

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Факультет Електроніки  
Кафедра мікроелектроніки

Розрахунково-графічна робота  
з дисципліни: «Вакуумна та плазмова електроніки»  
варіант №3

Виконав:

Студент 3-го курсу

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кузьмінський О.Р.

Перевірив:

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Бевза О.М.

# Зміст

<b>Завдання</b>	<b>3</b>
<b>Перша частина завдання</b>	<b>5</b>
1. Частота червоної границі фотоефекту . . . . .	5
2. Напруга запирання . . . . .	6
3. Залежність напруги запирання від частоти . . . . .	8
4. Визначення роботи виходу . . . . .	9
5. Визначення кінетичної швидкості електрона . . . . .	10
6. Аналіз результатів та перевірка закону Ейнштейна . . . . .	11
<b>Друга частина завдання</b>	<b>13</b>
<b>Третя частина завдання</b>	<b>15</b>

## Завдання↑

1) Поглянути на графіки побудовані для п.3 лабораторної роботи:

- ▷ Визначити частоту червоної границі фотоефекту.
- ▷ Визначити напругу запирання для кожного елементу при інтенсивності 50% та 100%. Пояснити, чому напруги запирання відрізняються при різних інтенсивності.
- ▷ Побудувати графіки залежностей напруги запирання від частоти (довжини хвиль перерахувати в частоту) для випадку інтенсивності 50% та 100% для власних 3-х матеріалів.
- ▷ Визначити з побудованих графіків роботу виходу в будь-якій точці (шукана точка має знаходитись посередині графіку) для власних 3-х матеріалів за інтенсивності 50% та 100%. Порівняти отримані значення роботи виходу при двох різних інтенсивностей для кожного матеріалу та зробити висновки.
- ▷ Розрахувати кінетичну швидкість електронів для точки А для всіх трьох матеріалів.
- ▷ Порівняти отримане із розрахунку значення роботи виходу з відомими значеннями роботи виходу (довідкові дані, вказати джерело) та розрахувати абсолютну та відносну помилки для власних 3-х матеріалів.
- ▷ Отримані результати звести до таблиці, де повинен бути вказаний кожен з трьох матеріалів та розраховані для нього значення: частота червоної границі фотоефекту, напруга запирання (для двох інтенсивностей), робота виходу в точці А (дві інтенсивності), кінетична швидкість електронів в точці А (для двох інтенсивностей 50% та 100%).
- ▷ Зробити перевірку правильності виконання розрахунків за формулою Ейнштейна для фотоефекту.

- 2) Взяти графіки зроблені до пункту 4, де було побудовано залежності струму від інтенсивності, маючи три довжини хвилі та обраний один матеріал. Виконати:
- ▷ Побудувати графік в інших координатах, де вісь  $x$ - довжина хвилі, вісь  $y$ -струм. Обрати значення струму для Інтенсивності 50%.
  - ▷ Побудуйте за власним припущенням іншим кольором залежність, якщо інтенсивність буде складати 30%. Пояснити чому струм змінився саме так.
- 3) Поглянути на графіки, побудовані для пункта 5 (залежність енергії від частоти). Визначити енергію (значення по осі  $y$ ). Визначити, чи це повна енергія фотону/робота виходу/кінетична енергія електрона чи щось інше? Відповідь аргументовано пояснити.

# Перша частина завдання↑

## 1.Частота червоної границі фотоефекту↑

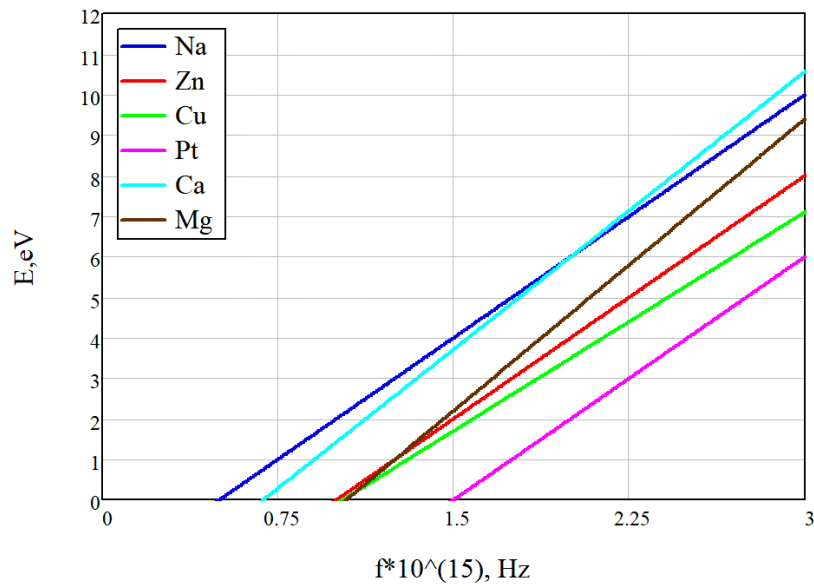


Рис. 1: Сімейство кривих залежності Енергія(частота)

В якості вихідних матеріалів були обрані наступні: натрій, цинк, магній. З рисунку частота червоної границі фотоефекта:

- для натрію складає  $f_{min,Na} = 0,5 \cdot 10^{15}$  Гц  $\lambda_{max,Na} = 600$  нм.
- для цинку складає  $f_{min,Zn} = 1 \cdot 10^{15}$  Гц  $\lambda_{max,Zn} = 300$  нм.
- для магнію складає  $f_{min,Mg} = 1,042 \cdot 10^{15}$  Гц  $\lambda_{max,Zn} = 287$  нм.

Порівняємо отримані результати з **теорією**:

- теоретичне  $\lambda_{max,Na} = 540$  нм.
- теоретичне  $\lambda_{max,Zn} = 290$  нм.
- теоретичне  $\lambda_{max,Mg} = 330$  нм.

Відносні похибки складають:  $\delta_{Na} = 11\%$ ,  $\delta_{Zn} = 3,45\%$ ,  $\delta_{Mg} = 13\%$ .

## 2. Напруга запирання↑

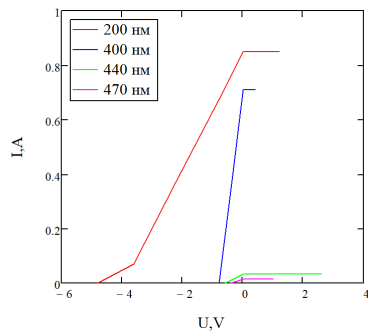


Рис. 2: Сімейство кривих для натрію (50% інтенсивності)

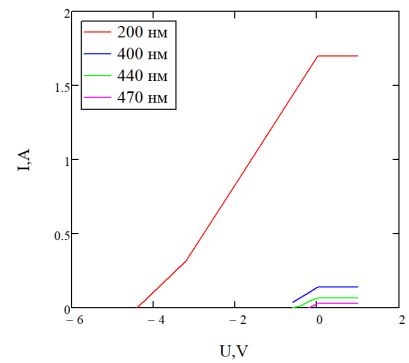


Рис. 3: Сімейство кривих для натрію (100% інтенсивності)

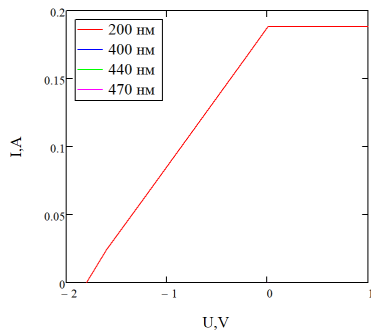


Рис. 4: Сімейство кривих для цинку (50% інтенсивності)

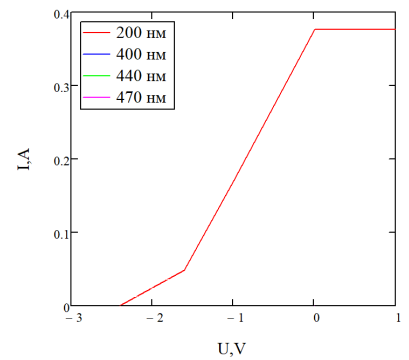


Рис. 5: Сімейство кривих для цинку (100% інтенсивності)

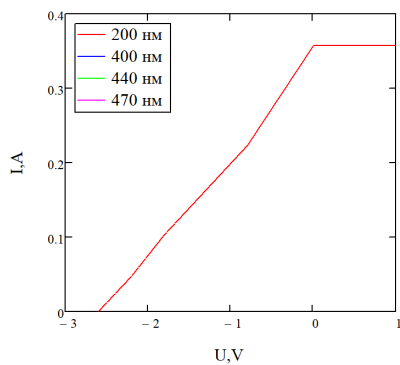


Рис. 6: Сімейство кривих для магнію (50% інтенсивності)

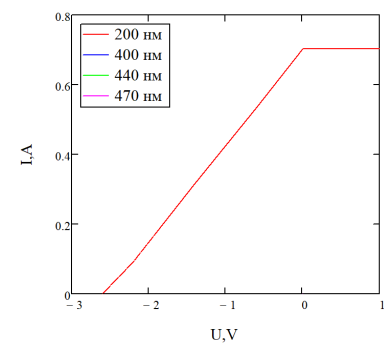


Рис. 7: Сімейство кривих для магнію (100% інтенсивності)

Табл. 1: Напруга запирання для натрію при інтенсивностях 50%, 100%

Na							
200нм		400нм		440нм		470нм	
50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%
-4.8	-4.4	-0.8	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	-0.2

Табл. 2: Напруга запирання для цинку при інтенсивностях 50%, 100%

Zn							
200нм		400нм		440нм		470нм	
50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%
-1.8	-2.4	0	0	0	0	0	0

Табл. 3: Напруга запирання для магнію при інтенсивностях 50%, 100%

Mg							
200нм		400нм		440нм		470нм	
50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%
-2.6	-2.5	0	0	0	0	0	0

Отже, ми бачимо, що при збільшенні інтенсивності напруга запирання теж збільшується, оскільки ми збільшуємо емісію електронів з катоду, які можуть з більшою ймовірністю досягти аноду, тому потрібно прикласти більш позитивну напругу, аби пригальмувати електрони.

### 3. Залежність напруги запирання від частоти↑

Сконвертуємо довжини хвиль в частоти:

$$200 \text{ нм} \rightarrow 1,5 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

$$400 \text{ нм} \rightarrow 0,75 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

$$440 \text{ нм} \rightarrow 0,68 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

$$470 \text{ нм} \rightarrow 0,64 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

Будуємо графік по наступній залежності.

Табл. 4:  $U_z(f)$  для Na

Na		
$f \cdot 10^{15}, \text{ Гц}$	$U_z, \text{ В}$	
	50%	100%
0.64	-0.4	-0.2
0.68	-0.6	-0.4
0.75	-0.8	-0.6
1.5	-4.8	-4.4

Табл. 5:  $U_z(f)$  для Zn

Zn		
$f \cdot 10^{15}, \text{ Гц}$	$U_z, \text{ В}$	
	50%	100%
0.64	0	0
0.68	0	0
0.75	0	0
1.5	-1.8	-2.4

Табл. 6:  $U_z(f)$  для Mg

Mg		
$f \cdot 10^{15}, \text{ Гц}$	$U_z, \text{ В}$	
	50%	100%
0.64	0	0
0.68	0	0
0.75	0	0
1.5	-2.6	-2.5

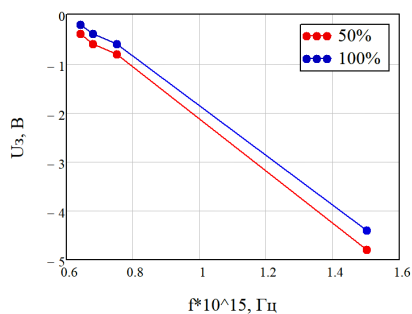


Рис. 8:  $U_z(f)$  для Na

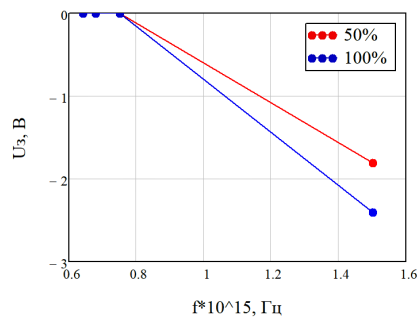


Рис. 9:  $U_z(f)$  для Zn

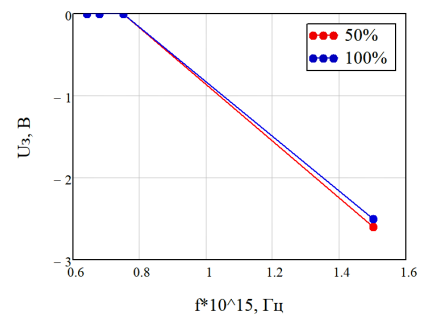


Рис. 10:  $U_z(f)$  для Mg



## 4. Визначення роботи виходу↑

Роботу виходу можна було б визначити з графіків, але зважаючи на невелику точність вимірювання, краще уникнути адитивних похибок, скориставшись розрахунковим способом. Тому роботу виходу знаходимо з наступного виразу:

$$A = h \cdot f_{min}. \quad (1)$$

Цей вираз характеризує той факт, що для того щоб фотоефект спостерігався, енергії фотона повинно вистачити як мінімум для того, щоб вирвати електрон з тіла, а це- ніщо інше як робота виходу. В свою чергу ця мінімальна енергія фотона спостерігається на частоті червої границі фотоефекту, тобто  $f_{min}$ , яку ми визначали раніше. Знайдемо роботи виходу наших обраних матеріалів:

$$A_{Na} = 4,135 \cdot 10^{-15} \times 0,5 \cdot 10^{15} = 2,067 \text{ eV}.$$

$$A_{Zn} = 4,135 \cdot 10^{-15} \times 1 \cdot 10^{15} = 4,135 \text{ eV}.$$

$$A_{Mg} = 4,135 \cdot 10^{-15} \times 1,042 \cdot 10^{15} = 4,309 \text{ eV}.$$

Порівняємо результати з **теорією**.

$$A_{Na, \text{теор}} = 2,28 \text{ eV}.$$

$$A_{Zn, \text{теор}} = 4,22 \text{ eV}.$$

$$A_{Mg, \text{теор}} = 3,76 \text{ eV}.$$

Похибки при цьому склали:

Na		Zn		Mg	
$\Delta$	$\delta, \%$	$\Delta$	$\delta, \%$	$\Delta$	$\delta, \%$
0,213	9,34	0,085	2	-0,549	-14,6

## 5. Визначення кінетичної швидкості електрона↑

Кінетичну швидкість електрона можна знайти, знаючи запираючу напругу- напругу котра здатна погасити до нуля кінетичну енергію найшвидших електронів, емітованих з катоду, тобто справедливе таке твердження:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = e \cdot U_3, \quad (2)$$

з якого можна отримати вираз для кінетичної швидкості електрона:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2eU_3}{m}}. \quad (3)$$

Наведемо детально один раз чисельний розрахунок кінетичної швидкості електрону для натрію, освітленим хвилею, довжина якої 200 нм, та інтенсивність 50%:

$$v_{max,Na,200nm,50\%} = \sqrt{\frac{2 \times (-1,6 \cdot 10^{-19}) \times (-4,8)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Табл. 7:  $v_{max}$  для Na

Na		
$\lambda$ , нм	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с	
	50%	100%
200	1.3	1.244
400	0.53	0.46
440	0.46	0.38
470	0.38	0.27

Табл. 8:  $v_{max}$  для Zn

Zn		
$\lambda$ , нм	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с	
	50%	100%
200	0.8	0.9
400	0	0
440	0	0
470	0	0

Табл. 9:  $v_{max}$  для Mg

Mg		
$\lambda$ , нм	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с	
	50%	100%
200	0.95	0.94
400	0	0
440	0	0
470	0	0

## 6. Аналіз результатів та перевірка закону Ейнштейна↑

Табл. 10: Експериментально визначені параметри для Na

Na				
$\lambda$ , нм	50%		100%	
	$U_3$ , В	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с	$U_3$ , В	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с
200	-4.8	1.3	-4.4	1.244
400	-0.8	0.53	-0.6	0.46
440	-0.6	0.46	-0.4	0.38
470	-0.4	0.38	-0.2	0.27
$A = 2.067$ eВ				
$f_{min} = 0.5 \cdot 10^{15}$ Гц				

Табл. 11: Експериментально визначені параметри для Zn

Zn				
$\lambda$ , нм	50%		100%	
	$U_3$ , В	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с	$U_3$ , В	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с
200	-1.8	0.8	-2.4	0.9
400	0	0	0	0
440	0	0	0	0
470	0	0	0	0
$A = 4.135$ eВ				
$f_{min} = 1 \cdot 10^{15}$ Гц				

Табл. 12: Експериментально визначені параметри для Mg

Mg				
$\lambda$ , нм	50%		100%	
	$U_z$ , В	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с	$U_z$ , В	$v_{max} \cdot 10^6$ , м/с
200	-2.6	0.95	-2.5	0.94
400	0	0	0	0
440	0	0	0	0
470	0	0	0	0
$A = 4.309$ eВ				
$f_{min} = 1.042 \cdot 10^{15}$ Гц				

Отже ми бачимо, що максимальна швидкість електронів з підвищенням інтенсивності вдвічі, практично не змінюється, а також зі збільшенням довжини хвилі зменшується. Тобто ми експериментально підтвердили **другий з-н Столетова**, який каже, що максимальна кінетична енергія фотоелектронів не залежить від інтенсивності світла і лінійно зростає з підвищенням частоти. Що ми бачимо і в нашому випадку: максимальна швидкість, яка власне характеризує максимальну кінетичну енергію практично не змінилась, і лінійно зменшується з ростом довжини хвилі, тобто спадає із спаданням частоти, або ж навпаки- збільшується зі збільшенням частоти.

Перевіримо, чи виконується формула Ейнштейна для фотоефекту, взявши в якості матеріалу натрій, який будемо засвічувати хвилею, довжина якої 200 нм.

$$\underbrace{hf}_{E_1} = \underbrace{A}_{E_2} + \underbrace{\frac{mv^2}{2}}_{E_3} \quad (4)$$

Знайдемо енергію фотона  $E_1$ :

$$E_1 = hf = |200 \text{ нм} \rightarrow 1,5 \cdot 10^{15} \text{ Гц}| = 4,135 \cdot 10^{-15} \times 1,5 \cdot 10^{15} = 6,203 \text{ eВ.}$$

$E_3$  має дорівнювати  $E_1 - E_2$ , тобто  $E_3 = 4,136$  eВ. Перевіримо це:

$$E_3 = \frac{mv^2}{2} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \times (1,25 \cdot 10^6)^2}{2} = 7,1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 4,4375 \text{ eВ.}$$

Результати практично збігаються, отже формула Ейнштейна виконується.

## Друга частина завдання↑

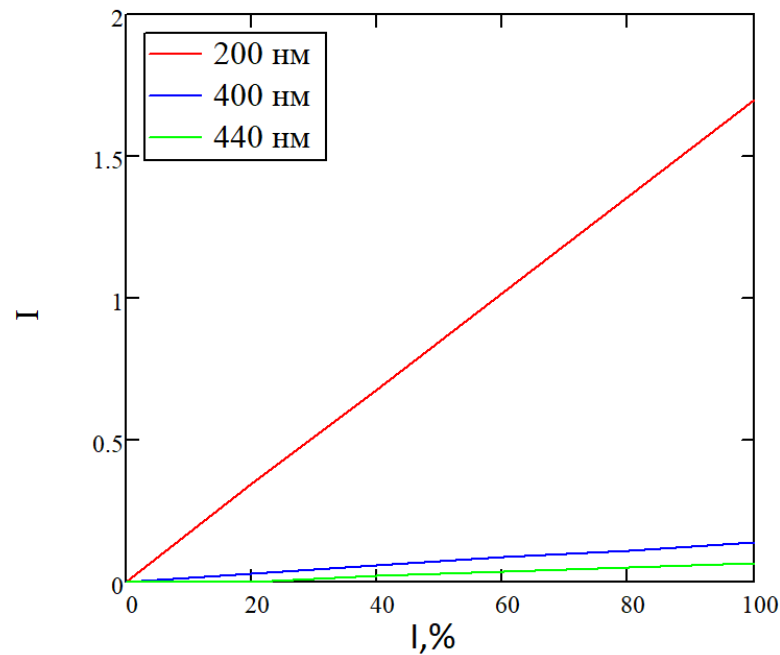


Рис. 11: Залежність струм(інтенсивність світла) для натрію

Побудуємо графік в інших координатах, де вісь x- довжина хвилі, вісь y-струм. Беремо значення інтенсивності 50% та 30%. Для підвищення точності, за експериментальними точками проведемо інтерполяцію, та знайдемо значення інтенсивності при 50% та 30%:

$$\begin{aligned}
 \text{int1} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} & \text{str1} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0.346 \\ 0.675 \\ 1.02 \\ 1.363 \\ 1.695 \end{pmatrix} & \text{int2} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} & \text{str2} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0.028 \\ 0.056 \\ 0.085 \\ 0.112 \\ 0.1414 \end{pmatrix} & \text{int3} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix} & \text{str3} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.025 \\ 0.039 \\ 0.051 \\ 0.064 \end{pmatrix} \\
 c1 &:= \text{cspline}(\text{int1}, \text{str1}) & c2 &:= \text{cspline}(\text{int2}, \text{str2}) & c3 &:= \text{cspline}(\text{int3}, \text{str3}) \\
 r1(t1) &:= \text{interp}(c1, \text{int1}, \text{str1}, t1) & r2(t2) &:= \text{interp}(c2, \text{int2}, \text{str2}, t2) & r3(t3) &:= \text{interp}(c3, \text{int3}, \text{str3}, t3) \\
 r1(50) &= 0.846 & r2(50) &= 0.071 & r3(50) &= 0.033 \\
 r1(30) &= 0.51 & r2(30) &= 0.042 & r3(30) &= 0.012
 \end{aligned}$$

Рис. 12: Результат інтерполяції

$x$ , нм	200	400	440
$y_1$ , А	0.846	0.071	0.033
$y_2$ , А	0.51	0.042	0.012

Будуємо графіки:

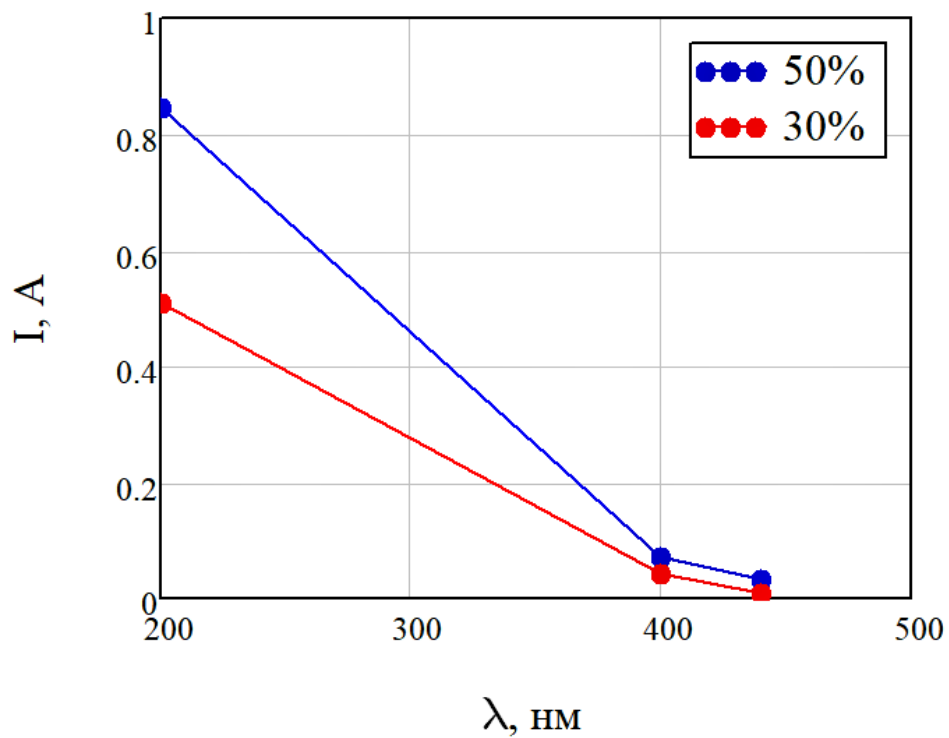


Рис. 13: Залежність  $I(\lambda)$  при 50% та 30%.

Проаналізуємо графік. Ми бачимо, що зі збільшенням довжини хвилі фотострум падає- це можна пояснити тим, що він наближається до своєї червоної межі фотоефекту, якому відповідає мінімальна частота, або ж в нашому випадку- максимальна довжина хвилі. Також ми бачимо, що фотострум зі зменшенням інтенсивності теж зменшується- це витікає з **першого з-ну Столетова**, який каже, що фотострум прямо пропорційний інтенсивності.

## Третя частина завдання↑

Поглянемо ще раз на залежність енергії від частоти:

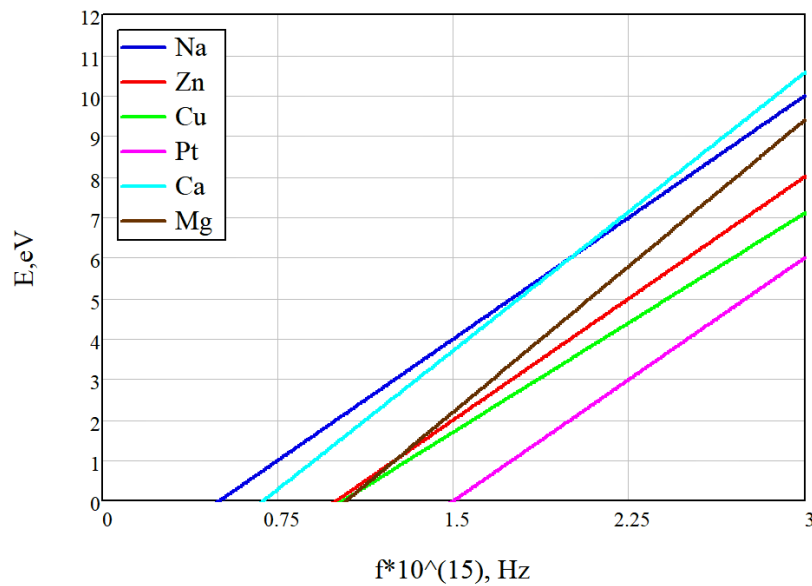


Рис. 14: Сімейство кривих залежності Енергія(частота)

По осі ігрек у нас- максимальна кінетична енергія електронів. Як ми пам'ятаємо з другого з-ну Столетова, максимальна кінетична енергія електрона не залежить від інтенсивності світла і лінійно збільшується з ростом частоти. На графіку ми і бачимо цю лінійну залежність. До речі експериментально ця залежність в мене трохи некоректна у тому плані, що нахил кривих різний, але взагалі він має бути однаковим для будь-якого матеріалу фотокатода.