

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського”**

**Факультет Електроніки  
Кафедра електронної інженерії**

**ЗВІТ  
ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ №1  
З курсу «Твердотільна електроніка»  
“Дослідження випрямляючих напівпровідникових діодів”**

Виконав студент 3-го курсу  
Групи ДМ-82:  
Іващук В.О

Перевірив роботу:  
Королевич Л.М.

Кількість балів: \_\_\_\_\_

## 1. МЕТА РОБОТИ

Теоретичне вивчення і практичне дослідження випрямляючих діодів; визначення фізичних та основних технічних параметрів германійових та кремнієвих діодів із їх вольт-амперних характеристик .

## 2. ЗАВДАННЯ

1. Вивчити структуру параметрів (паспортних даних) досліджуваного підкласу діодів. Ознайомитися із вимірювальним стендом та використовуваними приладами.

2. Зібрати схему для дослідження вольт-амперної характеристики випрямляючих діодів .

3. Виміряти вольт-амперні характеристики германієвого та кремнієвого діодів при кімнатній температурі. Результати вимірювань записати в таблиці.

4. \*Провести температурні дослідження ВАХ германієвого та кремнієвого діодів при температурі  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для прямої та зворотної полярності напруги).

5. Побудувати графіки вольт-амперних характеристик діодів .

6. Графічно визначити дифузійний потенціал  $\phi_0$  , опір бази  $r_b$  та струм виродження  $I_{vir}$  для кожного з діодів. Оцінити тепловий струм германієвого діода.

7. За побудованими графіками характеристик визначити основні параметри діодів.

8. \*\*Побудувати графіки залежностей статичного та динамічного опорів діодів від прикладеної напруги (або вирахувати статичний та диференціальний опори посередині прямої та зворотної гілок ВАХ кожного діода і співставити їх між собою).

9. Провести аналіз результатів досліджень, і зробити висновки з виконаної роботи.

## 3. ДОСЛІДНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ

В склад вимірювального стенду (рис.1) входять: блок живлення постійного струму, вольтметр цифровий, окремий перемикач " $S_1$ ", термостат із термометром, два точних резистори і плата з досліджуваними діодами. При вимірюванні прямої гілки ВАХ в схему вмикається резистор  $R=R_1$ , а при вимірюванні зворотної гілки - резистор  $R=R_2$ ;  $R_2.R_1$ . Частина елементів схеми може бути розміщена на спеціальному макеті.

В роботі використовується методика непрямого вимірювання вольт-амперної характеристики діода за допомогою одного цифрового вольтметра. У відповідності зі схемою вимірювання в позиції "1" перемикача " $S_1$ " вольтметр  $V$  вимірює напругу  $U$ — сумарну на діоді і резисторі, а в позиції "2" - спад напруги на резисторі  $U_R$ .

Напруга на діоді —  $U_D$  та струм через діод —  $I_D$  вираховуються за формулами:

$$U_D = U - U_R; \quad I_D = \frac{U_R}{R}.$$

Використовуючи апроксимацію Шоклі, можна графічно визначити дифузійний потенціал  $\phi_0$  та опір бази  $r_b$  при високому рівні інжекції на прямій гілці вольт-амперної характеристики, а за величиною опору бази  $r_b$  розраховується струм виродження  $I_{вир}$ :

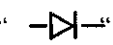
$$U_{np} = \phi_0 - \phi_T + I_{np} \cdot r_b; \quad r_b \approx \frac{U_{np} - \phi_0}{I_{np}}; \quad I_{вир} = \frac{\phi_T}{r_b}.$$

#### 4. ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. На початку роботи уважно прочитати цю інструкцію. Ознайомитись з будовою стенду для дослідження ВАХ діодів на робочому місці (див. рис.1 та рис.2).

1.1.1.\*Зібрати схему (рис.1) з використанням перемикача "S<sub>1</sub>" для дослідження вольт-амперної характеристики випрямляючих діодів. При вимірюванні прямої гілки ВАХ "+" напруги має подаватись на анод (плюсовий вивід) діоду та вмикається вимірювальний резистор  $R_1=5,00 \text{ кОм}$ . Для зворотньої гілки — змінюється полярність напруги та використовується вимірювальний резистор  $R_2=100 \text{ кОм}$  (або  $1 \text{ МОм}$ ).

1.1.2. При використанні спеціального макету (рис.2), під'єднати до відповідних клем:

"ВХ + -"	-	блок живлення постійного струму на 50...100 В;
"  "	-	досліджуваний діод;
"V2 + -"	-	кабель із щупами від додаткового входу вольтметра типу В7-21.

Кабель із щупами від основного входу вольтметра типу В7-21 під'єднати безпосередньо до клем "+ -" блоку живлення, з'єднавши екран кабеля із корпусом блоку живлення. Слідкувати, щоб полярність під'єднання приладів, діоду і вимірювальних щупів вольтметра відповідала написам на макеті.

Роль перемикача "S<sub>1</sub>" в даному випадку виконує спеціальна кнопка із стрілкою на вольтметрі В7-21. Для зміни полярності напруги, що подається на діод ("ПРЯМА", "ЗВОР."), та одночасного вмикання в коло діода відповідного вимірювального резистора  $R_1$  чи  $R_2$  на спеціальному макеті встановлено додатковий перемикач "S<sub>2</sub>".

1.2. Ввімкнути вольтметр, установити відповідними перемикачами межу (межі — для В7-21) вимірювань вольтметра "100 В". На блоці живлення ручки регулювання напруги "U" установити в нульову позицію (проти годинникової стрілки до упору), ручки "I" установити в середню позицію, ввімкнути блок живлення. \*Ввімкнути термостат (за вказівкою викладача).

2. Вимірювання ВАХ діода  $I_d = f_1(U_d)$ , при  $T=T_1=T_{кнмн}^{\circ}\text{C}$ . Під час вимірювань записувати показання цифрового вольтметра, не округляючи висвічуваних цифрових значень !

2.1. **Пряма гілка ВАХ.** Плавню змінюючи вихідну напругу джерела живлення вимірювати вольтметром  $V$  як встановлювані значення сумарної напруги  $U$  (від 0 до 50 В) так і падіння напруги на резисторі  $U_R$  (для В7-21 — через додаткові щупи  $V_2$ ). На спеціальному макеті встановити перед цим перемикач "S<sub>2</sub>" в позицію "ПРЯМА". Після закінчення вимірювань знизити вихідну напругу джерела живлення до нуля.

2.2. **Зворотня гілка ВАХ.** Для схеми на рис.1: — замінити резистор  $R_1$  на  $R_2=100\text{ кОм}$  та перемінити полярність напруги блоку живлення. На спеціальному макеті — достатньо перемкнути "S<sub>2</sub>" в позицію "ЗВОРОТНЯ".

Плавню змінюючи вихідну напругу джерела живлення вимірювати вольтметром  $V$  як встановлювані значення сумарної напруги  $U$  (від 0 до 50 В, за вказівкою - до 75 В) так і падіння напруги на резисторі  $U_R$ . Отримані дані занести в таблицю. Під час вимірювання  $U_R$  перемикач, при необхідності, межу вольтметра  $V$  (для В7-21 — межу "V2") в позиції:

"10В", "1В" або "100мВ" !

2.3. Вирахувати і занести у відповідну таблицю значення струму через діод  $I_D$  і падіння напруги на діоді  $U_D$  за формулами :

$$I_D = \frac{U_R}{R_i}; \quad U_D = U - U_R;$$

де  $R_i$  - відповідний вимірювальний резистор, Ом .

3. \*Температурні дослідження ВАХ германійового та кремнійового діодів.

Помістити плату з досліджуваними діодами у попередньо нагрітий термостат (до температури  $T_2 = +70^\circ\text{C}$ ). Провести дослідження вольт-амперних характеристик діодів для прямої та зворотної полярності напруги у відповідності із п. 2.

$$I_d = f_2(U_d), \text{ при } T = T_2^\circ\text{C}.$$

4. За отриманими даними побудувати графіки ВАХ германійового та кремнійового діодів на одному малюнку. Якщо виконувались температурні дослідження, то допускається будувати окремо сімейства германійового  $I_{Ge} = f(U_{Ge})$ , при  $T = \text{const}$  та кремнійового

$I_{Si} = f(U_{Si})$ , при  $T = \text{const}$  діодів, використовуючи однакові масштаби для напруги.

5. Графічно визначити опір бази  $r_b$  та дифузійний потенціал  $\phi_0$ , вирахувати струм виродження  $I_{\text{вир}}$ . Визначити величину теплового струму германійового діода.

6. Із графіків знятих ВАХ визначити основні параметри германійового та кремнійового діодів. Вирахувати опори діодів  $R_{st}$  та  $r_{st}$  посередині прямої та зворотної гілок ВАХ.

7. \*\*Виконати необхідні розрахунки та побудувати графіки залежностей статичного та динамічного опорів діодів від прикладеної напруги .

8. \* Оцінити вплив температури на напругу та струм діодів, вирахувавши температурну чутливість прямої напруги  $TCH_{np} = \Delta U_{np} / \Delta T$  та температурний коефіцієнт збільшення зворотного струму  $TKI_{38} = I_{38T2}/I_{38T1} \approx \exp(\alpha_i \times \Delta T)$ . Визначити значення  $\alpha_{Si}$  та  $\alpha_{Ge}$  .

9. Провести аналіз результатів досліджень, порівняти параметри германійового та кремнійового діодів, пояснити вплив температури на параметри діодів і зробити висновки з виконаної роботи.

**Схема для дослідження вольт-амперної характеристики:**

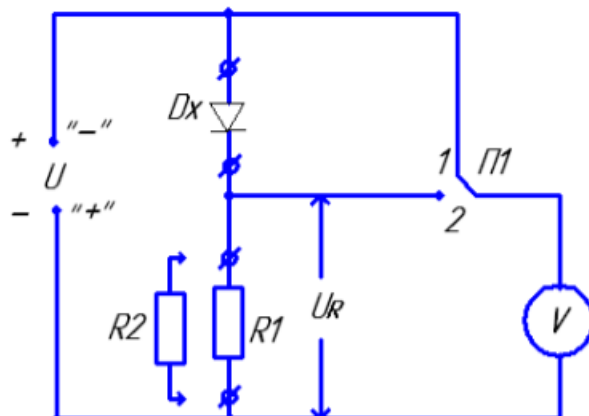


Рис.1. Схема для вимірювання ВАХ діода. При знятті зворотної гілки ВАХ змінюється полярність джерела живлення та номінал резистора R (величина резистора для прямої гілки  $R_1=5\text{ кОм}$ ; для зворотної  $R_2=100\text{ кОм}$ , або  $1\text{ МОм}$ ).

## 5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1.Результати вимірювань та розрахунків

Табл. №5.1. ВАХ діода 1 — германієвого

Умови досліджень: пряме зміщення,  $R_1=5,0\text{ кОм}$ ,  $T_1=20^\circ\text{C}$

$U, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$\Delta U = \Delta U_R, \text{В}$	$I_d, \text{мА}$	$U_D, \text{В}$	$\Delta I_D, \text{мА}$	$\Delta U_D, \text{В}$
0,277	0,22	0,0005	0,044	0,057	0,002202	0,00070711
0,306	0,246	0,0005	0,0492	0,06	0,002462	0,00070711
0,375	0,309	0,0005	0,0618	0,066	0,003092	0,00070711
0,465	0,39	0,0005	0,078	0,075	0,003901	0,00070711
0,48	0,403	0,0005	0,0806	0,077	0,004031	0,00070711
0,515	0,437	0,0005	0,0874	0,078	0,004371	0,00070711
0,574	0,494	0,0005	0,0988	0,08	0,004941	0,00070711
0,638	0,555	0,0005	0,111	0,083	0,005551	0,00070711
0,71	0,623	0,0005	0,1246	0,087	0,006231	0,00070711
0,738	0,65	0,0005	0,13	0,088	0,006501	0,00070711
0,76	0,67	0,0005	0,134	0,09	0,006701	0,00070711
0,806	0,714	0,0005	0,1428	0,092	0,007141	0,00070711
0,811	0,719	0,0005	0,1438	0,092	0,007191	0,00070711
0,83	0,736	0,0005	0,1472	0,094	0,007361	0,00070711
0,87	0,774	0,0005	0,1548	0,096	0,007741	0,00070711
0,908	0,811	0,0005	0,1622	0,097	0,008111	0,00070711
0,97	0,874	0,0005	0,1748	0,096	0,008741	0,00070711
1,019	0,918	0,0005	0,1836	0,101	0,009181	0,00070711
1,042	0,942	0,0005	0,1884	0,1	0,009421	0,00070711

1,21	1,103	0,0005	0,2206	0,107	0,01103	0,00070711
1,37	1,262	0,0005	0,2524	0,108	0,01262	0,00070711
1,527	1,412	0,0005	0,2824	0,115	0,01412	0,00070711
1,723	1,604	0,0005	0,3208	0,119	0,01604	0,00070711
2,043	1,914	0,0005	0,3828	0,129	0,01914	0,00070711
2,264	2,136	0,0005	0,4272	0,128	0,02136	0,00070711
2,483	2,348	0,0005	0,4696	0,135	0,02348	0,00070711
2,583	2,441	0,0005	0,4882	0,142	0,02441	0,00070711
2,824	2,681	0,0005	0,5362	0,143	0,02681	0,00070711
4,426	4,263	0,0005	0,8526	0,163	0,04263	0,00070711
4,878	4,711	0,0005	0,9422	0,167	0,04711	0,00070711
5,201	5,034	0,0005	1,0068	0,167	0,05034	0,00070711
6,575	6,393	0,0005	1,2786	0,182	0,06393	0,00070711
7,125	6,937	0,0005	1,3874	0,188	0,06937	0,00070711
8,53	8,341	0,0005	1,6682	0,189	0,08341	0,00070711
9,386	9,181	0,0005	1,8362	0,205	0,09181	0,00070711
10,26	10,06	0,005	2,012	0,2	0,100605	0,0070711
13,08	12,61	0,005	2,522	0,47	0,126104	0,0070711
15,65	15,45	0,005	3,09	0,2	0,154503	0,0070711
18,43	18,03	0,005	3,606	0,4	0,180303	0,0070711
18,81	18,51	0,005	3,702	0,3	0,185103	0,0070711
20,34	20,12	0,005	4,024	0,22	0,201202	0,0070711
23,25	22,98	0,005	4,596	0,27	0,229802	0,0070711
25,53	25,27	0,005	5,054	0,26	0,252702	0,0070711
28,58	28,28	0,005	5,656	0,3	0,282802	0,0070711
30,2	29,9	0,005	5,98	0,3	0,299002	0,0070711
31,95	31,66	0,005	6,332	0,29	0,316602	0,0070711
33,44	33,12	0,005	6,624	0,32	0,331202	0,0070711
34,67	34,35	0,005	6,87	0,32	0,343501	0,0070711
35,95	35,69	0,005	7,138	0,26	0,356901	0,0070711
37,82	37,55	0,005	7,51	0,27	0,375501	0,0070711
38,67	38,35	0,005	7,67	0,32	0,383501	0,0070711
40,91	40,32	0,005	8,064	0,59	0,403201	0,0070711
41,83	41,55	0,005	8,31	0,28	0,415501	0,0070711
46,37	46,05	0,005	9,21	0,32	0,460501	0,0070711
49,43	49,01	0,005	9,802	0,42	0,490101	0,0070711
50,63	50,33	0,005	10,066	0,3	0,503301	0,0070711

Табл. №5.2. ВАХ діода 1 — германієвого

Умови досліджень: зворотнє зміщення,  $R_I = 100 \text{ кОм}$ ,  $T_I = 20^\circ\text{C}$

$U, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$\Delta U = \Delta U_R,$ $\text{В}$	$I_d, \text{мА}$	$U_D, \text{В}$	$\Delta I_D, \text{мА}$	$\Delta U_D, \text{В}$
1,79	1,1	0,005	0,011	0,69	0,000550006	0,0070711
2,14	1,13	0,005	0,0113	1,01	0,000565006	0,0070711
2,75	1,19	0,005	0,0119	1,56	0,000595005	0,0070711
3,26	2,24	0,005	0,0224	1,02	0,001120003	0,0070711
3,83	1,24	0,005	0,0124	2,59	0,000620005	0,0070711
5,57	1,32	0,005	0,0132	4,25	0,000660005	0,0070711
6,38	1,35	0,005	0,0135	5,03	0,000675005	0,0070711
7,36	1,39	0,005	0,0139	5,97	0,000695004	0,0070711

9,40	1,17	0,005	0,0117	8,23	0,000585005	0,0070711
14,77	1,69	0,005	0,0169	13,08	0,000845004	0,0070711
18,96	1,42	0,005	0,0142	17,54	0,000710004	0,0070711
24,67	2,74	0,005	0,0274	21,93	0,001370002	0,0070711
23,86	2,5	0,005	0,025	21,36	0,001250002	0,0070711
24,13	2,58	0,005	0,0258	21,55	0,001290002	0,0070711
28,25	4,09	0,005	0,0409	24,16	0,002045002	0,0070711
28,97	4,42	0,005	0,0442	24,55	0,002210001	0,0070711
31,12	5,33	0,005	0,0533	25,79	0,002665001	0,0070711
32,32	5,97	0,005	0,0597	26,35	0,002985001	0,0070711
32,93	6,29	0,005	0,0629	26,64	0,003145001	0,0070711
34,63	7,22	0,005	0,0722	27,41	0,003610001	0,0070711
35,76	7,81	0,005	0,0781	27,95	0,003905001	0,0070711
37,49	8,75	0,005	0,0875	28,74	0,004375001	0,0070711
37,90	9,01	0,005	0,0901	28,89	0,004505001	0,0070711
39,94	10,11	0,005	0,1011	29,83	0,005055001	0,0070711
42,66	11,57	0,005	0,1157	31,09	0,005785001	0,0070711
44,44	12,53	0,005	0,1253	31,91	0,006265	0,0070711
46,34	13,61	0,005	0,1361	32,73	0,006805	0,0070711
47,11	14,07	0,005	0,1407	33,04	0,007035	0,0070711
49,02	15,17	0,005	0,1517	33,85	0,007585	0,0070711
51,78	16,72	0,005	0,1672	35,06	0,00836	0,0070711
53,23	17,58	0,005	0,1758	35,65	0,00879	0,0070711
54,69	18,42	0,005	0,1842	36,27	0,00921	0,0070711
55,83	19,05	0,005	0,1905	36,78	0,009525	0,0070711
58,55	20,57	0,005	0,2057	37,98	0,010285	0,0070711
62,81	22,99	0,005	0,2299	39,82	0,011495	0,0070711
65,87	24,35	0,005	0,2435	41,52	0,012175	0,0070711
72,41	28,39	0,005	0,2839	44,02	0,014195	0,0070711
81,44	34,58	0,005	0,3458	46,86	0,01729	0,0070711
90,18	39,31	0,005	0,3931	50,87	0,019655	0,0070711
93,38	41,15	0,005	0,4115	52,23	0,020575	0,0070711
99,36	44,32	0,005	0,4432	55,04	0,02216	0,0070711

Табл. №5.3. ВАХ діода 2 — кремнієвого

Умови досліджень: пряме зміщення,  $R_I=5,0\text{кОм}$ ,  $T_I=20^\circ\text{C}$

$U, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$\Delta U = \Delta U_R, \text{В}$	$I_d, \text{мА}$	$U_D, \text{В}$	$\Delta I_D, \text{мА}$	$\Delta U_D, \text{В}$
0,576	0,139	0,0005	0,0278	0,437	0,001393592	0,000707
0,629	0,103	0,0005	0,0206	0,526	0,001034843	0,000707
0,646	0,196	0,0005	0,0392	0,45	0,001962549	0,000707
0,729	0,267	0,0005	0,0534	0,462	0,002671872	0,000707
0,807	0,339	0,0005	0,0678	0,468	0,003391475	0,000707
0,932	0,445	0,0005	0,089	0,487	0,004451123	0,000707
0,992	0,507	0,0005	0,1014	0,485	0,005070986	0,000707
1,054	0,565	0,0005	0,113	0,489	0,005650885	0,000707
1,116	0,622	0,0005	0,1244	0,494	0,006220804	0,000707
1,224	0,724	0,0005	0,1448	0,5	0,007240691	0,000707
1,337	0,831	0,0005	0,1662	0,506	0,008310602	0,000707
1,682	1,155	0,0005	0,231	0,527	0,011550433	0,000707

1,868	1,342	0,0005	0,2684	0,526	0,013420373	0,000707
2,045	1,513	0,0005	0,3026	0,532	0,01513033	0,000707
2,24	1,704	0,0005	0,3408	0,536	0,017040293	0,000707
2,553	2,01	0,0005	0,402	0,543	0,020100249	0,000707
2,88	2,325	0,0005	0,465	0,555	0,023250215	0,000707
3,137	2,581	0,0005	0,5162	0,556	0,025810194	0,000707
3,852	3,291	0,0005	0,6582	0,561	0,032910152	0,000707
4,587	4,017	0,0005	0,8034	0,57	0,040170124	0,000707
4,977	4,383	0,0005	0,8766	0,594	0,043830114	0,000707
4,891	4,313	0,0005	0,8626	0,578	0,043130116	0,000707
5,305	4,712	0,0005	0,9424	0,593	0,047120106	0,000707
6,383	5,831	0,0005	1,1662	0,552	0,058310086	0,000707
6,88	6,215	0,0005	1,243	0,665	0,06215008	0,000707
8,018	7,397	0,0005	1,4794	0,621	0,073970068	0,000707
8,711	8,087	0,0005	1,6174	0,624	0,080870062	0,000707
9,327	8,721	0,0005	1,7442	0,606	0,087210057	0,000707
10,1	9,46	0,005	1,892	0,64	0,094605285	0,007071
12,42	11,72	0,005	2,344	0,7	0,117204266	0,007071
14,19	13,54	0,005	2,708	0,65	0,135403693	0,007071
15,74	15,03	0,005	3,006	0,71	0,150303327	0,007071
16,87	16,18	0,005	3,236	0,69	0,16180309	0,007071
17,66	16,94	0,005	3,388	0,72	0,169402952	0,007071
19,23	18,51	0,005	3,702	0,72	0,185102701	0,007071
20,47	19,81	0,005	3,962	0,66	0,198102524	0,007071
23,08	22,41	0,005	4,482	0,67	0,224102231	0,007071
25,43	24,75	0,005	4,95	0,68	0,24750202	0,007071
27,13	26,46	0,005	5,292	0,67	0,26460189	0,007071
28,22	27,53	0,005	5,506	0,69	0,275301816	0,007071
29,63	28,94	0,005	5,788	0,69	0,289401728	0,007071
31,21	30,52	0,005	6,104	0,69	0,305201638	0,007071
32,55	31,85	0,005	6,37	0,7	0,31850157	0,007071
35,13	34,44	0,005	6,888	0,69	0,344401452	0,007071
38,56	37,86	0,005	7,572	0,7	0,378601321	0,007071
40,03	39,34	0,005	7,868	0,69	0,393401271	0,007071
42,03	41,35	0,005	8,27	0,68	0,413501209	0,007071
45,48	44,72	0,005	8,944	0,76	0,447201118	0,007071
48,47	47,74	0,005	9,548	0,73	0,477401047	0,007071
50,24	49,5	0,005	9,9	0,74	0,49500101	0,007071

Табл. №5.4. ВАХ діода 2 — кремнієвого

Умови досліджень: зворотнє зміщення,  $R_I = 100 \text{ кОм}$ ,  $T_I = 20^\circ\text{C}$

$U, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta U_R, \text{В}$	$I_d, \text{мА}$	$U_D, \text{В}$	$\Delta I_D, \text{мА}$	$\Delta U_D, \text{В}$
0,034	0,00012	0,0005	0,000005	0,0000012	0,03388	7,8102E-08	0,0005
0,054	0,00007	0,0005	0,000005	0,0000007	0,05393	6,1032E-08	0,0005
0,085	0,00003	0,0005	0,000005	0,0000003	0,08497	5,2201E-08	0,0005
0,11	0,00004	0,0005	0,000005	0,0000004	0,10996	5,3851E-08	0,0005
0,208	0,00013	0,0005	0,000005	0,0000013	0,20787	8,2006E-08	0,0005
0,247	0,00016	0,0005	0,000005	0,0000016	0,24684	9,4339E-08	0,0005
0,347	0,00022	0,0005	0,000005	0,0000022	0,34678	1,2083E-07	0,0005
0,527	0,00031	0,0005	0,000005	0,0000031	0,52669	1,6286E-07	0,0005



0,662	0,00037	0,0005	0,000005	0,0000037	0,66163	1,9163E-07	0,0005
0,709	0,00039	0,0005	0,000005	0,0000039	0,70861	2,0130E-07	0,0005
1,041	0,00055	0,0005	0,000005	0,0000055	1,04045	2,7950E-07	0,0005
1,524	0,00075	0,0005	0,000005	0,0000075	1,52325	3,7831E-07	0,0005
2,109	0,00103	0,0005	0,000005	0,0000103	2,10797	5,1742E-07	0,0005
2,883	0,00132	0,0005	0,000005	0,0000132	2,88168	6,6189E-07	0,0005
3,237	0,00146	0,0005	0,000005	0,0000146	3,23554	7,3171E-07	0,0005
4,515	0,00203	0,0005	0,000005	0,0000203	4,51297	1,0162E-06	0,0005
4,837	0,00218	0,0005	0,000005	0,0000218	4,83482	1,0915E-06	0,0005
5,644	0,00253	0,0005	0,000005	0,0000253	5,64147	1,2659E-06	0,0005
6,024	0,00267	0,0005	0,000005	0,0000267	6,02133	1,3359E-06	0,0005
7,455	0,00325	0,0005	0,000005	0,0000325	7,45175	1,6257E-06	0,0005
8,175	0,00366	0,0005	0,000005	0,0000366	8,17134	1,8306E-06	0,0005
9,162	0,00397	0,0005	0,000005	0,0000397	9,15803	1,9856E-06	0,0005
10,06	0,00445	0,005	0,000005	0,0000445	10,05555	2,2255E-06	0,005
11,09	0,0049	0,005	0,000005	0,000049	11,0851	2,4505E-06	0,005
11,85	0,00527	0,005	0,000005	0,0000527	11,84473	2,6354E-06	0,005

Отримали ВАХ для прямого і зворотнього зміщення:

2.3.Струм і напругу на діоді для кожного вимірювання розраховали за формулами :

$$I_D = \frac{U_R}{R_i}; \quad (1)$$

$$U_D = U - U_R \quad (2)$$

Похибки знаходження струму і напруги знаходили з формулами:

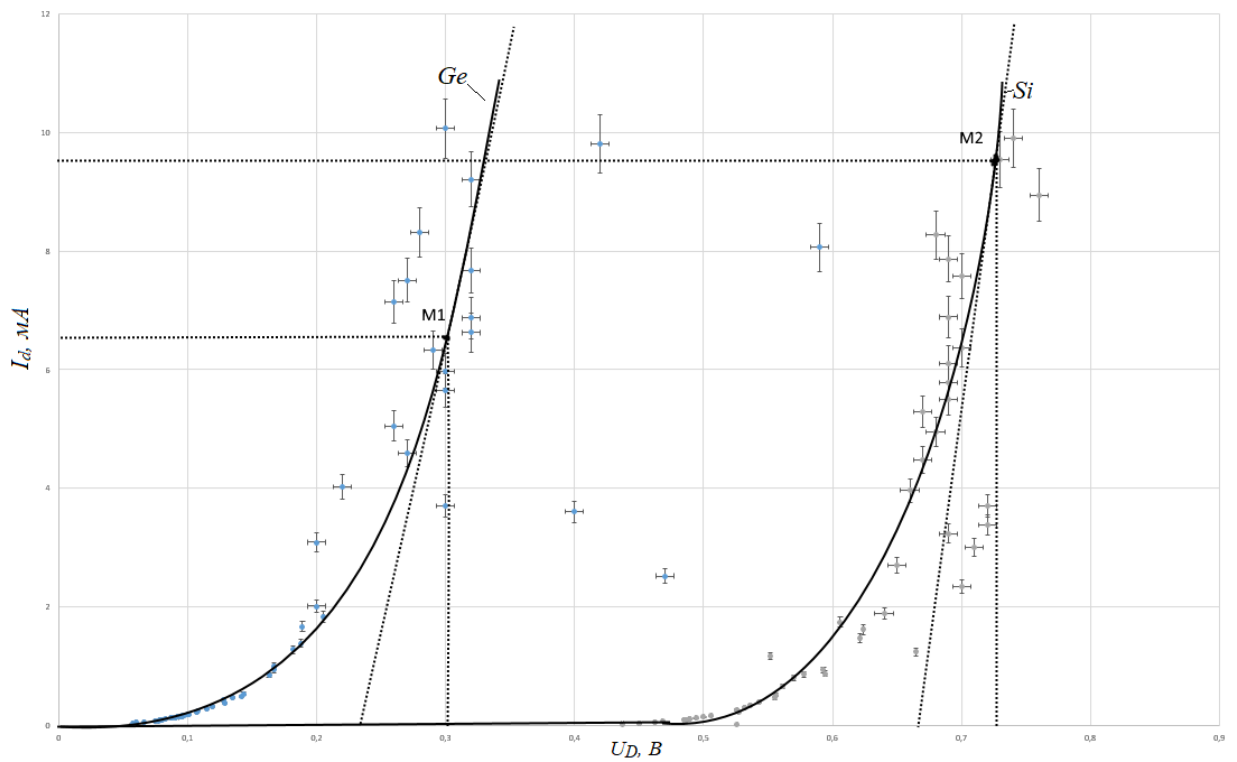
$$\Delta U_D = \sqrt{\Delta U^2 + \Delta U_R^2} \quad (3)$$

$$\Delta I_D = \frac{1}{R^2} \sqrt{R^2 \cdot \Delta U_R^2 + U_R^2 \cdot \Delta R^2} \quad (4)$$

Ці розрахунки виконуємо для всіх значень і підставляємо у відповідні таблиці.

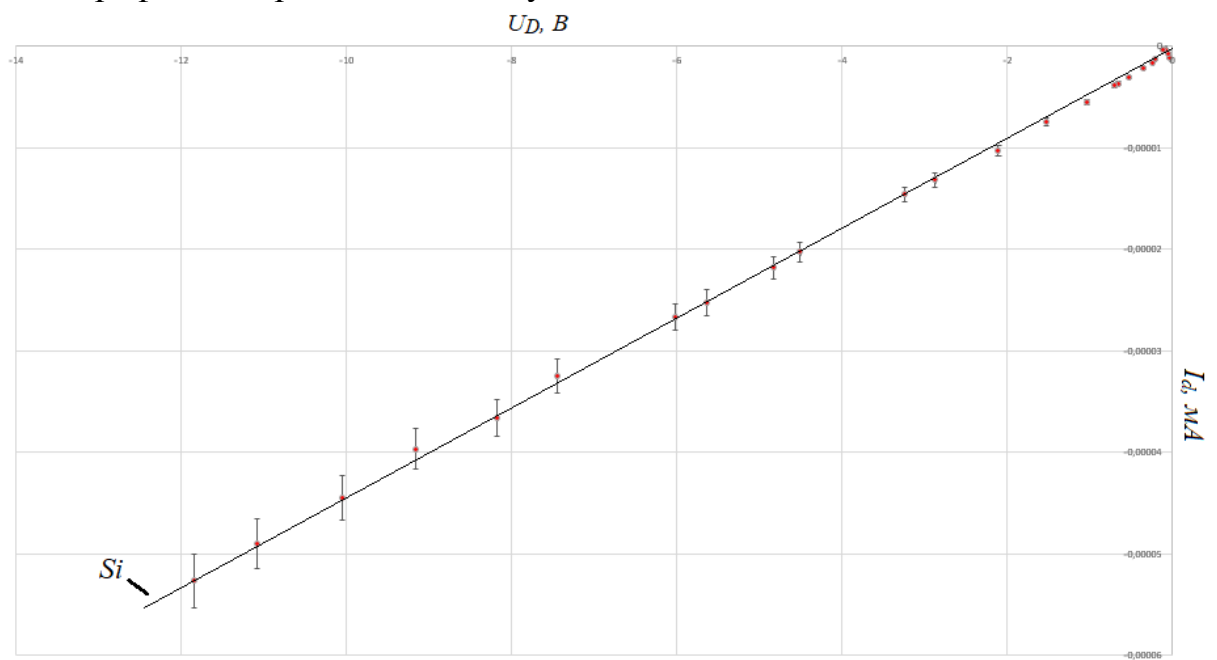
4.Використовуючи отриманні значення і за допомогою спеціалізованих програм побудуємо графіки:

4.1Графік прямої гілки ВАХ кремнієвого та германієвого діодів:

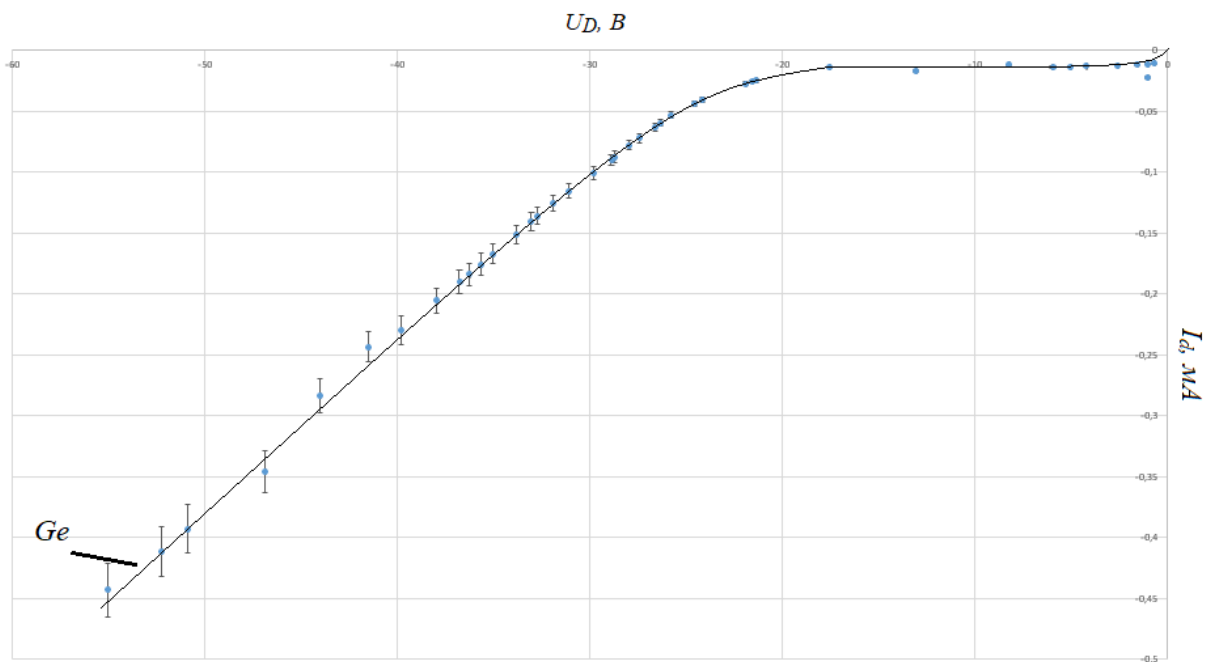


#### 4.2.Графіки зворотних гілок ВАХ кремнієвого та германієвого діоду:

##### 4.2.1.Графік для кремнієвого діоду:



##### 4.2.2.Графік для германієвого діоду:



5.Із вольт-амперної характеристики, використовуючи апроксимацію Шоклі для високого рівня інжекції, визначаємо (див. побудову на графіках ВАХ):

5.1.3 графіку прямої гілки ВАХ для Германієвого діода визначимо його опір бази  $r_b$ : для цього з точки М1 опускаємо перпендикуляр на осі напруги і струму визначаємо значення в точці їх перетину  $I_{np} = 6.51$  мА і  $U_{np} = 0,31$  В. Також визначимо дифузійний потенціал який знаходиться в точці перетину дотичної проведеної до точки М1 і вісі напруг. Зробивши це отримаємо  $\varphi_0 = 0,27$  В.

Опір бази знаходимо за формулою :

$$r_b \approx \frac{U_{np} - \varphi_0}{I_{np}}; \quad (5)$$

Підставивши значення в (5) отримаємо:

$$r_b = \frac{0.31 - 0.25}{6.51 \cdot 10^{-3}} = 9.2165 \text{ Ом}$$

Визначивши  $r_b$  можемо знайти струм виродження за формулою:

$$I_{\text{вир}} = \frac{\varphi_T}{r_b}. \quad (6)$$

де  $\varphi_T = 0,026$  В – температурний потенціал

Підставивши значення в (6) отримаємо:

$$I_{вир} = \frac{0.026}{9.2165} = 0.002836 \text{ A} = 2.836 \text{ mA}$$

5.2. Аналогічно визначимо всі параметри які знайшли для Германієвого діода для Кремнієвого діода. Зробивши це, отримаємо:

$$I_{пр} = 9,55 \text{ mA}$$

$$U_{пр} = 0,726 \text{ V}$$

$$\varphi_0 = 0,668 \text{ V}$$

Підставивши ці значення в (5) знайдемо опір бази цього діода:

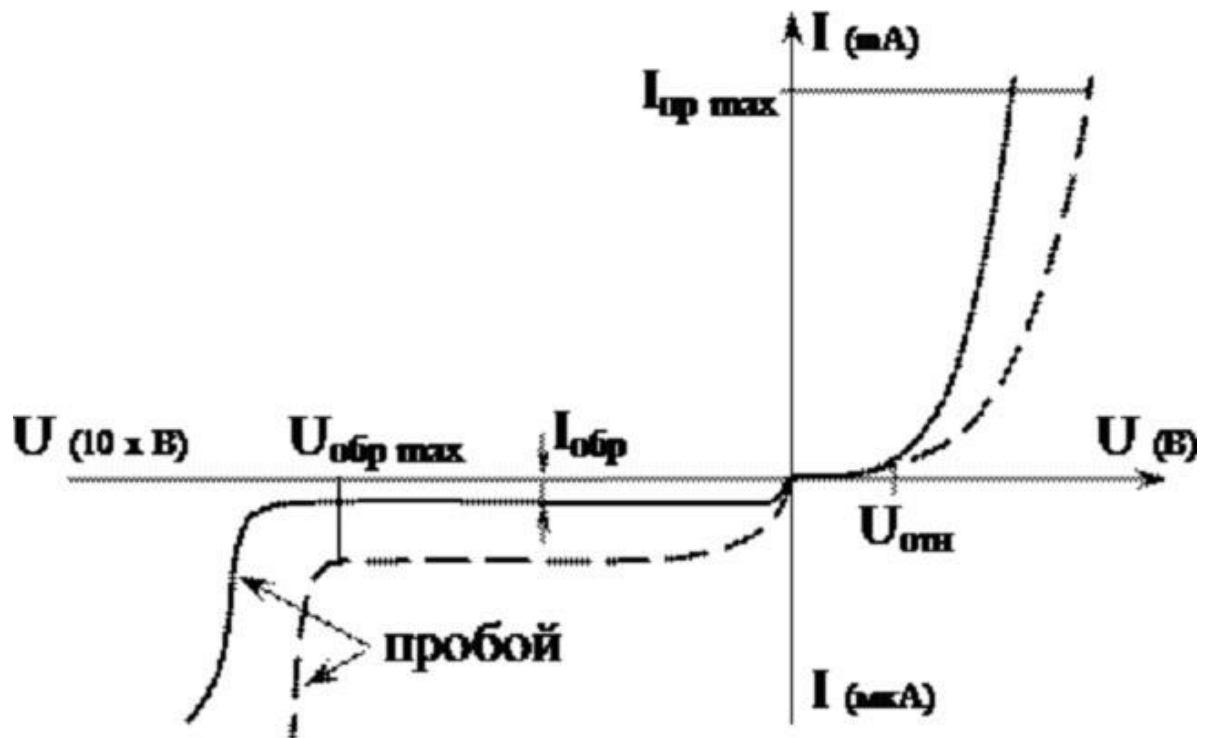
$$r_b = \frac{0.726 - 0.668}{9.55 \cdot 10^{-3}} = 6.073 \text{ Ом}$$

З (6) знайдемо струм виродження:

$$I_{вир} = \frac{0.026}{6.073} = 0.00428 \text{ A} = 4.28 \text{ mA}$$

6. Визначення основних параметрів діода за допомогою ВАХ:

Основні параметри на ВАХ визначаються за цією схемою:



Для кремнієвого діода:

$$U_{np} = 0,1 \text{ В}$$

$$I_{зб} = 0,00005 \text{ мА}$$

$$R_{st} = \frac{0,26 \text{ В}}{5,054 \text{ мА}} = 51,44 \text{ Ом}$$

$$r_{st} = \frac{6,02 \text{ В}}{0,0000267 \text{ мА}} = 225 \text{ МОм}$$

Для германієвого діода:

$$U_{np} = 0,5 \text{ В}$$

$$I_{зб} = 0,017 \text{ мА}$$

$$R_{st} = \frac{0,66 \text{ В}}{3,962 \text{ мА}} = 16,65 \text{ Ом}$$

$$r_{st} = \frac{33,85 \text{ В}}{0,1517 \text{ мА}} = 223 \text{ кОм}$$

## 6. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИСНОВКИ З ВИКОНАНОЇ РОБОТИ.

На даній лабораторній роботі ми отримали ВАХ для двох діодів: кремнієвого і германієвого. І за допомогою отриманого ВАХ визначили основні параметри діода. Оцінюючи отримані результати можна сказати, що кремнієві діоди мають такі переваги над германієвими: більша допустима зворотна напруга, більший робочий температурний інтервал, менший зворотний струм, а недолік — більший прямий спад напруги.

### Відповіді на контрольні питання:

1. За яких ознак класифікують напівпровідникові діоди? Наведіть основні класи діодів.

Діоди можна класифікувати за сукупністю загальних ознак, найважливіші з яких такі:

- початковий матеріал;
- фізичні принципи роботи;
- конструктивно-технологічні особливості;
- функціональне призначення.

2. Наведіть визначення випрямного діода.

Випрямні діоди — це напівпровідникові діоди, принцип дії яких полягає у використанні вентильних властивостей електроннодіркового переходу і які призначені для перетворення змінної напруги в постійну.

3. Назвіть методи отримання р-n переходів випрямних діодів.

Випрямні діоди отримують різними методами:

- методом рідинної епітаксії
- методом вплавлення
- методом дифузії

4. Назвіть параметри випрямних діодів.

Для випрямних діодів вводяться такі основні параметри:

- постійна пряма напруга діода  $U_{пр}$  — спад напруги на діоді в прямому напрямі за заданого прямого струму;
- постійний зворотний струм  $I_{зв}$  — струм через діод у зворотному напрямі за заданої зворотної напруги;
- максимально допустимий прямий струм  $I_{пр.мах}$  — максимальне значення струму, що проходить через діод в прямому напрямі, за якого забезпечується задана надійність;
- максимально допустима зворотна напруга  $U_{зв.мах}$  — максимальне значення зворотної напруги на діоді, за якої забезпечується задана надійність;
- диференціальний опір діода  $r$  у заданій робочій точці;
- максимальна робоча частота  $f_{мах}$  — частота, за якої значення випрямленого струму зменшується до 0,7 свого номінального значення.

5. Наведіть переваги та недоліки германієвих і кремнієвих випрямних діодів.

Переваги кремнієвих випрямних діодів порівняно з германієвими це більша допустима зворотна напруга, більший робочий температурний інтервал, менший зворотний струм, а недолік — більший прямий спад напруги.

6. Які види пробою характерні для германієвих і кремнієвих випрямних діодів?

Германієвий – тепловий пробій

Кремнієвий - лавинний пробій

7. Чому кремнієві діоди мають більші напруги пробою та спади напруги в прямому напрямі порівняно з германієвими?

У цілому зворотний струм у кремнієвих діодах значно менший, ніж в аналогічних германієвих діодах, оскільки питомий опір (ширина забороненої

зони) кремнію набагато більший, ніж германію. Із цієї ж причини прямий спад напруги у кремнієвих діодах більший, ніж у германієвих, і досягає 1,5 В.

8. Поясніть температурну залежність ВАХ діодів.

Германієві діоди можуть працювати в діапазоні температур  $-60...+75$  °С. Нижню межу зумовлено різницею температурних коефіцієнтів розширення германію та індію, перевищення якої призводить до розтріскування кристала, а верхню — початком власної провідності та різким погіршенням випрямних властивостей

Власна провідність кремнію настає за температури 125 °С, тому кремнієві випрямні діоди можуть працювати в більш широкому температурному інтервалі ( $-60...+125$  °С), ніж германієві.