

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Komunikacja z urządzeniami pomiarowymi na platformie Linux	4
2.1	Programowane urządzenia pomiarowe	4
2.2	Komunikacja	4
2.3	SCPI — standard komend do komunikacji z urządzeniami	5
2.4	Przykładowe programy do sterowania sprzętem	6
3	Py3LabDeviceIO — moduł do sterowania sprzętem laboratoryjnym	7
3.1	Opis programu	7
3.2	Używanie programu	8
4	Gui	9
4.1	Gui	9
5	Eksperyment	10
5.1	Teoria	10
5.2	Badanie lasera	12
5.3	Laser krawędziowy 635 nm	22

Rozdział 1

Wstęp

Niniejsza praca dotyczy zakresu inżynierii oprogramowania sprzętu pomiarowego w celu wykorzystania go w badaniu charakterystyk laserów półprzewodnikowych w laboratorium fotoniki Politechniki Łódzkiej.

Głównym celem pracy jest przedstawienie wykorzystania systemu Linux oraz oprogramowania open source w badaniach naukowych na przykładzie stworzenia interfejsu pomiarowego w laboratorium fononiki do badania charakterystyk 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 system 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 programu do komunikacji ze sprzętem na platformach 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

Głównymi celami mojej pracy jest przedstawienie wykorzystania oprogramowania open source takiego jak Python, C/C++ oraz systemu Linux do stworzenia stanowiska pomiarowego w celu badania laserów półprzewodnikowych. Korzystając z tych technologii mam zamiar stworzyć interfejs pomiarowy na platformę Ubuntu w laboratorium fotoniki.

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. Za pomocą mojego stanowiska pomiarowego możliwe także będzie badanie ile uzyskuje się mocy z lasera przy danej mocy aplikowanej.

Rozdział 2

Komunikacja z urządzeniami pomiarowymi na platformie Linux

2.1 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.

2.2 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 użytkownik może komunikować się ze sprzętem. Podstawowe wywołania systemowymi, które należy użyć do komunikacji ze sprzętem:

- `open` — służy do połączenia się z urządzeniem, zwraca deskryptor pliku.
- `write` — funkcja służąca do pisania komend do pliku.
- `read` — funkcja służąca do odczytywania buffora z pliku.
- `close` — funkcja zamykająca połączenie.

Funckje te mają swoją implementację w języku C w bibliotece `<fcntl.h>`, oraz w języku Python w bibliotece `os`.

2.3 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 tych urządzeń przy wykorzystaniu komputera. Polecenia SCPI są to ciągi tekstowe ASCII, które są wysyłane do urządzenia. 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 używane także formaty binarne.

Cechą poleceń wspólnych (ang. *common*) jest ich implementacja przez każde urządzenie. Czyli na przykład 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*) 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, VXibus.

2.4 Przykładowe programy do sterowania sprzętem

Przykładowy program w języku python do zapytania sprzętu o jego nazwę.

```
import os

class IODevice:
    def __init__(self, path_to_device):
        self.path_to_device = path_to_device
        self.file_descriptor = os.open(device, os.O_RDWR | O_NOCITY)

    def write(self, command):
        os.write(self.file_descriptor, command)

    def read(self, length=4000):
        return os.read(self.file_descriptor, length)

    def close(self):
        os.close(self.file_descriptor)

device = IODevice("/dev/usbtmc0")
device.write("*IDN?")
print(device.read())
```

Przykładowy program w języku C do zapytania sprzętu o jego nazwę.

```
#include<errno.h>
#include<fcntl.h>
#include<unistd.h>
#include<stdio.h>

int main()
{
    int fd = open("/dev/usbtmc0", O_RDWR | O_NOCTTY);
    if(fd == -1) {
        perror("open");
        exit(EXIT_FAILURE);
    } else {
        write(fd, "*IDN?", 100);
        char buffor[128];
        read(fd, buffor, 128);
        printf(buffor);
    }
}
```

Rozdział 3

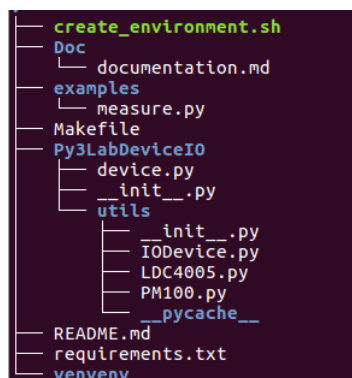
Py3LabDeviceIO — moduł do sterowania sprzętem laboratoryjnym

3.1 Opisz programu

PyLabDeviceIO jest modułem napisanym w języku python umożliwiającym sterowanie zasilaczem do lasera oraz miernikiem mocy. Program opiera się na wykorzystaniu wywołań systemowych oraz na komunikacji przez komendy SCPI.

Program składa się z czterech klas:

- `device.py` — główna klasa, zawiera funkcje: do sprawdzania dostępnych urządzeń, zwraca instancje danego urządzenia, co umożliwia korzystanie z jego funkcji.
- `IIODevice.py` — klasa do operacji wejścia-wyjścia na programowalnych urządzeniach pomiarowych.
- `LDC4005.py` — klasa zawierająca funkcje od obsługi zasilacza diód laserowych Thorlabs 4005.
- `PM100.py` — klasa zawierająca funkcje do obsługi detektora mocy Thorlabs PM100.



Rysunek 3.1: Struktura programu.

3.2 Używanie programu

W celu dokonania pomiarów za pomocą programu Py3LabDeviceIO możliwe są dwie opcje:

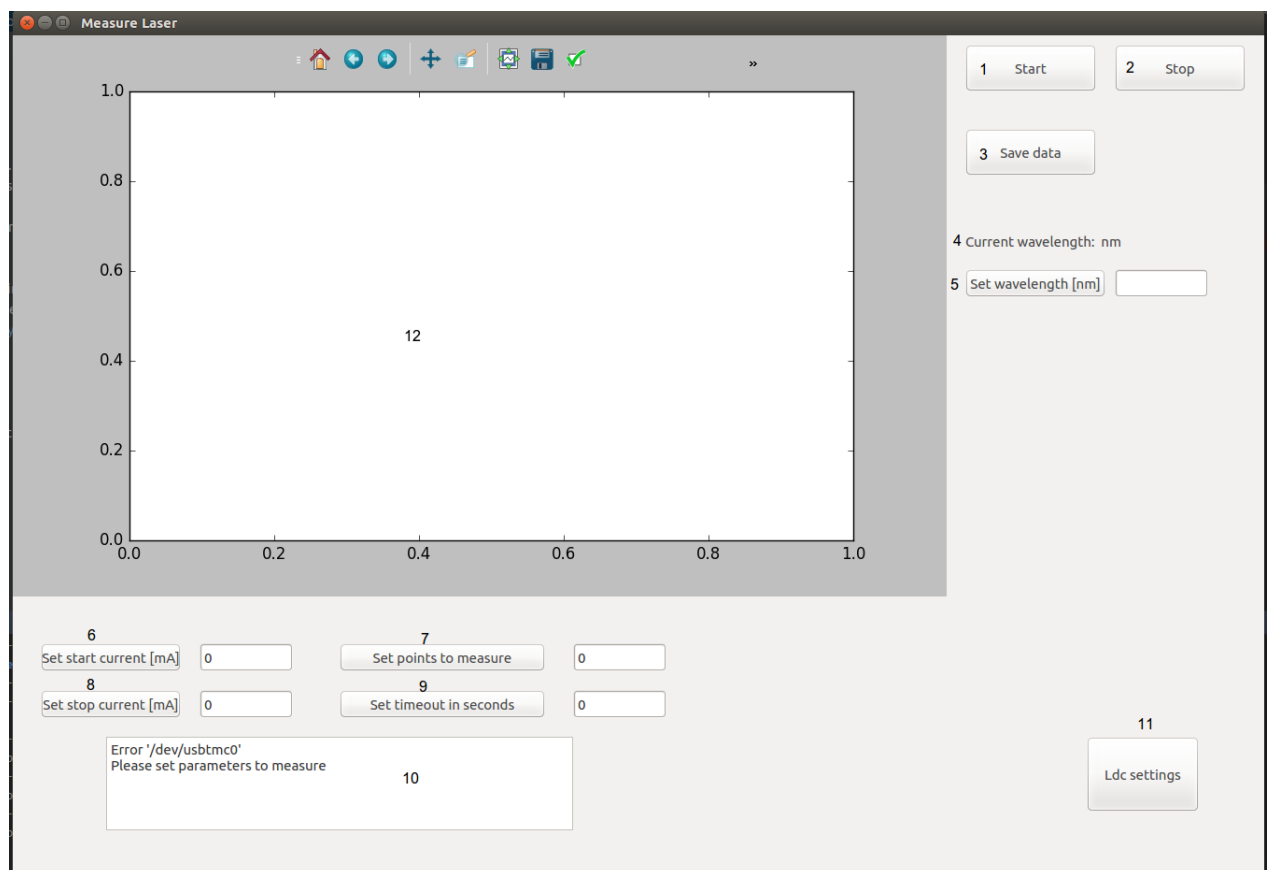
- wywołanie jako skryptu z linii poleceń z odpowiednimi parametrami.
- uruchomienie programu okienkowego.

Obie wymagają uprawnień użytkownika uprzywilejowanego (sudo).

Rozdział 4

Gui

4.1 Gui



Rysunek 4.1: 1 — rozpoczęcie pomiarów, 2 — zatrzymanie pomiarów, 3 — zapisanie danych pomiarowych, 4 — pokazuje długość fali detektora, 5 — zmiana długości fali detektora.

Rozdział 5

Eksperyment

5.1 Teoria

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

Ważnym parametrem laserów krawędziowych 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. Zależności prądu progowego I_{th} od temperatury T możemy wyrazić za pomocą równania:

$$I_{th} = I_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (5.1)$$

Wartości parametrów I_0 oraz T_0 możemy wyznaczyć na podstawie charakterystyk emisyjnych lasera w różnych temperaturach T Przez zlogarytmowanie wartości prądu oraz podstawienie otrzymujemy:

$$\ln(I_{th}) = \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln(I_0) \quad (5.2)$$

$$I_{th} = \frac{T}{T_0} + I_0 \quad (5.3)$$

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

$$y = a \cdot x + b \quad (5.4)$$

Gdzie:

$$a = \frac{1}{T_0} \quad (5.5)$$

$$b = \ln(I_0) \quad (5.6)$$

Na tej podstawie możemy znaleźć poszukiwane parametry I_0 oraz T_0 :

$$I_0 = e^b \quad (5.7)$$

$$T_0 = \frac{1}{a} \quad (5.8)$$

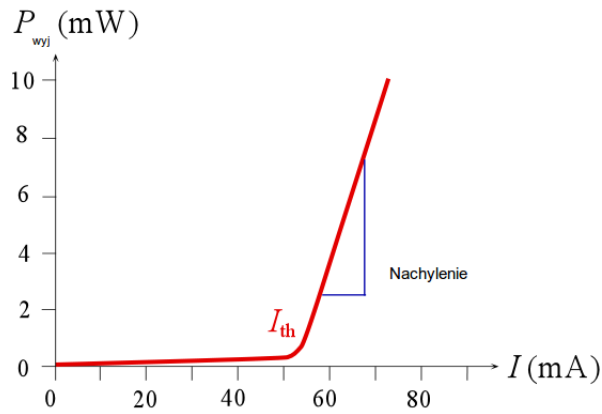
Korzystając z różniczki zupełnej można obliczyć wartości błędów wyznaczonych wartości:

$$\Delta I_0 = \left| \frac{\partial I_0}{\partial b} \right| \cdot \Delta b = |be^b| \cdot \Delta b \quad (5.9)$$

$$\Delta T_0 = \left| \frac{\partial T_0}{\partial a} \right| \cdot \Delta a = \left| -\frac{1}{a^2} \right| \cdot \Delta a \quad (5.10)$$

Dzięki analizie charakterystyk możliwe jest także obliczenie przyrostowej sprawności różniczkowej η_{SE} (ang. *slope efficiency*), która odpowiada nachyleniu charakterystyki mocy wyjściowej P_{wyj} lasera w funkcji prądu zasilającego I powyżej progowej wartości prądu progowego I_{th} dla akcji laserowej:

$$\eta_{SE} = \frac{dP_{wyj}}{dI} \quad (5.11)$$



Rysunek 5.1: Przyrostowa sprawność różniczkowa.

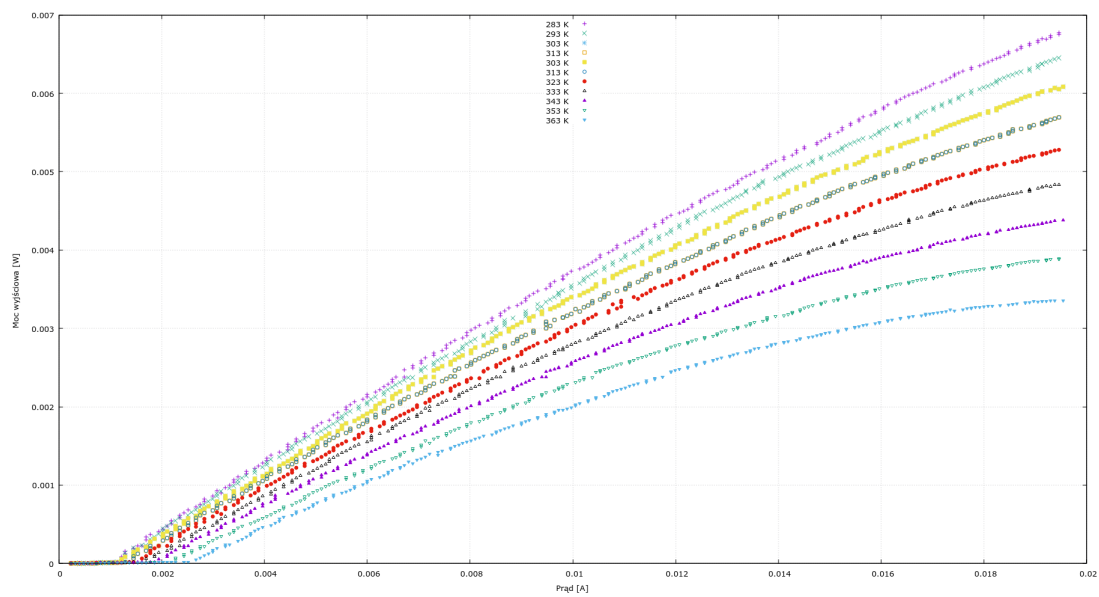
5.2 Badanie lasera

Podpunkt ten zawiera wyniki pomiarów dla lasera krawędziowego o emitowanej fali długości 980 nm. Pomiar polegał w pierwszej części na wykonaniu charakterystyk prądowo-napięciowych oraz prądowo-oświetleniowych lasera w temperaturze lasera od 283 K do 363 K krokiem co 10 K. Na podstawie otrzymanych charakterystyk wyznaczyłem wartość prądu progowego w danej temperaturze. Następnie korzystając z wyznaczonych wartości na podstawie wzorów (3.7) i (3.8) znalazłem parametry $I_0 = (78.7 \pm 0.1)$ mA oraz $T_0 = (0.02 \pm 0.01)$ K.

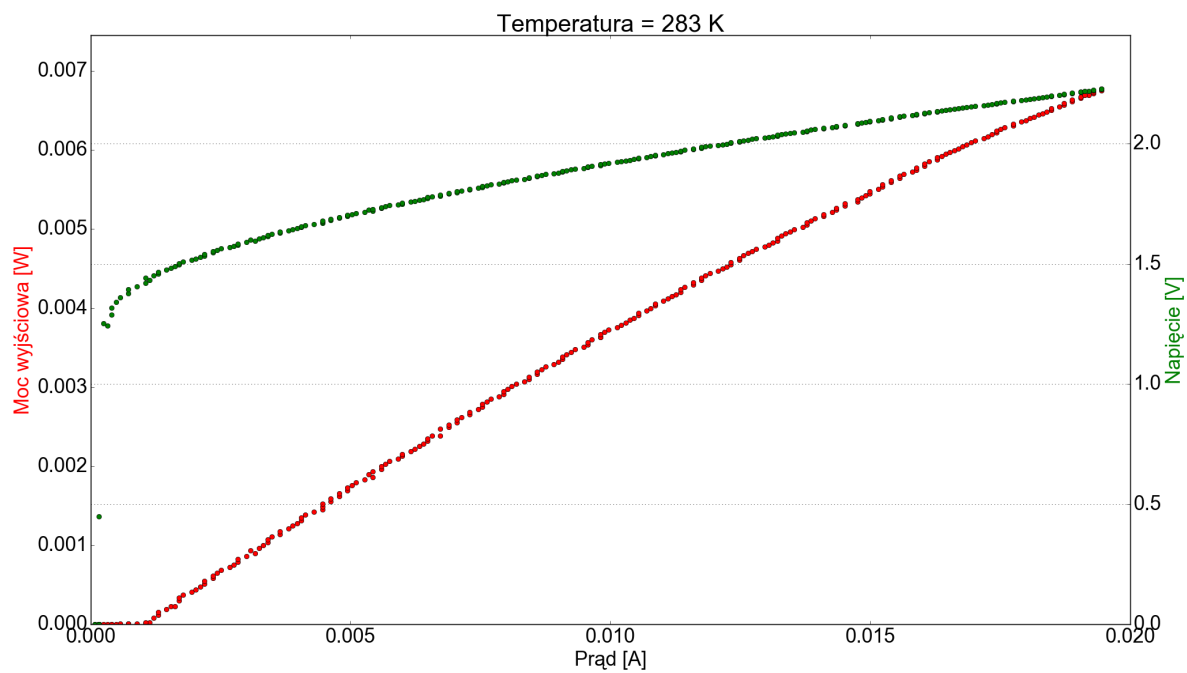
Tabela 1 zawiera wyznaczone wartości prądu progowego I_0 oraz wartości przyrostowej sprawności różniczkowej η dla tego lasera. Rysunek 3.1 przedstawia charakterystykę wszystkich badanych laserów. Rysunki 3.2-3.29 przedstawiają charakterystyki lasera wraz z obliczonymi parametrami które służą do charakterystyki lasera. Rysunek 3.30 przedstawia wykres prądu progowego w funkcji temperatury.

Tabela 5.1: Wyznaczone wartości prądu progowego I_0 oraz przyrostowej sprawności różniczkowej η w różnych temperaturach T dla lasera krawędziowego 980 nm.

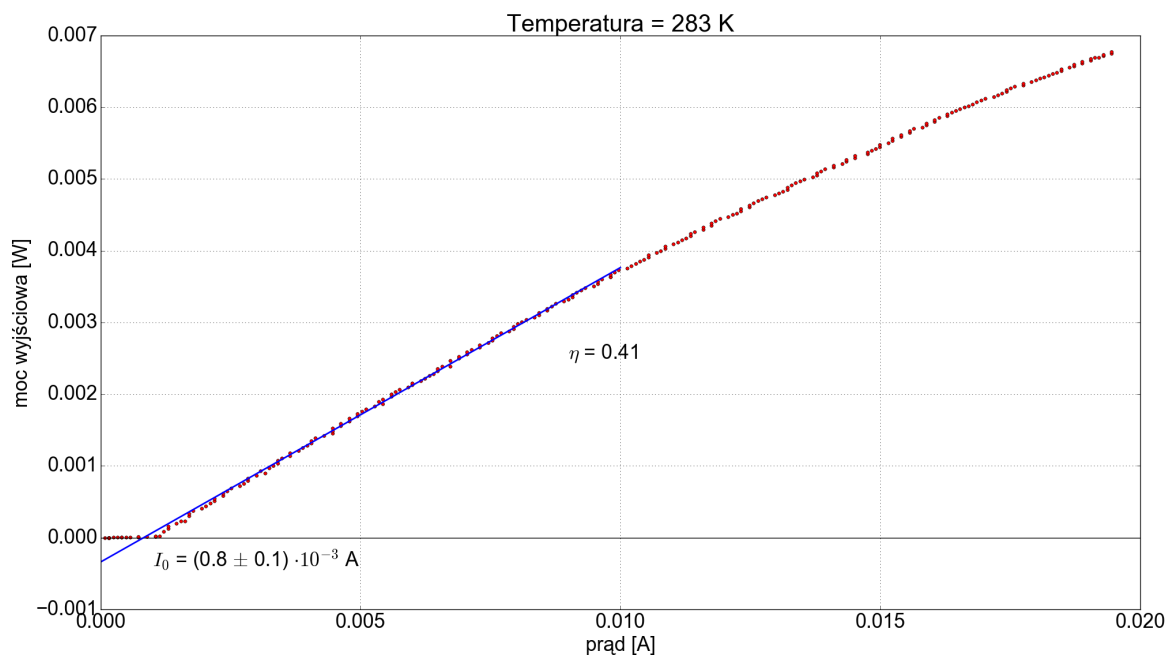
T [K]	I_0 [mA]	η
283	0.8 ± 0.1	0.41 ± 0.01
293	0.9 ± 0.1	0.39 ± 0.01
303	1.0 ± 0.1	0.38 ± 0.01
313	1.1 ± 0.1	0.37 ± 0.01
323	1.2 ± 0.1	0.35 ± 0.01
333	1.4 ± 0.1	0.33 ± 0.01
343	1.6 ± 0.1	0.31 ± 0.01
353	2.0 ± 0.1	0.29 ± 0.01
363	2.2 ± 0.1	0.27 ± 0.01



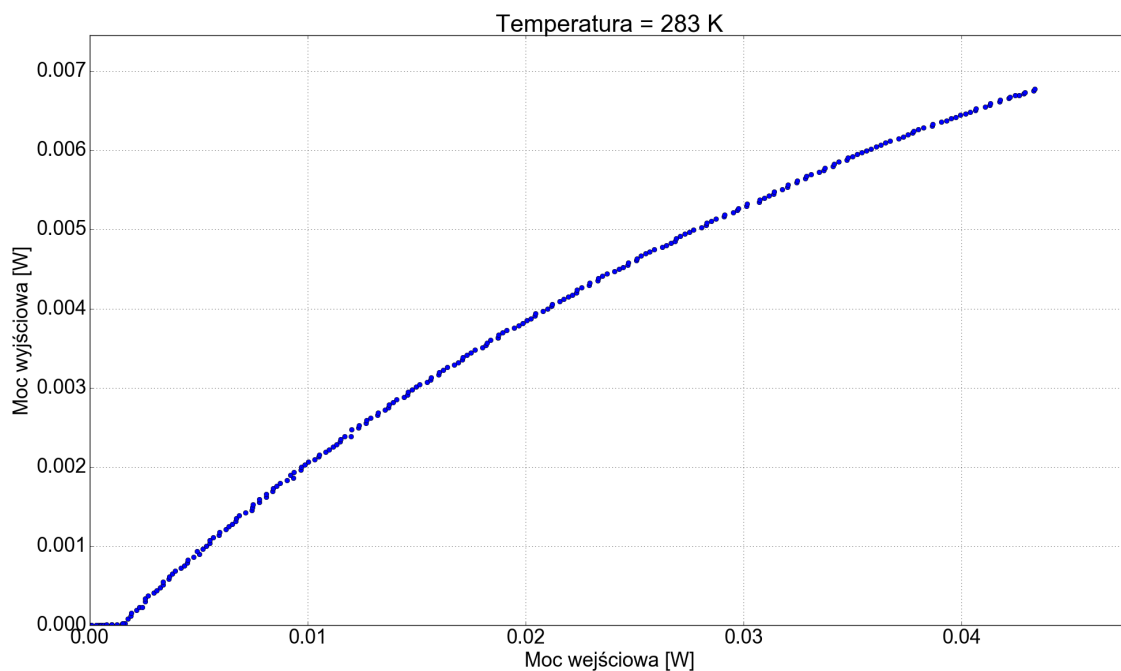
Rysunek 5.2: Wykres wszystkich



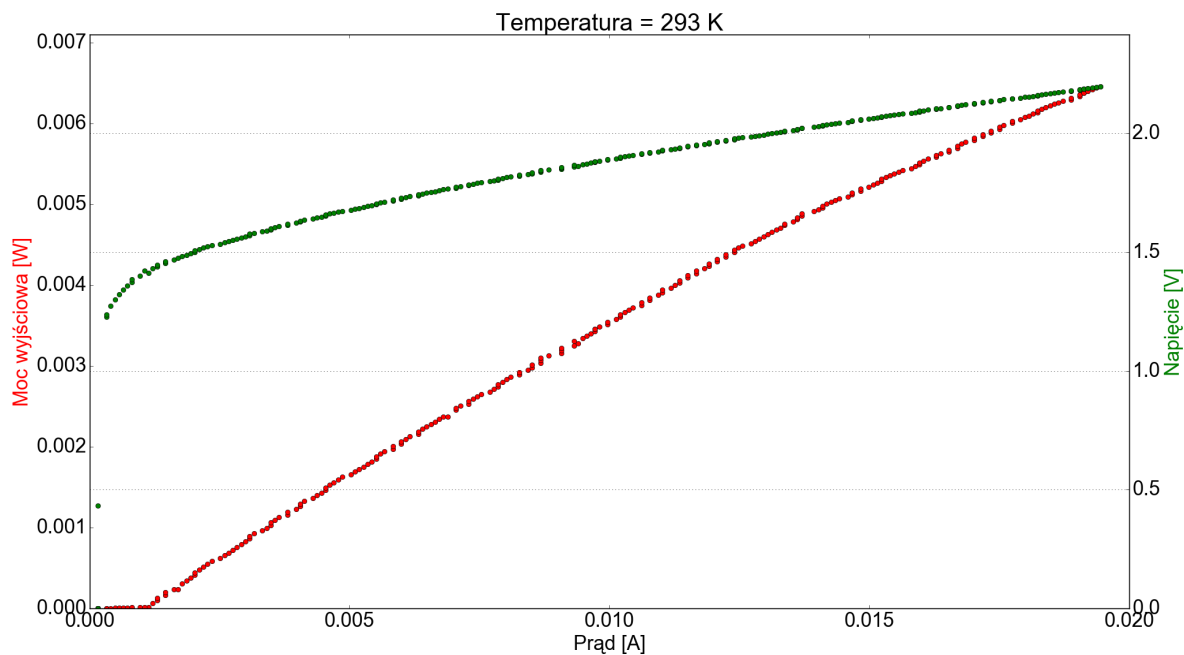
Rysunek 5.3: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 283 K.



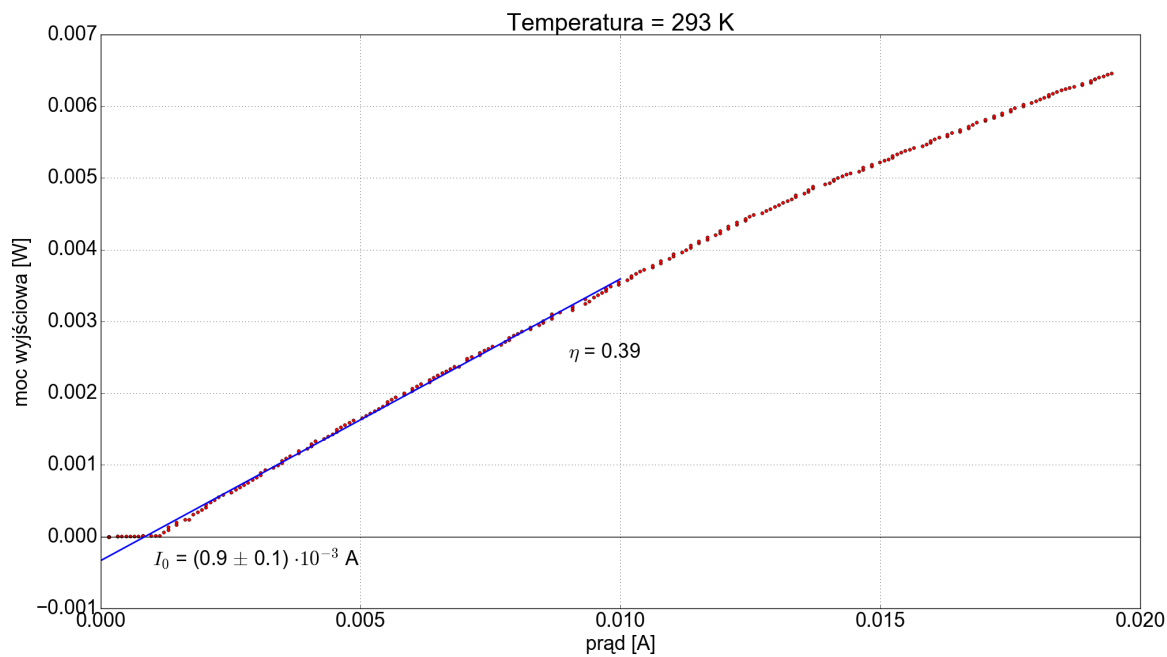
Rysunek 5.4: Charakterystyka mocy lasera kraędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 283 K.



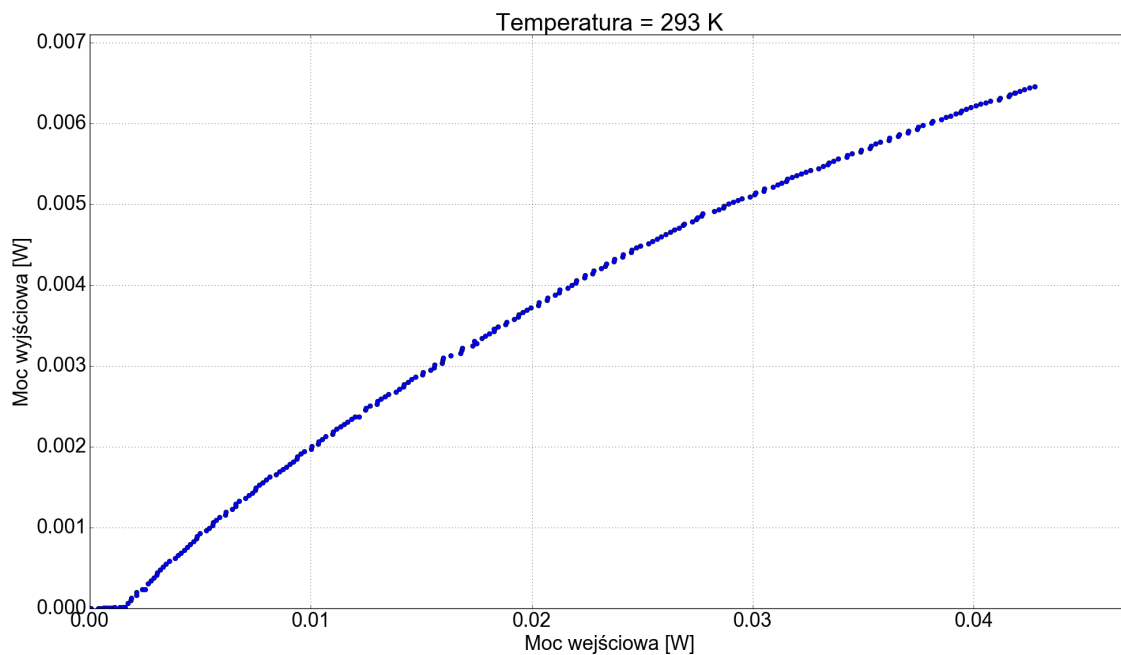
Rysunek 5.5: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 283 K.



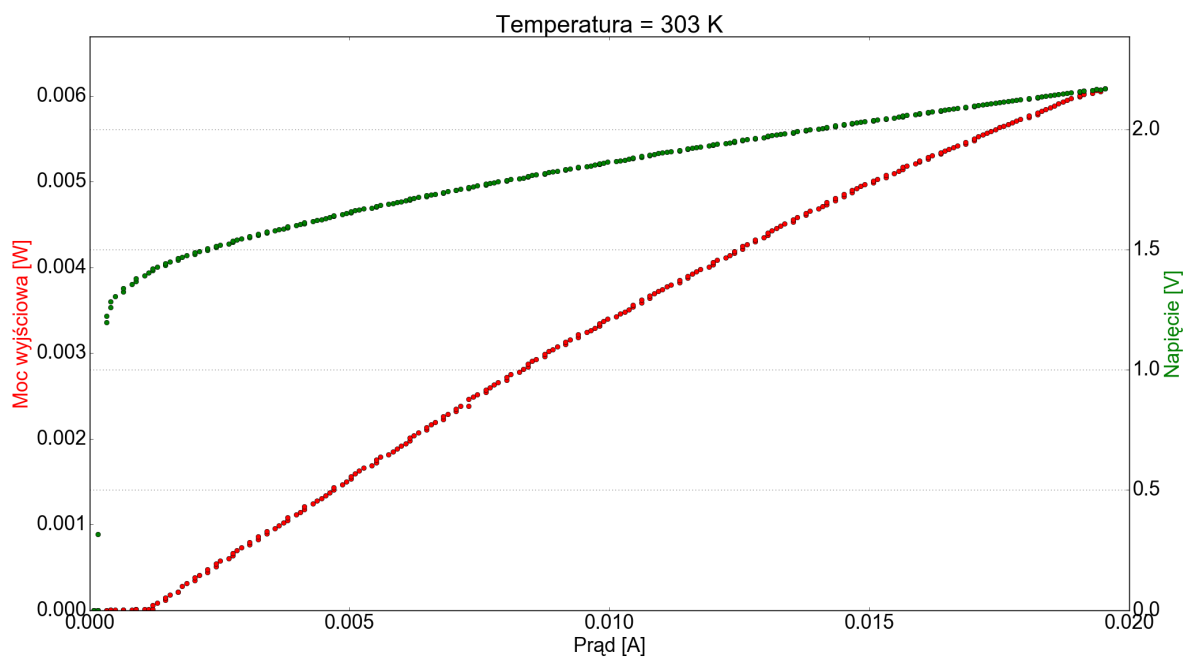
Rysunek 5.6: Charakterystyka lasera krędziowego 980 nm w temperaturze 293 K.



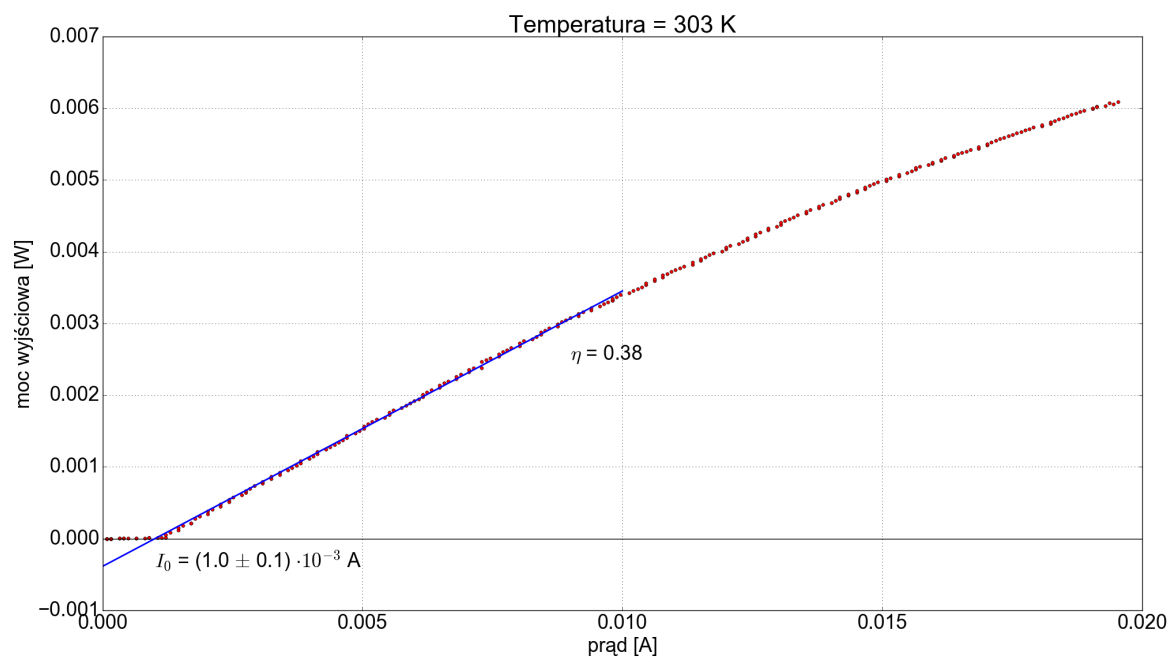
Rysunek 5.7: Charakterystyka mocy lasera krędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 293 K.



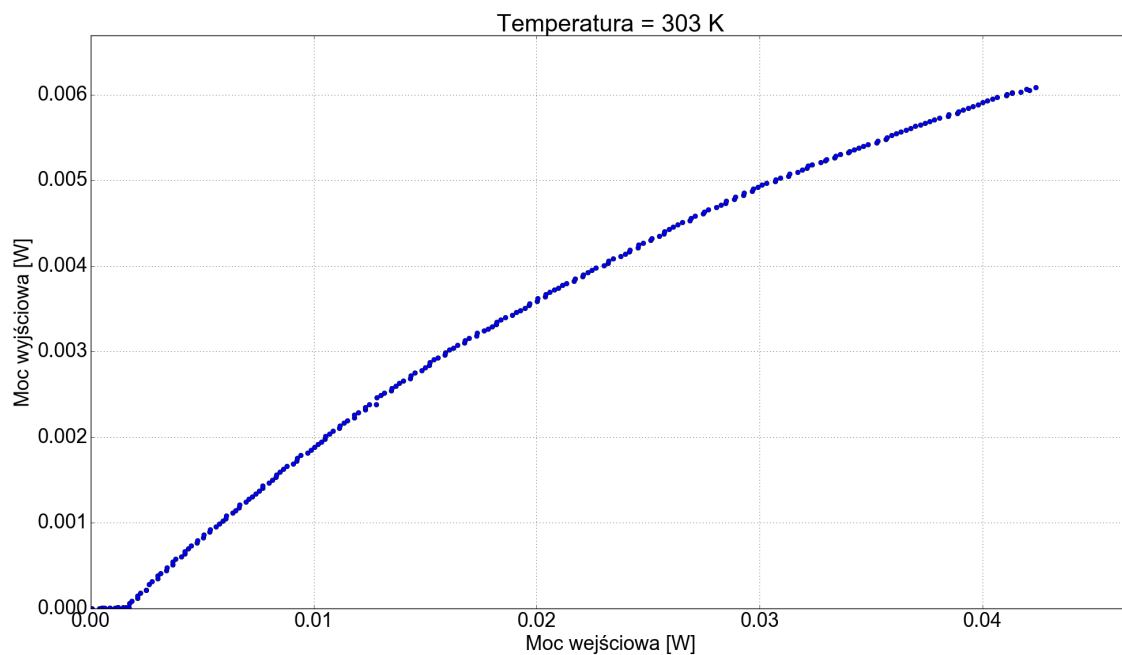
Rysunek 5.8: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 293 K.



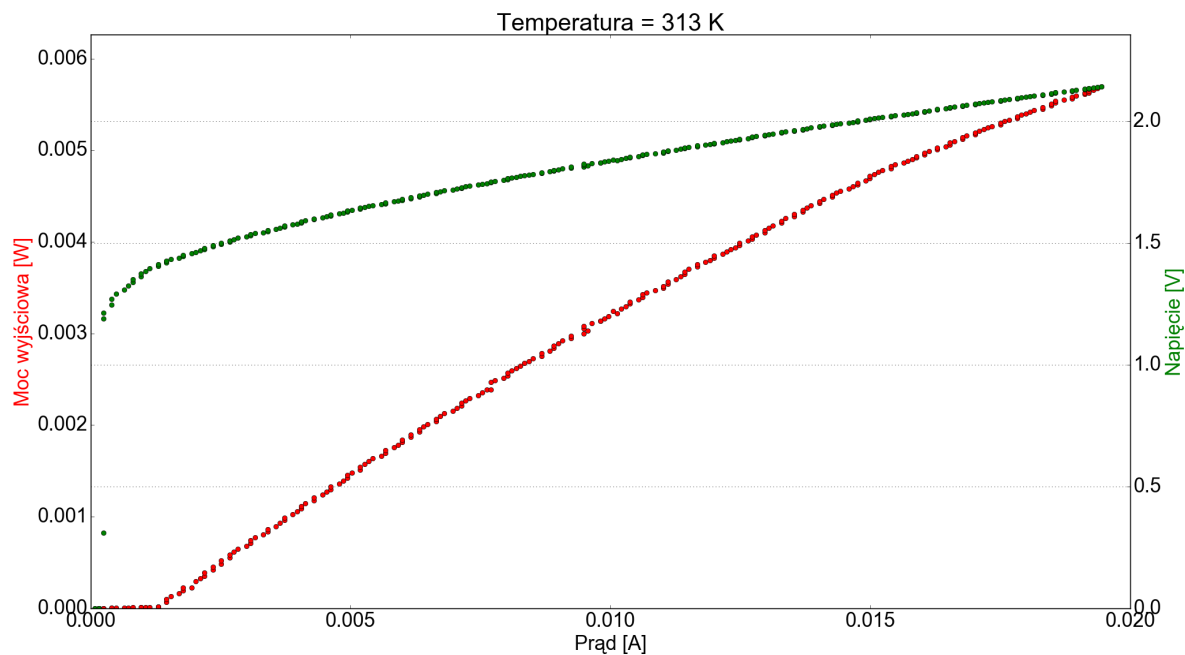
Rysunek 5.9: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 303 K.



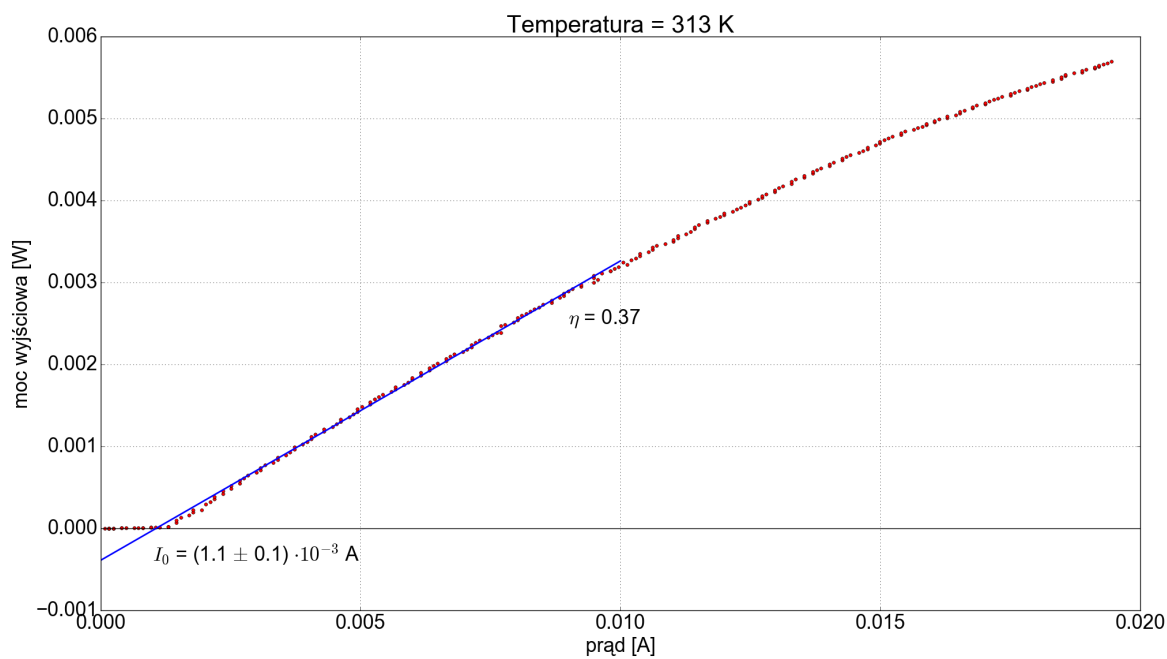
Rysunek 5.10: Charakterystyka mocy lasera krawędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 303 K.



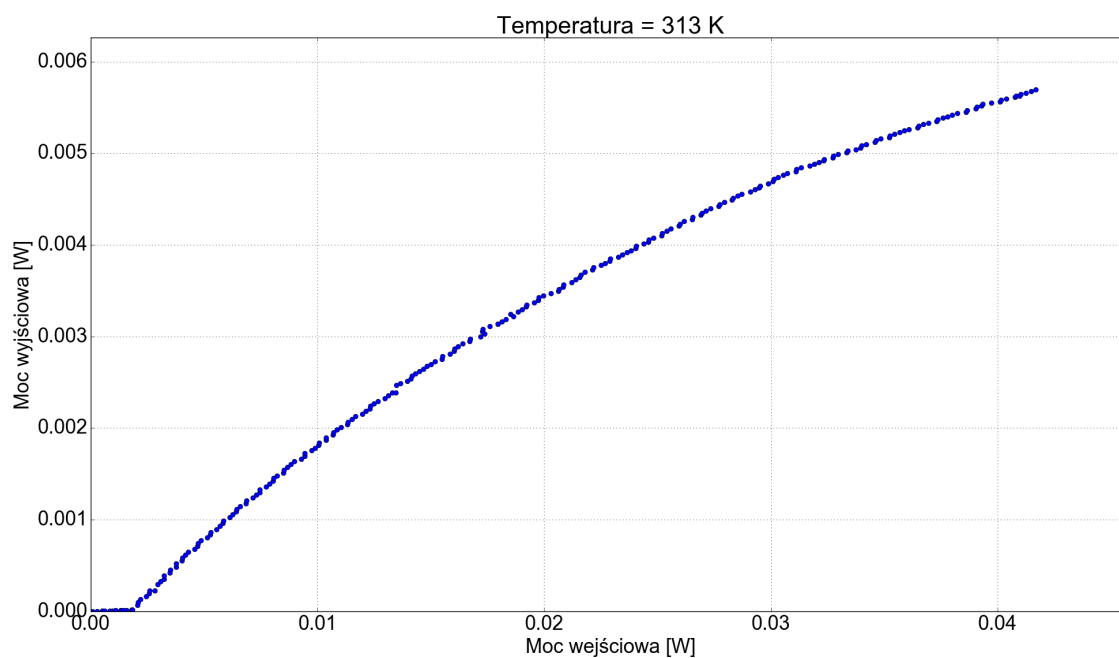
Rysunek 5.11: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 303 K.



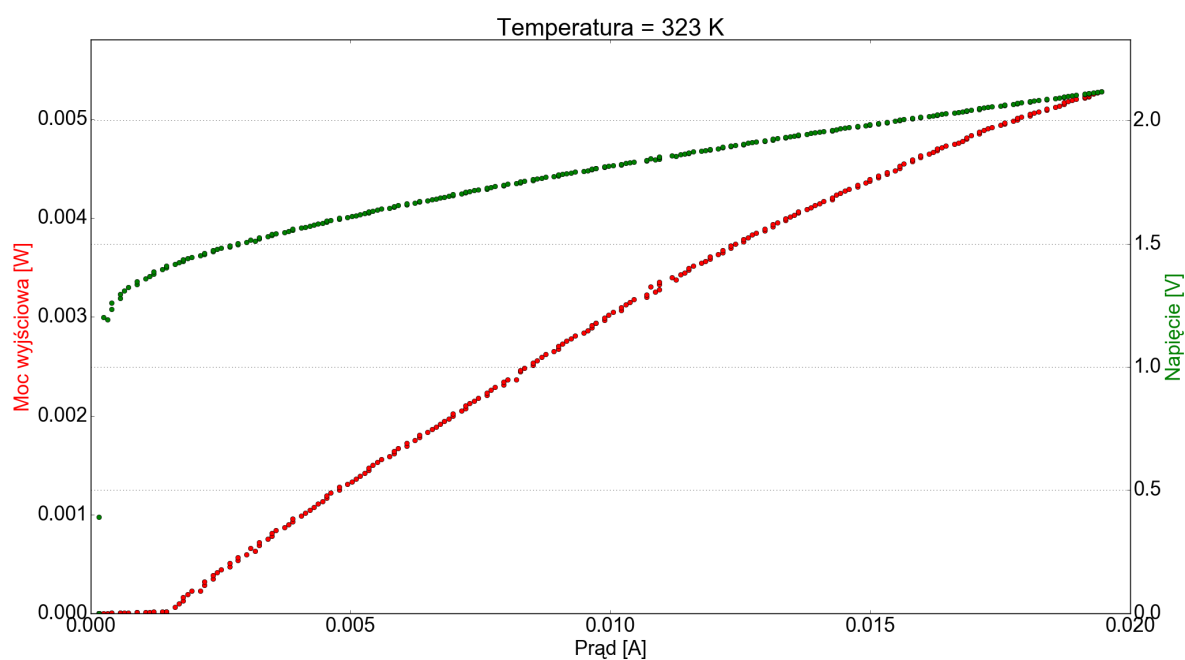
Rysunek 5.12: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 313 K.



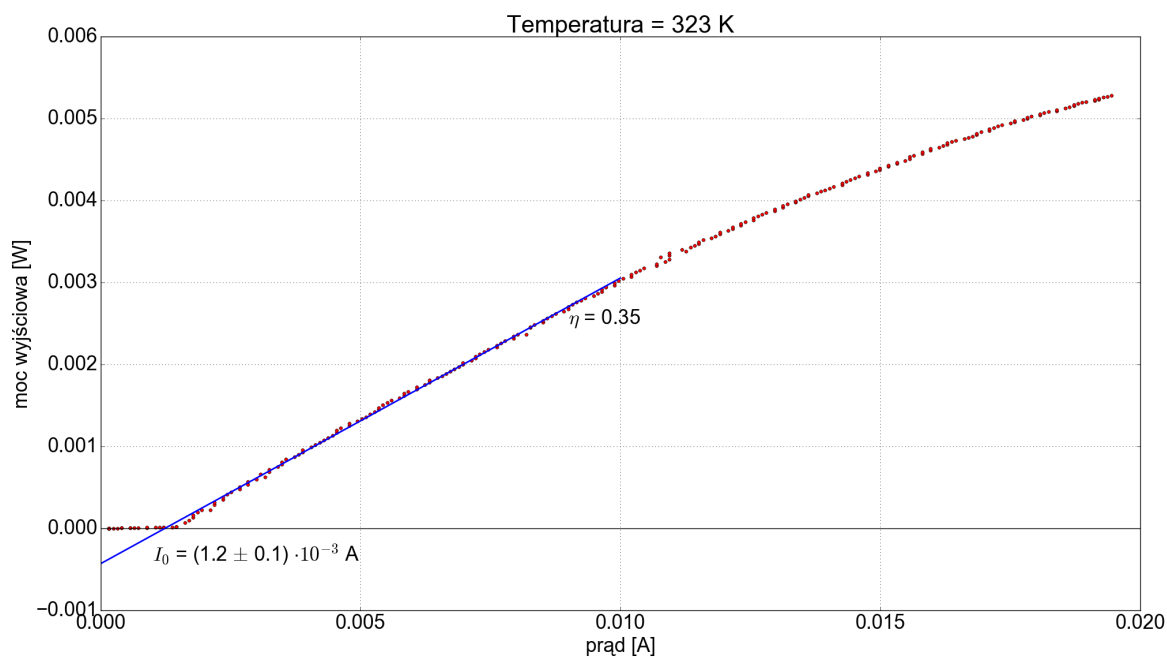
Rysunek 5.13: Charakterystyka mocy lasera krawędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 313 K.



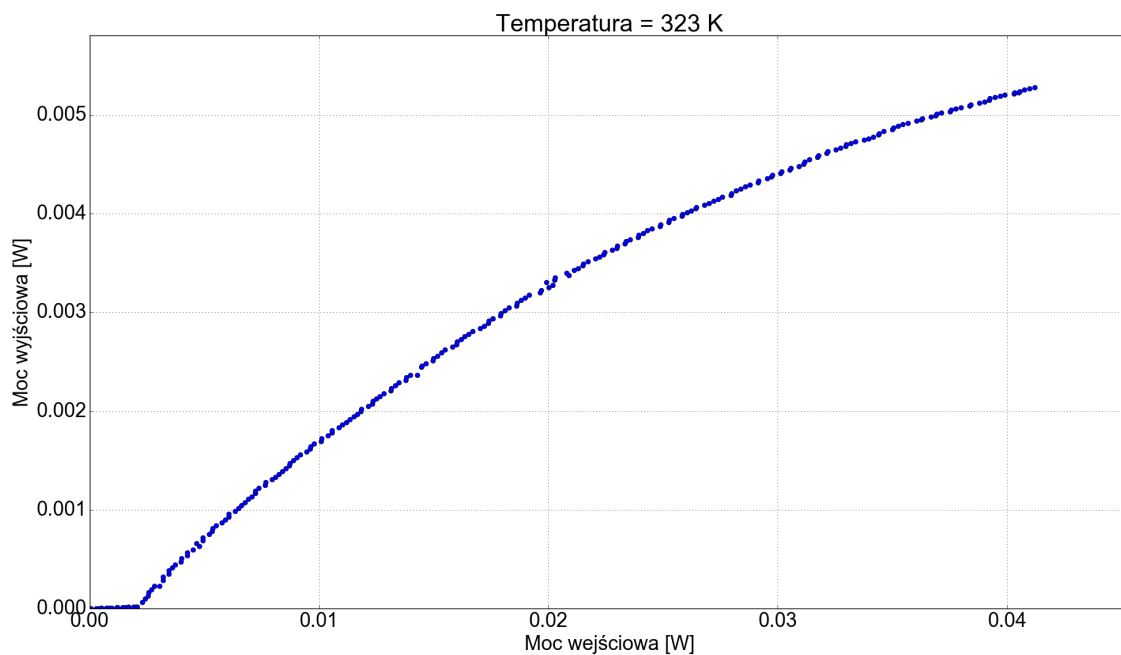
Rysunek 5.14: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 313 K.



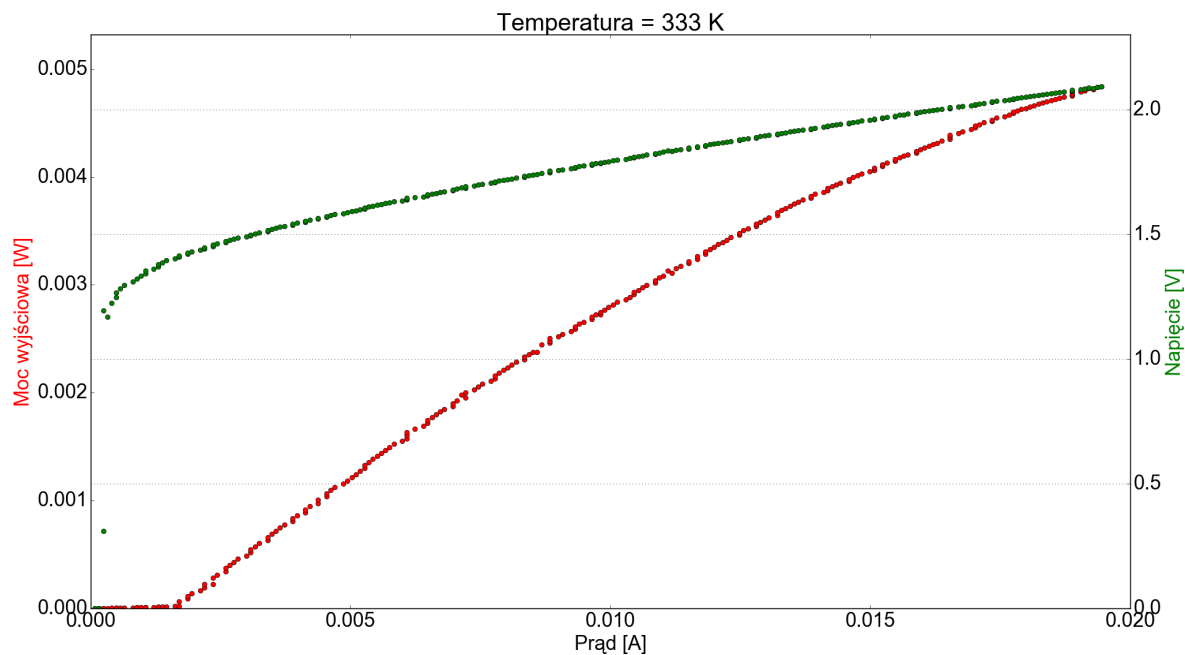
Rysunek 5.15: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 323 K.



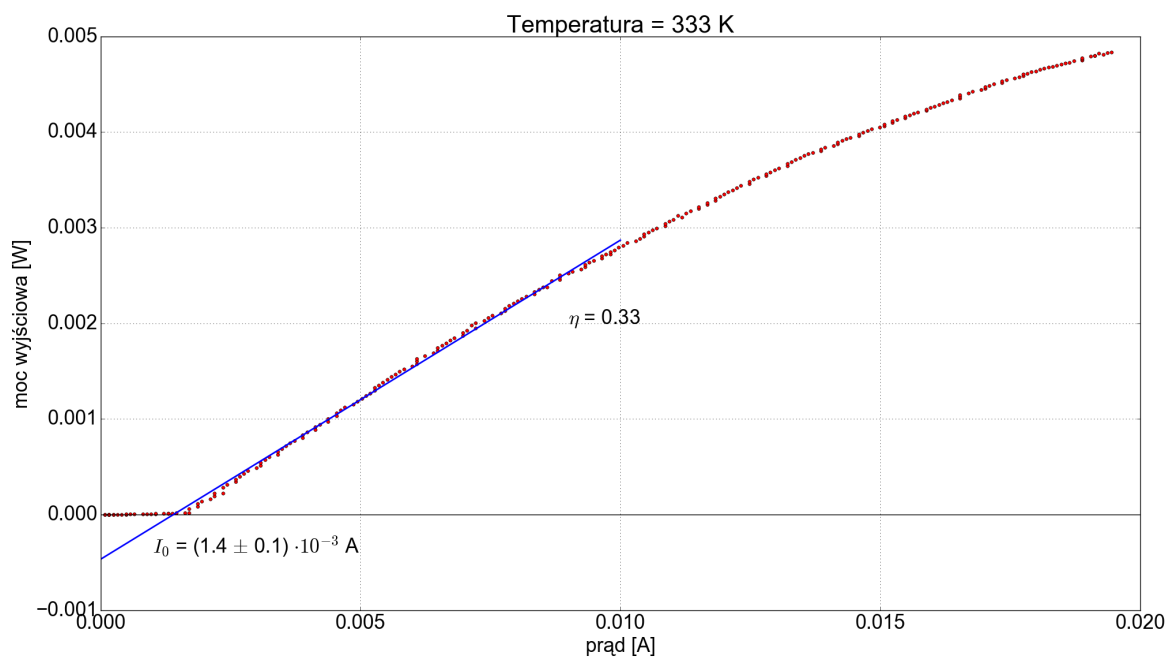
Rysunek 5.16: Charakterystyka mocy lasera krawędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 323 K.



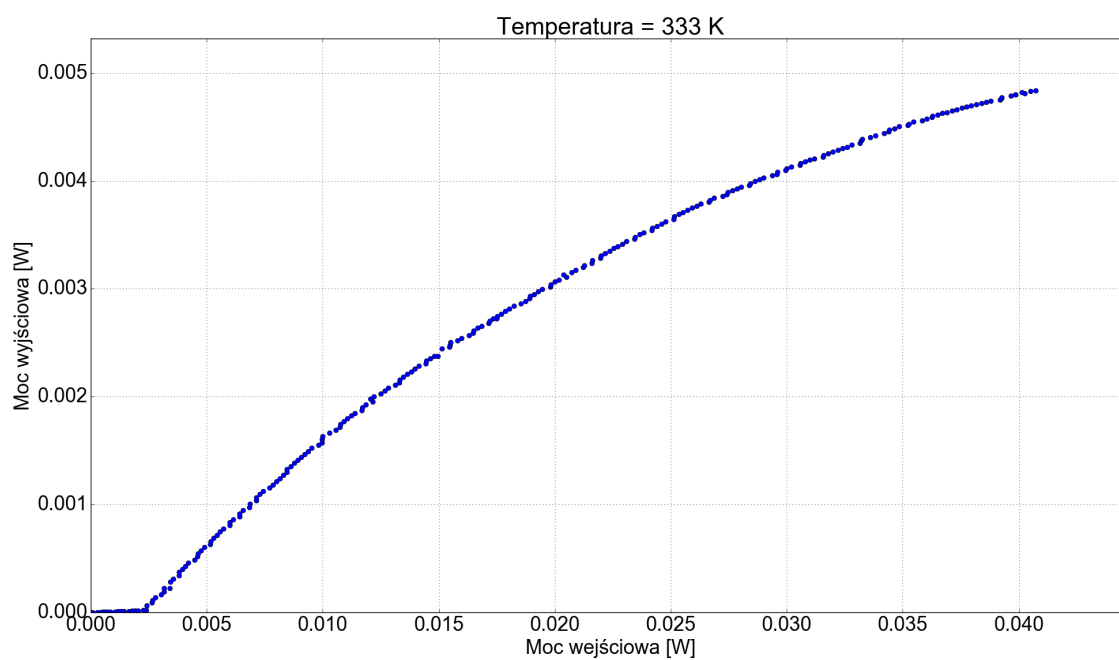
Rysunek 5.17: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 323 K.



Rysunek 5.18: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 333 K.

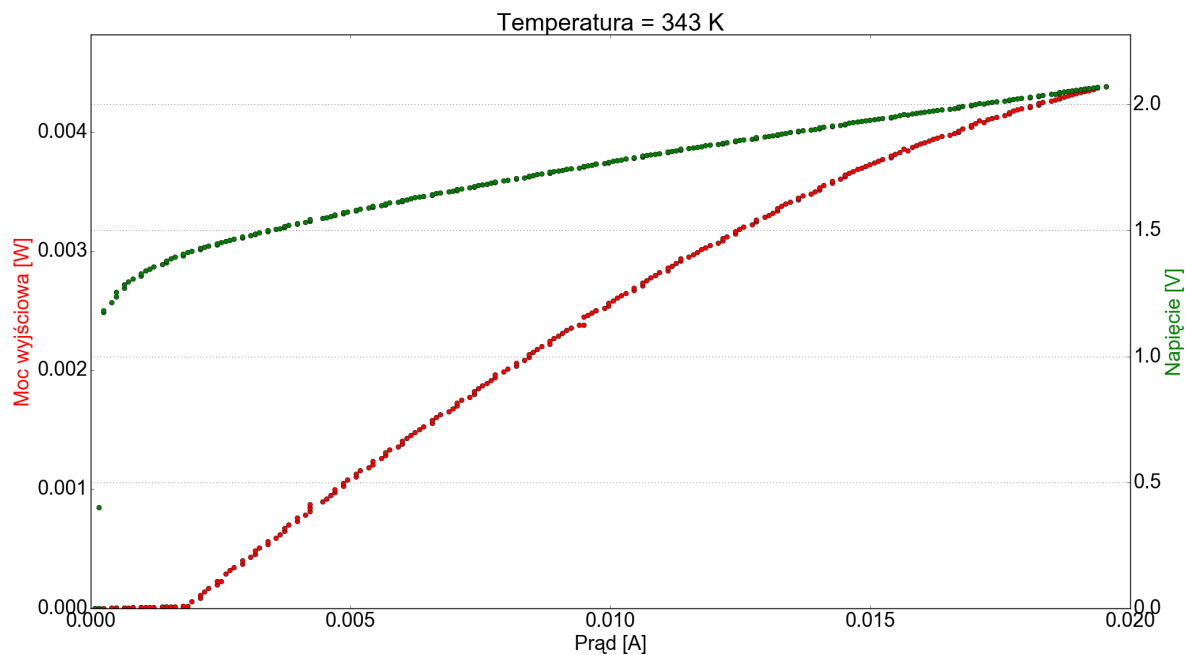


Rysunek 5.19: Charakterystyka mocy lasera krawędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 333 K.

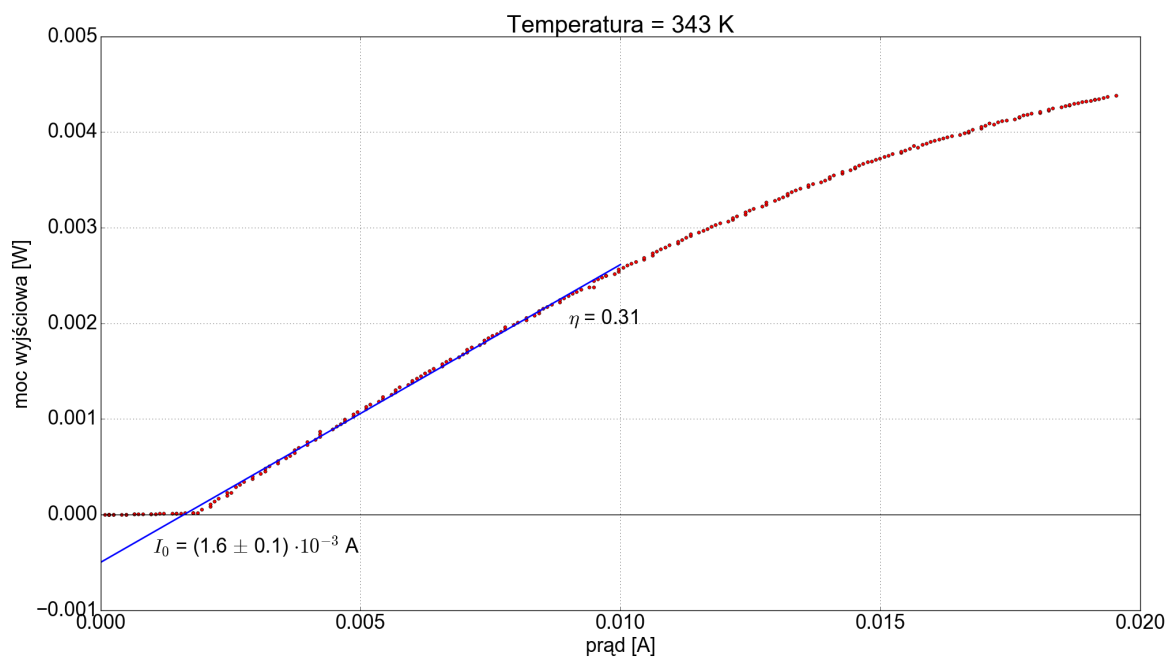


Rysunek 5.20: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 333 K.

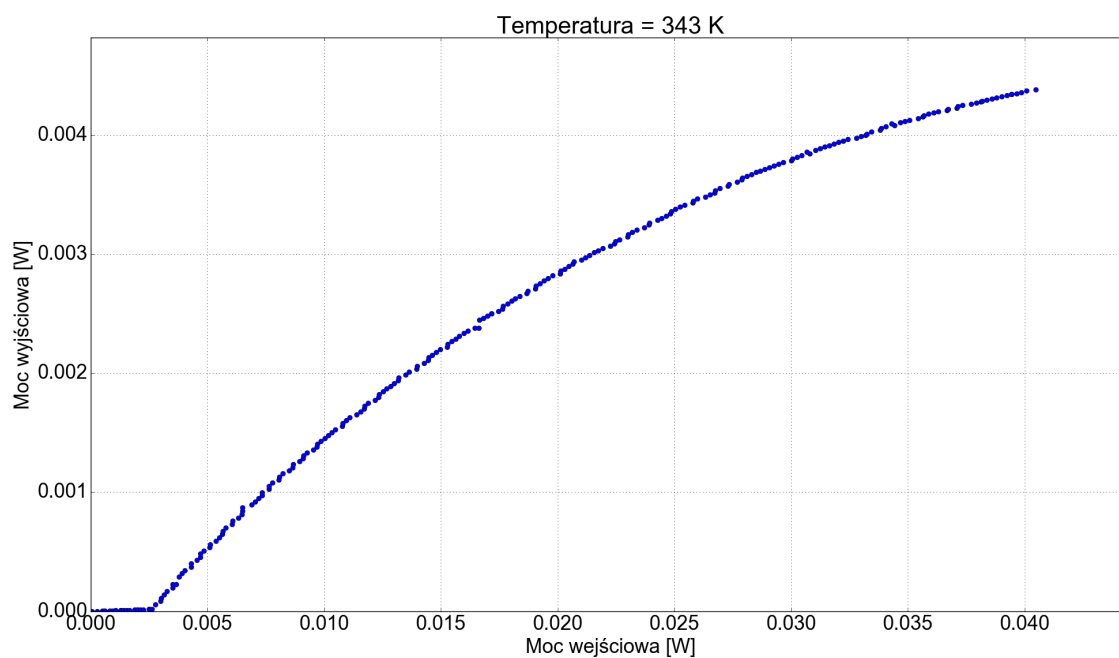
5.3 Laser krawędziowy 635 nm



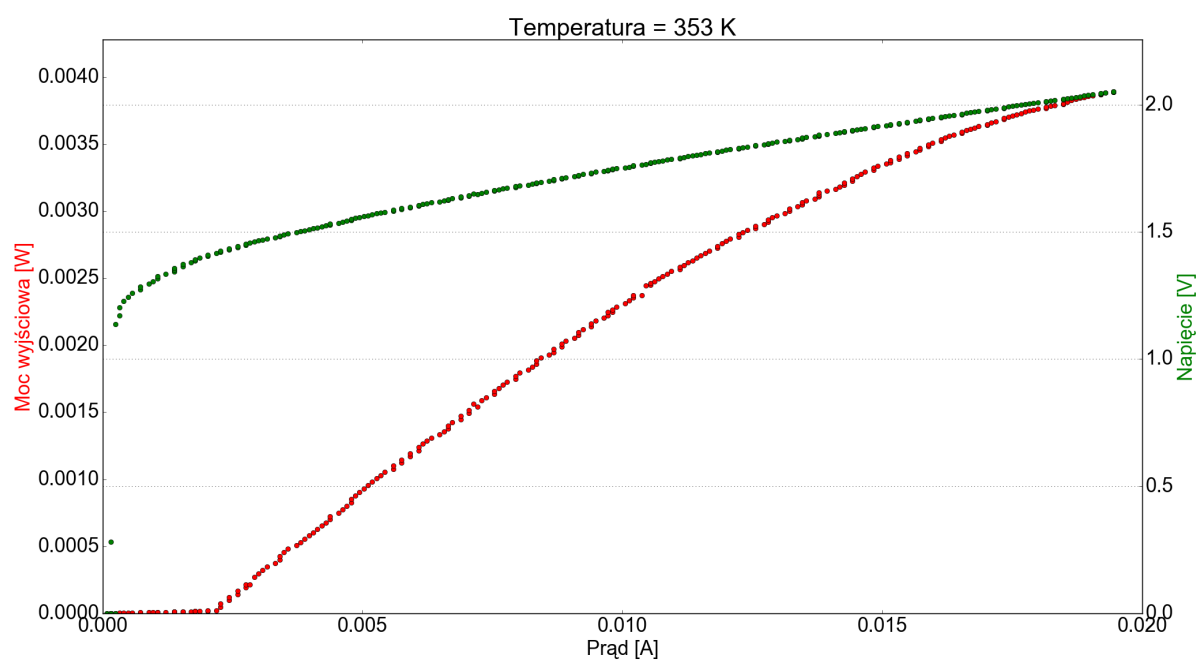
Rysunek 5.21: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 343 K.



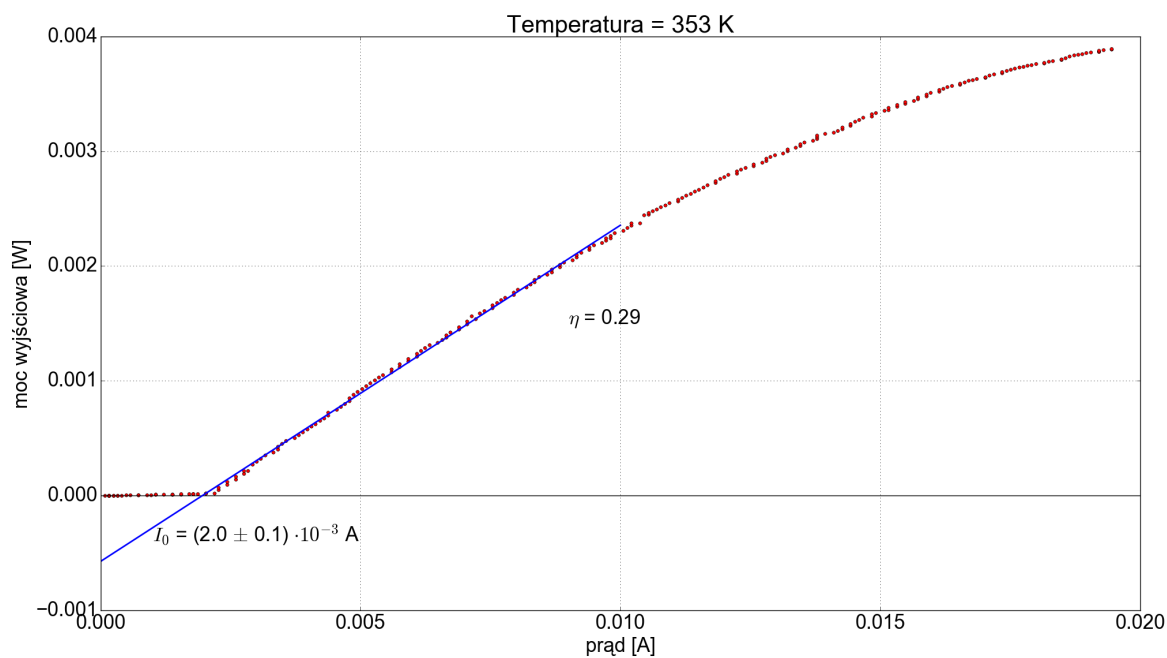
Rysunek 5.22: Charakterystyka mocy lasera krawędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 343 K.



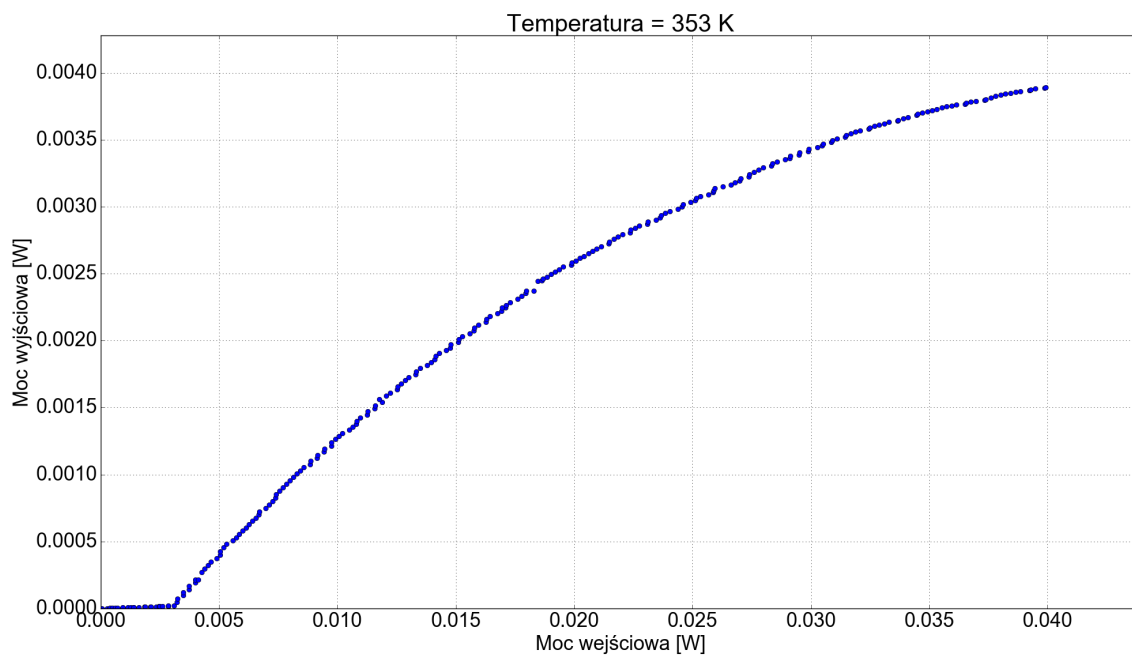
Rysunek 5.23: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 343 K.



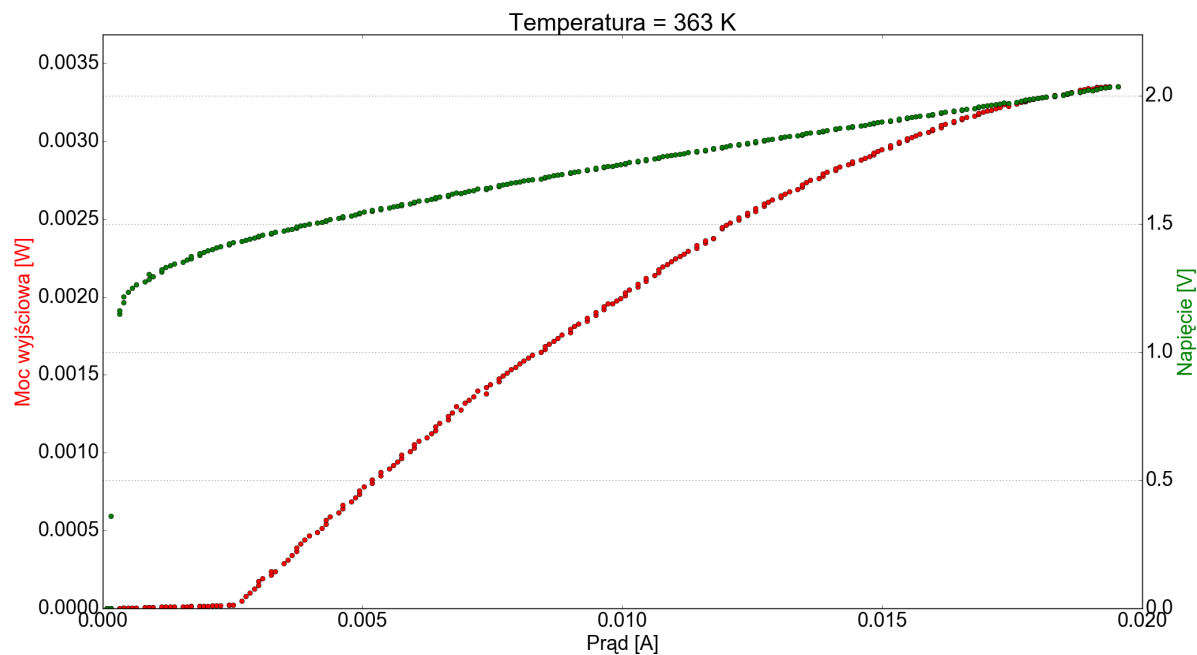
Rysunek 5.24: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 353 K.



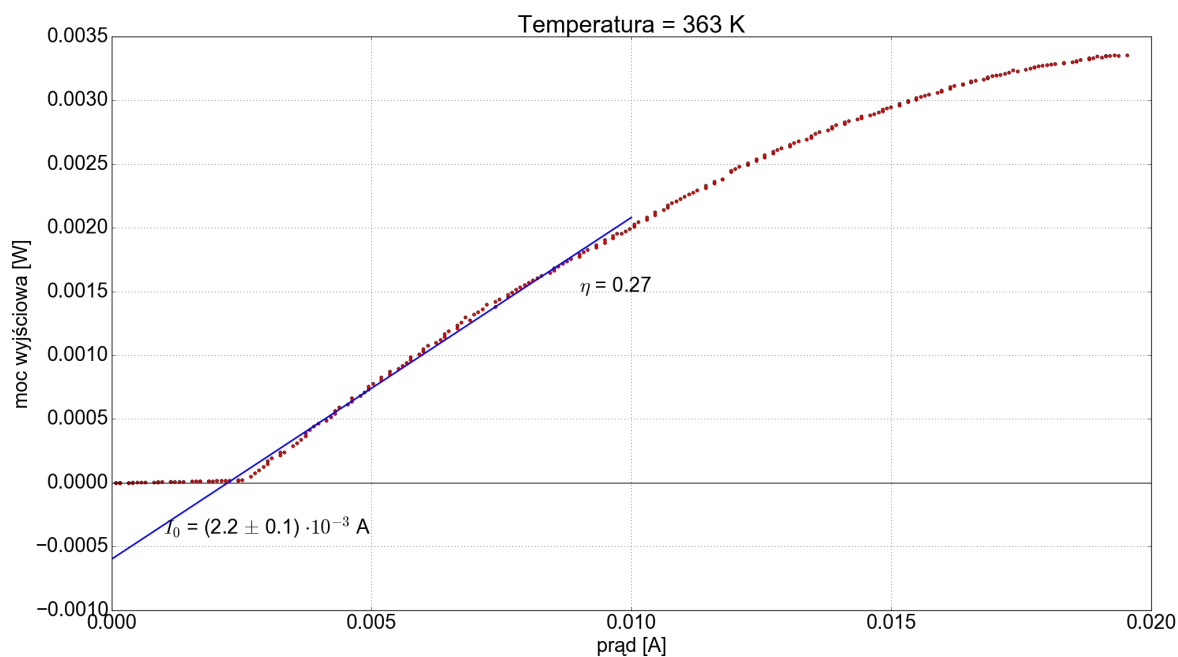
Rysunek 5.25: Charakterystyka mocy lasera krawędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 353 K.



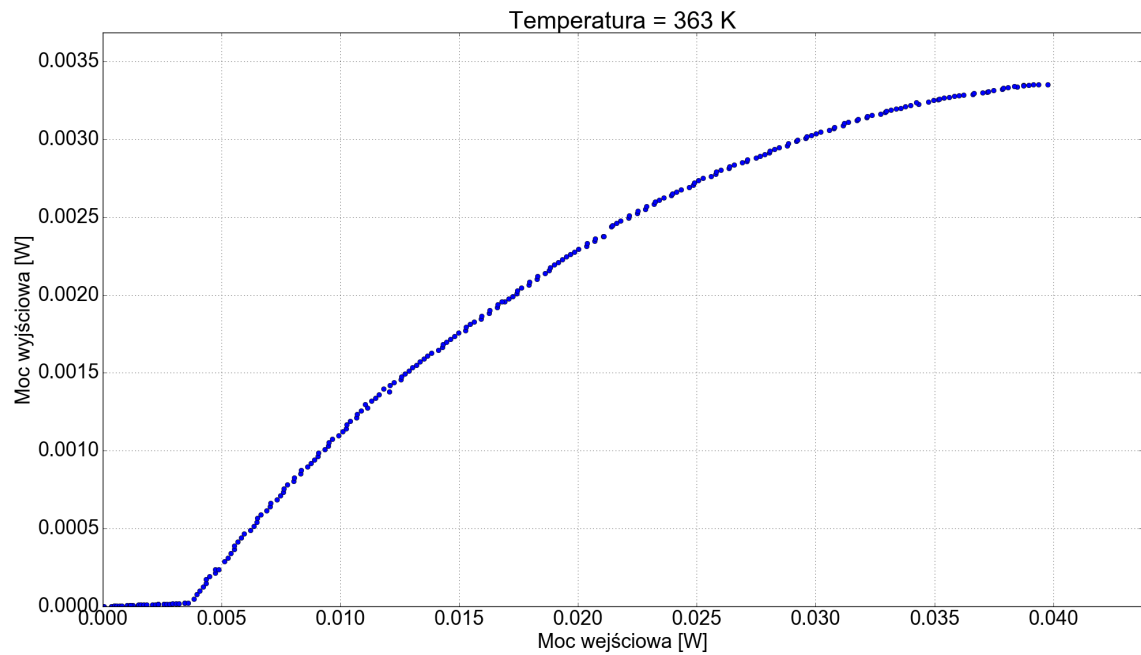
Rysunek 5.26: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 353 K.



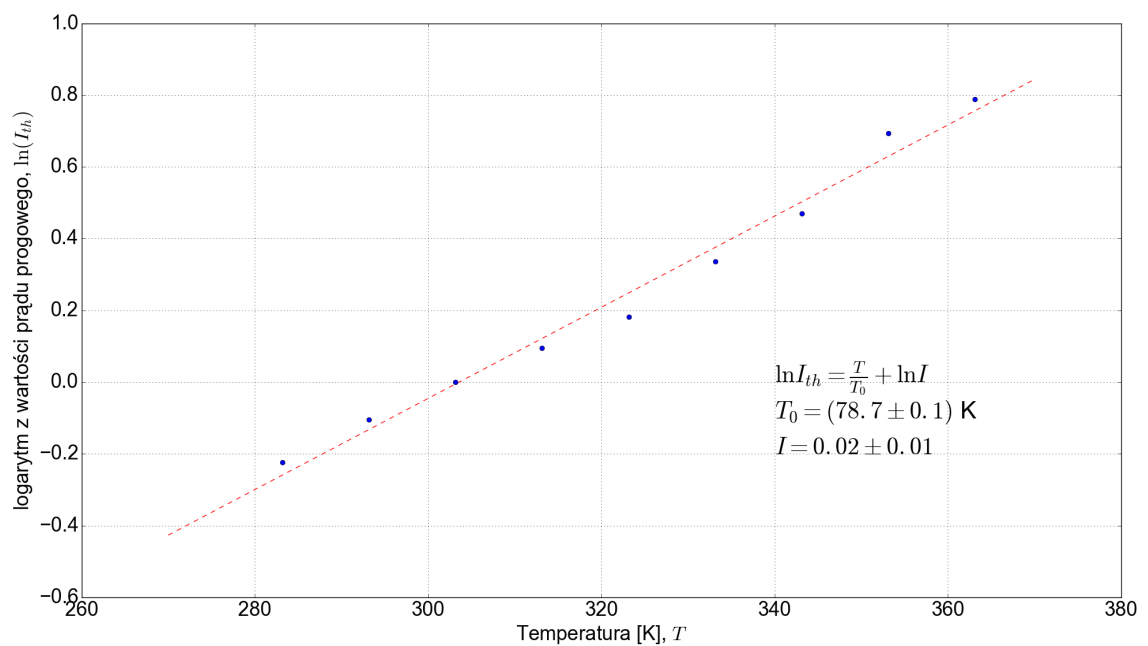
Rysunek 5.27: Charakterystyka lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 363 K.



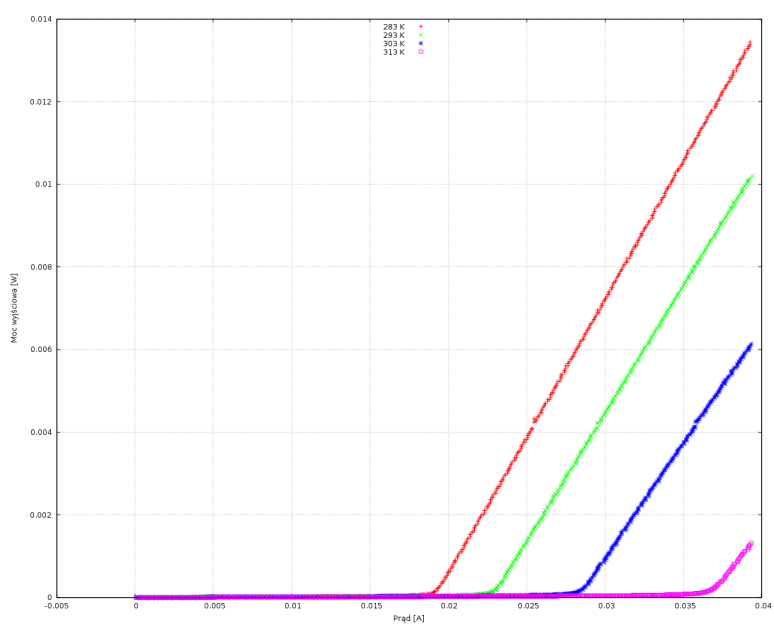
Rysunek 5.28: Charakterystyka mocy lasera krawędziowego 980 nm z obliczonym prądem progowym I_0 oraz przyrostową sprawnością różniczkową η w temperaturze 363 K.



Rysunek 5.29: Charakterystyka mocy wyjściowej do wejściowej lasera krawędziowego 980 nm w temperaturze 363 K.



Rysunek 5.30: Wykres zależności prądu progowego od temperatury.



Rysunek 5.31: Wykres zależności prądu progowego od temperatury.