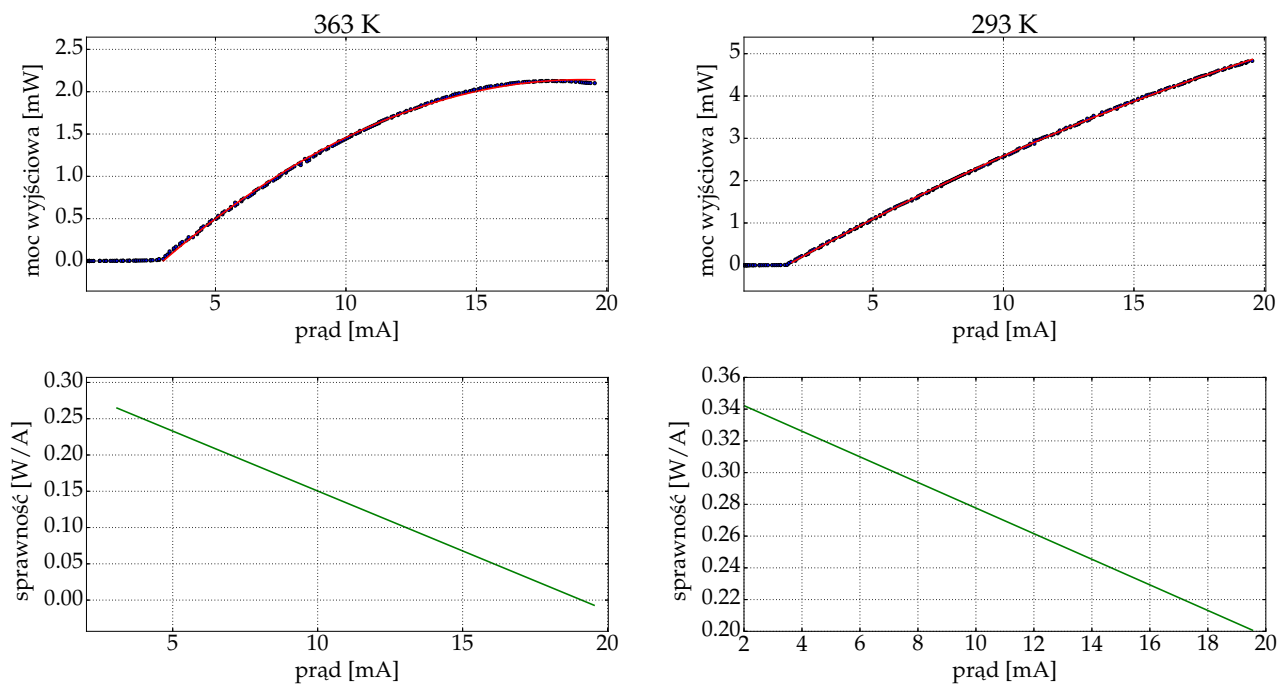
Rysunek 5.12. Wykres prądu progowego od temperatury z wyznaczonymi progami prądu dla lasera VCSEL 850 nm.



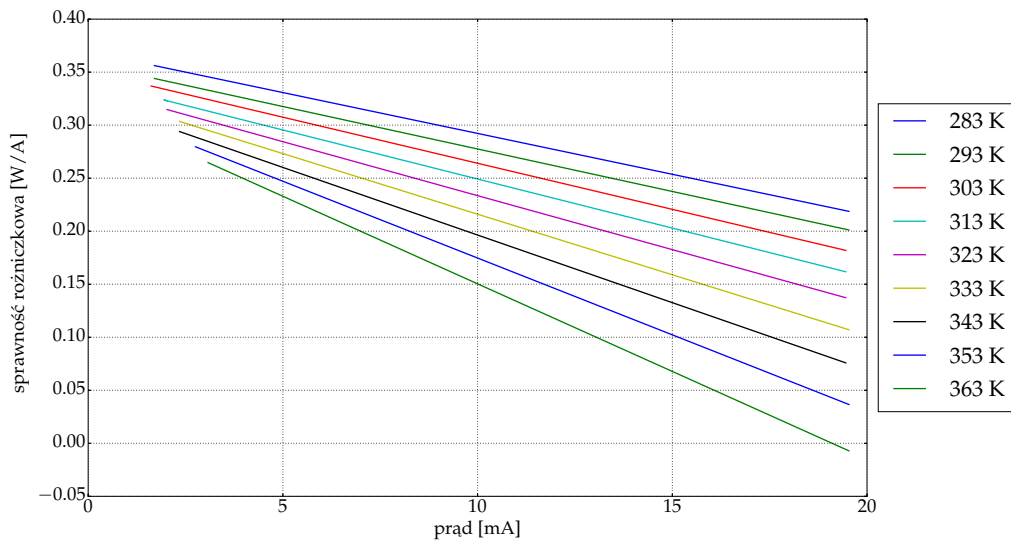
Rysunek 5.13. Wykres prądu progowego od temperatury dla lasera VCSEL 850 nm.



Rysunek 5.14. Wykres napięcia na laserze i mocy wyjściowej w funkcji prądu od temperatury chłodnicy dla lasera VCSEL 850 nm.



Rysunek 5.15. Sprawność różniczkowa dla lasera VCSEL 850 nm w różnych temperaturach.



Rysunek 5.16. Sprawność różniczkowa lasera VCSEL 850 w funkcji prądu dla różnych temperatur.

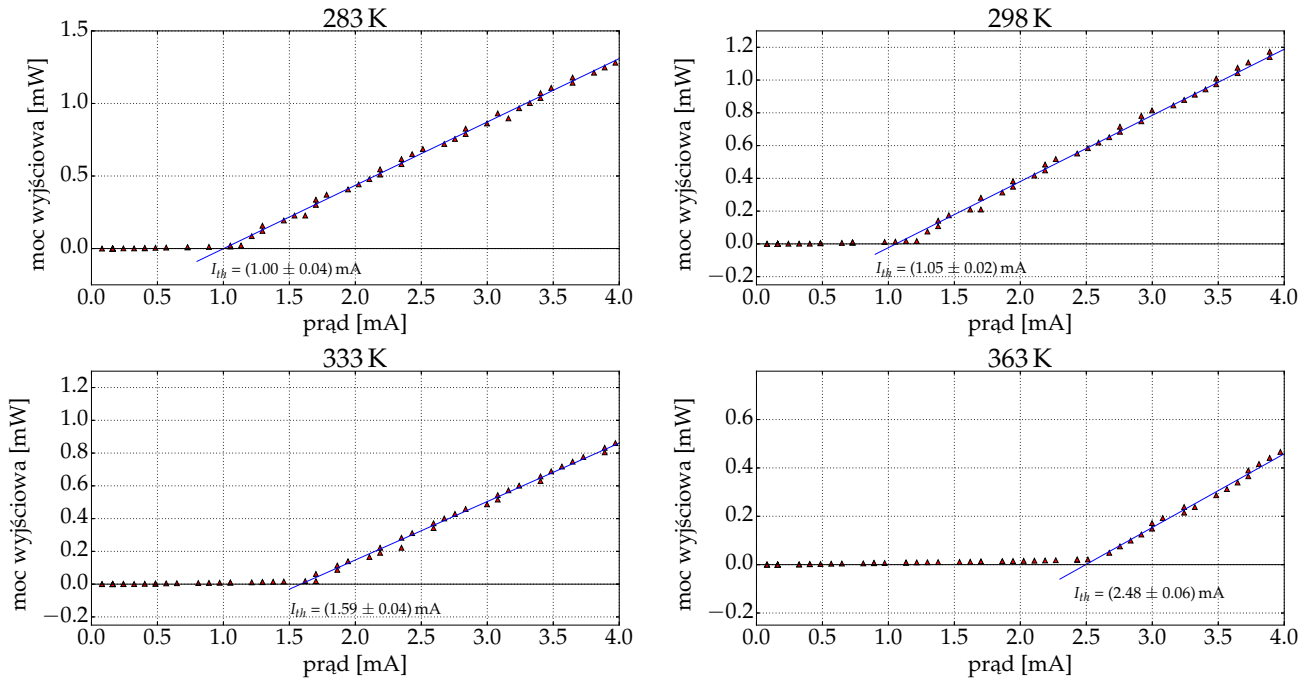
5.2.4. Laser VCSEL 980 nm — omówienie wyników

Pomiar przeprowadzany był w temperaturach chłodnicy od 283 K do 363 K, krokiem co 5 K. Wartości wyznaczonego prądu progowego znajdują się w tabeli 5.2.3. Rysunki od 5.17 do 5.21 dotyczą lasera VCSEL 980 nm.

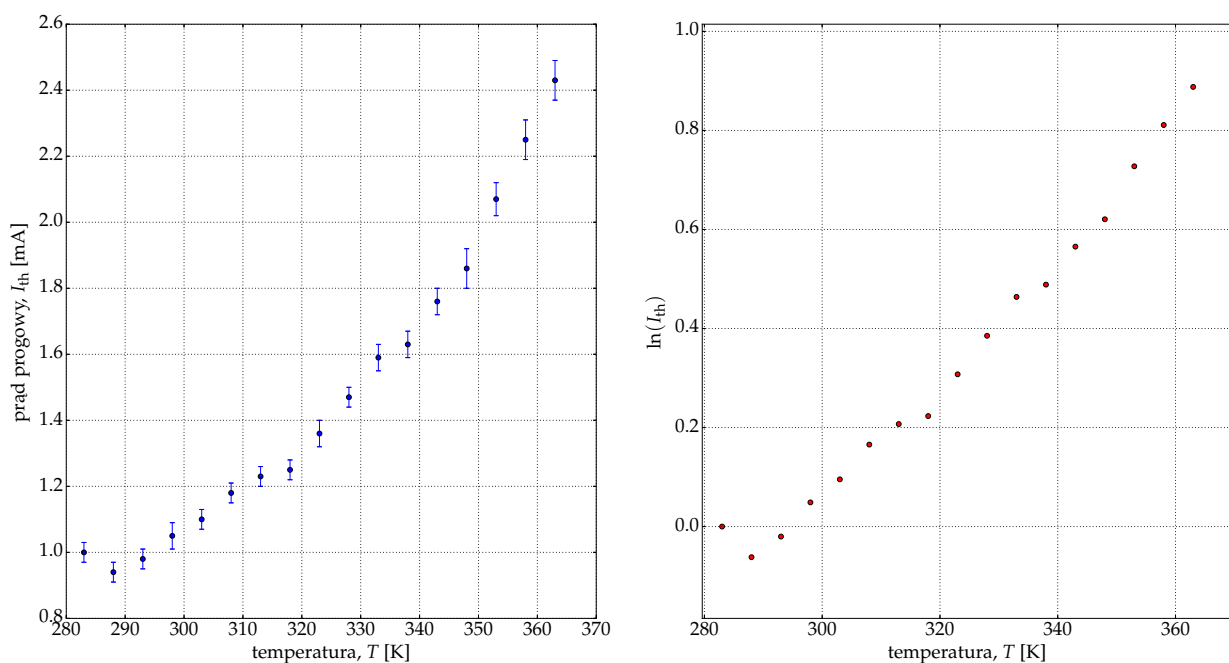
- Wykres na rysunku 5.17 przedstawia sposób wyznaczania wartości prądu progowego. Następnie na podstawie wyznaczonych wartości w danej temperaturze, sporządziłem wykres prądu progowego w zależności od temperatury przedstawiony na rysunku 5.18. Jak widzimy wykres ten charakteryzuje się pewnym prądem minimalnym osiągniętym w temperaturze 288 K.
- Analizując wykres napięcia na laserze od prądu wejściowego przedstawiony na rysunku 5.19 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 5.20 przedstawia sprawność różniczkową lasera w funkcji prądu wejściowego od temperatury na 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 kwadratowej, przez co zmiany sprawności wraz z wzrostem prądu jest dosyć duża.
- Wykres na rysunku 5.21 przedstawia jak zmienia się sprawność lasera od temperatury chłodnicy. Funkcje, które przedstawiają sprawność zostały wyznaczone analogicznie jak te przedstawione na rysunku 5.20. Analizując ten wykres, dochodzę do wniosku, że wraz z wyższą temperaturą sprawność lasera maleje.

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

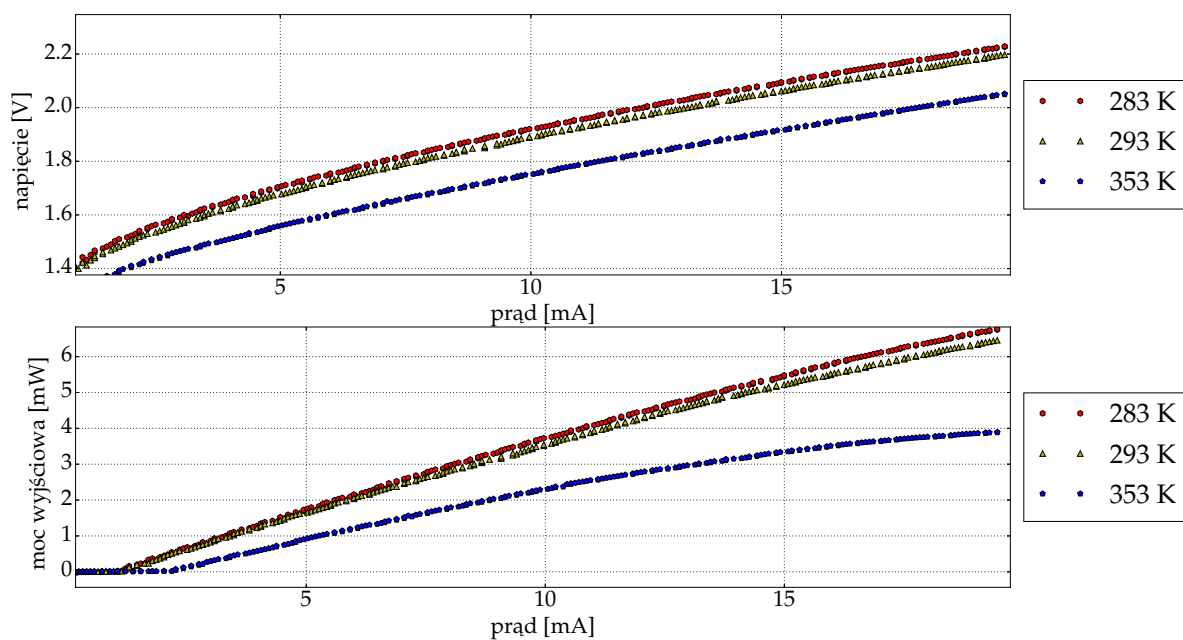
T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]	T [K]	I_{th} [mA]
283	1.0 ± 0.04	288	0.94 ± 0.03	293	0.98 ± 0.03
298	1.05 ± 0.04	303	1.1 ± 0.03	308	1.18 ± 0.03
313	1.23 ± 0.03	318	1.25 ± 0.03	323	1.36 ± 0.04
328	1.47 ± 0.03	333	1.59 ± 0.04	338	1.63 ± 0.04
343	1.76 ± 0.04	348	1.86 ± 0.06	353	2.07 ± 0.05
358	2.25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



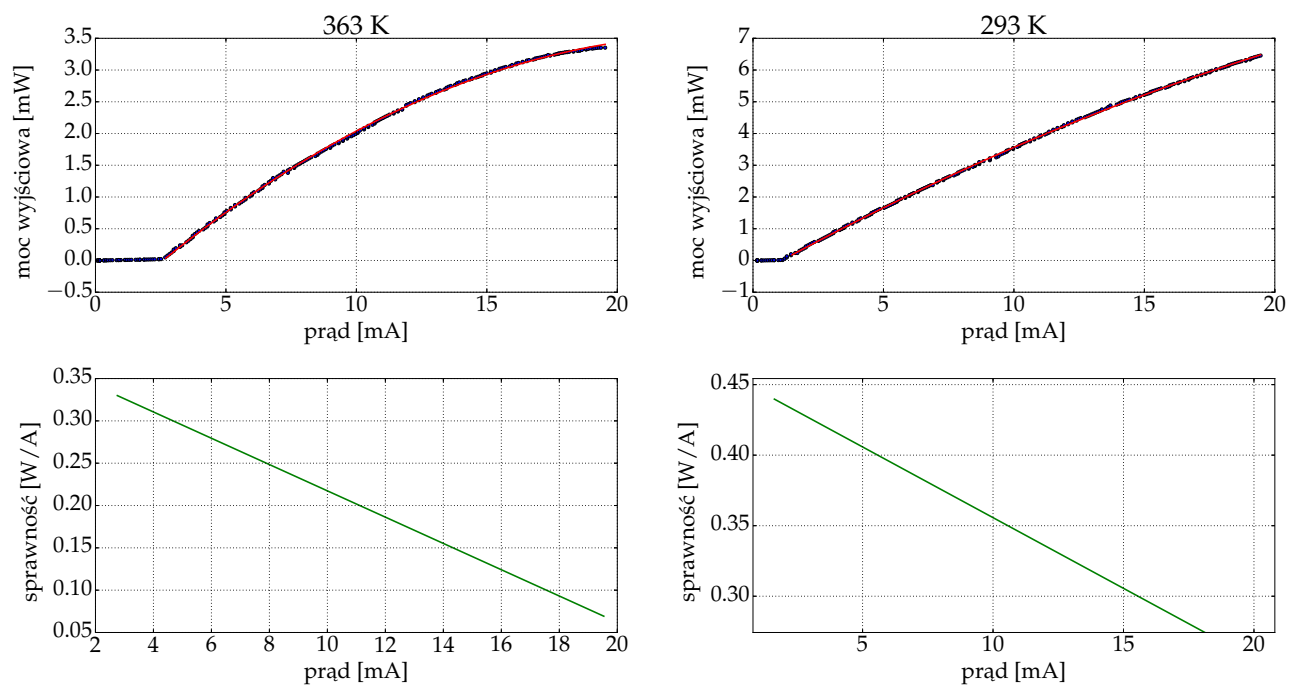
Rysunek 5.17. Wykres ilustrujący wyznaczanie prądu progowego dla lasera VCSEL 980 nm.



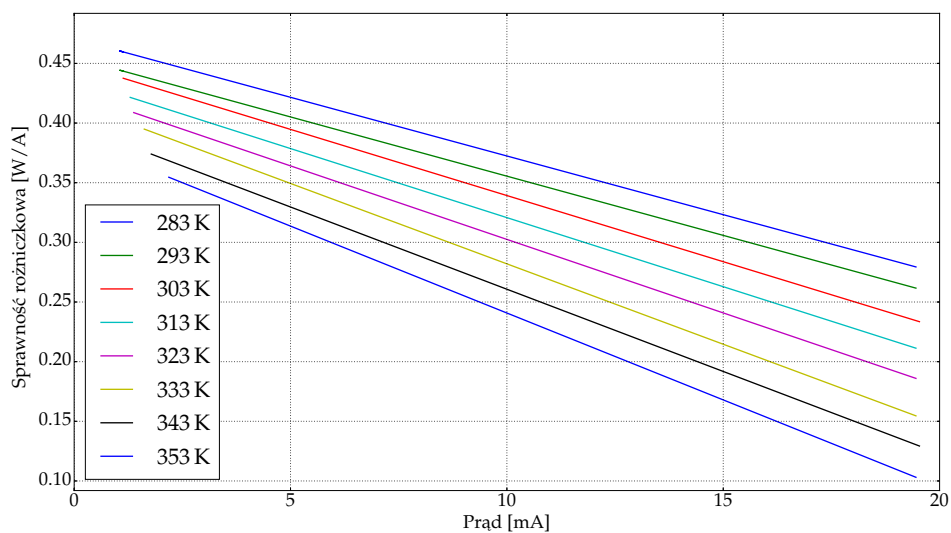
Rysunek 5.18. Wykres prądu progowego od temperatury dla lasera VCSEL 980 nm w skali liniowej oraz logarytmicznej.



Rysunek 5.19. Wykres napięcia oraz mocy wyjściowej w funkcji prądu dla lasera VCSEL 980 nm.



Rysunek 5.20. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera VCSEL 980 nm w dwóch różnych temperaturach.

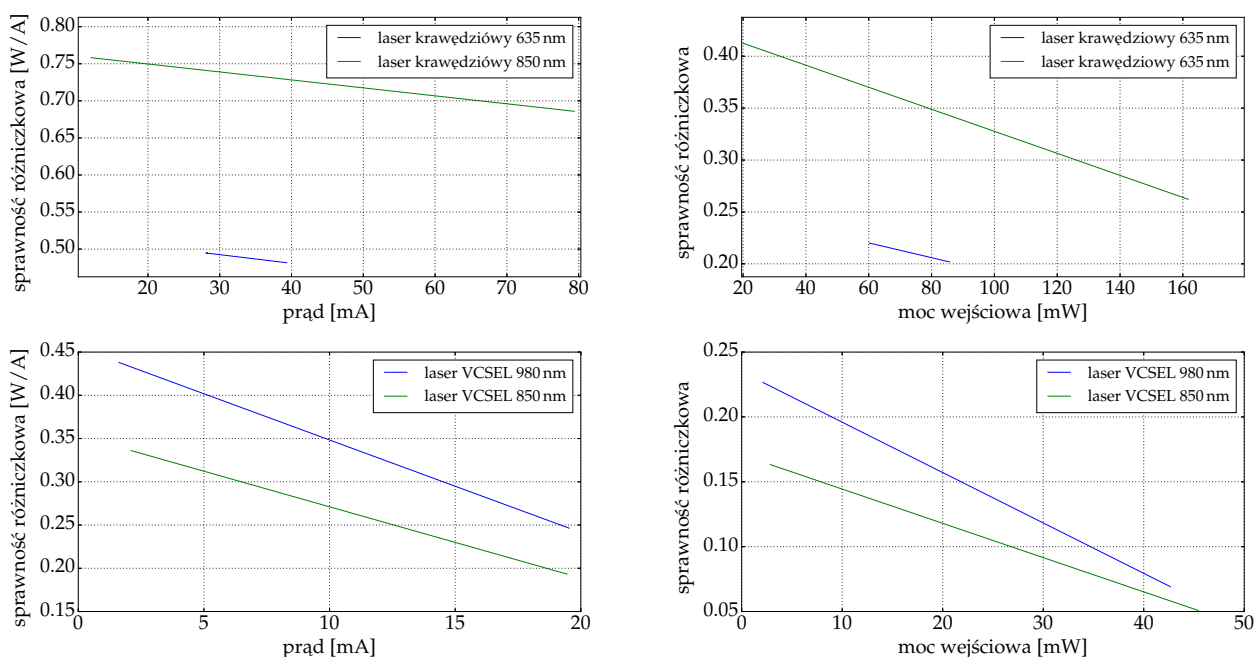


Rysunek 5.21. Wykres sprawności różniczkowej dla lasera VCSEL 980 nm w różnych temperaturach.

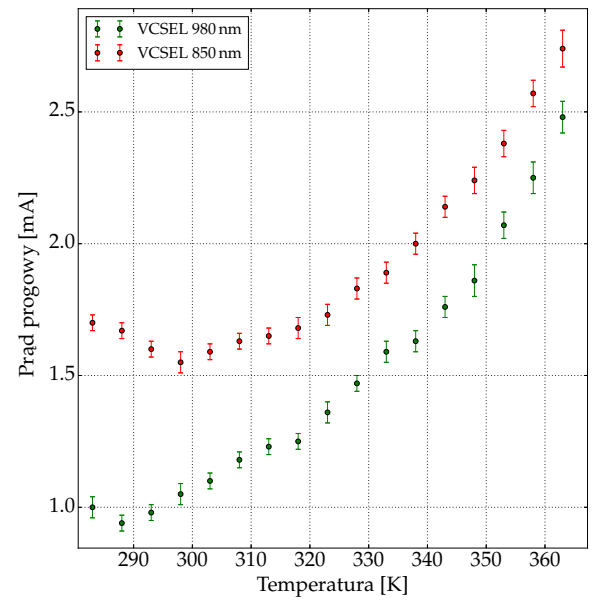
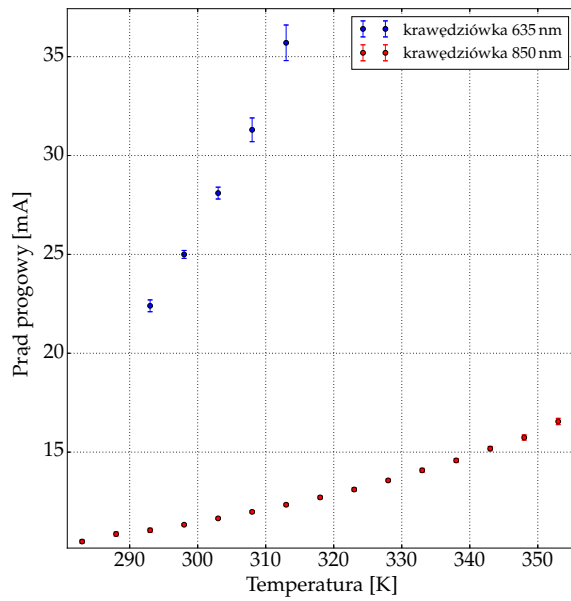
5.3. Porównanie laserów

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

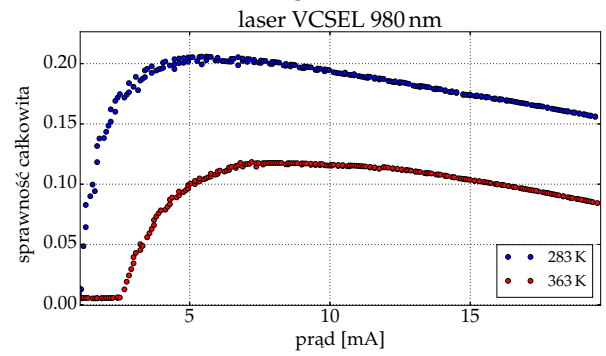
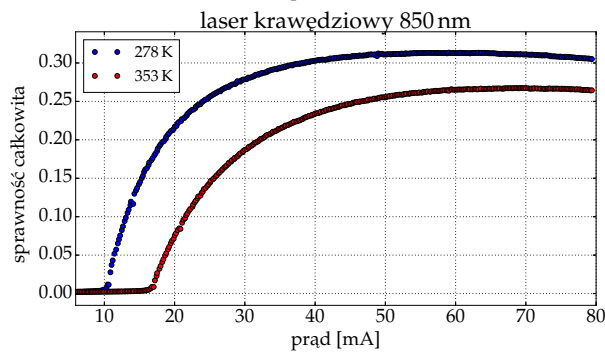
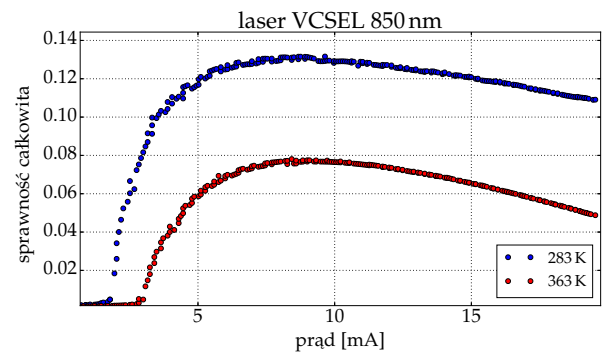
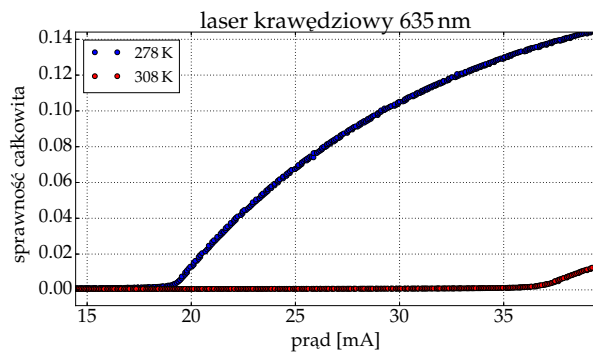
- Sprawność różniczkowa w funkcji zarówno prądu i mocy wejściowej jest większa dla laserów krawędziowych niż dla laserów VCSEL, co przedstawia wykres na rysunku 5.22.
- Prąd progowy dla laserów krawędziowych jest większy od prądu progowego dla laserów VCSEL, co przedstawia wykres na rysunku 5.23.
- Sprawność całkowita w niższych temperaturach jest większa, zarówno dla laserów VCSEL jak i krawędziowych, co przedstawia wykres przedstawionym na rysunku 5.24. Warto zauważyć, że dla laserów krawędziowych wraz z 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. Błąd może być związany z położeniem miernika mocy.



Rysunek 5.22. Wykres sprawności różniczkowej w funkcji prądu oraz mocy wejściowej w temperaturze 298 K.



Rysunek 5.23. Wykres prądu progowego od temperatury.



Rysunek 5.24. Wykres sprawności całkowitej w funkcji prądu.

Tabela 5.5. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [11] 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

Tabela 5.6. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [12] 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

Tabela 5.7. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [13] 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	0.49 - 0.48

Tabela 5.8. Porównanie wyznaczonych wartości prądu progowego oraz sprawności różniczkowej z kartą katalogową [14] 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	0.76 - 0.68

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. Natomiast lasery VCSEL charakteryzowały się pewnym prądem minimalnym osiąganym w niższych temperaturach, jest to spotyka ich cecha [9]. , dla wyższych temperatur wartość prądu progowego również rosła. Zjawisko wzrostu wartości prądu progowego wraz z temperaturą I_{th} spowodowane jest wzrostem współczynnika Auger wraz z temperatura, co obniża wydajność i czas życia ładunku podczas przejścia promienistego.

Drugą badaną cechą laserów półprzewodnikowych była ich sprawność. Wraz ze wzrostem temperatury, sprawność laserów, które testowałem malała. Taki wyniki zgodny jest z przewidywaniami, proces fizyczny odpowiedzialnym za to zjawisko jest wzrost prawdopodobieństwa obsadzenia wyższych stanów energetycznych wraz ze wzrostem temperatury w półprzewodniku — mówi o tym rozkład Fermiego-Dirca. W wyniku tego energia emitowanych fotonów podczas przejść promienistych maleje.

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] 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
- [10] 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
- [11] Thorlabs: MFG Spec, VCSEL-980-MFGSpec
- [12] Thorlabs: MFG Spec, VCSEL-980-MFGSpec
- [13] Thorlabs Spec Sheet L850P010-SpecSheet
- [14] Thorlabs Spec Sheet L635P003-SpecSheet