ТЕОДОРА ПЕТРОВА
МАРИН ГЕОРГИЕВ

УЧЕБНО ПОСОБИЕ ЗА ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ ПО ЕЛЕКТРОННИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ЕЛЕМЕНТИ



2025
gabriell-e-lit

ТЕОДОРА ПЕТРОВА
МАРИН ГЕОРГИЕВ

УЧЕБНО ПОСОБИЕ ЗА ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ ПО ЕЛЕКТРОННИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ЕЛЕМЕНТИ

Първо издание

Рецензенти:

Венелин Терзиев
Професор, доктор на науките

Живо Петров
Доцент, доктор

Редактор:

Силва Василева

ISBN: 978-619-7705-69-0
gabriell-e-lit
София, 2025

ПРЕДГОВОР

Учебното пособие съдържа методически указания за лабораторни упражнения и виртуални лабораторни работи, в които се изследват основните характеристики и параметри на най-често използваните градивни елементи в електронните схеми.

Полупроводниковите елементи в дискретно и особено в интегрално изпълнение имат огромно разнообразие и изключително бурно развитие. По принцип на функциониране и структурен строеж по-голямата част от тях са свързани помежду си.

Свойствата на полупроводниковите елементи се определят от физическият принцип на действие, конструкцията и технологията на изготвянето им, електрическият режим на работа и влияние на външната среда.

При изследване на характеристиките и параметрите на разглежданите в упражненията полупроводникови елементи се правят непосредствени експериментални измервания.

Експерименталното измерване на характеристиките и параметрите се извършва чрез специално разработени лабораторни макети с вградено захранване, измервателни уреди, термостат и др. Виртуалните лабораторни работи са направени за работа с елементната база, прибори и устройства на Multisim 8. В тях са описани конкретните измервателни схеми и начина на работа с лабораторния макет.

Описаните упражнения са подредени тематично. В началото се дават най-необходимите теоретични знания, без да се правят математически изводи и задълбочени разглеждания, които могат да са намерят в съответната учебна литература.

При използване на ръководството трябва да се има в предвид, че лабораторните упражнения постоянно се актуализират и модернизират.

Учебното пособие може да бъде използвано от всички курсанти, студенти и докторанти в областите на техническите науки, икономиката, националната сигурност и администрация и управление.

1. ЕЛЕКТРОВАКУУМНИ ПРИБОРИ

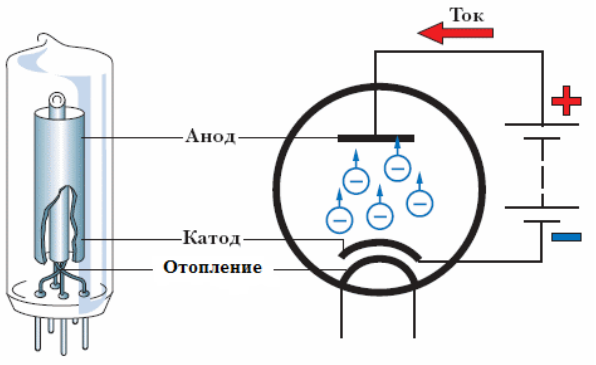
Взаимодействието на движещите се електрони с електрическото поле е основен процес в електровакуумните прибори.

Електронна емисия е явлението, свързано окъсването на електрони от повърхността на метала в околното пространство. Необходимата за това допълнителна енергия се нарича работа на излитане. В зависимост от начините на предаване на допълнителна енергия са различават термоелектронна, фотоелектронна, вторична и студена емисия.

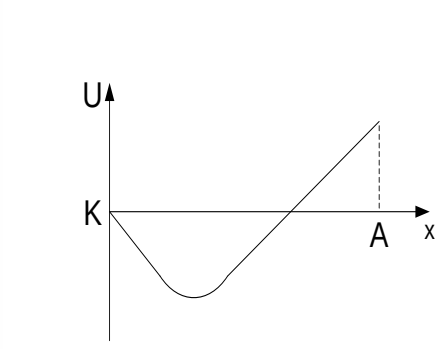
1.1. Триод

Триодът е електровакуумен прибор, който се използва за усилване и генериране на електрически сигнали. Конструктивно е оформен в стъклен или метален балон, където са разположени трите му електрода-катод, анод и решетка (фиг. 1.1).

Електродът, който е източник на електронна емисия, се нарича катод. В зависимост от начина на нагряване се различават катоди с пряко и косвено отопление, символичните означения на които са дадени на фиг. 1.2. при загряване на катода се увеличава кинетичната енергия на електроните и броят на тези от тях, които отделят от него. Излитащите електрони образуват електронен облак с отрицателен заряд близо до катода и в разпределението на потенциала по дължина на лампата се появява минимум (фиг. 1.3).



Фигура 1.1



Фигура 1.2

Фигура 1.3

Основна особеност на триода е възможността за управление на този минимум, а следователно и на анодния ток чрез изменение на напрежението на решетката. Резултантното поле при катода на лампата се формира от ускоряващото поле на анода и спиращото или ускоряващото поле на решетката. Тъй като решетката се

намира много по-близо до катода, влиянието на полето и е многократно по-голямо от влиянието на анода. Малки изменения на напрежението на решетката довеждат до значителни изменения на резултантното поле в областта на минимума на потенциала и до съществена промяна на количеството на електроните, достигащи до анода. По този начин ефикасно се регулира анодния ток.

При триодите катодния ток се определя между решетката и анода:

(1.1) $I_k = I_a + I_g$.

Зависимостта на тока I_k от U_a и U_g се дава от т. нар. закон за степента 3/2:

(1.2) $I_k = I_a + I_g = \Phi\left(U_g + DU_a\right)^{\frac{3}{2}}$,

където Ф е константа, зависеща от конструкцията и геометричните размери на електродите, а D-проницаемостта на решетката.

За определяна на катодния ток триодът може да се замени с еквивалентен диод. Съвместното действие на анодното и решетъчното напрежение може да се изрази чрез едно резултантно напрежение U_D, което създава същото поле около катода и причинява протичането на същия ток. Анодното напрежение на еквивалентния диод, при което катодният му ток е равен на тока на изследвания триод, се нарича действащо напрежение:

(1.3) $U_D = U_g + DU_a$.

I. Статични характеристики

Статичните характеристики дават зависимостта между токовете и напреженията при липса на съпротивление в анодната верига на лампата $(R_a = 0)$

Статичните характеристики на триода са:

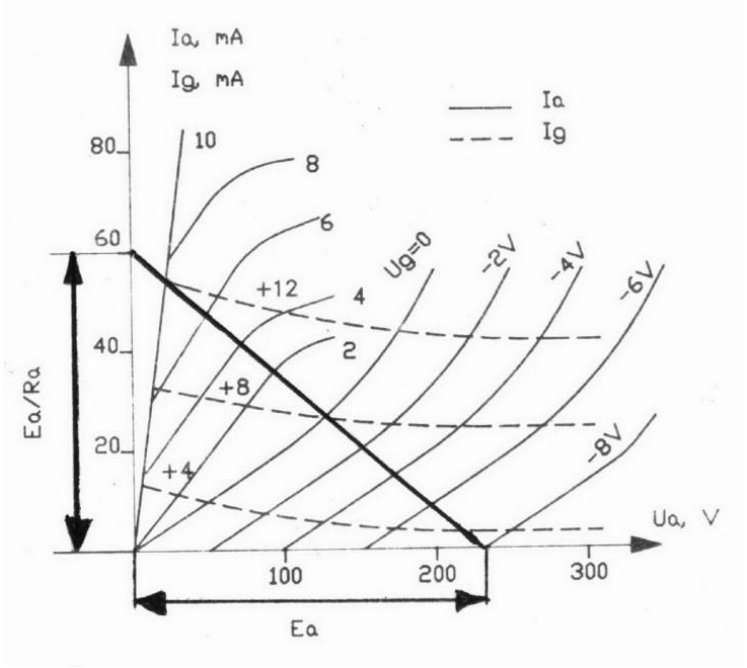
1. Анодна характеристика $I_a = f_1(U_a)$ *за* $U_g = const$ *;*

2. Анодно-решетъчна характеристика $I_a = f_2(U_g)$ *за* $U_a = const$ *;*

3. Решетъчно-анодна характеристика $I_g = f_3(U_a)$ *за* $U_g = const$ *;*

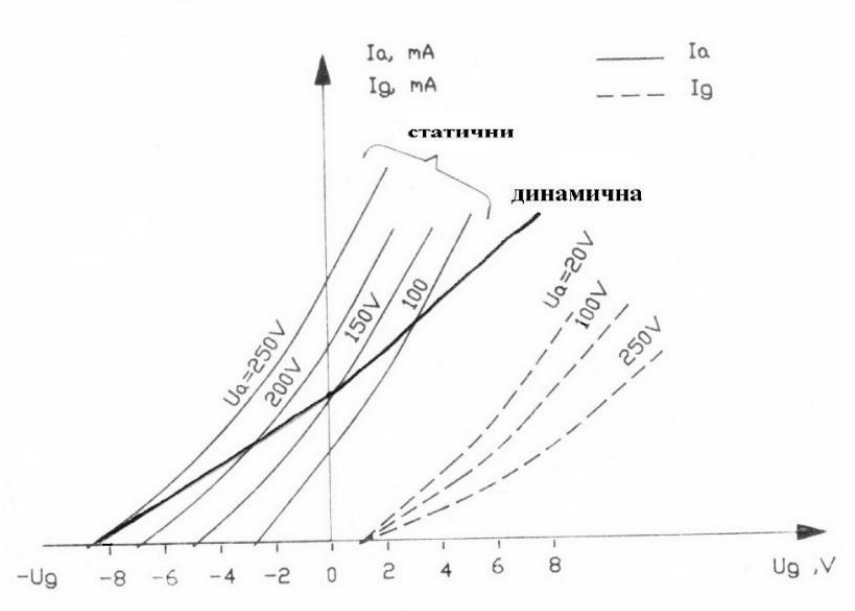
4. Решетъчна характеристика $I_g = f_4(U_g)$ *за* $U_a = const$.

Анодните и решетъчно-анодните характеристики са показани на фиг. 1.4 съответно с плътни и прекъснати линии.



Фигура 1.4

Анодно-решетъчните и решетъчните характеристики са показани по аналогичен начин на фиг. 1.5.



Фигура 1.5

От графиките на анодно-решетъчните характеристики може да се предели напрежението на запушване U'_g. Неговата големина може да се изчисли и от закона за степента $3/2$, като се положи $I_a = 0$:

(1.4) $$-U'_g = DU_a$$

II. Статични параметри

1. Стръмност S:

(1.4) $$S = \left(\frac{dI_a}{dU_g} \right) \quad \text{при} \quad U_a = const .$$

Стръмността определя количествено управляващата способност на решетката и зависи главно от емисионната способност на катода, плътността на навивките на решетката, разстоянието между решетката и катода и др. в съвременните триоди S е в границите от 1 до 30 mA/V.

Стръмността зависи от работната точка и може да бъде определена графично от анодните статични характеристики (фиг. 1.5) и от анодно-решетъчните характеристики, като диференциалите се заменят с крайни нарастъци (фиг. 1.6).

2. Вътрешно съпротивление по променлив ток:

(1.5) $$R_i = \left(\frac{dU_a}{dI_a} \right) \quad \text{при} \quad U_g = const .$$

То зависи от електрическите и конструктивни параметри на лампата (от плътността на управляващата решетка, разстоянието А-К и др.) и за съвременните триоди е в границата от 0,5 до 100 Ω. Постояннотоковото съпротивление се определя от израза:

(1.6) $$R = \frac{U_a}{I_a} .$$

Графично определяне на R_i може да се извърши от анодните и анодно-решетъчните характеристики за определена работна точка.

3. Проницаемост:

(1.7) $$D = -\left(\frac{dU_g}{dU_a} \right) \text{ при} \quad I_a = const .$$

За да се запази $I_a = const$ при увеличаване на анодното напрежение, е необходимо да се намали решетъчното напрежение, т. е. нарастъците на U_g и U_a имат противоположни знаци. Проницаемостта е безразмерна величина. Тя е винаги положителна и за маломощните усилвателни триоди има стойност от 0,01 до 0,25.

4. Статичен коефициент на усилване:

(1.8) $$\mu = \frac{1}{D} = -\left(\frac{dU_a}{dU_g} \right) \text{ при} \quad I_a = const .$$

μ може да се определи графично от анодните и от анодно-решетъчните характеристики.

Разглежданите параметри на триода са свързани със съотношението:

(1.9) $SR_i D = 1$ или $SR_i = \mu$.

Това уравнение се нарича вътрешно уравнение на триода и позволява да се изчисли един от параметрите, ако са известни останалите два.

III. Динамична характеристика

Динамичния режим на усилвателните лампи се характеризира с това, че в анодната верига е включено товарно съпротивление. Анодното напрежение в динамичен режим не е постоянно, а зависи от протичащия през лампата аноден ток:

(1.10) $U_a = E_a - I_a R_a$, от където $I_a = \frac{E_a}{R_a} - \frac{U_a}{R_a}$.

Последната зависимост представлява уравнение на права линия, пресичаща абцисната ос в т. $U_A = E_A$ и ординатната ос в т. $I_a = \frac{E_a}{R_a}$.

Тази права представлява динамичната анодна характеристика при товарно съпротивление R_a и се нарича товарна права.

Зависимостта между решетъчното напрежение и анодния ток в динамичен режим се изразява с динамичната анодно-решетъчна характеристика. Началото на динамичната анодно-решетъчна характеристика съвпада с началото на статичната характеристика, снета при $U_a = E_a$. С увеличаване на решетъчното напрежение и на анодния ток анодното напрежение намалява и динамичната характеристика минава през точки от статичните характеристики, снети при по-ниски анодни напрежения.

IV. Динамични параметри

1. Динамична стръмност:

(1.11) $S_d = \left(\frac{dI_a}{dU_g} \right)$ при $R_a > 0$.

Връзката между динамичната и статичната стръмност се дава от израза:

(1.12) $S_d = \frac{S}{1 + \frac{R_a}{R_i}}$.

2. Динамичен коефициент на усилване по напрежение:

(1.13) $$K = \left(\frac{dU_a}{dU_g} \right) \text{ при } R_a > 0 .$$

Връзката между динамичния и статичния коефициент се определя от:

(1.14) $$|K| = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}} .$$

Динамичният коефициент на усилване е винаги отрицателно число, защото входният и изходният сигнал са дефазирани на 180°. Недостатък на триода е относително малкият коефициент на усилване μ, което се дължи на факта, че управляващата решетка слабо екранира електронния поток от действието на полето на анода. Друг недостатък е големият междуелектроден капацитет C_{ag} (капацитет между анода и управляващата решетка), който оказва вредно влияние върху работата на триода при високи честоти. За да се избегнат тези недостатъци, се изменя конструкцията на лампата, като се поставя допълнителна решетка. Така се получава четириелектродна лампа.

Лабораторна работа № 1
Изследване на електронни лампи
Изследване на триод

1. Цел – Запознаване с конструкцията на типовете триодни лампи. Експериментално изследване на статичните характеристики и определяне на статичните параметри.

2. Задание

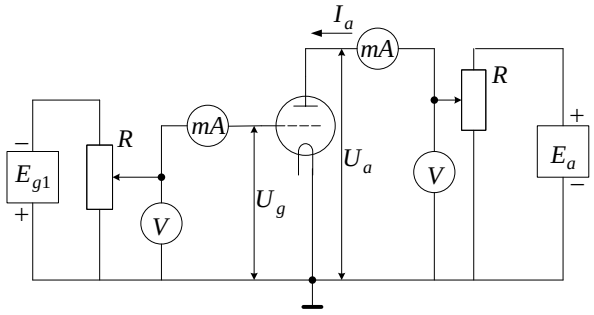
а) Да се свърже схемата за изследване на триода в статичен режим.

б) Да се снеме семейството анодно – решетъчни характеристики $I_a = f(U_{g1})$, при различни стойности на анодното напрежение $U_a = ...,V$.

в) Да се снеме семейството анодни характеристики $I_a = f(U_a)$, при различни стойности на решетъчното напрежение $U_{g1} = ..,V$.

г) За дадена работна точка от снетите статичните характеристики да се определят статичните параметри S и R_i.

3. Схема за експериментално изследване на триода



Фигура 1.6

4. Методически указания

Резултатите от измерванията да се нанесат в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

№	U_{g1},V	$U_a = ...,V$	$U_a = ...,V$	$U_a = ...,V$	$U_a = ...,V$	$U_a = ...,V$
		I_a,mA	I_a,mA	I_a,mA	I_a,mA	I_a,mA
1.						
2.						
3.						

Таблица 2

№	U_a,V	$U_{g1} = ..,V$	$U_{g1} = ..,V$	$U_{g1} = ..,V$	$U_{g1} = ..,V$	$U_{g1} = ..,V$
		I_a,mA	I_a,mA	I_a,mA	I_a,mA	I_a,mA
1.						
2.						
3.						

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ДИОДИ

Принципът на действие на значителна част от съвременните полупроводникови елементи е основан на спецификата на процесите, протичащи на границата на между две области в полупроводника с различен тип проводимост. Граничният (преходният) слой между двете области на единен полупроводников монокристал, една от които има проводимост от N тип, а другата с проводимост от P тип, се нарича PN преход. Такъв преход се създава по време на конкретен технологичен процес-дифузия, епитаксиално нарастване на или йонно внедряване, при което в полупроводника се въвеждат определено количество примеси.

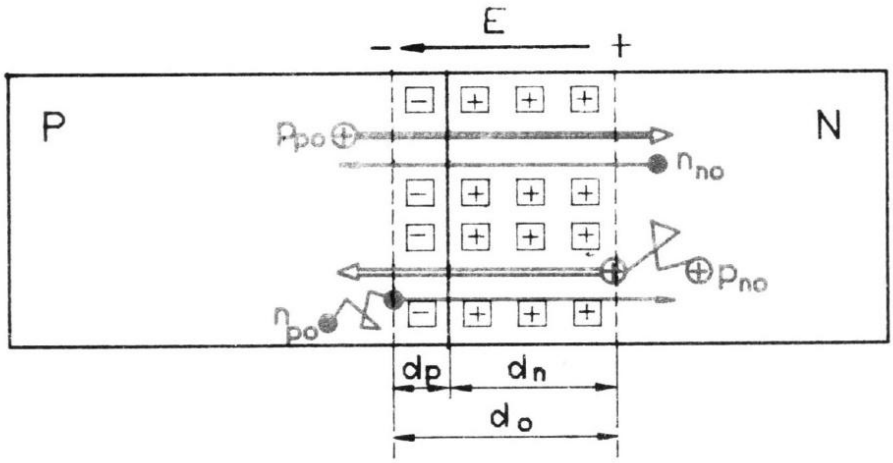
2.1. Равновесно състояние на PN прехода

Основни токоносители в P областта се дупките, а в N областта-електроните. Концентрациите им се определят съответно от концентрацията на внесените акцепторни и донорни примеси, тъй като при стайна температура всички примесни атоми са йонизирани. Освен основни токоносители във всяка от областите има и неосновни, дължащи се на междузонни преходи на електрони от валентната зона в зоната на проводимост. На практика PN преходите се правят несиметрични.при тях концентрацията на акцептори в P областта се различава с няколко порядъка от концентрацията на донорите в N областта. За структура с по-нискоомна P област $N_A \rangle\rangle N_D$ и съответно $p_{p0} \rangle\rangle n_{n0}$.

Допирната повърхност между двете области, където се сменя проводимостта, се нарича металургична граница. От двете и страни има разлика на концентрациите на едноименните токоносители – в единия слой те са основни, а в другия – неосновни. В граничните области поради наличието на градиент на концентрациите започва движение на основни токоносители. Дупките от P областта дифундират в N областта, а електроните от N областта – в P областта и навлизайки в тези областти, рекомбинират с основните токоносители в тях. В резултат намалява концентрацията на основни токоносители в граничните области (създава се обеднен слой).

При преминаване на дупки от P в N слоя те оставят след себе си некомпенсиран отрицателен обемен заряд на неподвижните

йонизирани акцепторни атоми. Аналогично електроните, напуснали N слоя, оставят там некомпенсиран положителен заряд на йонидираните донорни процеси (фиг. 2.1). Така образуваният двоен слой от некомпенсирани йони от двете страни на металургичната граница се нарича PN преход. Тъй като плътностите на зарядите са различни, то и широчината на областта на некомпенсирания заряд е различна.



Фигура 2.1

В слоя с по-малка концентрация (N областта) широчината на областта на некомпенсирания заряд е по-голяма - $d_n \rangle\rangle d_p$, т.е. PN преходът е съсредоточен главно във високоомната област.

(2.1) $$d_0 = d_p + d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r . U_0}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)};$$

(2.2) $$d_0 \approx d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r . U_0}{qN_D}}.$$

N_A и N_D са концентрациите съответно на акцепторните и донорните примеси, q е зарядът на електрона, а U_0- константната потенциалана разлика на PN прехода:

(2.3) $$U_0 = \varphi_T \ln \frac{N_A . N_D}{n_i^2}.$$

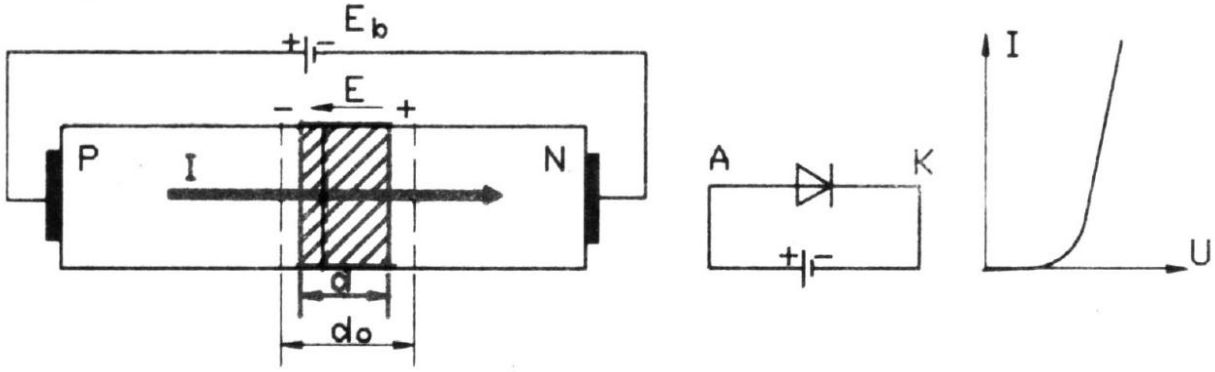
2.2. Неравновесно състояние на PN прехода

Условията за преминаване на токоносители през прехода съществено се изменят, ако се приложи външно напрежение. важна роля при това играе полярността на напрежението. Процесите в PN прехода при наличие на външно напрежение

обуславят изправителните свойства на диода и волт-амперната му характеристика.

2.2.1. Право включване

Външното напрежение е в права посока, ако положителния полюс на токоизточника се включи към P областта (анод), а отрицателния полюс – към N областта (катод), фиг. 2.2 *а,б*.



а) *б)* *в)*

Фигура 2.2

При това включване електрическото поле от източник е противоположно на вътрешното поле. В резултат намалява сумарното поле на прехода, стеснява се обемния заряд и намалява височината на потенциалната бариера, като става $q(U_0 - U)$. Понижаването на потенциалната бариера облекчава преминаването на основни токоносители и спомага за значително увеличение на дифузния ток. Дупките от P областта преодоляват потенциалната бариера и попадат в N областта, където нараства концентрацията на неосновни токоносители. Аналогично и електроните от N областта преминават по-лесно в P областта и увеличават концентрацията на неосновни токоносители там.

Увеличаването на концентрацията на неосновни токоносители непосредствено до PN прехода над равновесната при право включване се нарича инжекция. В несиметрични преходи се инжектират токоносители предимно от нискоомния слой (емитера) във високоомния (базата).

Дрейфовият ток несе променя, тъй като той зависи само от концентрацията на неосновните токоносители, намиращи се на

една дифузна дължина от прехода, а не от височината на потенциалната бариера.

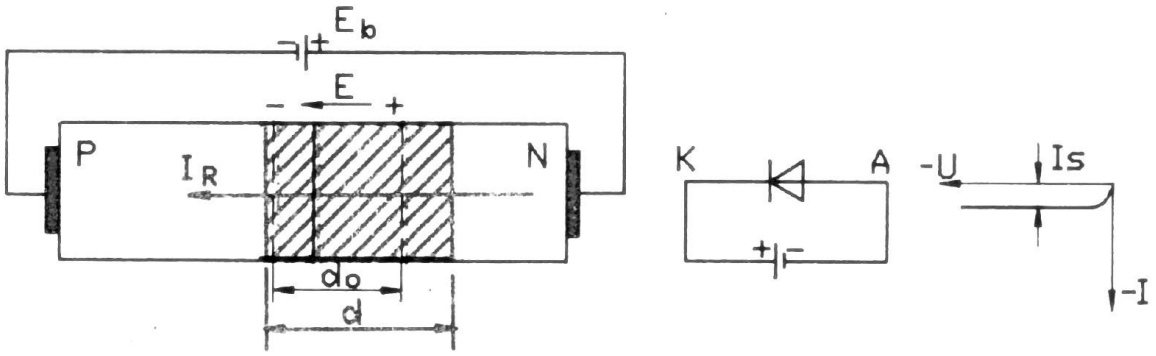
Резултантния ток в права посока се определя от разликата между дифузния и дрейфовия ток –

(2.4) $I = I_D - I_E$, като $I_D >> I_E$.

С увеличаване на напрежението намалява височината на потенциалната бариера и рязко се увеличава токът през прехода (фиг. 2.2*в*).

2.2.2. Обратно включване

При прилагане към PN прехода на външно напрежение в обратна посока (положителния полюс към N областта и отрицателния полюс към P областта – фиг. 2.3*а,б*) потенциалната бариера се увеличава, тъй като посоките на вътрешното и външното поле съвпадат. При това се увеличават и обемния заряд и неговата ширина.



а) *б)* *в)*

Фигура 2.3

Дифузния ток намалява, тъй като се затруднява преминаването на основни токоносители през високата потенциална бариера на прехода. Дрейфовия ток не се променя, но при обратно включване той превишава дифузионния. През диода ще тече ток в обратна посока, който се стреми към стойност, определена от дрейфовия ток.

Концентрацията на неосновни токоносители непосредствено до прехода намалява поради ускоряващото действие на полето и прехвърлянето им през прехода.това явление се нарича екстракция на неосновни токоносители. При прилагане на по-голямо напрежение в обратна посока токът се запазва почти постоянен

(фиг. 2.3*в*), тъй като $I_D \approx 0$, а I_E не зависи от височината на потенциалната бариера, съответно от обратното напрежение до определена стойност.

2.3. Физични ефекти при реалните диоди

Експериментално снетата характеристика на реалния диод се различава от тази на идеалния, тъй като при извеждането на волт-амперната характеристика на идеалния PN преход не са отчетени редица физични ефекти. При различни режими на работа преобладават някой от тях и трябва да се отчита влиянието им.

2.3.1. Волт-амперна характеристика на реален диод в права посока

Главните причини, поради които реалната характеристика се отличава от идеалната в права посока, са:

- наличието на ток на рекомбинация в прехода;
- съпротивлението на базовият слой;
- модулацията на това съпротивление при високи нива на инжекция.

Рекомбинационния ток е обусловен от токоносители, които навлизат в PN прехода, но нямат достатъчно енергия да минат в съседния слой и да рекомбинират. Големината на този ток зависи от вида на материала и има съществено значение за диоди с по-широка забранена зона.

С увеличаване на тока през диода забележимо влияние върху волт-амперната характеристика оказва падът на напрежение върху обемното съпротивление на базата. Поради него напрежението върху PN прехода е по-малко от приложеното на изводите.

(2.5) $$I = I_s\left(e^{\frac{U - I.r_B}{\varphi_T}} - 1\right);$$

(2.6) $$U = \varphi_T \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) + Ir_B .$$

При достатъчно голям ток падът върху съпротивлението на базата преобладава и експоненциалната волт-амперна характеристика се изражда – получава се изроден (омичен) участък. Характеристиката на диода от експоненциална се превръща в степенна.

За отразяване на различните физични ефекти в реалния диод в основното уравнение на диода се въвежда коригиращ коефициент

m със стойност между 1 и 2. така волт-амперната характеристика на реалния диод добива вида:

(2.7) $$I = I_s\left(e^{\frac{U-I.r_B}{m.\varphi_T}} - 1\right).$$

2.3.2. Ефекти в реалните диоди при обратно свързване

При обратно включване главни причини за отклонение от идеалната характеристика са:

- термогенерация на токоносители в областта на прехода;
- утечка по повърхността;
- явления на пробив.

Така обратния ток се определя от няколко съставки:

(2.8) $$I_R = I_s + I_G + I_{УТ} + I_{BR}.$$

1. Токът на насищане I_s (обратния топлинен ток) се обуславя от неосновните токоносители, генерирани в намиращите се на една дифузионна дължина слоеве непосредствено до прехода. Той не зависи от приложеното напрежение.

2. Токът на термогенерация I_G се дължи на генерацията на токоносители под действие на топлината в областта на обемния заряд и зависи от приложеното обратно напрежение ($I_G \sim \sqrt{U}$). Генерацията на токоносители е от значение за диоди с по-голяма широчина на забранената зона (по-малка собствена концентрация n_i), тъй като $I_G \sim n_i$, а $I_s \sim n_i^2$.

При стайна температура за Si диоди обратния ток се определя от тока на термогенерация $(I_G >> I_s)$, докато за Ge диоди той се обуславя от топлинния ток $(I_S >> I_G)$.

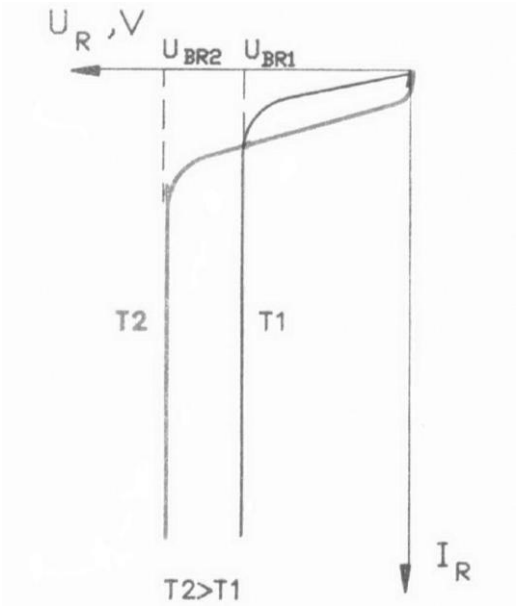
3. Токът на утечка се дължи на дефекти на кристала, абсорбация на примесни атоми, замърсявания и др. Утечните токове влошават изправителните свойства на полупроводниковите диоди и увеличават нестабилността на техните характеристики и параметри. За съвременните силициеви диоди утечният ток е малък и може да се пренебрегне.

4. Токът на пробив I_{BR} се обуславя от явленията на пробив.

2.3.3. Пробиви в PN прехода прехода

Пробив на диода е явлението, свързано с рязко увеличаване на обратния ток при достигане на определена критична стойност U_{BR} на обратното напрежение върху PN прехода. В зависимост от

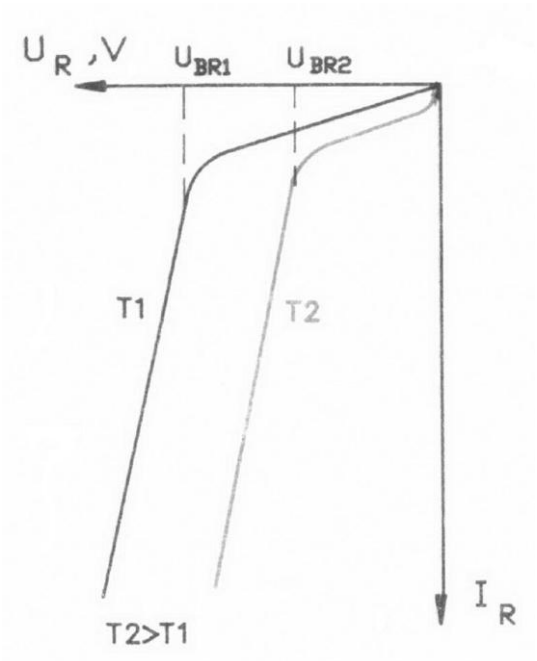
причините, предизвикващи появата на допълнителни токоносители, се различават електрически и топлинен пробив. Електрическият пробив от своя страна може да бъде лавинен и тунелен.
Лавинният пробив е обусловен от лавинното нарастване на броя на токоносителите под действието на силно електрическо поле. При големи обратни напрежения неосновните носители на заряд, постъпващи в прехода, се ускоряват от полето, придобиват достатъчна енергия и при сблъскването си с атоми от кристалната решетка избиват валентни електрони. При това се образуват допълнителни двойки токоносители – електрони и дупки. Избитите електрони се ускоряват от полето и предизвикват йонизация на нови атоми. Описаният процес има лавинообразен характер и протичащия ток се ограничава само от външното съпротивление на във веригата. Лавинният пробив възниква в широки PN преходи при по-високи обратни напрежения.



Фигура 2.5

При повишаване на температурата се увеличава хаотичното движение на атомите в кристала, намалява се дължината на свободния пробег на електроните и енергията, която те могат да придобият при движението си в електрическото поле. За настъпване на йонизация е необходимо да се повиши интезитетът на електрическото поле. Следователно напрежението на лавинен

пробив нараства с повишаване на температурата (положителен температурен коефициент на напрежението на пробив - TKU_{BR}, фиг. 2.5).
Лавинен пробив се наблюдава при високоомните преходи, като пробивното напрежение е $U_{BR} > 7V$.
При тунелния пробив увеличаването на концентрацията на токоносители в обеднения слой се получава чрез непосредствено освобождаване на валентни електрони и превръщането им в свободни под действието на силното електрическо поле на слоя.
С повишаване на температурата се увеличава вероятността за тунелно преминаване на токоносители през прехода и напрежението на тунелен пробив намалява (TKU_{BR} е отрицателен – фиг. 2.6).



Фигура 2.6

Лавинният и тунелният пробив се съпровождат с появата на почти вертикален участък в обратната частна волт-амперната характеристика, тъй като малко изменение на напрежението предизвиква голяма нарастване на броя на токоносителите и следователно на тока. И двата вида пробиви са обратими. Те не довеждат до повреда на диода и при намаляване на напрежението свойствата му се запазват.

Топлинният пробив възниква, когато при протичане на ток приз PN прехода се наруши равновесието между отделената топлинна мощност в прехода и излъчената мощност извън корпуса.

При подаване на обратно напрежение U_R практически цялото напрежение пада върху PN прехода. Отделената мощност $P = U_R I_R$ загрява полупроводниковата структура. Отделената мощност в резултат на топлопроводимостта е:

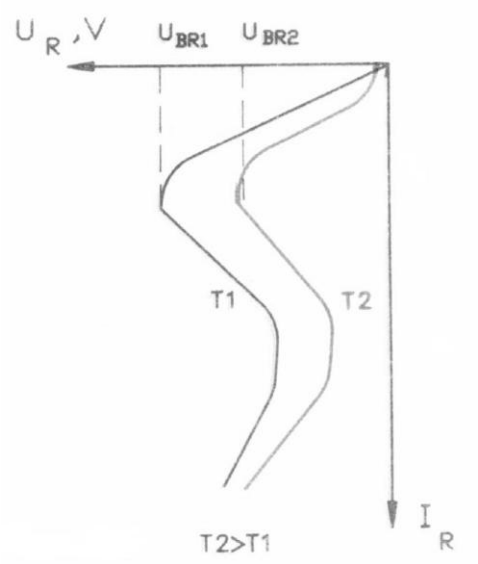
(2.9) $$P = \frac{T_j - T_c}{R_{th\ jc}},$$

където T_j е температурата на прехода, T_c - температурата на корпуса и $R_{th\ jc}$ - топлинното съпротивление на преход-корпус.

При повишаване на обратното напрежение възникват условия за нарушаване на баланса между отделената в прехода и отведена мощност:

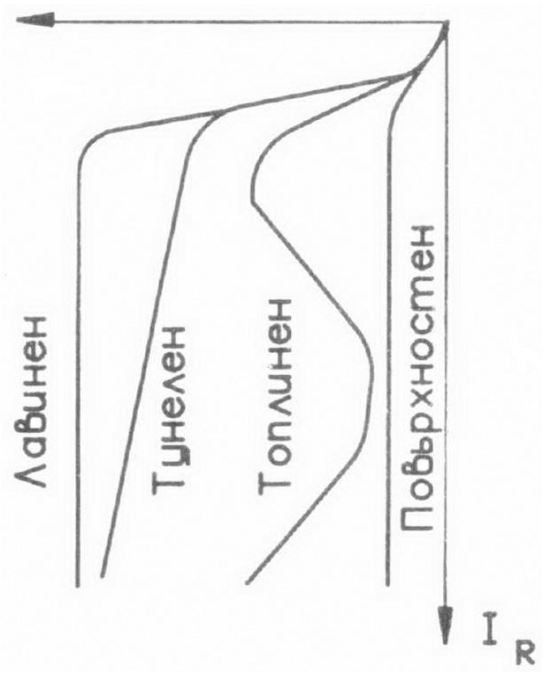
(2.10) $$U_R . I_R > \frac{T_j - T_c}{R_{th\ jc}}.$$

При това се повишава температурата. Започва интензивна термогенерация на токоносители в PN прехода, увеличава се обратния ток, което от своя страна води до повишаване на температурата. Процесът се развива лавинообразно и поради нееднородностите на прехода има локален характер, като даденият участък се разтапя и приборът се поврежда. Напрежението на топлинен пробив бързо намалява с повишаване на температурата на околната среда (фиг. 2.7).



Фигура 2.7

При топлинен пробив волт-амперната характеристика в обратна посока има участък с отрицателно диференциално съпротивление. Колкото по-малък е тока в обратна посока, толкова по-високо е напрежението на топлинен пробив. Силициевите диоди имат с няколко порядъка по-малък обратен ток от германиевите диоди и допускат експлоатация при по-високи температури на полупроводниковата структура. те се използват при прилагане на по-високи обратни напрежения отколкото германиевите.



Фигура 2.8

Поради влиянието на замърсявания, влага, повърхностни канали с малко сечение, които обуславят големи повърхностни утечни токове, на повърхността на прехода може да настъпи локален пробив при интензитет на полето, значително по-малък от този, при който възниква в обема. По своята природа повърхностния пробив може да бъде лавинен, тунелен или топлинен. На фиг.2.8 са показани за сравнение волт-амперните характеристики на PN преход в обратна посока при различни видове пробиви.

Лабораторна работа № 2
Полупроводникови диоди

2.1. Цел

Експериментално изследване на волт - амперните характеристики на полупроводникови диоди. Определяне и сравняване на параметрите на диодите със зададените каталожни данни в справочниците.

2.2. Задание

а) Да се разгледа опитната постановка за изследване на полупроводникови диоди.

б) Да се запишат каталожните данни на диодите, които ще се изследват: точкови диоди - Д2Е, SFД-104, SFД-108 и плоскостните диоди Д7Г, Д7Ж.

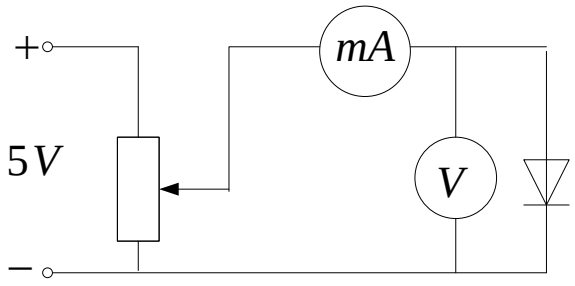
в) Да се снеме волт - амперната характеристика на точков диод в право и обратно включване.

г) Да се снеме волт - амперната характеристика на плоскостен диод в право и обратно включване.

д) Да се определят параметрите S и R_i за изследваните прибори.

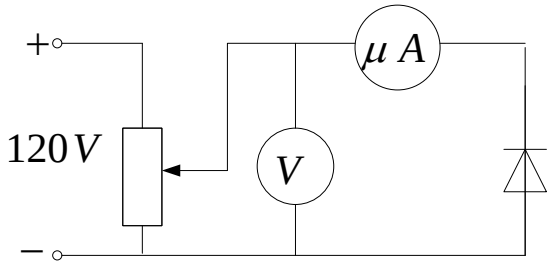
2.3. Схеми за експериментално изследване на полупроводниковите диоди

Снемането на волт-амперна характеристика на диодите в право включване се реализира по схемата на фиг. 1.



Фигура 1

Снемането на волт-амперна характеристика на диодите в обратно включване се реализира по схемата на фиг. 2. Волтметърът е свързан пред амперметъра с цел да се избегне влиянието на неговото вътрешно съпротивление.



Фигура 2

2.4. Методически указания

При провеждане на изследванията да не се превишават допустимите токове и напрежения на изследваните диоди. Резултатите от измерванията в права посока $I_F = f(U_F)$ и за измерванията в обратна посока $I_R = f(U_R)$ се нанасят в таблици.

А) точков диод

Таблица 1

U_F, V									
I_F, mA									

Таблица 2

U_R, V									
I_R, mA									

Б) плоскостен диод

Таблица 3

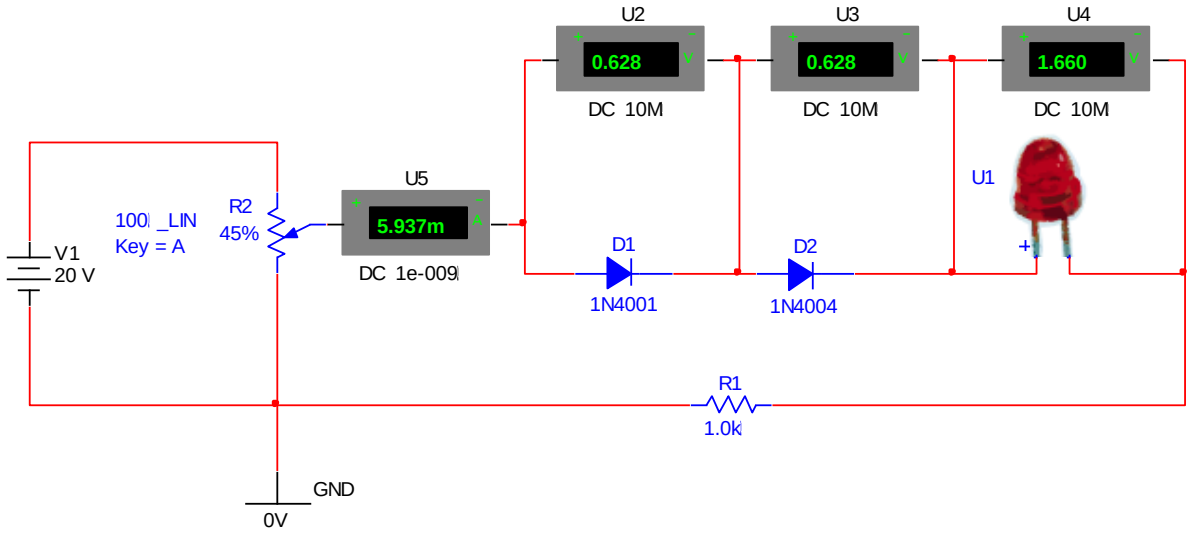
U_F, V									
I_F, mA									

Таблица 4

U_R, V									
I_R, mA									

Лабораторна работа № 3
Права ВАХ на полупроводников диод

3.1. Намерете файл права ВАХ на диод със схемата, която е показана на фигура 1. Файлът ще откриете чрез пътя:
Multisim – File – Open – My Documents – Multisim - PVAH.
Разширете прозореца.
От измервателната схема се вижда, че обектите на изследване са два изправителни диода (D_1 и D_2) и един светодиод (U1). Стойността на тока през последователно съединените изследвани диоди с крачка 5% от максималния ток, който се задава от източник на ток. Тези токове се измерват с помощта на амперметър, а пада на напрежението през диода при тези токове с волтметър. Всяка нова стойност на тока се получава, чрез натискане на клавиш A за увеличаване и A + Shift на клавиатурата за намаляване.



Фигура 1

3.2. Натискайки клавиш A+Shift на клавиатурата на 5% за „зануляване”, т.е. задаваме първата стойност на тока през диода $I = 0$.
3.3. Включваме схемата да работи, като преместваме превключвателя, който се намира горе в десния ъгъл на прозореца от положение „0” в положение „1”. При което амперметъра показва нула, а волтмерите ще покажат стойности близки до

нулата пад на напрежението на диодите (първата точка от клона на ВАХ).

3.4. След последователното натискане на клавиша A, снемете измерените показания от приборите и ги нанесете в таблица 1, където ще отбележите при каква най-малка стойност на тока светодиода светва.

Експериментални данни за определяне на правата ВАХ на полупроводников диод

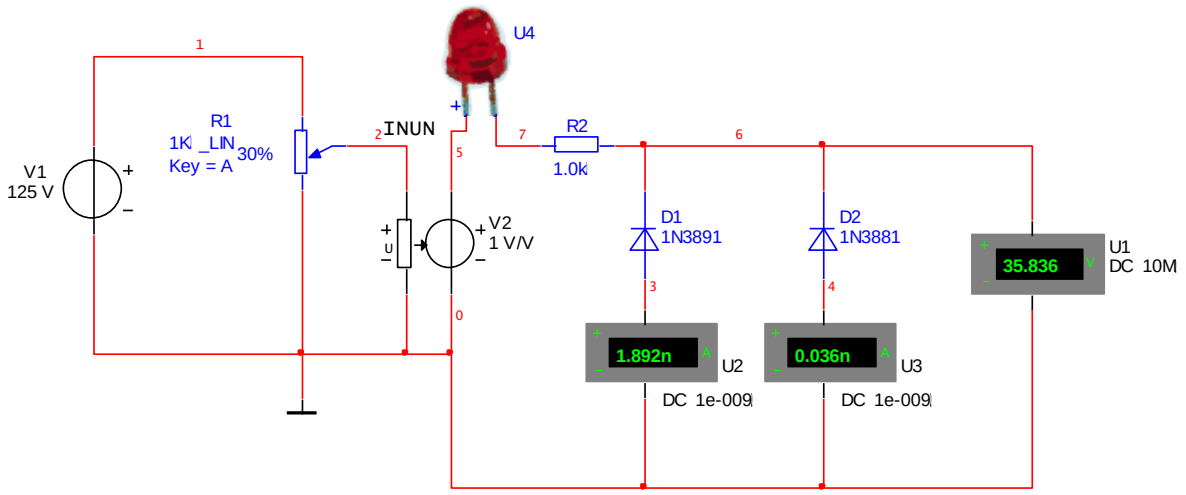
Таблица 1

I, mA	$U,\ V$		
	D_1	D_2	LED1

3.5. Изключете схемата и затворете прозореца.

Обратна ВАХ на полупроводников диод

3.1. Намерете файлът обратна ВАХ на диод със схемата, която е показана на фигура 2. Файлът ще откриете чрез пътя:
Multisim – File – Open – My Documents – Multisim - OVAH.
Разширете прозореца.



Фигура 2

От измервателната схема се вижда, че обектите на изследване са два диода (D_1 и D_2) и един светодиод (U4). Стойността на тока през изследваните диоди е с крачка 5% от максималния ток, който се задава от източник на ток. Всяка нова стойност на тока се получава, чрез натискане на клавиш A за увеличаване и A + Shift на клавиатурата за намаляване.

3.2. Натискайки клавиш A+ Shift на клавиатурата на 5% за „зануляване", т.е. задаваме първата стойност на напрежението през диодите е $U = 0$.

3.3. Включваме схемата да работи, при което волтметъра показва нула, а ампеметрите ще покажат стойности близки до нулата пад на тока на диодите (първата точка от обратната ВАХ).

3.4. След последователното натискане на клавиша A, снемете измерените показания от приборите и ги нанесете в таблица 2, и отбележите при каква най-малка стойност на напрежението светодиода светва.

Експериментални данни за определяне на обратния клон на ВАХ на полупроводников диод

Таблица 2

$U,\ V$	$I,\ mA$	
	D_1	D_2

3.5. Изключете схемата и затворете прозореца

Съдържание на протокола

1. Цел на лабораторното упражнение.
Експериментално изследване на волт - амперните характеристики на полупроводникови диоди. Определяне и сравняване на параметрите на диодите със зададените каталожни данни в справочниците.
2. Задание:
а) Да се разгледа опитната постановка за изследване на полупроводникови диоди.
б) Да се запишат каталожните данни на диодите, които ще се изследват.
в) Да се снеме волт - амперната характеристика диод в право и обратно включване.
д) Да се определят параметрите S и R_i за изследваните прибори.
3. Схеми на измервателните установки.
4. Резултатите от измерванията нанесени в таблиците и графики на ВАХ.
5. Стойностите на тока и напрежението, при които светодиода светва.
6. Изводи

3. БИПОЛЯРНИ ТРАНЗИСТОРИ. ИЗСЛЕДВАНЕ НА САТАТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БИПОЛЯРНИЯ ТРАНЗИСТОР

3.1. Конструкция, схеми на свързване, режими на работа и принцип на действие на биполярния транзистор

Транзисторът е активен полупроводников елемент, чието основно предназначение е да усилва електрически сигнали по мощност. Според принципа на действие транзисторите се подразделят на биполярни и униполярни (полеви). В полупроводниковия монокристал, явяващ се основна частна биполярния транзистор, са формирани два $p-n$ прехода, които разделят кристала на три области с различен тип проводимост, като съответно имаме два типа транзистори - $n-p-n$ и $p-n-p$. Едната от крайните области, която е най-силно легирана и най-малка по площ се нарича емитер, другата крайна област – колектор, а средната – база. Така се наричат и изводите от трите области. $P-n$ преходът между емитера и базата е емитерен, а между базата и колектора – колекторен. В т.н. бездрейфови транзистори базата е най-слабо легираната област, примесите в нея са разпределени равномерно и движението на носителите през нея е вследствие на дифузията. В дрейфовите транзистори разпределението на примесите в базата е неравномерно и носителите се движат през нея както посредством дифузия, така и под действието на вътрешно електрическо поле.

В зависимост от това, кой от изводите на транзистора е общ за входната и изходната верига, различаваме три основни схеми на свързване на транзистора – обща база (ОБ), общ емитер (ОЕ) и общ колектор (ОК). Транзистора може да работи в четири режима, които се определят от начина на включване на $p-n$ преходите: **активен режим** – емитерния $p-n$ преход е включен право, а колекторният е включен обратно; **режим на насищане** – и двата $p-n$ прехода са включени право; **режим на отсечка** – и двата $p-n$ прехода са включени обратно; **инверсен режим** – колекторният $p-n$ преход е включен право, а емитерният е включен обратно.

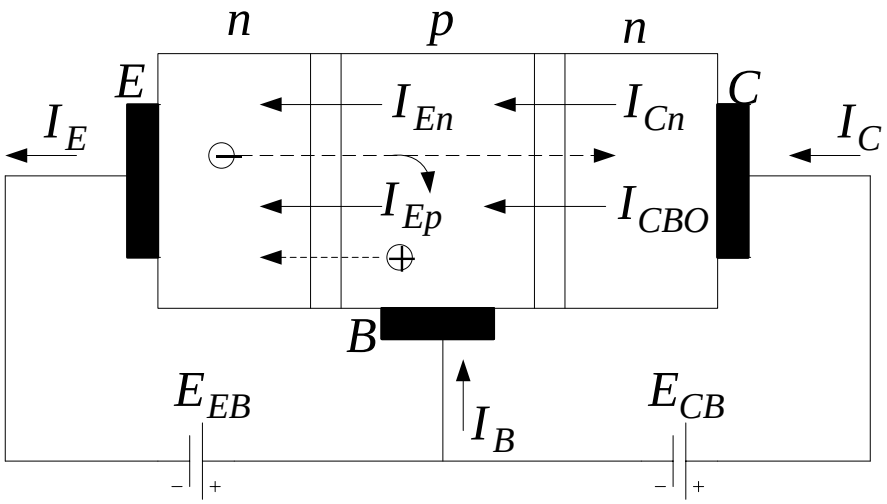
Постояннотоковият режим на работа на транзистора зависи от полярността на външните захранващи източници. В усилвателните схеми транзисторът работи в активен режим. При работа в ключов

режим (в логическите схеми) транзисторът работи в режим на насищане или отсечка.

При работа в активен режим през право включения емитерен $p-n$ преход се инжектират неосновни токоносители в базата, които вследствие на дифузи и дрейф под действието на вътрешно електрическо поле (за дрейфовите транзистори) достигат до колекторния $p-n$ преход. Полето на обратно включения колекторен преход прехвърля тези носители в колекторната област и във външната верига протича ток. Част от носителите рекомбинират в базата с основни носители и за запазване електронеутралността на базата през базовия извод втичат основни носители, които обуславят базовия ток. Този механизъм на действие на транзистора не зависи от схемата на свързване.

3.2. Коефициенти на усилване по ток и уравнения на колекторния ток при схеми на свързване ОБ, ОЕ и ОК.

Основните съотношения между токовете в транзистора са илюстрирани на базата на един $n-p-n$ транзистор, свързан по схема ОБ и работещ в активен режим (фиг. 3.1).



Фигура 3.1

Инжектираните в базата през право включения емитерен $p-n$ преход електрони обуславят тока I_{En}. При обратната инжекция на дупки от базата в емитера се получава тока I_{Ep}, но тъй като емитера е много по-силно легиран от базата $I_{Ep} >> I_{En}$. Токът във външната верига I_E е:

(3.1) $I_E = I_{En} + I_{Ep}$.

Коефициентът на инжекция на емитера γ е:

(3.2) $$\gamma = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}} = \frac{I_{En}}{I_E},$$

γ има стойности от 0,95 до 0,995.

Честотата на неосновните носители, които рекомбинират в базата се отчита с коефициентът на пренасяне в базата χ:

(3.3) $$\chi = \frac{I_{Cn}}{I_{En}}, \qquad \chi = 0{,}96 \div 0{,}999.$$

Отношението на частта от емитерния ток, достигнал до колектора I_{Cn}, към общия емитерен ток I_E се нарича **интегрален коефициент на усилване (предаване)по ток в схема ОБ** и се означава с $\overline{\alpha}$.

(3.4) $$\overline{\alpha} = \frac{I_{Cn}}{I_E} = \gamma.\chi, \qquad \overline{\alpha} = 0{,}93 \div 0{,}999.$$

При схема ОБ $\overline{\alpha}$ е малко по-малък от единица и усилване по ток нямаме. През областта на обратно включения колекторен $p-n$ преход протича и обратния ток I_{CBO}. Общият колекторен ток I_C е равен:

(3.5) $I_C = I_{Cn} + I_{CBO}$.

Като заместим $I_{Cn} = \overline{\alpha} I_E$ в (5) получаваме т. н. уравнение на колекторния ток при схема ОБ:

(3.6) $I_C = \overline{\alpha} I_E + I_{CBO}$,

(3.7) $$\overline{\alpha} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} = \frac{I_C}{I_E}.$$

При работа с променлив сигнал се използва диференциалният коефициент на усилване по ток α:

(3.8) $$\alpha = \left(\frac{dI_C}{dI_E}\right) \text{ при} U_{CB} = const$$
$$\alpha = \overline{\alpha} + I_E \frac{d\overline{\alpha}}{dI_E}$$

При малки амплитуди на променливия сигнал:

(3.9) $$\alpha = \frac{I_C}{I_E},$$

$\overline{\alpha}$ и α малко се различават по стойности и обикновено се приема, че $\overline{\alpha} = \alpha$.

При обратни напрежения на колекторния $p-n$ преход близки до пробивните, коефициентът на усилване по ток става:

(3.10) $$\bar{\alpha}_M = \bar{\alpha} M \text{ ,}$$

където M е коефициента на ударна йонизация.

При тези условия в предпробивната област $\bar{\alpha}$ може да стане и по-голям от единица. За токовете в транзистора може да се запише :

(3.11) $$I_E = I_C + I_B .$$

При схема на свързване ОЕ входния ток се явява базовия ток, а изходен – колекторният. Като заместим в уравнението на колекторния ток при схема ОБ (3.6) I_E с (3.11), получаваме:

(3.12) $$I_C = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} I_B + \frac{1}{1-\bar{\alpha}} I_{CBO} .$$

От тук уравнението на колекторния ток при схема ОЕ има вида:

(3.13) $$I_C = \bar{\beta} I_B + (1+\bar{\beta}) I_{CBO} \text{ ,}$$

където:

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \text{ ;} \qquad 1+\bar{\beta} = \frac{1}{1-\bar{\alpha}} .$$

$\bar{\beta}$ се нарича **интегрален коефициент на усилване по ток в схема ОЕ** и има обикновено стойности в границите $\bar{\beta} = 20 \div 200$:

(3.14) $$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} = \frac{I_C}{I_B} .$$

Диференциалният коефициент на усилване по ток β е:

(3.15)

$$\beta = \left(\frac{dI_C}{dI_B}\right)_{U_{CE}=const} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right)_{U_{CE}=const} \text{ ,} \qquad \beta = \left(\frac{i_C}{i_B}\right)_{U_{CE}=0} .$$

На практика за средни стойности на колекторния ток $\bar{\beta} = \beta$.

При схема на свързване ОК входния ток е I_B, а изходния - I_E и:

$$I_E = (1+\beta) I_B + (1+\beta) I_{CBO} .$$

Коефициентът на усилване по ток в схема ОК е с единица по-голям от този в схема ОЕ.

3.3. Статични характеристики на транзистора.

При транзисторите разглеждаме сладните семейства статични характеристики:

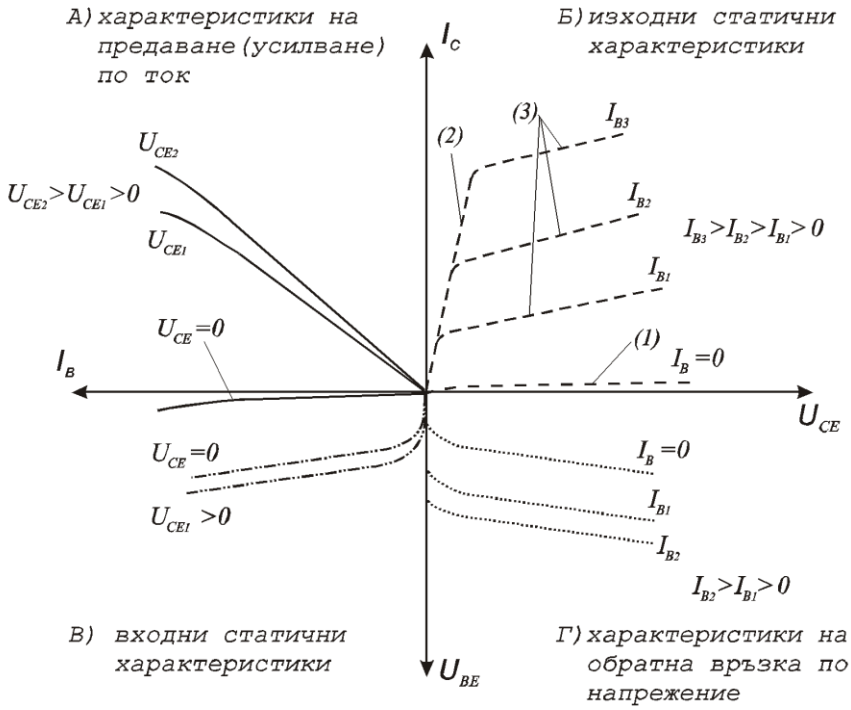
а) **входни характеристики** – зависимост на входния ток от входното напрежение при постоянно изходно напрежение;

б) **изходни характеристики –** зависимост на изходния ток от изходното напрежение при постоянен входен ток;

в) **характеристики на усилване (предаване)по ток** – зависимост на изходния ток от входния ток при постоянно изходно напрежение;

г) **характеристики на обратната връзка по напрежение** – зависимост на входното напрежение от изходното напрежение при постоянен входен ток .

На фиг. 3. 2 са представени статичните характеристики на един $n-p-n$ транзистор при схема на свързване ОЕ.



Фигура 3. 2

а)- входни характеристики; *б)*- изходни характеристики; *в)*- характеристики на усилване по ток; *г)*- характеристики на обратната връзка по напрежение.

3. 4. h - параметри на транзистора

h- параметрите на транзистора са статични параметри и се използват най-често в практиката, тъй като лесно могат да се определят експериментално за променлив сигнал или графично от статичните характеристики. значението на отделните h- параметри при схема на свързване ОЕ е следното:

h_{11E} - входно съпротивление,

$$h_{11E}=\left(\frac{dU_{BE}}{dI_B}\right)\Bigg|_{U_{CE}=const}\approx\left(\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}\right)\Bigg|_{U_{CE}=const};$$

h_{12E} - коефициент на обратна връзка по напрежение,

$$h_{12E} = \left(\frac{dU_{BE}}{dU_{CE}} \right) \Bigg|_{I_B = const} = \left(\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \right) \Bigg|_{I_B = const} \quad ;$$

h_{21E} - коефициент на усилване по ток,

$$h_{21E} = \left(\frac{dI_C}{dI_B} \right) \Bigg|_{U_{CE} = const} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right) \Bigg|_{U_{CE} = const} \quad ;$$

h_{22E} - изходна проводимост,

$$h_{22E} = \left(\frac{dI_C}{dU_{CE}} \right) \Bigg|_{I_B = const} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right) \Bigg|_{I_B = const} .$$

При схема на свързване ОБ h - параметрите се дефинират по същия начин като I_B се заменя с I_E, U_{CE} с U_{CB}, U_{BE} с U_{EB} и съответно се означават с индекс B (h_{11B} и т. н.).

Лабораторна работа № 4
Изследване на биполярни транзистори
Изследване характеристиките на транзистор свързан по схема общ емитер (ОЕ)

1. Цел
Експериментално изледване на статичните характеритики и параметри на биполярен транзистор при схема на свързване ОЕ.

2. Задание
а) Да се запишат каталожните данни (електрически показатели и параметри) на транзисторите, които ще се изследват.

б) Да се разучи схемата на лабораторната постановка за снемане на статичните характеритики.

в) Да се снеме семейството изходни статични характеристики. $I_C = f(U_{CE})\, при\ I_B = const$.

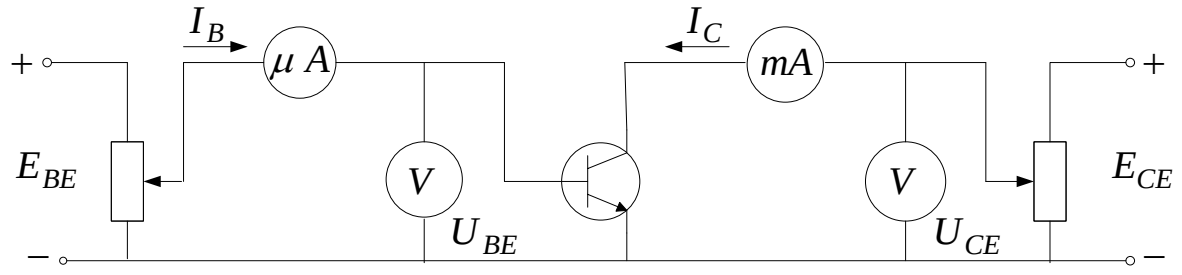
г) Да се снеме семейството входни статични характеристики $I_B = f(U_{BE})\, при\, U_{CE} = const$.

д) Да се снеме семейството статични характеристики на предаване по ток $I_C = f(I_B)\, при\, U_{CE} = const$.

е) Да се начертаят на обща координатна система снетите статични характеристики.

ж) От статични характеристики да се определят параметрите $R_{вх} = h_{11e}$, $\beta = h_{21e}$, $R_{изх} = 1/h_{22e}$.

3. Схема за експериментално изследване на биполярен транзистор при схема на свързване ОЕ



4. Методически указания

При изследване на транзистора да не се допуска превишаване на допустимите токове и напрежения. Постоянните величини при всяко измерване да се проверяват и регулират, ако е необходимо.

Резултатите от изпълнението на т. 2в да се нанесат в таблица 1.

Таблица 1

№	$I_B = ...[\mu A]$		$I_B = ...[\mu A]$		$I_B = ...[\mu A]$		$I_B = ...[\mu A]$		$I_B = ...[\mu A]$	
	U_{CE}	I_C	U_{CE}	I_C	U_{CE}	I_C	U_{CE}	I_C	U_{CE}	I_C
	V	mA	V	mA	V	mA	V	mA	V	mA
1.										
2.										

Резултатите при изпълнение на т. 2г се нанасят в табл. 2.

Таблица 2

№	$U_{CE} = ...[V]$		$U_{CE} = ...[V]$	
	U_{BE}	I_B	U_{BE}	I_B
	V	μA	V	μA
1.				
2.				

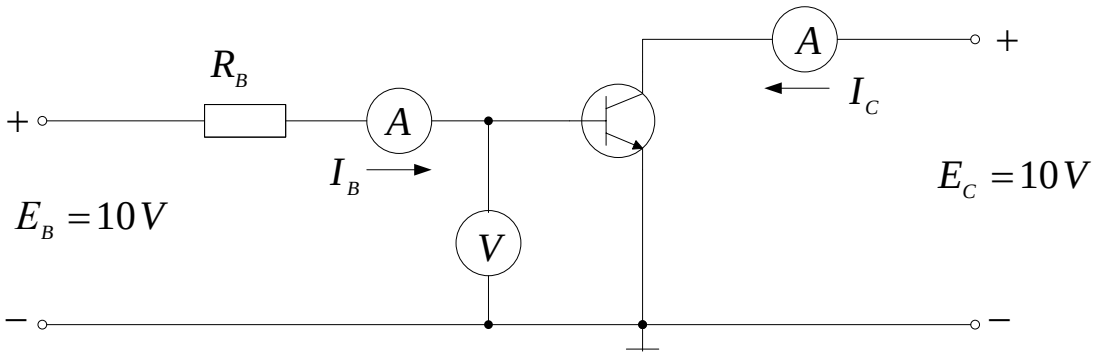
Резултатите от изпълнението на т. 2д да се нанесат в табл. 3.

Таблица 3

№	$U_{CE} = ...[V]$		$U_{CE} = ...[V]$	
	I_B	I_C	I_B	I_C
	μA	mA	μA	mA
1.				
2.				

Лабораторна работа № 5
Статични характеристики и параметри на биполярен транзистор при схема на свързване ОЕ

5.1. Намерете файл „определяне на стат. х-ки и парам. на БТ”, който е показан на фиг. 1. Файлът ще откриете чрез пътя: Multisim – File – Open - My Documents – Multisim - „Определяне на стат. х-ки и парам. на БТ”.



Фигура 1

От схемата се вижда, че обект на изследването е БТ тип n-p-n. В тази схема стойностите на тока на базата се задават чрез изменение големината на резистора R_B и се измерва с помощта на амперметър, който е включен в тази верига. Колекторния ток се измерва също с амперметър, който е включен в колекторната верига на БТ. С помощта на волтметрите се измерват напреженията U_{BE} и U_{CE}. Тъй като амперметъра притежава практически нулево съпротивление, то в тази схема $U_{CE} = E_C = 10V$ при наличие на ток на базата, то транзистора е в активен режим.

5.2. Включете схемата. Установете стойността на R_B в съответствие с данните от таблица 1, като за всяка стойност на R_B снемете показанията на измервателните прибори и ги нанесете в таблицата. По данните от таблица 1 постройте графика на зависимостта β от I_C в диапазона колекторен ток от 1 до 60 mA. На тази графика отделете областта на тока I_C, в която β се изменя не повече от 5% от своята максимална стойност.

Таблица 1

R_B kΩ	U_{BE}, V	I_B, mA	I_C, mA	$\beta = I_C / I_B$
1000				
500				
400				
300				
250				
200				
150				
125				
100				
50				
40				
30				
20				
10				
2				
1				

Входна характеристика на биполярен транзистор в схема ОЕ

5.1. В схемата на фиг.1 направете $E_C = 0V$. Изменяйте стойността на R_B в съответствие с данните от таблица 2, като за всяка стойност на R_B снемете показанията на измервателните прибори и ги запишете в таблицата. По данните от таблици 1 и 2 постройте графиката на зависимостта на I_B от $U_{БЕ}$ при $U_{CE} = 10V$ и при $U_{CE} = 0V$ (входна характеристика на БТ).

Таблица 2

R_B kΩ	I_B, mA	U_{BE}, V
50		
5		
2		
1		

5.2. Изключете схемата и затворете прозореца.

Предавателна характеристика на биполярен транзистор в схема ОЕ

5.1. По данни от таблица 1 постройте графика на зависимостта на I_C от U_{BE} при $U_{CE} = 10V$ (предавателна характеристика на БТ).

Изходна характеристика на биполярен транзистор в схема ОЕ

5.1. Отворете файл „определяне на стат. х-ки и парам. на БТ", схемата който е показан на фиг. 1.

5.2. Включете схемата. Установете стойността на E_C в съответствие с данните от таблица 3, като за всяка стойност на E_C се снемат показанията на измервателните прибори и се нанасят в таблицата.

Таблица 3

$R_B = 100\,k\Omega$ $(I_B = 0{,}1\,mA)$	$E_C = U_{CE}, V$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,5	1 1	2 2	5
	I_C, mA								
$R_B = 50\,k\Omega$ $(I_B = 0{,}2\,mA)$	I_C, mA								
$R_B = 25\,k\Omega$ $(I_B = 0{,}4\,mA)$	I_C, mA								

5.3. Повторете т.4.2, като поставите предварително $R_B = 50\,k\Omega$, $(I_B = 0{,}2\,mA)$.

5.4. Повторете т.4.2, като поставите предварително $R_B = 25\,k\Omega$, $(I_B = 0{,}4\,mA)$.

5.5. По данните от таблица 3 и тези от т. 4.2 - 4.4 постройте графика на семейство изходни характеристики на БТ: $I_C = f(U_{CE})$ при $I_B = const$.

5.6. Изключете схемата и затворете прозореца.

Съдържание на протокола

1. Цел - Експериментално изследване на статичните характеристики и параметри на биполярен транзистор при схема на свързване ОЕ.

2. Задание

а) Да се запишат каталожните данни (електрически показатели и параметри) на транзистора, които се изследва.

б) Да се разучи схемата на лабораторната постановка за снемане на статичните характеритики .

в) Резултатите от експеримента във вид на таблици и построените по тези данни графики на статичните характеристики на биполярния транзистор.

е) Да се начертаят на обща координатна система снетите статични характеристики.

г) Числените стойности на основните параметри на транзистора (β, α и U_{EO}), а също и малосигналните параметри на БТ.

3. Изводи

4. ПАЗАРА НА ПОЛУПРОВОДНИЦИ: ГЛОБАЛНА ВЕРИГА НА СТОЙНОСТТА И ДИНАМИКА

Полупроводниците са четвъртата най-търгувана стока в света след суровия петрол, петролните продукти и автомобилите. Това е изключително сложен продукт, който изисква значителни инвестиции в научноизследователска и развойна дейност (22% от годишните продажби на полупроводници) и капиталови разходи (26%) за проектиране и производство. Размерът на пазара, необходимостта от използване на високи технологии и решаване на голям брой сложни, но високоспециализирани проблеми в производствения процес са факторите, които определят създаването на глобална верига за стойност на полупроводниците (GVC). Компаниите в тази верига от различни региони и страни по света, намирайки се в твърда взаимозависимост, изпълняват различни роли и функции в съответствие със своята специализация, използвайки своите сравнителни предимства.

Глобалната верига на стойността на полупроводниците всъщност е глобална екосистема. Например, за да се произведе един компютърен чип, трябва да се извършат повече от 1000 процедури и повече от 70 движения през международни граници, преди той да достигне до крайния потребител. На най-високо ниво GVC се състои от седем сегмента (връзки): изследване и развитие; дизайн; производство; монтаж, тестване и опаковане; Автоматизация на електронното проектиране и интелектуална собственост; оборудване за производство на полупроводници; материали. След като преминат през тези връзки, полупроводниковите продукти преминават към етапа на крайна употреба, който включва разпространение на чипове за интегриране в продукти.

Интересът към изучаване на проблемите на развитие на цифровата икономика се увеличава, като много актуални теми са полупроводниковата индустрия в контекста на цифровата трансформация, нови тенденции в развитието на световната и вътрешната полупроводникова индустрия, регионалните промени в електронната индустрия и изпълнението на националните икономически стратегии. Изучаването на тези въпроси е от особено значение в контекста на кризата на световния пазар на полупроводници. Криза, която започва с пандемията от COVID-19, когато производствените обеми намаляват и веригите за доставки

са нарушени, на по късен етап се изостря от нарастващите геополитически и търговски проблеми на фона на нарастващото търсене, променяйки динамиката и структурата на пазара на полупроводници.

4.1. Структура на глобалния пазар на полупроводникови елементи.

Характеристика на световния пазар на полупроводници е неговата висока концентрация: 2-те най-големи компании представляват почти ⅓, 6 на повече от ½ и 15 за повече от ⅔ от глобалния обем на продажбите (виж таблица 1). Южнокорейската компания Samsung се премести и заема първо място поради повече от 30% увеличение на приходите през 2021 г., изместваики американската компания Intel от тази позиция. Три компании показаха над 60% годишен ръст – американските Nvidia и AMD и тайванската Media Tek. Като цяло приходите на глобалните полупроводникови компании са се увеличили с 19,1% през годината, от $465,4 милиарда през 2020 г. на $554,1 милиарда.

Таблица 1

ТОП 15 на най-големите полупроводникови компании в света по приходи, 2021 г.

Компания	Бизнес модел	Страна	Приходи, милиарда $	Годишен ръст, %	Световен дял, %
Samsung	IDM*	Ю. Корея	81,3	30,5	14,7
Intel	IDM	САЩ	79,0	1,5	14,3
SK Hynix	IDM	Ю. Корея	37,1	36,0	6,7
Micron	IDM	САЩ	30,0	33,3	5,4
Qualcomm	Fabless**	САЩ	29,2	52,0	5,3
Nvidia	Fabless	САЩ	26,0	61,9	4,7
Broadcom	Fabless	САЩ	20,9	18,0	3,8
Texas Instruments	IDM	САЩ	18,3	26,9	3,3
MediaTek	Fabless	Тайван	17,7	60,5	3,2
AMD	Fabless	САЩ	16,2	66,0	2,9
Apple	Fabless	САЩ	15,1	23,0	2,7
Infineon	IDM	Германия	13,5	25,0	2,4
Kioxia (Toshiba Memory)	IDM	Япония	13,4	21,8	2,4

STMicro elect ronics	IDM	Швеция	12,8	24,9	2,3
NXP	IDM	Холандия	11,0	28,0	2,0
Други			132,6	–1,3	23,9
Общо			554,1	19,1	100

* IDM (Integrated Device Manufacturer) – производител на интегрирани устройства, самостоятелно разработва, произвежда и продава полупроводници.
** Fabless – Компанията се занимава само с разработка и продажба на полупроводници, няма собствени производствени мощности и възлага производството на специализиран производител.

Експертите на Counterpoint включват в рейтинга компании, прилагащи само два бизнес модела (IDM и Fabless), с изключение на доходите на производителите по договор (Foundry), за да се избегне двойно отчитане. В допълнение към 15-те представени компании, има още два големи играча на пазара на полупроводници - тайванският производител на чипове по договор TSMC, който получи през 2021 г. приходи от $56,8 милиарда (само Samsung и Intel имат повече), и холандският производител на литографско оборудване за микроелектроника ASML, чиито продажби през 2021 г. възлизат на около $16,4 милиарда (€18,6 милиарда). Така са идентифицирани 16 ключови компании в полупроводниковата индустрия, оценката на пазарната капитализация на които е представена в табл. 2. От тях 10 влизат в ТОП-100, а 6 влизат в ТОП-500 на най-големите компании в света.

Таблица 2

Полупроводникови компании, класирани от най-големите световни компании по пазарна капитализация

Ранг	Компания	Бизнес модел	Страна	Пазарна капитализация, милиарда $
1	Apple	Fabless	САЩ	2 752
9	TSMC	Foundry*	Тайван	627,55
10	Nvidia	Fabless	САЩ	596,80
16	Samsung	IDM	Ю. Корея	425,22
34	ASML	SME**	Холандия	256,86

38	Broadcom	Fabless	САЩ	236,75
60	Intel	IDM	САЩ	193,94
65	Qualcomm	Fabless	САЩ	185,54
85	Texas Instruments	IDM	САЩ	151,83
100	AMD	Fabless	САЩ	135,73
149	Micron	IDM	САЩ	100,51
206	SK Hynix	IDM	Ю. Корея	75,85
256	MediaTek	Fabless	Тайван	65,71
370	NXP	IDM	Холандия	49,66
372	Infineon	IDM	Германия	49,45
467	STMicro elect ronics	IDM	Швейцария	40,59

* Foundry – договорен производител на полупроводници.
** SME (Semiconductor Manufacturing Equipment) – компания, специализирана в разработването и продажбата на оборудване за производство на полупроводници.

Дългогодишното сътрудничество и тясното сътрудничество, съчетано с конкурентни иновации, са формирали модерна, глобално разпространена, високоефективна и иновативна верига за стойност на полупроводниците. Но в същото време необходимата тясна специализация и високата степен на разделение на труда водят до консолидация на пазарите, а в редица области до олигополи и монополи. Например холандската компания ASML е единственият в света производител на екстремни ултравиолетови (EUV) литографски скенери за производство на голям обем на най-модерните микрочипове (7 nm и по-малко). Революционната разработка е представена през 2017 г. Като се има предвид цената на една машина - около 150 милиона долара, големите размери и ниво на сложност, само няколко компании в света могат да си позволят такова оборудване, а търсенето за него надвишава предлагането (през 2021 г. произведени са само 42 EUV -скенер).
В сегмента за договорно производство на полупроводникови компоненти 90% от пазара се представлява от 5 компании: тайванската TSMC – 55%, южнокорейската Samsung – 17%,

тайванската UMC и американската GlobalFoundries – по 7%, китайската SMIC – 4%. Но само две от тях (TSMC и Samsung) имат производствен капацитет на базата на технологични процеси 7nm и 5nm. Световният лидер на пазара на договорни услуги е тайванската TSMC. Неговите клиенти включват големи полупроводникови компании без фабрично производство, включително Apple, AMD, Nvidia и Qualcomm. TSMC също притежава повече от половината от всички съществуващи EUV литографски машини, произведени от холандската компания ASML. В края на 2021 г. тайванската компания започва експериментално производство на микрочипове по 3-nm технологичен процес. Най-близкият конкурент на тайванския производител е южнокорейският Samsung. Преди това компанията е класифицирана в бизнес модела IDM, но сега работи и в сектора на договорните услуги.

Стремежът на полупроводниковия бизнес към икономическа ефективност през последните десетилетия доведе до формирането на GVC, в който е невъзможно автономно да се извърши пълен производствен цикъл не само в рамките на една компания, но и в рамките на един регион. Освен това 99% от пазара е концентриран в шест териториални зони (таблица 3). И точно високата концентрация на играчи на пазара на полупроводници в сегментите и регионите на GVC е това, което направи този пазар потенциално нестабилен. Единственият въпрос, който остава открит, е кога ще се прояви тази нестабилност?

Таблица 3

Регионална структура на световния пазар на полупроводници по сегменти на веригата за доставки, 2020 г.

Регион	Световен пазарен дял, в %	Специализация в сегменти на веригата за доставки
САЩ	47	Доминиращи в технологиите за научноизследователска и развойна дейност, проектиране и производствени процеси, участващи в различни сегменти

		на веригата за доставки, но без собствени модерни леярни за полупроводници и оборудване за фотолитография (най-скъпото и сложно оборудване в полупроводниковата индустрия)
Ю. Корея	20	Всички етапи на производство, както и производството на значителна част от материалите и част от оборудването за производство на полупроводници
Япония	10	Специализира в оборудване и материали за производство на полупроводници, произвежда полупроводникови продукти главно с помощта на немодерни технологии
Европа	10	Основно Холандия, Великобритания и Германия, специализирани в оборудване за производство на полупроводници (включително фотолитографско оборудване), материали и ключова интелектуална собственост
Тайван (островна провинция на Китай)	7	Доминира в най-модерното производство на полупроводници (Foundry) и сегмента за сглобяване, тестване, опаковане, а също така произвежда някои материали
Китай (континентален)	5	Специализиран в етап „Сглобяване, тестване, опаковане“, монтажно и опаковъчно оборудване и суровини

4.2. Фактори на кризата на пазара на полупроводници

Безпрецедентното търсене на чипове, възникнало през 2020 г., доведе до безпрецедентен недостиг от тях на световния пазар, който не можеше да бъде преодолян до второто тримесечие на 2022 г. Отправната точка е голямото търсене на персонални компютри и периферни устройства по време на COVID-19 пандемия, когато в почти всяка страна по света се наблюдава рязко увеличаване на мащаба на работа и учене от дома. До есента на 2020 г. се увеличава и търсенето на други джаджи – игрови конзоли, телевизори, смартфони, таблети. В същото време поради локдауни компаниите за полупроводници започнаха да спират дейността си и възникнаха проблеми с логистиката.

Най-значимият фактор, който повлия на развитието на глобалната криза в производството на полупроводници, може да бъде идентифициран като силно концентрираните пазарни сегменти, формирани от съвременния GVC, които се превърнаха в негови „тесни места“. В случай на непреодолима сила тези сегменти или дори отделни компании създават рискове от каскадни сривове в разпределената производствена система. Пример за това е ASML, компания, която заема уникална позиция на пазара. Пожар, който избухва в завода в Берлин през януари 2022 г. повреждa производството на един от компонентите на екстремните ултравиолетови литографски скенери, което спира производството им за неопределено време. Друг пример са японските фабрики на Western Digital и Kioxia, където използването на замърсени химически реактиви води до повреда на огромен брой чипове памет. Загубата възлиза на около 13% от планираното производство на двете компании за първото тримесечие на 2022 г. (3% от глобалния обем), което според предварителните прогнози може да доведе до ръст на цените им през второто тримесечие с 5-10%. Друг важен фактор в световната криза е промяната в бизнес поведението на участниците на пазара. По същество концепцията за „логистика точно навреме“, която е насочена към намаляване на разходите за поддръжка на склада, спря да работи. В същото време някои компании за полупроводници започнаха да действат по начини, които противоречат на интересите на техните клиенти. Например, американската Broadcom използва тактиката на

задържане на доставките, оправдавайки това с риска от прекъсвания в бъдеще.
Според анализаторите на Goldman Sachs, 169 индустрии са били засегнати от глобалния недостиг на чипове, но световната автомобилна индустрия е претърпяла най-големи щети. През 2021–2022г Един след друг автомобилните производители бяха принудени да съкращават и спират производството. Сред тях са General Motors, Ford, Toyota, Honda, Nissan, Fiat Chrysler, Opel, Volkswagen, BMW. Глобалната консултантска фирма AlixPartners оценява общите загуби на приходи за световната автомобилна индустрия през 2021 г. на 210 милиарда долара. Важно е да се отбележи, че настоящата ситуация създава всички предпоставки за продължаване на недостига на полупроводници, тъй като проблемите на GVC продължават да се натрупват. Представителите на бранша дават различни дати за края на кризата. През 2021 г. много от тях се съгласиха, че ситуацията трябва да се нормализира до края на 2022 г. Експертите на Deloitte обаче представиха по-песимистична прогноза в края на 2021 г. - недостигът на чипове стана дългосрочен, т.е. вече не говорим около тримесечия, но около години.
Сегментните уязвимости са ключова характеристика на днешната глобална верига на стойността на полупроводниците, която беше напълно разкрита по време на пандемията от COVID-19. Поради прекъсвания на веригата за доставки през 2020–2022 г. Повечето индустрии по света са засегнати. Възникналата ситуация даде тласък на прилагането на политики от страна на държавите за локализиране на производството с цел осигуряване на самодостатъчност и конкурентоспособност в полупроводниковата индустрия. Това вече се случва в страни като САЩ, Република Корея, Япония и Китай.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вълков С, И. Ямаков, Р.Дойчинова, М. Христов, Т. Василева, Електронни и полупроводникови елементи и интегрални схеми, Техника, С., 1992.
2. Шишков А., Полупроводникова техника – I част, Техника, С., 1992.
3. Христов М., Т. Василева, Ръководство за лабораторни упражнения по електронни и полупроводникови елементи и интегрални схеми, Техника, С., 1988.
4. Ангелова Т., Ръководство за лабораторни упражнения по електронни, йонни лампи и полупроводници, Д. Митрополия, 1975.
5. Григориьев Б. И., Элементная база и устройства аналоговой электроники, ИТМО, Санк-Петербург, 2008.

Теодора Петрова получава магистърска степен по „Комуникационна техника и технологии“ в Русенски университет „Ангел Кънчев“, „Доктор“ по „Радиолокация и радионавигация“ през 2009 г. и научна степен „Доктор на науките“ в „Национална сигурност“ през 2024 г. От 2014 г. заема академична длъжност „Доцент“ в професионално направление 5.2 „Електротехника, електроника и автоматика“. Автор е на 5 монографии, 3 книги, 1 учебник и повече от 90 статии, от които 32 са в реферираните системи на Scopus и Web of science. Има два регистрирани полезени модела и две подадени заявки за патент. Изследователските й интереси са в области, като обработка на изображения, използване на безпилотни летателни апарати и прилагане на лазери в медицината.

Марин Георгиев е възпитаник на Университета за национално и световно стопанство в град София. През 2018 г. защитава дисертация на тема: „Балансирана карта за оценка като инструмент за усъвършенстване на управлението във военнообразователната сфера“ в професионално направление 3.7. Администрация и управление в Национален военен университет „Васил Левски“ в град Велико Търново. „Доцент“ е в професионално направление 9.1. Национална сигурност на Военна академия „Георги Стойков Раковски“ в град София. Неговите научни и изследователски интереси са в сферата на икономиката, управлението на човешките ресурси, социалните дейности и националната сигурност. Има над 300 научни статии, доклади и съобщения, като 50 от тях са в реферираните системи на Web of Science и SCOPUS.

СЪДЪРЖАНИЕ

ПРЕДГОВОР 3
1. ЕЛЕКТРОВАКУУМНИ ПРИБОРИ.....4
Лабораторна работа № 1 10
2. ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ДИОДИ 11
Лабораторна работа № 2 21
Лабораторна работа № 3 23
3. БИПОЛЯРНИ ТРАНЗИСТОРИ. ИЗСЛЕДВАНЕ НА САТАТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БИПОЛЯРНИЯ ТРАНЗИСТОР.....27
Лабораторна работа № 4 33
Лабораторна работа № 5 35
4. ПАЗАРА НА ПОЛУПРОВОДНИЦИ: ГЛОБАЛНА ВЕРИГА НА СТОЙНОСТТА И ДИНАМИКА.....39
ЛИТЕРАТУРА 47

ТЕОДОРА ПЕТРОВА
МАРИН ГЕОРГИЕВ

УЧЕБНО ПОСОБИЕ ЗА ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ ПО ЕЛЕКТРОННИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ЕЛЕМЕНТИ

Първо издание

© Теодора ПЕТРОВА, Марин ГЕОРГИЕВ
© Издателство *gabriell-e-lit*, София, 2025
ISBN: 978-619-7705-69-0
платформа за електронни книги: www.e-books.gabriell-e-lit.com