

Лабораторна робота №6 ФОТОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи: ознайомитися з енергетичними та світловими характеристиками випромінювання та їхніми взаємозв'язками; виміряти спектральну густину освітленості предмета залежно від довжини хвилі у видимій області спектра; знайти енергетичну освітленість, енергетичний потік і коефіцієнт перетворення електричної потужності лампи розжарення; перевірити залежність освітленості від відстані, на якій реєструють світло; визначити кутовий розподіл випромінювання світлодіода.

Обладнання: лампа розжарення, світлодіод, фотодіод, монохроматор, люксметр, лінійка, кутовий вимірювальний пристрій.

1. Основні фотометричні характеристики

У будь-якому оптоелектронному пристрої завжди наявне джерело випромінювання. Джерелом може бути сам досліджуваний об'єкт, якщо він світиться, або джерело може опромінювати деякий об'єкт. Розглянемо ті характеристики, якими описують джерела та їхнє випромінювання.

Одна з головних енергетичних величин, які характеризують джерела випромінювання, – це *енергетичний потік* Φ_e випромінювання. Це середня потужність, яку переносить оптичне випромінювання за великі часи Δt , які набагато більші за період T електромагнітних коливань. Оскільки ці періоди складають $T \sim 2 \cdot 10^{-15}$ с, то йдеться про звичайні часи Δt порядку секунд або годин. Потік випромінювання за своє суттю є потужністю, а тому його вимірюють у ватах (Вт).

Енергетична освітленість E_e – це відношення потоку випромінювання, що падає на деякий елемент поверхні предмета, до площі цього елемента dS :

$$E_e = d\Phi_e / dS \text{ [Вт} \times \text{м}^{-2}\text{]}. \quad (2)$$

Найпростіший вид випромінювання – монохроматичне, яке характеризується безмежно вузьким інтервалом довжин хвиль (від λ до $(\lambda + \Delta\lambda)$ за умови, що $\Delta\lambda \rightarrow 0$). Якщо випромінювання немонохроматичне, то слід додатково з'ясувати розподіл випромінювання за довжинами хвиль. Тоді спектральний склад світла від джерела описують *спектральною густиною енергетичного потоку* $\Phi_e(\lambda)$. Величину $\Phi_e(\lambda)$ визначають як відношення енергетичного потоку, взятого для безмежно малого інтервалу довжин хвиль, до ширини інтервалу довжин хвиль. Добуток $\Phi_e(\lambda)d\lambda$ визначає потужність, яку переносить світло в інтервалі довжин хвиль $d\lambda$. Отже,

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda)d\lambda \text{ [Вт]}. \quad (1)$$

Схоже визначають *спектральну густину енергетичної освітленості* $E_e(\lambda) = E_{e\lambda}$:

$$E_e = \int_0^{\infty} E_{e\lambda}d\lambda, \quad E_{e\lambda} = dE_e / d\lambda. \quad (3)$$

Крім потоку випромінювання та освітленості, додатково визначають такі фотометричні характеристики джерел світла як *поверхнева густина енергетичного потоку* M_e , *енергетична сила* I_e світла в деякому напрямку та *енергетична яскравість* L_e світної поверхні в деякому напрямку (див. Додаток 1).

Людське око неоднаково чутливе до випромінювання різних довжин хвиль. Така ситуація означає, що об'єктивних енергетичних параметрів джерела замало для оцінювання дії світла. Інакше, іноді дію світла слід оцінювати не за його енергетичними характеристиками, а за світловим відчуттям, тобто за реакцією людського ока на дію світлового потоку. Тоді від *енергетичних величин* переходять до *світлових величин*. Наприклад, від *енергетичного потоку* (позначення Φ_e) можна перейти до *світлового потоку* (позначення Φ_v). Світловий потік Φ_v вимірюють в одиницях, які називають *люменами* (лм).

Відповідно можна ввести й інші світлові величини. Наприклад, від *енергетичної освітленості* E_e переходять до *освітленості* E_v . E_v визначають як відношення світлового потоку $d\Phi_v$, що проходить крізь деяку малу площу dS освітлюваного предмета, до цієї площі:

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \text{ [лк]}. \quad (4)$$

Освітленість вимірюють у *люксах* (лк). Якщо джерело однаково випромінює світло у всіх напрямках, а сам предмет перебуває на деякій відстані r від точкового джерела, то повний потік Φ_e пов'язаний з освітленістю E_v так:

$$\Phi_v = 4\pi r^2 E_v, \quad (5)$$

де S – це площа сфери з радіусом r ($S = 4\pi r^2$).

Окрім освітленості, часто вводять ще *спектральну густина освітленості* (або скорочено *спектральну освітленість*) $E_{v\lambda}$:

$$E_{v\lambda} = dE_v / d\lambda \text{ [лк/нм]}. \quad (6)$$

Одиниця її вимірювання – це люкс, поділений на нанометр (лк/нм).

Позначимо потік випромінювання у безмежно малому діапазоні довжин хвиль $\lambda \div (\lambda + \Delta\lambda)$ для деякого джерела як $\Phi_{e\lambda}$, а світловий потік, що сприймається оком у тому ж діапазоні, як $\Phi_{v\lambda}$. Іншими словами, $\Phi_{e\lambda}$ і $\Phi_{v\lambda}$ – це відповідно *спектральна густина енергетичного потоку* і *спектральна густина світлового потоку*. Їхнє відношення називають *спектральною світловою ефективністю*:

$$k_\lambda = k(\lambda) = \Phi_{v\lambda} / \Phi_{e\lambda}. \quad (7)$$

Очевидно, що k_λ – це деяка функція довжини хвилі; вона має максимум k_m на деякій довжині хвилі λ_m ($k_m = k$ при $\lambda = \lambda_m$). Для людського ока цей максимум маємо для зеленого світла посередині видимого діапазону ($\lambda_m \approx 0.56$ мкм). Відношення k_λ до цього максимального значення k_m називають *спектральною світловою чутливістю*:

$$V_\lambda = V(\lambda) = k_\lambda / k_m. \quad (8)$$

Очевидно, що величина V_λ може змінюватися в межах від нуля до одиниці. Часто криву V_λ називають ще *кривою спектральної чутливості людського ока* або *кривою видності*.

Максимальний параметр k_m , який встановлює зв'язок між енергетичним і світловим потоками на довжині хвилі λ_m , називають ще *світловим еквівалентом енергетичного потоку*. Його числове значення дорівнює $k_m = 683 \text{лм} \times \text{Вт}^{-1}$.

Якщо енергетичний потік визначають формальним інтегруванням відповідної спектральної густини по будь-яких (додатних) довжинах хвилі ($\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_e(\lambda) d\lambda$), то для світлового потоку можна обмежитися лише тим діапазоном довжин хвиль, у якому чутливе людське око:

$$\Phi_v = \int_{0.40}^{0.76} K_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda \quad (9)$$

або

$$\Phi_v = 683 \int_{0.40}^{0.76} V_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda. \quad (10)$$

Тут довжини хвиль 0.40 мкм і 0.76 мкм у межах інтегрування орієнтовно відповідають межам сприйняття видимого світла людським оком.

На завершення теоретичного вступу розглянемо одне теоретичне питання, яке має надзвичайно важливі практичні наслідки. Нехай джерело випромінювання *точкове*. Точковим можна вважати джерело, якщо його розміри справді зникаюче малі, або якщо ці розміри й не малі в абсолютному вимірі, проте вони малі, порівняно з розмірами та масштабами нашої системи (наприклад, порівняно з розмірами предмета або порівняно з відстанню від джерела до предмета).

Інтуїтивно зрозуміло, що при віддаленні предмета від точкового джерела світла освітленість предмета зменшується. Постає питання: якою саме математичною формулою описується залежність освітленості від відстані, на якій предмет перебуває від джерела?

Нехай джерело випромінювання точкове і, до того ж, світить однаково в усіх напрямках. Більшість джерел на зразок лампи розжарення задовольняє останню умову. Тоді світло від джерела йде рівномірно по всіх радіальних напрямках і на деякій відстані r випромінювання рівномірно розповсюджується по всій площі $S = 4\pi r^2$ сфери з цим радіусом. Чим далі предмет від джерела, тим меншу частку площі цієї сфери він займає. Неважко здогадатися, що освітленість E предмета обернено пропорційна до квадрата відстані r від джерела до цього предмета:

$$E \sim 1/r^2. \quad (11)$$

Формула (11) математично формулює т. зв. *закон обернених квадратів*. Цей закон описує закономірності зменшення освітленості предмета від будь-якого типу випромінювання, незалежно від його природи. Формула (11) правильна, наприклад, для видимого світла, для хвиль НВЧ-діапазону, які широко використовують у сучасних телекомунікаціях і зв'язку, або для таких край шкідливих для здоров'я лю-

дини типів випромінювання як X-випромінювання або радіоактивне гамма-випромінювання.

Формула (11) одночасно підказує один із можливих шляхів захисту від небажаного (або шкідливого) опромінювання: треба всього лише перебувати на значній відстані від джерела. Розглянемо для прикладу послаблення НВЧ-випромінювання, абсолютно точних і переконливих даних про повну нешкідливість якого на сьогодні немає, – усе залежить від часу перебування організму людини під дією цього випромінювання, від його енергії та потужності і т. ін. Якщо збільшити відстань від людини (або деякого її життєво важливого органу – наприклад, голови) до джерела випромінювання (наприклад, передавальної антени мобільного телефону) від 1 см до 1 м, то освітленість послабиться в $(100/1)^2 = 10000$ разів! Навіть послаблення на якихось 10% або 50% зазвичай вважають успіхом; тут же фактично йдеться про те, що ми повністю позбулися випромінювання! Якісно така ж ситуація матиме місце для випромінювання Wi-Fi-рутера: перемістивши його з відстані 1 м на відстань 10 м від місця, де ми переважно сидимо, одержуємо послаблення випромінювання в 100 разів. Схожі міркування стосуються перебування поблизу телекомунікаційної вежі тощо.

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

І. Знайти енергетичну освітленість на деякій відстані r від лампи розжарення до люксметра і визначити коефіцієнт перетворення електричної потужності лампи на потужність світлового випромінювання

1. Ознайомитися з люксметром – приладом для вимірювання освітленості.

2. Розмістити на оптичній лаві освітлювач (лампу розжарення потужністю $W = 100$ Вт), збиральну лінзу, монохроматор і люксметр (рис. 1).

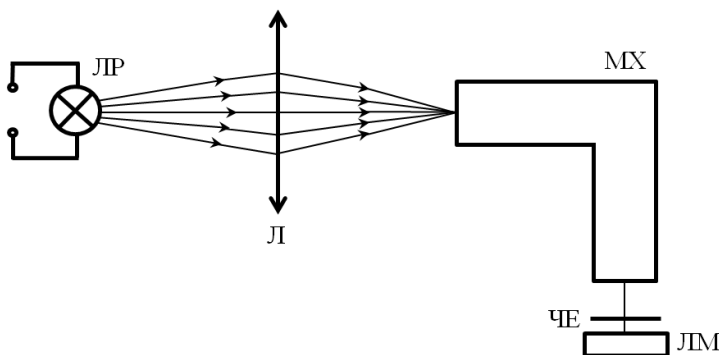


Рис. 1. Схема установки для вимірювання освітленості залежно від довжини хвилі світла: ЛР – лампа розжарення; Л – лінза; МХ – монохроматор; ЛМ – люксметр; ЧЕ – чутливий елемент люксметра.

3. За допомогою лінзи Л сфокусувати світлові промені від джерела світла (лампи розжарення ЛР) на вхідній щілині монохроматора МХ. Монохроматор виділяє із неперервного спектру хвилі з певними довжинами λ . Ці хвилі через вихідну щілину потрапляють на чутливий фотоелемент ЧЕ люксметра ЛМ, який перетворює світло на електричний сигнал. Електричний сигнал фіксують пристроєм реєстрації люксметра. Оскільки монохроматор щоразу виділяє дуже малу ділянку довжин хвиль світ-

ла, то замість освітленості E_v експериментально ми фактично вимірюємо спектральну густану освітленості $E_{v\lambda}$. Її одиниця вимірювання – це лк/нм.

Нарешті, на монохроматорі безпосередньо немає шкали довжини хвиль – натомість ми працюємо зі шкалою, на якій позначено деякі кути φ на поворотному барабані приладу. Для переведення кутів φ на барабані монохроматора у довжину хвилі λ слід скористатися таблицею Додатку 3 до цієї лабораторної роботи.

4. Виміряти значення спектральної освітленості $E_{v\lambda}$ [лк/нм] від лампи розжарення при різних довжинах хвилі λ [нм] у видимій області спектру (400–700 нм) із кроком 10 нм. Дані вимірювань занести в таблицю 1.

5. Обрати один зі стандартних програмних пакетів для чисельного аналізу даних і наукової графіки, а також ознайомитися з цим пакетом. Наведені нижче конкретні вказівки та ілюстрації роботи стосуються програмного пакету Origin. У разі його обрання слід перенести результати виконаних вимірювань $E_{v\lambda}(\lambda)$ у таблицю Origin (тобто в Таблицю 2).

Таблиця 1

Таблиця для занесення результатів вимірювань спектральної освітленості $E_{v\lambda}$ від лампи розжарення залежно від довжини хвилі λ у видимій області спектру

λ , нм	$E_{v\lambda}$, лк/нм
400	
410	
420	
...	
690	
700	

Таблиця 2

Таблиця програми Origin для перенесення результатів вимірювання з Таблиці 1

	A(X)	B(Y)
Long Name	λ	$E_{v\lambda}$
Units	nm	lx/nm
Comments		
1	400	...
2	410	...
3	420	..
...
29	690	...
30	700	...

6. Побудувати графік залежності спектральної освітленості $E_{v\lambda}$ від довжини хвилі λ , використовуючи таку послідовність пунктів меню програми Origin: Plot -> Symbol -> Scatter. У діалоговому вікні (див. рис. 2) відповідним колонкам (Column) присвоїти значення X і Y.

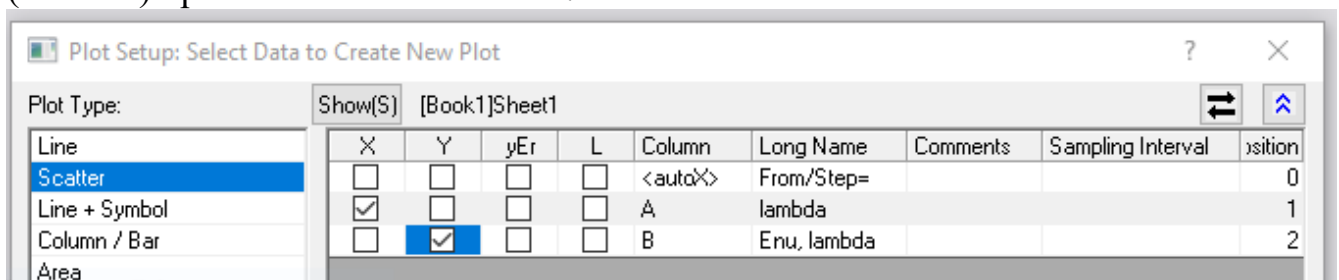


Рис. 2. Діалогове вікно програми Origin для вибору даних і побудови графіка $E_{v\lambda}(\lambda)$.

Приклад графіка залежності $E_{v\lambda}(\lambda)$, наведений на рис. 3, показує, що люксметр вимірює освітленість так, наче його спектральна чутливість відповідає чутливості ока.

7. За аналогією до формули (9), загальну освітленість E_v від лампи розжарення

можна обчислити як визначений інтеграл від функції $E_{v\lambda}$:

$$E_v = \int_{400}^{700} E_{v\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (12)$$

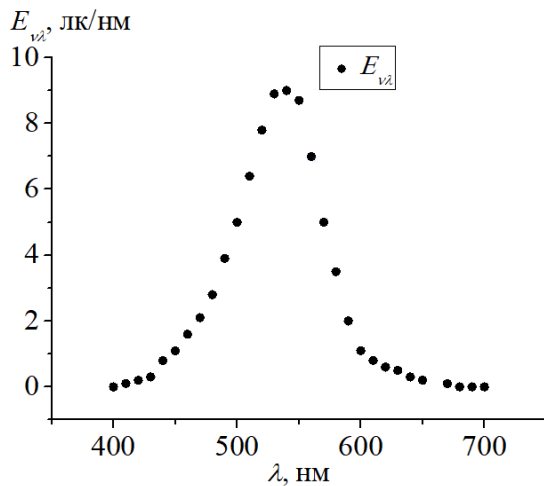


Рис. 3. Приклад графіка залежності спектральної освітленості $E_{v\lambda}$ лампи розжарення від довжини хвилі λ у видимій області спектру. Експериментальний графік будують у вигляді точок, які не потрібно з'єднувати лініями – ці лінії не відповідають жодним реальним даним!

Нагадаємо геометричний зміст визначеного інтеграла. *Визначений інтеграл* – це інтеграл функції $f(x)$ із вказаними межами інтегрування a і b . Чисельно значення визначеного інтеграла дорівнює площі s криволінійної фігури, обмеженої віссю абсцис, двома вертикальними прямими на кінцях відрізка ab (прямими $x = a$ і $x = b$) і кривою графіка функції $f(x)$ (див. рис. 4):

$$s = \int_a^b f(x) dx. \quad (13)$$

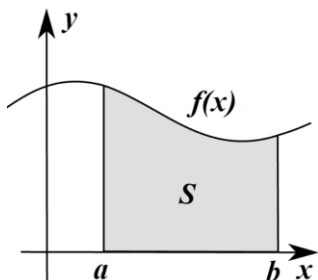


Рис. 4. Геометричний зміст визначеного інтеграла.

Отже, загальна освітленість E_v дорівнює площі під графіком $E_{v\lambda}(\lambda)$. Для визначення цієї площі в програмі Origin потрібно використати таку послідовність пунктів меню: Analysis -> Mathematics -> Integrate. У Таблиці 2 з'явиться додаткова колонка з назвою Mathematical Integral Area. Шукане нами значення площі розташоване в останній комірці цієї колонки, якій відповідає останнє значення $\lambda = 700$ нм.

8. На жаль, знайдені вище дані $E_{v\lambda}$ і E_v не можна безпосередньо використати для подальших розрахунків. Для цього потрібні дані E'_v і $E'_{v\lambda}$, які стосуються деякої визначеної відстані r між джерелом світла і чутливим елементом люксметра. Величину E'_v можна легко знайти, посвітивши джерелом прямо на люксметр і зчитавши його покази на відстані r від джерела. Проте за цих умов (тобто без монохроматора) неможливо знайти потрібну нам спектральну характеристику $E'_{v\lambda}$.

Для вирішення цієї суперечності поступають так: знаходять освітленість E'_v від лампи розжарення на відстані r [м] від нитки розжарення лампи до чутливого елемента люксметра. Відстань r задає викладач.

Далі визначають коефіцієнт пропорційності k_0 між E'_v і E_v за формулою

$$k_0 = E'_v / E_v. \quad (14)$$

9. Усі значення $E_{\nu\lambda}$ домножити на k_0 і так одержати залежність спектральної освітленості $E'_{\nu\lambda}(\lambda)$ на відстані r від джерела світла.

Для цього створити в Таблиці 2 нову колонку, клікнувши правою клав'яшею миші на вільному місці екрану справа від таблиці та обравши з випадаючого меню опцію Add New Column. Нову колонку також можна створити за допомогою комбінації клав'яш Ctrl+D. У цій колонці розрахувати значення

$$E'_{\nu\lambda} = k_0 E_{\nu\lambda}. \quad (15)$$

Для цього клікнути лівою клав'яшею миші по назві колонки, при цьому колонка виділиться чорним кольором. Клікнувши правою клав'яшею миші по колонці, викликати випадаюче меню, з якого обрати опцію Set Column Values. У діалоговому вікні присвоїти колонці значення відповідно до формули (15) (див. рис. 5).

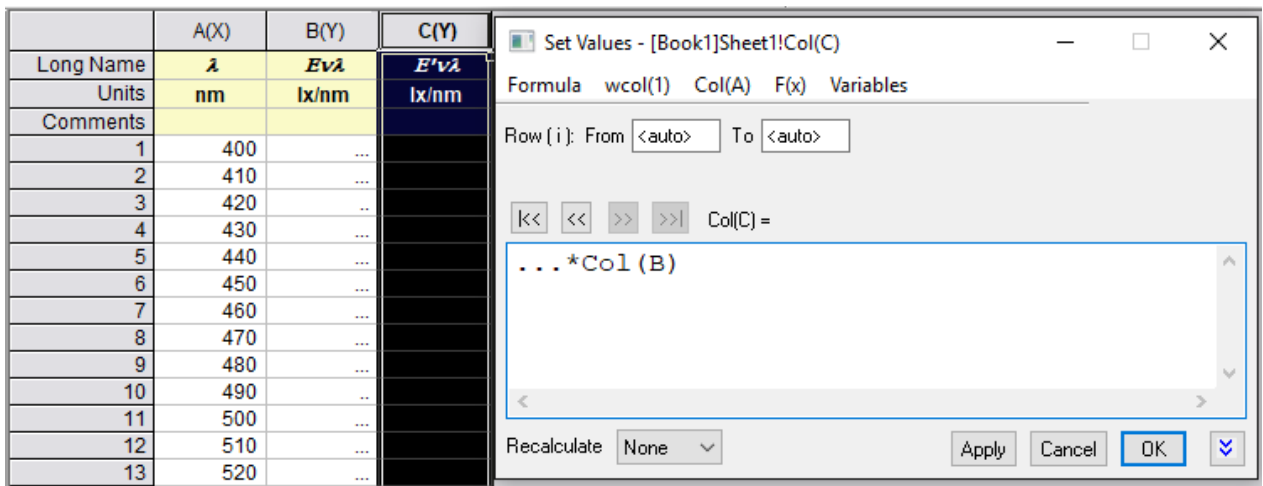


Рис. 5. Діалогове вікно присвоєння колонці C(Y) значення $k_0 E_{\nu\lambda}$ (замість трьох крапок потрібно вписати значення k_0 , розраховане за формулою (14)).

10. Побудувати графік залежності $E'_{\nu\lambda}(\lambda)$.

Зазначимо, що інтеграл $\int_{400}^{700} E'_{\nu\lambda}(\lambda) d\lambda$, тобто площа під кривою $E'_{\nu\lambda}(\lambda)$, дорівнюватиме значенню E'_{ν} , знайденому в пункті 8.

Підкреслимо також, що для знаходження інтеграла функції в програмі Origin не обов'язково будувати графік цієї функції. Достатньо в таблиці Origin виділити колонку або ту частину колонки, куди раніше було занесено значення функції, потрібні для знаходження інтеграла. Далі використовують такі пункти меню: Analysis -> -> Mathematics -> Integrate. Як аргумент програма сама обере колонку A(X) або ту її частину, що відповідає виділеній частині колонки зі значеннями функції.

11. За допомогою таблиці спектральної залежності спектральної світлової ефективності $k_{\lambda} = k(\lambda)$ [лк/(Вт/м²)] для видимої області спектру, наведеної в Додатку 2, перейти від спектральної освітленості $E'_{\nu\lambda}(\lambda)$ [лк/нм] до спектральної густини енергетичної освітленості $E_{e\lambda}(\lambda)$ [Вт/(м² нм)] за формулою

$$E_{e\lambda} = E'_{\nu\lambda} / k_{\lambda}. \quad (16)$$

Значення спектральної світлової ефективності $k_{\lambda} = k(\lambda)$ наведено в таблиці з Додатку 2, а сам графік залежності $k(\lambda)$ для наочності наведено на рис. 6.

Для переходу від світлової характеристики $E'_{v\lambda}(\lambda)$ до енергетичної характеристики $E_{e\lambda}(\lambda)$ у Таблиці 2 створюють дві нові колонки. В одній із них переносять із таблиці Додатку 2 значення k_λ , які відповідають діапазонаві довжин хвиль 400–700 нм, а другій колонці присвоюють значення за формулою (16).

12. Знайти енергетичну освітленість E_e від лампи розжарення на відстані r , обчисливши інтеграл

$$E_e = \int_{400}^{700} E_{e\lambda} d\lambda. \quad (17)$$

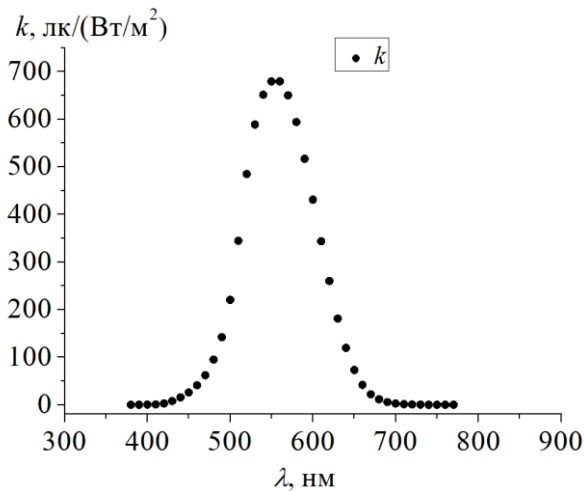


Рис. 6. Залежність спектральної світлової ефективності $k(\lambda) = k_\lambda$ від довжини хвилі світла.

Для цього побудувати графік залежності $E_{e\lambda}(\lambda)$ і розрахувати площу E_e під цим графіком. Приклад графіка $E_{e\lambda}(\lambda)$, наведений на рис. 7, засвідчує, що спектральна залежність об'єктивної (тобто енергетичної) освітленості істотно відрізняється від спектральної освітленості, яку сприймає людське око (порівн. із рис. 3). Зокрема, залежність $E_{e\lambda}(\lambda)$ майже монотонна та не має максимуму при $\lambda_m \approx 0.56$ мкм.

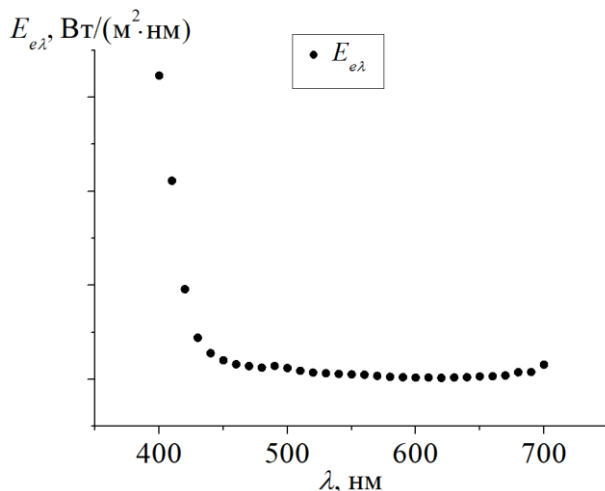


Рис. 7. Приклад графіка залежності спектральної густини енергетичної освітленості $E_{e\lambda}$ для лампи розжарення від довжини хвилі λ у видимій області на відстані r від джерела світла.

13. Визначити загальний потік випромінювання Φ_e за формулою (6):

$$\Phi_e = 4\pi r^2 E_e, \quad (18)$$

де $4\pi r^2$ – це площа сфери з радіусом r .

14. Оскільки енергетичний потік випромінювання Φ_e від лампи розжарення фактично дорівнює оптичній потужності лампи, то коефіцієнт перетворення μ електричної потужності лампи розжарення W на енергетичний потік випромінювання Φ_e можна визначити за формулою

$$\mu = \Phi_e/W. \quad (19)$$

Для електричної потужності лампи розжарення слід узяти значення $W = 100$ Вт.

Наголосимо, що коефіцієнт корисної дії ламп розжарення доволі низький, а тому коефіцієнт μ істотно менший за одиницю (або за 100%).

II. Знайти залежність освітленості E_v від відстані r між джерелом і люксометром

1. Розмістити на оптичній лаві джерело світла і люксометр (рис. 5).

2. Провести вимірювання освітленості E_v для п'яти відстаней r від середини нитки розжарення лампи до чутливого елемента люксометра. Відстані задає викладач. Дані вимірювань занести в Таблицю 3 (зауважимо, що всі таблиці для зручності наведено в Додатку 4).

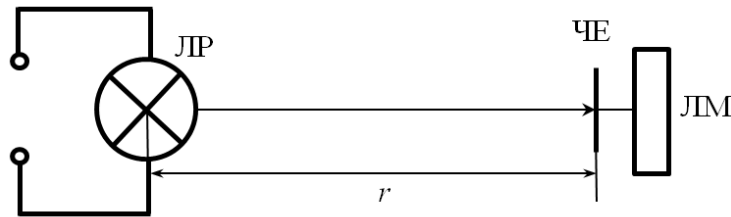


Рис. 8. Схема установки для вивчення залежності освітленості E_v предмета від його відстані r до джерела світла: ЛР – джерело світла (лампа розжарення); ЛМ – люксометр; ЧЕ – чутливий елемент люксометра.

r , м	E_v , лк

Таблиця 3
Таблиця для результатів вимірювань освітленості E_v від лампи розжарення залежно від її відстані r до чутливого елемента люксометра

3. Перенести дані Таблиці 3 у таблицю Origin; в окремій колонці розрахувати значення $1/r^2$ і побудувати графік залежності $E_v(1/r^2)$. Якщо графік виявиться прямолінійним, то параметр E_v і справді обернено пропорційний до квадрату відстані r .

Зауважте, що навіть без вимірювань зрозуміло, що на відстані $r \rightarrow \infty$ маємо $E_v \rightarrow 0$. Отже, у Вас фактично є ще одна точка: $r \rightarrow \infty, 1/r^2 = 0, E_v = 0$! Цю точку теж слід навести на графіку. Приклад графіка залежності освітленості E_v від величини, обернено пропорційної до квадрату відстані r від чутливого елемента люксометра до джерела світла, наведено на рис. 9.

Корисно перевірити, наскільки добре експериментальні точки описуються теоретичною формулою (11) $E_v \sim 1/r^2$. У нашому випадку для цього слід апроксимувати залежність $E_v(1/r^2)$ на рис. 9 прямою лінією. У меню Origin треба поступово обрати такі пункти меню для обробки графіка: Analysis -> Fitting -> Linear Fit. Програма побудує апроксимуючу пряму лінію, яка буде проходити якомога ближче до всіх експериментальних точок, виходячи з відомого алгоритму найменших квадратів. «Якість» апроксимації перевіримо за коефіцієнтом кореляції Пірсона R («Pearson's r»), який можна знайти в таблиці Origin із чисельними підсумками апроксимації.

Якщо маємо $R \approx 0.99$ або вище, то точність нашого експерименту висока, а освітленість справді обернено пропорційна до квадрату відстані між джерелом і предметом. Якщо ж маємо протилежну ситуацію, швидше за все, експериментальні дані одержано з помилками або результати їхньої чисельної обробки містять помилки.

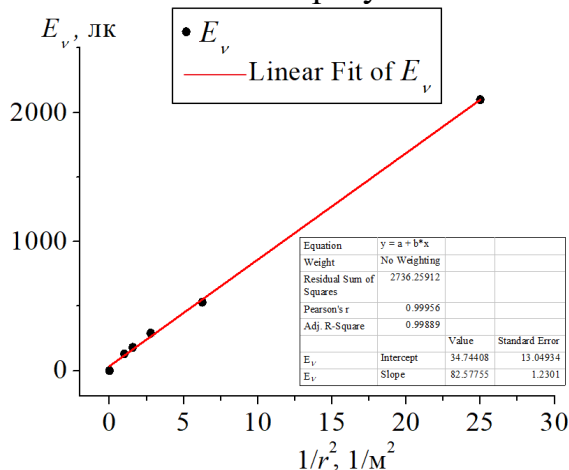


Рис. 9. Приклад графіка залежності E_v від $1/r^2$ для лампи розжарення.

III. Дослідити кутовий розподіл освітленості від світлодіода

1. Установити кутовий вимірювальний пристрій на оптичній лаві, а на ньому розмістити світлодіод як джерело випромінювання. Встановити фотодіод, який використовують для реєстрування світла (рис. 10).

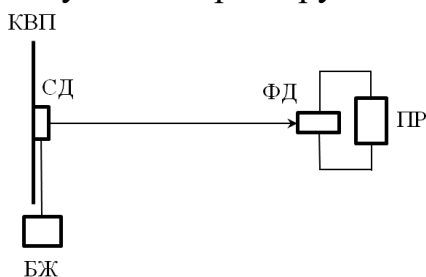


Рис. 10. Схема установки для вивчення просторового розподілу освітленості світлодіода: СД – світлодіод; КВП – кутовий вимірювальний пристрій; БЖ – блок живлення; ФД – фотодіод; ПР – пристрій реєстрації (амперметр).

2. За допомогою амперметра виміряти значення сили струму I на фотодіоді [мкА]. Величина I прямо пропорційна до освітленості E_v .

$\alpha, ^\circ$	$I, \text{мкА}$
0	
5	
10	
...	
85	
90	

Таблиця 4

Таблиця для результатів вимірювання сили струму I на фотодіоді (пропорційної до освітленості світлодіода E_v) залежно від кута повороту α кутового вимірювального пристрою

Long Name	α	$I(E_v)$
Units	$^\circ$	mkA
Comments		
1	0	...
2	5	...
3	10	...
...
35	170	...
36	175	...
37	180	...

Таблиця 5

Таблиця Origin для перенесення результатів вимірювань із Таблиці 4

3. Повертаючи при нерухомому фотодіоді освітлювач з кроком $\Delta\alpha = 3^\circ$ у діапазоні кутів α від -40° до $+40^\circ$, визначити освітленості $I(\alpha)$ для всіх кутів повороту α . Початкову орієнтацію кутового вимірювального пристрою, якій відповідає кут $\alpha = 0^\circ$, задає викладач.

Занести результати вимірювання в Таблицю 4.

4. Перенести дані вимірювань в таблицю Origin (див. Таблицю 5).

5. Побудувати діаграму направленості світлового випромінювання $I(\alpha)$ світлодіода у *полярній системі координат*. Коротко опишемо дану систему координат. Полярна система містить точку O (*полюс*) і промінь (*полярну вісь*), який виходить із точки O . Координати точки на площині задають полярним кутом α і полярним радіусом r . *Полярний радіус r* – це відстань від точки до полюса O , а *полярний кут α* – це кут, на який потрібно повернути полярну вісь проти годинникової стрілки, щоби потрапити в цю точку (див. рис. 11).

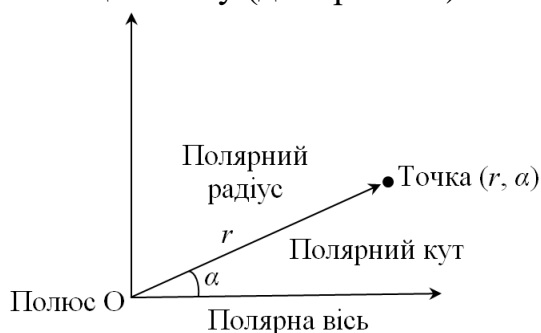


Рис. 11. Точка з координатами r і α у полярній системі координат.

Координатними лініями в полярній системі координат є концентричні кола, які відповідають полярним радіусам r , а також промені, які відповідають полярним кутам α . Тому полярна система координат має вигляд полярної сітки (рис. 12).

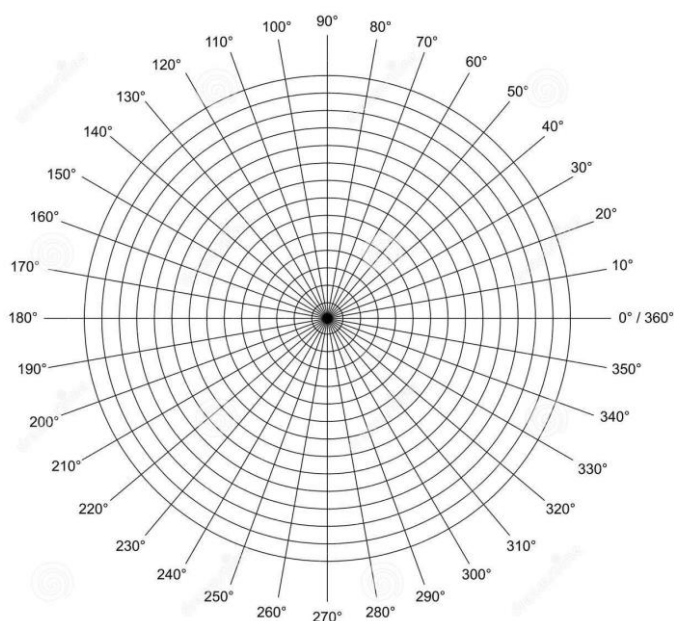


Рис. 12. Координатні лінії у полярній системі координат у вигляді полярної сітки.

Для побудови діаграми направленості світлового випромінювання $I(\alpha)$ світлодіода у *полярній системі координат* використати таку послідовність пунктів меню: Plot -> Specialized -> Polar Theta (X) r(Y) (див. рис. 13).

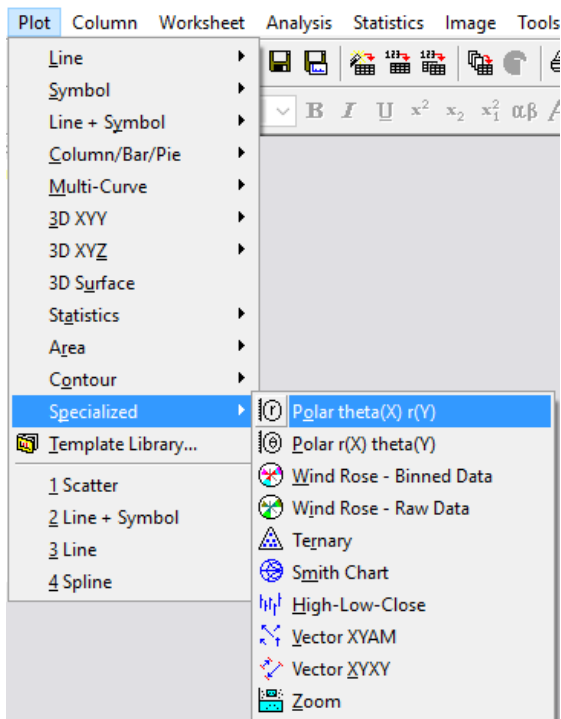


Рис. 13. Пункти меню програми Origin для побудови графіка у полярній системі координат.

У діалоговому вікні вибрати тип графіка Scatter і присвоїти значення X і Y відповідним колонкам (див. рис. 14).

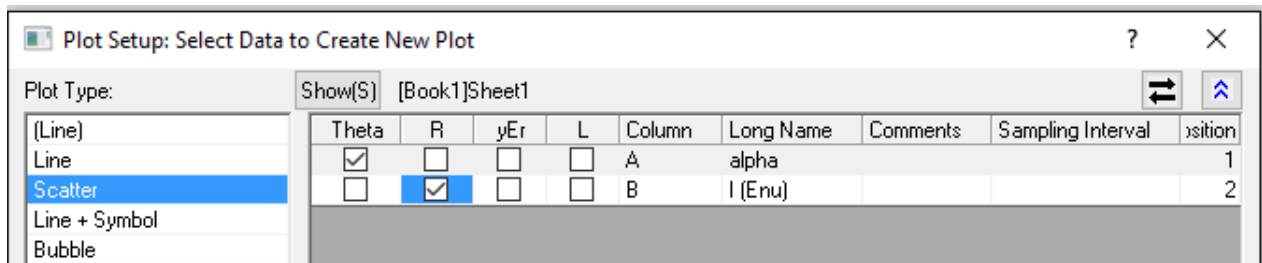


Рис. 14. Діалогове вікно вибору даних для побудови експериментального графіка $I(\alpha)$ у полярній системі координат.

Приклад діаграми направленості світлового випромінювання $I(\alpha)$ світлодіода у полярній системі координат наведено на рис. 15. Із рис. 15 видно, що світлодіод не випромінює рівномірно в усі боки; навпаки, його випромінювання зосереджене в порівняно вузькому діапазоні кутів, який слід приблизно визначити з графіка.

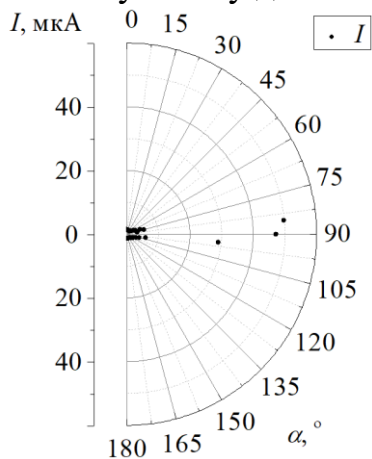


Рис. 15. Приклад діаграми направленості світлового випромінювання $I(\alpha)$ світлодіода.

Додаток 1

Основні енергетичні і світлові величини (відповідно до системи СІ та Міжнародного світлотехнічного словника)

Енергетична величина			Світлова величина		
Назва	Формула	Одиниця вимірювання	Назва	Формула	Одиниця вимірювання
Потік випромінювання	$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda$	Вт	Світловий потік	$\Phi_v = K_{\lambda m} \int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda$	лм
Енергія випромінювання	$Q_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt$	Дж	Світлова енергія	$Q_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt$	лм×с
Енергетична сила світла	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Вт×ср ⁻¹	Сила світла	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	кд
Поверхнева густина потоку випромінювання	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS_1}$	Вт×м ⁻²	Світність	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS_1}$	лм×м ⁻²
Енергетична освітленість	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS_2}$	Вт×м ⁻²	Освітленість	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS_2}$	лк
Енергетична яскравість	$L_{e\theta_1} = \frac{dI_{e\theta_1}}{dS_1 \cos\theta_1}$	Вт×м ⁻² ×ср ⁻¹	Яскравість	$L_{v\theta_1} = \frac{dI_{v\theta_1}}{dS_1 \cos\theta_1}$	кд×м ⁻²
Енергетична кількість світла	$H_e = \int_0^t E_e(t) dt$	Дж×м ⁻²	Кількість світла	$H_v = \int_0^t E_v(t) dt$	лк×с

Примітка: індекс 1 позначає ті площі S і кути θ , що стосуються джерела випромінювання, а індекс 2 – ті, що стосуються освітлюваного предмета.

Додаток 2

Значення спектральної світлової ефективності залежно від довжини хвилі світла

λ , нм	k , лк/(Вт/м ²)
380	0.027
390	0.082
400	0.270
410	0.826
420	2.732
430	7.923
440	15.709
450	25.954
460	40.980
470	62.139
480	94.951
490	142.078
500	220.609
510	344.549
520	484.930
530	588.746
540	651.582
550	679.551
555	683.000
560	679.585
570	650.216
580	594.210
590	517.031
600	430.973
610	343.549
620	260.223
630	180.995
640	119.525
650	73.081
660	41.663
670	21.856
680	11.611
690	5.607
700	2.802
710	1.428
720	0.715
730	0.355
740	0.170
750	0.082
760	0.041
770	0.020

Додаток 3

Зв'язок між довжиною хвилі λ і кутовою мірою φ барабана монохроматора

λ , нм	φ , град	λ , нм	φ , град	λ , нм	φ , град
400	509	830	3104	1330	3407
410	710	840	3115	1350	3416
420	920	850	3126	1400	3433
430	1080	860	3136	1450	3448
440	1218	870	3146	1500	3464
450	1347	880	3156	1550	3480
460	1473	890	3165	1600	3493
470	1593	900	3174	1630	3500
480	1704	910	3183		
490	1806	920	3191		
500	1900	930	3199		
510	1983	940	3207		
520	2059	950	3214		
530	2130	960	3222		
540	2197	970	3229		
550	2261	980	3236		
555	2290	990	3243		
560	2320	1000	3249		
570	2378	1010	3256		
580	2432	1020	3262		
590	2485	1030	3268		
600	2536	1040	3274		
610	2583	1050	3280		
620	2629	1060	3286		
630	2670	1070	3291		
640	2710	1080	3296		
650	2746	1090	3303		
660	2780	1100	3311		
670	2811	1110	3313		
680	2840	1120	3318		
690	2868	1130	3324		
700	2892	1140	3328		
710	2915	1150	3332		
720	2937	1160	3339		
730	2957	1170	3342		
740	2975	1180	3347		
750	2993	1190	3352		
760	3010	1200	3356		
770	3025	1210	3360		
780	3040	1230	3368		
790	3054	1250	3378		
800	3068	1270	3386		
810	3081	1290	3393		
820	3093	1310	3401		

Додаток 4
Робочі таблиці

<p style="text-align: center;">Таблиця для результатів вимірювання спектральної освітленості $E_{v\lambda}$ лампи розжарення в залежності від довжини хвилі λ у видимій області спектру</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">λ, нм</th> <th style="padding: 5px;">$E_{v\lambda}$, лк/нм</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>400</td><td></td></tr> <tr><td>410</td><td></td></tr> <tr><td>420</td><td></td></tr> <tr><td>430</td><td></td></tr> <tr><td>440</td><td></td></tr> <tr><td>450</td><td></td></tr> <tr><td>460</td><td></td></tr> <tr><td>470</td><td></td></tr> <tr><td>480</td><td></td></tr> <tr><td>490</td><td></td></tr> <tr><td>500</td><td></td></tr> <tr><td>510</td><td></td></tr> <tr><td>520</td><td></td></tr> <tr><td>530</td><td></td></tr> <tr><td>540</td><td></td></tr> <tr><td>550</td><td></td></tr> <tr><td>560</td><td></td></tr> <tr><td>570</td><td></td></tr> <tr><td>580</td><td></td></tr> <tr><td>590</td><td></td></tr> <tr><td>600</td><td></td></tr> <tr><td>610</td><td></td></tr> <tr><td>620</td><td></td></tr> <tr><td>630</td><td></td></tr> <tr><td>640</td><td></td></tr> <tr><td>650</td><td></td></tr> <tr><td>660</td><td></td></tr> <tr><td>670</td><td></td></tr> <tr><td>680</td><td></td></tr> <tr><td>690</td><td></td></tr> <tr><td>700</td><td></td></tr> </tbody> </table>	λ , нм	$E_{v\lambda}$, лк/нм	400		410		420		430		440		450		460		470		480		490		500		510		520		530		540		550		560		570		580		590		600		610		620		630		640		650		660		670		680		690		700		<p style="text-align: center;">Таблиця для результатів вимірювань освітленості E_v лампи розжарення залежно від її відстані r до чутливого елемента люксметра</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">r, м</th> <th style="padding: 5px;">E_v, лк</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Таблиця для результатів вимірювання сили струму на фотодіоді I, пропорційної освітленості світлодіода E_v, залежно від кута повороту α кутового вимірювального пристрою</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">α, град</th> <th style="padding: 5px;">I, мкА</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td></tr> <tr><td>25</td><td></td></tr> <tr><td>30</td><td></td></tr> <tr><td>35</td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td></td></tr> <tr><td>45</td><td></td></tr> <tr><td>50</td><td></td></tr> <tr><td>55</td><td></td></tr> <tr><td>60</td><td></td></tr> <tr><td>65</td><td></td></tr> <tr><td>70</td><td></td></tr> <tr><td>75</td><td></td></tr> <tr><td>80</td><td></td></tr> <tr><td>85</td><td></td></tr> <tr><td>90</td><td></td></tr> </tbody> </table>	r , м	E_v , лк											α , град	I , мкА	0		5		10		15		20		25		30		35		40		45		50		55		60		65		70		75		80		85		90	
λ , нм	$E_{v\lambda}$, лк/нм																																																																																																																				
400																																																																																																																					
410																																																																																																																					
420																																																																																																																					
430																																																																																																																					
440																																																																																																																					
450																																																																																																																					
460																																																																																																																					
470																																																																																																																					
480																																																																																																																					
490																																																																																																																					
500																																																																																																																					
510																																																																																																																					
520																																																																																																																					
530																																																																																																																					
540																																																																																																																					
550																																																																																																																					
560																																																																																																																					
570																																																																																																																					
580																																																																																																																					
590																																																																																																																					
600																																																																																																																					
610																																																																																																																					
620																																																																																																																					
630																																																																																																																					
640																																																																																																																					
650																																																																																																																					
660																																																																																																																					
670																																																																																																																					
680																																																																																																																					
690																																																																																																																					
700																																																																																																																					
r , м	E_v , лк																																																																																																																				
α , град	I , мкА																																																																																																																				
0																																																																																																																					
5																																																																																																																					
10																																																																																																																					
15																																																																																																																					
20																																																																																																																					
25																																																																																																																					
30																																																																																																																					
35																																																																																																																					
40																																																																																																																					
45																																																																																																																					
50																																																																																																																					
55																																																																																																																					
60																																																																																																																					
65																																																																																																																					
70																																																																																																																					
75																																																																																																																					
80																																																																																																																					
85																																																																																																																					
90																																																																																																																					