

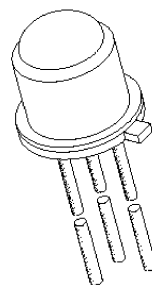
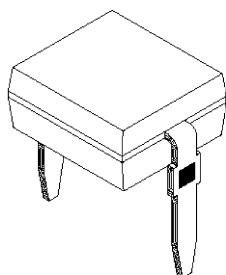


ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ–СОФИЯ



ФАКУЛТЕТ ПО ЕЛЕКТРОННА ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

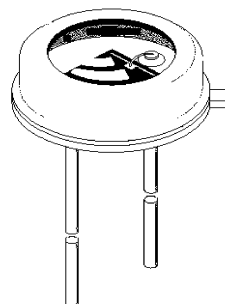
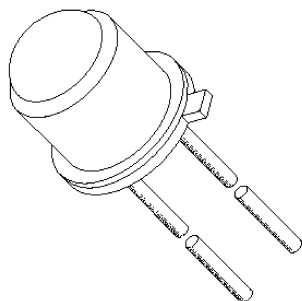
Тодор Джамийков



ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ЕЛЕМЕНТИ II част

(оптоелектронни елементи, тунелен диод, тиристор)

протоколи за лабораторни упражнения– методически указания



София 2008

Съдържание

Увод.....	5
Протокол № 1 Изследване на електрически параметри и характеристики на светодиоди	6
Протокол № 2 Изследване на оптични параметри и характеристики на светодиоди	11
Протокол № 3 Изследване на електрически схеми на захранване на светодиоди посредством компютърна симулация.....	17
Протокол № 4 Изследване на фоторезистор.....	24
Протокол № 5 Изследване на фотодиод.....	30
Протокол № 6 Изследване на фототранзистор	36
Протокол № 7 Изследване на фототранзисторен оптрон.....	42
Протокол № 8 Изследване на тунелен диод.....	49
Протокол № 9 Изследване на тиристор	52
Литература	56

Увод

Настоящото учебно помагало за лабораторни упражнения по “Полупроводникови елементи II част” е предназначено за студентите от бакалаварския втори курс по специалност “Електроника” на факултета по “Електронна техника и технологии”. То има за цел да облекчи и улесни работата на студентите при изпълнение на лабораторните упражнения.

За всяко от предлаганите упражнения са предвидени задачи за самостоятелна подготовка, които трябва да бъдат решени преди започване на експерименталната работа в лабораторията. Представени са таблици за попълване по време на измерванията и разграфени координатни системи за изчертаване на графиките на характеристиките по получените резултати.

Дадените към заданията на протоколите параметри и характеристики на еталонни източници и фотоприемници се отнасят за използваните такива в конкретните лабораторни макети, с които се провеждат измерванията.

Учебното помагало би могло да се използва и от студенти от други курсове и специалности, както и от инженери, провеждащи експериментални изследвания в областта на оптоелектрониката.

Авторът изразява благодарност на своите колеги, които със своите консултации и отзивчивост допринесоха за подобряване на ръкописа.

Всички доброжелателни забележки и препоръки от колеги и студенти за подобряване на учебното помагало са добре дошли и ще бъдат взети под внимание при следващи издания.

София, януари 2008

Тодор Джамийков

Протокол № 1

Изследване на електрически параметри и характеристики на светодиоди

Студент:	Ф. №.....	Група...
.....	Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:
За корегирание:		

1.1 Задачи за предварителна подготовка

1 – Силицият Si има ширина на забранената зона $\Delta W = 1,2 \text{ eV}$. В коя област от спектъра на електромагнитните вълни ще излъчва светодиод на негова основа?

2 – Светодиоди на базата на PbCdS излъчват в инфрачервения спектър $\lambda = 4,2 \div 8,0 \text{ }\mu\text{m}$. Изчислете диапазона на изменение на ширината на забранената зона на полупроводниковия материал.

3 – Какви типове рекомбинационни процеси протичат в полупроводниците с пряк преход зона – зона?

4 – В постояннотоков или импулсен режим на електрическо хранене светодиода разсейва по-голяма електрическа мощност?

5 – Попълнете в табл. 1-1 дължините на вълната на различните по цвят светодиоди в микрометри. Изчислете ширината на забранената зона на полупроводниците, от които са направени.

6 – Възможно ли е през светодиода да протече ток 3 A? Обосновайте отговора.

1.2 Решения на задачите

Табл. 1-1 Дължина на вълната и ширина на забранената зона за светодиодите.

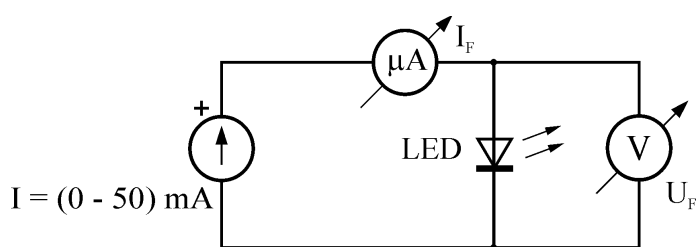
LED	Син цвят	Зелен цвят	Жълт цвят	Червен цвят	Сепер -червен	Инфрачервен
$\lambda \text{ }\mu\text{m}$						
$\Delta W \text{ eV}$						

1.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Запознаване с каталожните данни и общия вид на светодиодите. Да се разпознаят изводите (анод, катод) на различните видове светодиоди. Запознаване със схемата на опитната постановка.

2 – Да се снимат волт–амперните характеристики на различните типове светодиоди.

За измерване на точки от волт–амперната характеристика на светодиода, да се реализира електрическата схема от фиг. 1-1.



Фиг. 1-1 Принципна електрическа схема за измерване на точки от волт–амперната характеристика на светодиод.

Измерва се падът на напрежение върху светодиода за стойности на тока зададени според табл. 1-2. Резултатите за всеки тип светодиод да се нанасат в таблицата.

Табл. 1-2 Резултати от измерванията на волт–амперните характеристики.

I_F mA	Светодиоди					
	Син цвят U_F V	Зелен цвят U_F V	Жълт цвят U_F V	Червен цвят U_F V	Суперчервен U_F V	Инфрачервен U_F V
0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1						
2						
3						
5						
10						
15						
20						
30						
40						
50						

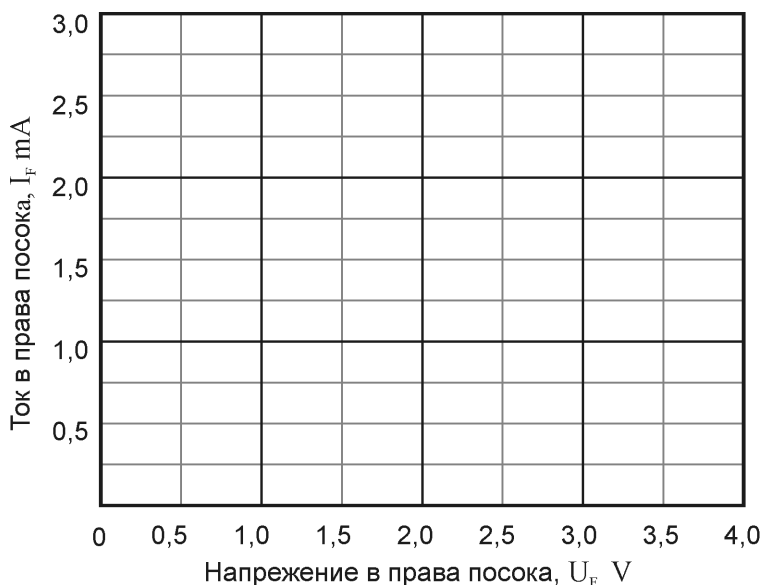
3 – Да се измери тока, при който излъчването на светодиодите (от видимия диапазон) започва да се наблюдава, получената стойност да се нанесе в табл. 1-3.

Табл. 1-3 Ток, при който се различава излъчването на светодиода.

Ток при който се наблюдава излъчване I_{vis} mA				
Син цвят	Зелен цвят	Жълт цвят	Червен цвят	Суперчервен

Да се построят графично в обща координатна система резултати от измерванията на волт–амперните характеристики от табл. 1-2 за всички типове светодиоди.

Начертайте волт–амперните характеристики фиг. 1-2, за стойности на тока в права посока до 2 mA.



Фиг. 1-2 Волт–амперни характеристики на светодиоди в диапазон на тока до 2 mA.

Начертайте волт–амперните характеристики фиг. 1-3, за стойности на тока в права посока до 50 mA.

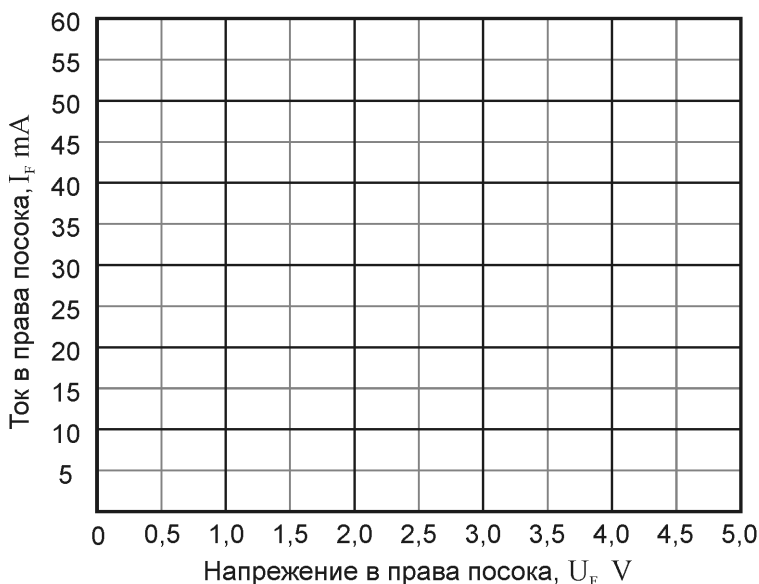
4 – Апроксимирайте волт–амперната характеристика на светодиодите в интервала: $I_F \in (0 \div 50)$ mA, $U_F \in (0 \div 4)$ V с права с уравнение:

$$I_F = \frac{U_F - U_0}{r_d} \quad (1-1)$$

където: U_0 е напрежението на “отпушване” на светодиода, r_d - диференциално съпротивление на светодиода, в права посока.

Определете U_0 и r_d за изследваните различни типове светодиоди. Изчислете диференциалното съпротивление за ток $I_{F1} = 20$ mA, по формулата:

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{F1} - U_{F2}}{I_{F1} - I_{F2}} \quad (1-2)$$



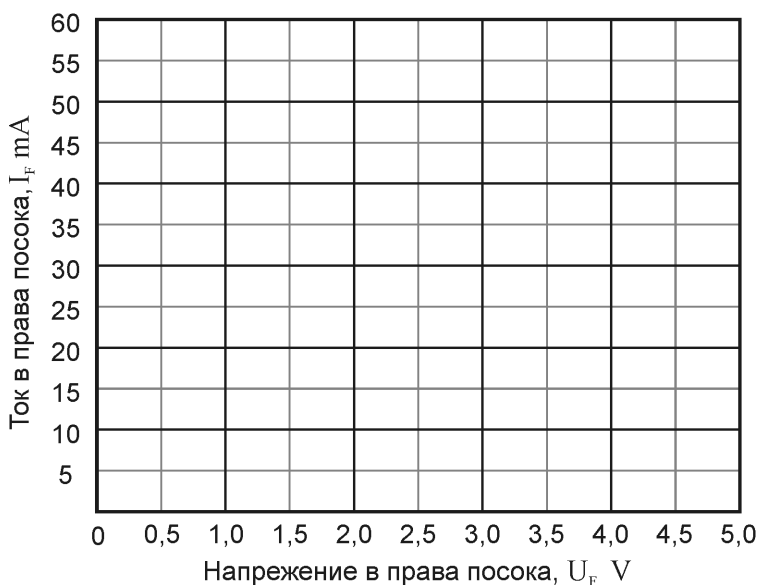
Фиг. 1-3 Волт–амперни характеристики на измерените светодиоди в диапазон на тока до 50 mA.

Определете U_o като стойност на напрежението, при което се пресича допирателната към волт–амперната характеристика в точка $I_{F1} = 20 \text{ mA}$ с абсцисата на координатната система. Получените резултати попълнете в табл. 1-4.

Табл. 1- 4 Резултати за r_d и U_o изчислени от експерименталните данни.

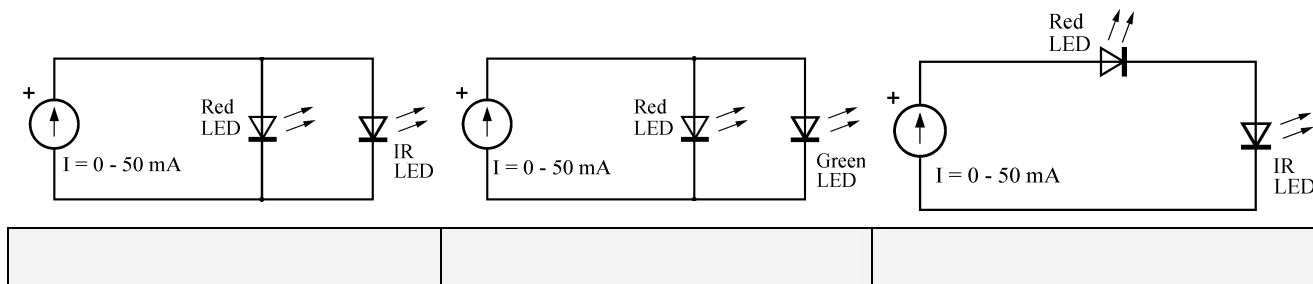
	Син цвят	Зелен цвят	Жълт цвят	Червен цвят	Суперчервен	Инфрачервен
$I_F \text{ V}$						
$U_F \text{ V}$						
$r_d \Omega$						
$U_o \text{ V}$						

Начертайте апроксимираните волт–амперни характеристики на фиг. 1-4.



Фиг. 1-4 Апроксимирани волт–амперни характеристики на светодиоди в диапазон на тока в права посока до 50 mA.

5 – Да се включат паралелно и последователно светодиоди в различни комбинации по схемите от фиг. 1-5 и да се захранят в права посока. Да се наблюдава излъчването им при последователно увеличаване на захранващия ток. Резултата отразете под всяка схема.



Фиг. 1-5 Различни включвания на комбинации от светодиоди права посока.

6 – Свържете светодиодите към омметъра в съответствие със схемите от фиг. 1-6. Променяйте обхватите на измерителния уред, резултатите от измерванията нанесете в табл. 1-5.



Фиг. 1-6 Различни възможности на измерване на светодиоди с омметър.

Табл. 1-5 Резултати от измерванията на светодиодите с мултицет.

		Син цвят	Зелен цвят	Жълт цвят	Червен цвят	Суперчервен	Инфрачервен
Схема А	0 –200 Ω						
	0 –2000 Ω						
	0 –20 КΩ						
Схема Б	0 –200 Ω						
	0 –2000 Ω						
	0 –20 КΩ						

1.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- Каква е зависимостта между ширината на забранената зона, спектъра на излъчване и вида на волт–амперната характеристика на светодиода?
- Може ли да се разпознаят и измерят светодиоди с помощта на мултицет и как?
- Как зависи от температурата ширината на забранената зона на полупроводниковия материал, дължината на вълната и волт–амперната характеристика на светодиодите?

Протокол № 2

Изследване на оптични параметри и характеристики на светодиоди

Студент:		Ф. №.....	Група...
.....		Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.	
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:	
За корегирание:			

2.1 Задачи за предварителна подготовка

1 – В какви единици се измерва яркостта на излъчване на светодиодите във видимия спектър и тази на инфрачервените? Обосновете отговора.

2 – Ако два светодиода имат еднакъв интензитет на излъчване, но излъчващите кристали са с различна площ, как ще се отнасят яркостите им?

3 – В коя част на полупроводниковия кристал се формира излъчването на светодиодите?

4 – Какво е температурен коефициент на потока на излъчване на светодиода? С колко ще се промени излъчвания поток при промяна на температурата на светодиода с 15 °C?

5 – Кои оптични параметри се променят и с колко в импулсен режим на работа светодиода при големи стойности на тока в права посока?

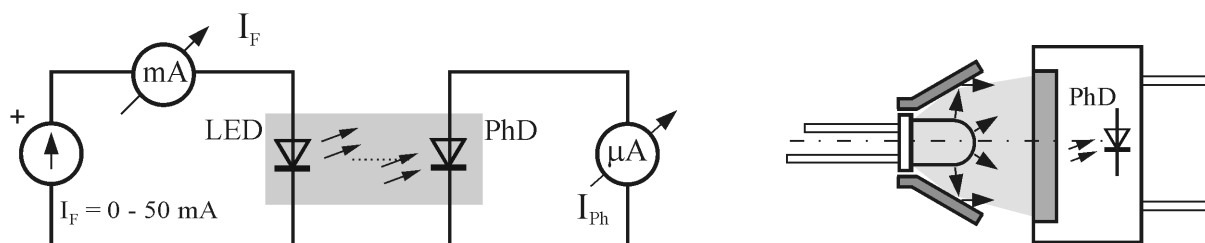
2.2 Решения на задачите

2.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Запознаване с оптичните параметри и характеристики от каталожните данни на светодиодите. Запознаване със схемата на опитната постановка.

2 – Да се снимат светлинните (мощностните) характеристики $\Phi_{\text{led}} = f(I_F)$ на различните типове светодиоди.

За измерване на точки от светлинната (мощностна) характеристика на светодиода, да се реализира механичната и електрическата схема от фиг. 2-1. Светодиода да се закрепва надеждно в носача срещу еталонния фотодиод, максимално близо до него така, че целия излъчван от него поток да попада върху фоточувствителната повърхност.



Фиг. 2-1 Електрическа схема и механично оформление за измерване на светлинната (мощностна) характеристика $\Phi_{\text{led}} = f(I_F)$.

С помощта на микроамперметъра се измерва фототока генериран от еталонния фотодиод при последователно задаване на тока през светодиода със стойности от табл. 2-1. Резултатите за всеки тип светодиод се нанасят в таблицата.

Табл. 2-1 Резултати от измерване на мощностната характеристика на светодиод.

I_F mA	Фототок I_{Ph} μ A & Излъчен поток Φ_{led} mW							
	Зелен – LED		Жълт – LED		Суперчервен – LED		Инфрочервен – LED	
	I_{Ph} μ A	Φ_{led} mW	I_{Ph} μ A	Φ_{led} mW	I_{Ph} μ A	Φ_{led} mW	I_{Ph} μ A	Φ_{led} mW
0								
0,2								
0,4								
0,6								
0,8								
1								
2								
3								
5								

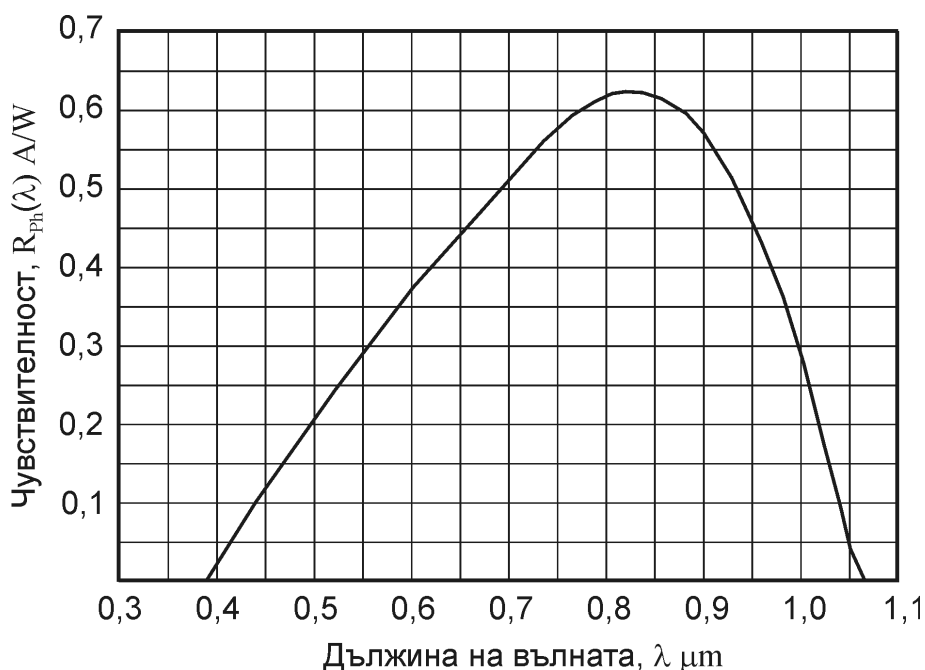
Табл. 2-1 Продължение

I _F mA	Фототок I _{Ph} μA & Излъчен поток Φ _{led} mW)							
	Зелен – LED		Жълт – LED		Суперчервен – LED		Инфрочервен – LED	
	I _{Ph} μA	Φ _{led} mW	I _{Ph} μA	Φ _{led} mW	I _{Ph} μA	Φ _{led} mW	I _{Ph} μA	Φ _{led} mW
10								
15								
20								
30								
40								
50								

От спектралната характеристика на еталонния фотодиод, фиг. 2-2 се отчита чувствителността му $R_{Ph}(\lambda_{led})$ за дължината на вълната на излъчване на съответния светодиод. Излъчения поток от светодиода се изчислява по формулата:

$$\Phi_{led} = R_{Ph}(\lambda_{led}) \cdot I_{Ph}$$

където: Φ_{led} – е лъчистия поток, излъчен от светодиода и паднал върху фотодиода, $R_{Ph}(\lambda_{led})$ A/W – спектрална чувствителност на фотодиода за дължината на вълната на излъчване на светодиода, I_{Ph} – фототок, генериран от фотодиода.



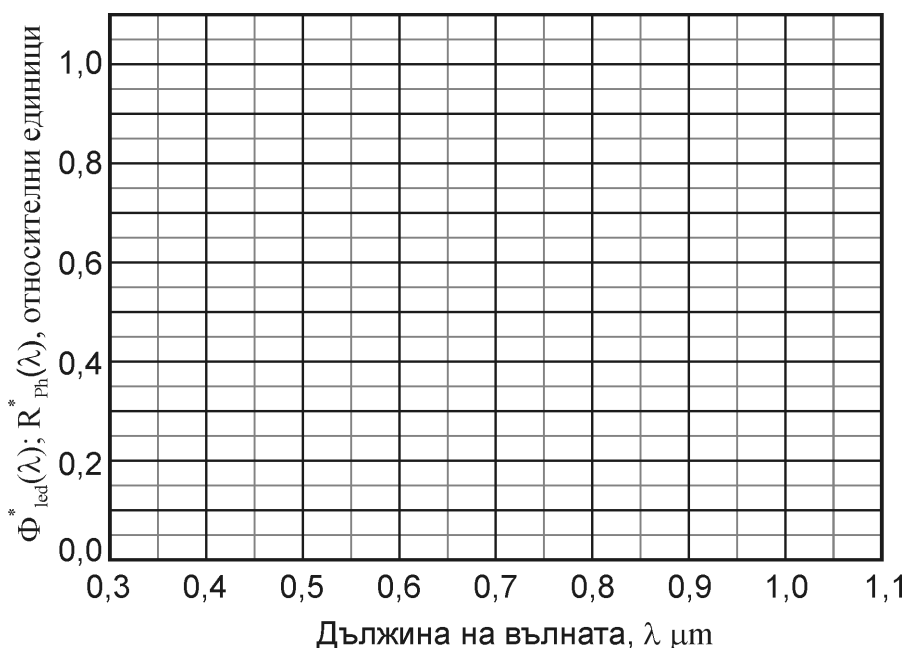
Фиг. 2-2 Спектрална характеристика на чувствителност на еталонния фотоприемник.

Получените резултати $\Phi_{led} = f(I_F)$ за различните видове светодиоди от Табл. 2-1 да се построят графично на Фиг. 2-3.



Фиг. 2-3 Мощностни характеристики $\Phi_{\text{led}} = f(I_F)$ на изследваните светодиоди.

3 – Постройте в единен мащаб на фиг. 2-4, графиките на относителните спектрални характеристики на излъчване на изследваните светодиоди $\Phi_{\text{led}}^*(\lambda)$ и на спектрална чувствителност $R_{\text{ph}}^*(\lambda)$ на еталонния фотодиод.

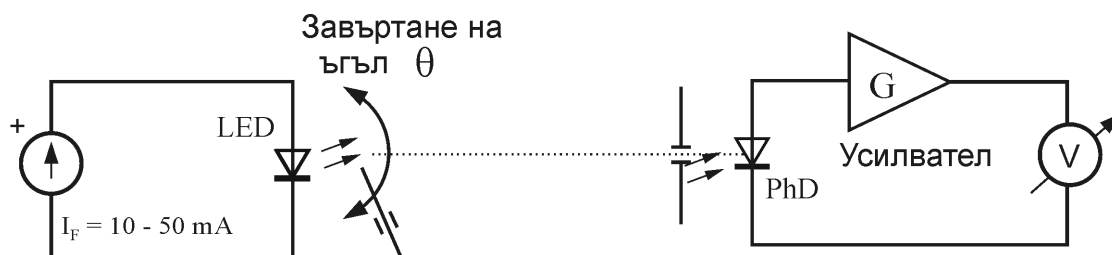


Фиг. 2-4 Относителни спектрални характеристики излъчване на изследваните светодиоди $\Phi_{\text{led}}^*(\lambda)$ и чувствителност на еталонния фотоприемник $R_{\text{ph}}^*(\lambda)$.

4 – Измерете диаграмите на насоченост $I_{\text{led}} = f(\theta)$ на светодиодите в две перпендикулярни направления спрямо направлението на излъчване.

Реализирайте механичното разположение между изследвания светодиод и фотоприемника показано на фиг. 2-5 като надеждно закрепите светодиода в носача на лабораторния макет. Включете електри-

ческата схема на захранване на светодиода и усилвателя на измервателния фотодиод. Отчитайте ъгъла θ по скалата върху макета.



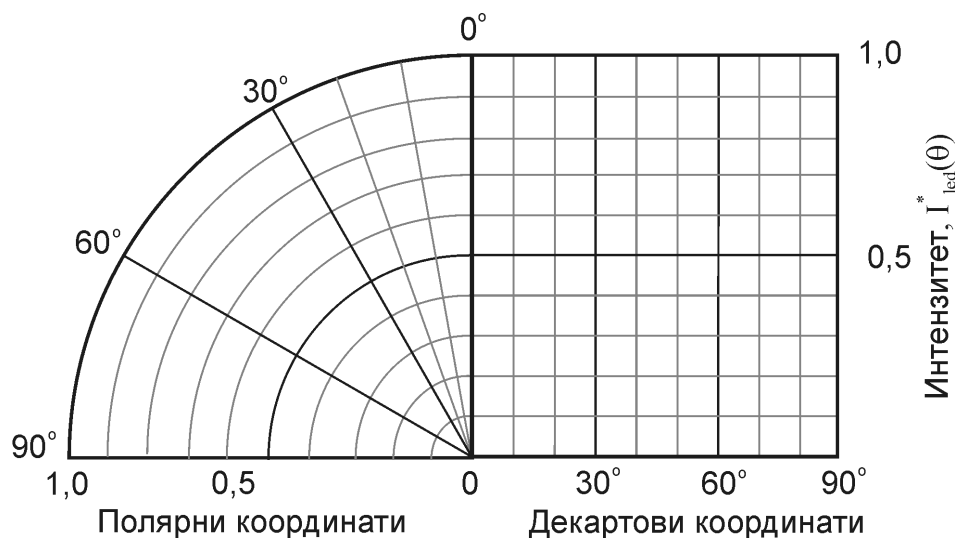
Фиг. 2-5 Схема на лабораторния макет за измерване на диаграмата на насоченост.

Настройте показанията на волтметъра на стойност 1V, чрез промяна на тока през светодиода при ъгъл между оптичните оси на фотоприемника и светодиода $\theta = 0^\circ$. Последователно променяйте ъгъла θ със стойности зададени в табл. 2-3. За всеки ъгъл отчитайте стойността на напрежението на волтметъра, резултатите запишете в Табл. 2-3.

Табл. 2-3 Резултати от измерване на диаграмата на насоченост на светодиодите.

		←				↑			→			
		25°	20°	15°	10°	5°	0°	5°	10°	15°	20°	25°
Зелен LED	U mV											
	↔ ОТН.											
	↑ U mV											
	↓ ОТН.											
Червен LED	U mV											
	↔ ОТН.											
	↑ U mV											
	↓ ОТН.											
Супур червен LED	U mV											
	↔ ОТН.											
	↑ U mV											
	↓ ОТН.											
Инфрачервен LED	U mV											
	↔ ОТН.											
	↑ U mV											
	↓ ОТН.											

Резултатите от измерванията за двете перпендикулярни направления постройте в графичен вид в координатната система на фиг. 2-6.



Фиг. 2-6 Диаграми на насоченост $I_{led} = f(\theta)$ на различни светодиоди.

5 – Изчислете интензитета на излъчване на изследваните светодиоди по получените резултати от точка 3, по формулата: $I_{led} = \frac{\Phi_{led}}{\Omega}$, където: Φ_{led} – излъчван от светодиода лъчист поток, Ω – пространствен ъгъл на разпространение на потока в стерadianи, sr. Пространствения ъгъл Ω изчислете по формулата: $\Omega = 2\pi[1 - \cos(\theta_{1/2})]$, където $\theta_{1/2}$ – ъгъл на разходимост на излъчване на светодиода на ниво $\frac{1}{2}$ от максимума, отчетена от табл. 2-2. Резултатите от изчисленията нанесете в табл. 2-3.

Табл. 2-3 Изчислени оптични параметри на измерваните светодиоди.

	Зелен – LED	Жълт – LED	Суперчервен – LED	Инфрарчервен – LED
$I_{les}, \frac{mW}{sr}$				
$\Phi_{led} mW$				
Ωsr				
$\theta_{1/2} grd$				

2.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- Какви конструкции на светодиоди съществуват?
- Какви фактори влияят върху вида на диаграмата на насоченост?
- Как се променят оптичните параметри на светодиодите с промяна на температурата на излъчващия кристал?

Протокол № 3

Изследване на електрически схеми на захранване на светодиоди посред- ством компютърна симулация

Студент:	Ф. №..... Група...	
.....	Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:
За корегирание:		

3.1 Задачи за предварителна работа

1 – Оразмерете електрическа схема на захранване на инфрачервен светодиод с допълнително съпротивление при следните параметри: $V_{CC} = 12\text{ V}$; $I_{led} = 10\text{ mA}$.

2 – Изчислете каква ще бъде консумираната електрическа мощност на схемата P_{el-sum} и как ще бъде разпределена между мощността, разсейваща се от допълнителния резистор, P_{el-R} и тази от светодиода P_{el-led} .

3 – Светодиод захранен по схемата от задача 1 (с параметри оразмерени по предходните две точки), работи при температура $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. След време температурата се повишава вследствие на външни фактори на $42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какво се променя от температурата в елементите от схемата и с колко се променя излъчвания от светодиода лъчист поток?

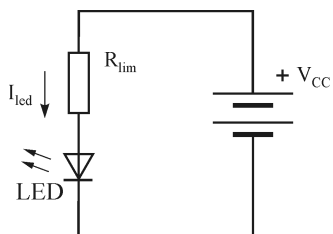
4 – От схемата на импулсно захранване на светодиод изчислете времеконстантите за електрическите вериги на заряд и разряд на кондензаторите C_1 и C_2 . Отбележете ги на схемата.

5 – За схемата на импулсно захранване на инфрачервен светодиод изведете зависимостите на максималната електрическа мощност $P_{el-led-max}$ разсейваща се от светодиода, средната мощност за един период $P_{el-led-avr}$ и консумираната от захранващия източник мощност $P_{el-sorce}$.

3.2 Решения на задачите

3.3 Задачи за изпълнение и указания за работа

1 – Да се изследва схемата на включване на инфрачервен светодиод фиг. 3 – 1 при постояннотоково захранване в диапазона (6 ÷ 18) V.



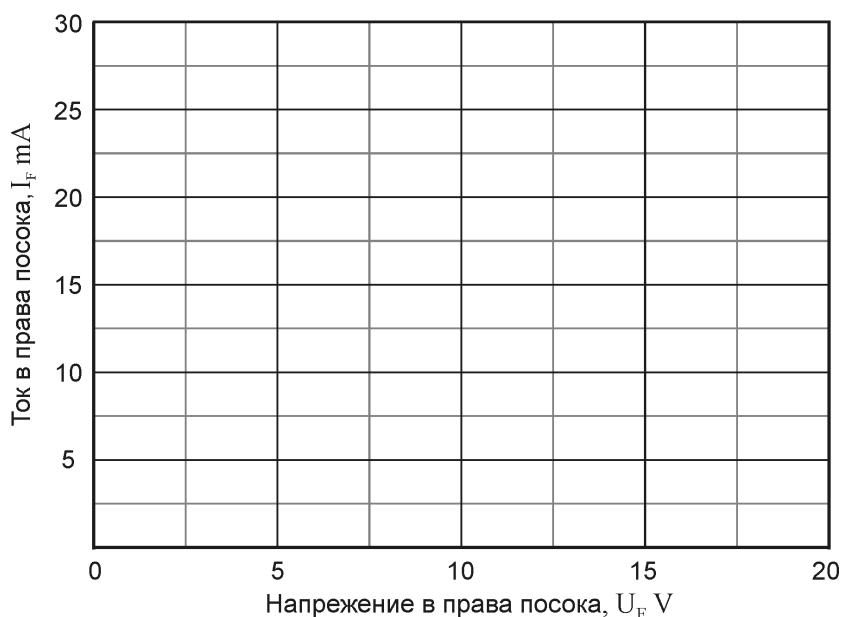
Фиг. 3-1 Електрическа схема на захранване на светодиод.

Заредете за симулация файла с име *LED-R_driver*. Стартирайте компютърната симулация. Отчетете стойността на съпротивлението на резистора R_{lim} . Резултата от симулацията запишете в табл. 3-1.

Табл. 3-1 Ток през светодиода в зависимост от захранващото напрежение.

V_{cc} V	6	8	10	12	14	16	18
I_{led} mA							

1а – В единна координатна система фиг. 3-2 постройте волт–амперната характеристика на светодиода, използван в схема фиг. 3-1 и работните прави за минималното V_{CC-min} и максимално V_{CC-max} захранващи напрежения.



Фиг. 3-2 Волт–амперна характеристика и товарна права на режима на захранване на инфрачервен светодиод.

1б – Изчислете минималната и максимална електрически мощности, разсейващи се от светодиода.

$$P_{el-min} = I_{led-min} \cdot U_{led-min} =$$

$$P_{el-max} = I_{led-max} \cdot U_{led-max} =$$

1в – Изчислете коефициента на изменение на тока през светодиода при промяна на захранващото напрежение:

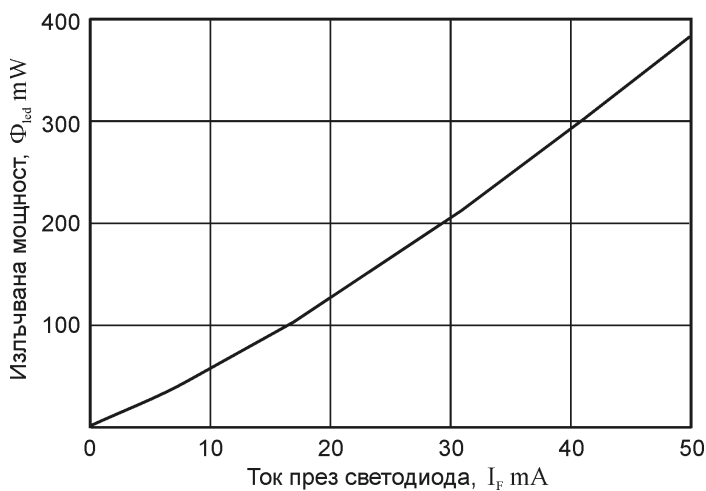
$$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_{\text{led}} \cdot 100\%}{I_{\text{led}} \cdot \Delta V_{\text{CC}}} = \frac{(I_{\text{led-max}} - I_{\text{led-min}}) \cdot 100\%}{I_{\text{led-max}} \cdot (V_{\text{CC-mdx}} - V_{\text{CC-min}})} \left[\frac{\%}{\text{V}} \right] \quad (3-1)$$

$$K_{\Delta I} = \text{—————} =$$

1г – Определете минималния и максимален електромагнитни потоци излъчвани от светодиода при минимална и максимална стойности на тока през него. Използвайте мощностната характеристика на симулирания светодиод, фиг. 3-3.

$$\Phi_{\text{led-max}} =$$

$$\Phi_{\text{led-min}} =$$



Фиг. 3-3 Мощностна характеристика на изследвания инфрачервен светодиод.

Изчислете коефициента на изменение на излъчвания от инфрачервения светодиод електромагнитен поток при промяна на захранващото напрежение.

$$K_{\Delta \Phi} = \frac{\Delta \Phi_{\text{led}} \cdot 100\%}{\Phi_{\text{led}} \cdot \Delta V_{\text{CC}}} = \frac{(\Phi_{\text{led-max}} - \Phi_{\text{led-min}}) \cdot 100\%}{\Phi_{\text{led-max}} \cdot (V_{\text{CC-mdx}} - V_{\text{CC-min}})} \left[\frac{\%}{\text{V}} \right] \quad (3-2)$$

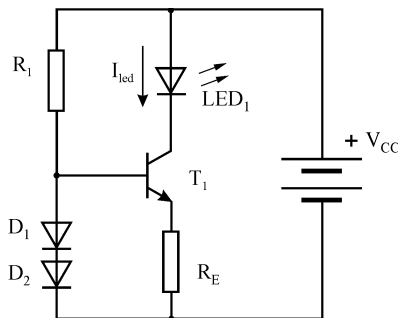
$$K_{\Delta \Phi} = \text{—————} =$$

2 – Да се изследват електрическите схеми на захранване на светодиод с генератор на ток реализиран с NPN и полеви транзистор от фиг. 3-4 при захранване на схемите в диапазона: $V_{\text{CC}} = (6 \div 18) \text{ V}$.

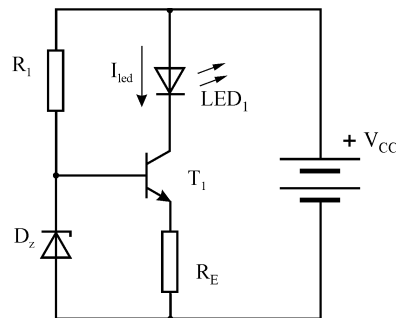
Заредете за симулация файла със съответното име на схемата. Стартирайте компютърната симулация. Резултатите от работата на програмата запишете в Табл. 3-2.

2а – Запишете стойностите на тока през светодиода $I_{\text{led-min}}$ и $I_{\text{led-max}}$ при минимално и максимално захранващи напрежения.

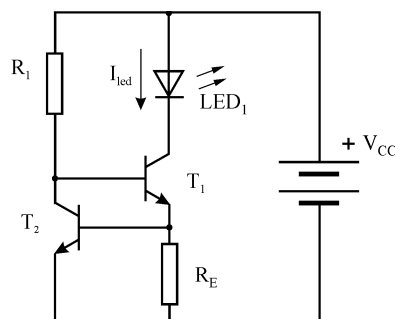
2б – За всяка от изследваните схеми изчислете минималната и максимална електрически мощности, разсейващи се от светодиода по формулата: $P_{el} = I_{led} \cdot U_{led}$. Резултата нанесете в Табл. 3–2.



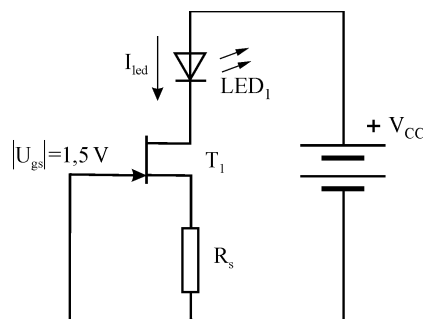
а – Схема със задаване на опорното напрежение чрез два изправителни диода – файл *LED-current_driver1*



б – Схема със задаване на опорното напрежение чрез ценеров диод – файл *LED-current_driver2*



в – Схема на генератор на ток с отрицателна обратна връзка, реализиран с втори транзистор – файл *LED-current_driver3*



г – Схема на генератор на ток с полеви транзистор – файл *LED-current_driver4*

Фиг. 3-4 Електрически схеми на захранване на светодиод с генератор на ток, реализиран с транзистор

2в – Изчислете коефициента на изменение на тока през светодиода (3–1) за всяка от изследваните схеми при промяна на захранващото напрежение в интервала $V_{CC-min} - V_{CC-max}$. Резултата запишете в табл. 3-2.

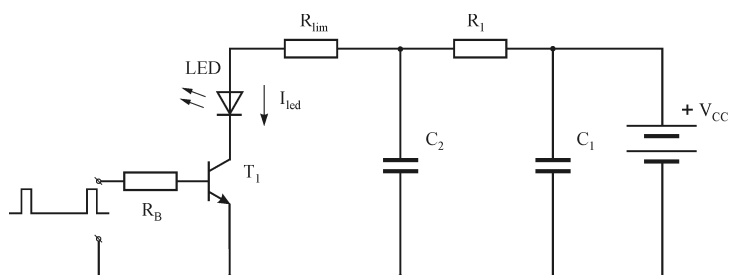
Табл. 3-2, а Резултати от симулацията на схеми фиг. 3-4, а - фиг. 3-4, б.

	Схема фиг.3-4, а (<i>LED-current_driver1</i>)			Схема фиг.3-4, б (<i>LED-current_driver2</i>)		
	$V_{CC-min} \cdot V$	$\frac{V_{CC-max} + V_{CC-min}}{2} \cdot V$	$V_{CC-max} \cdot V$	$V_{CC-min} \cdot V$	$\frac{V_{CC-max} + V_{CC-min}}{2} \cdot V$	$V_{CC-max} \cdot V$
$I_{led} \text{ mA}$						
$K_{\Delta I} \frac{\%}{V}$						
$\Phi_{led}, \text{ mW}$						
$K_{\Delta \Phi} \frac{\%}{V}$						
$P_{el} \text{ mW}$						

Табл. 3-2, б Резултати от симулацията на схеми фиг. 3-4 в , фиг. 3-4 г

	Схема фиг.3-4, в (<i>LED-current_driver3</i>)			Схема фиг.3-4, г (<i>LED-current_driver4</i>)		
	$V_{CC-min} \cdot V$	$\frac{V_{CC-max} + V_{CC-min}}{2} \cdot V$	$V_{CC-max} \cdot V$	$V_{CC-min} \cdot V$	$\frac{V_{CC-max} + V_{CC-min}}{2} \cdot V$	$V_{CC-max} \cdot V$
$I_{led} \text{ mA}$						
$K_{\Delta I} \text{ \%}/V$						
$\Phi_{led} \text{ mW}$						
$K_{\Delta \Phi} \text{ \%}/V$						
$P_{el} \text{ mW}$						

3 – Да се изследва електрическа схема на импулсно захранване на инфрачервен светодиод с пиков ток 150 mA, фиг. 3-5.



Фиг. 3-5 Електрическа схема на захранване на светодиода с импулсен ток.

Заредете за симулация файла с име *LED-impulse*. Стартирайте компютърната симулация. Резултатите от работата на програмата, като числови стойности, нанесете в табл. 3-2. Времедиаграмите нанесете на фиг. 3-6.

3а – Изчислете моментната (максимална) и средна електрически мощности, разсейващи се от светодиода. Резултата нанесете в Табл. 3-2.

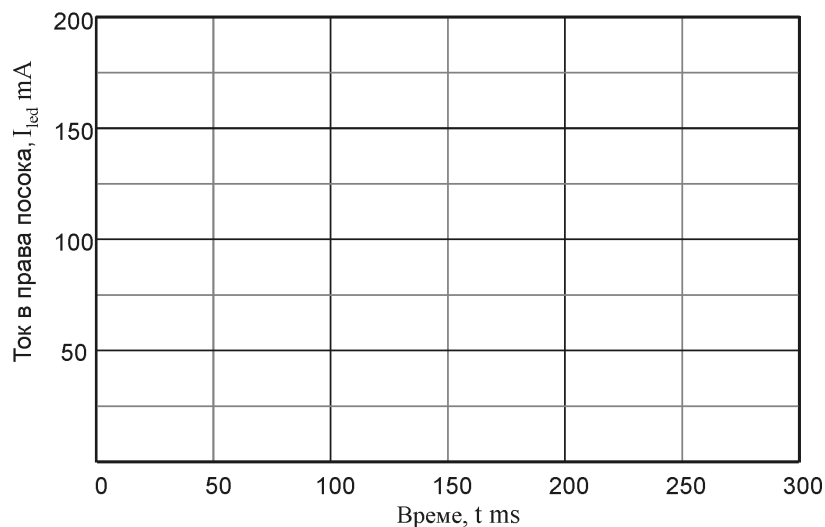
Табл. 3-2 Резултати от симулацията на схема *LED-impulse*.

Импулсно захранване на светодиода (файл <i>LED-impulse</i>)			
$R_{lim} =$	$R_{lim} =$	$C_1 =$	$C_2 =$
$V_{CC} =$ V	$T =$ ms	$t_{imp} =$ ms	
$I_{led-min} \text{ mA}$	$U_{led-min} \text{ V}$	$I_{led-max} \text{ mA}$	$U_{led-max} \text{ V}$
$\Phi_{led-min} =$ mW		$\Phi_{led-max} =$ mW	
$P_{el-min} =$ mW		$P_{el-max} =$ mW	
$P_{el-avr} =$ mW		$\xi =$	

Изчислете средната електрическа мощност за един период и отношението $\xi = \frac{P_{el-max}}{P_{el-avr}}$. Стойностите нанесете в Табл. 3-2.

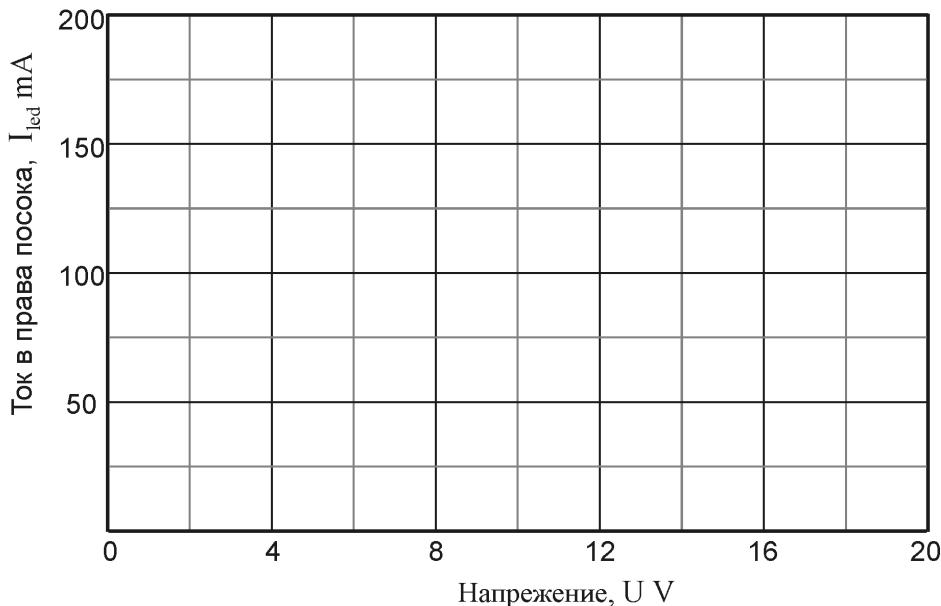
$$P_{el-t} = I_{led} \cdot U_{led} =$$

$$P_{el-avr} = \frac{(I_{led} \cdot U_{led}) t_{imp}}{T} = \underline{\hspace{2cm}} =$$



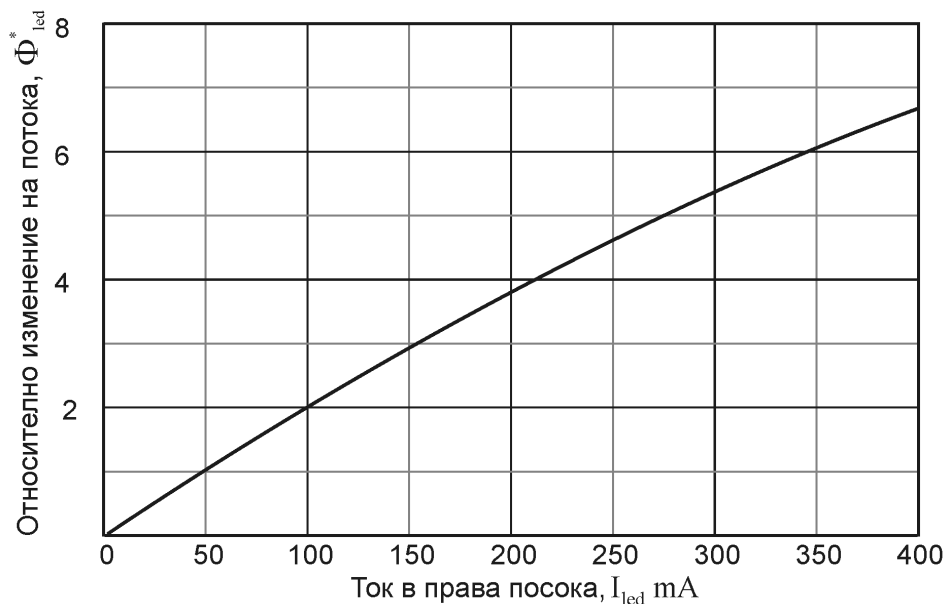
Фиг. 3-6 Времедиаграми на напреженията и тока на захранване на инфрачервен светодиод при импулсно захранване по схема фиг.3-5.

3б – В единна координатна система фиг. 3-7 постройте волт–амперната характеристика на светодиода, използван в схема фиг. 3-5 и работната права за импулсния режим на работа.



Фиг. 3-7 Волт–амперна характеристика и товарна права на режима на захранване на инфрачервен светодиод.

3в – Изчислете колко пъти се е увеличил интензитетът на излъчване на светодиода спрямо номиналния при постояннотоково захранване $I_{led} = 50 \text{ mA}$ и при импулсен ток $I_{led} = 150 \text{ mA}$. Използвайте характеристиката на изменение на интензитета на излъчване на светодиода фиг. 3-8 от протичащия ток.



Фиг. 3-8 Относителна характеристика на изменението на интензитета на излъчване на инфрачервен светодиод от тока в права посока.

3.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- При каква схема на захранване на светодиода излъчвания поток е константен при промяна на напрежението?
- Класирайте изследваните схемни решения по най добър коефициент на изменение на излъчвания поток?
- От какви фактори зависи отношението между излъчения електромагнитен поток и консумираната електрическа мощност?
- Класирайте изследваните схемни решения по най добър коефициент на полезно действие (ефективност), отношение излъчван електромагнитен поток–консумирана електрическа мощност.

Протокол № 4

Изследване на фоторезистор

Студент:	Ф. №.....	Група...
.....	Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:
За корегирание:		

4.1 Задачи за предварителна подготовка

1 – Какво представлява технологично полупроводниковия фоторезистор? От какво се определя спектралната му чувствителност? Какво представлява полупроводниковия болометър?

2 – Какъв е динамичния диапазон на регистрирания лъчист поток от фоторезисторите. От какво зависи?

3 – Защо фоторезисторите се изработват по технологията “зиг–заг”? Каква част от размера на фоторезистора е чувствителна към електромагнитния поток?

4 – Какви процеси ще протекат във фоторезистора при захранване с високо напрежение и облъчване с максимално възможна осветеност?

5 – Кои са основните видови източници на шум, ограничаващи сигнала от фоторезистора? От какво зависи генерирания изходен сигнал от фоторезистора.

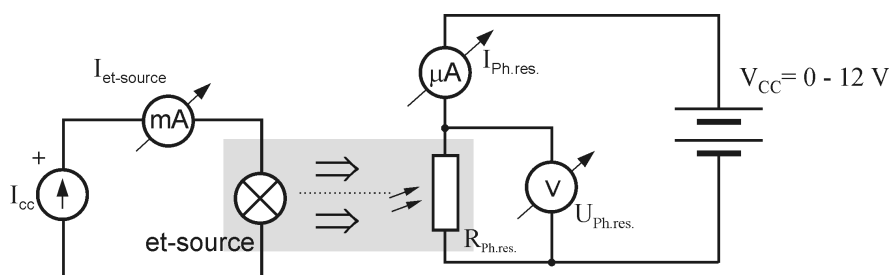
4.2 Решения на задачите

4.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Запознаване с електричните и оптичните параметри и характеристики на фоторезисторите от каталожните данни. Запознаване със схемата на опитната постановка.

2 – Да се снемат семейството волт–амперни характеристики на фоторезистор $I_{Ph.res.} = f(U_{Ph.res.})$ за режима на включване. Направете измерванията за неосветен фоторезистор ($E_{Ph} = 0 \text{ lx}$) и още три стойности на осветеността ($E_{Ph} = \text{const}$).

2а – За измерване на точки от волт–амперната характеристика на фоторезистора, да се реализира електрическата схема на включване и механичното разположение на елементите от фиг. 4-1.



Фиг. 4-1 Електрическа схема и механично оформление за измерване на волт–амперната характеристика $I_{Ph.res.} = f(U_{Ph.res.})$ за $E_{Ph.res.} = \text{const}$.

2б – Установете константната стойност на светлинната осветеност, $E_{Ph.res.} = \text{const}$, чрез задаване на захранващия ток $I_{et-source}$ през еталонния излъчвател. Ток през светлинния източник $I_{et-source} = 0 \text{ mA}$ съответства на осветеност върху фоторезистора $E_{Ph.res.} = 0 \text{ lx}$.

Измерете протичащия през фоторезистора ток при различни стойности на напрежението върху него. Резултатите нанесете в табл. 4-1. По време на провеждане на измерването да се отстрани възможността, върху фоторезистора да попада лъчение от други източници.

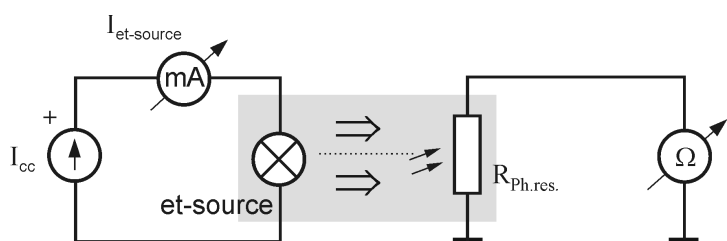
2в – След провеждане на измерванията за първото значение от зададените стойности на осветеността, променете захранващия ток на еталонния източник $I_{et-source}$, като по този начин установите нова стойност $E_{Ph.res.} = \text{const}$. Повторете измервателната процедура за тока и напрежението. Резултатите нанесете в таблицата.

2г – Направете измерванията по точки 2а, 2б и 2в, за втория фоторезистор от комплекта на лабораторния макет. По време на провеждане на измерването за втория фоторезистор да не се допуска попадане на оптично лъчение от други източници върху него. Резултатите нанесете в табл. 4-1.

Табл. 4-1 Семейство волт–амперни характеристики на фоторезистор.

V $U_{Ph.res}$	Ток през фоторезистора I_{Ph} μA							
	Фоторезистор № 1				Фоторезистор № 2			
	$E_{Ph.res} = 0$ lx $I_{et-source} = 0$ mA	$E_{Ph.res} = E1$ lx $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E2$ lx $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E3$ lx $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = 0$ lx $I_{et-source} = 0$ mA	$E_{Ph.res} = E1$ lx $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E2$ lx $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E3$ lx $I_{et-source} =$
0								
0,5								
1								
2								
5								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								

3 – Измерете лукс–омическата (светлинната) характеристика на фоторезистора $R_{Ph.res.} = f(E_{Ph.res.})$. За измерването и реализирайте механичното разположение на елементите и включете електрическата схема показани на фиг. 4-2.

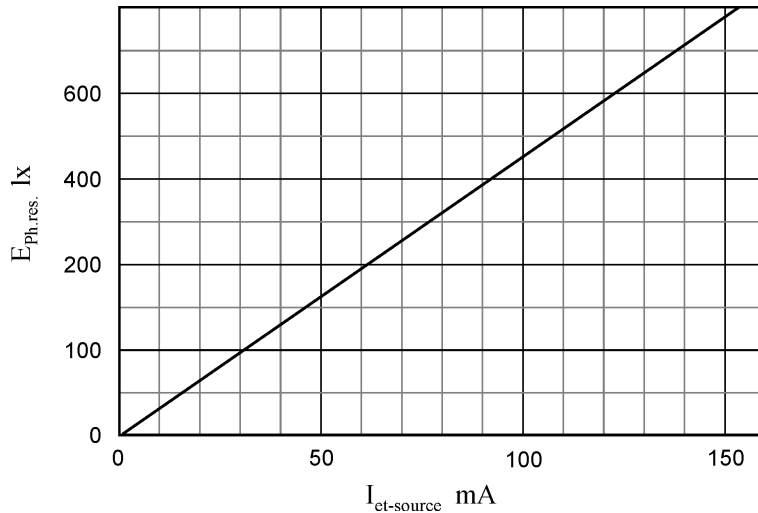


Фиг. 4-2 Електрическа схема и механично разположение за измерване на лукс–омическата характеристика $R_{Ph.res.} = f(E_{Ph.res.})$ на фоторезистор.

Последователно задавайте различни стойности на осветеност $E_{Ph.res.}$ чрез промяна на захранващия ток на еталонния източник с равномерна стъпка. Стойностите на осветеността върху фоторезистора при определен захранващ ток $I_{et-source}$, отчетете по графиката на еталонния източник $E_{Ph.res.} = f(I_{et-source})$, фиг. 4-3.

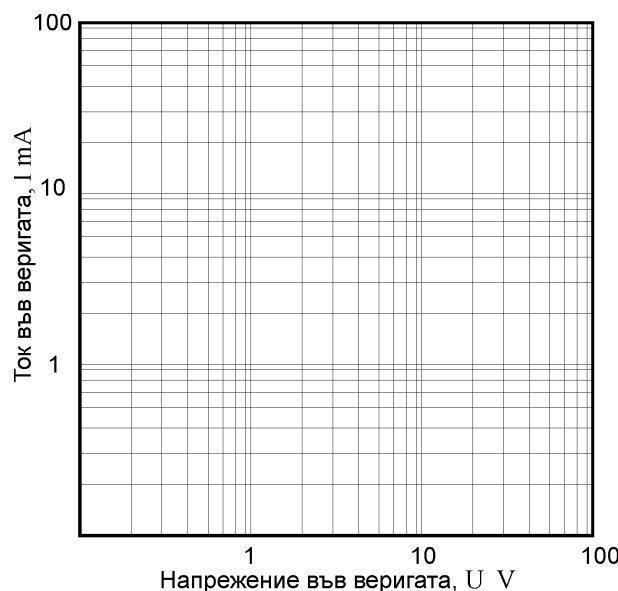
За всяка стойност на осветеността измервайте съпротивлението на фоторезистора. Резултатите нанесете в Табл. 4-2.

4 – Постройте графиката на семейството волт–амперни характеристики на фоторезистора. Нанесете получените данни върху координатна система с десетично–логаритмичен мащаб по абсцисата $\lg(U_{\text{Ph.res.}})$ и ординатата $\lg(I_{\text{Ph.res.}})$. Същите данни нанесете върху координатна система с линеен мащаб на напрежението $U_{\text{Ph.res.}}$ V и тока $I_{\text{Ph.res.}}$ mA. Използвайте координатните системи на фиг. 4–4, а и фиг. 4–4, б.

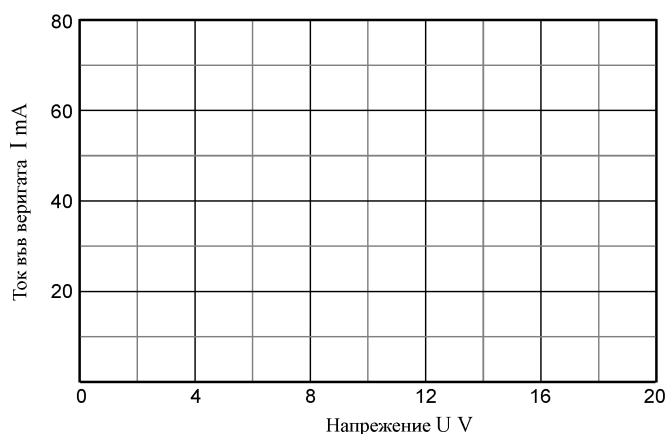


Фиг. 4–3 Педавателната функция $E_{\text{Ph.res.}} = f(I_{\text{et-source}})$, на еталонния източник.

5 – Постройте на фиг. 4–5, графиката на лукс–омическата характеристика на фоторезистора по получените данни. По абсцисата отложете $E_{\text{Ph.res.}}$ по ординатата $R_{\text{Ph.res.}}$.



а – Семейство волт–амперни характеристики в логаритмичен мащаб.



б – Семейство волт–амперни характеристики в линеен мащаб

Фиг. 4–4 Семейство волт–амперни характеристики на изследваните фоторезистори в различен мащаб.

б – По получените експериментални данни определете съпротивлението на тъмно на фоторезистора $R_{Ph.res.-dark}$, минималното съпротивление $R_{Ph.res.-min}$, максималното съпротивление $R_{Ph.res.-max}$ и динамичния им диапазон на изменение.

$$R_{Ph.res.-dark} =$$

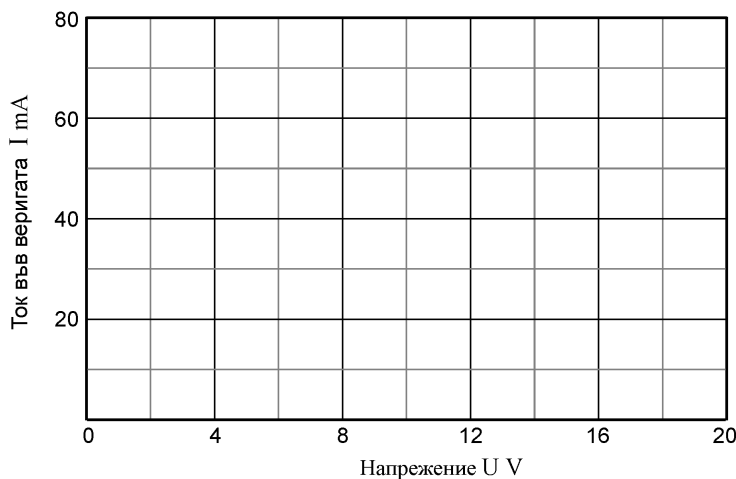
$$R_{Ph.res.-min} =$$

$$R_{Ph.res.-max} =$$

$$\text{Динамичен диапазон} \frac{R_{Ph.res.-max}}{R_{Ph.res.-min}} = \frac{\quad}{\quad} =$$

Табл. 4-2 Лукс-омическа характеристика на изследваните фоторезистори.

$I_{et-source}$ mA	$E_{Ph.res}$ lx	$R_{Ph.res}$ k Ω	
		Фоторезистор № 1	Фоторезистор № 2
0			
20			
40			
60			
80			
100			
120			
140			
160			



Фиг. 4–5 Лукс–омическа характеристика $R_{Ph.res} = f(E_{Ph.res.})$ на изследваните фоторезистори.

7 – Изчислете средноквадратичната стойност на шумовия ток на фоторезистора за съпротивлението на тъмно в честотен диапазон 10 kHz. Използвайте формулата:

$$i_n = \frac{4 \cdot \sqrt{B[\text{Hz}]}}{\sqrt{R[\text{k}\Omega]}} [\text{pA}]$$

Където: i_n – средноквадратична стойност на топлинния шумов ток на фоторезистора, B – ширина на честотната лента в Hz, за която се оценява шумовия ток, R – съпротивление на фоторезистора в $\text{k}\Omega$.

4.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- Принцип на работа и устройство на фоторезистора.
- Основни параметри на фоторезисторите.
- Зависи ли динамичния диапазон на снемания от фоторезистора сигнал от параметрите на схемата на включване?
- Принцип на действие и конструкция на еталонния източник на лъчение.

Протокол № 5

Изследване на фотодиод

Студент:	Ф. №.....	Група...
.....	Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:
За корегирание:		

5.1 Задачи за предварителна подготовка

1 – Какво представлява полупроводниковия фотодиод? От какво се определя спектралната чувствителност? Има ли технологична разлика между P-N дифузен, PIN и лавинен фотодиоди?

2 – Какъв е динамичния диапазон на регистрирания лъчист поток от фотодиодите. От какво зависи? Ако фотодиода има по-голяма фоточувствителна повърхност какъв ще бъде динамичния диапазон?

3 – Какъв е физичния смисъл на термина шунтово съпротивление на фотодиода? Ако два фотодиода имат различно шунтово съпротивление, кой е за предпочитане?

4 – В какви режими на работа като приемник на лъчист поток може да се включва фотодиода? Отбележете особеностите им.

5 – Какво е работна права на режима на работа на фотодиода? Кои са характерните точки, които я определят?

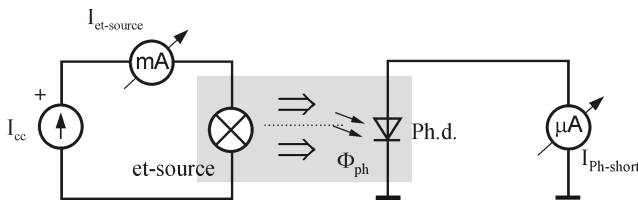
5.2 Решения на задачите

5.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Запознаване с електричните и оптични параметри и характеристики на фотодиодите от каталожните данни. Запознаване със схемата на опитната постановка.

2 – Да се снее семейството волт–амперни характеристики на фотодиод $I_{Ph} = f(U_R)$, схема фиг. 5–2 при обратно включване – фотодиоден режим на работа за три стойности на облъчващия поток $\Phi_{Ph} = const$.

2а – Да се измери фототока на късо съединение $I_{Ph-short}$ при $U_R = 0V$ за различните стойности на облъчващия поток $\Phi_{Ph} = const$. За целта да се реализира електрическата схема на включване и механично разположение на елементите от фиг. 5–1. По време на провеждане на измерването да се отстрани възможността върху фотодиода да попадне лъчение от други източници.



Фиг. 5–1 Електрическа схема и механично оформление за измерване на тока на късо съединение $I_{Ph-short}$ за $\Phi_{Ph} = const$

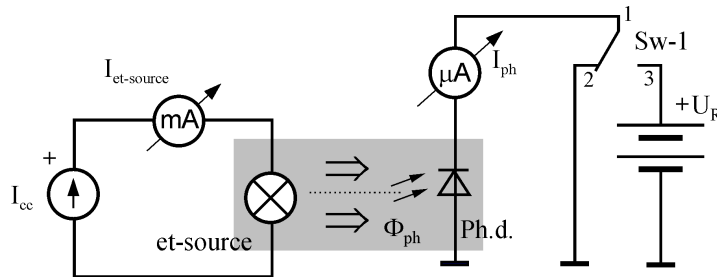
Посредством промяна на захранващия ток $I_{et-source}$, задавайте фиксирани нива на оптичния поток, излъчван от еталонния източник и облъчващ фотодиода $\Phi_{Ph} = const$. Отчетете стойностите на тока $I_{et-source}$ във веригата и ги нанесете в табл. 5–1.

Табл. 5-1 Семейство волт–амперни характеристики на фотодиод в III квадрант.

U_R V	I_{Ph} μA							
	Фотодиоди № 1				Фотодиод № 2			
	$\Phi_{Ph} = 0$ lm $I_{et-source} = 0$ mA	$\Phi_{Ph} = \Phi_1$ lm $I_{et-source} =$	$\Phi_{Ph} = \Phi_2$ lm $I_{et-source} =$	$\Phi_{Ph} = \Phi_3$ lm $I_{et-source} =$	$\Phi_{Ph} = 0$ lm $I_{et-source} = 0$ mA	$\Phi_{Ph} = \Phi_1$ lm $I_{et-source} =$	$\Phi_{Ph} = \Phi_2$ lm $I_{et-source} =$	$\Phi_{Ph} = \Phi_3$ lm $I_{et-source} =$
0								
0,01								
0,5								
1								
2								
5								
8								
12								

Генерирания от фотодиода ток отчитайте по микроамперметъра. Резултатите нанесете в табл. 5–1 в реда $U_R = 0$ V.

2б – Снемете семейството волт–амперни характеристики на фотодиода $I_{Ph} = f(U_R)$ при $\Phi_{Ph} = \text{const}$, за стойности на напрежението в обратна посока U_R в диапазона от 10 mV до 10 V. За целта, реализирайте схемата от фиг. 5-2.



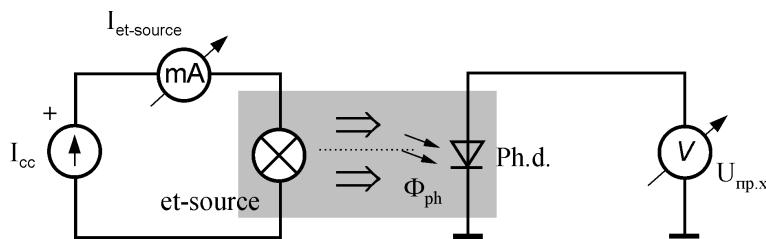
Фиг. 5-2 Електрическа схема за измерване на тока на семейство волт–амперни характеристики $I_{Ph} = f(U_R)$ за $\Phi_{Ph} = \text{const}$.

Задайте същите стойности на захранващия ток на еталонния източник на оптичен поток, както при измерванията в точка 2-А. При последователно задаване на различни стойности на напрежението в обратна посока на фотодиода при $\Phi_{Ph} = \text{const}$ отчитайте фототока. Резултатите нанесете в табл. 5-1.

2в – Направете измерванията по точки 2–А и 2-Б за различните екземпляри фотодиоди от комплекта в лабораторния макет.

3 – Да се снемат семейство волт-амперни характеристики на фотодиод $(I_{Ph}, U_{Ph}) = f(\Phi_{Ph}, R_{load})$, работещ във фотогенераторен режим.

3а – Да се измери напрежението на празен ход, генерирано от фотодиода за различни стойности на облъчващия оптичен поток $U_{np.x} = f(\Phi_{Ph})$. За целта реализирайте електрическата схема и механичното разположение на елементите показани на фиг. 5-3.



Фиг. 5-3 Електрическа схема за измерване на напрежението на празен ход $U_{np.x} = f(\Phi_{Ph})$.

Задайте стойности на захранващия ток на еталонния източник на оптичен поток, както при измерванията в точка 2–А. За всяка една стойност на оптичния поток $\Phi_{Ph} = \text{const}$ отчитайте генерираното от фотодиода напрежение $U_{np.x}$. Резултатите нанесете в табл. 5–2.

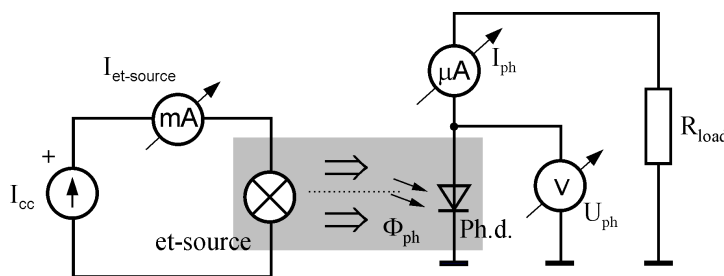
3б – Да се измерят стойностите на генерираните ток и напрежение от фотодиода $(I_{Ph}, U_{Ph}) = f(\Phi_{Ph}, R_{load})$ за различен облъчващ поток Φ_{Ph} при различни товарни съпротивления R_{load} . За целта реализирайте електрическата схема показана на фиг. 5–4.

Поставете в схемата най–малката стойност на товарния резистор R_{load} .
 Задайте същите стойности на захранващия ток на източника на оптичен

Табл. 5–2 Семейство волт–амперни характеристики на фотодиод в IV квадрант.

		Фотодиоди № 1			Фотодиод № 2		
		$\Phi_{ph} = \Phi_1 \text{ lm}$ $I_{et-source} =$	$\Phi_{ph} = \Phi_2 \text{ lm}$ $I_{et-source} =$	$\Phi_{ph} = \Phi_3 \text{ lm}$ $I_{et-source} =$	$\Phi_{ph} = \Phi_1 \text{ lm}$ $I_{et-source} =$	$\Phi_{ph} = \Phi_2 \text{ lm}$ $I_{et-source} =$	$\Phi_{ph} = \Phi_3 \text{ lm}$ $I_{et-source} =$
$U_{пр.х.}$							
$R_{load} =$ $k\Omega$	$U_{ph} \text{ mV}$						
	$I_{ph} \mu A$						
$R_{load} =$ $k\Omega$	$U_{ph} \text{ mV}$						
	$I_{ph} \mu A$						
$R_{load} =$ $k\Omega$	$U_{ph} \text{ mV}$						
	$I_{ph} \mu A$						
$R_{load} =$ $k\Omega$	$U_{ph} \text{ mV}$						
	$I_{ph} \mu A$						

поток, както при измерванията в точка 2–А. За всяка една стойност на оптичния поток $\Phi_{ph} = const$ отчитайте генериранните от фотодиода ток и напрежение I_{ph} , U_{ph} . Резултатите нанесете в табл. 5-2.



Фиг. 5–4 Електрическа схема и механично разположение на елементите за измерване на $(I_{ph}, U_{ph}) = f(\Phi_{ph}, R_{load})$.

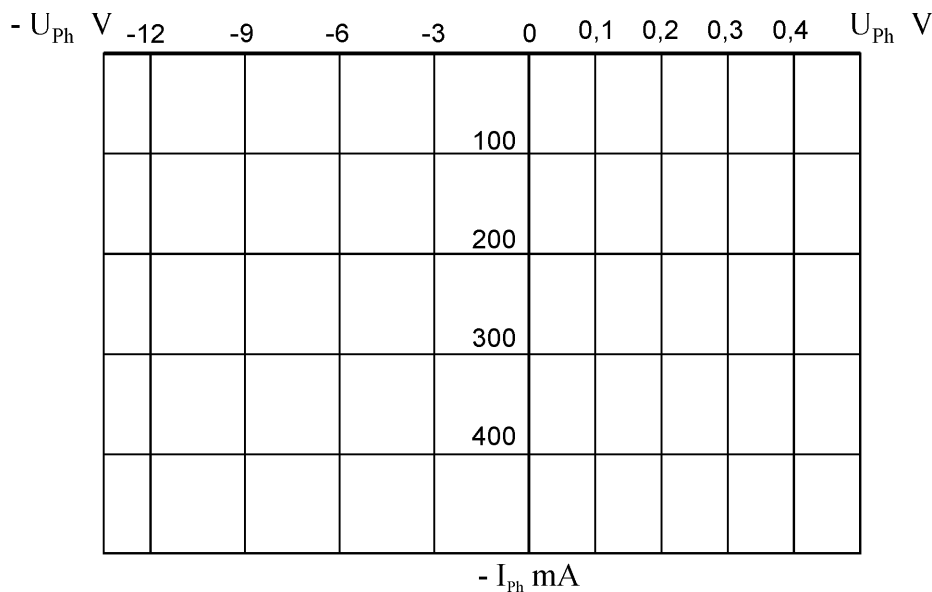
Заменете резистора R_{load} като поставите нов с по-голяма стойност на съпротивлението. Направете нов цикъл измервания на фототока I_{ph} , U_{ph} и напрежението за различните стойности на оптичен поток $\Phi_{ph} = const$. Получените резултати нанесете в таблицата.

3в – Направете измерванията по точки 3–А и 3–Б за различните екземпляри фотодиоди от комплекта в лабораторния макет.

4 – Измерете светлинната характеристика на фотодиода $I_{ph-short} = f(\Phi_{ph})$. За измерването и реализирайте електрическата схема и механичното разположение на елементите, показани на фиг. 5–1. Последователно

задавайте различни стойности на оптичния поток Φ_{Ph} , чрез промяна на захранващия ток на еталонния източник с равномерна стъпка. Отчитайте генерирания от фотодиода ток на късо съединение $I_{Ph-short}$. Резултатите нанесете в табл. 5–3.

5 – Постройте графиката на семейството волт-амперни характеристики на измерените фотодиоди. Нанесете получените данни върху една координатна система за III и IV квадранти от волт-амперната характеристика на фотодиода фиг. 5-5. Линията на характеристиката при $\Phi_{Ph} = const$ на границата между III и IV квадранти трябва да не се пречупва.



Фиг. 5–5 Волт–амперна характеристика на изследваните фотодиоди $I_{Ph} = f(U)$ при $\Phi_{Ph} = const$.

6 – Върху волт-амперните характеристики фиг. 5–5 начертайте товарните прави на фотогенераторния режим на работа на фотодиода за използваните при измерванията стойности на товарния резистор R_{load} .

7 – Изчислете шунтовото съпротивление R_{Sh} на измерваните фотодиоди като наклон на допирателната към волт-амперната характеристика на фотодиода в точката $I_{Ph_s} = 0, U_{Ph} = 0$. Използвайте формулата:

$$R_{Sh} = \frac{10mV}{I_{Ph} | U_{Ph}=10mV} , R_{Sh} = \text{—————} =$$

Където: $I_{Ph} | U_{Ph}=10mV$, стойност на фототока при обратно напрежение 10 mV.

8 – Изчислете коефициента на полезно действие γ_{Ph} на фотодиодите във фотогенераторен режим. Използвайте формулата:

$$\gamma_{Ph} = \frac{I_{Pk} \cdot U_{Ph}}{\Phi_{Ph}} = \frac{I_{Ph} \cdot U_{Ph}}{I_{Ph-short} \cdot R_{Ph} | \Phi_{Ph} = const.}$$

Където: Φ_{Ph} – оптичният поток върху фотодиода предизвикал протичането на ток I_{Ph} , при генерирано напрежение U_{Ph} върху товарен резистор R_{load} ; $R_{Ph} \frac{A}{W}$ – интегрална чувствителност на фотодиода спрямо спектралното разпределение на потока на еталонния източник. За използваните в макета фотодиоди и еталонен източник $R_{Ph} = 0,25 \frac{A}{W}$.

9 – Изчислете вътрешното съпротивление на фотодиода R_{Ph-inp} като генератор за различните товарни съпротивления. Използвайте формулата:

$$U_{R.load} = \frac{U_{Пр.ход} \cdot R_{load}}{R_{Ph-inp} + R_{load}}$$

Където: $U_{Пр.ход}$ – напрежение на празен ход, генерирано от фотодиода, $U_{R.load}$ – напрежението генерирано от фотодиода при товарно съпротивление R_{load} .

5.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- Каква е зависимостта между ширината на забранената зона и спектралната чувствителност на фотодиода?
- Какъв е диапазона на стойности на шунтовото съпротивление на фотодиодите? Как зависи шунтовото съпротивление от размера на чувствителната площ на фотодиода?
- Може ли да се разпознаят изводите и да се провери работоспособността на фотодиод с помощта на мултицет?
- Връзка между генерирания електрически сигнал във фотодиоден режим и площта на фотодиода. Какъв е динамичният обхват?
- В какъв режим на работа собствените шумове на фотодиода са минимални? Защо?

Протокол № 6

Изследване на фототранзистор

Студент:	Ф. №.....	Група...
	Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:
За корегирание:		

6.1 Задачи за предварителна подготовка

1 – Колко P-N прехода притежава фототранзистора? Колко извода има и как се наричат?

2 – Какъв е динамичния диапазон на регистрирания лъчист поток от фототранзистора? От какво зависи? Защо фототранзисторите се изработват с малка фоточувствителна повърхност?

3 – Какво е фототок на тъмно на фототранзистора? Сравнете фототока на тъмно на фототранзистора с този на фотодиода.

4 – Линейна или нелинейна е зависимостта на изходния сигнал на фототранзистора, породен от погълнат лъчист поток?

5 – В какви схеми на включване работи фототранзистора? Сравнете ги по температурна стабилност.

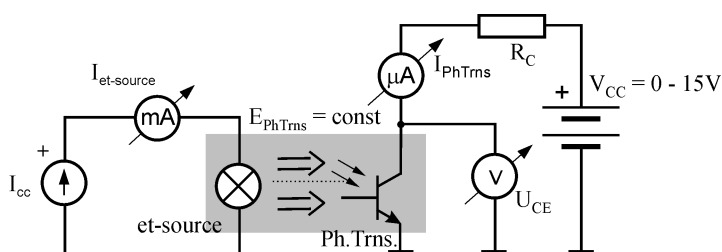
6.2 Решения на задачите

6.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Запознаване с електричните и оптични параметри и характеристики от каталожните данни на фототранзисторите. Запознаване със схемата на опитната постановка.

2 – Да се снемат семейството изходни характеристики на фототранзистор $I_{PhTrms} = f(U_{CE})$ за различни стойности на осветеността $E_{PhTrms} = const$.

За измерване на точки от изходната характеристика на фототранзистора да се реализира електрическата схема на включване и механичното разположение на еталонния източник на лъчист поток и фототранзистора показани на фиг. 6-1.



Фиг. 6-1 Електрическа схема и механично оформление за измерване на семейство изходни характеристики на фототранзистор.

Снемете волт-амперните характеристики за четири стойности на осветеността $E_{PhTrms} = const$; $E_{PhTrms} = 0 \text{ lx}$, $E_{PhTrms} = E1 \text{ lx}$, $E_{PhTrms} = E2 \text{ lx}$; $E_{PhTrms} = E3 \text{ lx}$. Осветеността променяйте, чрез тока на еталонния източник. Задавайте стойностите на напрежението U_{CE} в интервала $(0 \div 1) \text{ V}$ и отчитайте тока I_{PhTrms} във веригата. Получените резултати нанесете в табл. 6-1. По време на провеждане на измерването да се отстрани възможността да попадне върху фототранзистора лъчение от други източници.

Табл. 6-1 Семейство волт-амперни характеристики на фототранзистор.

$U_{CE}, (V)$	$I_{PhTrms} \text{ mA}$							
	Фототранзистор № 1				Фототранзистор № 2			
	$E_{Ph.res} = 0 \text{ lx}$ $I_{et-source} = 0$	$E_{Ph.res} = E1 \text{ lx}$ $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E2 \text{ lx}$ $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E3 \text{ lx}$ $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = 0 \text{ lx}$ $I_{et-source} = 0$	$E_{Ph.res} = E1 \text{ lx}$ $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E2 \text{ lx}$ $I_{et-source} =$	$E_{Ph.res} = E3 \text{ lx}$ $I_{et-source} =$
0								
1								
2								
5								
8								
10								
12								
15								

След измерване на първия фототранзистор, реализирайте схемата на измерване фиг. 6-1 с втория фототранзистор от комплекта към лабораторния макет и снемете неговата изходна характеристика.

3 – Снемете семейството предавателни характеристики на фототранзистор $I_{PhTrms} = f(E_{PhTrms})$ при $U_{CE} = \text{const}$ за стойности на напрежението $U_{CE} = 1 \text{ V}$, $U_{CE} = 3 \text{ V}$ и $U_{CE} = 5 \text{ V}$.

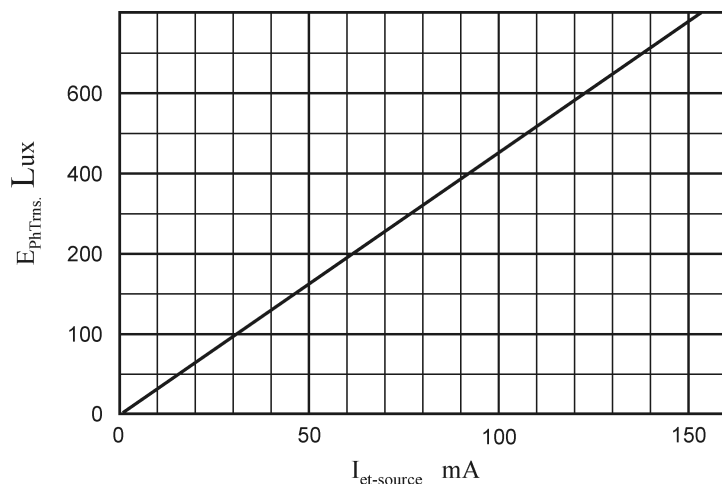
Измерването на предавателните характеристики на фототранзистор се осъществява по електрическата схема фиг. 6-1. Задайте първата стойност на колекторното напрежение посредством захранващото напрежение V_{CC} . Последователно повишавайте тока през еталонния източник с равномерна стъпка. Отчитайте тока на фототранзистора I_{PhTrms} като следите колекторното напрежение U_{CE} да не се променя от първоначално зададената стойност. Ако отчетете промяна в U_{CE} , чрез захранващото напрежение V_{CC} възстановете първоначално зададената стойност. Получените резултати нанесете в табл. 6-2.

Табл. 6-2 Семейство предавателни характеристики $I_{PhTrms} = f(E_{PhTrms})$.

$E_{Ph.res} =$	$I_{et-source} \text{ mA}$	$I_{PhTrms} \text{ mA}$					
		Фототранзистор № 1			Фототранзистор № 2		
		$U_{CE} = 1 \text{ V}$	$U_{CE} = 3 \text{ V}$	$U_{CE} = 5 \text{ V}$	$U_{CE} = 1 \text{ V}$	$U_{CE} = 3 \text{ V}$	$U_{CE} = 5 \text{ V}$
	0						
	10						
	20						
	40						
	60						
	80						
	100						
	130						
	150						
	180						

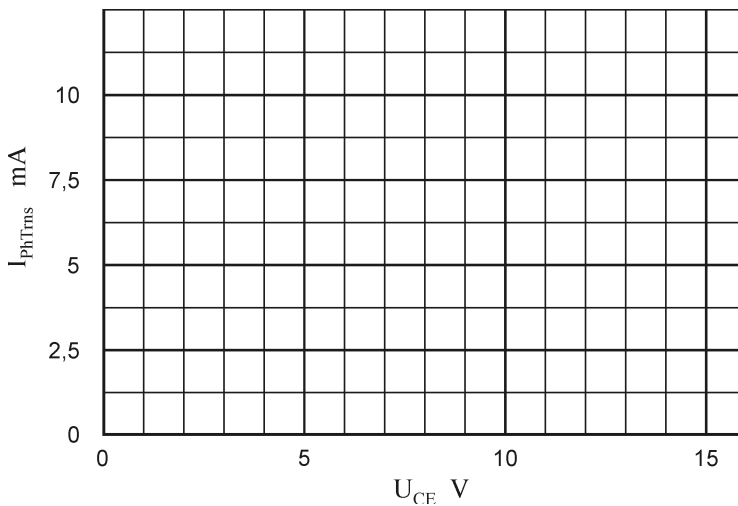
След измерване при първата константна стойност на напрежението U_{CE} установете тока през еталонния източник $I_{et-source} = 0 \text{ mA}$. Задайте следващата стойност на колекторното напрежение на U_{CE} . Направете нова серия измервания на тока I_{PhTrms} при различни стойности на осветеността E_{PhTrms} . Стойностите на осветеността E_{PhTrms} отчетете от графиката на предавателната характеристика на еталонния източник $E_{PhTrms} = f(I_{et-source})$, фиг. 6-2. Резултатите нанесете в табл. 6-2.

4 – По получените данни (табл. 6-2) постройте графиката на изходните характеристики на фототранзистора на фиг. 6-3.



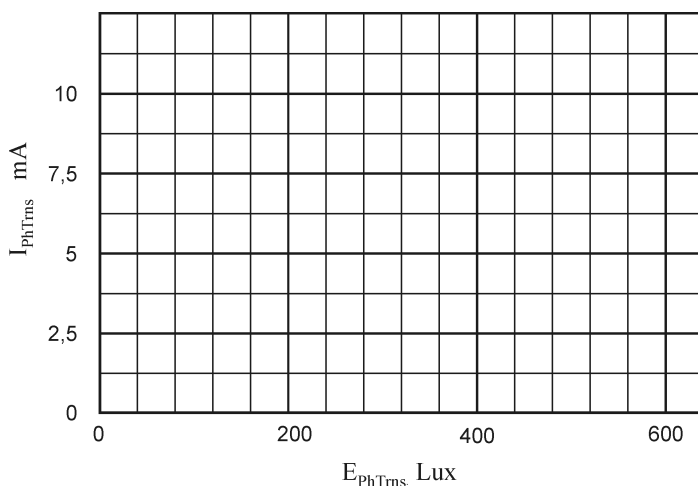
Фиг. 6-2 Предавателна характеристики на еталонния източник $E_{\text{PhTms}} = f(I_{\text{et-source}})$.

Отбележете областта, в която разсейващата електрическа мощност е по-голяма от максимално допустимата за фототранзистора.



Фиг. 6-3 Семейство изходни характеристики на фототранзистор.

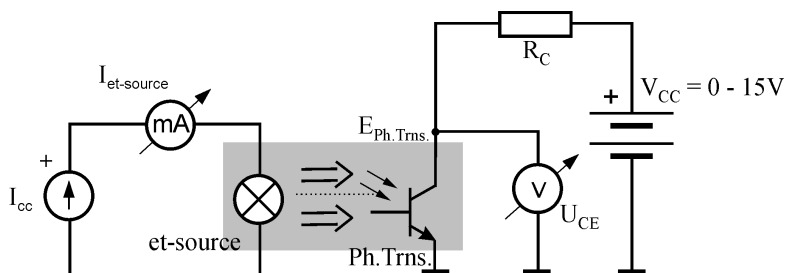
5 – По получените данни (табл. 6-2) постройте графиката на семейството предавателни характеристики на фототранзистора на фиг. 6-4. Отбележете областта в която функцията е линейна.



Фиг. 6-4 Семейство предавателни характеристики на фототранзистор.

6 – Снете зависимостта на изходното напрежение U_{OUT} на схемата на включване “общ емитер”, (фиг. 6-5) от входната осветеност на фото-

транзистора E_{PhTms} . Захранващо напрежение на схемата $U_{CC} = 9\text{ V}$. Променяйте осветеността E_{PhTms} стъпално, чрез протичащия през светлинния източник ток започвайки от $E_{PhTms} = 0\text{ lx}$. Резултата нанесете в табл. 6-3.

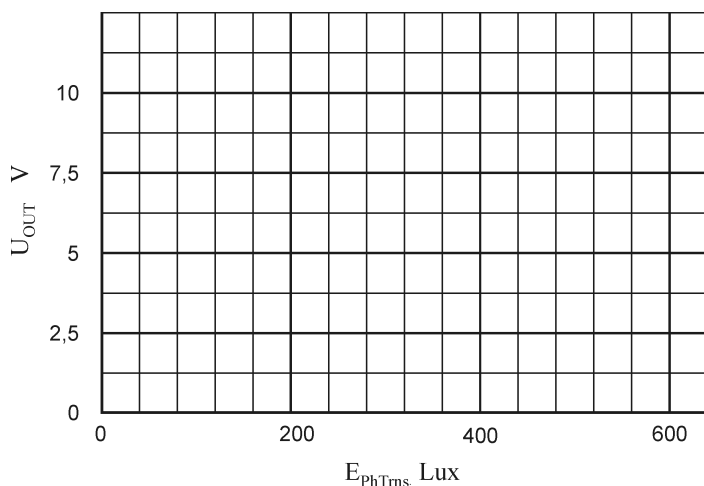


Фиг. 6-5 Електрическа схема за измерване на изходния сигнал на фототранзистор в схема “общ емитер”.

Табл. 6-3 Зависимост на изходното напрежение U_{OUT} за схема “общ емитер”.

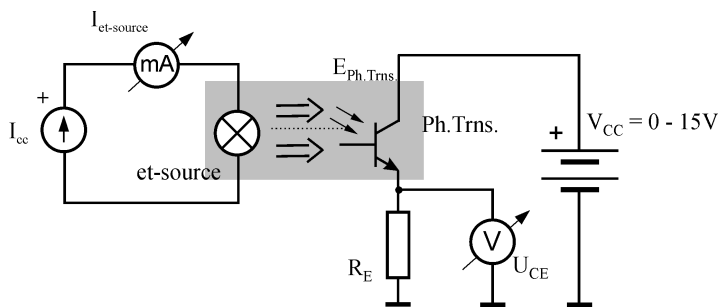
$U_{CC} = 9\text{ V}$								
$I_{et-source}\text{ mA}$	0	10	20	30	50	70	90	100
$E_{Ph.res},\text{ lx}$								
$U_{OUT}\text{ V}$								
$U_{CC} = 9\text{ V}$								
$I_{et-source}\text{ mA}$	120	140	150	160	170	180	190	200
$E_{Ph.res},\text{ lx}$								
$U_{OUT}\text{ V}$								

7 – По получените данни (табл. 6-3), постройте графиката на зависимостта $U_{OUT} = f(E_{PhTms})$ за схемата “общ емитер” фиг. 6-5. Отбележете областта, в която функцията е линейна.



Фиг. 6-6 Зависимост на изходното напрежение U_{OUT} от входната осветеност E_{PhTms} за фототранзистора включен по схема “общ емитер”.

8 – Снете зависимостта на изходното напрежение U_{OUT} на схемата на включване “общ колектор” (фиг. 6-7) от входната осветеност на фототранзистора. Захранващо напрежение на схемата $U_{CC} = 9\text{ V}$. Променяйте осветеността E_{PhTms} стъпално, чрез протичащия през светлинния източник ток започвайки от $E_{PhTms} = 0\text{ lx}$. Резултата нанесете в табл. 6-4.

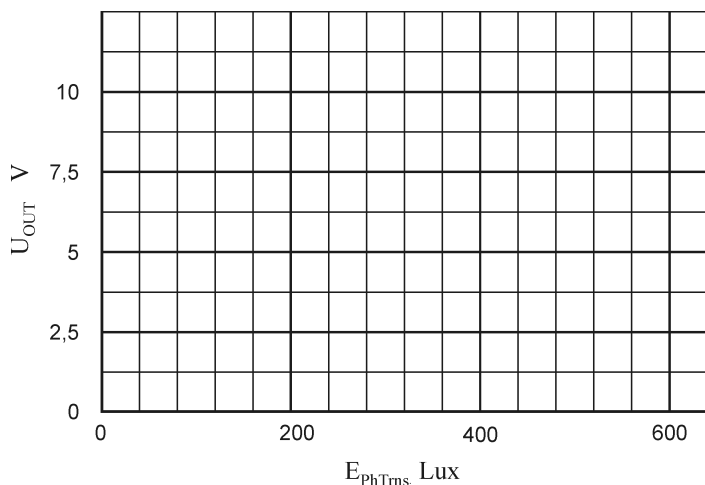


Фиг. 6-7 Електрическа схема за измерване на изходния сигнал на фототранзистор в схема “общ колектор”.

Табл. 6-4 Зависимост на изходното напрежение U_{OUT} за схема “общ колектор”.

		$U_{CC} = 9\text{ V}$							
$I_{et-source}$ mA		0	10	20	30	50	70	90	100
$E_{Ph.res}$ lx									
U_{OUT} V									
		$U_{CC} = 9\text{ V}$							
$I_{et-source}$ mA		120	140	150	160	170	180	190	200
$E_{Ph.res}$ lx									
U_{OUT} V									

9 – По получените данни табл. 6-4, постройте графиката на зависимостта $U_{OUT} = f(E_{PhTrms})$ за схемата “общ колектор” (фиг. 6-8). Отбележете областта, в която функцията е линейна.



Фиг. 6-8 Зависимост на изходното напрежение U_{OUT} от входната осветеност E_{PhTrms} за фототранзистора включен по схема “общ колектор”.

6.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- Сравнете по чувствителност и скорост на реакция фоторанзистор и фотодиод. Кой елемент е с по-голям собствен шум? Защо?
- Може ли да се провери работоспособността и да се разпознаят изводите на фототранзистор с помощта на мултицет? В какво включване?

Протокол № 7

Изследване на фототранзисторен оптрон

Студент:		Ф. №.....	Група...
.....		Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.	
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:	
За коригиране:			

7.1 Задачи за предварителна подготовка

1 – Колко P-N прехода има във фототранзисторния оптрон? Колко извода има и как се наричат?

2 – Какъв е динамичния диапазон на предаване по ток за фототранзисторния оптрон? От какво зависи?

3 – Кой елемент на оптрона ограничава най-много честотната лента на предаване на сигнали между входа и изхода?

4 – От какво зависи вида на входната характеристика на фототранзисторния оптрон? Може ли да се определи дължината на вълната на която излъчва светодиода?

5 – В какви схеми на включване може да се използва фоторанзистора на оптрона? Сравнете ги по динамичен диапазон на предаване.

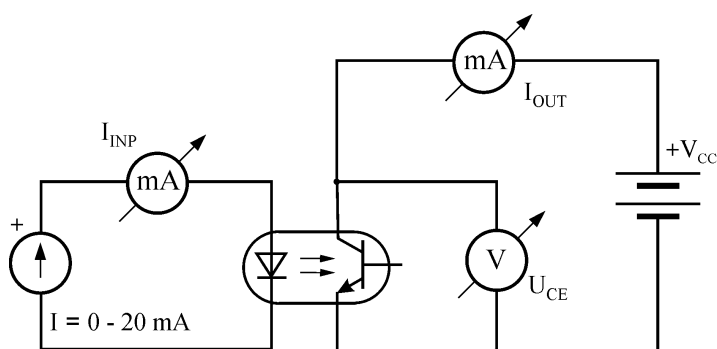
7.2 Решения на задачите

7.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Запознаване с електричните и оптични параметри и характеристики от каталожните данни на фототранзисторните оптрони. Запознаване със схемата на опитната постановка.

2 – Да се снее семейството предавателни характеристики на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(I_{INP})$ за включване с отворена база при различни стойности на напрежението върху фототранзистора $U_{CE} = const.$

А – Да се реализира електрическата схема на включване от фиг. 7 - 1. Посредством промяна на захранващото напрежение U_{CC} , задавайте фиксирани стойности на U_{CE} . Колекторния ток на фототранзистора в изходната верига при константната стойност на напрежението U_{CE} отчитайте чрез милиамперметъра.



Фиг. 7-1 Електрическа схема за измерване на предавателната характеристика на фототранзисторен оптрон с отворена база.

Променяйте тока във входната верига на оптрона чрез генератора на ток, като отчитате стойностите му чрез милиамперметъра. Резултатите от измерванията нанесете в табл. 7-1. По време на измерване следете напрежението U_{CE} да не се променя от фиксираните стойности.

Табл. 7-1 Предавателна характеристика на фототранзисторен оптрон с отворена база, $I_{OUT} = f(I_{INP})$.

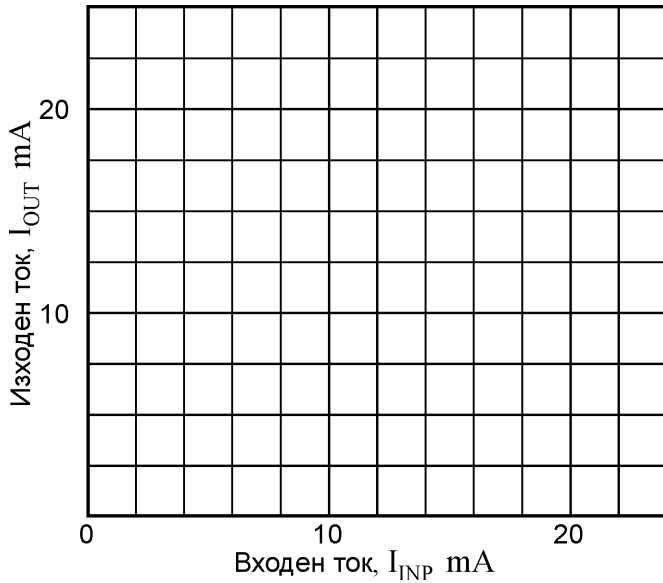
I_{INP} mA		0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
I_{OUT} mA	$U_{CE} = 8V$												
	$U_{CE} = 12V$												
	$U_{CE} = 16V$												

Б – След измерване на предавателната характеристика при първата стойност на U_{CE} , фиксирайте нова стойност на напрежението и повторете цикъла на измерване на предавателната характеристика.

3 – По измерените стойности на токовете (фиг. 7-2), да се начертае графиката на предавателната функция на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(I_{INP})$ при $U_{CE} = const$ за схемата с отворена база.

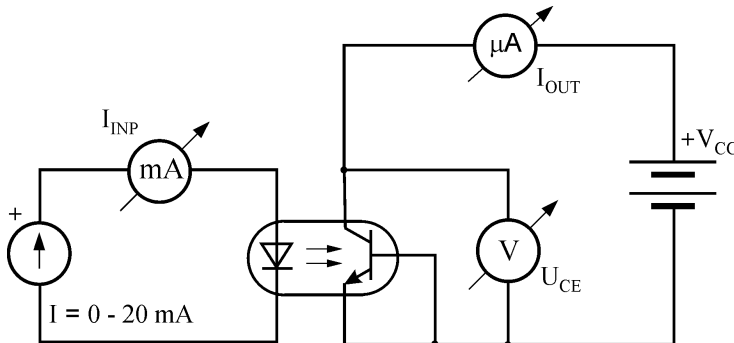
4 – Да се снемат семейството предавателни характеристики на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(I_{INP})$ за схема с включена база при различни стойности на напрежението върху фототранзистора $U_{CE} = const$.

А – Да се реализира електрическата схема на включване от фиг. 7 - 3.



Фиг. 7–2 Предавателна характеристика $I_{OUT} = f(I_{INP})$ при $U_{CE} = const$ на фототранзисторен оптрон с отворена база

Посредством промяна на захранващото напрежение U_{CC} , задавайте фиксираните стойности на U_{CE} . Колекторния ток на фототранзистора в изходната верига отчитайте по уреда на обхват 200 микроампера.



Фиг. 7–3 Електрическа схема за измерване на предавателната характеристика на фототранзисторен оптрон с включена база.

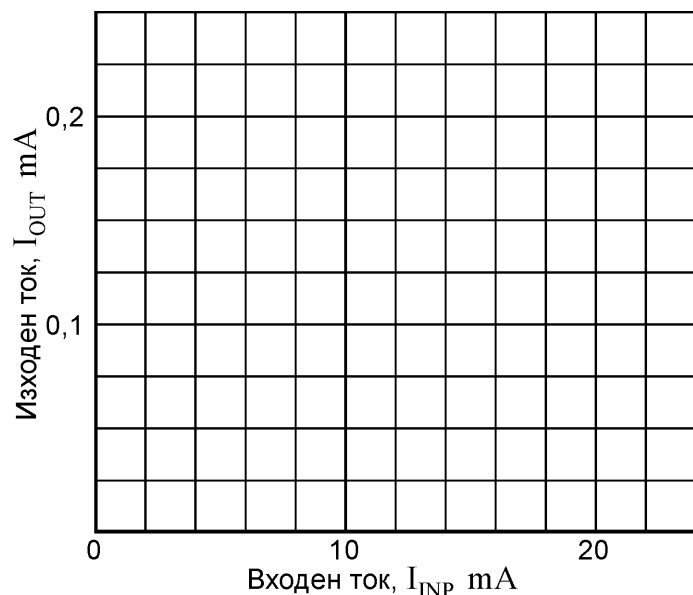
Променяйте тока във входната верига на оптрона чрез генератора на ток. Отчитайте стойностите му чрез милиамперметър. Стойностите нанесете в Табл. 7–2. Ако по време на измерване напрежението U_{CE} се промени, чрез V_{CC} фиксирайте константната стойност.

Табл. 7-2 Предавателна характеристика на фототранзисторен оптрон с включена база, $I_{OUT} = f(I_{INP})$.

I_{INP}, mA		0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
$I_{OUT} \mu A$	$U_{CE} = 8V$												
	$U_{CE} = 12V$												
	$U_{CE} = 16V$												

Б – След измерване на предавателната характеристика при първата константна стойност на U_{CE} , установете нова и повторете цикъла на измерване на предавателната характеристика. Резултатите от измерването нанесете в таблицата.

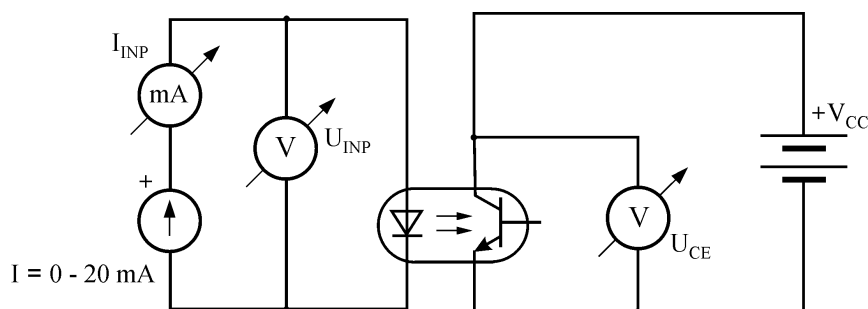
5 – Начертайте графиката, фиг. 7–4 на предавателната функция на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(I_{INP})$ при $U_{CE} = const$ за схемата с включена база по измерените значения от табл. 7–2.



Фиг. 7–4 Предавателна характеристика $I_{OUT} = f(I_{INP})$ при $U_{CE} = const$ на фототранзисторен оптрон с включена база

6 – Да се снемe семейството входни характеристики на фототранзисторен оптрон $I_{INP} = f(U_{INP})$ при различни стойности на напрежението върху фототранзистора $U_{CE} = const$ в схема с отворена база.

Да се реализира електрическата схема на включване от фиг. 7 - 5. Посредством промяна на захранващото напрежение U_{CC} , задавайте фиксираните стойности на U_{CE} .



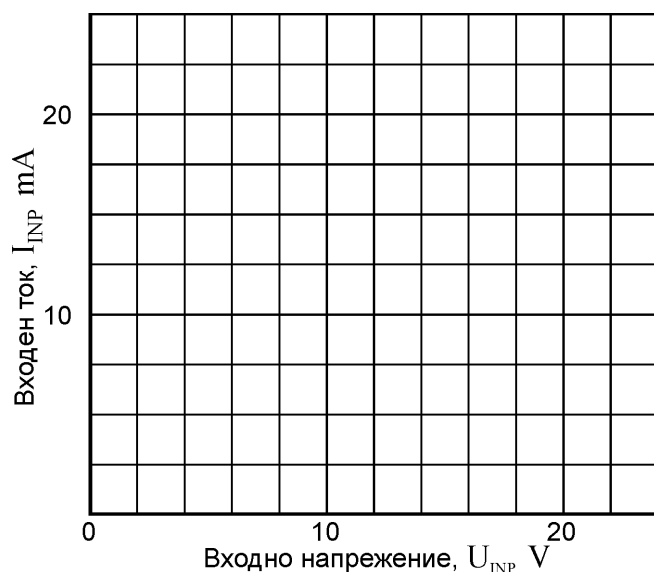
Фиг. 7–5 Електрическа схема за измерване на входната характеристика на фототранзисторен оптрон.

Променяйте тока във входната верига на оптрона чрез генератора на ток. Отчитайте стойностите му чрез милиамперметъра. Входното напрежение U_{INP} отчитайте по волтметъра във входната верига. Стойностите нанесете в табл. 7-3.

Табл. 7-3 Входни характеристики на фототранзисторен оптрон, $I_{INP} = f(U_{INP})$.

I_{INP}, mA		0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
$U_{INP} \text{ V}$	$U_{CE} = 2\text{V}$												
	$U_{CE} = 8\text{V}$												

7 – По измерените значения на тока и напрежението, табл. 7–3 да се начертае графиката на входната характеристика на фототранзисторен оптрон $I_{INP} = f(U_{INP})$, (фиг. 7–6) при различни стойности на напрежението върху фототранзистора $U_{CE} = \text{const}$.

**Фиг. 7–6** Входна характеристика $I_{INP} = f(U_{INP})$ при $U_{CE} = \text{const}$ на фототранзисторен оптрон.

8 – Да се снемат семейството изходни характеристики на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(U_{CE})$ за схема с отворена база при различни стойности на входния ток $I_{INP} = \text{const}$.

Да се реализира електрическата схема на включване от фиг. 7–1. Посредством промяна на тока във входната верига задавайте фиксираните стойности на входния ток $I_{INP} = \text{const}$.

Променяйте захранващото напрежение U_{CC} , с равномерна стъпка в диапазона $0 \div 15 \text{ V}$, като отчитате тока през фототранзистора I_{OUT} и напрежението U_{CE} . Стойностите нанесете в табл. 7–4.

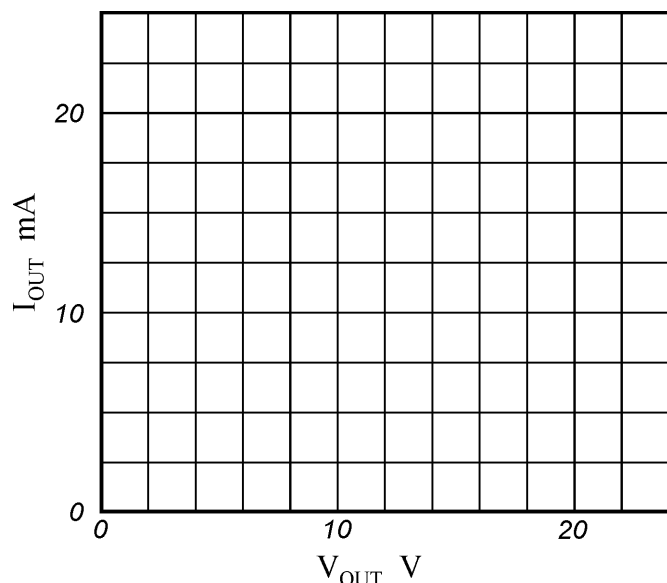
Табл. 7-4 Изходни характеристики на фототранзисторен оптрон с отворена база.

U_{CE}, V		0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
$I_{OUT} \text{ mA}$	$I_{INP} = 4 \text{ mA}$												
	$I_{INP} = 8 \text{ mA}$												
	$I_{INP} = 16 \text{ mA}$												

9 – Да се начертае графиката на изходната характеристика на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(U_{CE})$ при различни стойности на входния ток $I_{INP} = \text{const}$ (фиг. 7–7).

10 – Да се снемат семейството изходни характеристики на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(U_{CE})$ за схема с включена база при различни стойности на входния ток $I_{INP} = \text{const}$.

Да се реализира електрическата схема на включване от фиг. 7–2. Посредством промяна на тока във входната верига на оптрона задавайте фиксирани стойности на входния ток $I_{INP} = \text{const}$.



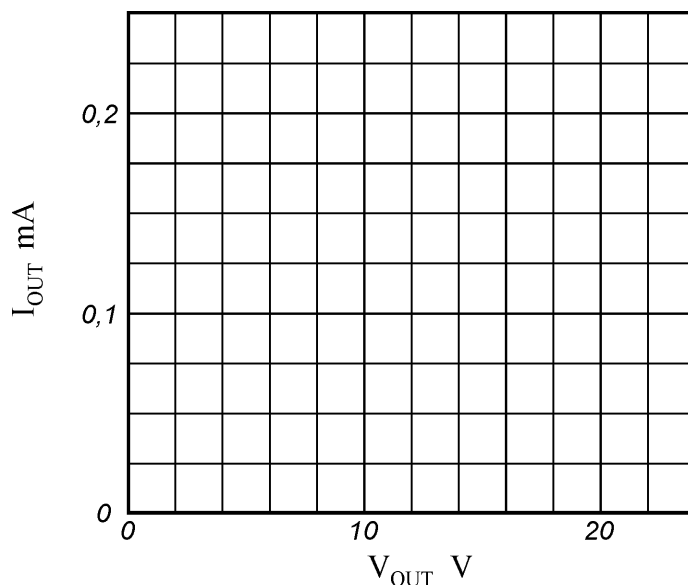
Фиг. 7–7 Изходна характеристика $I_{OUT} = f(U_{CE})$ при $I_{INP} = \text{const}$ на фототранзисторен оптрон с отворена база.

Променяйте захранващото напрежение U_{cc} с равномерна стъпка в диапазона $0 \div 15V$. Отчитайте съответстващите стойности на тока през фототранзистора I_{OUT} и на напрежението U_{CE} . Стойностите на колекторния ток отчитайте на обхват 200 микроампера на уреда. Получените резултати нанесете в табл. 7–5.

Табл. 7-5 Изходни характеристики на фототранзисторен оптрон с включена база.

U_{CE}, V		0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
$I_{OUT} \mu A$	$I_{INP} = 4 \text{ mA}$												
	$I_{INP} = 8 \text{ mA}$												
	$I_{INP} = 16 \text{ mA}$												

11 – Начертайте графиката фиг. 7–8 на изходната характеристика на фототранзисторен оптрон $I_{OUT} = f(U_{CE})$ на схема с включена база при различни стойности на входния ток $I_{INP} = \text{const}$ (резултатите от табл. 7–5).



Фиг. 7–8 Входна характеристика $I_{INP} = f(U_{INP})$ при $U_{CE} = \text{const}$ на фототранзисторен оптрон с включена база

12 – Изчислете коефициента на усилване по ток на фототранзистора по резултатите от измерванията

13 – Определете дължината на вълната на излъчване на светодиода по входните характеристики на оптрона:

$$\lambda = \quad \mu\text{m}$$

14 – Изчислете коефициента на предаване по ток на оптрона за двете схеми на включване на фототранзистора при $U_{CE} = 10\text{V}$ и $I_{INP} = 8\text{ mA}$.

Отворена база	Включена база
$K_I = \text{—————} =$	$K_I = \text{—————} =$

7.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- В какви схеми на включване може да се използва фототранзисторния оптрон? Сравнете ги по бързодействие и динамичен диапазон.
- В какви приложения най–често се използват фототранзисторните оптрони?
- Може ли да се разпознаят изводите на фототранзисторния оптрон с помощта на мултицет?

Протокол № 8

Изследване на тунелен диод

Студент:	Ф. №.....	Група...
.....	Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:
За корегирание:		

8.1 Задачи за предварителна подготовка

1 – Какво представлява тунелен преход? От какви токоносители се формира тунелния преход в участъка с отрицателно съпротивление в права посока на включване на тунелен диод?

2 – Какви са различията между волт–амперните характеристики на обикновен и тунелен диод.

3 – Какъв е физичния смисъл на термина отрицателно съпротивление?

4 – Как се отнасят стойностите на тока в обратна посока на включване за тунелен диод в сравнение с тези на обикновен диод от същия полупроводник?

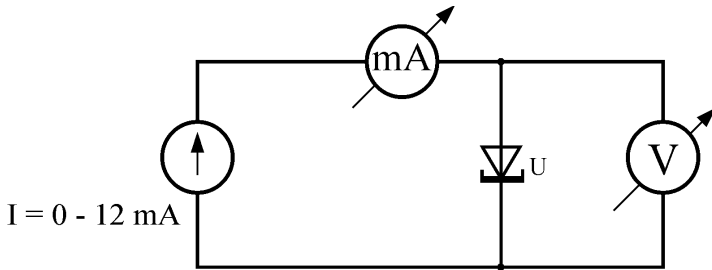
5 – Изчислете граничната честота на тунелен диод със средни стойности на параметрите $R_{отр}$, C и r_s .

8.2 Решения на задачите

8.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Да се снеме волт–амперната характеристика на тунелен диод.

Да се реализира схемата на включване, показана на фиг. 8–1.



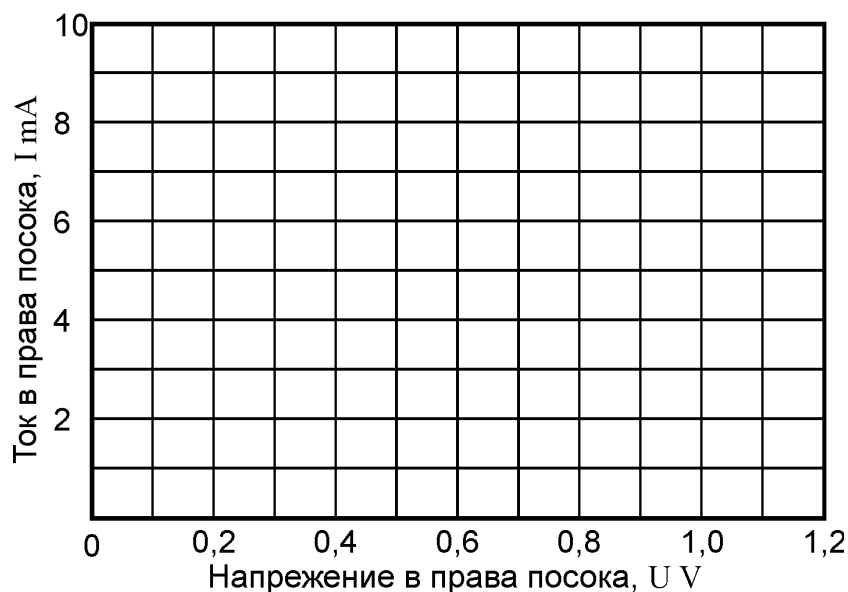
Фиг. 8-1 Електрическа схема за измерване на волт–амперната характеристика на тунелен диод.

С последователно задаване на различни стойности на тока (по табл. 9–1) от генератора, се отчита пада на напрежението върху тунелния диод. Резултатите се нанасят в Табл. 8–1.

Табл. 8-1 Резултати от измерването на волт–амперната характеристика.

I mA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	(9)	(10)
U mV											
I mA	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
U mV											
I mA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U mV											

2 – Да се построи графиката на волт–амперната характеристика фиг. 8-2, по резултатите за напрежението и тока от табл. 8–1.



Фиг. 8-2 Волт–амперна характеристика на тунелен диод.

3 – Отбележете върху волт–амперната характеристика участъка с отрицателно съпротивление.

4 – Попълнете стойностите на токовете и напреженията в табл. 8–2 за локалните екстремуми на волт–амперната характеристика.

Табл. 8-2 Стойности на тока и напрежението в максимума и минимума на волт–амперната характеристика.

Максимум		Минимум	
I_{\max} mA		I_{\min} mA	
U_1 mV		U_2 mV	

5 – Изчислете стойностите на отрицателното съпротивление по формулата:

$$R_{\text{отр}} = \frac{U_2 - U_1}{I_{\max} - I_{\min}} = \frac{\quad}{\quad} =$$

6 – Изчислете възможната гранична честота при минимални и максимални стойности на параметрите: $R_{\text{отр}} = (5 \div 500) \Omega$, $C = (1 \div 200) \text{ pF}$, $r_s = (0,5 \div 15) \Omega$.

$$R_{\text{отр} \cdot \text{max}} = \quad ; C_{\text{max}} = \quad ; r_{s\text{-max}} = \quad ,$$

$$f_{\text{гр-max}} = \frac{1}{2\pi \cdot |R_{\text{отр}}| \cdot C \sqrt{\frac{|R_{\text{отр}}|}{r_s} - 1}} =$$

$$R_{\text{отр} \cdot \text{min}} = \quad ; C_{\text{min}} = \quad ; r_{s\text{-min}} = \quad ,$$

$$f_{\text{гр-min}} = \frac{1}{2\pi \cdot |R_{\text{отр}}| \cdot C \sqrt{\frac{|R_{\text{отр}}|}{r_s} - 1}} =$$

8.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- В какви схеми се използва тунелния диод? Може ли да се използва като изправителен елемент?
- Защо във волт–амперната характеристика на тунелния диод има област с отрицателно съпротивление?
- Може ли да се разпознаят изводите и да се провери изправността на тунелен диод с мултицет?

Протокол № 9

Изследване на тиристор

Студент:	Ф. №.....	Група...
	Дата на провеждане:	
	Подготовка за лаб. упр.	Провеждане на лаб. упр.
Заверка на преподавател:	Дата:	Дата:
За корегирание:		

9.1 Задачи за предварителна подготовка

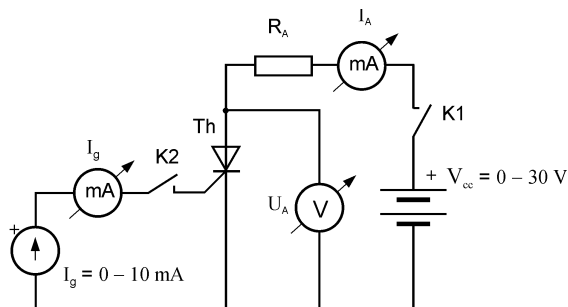
- 1 – Какво представлява тиристора? От колко P-N прехода е съставен?
- 2 – Избройте всичките възможни способи, чрез които може да се “запуши” тиристора.
- 3 – Избройте всичките възможните способи за “отпушване” на тиристор.
- 4 – Възможно ли е да се използва тиристор в електронни схеми за усилване на напрежения, ток и мощност? Обосновете отговора си.
- 5 – Кои са основните приложения на тиристорите?

9.2 Решения на задачите

9.3 Задачи за изпълнение, указания за работа и резултати от измерванията

1 – Да се сниме семейство волт–амперни характеристики $I_A = f(U_A)$, при $I_g = \text{const}$ на тиристор.

Да се реализира схемата на включване, показана на фиг. 9–1.



Фиг. 9-1 Електрическа схема за измерване на семейство волт-амперни характеристики на тиристор.

Задайте управляващ ток $I_g = 0$, чрез прекъсване на управляващата верига на тиристора с помощта на превключвателя K2.

Чрез промяна на захранващото напрежение V_{cc} , последователно задавайте стойности на анодния ток I_A от 0 mA през 1 mA до отпушване на тиристора. За всяка една стойност на анодния ток I_A отчитайте анодното напрежение U_A . Точката на отпушване е характерна с рязкото увеличаване на анодния ток и намаляване на анодното напрежение на тиристора.

Измерете последователно точки от волт–амперната характеристика на тиристора при отпушено състояние. За целта задайте максимален аноден ток ($I_A = 20 \text{ mA}$) на тиристора посредством V_{cc} .

При последователно задаване на стойности на анодния ток от максимална към минимална през 2 mA (с помощта на източника V_{cc}), се отчита пада на напрежението върху тиристора. Измерете прецизно анодното напрежение на обхват 2000 mV на волтметъра. Резултатите се нанасят в табл. 9–1.

Табл. 9-1 Резултати от измерването на волт–амперната характеристика на тиристор

$I_a \text{ (mA)}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_a \text{ (V)}$										

$I_a \text{ (mA)}$	24	22	20	18	16	14	12	10	8	5	3	2
$U_a \text{ (V)}$												

2 – Снемете волт–амперната характеристика на тиристора при различни управляващи токове I_g в участъка от волт–амперната характеристика до точката на отпушване. За целта, в схема фиг. 9–1 включете превключвателя K2. Задайте последователно управляващ ток на тиристора 1 mA, 2 mA, 3 mA, 4 mA, 4,5 mA, 5,5 mA и 6 mA от генератора

на ток в управляващата верига. За всяка една стойност на управляващия ток, задавайте аноден ток от 1 mA до 6 mA през 1 mA с помощта на източника V_{cc} . Отчитайте пада на напрежение върху анода на тиристора U_A , като резултатите нанесете в табл. 9–2.

Табл. 9-2 Резултати от измерването на волт–амперната характеристика при различни управляващи токове.

I_A mA	U_A V					
	$I_g = 0$ mA	$I_g = 4$ mA	$I_g = 4,5$ mA	$I_g = 5$ mA	$I_g = 5,5$ mA	$I_g = 6$ mA
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
8						

3 – Да се построи графиката на семейството волт–амперни характеристики $I_A = f(U_A)$, при $I_g = \text{const}$ по получените резултати.

Отбележете на графиката участъка с отрицателно съпротивление.



Фиг. 9-2 Семейство волт-амперни характеристики на тиристор.

4 – Да се снее зависимостта $U_{bo} = f(I_g)$, - пускова характеристика на тиристора.

За снемане на точки от пусковата характеристика на тиристора в схемата фиг. 9–1, се измерва стойността на анодното напрежение U_A , при което той се “отпушва” при зададен управляващ ток I_g . За целта, при “запушен” тиристор се установява стойност на управляващия ток I_g , за която ще се прави измерването при $V_{cc} = 0$ V. Чрез увеличаване на V_{cc} последователно се увеличава анодното напрежение U_A до момента на “отпушване” на тиристора. Стойността на анодното напрежение в момента на “отпушване” се отчита и нанася в табл. 9–3. След това се

“запушва” тиристора по един от познатите Ви способи и се преминава към измерване на за следващата стойност на управляващия ток U_{bo} .

Табл. 9-3 Резултати от измерването на пусковата характеристика на тиристор.

I_g (mA)	0	1,5	2	3	4	4,5	5	5,5	6
U_{bo} (V)									

5 – Да се построи графиката на пусковата характеристика на тиристора $U_{bo} = f(I_g)$, (фиг. 9–3) по получените резултати.



Фиг. 9-3 Пускова характеристика на тиристор.

6 – Изчислете стойностите на отрицателното съпротивление $R_{отр}$.

7 – Изчислете стойността на диференциалното съпротивление $R_{диф}$ на тиристора в отпушено състояние като разлика между две стойности на анодния ток и съответстващото анодно напрежение. Изберете стойностите в средата на волт–амперната характеристика.

I_{A1} m =	I_{A2} mA =	$\Delta I_{(A1-A2)}$ mA =
U_{A1} V =	U_{A2} V =	$\Delta U_{(A1-A2)}$ V =

8 – Изчислете стойността на диференциалното съпротивление $R_{диф+}$ на тиристора в “запушено” състояние в участъка с положително съпротивление.

Табл. 9-3 Стойности на диференциалното съпротивление.

$R_{отр} \cdot \Omega$	$R_{диф} \cdot \Omega$	$R_{диф+} \cdot \Omega$

9.4 Въпроси за самостоятелна подготовка

- Може ли да се отпуши тиристор само, чрез промяна на анодното напрежение?
- Може ли да се запуши тиристора, чрез управляващия електрод?
- Може ли да се разпознаят изводите на тиристор с помощта на мултицет?

Литература

1. Конспект лекции, които студентите записват по време на лекции по дисциплината “Полупроводникови елементи II част”;
2. <http://ecad.tu-sofia.bg/ppe2/>;
2. Дойчинова Р., Ямаков И., “Специални и силови полупроводникови елементи”, С., Техника, 1990;
3. Вълков С., Ямаков И., Дойчинова Р., Христов М., Василева Т., ‘Електронни и полупроводникови елементи и интегрални схеми`, С., Техника, 1992.
4. Табаков С. ”Тиристорна техника”, С., Техника, 1998;
5. Христов М., Василева Т., Манолов Е., “Полупроводникови елементи” С., Нови знания, 2007;
6. Paul R., “Optoelektronische Halbleiterbauelemente”, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1992;
7. Schubert E. F., “Light Emitting Diodes” Cambridge University Press, 2003;
8. Johnson Mark, “Photodetection and Measurement” McGraw-Hill, 2003.