

# Czy to nadal złoto?

## Badanie właściwości elektrycznych cienkiej warstwy złota

Patrycja Trybułowska, Zuzanna Rudzińska

16 października 2023

### 1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie właściwości elektrycznych cienkich warstw złota w celu sprawdzenia czy zmienia ono swoje właściwości wraz z grubością.

### 2 Wstęp

#### 2.1 Do czego potrzebne są cienkie warstwy złota?

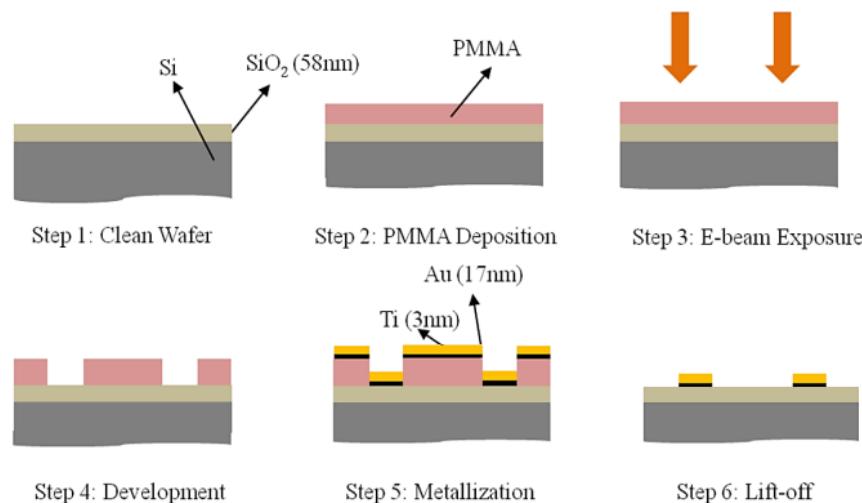
Rozwój technologii w ostatnich latach jest bardzo dynamiczny. Jak widzimy na przykładzie urządzeń elektronicznych dązymy do ich zminiaturyzowania i do przechowywania jak największej liczby danych. Aby mogło to następować potrzebne są nam coraz nowsze metody i materiały do budowy takich nano-urządzeń jakimi przykładowo są powszechnie stosowane tranzystory. Do ich budowy wykorzystuje się nanomateriały, które również mają zastosowanie w innych dziedzinach. Takie cienkie warstwy zwane również materiałami 2D, gdyż redukujemy ich jeden wymiar- grubość, okazują się zmieniać właściwości wraz z wysokością warstwy. Powszechnie znanym przykładem takiego zachowania materiału jest grafit. Jego jednoatomowa warstwa lepiej przewodzi prąd elektryczny i jest dużo bardziej wytrzymała na rozrywanie.

Złoto jest powszechnie wykorzystywany technicznie materiałem zwłaszcza w elektronice- chociażby dlatego, że jest dobrym przewodnikiem i nie ulega korozji. Zmiana jego właściwości przy miniaturyzacji urządzeń zawierających złoto będzie miała znaczący wpływ na ich pracę. Badanie właściwości cienkich warstw złota jest więc potrzebne do dalszego rozwoju sprzętów elektronicznych

#### 2.2 Przygotowanie próbki

W celu wyznaczenia rezystancji złota w cienkich warstwach wykonałyśmy pomiary elektryczne na przygotowanej płytce. Płytkę ta ma podłoże krzemowe a na nim warstwę

tlenku krzemu. Krzem został najpierw połamany z plastrów dzięki osiomej łamliwości aby uzyskać kształt prostokątny. Następnie został naniesiony na nią PMMA, który później został podgrzany. W celu ustalenia kształtu jaki chcemy uzyskać PMMA zostało naświetlone wiązką elektronów, a następnie naświetlone części zostały usunięte. Ta część została wykonana przez prowadzącą przed rozpoczęciem laboratorium.



Rysunek 1: "Czy to nadal złoto? Badanie właściwości elektrycznych cienkiej warstwy złota" z prezentacji do laboratorium autorstwa Małgorzaty Gizy

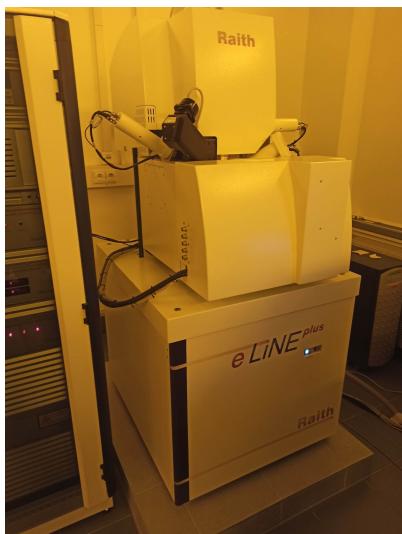
W ostatnich etapach przygotowania płytka naparowałyśmy na nią chrom(5nm) oraz złoto(42.9nm) za pomocą napylarki termicznej. Pierwszy z tych metali potrzebny jest nam aby złoto lepiej przylegało do podłoża. Następnie za pomocą acetonu zmyte zostały pozostałości PMMA. Dzięki temu otrzymaliśmy strukturę widoczną na zdjęciach. Poniżej zostawione zostały również zdjęcia urządzeń wykorzystywanych w etapie przygotowywania płytki

Kolejność wykonania płytki została przedstawiona punktowo poniżej:

1. Połamanie krzemu
2. Rozwirowanie PMMA
3. Wygrzanie PMMA, 175 C, 2 min
4. Naświetlanie wiązką elektronów
5. Development (wywołanie) - usunięcie naświetlonego PMMA
6. Metalizacja- termiczne naparowanie metalu
7. Lift-of - rozpuszczenie naświetlonego PMMA i usunięcie nadmiaru metalu z próbki



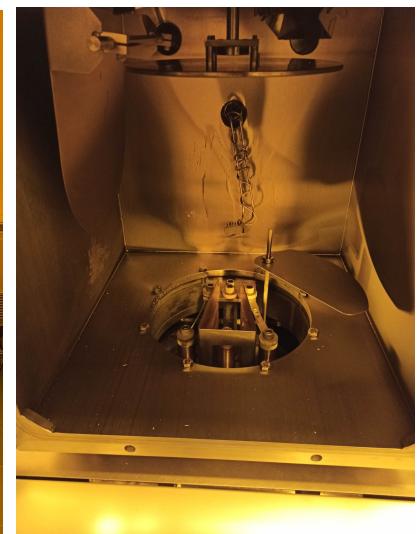
Rysunek 2: Wnętrze napylarki termicznej podczas napyłania złota oraz chromu na próbce



Aparatura do wysokorozdzielczej elektronno-litografii



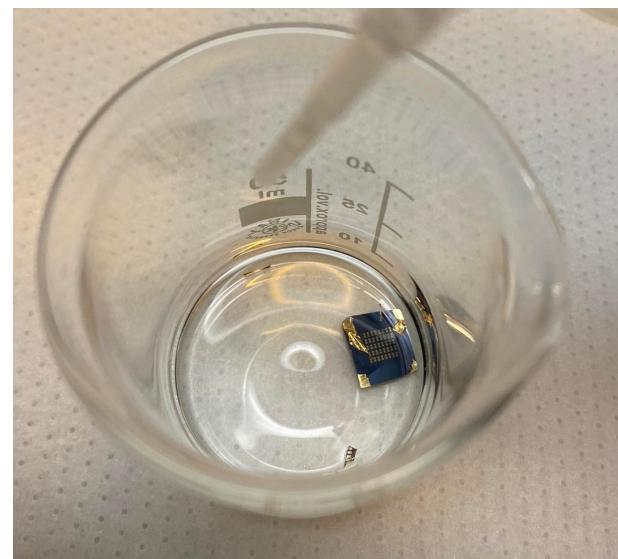
Napylarka termiczna



Napylarka termiczna  
wnętrze

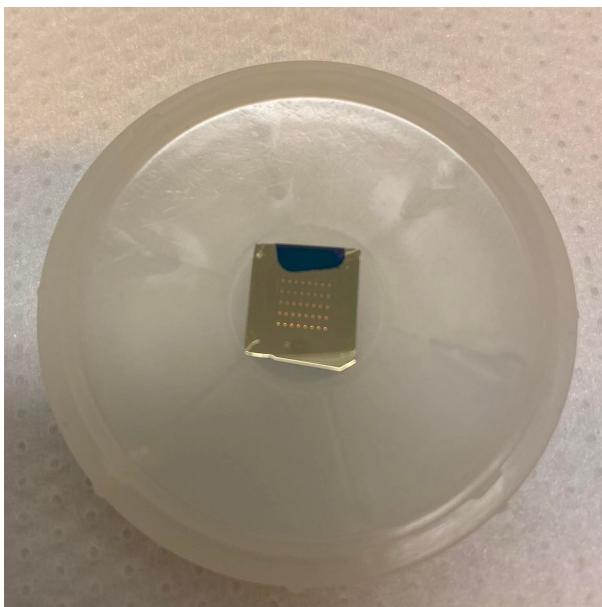


Płytkę umieszczona w podgrzewanym acettonie w celu usunięcia PMMA

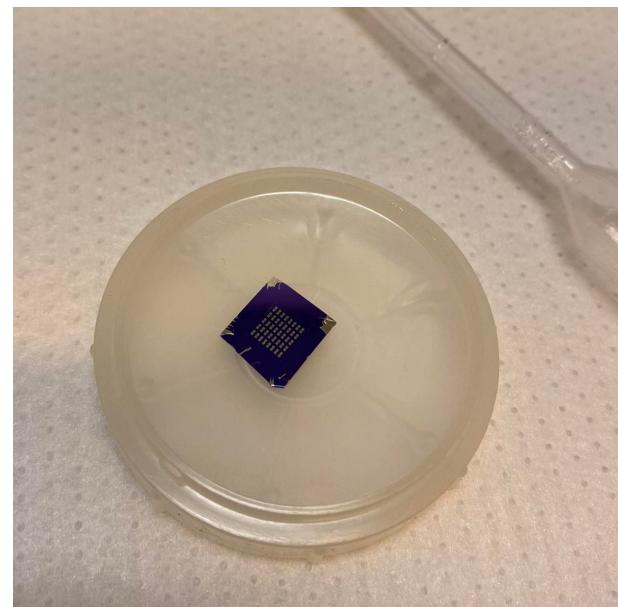


Usuwanie pozostałości złota pipetą z acetonom

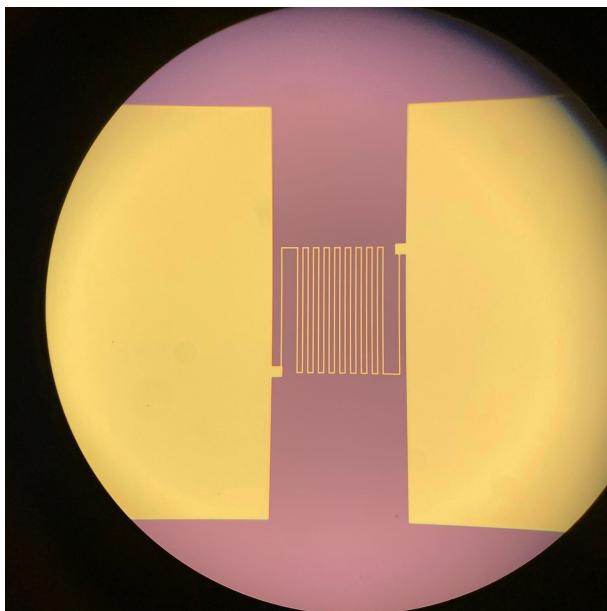
Przy czyszczeniu płytka acetonem podgrzany on został do temperatury  $35^{\circ}\text{C}$ . W umieszczonej tam płytce rozpuścił się w nim PMMA, jednak aby całkowicie usunąć pozostałe złoto posłużyłyśmy się pipetą.



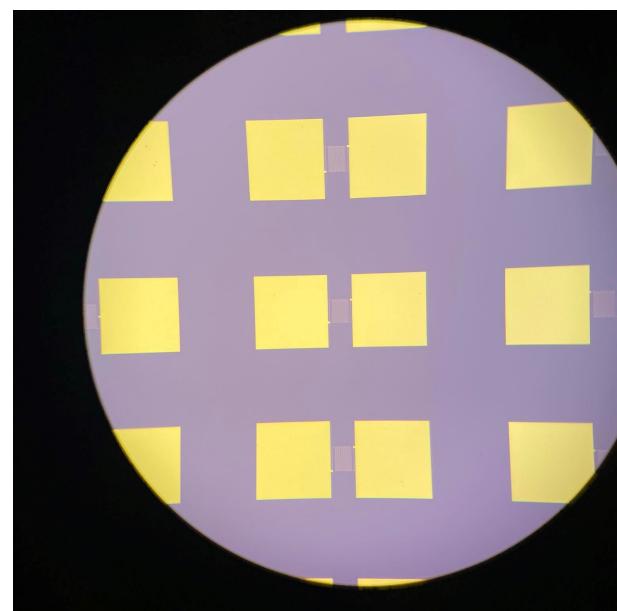
Płytkę po napyleniu chromu i złota



Płytkę po napyleniu przeszczyszczona acetonom

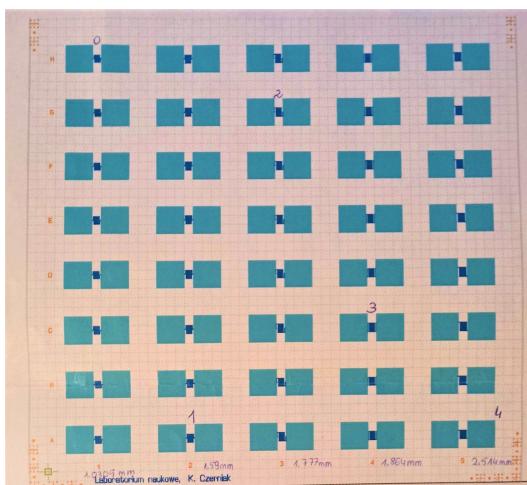


Struktura złota na płytce- przybliżenie na część z linią

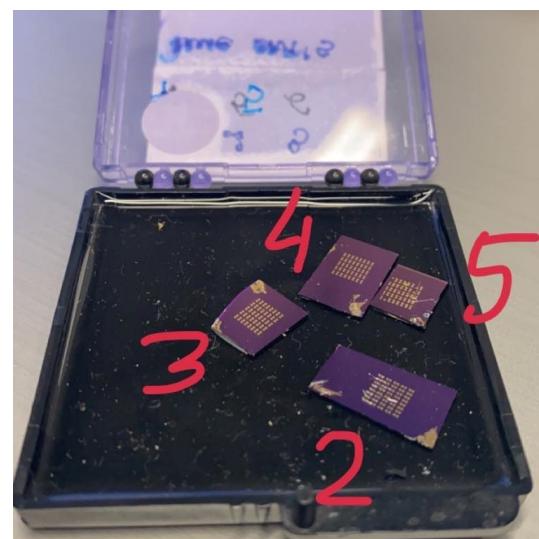


Struktura złota na płytce- widok na złote kwadraciki

Struktura złota jaką otrzymałyśmy została przedstawiona powyżej. Są to złote "kwadraty" pomiędzy którymi znajduje się cienka łamana złota linia. Zgodnie z projektem do litografii wiemy, że długość tej linii wzrasta wraz z numerem kolumny (poruszając się od lewej do prawej). W odrębie rzędów natomiast długości te się nie zmieniają i pozwalają na szerszy wybór pomiarowy gdyby nastąpiła jakaś zmiana mechaniczna w strukturze podczas przygotowania lub przenoszenia. Pomiar elektryczny który został przez nas wykonany odbywał się właśnie pomiędzy tymi kwadratami poprzez ich połączenie- złotą łamana linię. Siatka owych struktur jest ustawniona jako prostokąt o bokach A-H oraz 1-5.



Projekt płytki do litografii z niewidocznymi wyraźnie obszarami cienkiej linii łamanej



Płytki z poprzednich lat służące do porównania

Dla porównania różnych grubości złota użyłyśmy płytek z poprzednich lat laboratorium widocznych na zdjęciu powyżej.

Długości łamanych złotych linii uznajemy za znane z projektu litografii:

nr rzędu	1	2	3	4	5
długość linii [mm]	1.0305	1.59	1.777	1.864	2.514

## 3 Wykonywanie pomiarów

W laboratorium zmierzyłyśmy grubości płytka za pomocą Mikroskopu Sił Atomowych oraz charakterystyki napięciowo- prądowe dla poszczególnych płytka. Procesy poszczególnych pomiarów i ewentualnych sposobów opracowywania danych zostało przedstawiony poniżej.

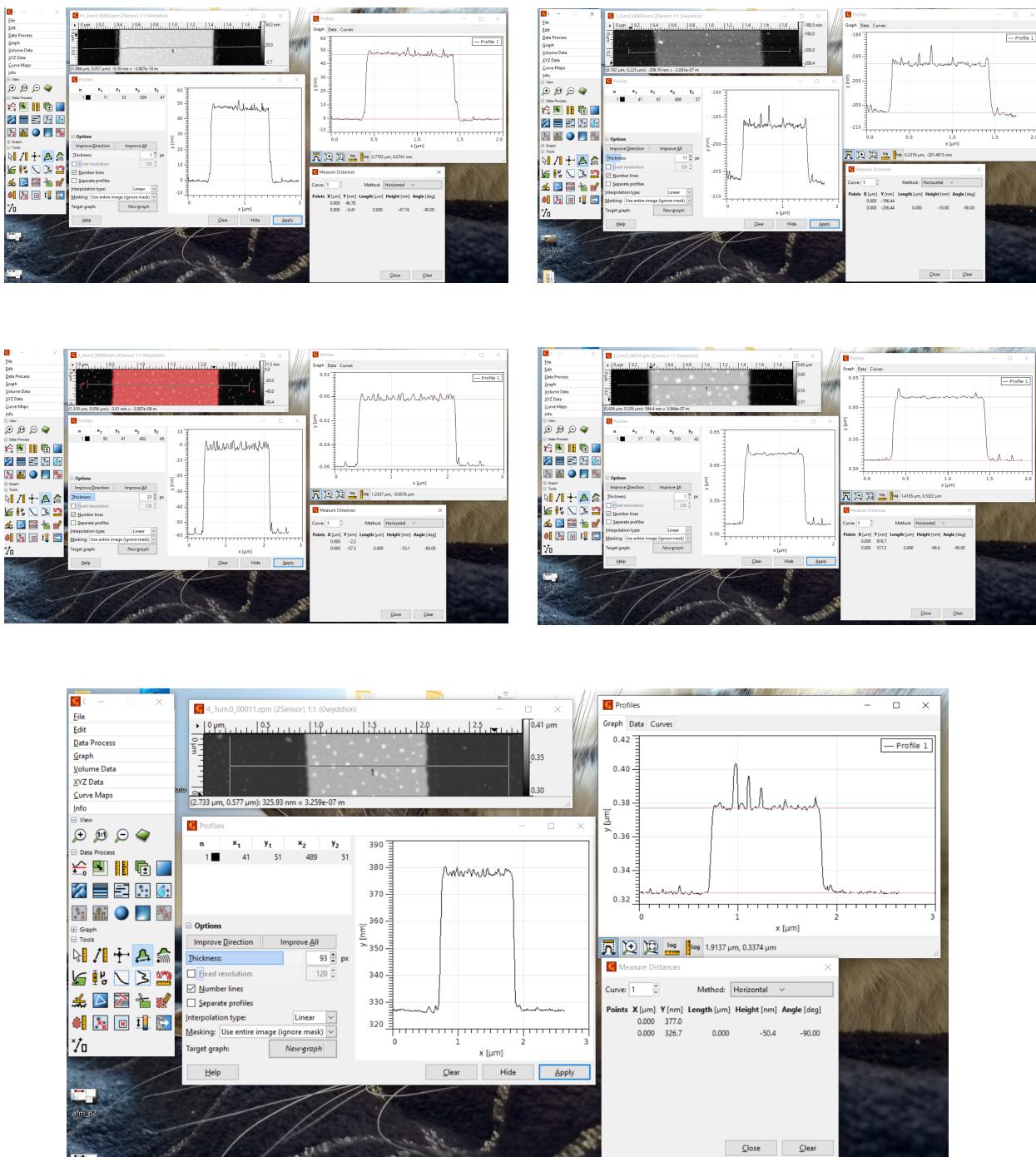
### 3.1 Atomic Force Microscopy

Pomiar grubości zostały wykonane na AFM. Z otrzymanych wyników udało nam się



Rysunek 3: Wygląd Mikroskopu Sił Atomowych

wyznaczyć grubości poszczególnych płytka za pomocą programu Gwyddion. Na początku z każde dane potraktowane zostały funkcją "Level data by mean plane subtraction" oraz "Remove polynomial background" w celu "wyprostowania" tych funkcji aby pomiary były wiarygodne i dokładniejsze. Następnie za pomocą "Extract profiles along arbitrary lines" wyznaczyłyśmy profil przekroju płytka w miejscu linii, tak że mogliśmy zobaczyć grubość złota na każdej z płytka. Poniżej przedstawione są zrzuty ekranu z wyznaczeń tych grubości tak, że widać profile każdej z płytka.



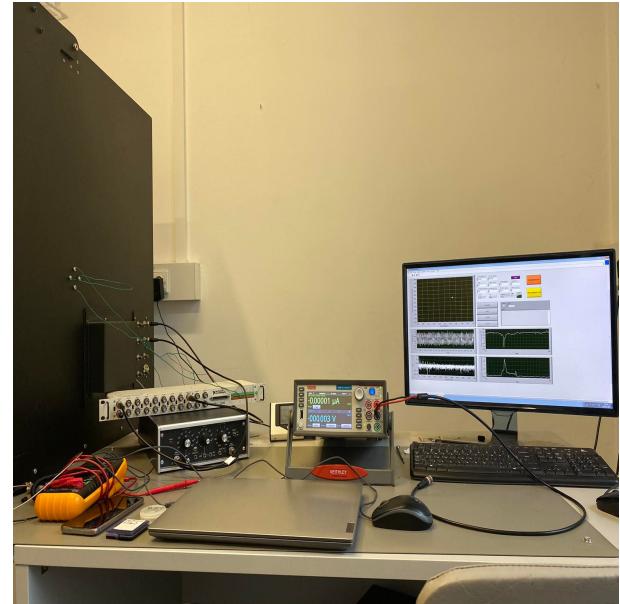
Rysunek 4: Przykład wyznaczania grubości płytka w programie Gwyddion- płytka nr 4

### 3.2 Stacja ostrzowa

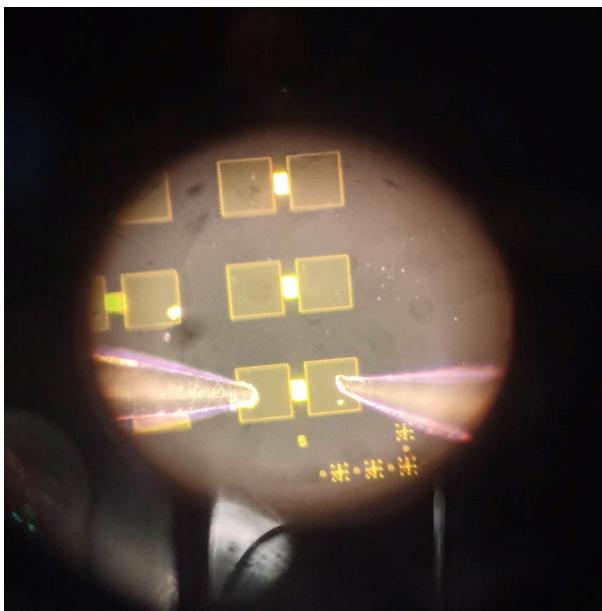
Płytkę podłączymy do stacji ostrzowej widocznej poniżej. Igły tej stacji zostały podłączonej do kwadratowych części złota tak aby prąd mógł przechodzić przez łamaną-liniową część. Do obsługi urządzenia został wykorzystany gotowy program LabVIEW.



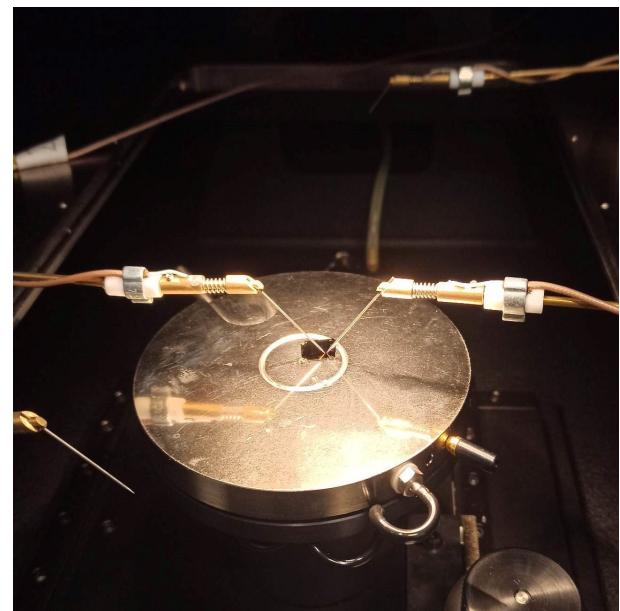
Stacja ostrzowa widoczna z zewnątrz – połączona z klatką Faradaya eliminującą zaburzenia w pomiarach



Urządzenia służące do komunikacji stacji ostrzowej z komputerem. Na ekranie widoczny program pomiarowy



Podłączenie płytki do stacji ostrzowej patrząc przez mikroskop



Płytki podłączona do stacji ostrzowej widziana nieuzbrojonym okiem

## 4 Wyniki

### 4.1 Wyznaczenie grubości płytEK

Zgodnie z opisaną wcześniej metodą wyznaczenia grubości z programu Gwyddion grubości płytEK przedstawione zostały w tabeli poniżej. Zakładamy, że przy oscylacjach widocznych na profilach nasz błąd pomiarowy może wynosić około 1.5nm. Tak więc przybliżamy owe wartości do najbardziej prawdopodobnych grubości naparowanych w poprzednich latach:

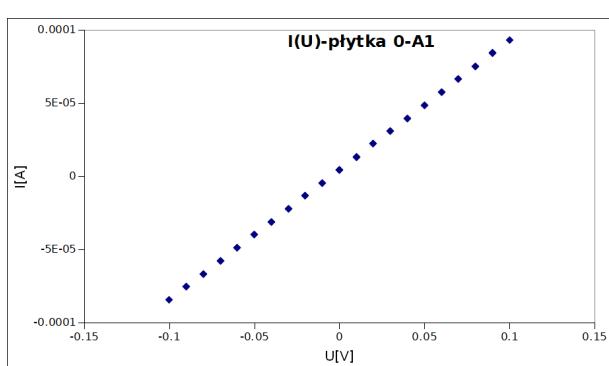
nr płytki	0	1	2	3	4	5
grubość złota	43nm	10nm	55nm	100nm	50nm	100nm

### 4.2 Wyznaczenie rezystancji warstwy

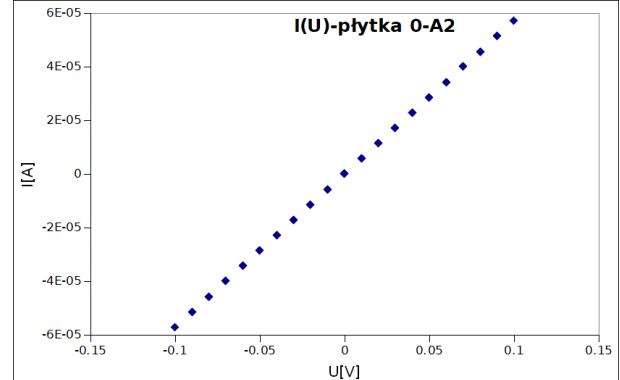
Dla każdej z badanych płytEK wykonałyśmy po pięć pomiarów zależności napięcia od natężenia płynącego przez jej struktury prądu. Każdy z pomiarów był wykonywany dla różnych długości cienkiej łamanej złotej lini zgadnie z naszym projektem. W celu wyznaczenia rezystancji wykreślłyśmy te zależności na wykresie i za pomocą funkcji linefit w programie gnumeric dopasowałyśmy prostą do punktów, której nachylenie było odwrotnością szukanej przez nas wartości. Z pomiarów wykluczyłyśmy płytki nr 2 oraz 5 ze względu na ich stan techniczny i niemożliwość przeprowadzenia takich pomiarów.

Otrzymane zależności wraz z otrzymanymi rezystancjami przedstawiłyśmy poniżej:

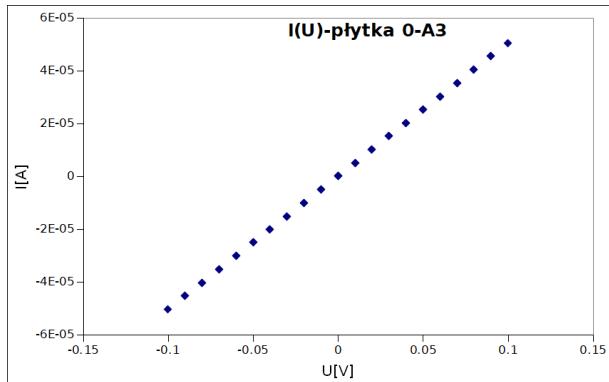
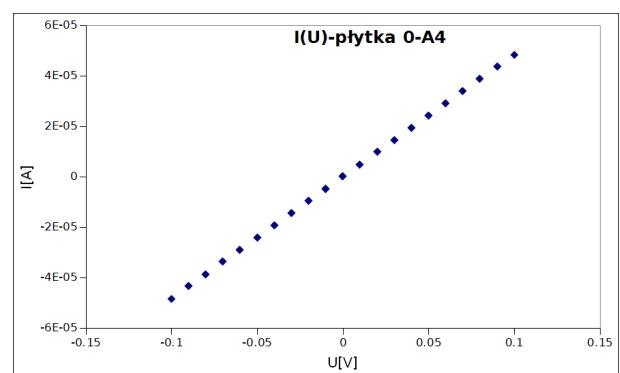
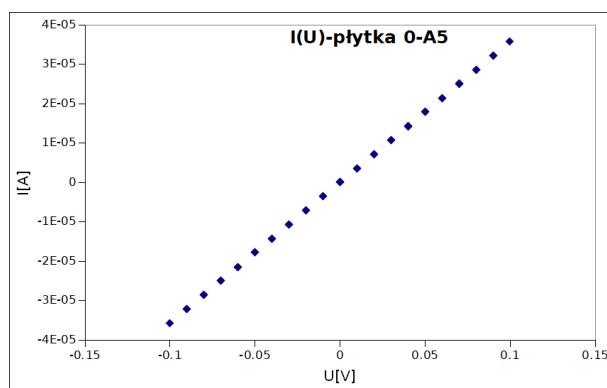
- Płytki numer 0



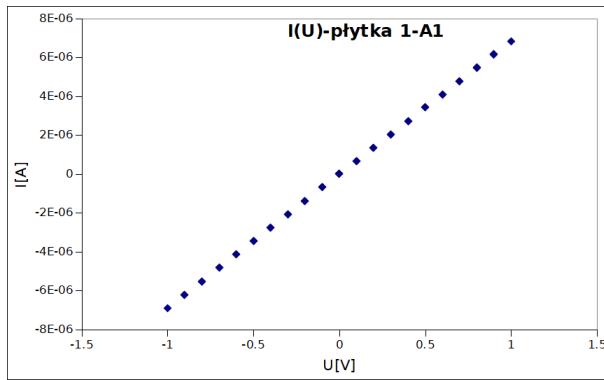
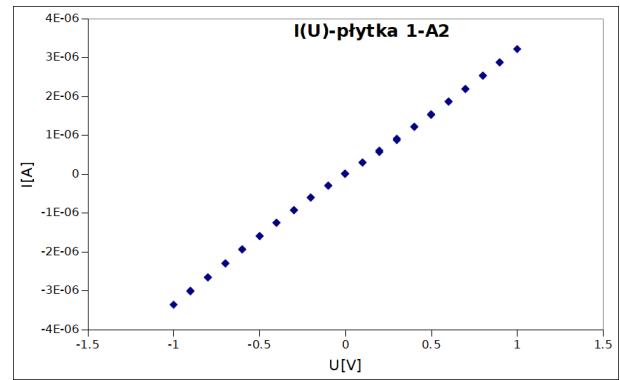
Rysunek 5:  $R=1126.491 \Omega$

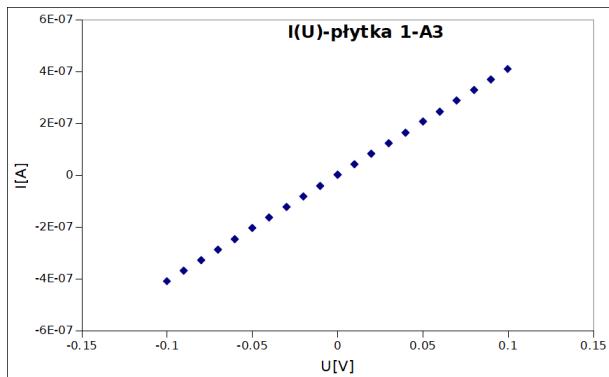
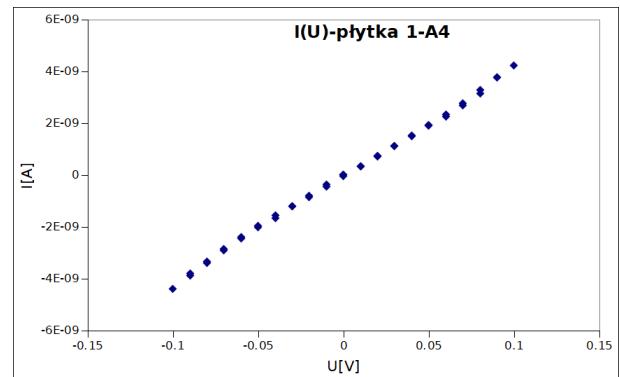
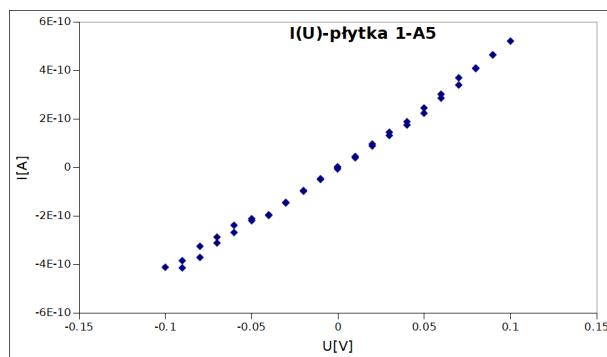


Rysunek 6:  $R=1750.524 \Omega$

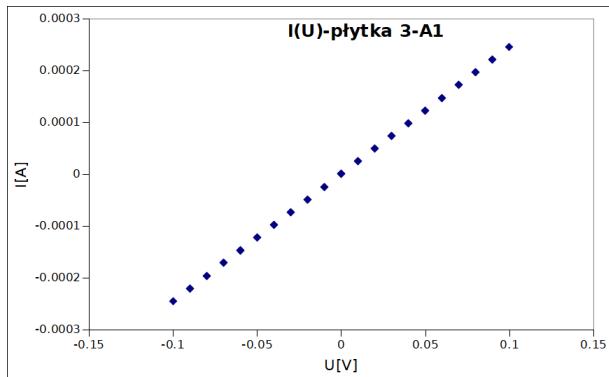
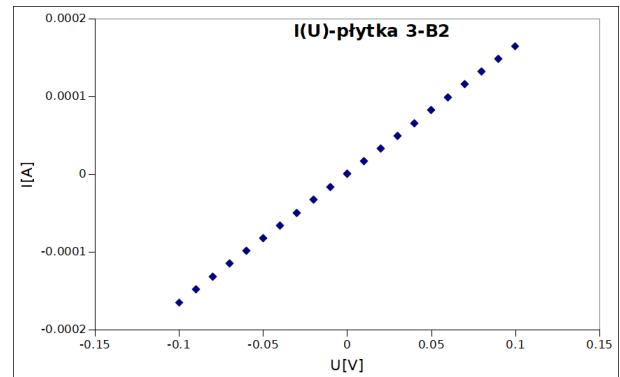
Rysunek 7:  $R=1983.395 \Omega$ Rysunek 8:  $R=2068.972 \Omega$ Rysunek 9:  $R=2798.815 \Omega$ 

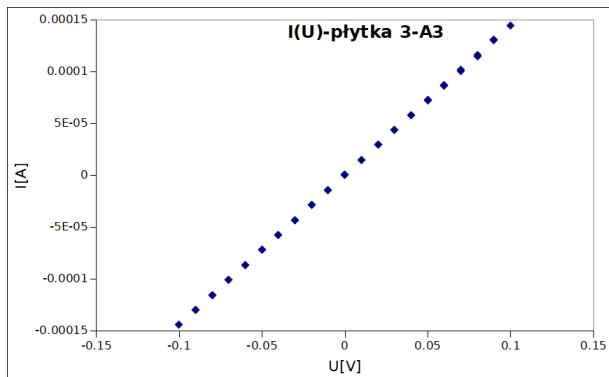
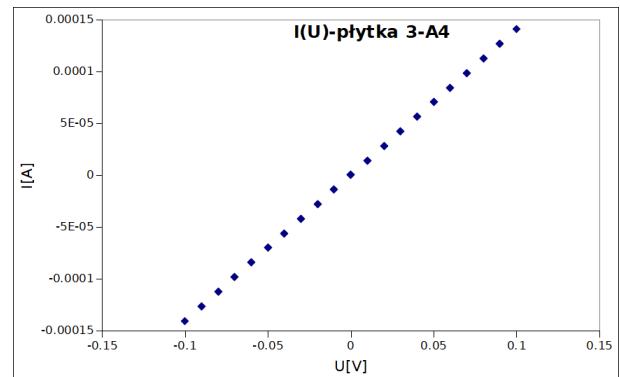
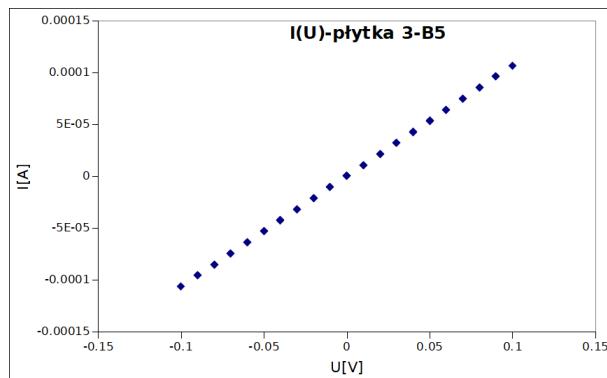
- Płytką numer 1

Rysunek 10:  $R=145617.713 \Omega$ Rysunek 11:  $R=310967.194 \Omega$

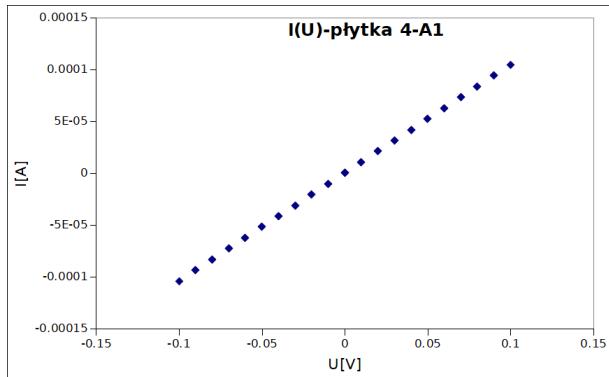
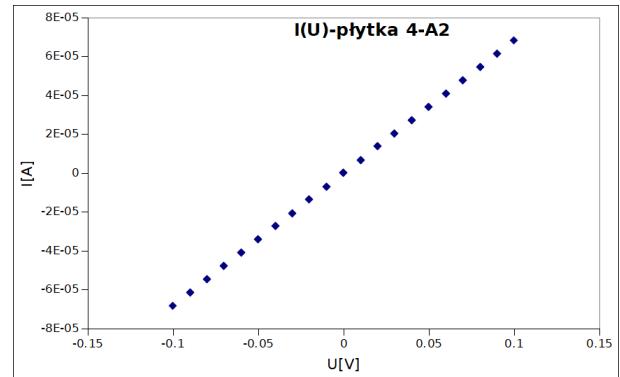
Rysunek 12:  $R=243702.934 \Omega$ Rysunek 13:  $R=2412061.105 \Omega$ Rysunek 14:  $R=213208417.386 \Omega$ 

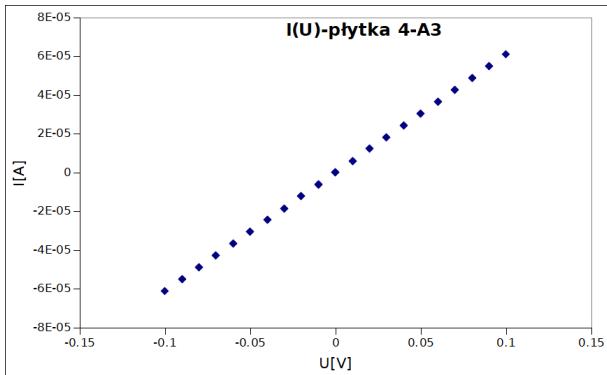
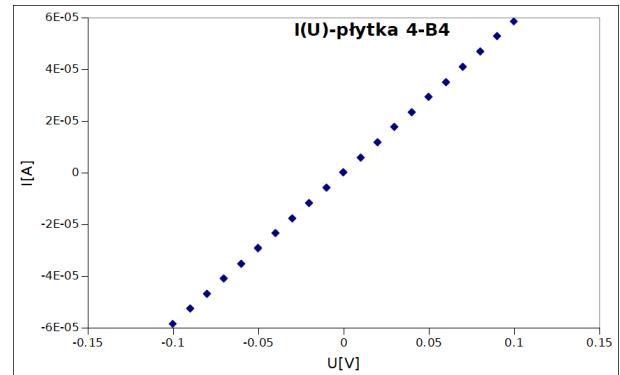
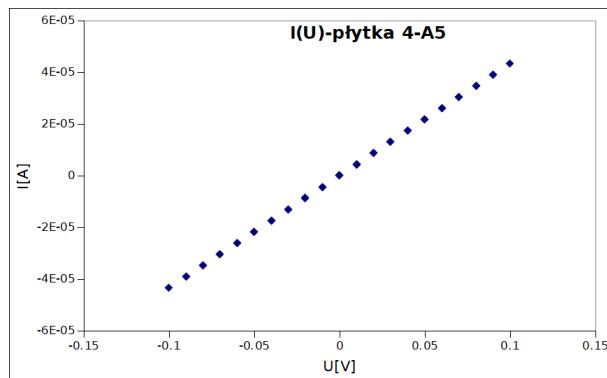
### • Płytką numer 3

Rysunek 15:  $R=407.543 \Omega$ Rysunek 16:  $R=606.887 \Omega$

Rysunek 17:  $R=692.122 \Omega$ Rysunek 18:  $R=710.931 \Omega$ Rysunek 19:  $R=938.211 \Omega$ 

- Płytki numer 4

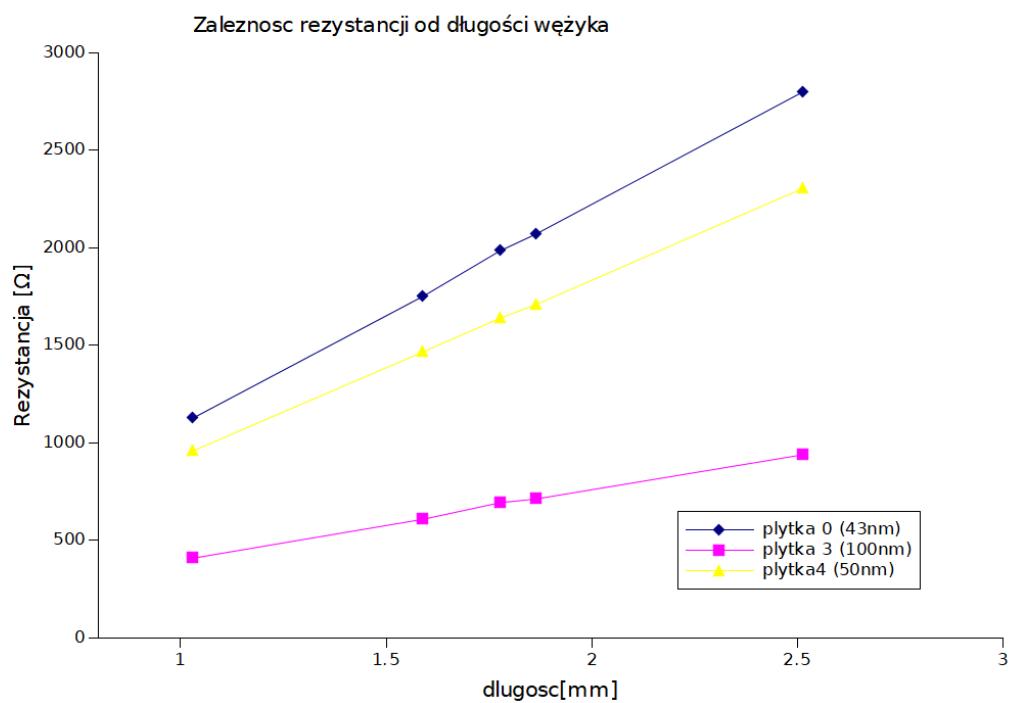
Rysunek 20:  $R=958.226 \Omega$ Rysunek 21:  $R=1465.336 \Omega$

Rysunek 22:  $R=1637.869 \Omega$ Rysunek 23:  $R=1707.808 \Omega$ Rysunek 24:  $R=2304.38 \Omega$

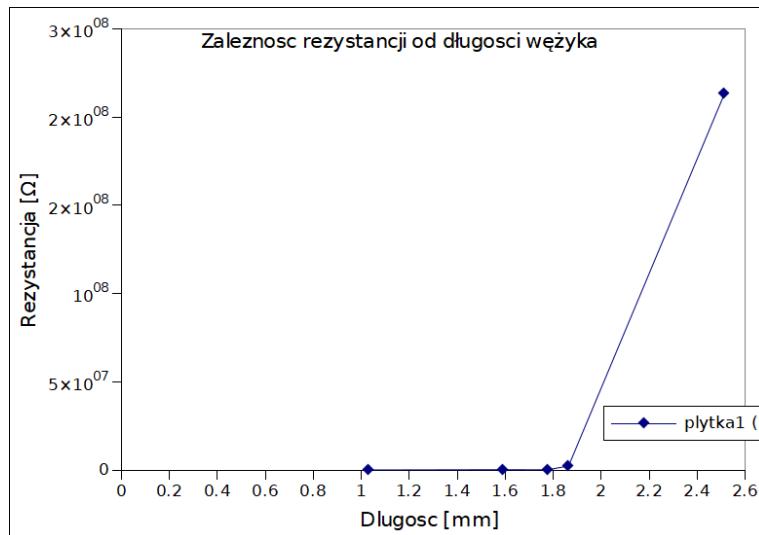
Otrzymane wyniki rezystancji zestawiłyśmy w tabeli poniżej:

PŁYTKA 0		PŁYTKA 1		PŁYTKA 3		PŁYTKA 4	
	Rezystancja [ $\Omega$ ]						
A1	1126.491	A1	145617.713	A1	407.543	A1	958.226
A2	1750.524	A2	310967.194	B2	606.887	A2	1465.336
A3	1983.395	A3	243702.934	A3	692.122	A3	1637.869
A4	2068.972	A4	2412061.105	A4	710.931	B4	1707.808
A5	2798.815	A5	213208417.386	B5	938.211	A5	2304.38

### 4.3 Zależność rezystancji od długości łamanej złotej linii



Rysunek 25: Zależność rezystancji od długości węzyka dla różnych płyt

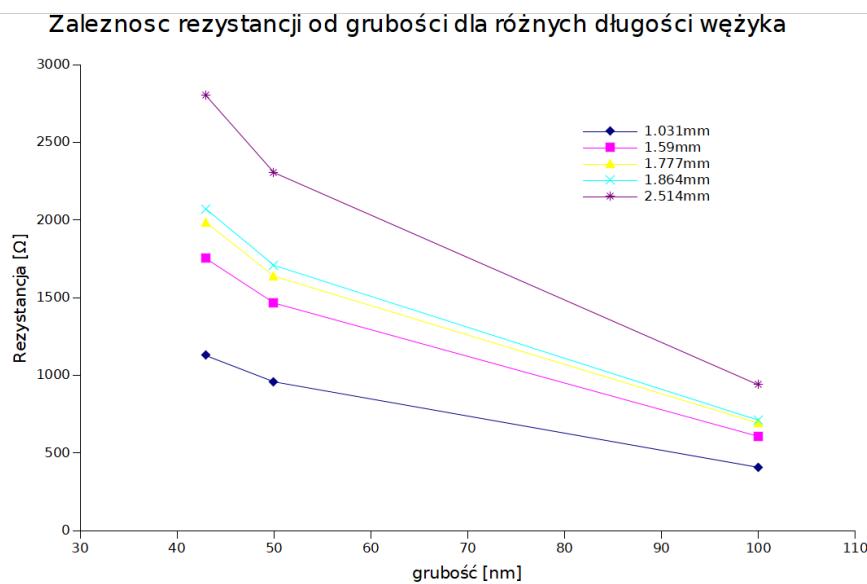


Rysunek 26: Zależność rezystancji od długości węzyka dla płytka numer 1

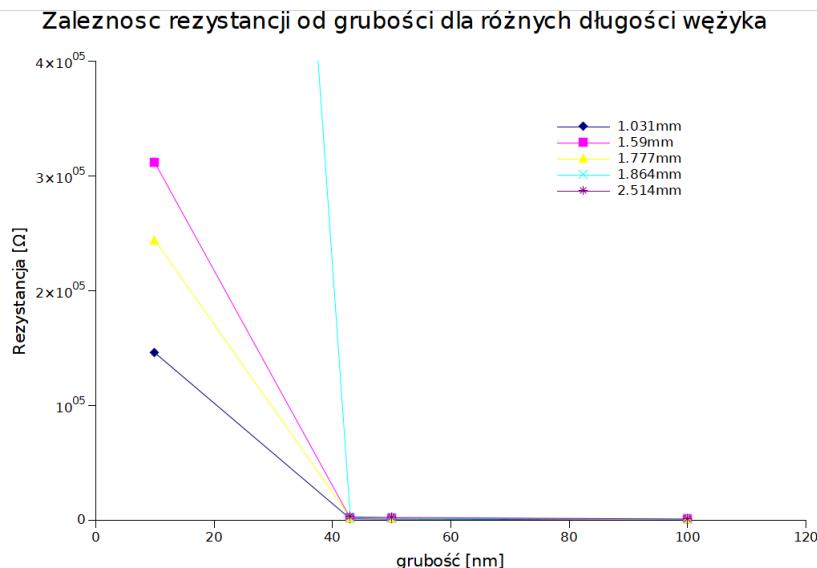
Dla płytka nr 1, która ma najmniejszą grubość złota ze wszystkich (10nm) widzimy znaczną różnicę w obliczeniach rezystancji. Może to wynikać z nieliniowości charakterystyk napięciowo natężeniowych co można dostrzec na wykresach powyższych. Dlatego w dalszej części pominiemy płytke w zestawieniach dla wszystkich płytak.

#### 4.4 Zależność rezystancji od grubości danej płytki

Przy wykreślaniu tej zależności pominiemy pomiary wykonywane dla najmniejszej grubości płytka - płytka nr 1. Są to pomiary które znaczaco odbiegaja od pozostałych i przy ich uwzględnieniu wykres byłby nieczytelny.



Rysunek 27: Wykres zależności rezystancji od grubości płytka dla różnych długości węzyka



Rysunek 28: Wykres zależności rezystancji od grubości płytka dla różnych długości węzyka uwzględniając płytka nr 1. Niezakończona linia jasnoniebieska dąży do punktu rezystancji dla płytka nr 1, jednakże jest on tak bardzo oddalony, że łącząca je linia wygląda niemalże pionowo.

## 5 Wnioski

Cienkie warstwy złota mają wysoką rezystancję, co oznacza, że przepuszczają małe ilości prądu przy wysokim napięciu. Wyniki pomiarów mogą być zmienne, ponieważ cienkie warstwy złota mogą mieć nierównomierną grubość lub być skłonne do uszkodzeń mechanicznych. Nie jesteśmy więc często przewidzieć przy niewielkich grubościach czy mamy do czynienia z jakimiś defektami czy nie.

Przy pomiarach elektrycznych możemy zauważać dla płytka numer 1(10nm), że jej charakterystyka prądowo-napięciowa odbiega lekko od liniowej dla różnych długości złotej linii łamanej. Oznacza to, że złoto przestaje się zachowywać jak metal i zaczyna jak półprzewodnik. Dlatego też właśnie najprawdopodobniej ostatnie wyznaczone rezystancje tak znacząco odbiegają od pozostałych dla tej płytka.

Badanie rezystancji w zależności od grubości badanej płytka wykazała, że rezystancja próbki jest odwrotnie proporcjonalna do jej przekroju poprzecznego. Oznacza to, że im grubsza próbka, tym niższa jest jej rezystancja.

Podsumowując, złoto nie zachowuje swoich właściwości elektrycznych przy zmianie grubości. Przy konstrukcji urządzeń elektronicznych z wykorzystaniem złota musimy więc uważać na jego działanie gdyż cieńsze warstwy będą miały dużo większą rezystancję i nie będą zachowywały swojej liniowej charakterystyki prądowo-napięciowej.