

## ЖАРЫҚТЫҢ ЖҰТЫЛУЫ ЖӘНЕ ФОТОЭЛЕМЕНТТЕР ТИПТЕРІ ЖАРЫҚТЫҢ ТАБИҒАТЫ ТУРАЛЫ

Заманауи физика жарықты екі табиғаты бар белгілі бір толқындардың ұзындығының электромагнитті сәулеленуі ретінде қарастырады. Ол толқындық та және корпускулярлық та бейнеде байқалады. Жарық үзіліссіз ағын ретінде емес, бөлек, бір бірімен байланыспаған толқындық пакет ретінде (фотон) шығады немесе таралады. Әрбір фотон белгілі бір мөлшердегі энергияның тасушысы болып табылады. Фотондар өзінің энергиясының мөлшеріне байланысты бөлінеді. Энергияның үлкен бөлігін толқындық теорияда аз мөлшердегі жиілікпен сипатталатын сәулеленуге сәйкес келетін фотон иеленеді. Егер көрінетін жарық туралы айтатын болсақ, күлгін түсті фотон үлкен энергияға ие болады да, ал қызыл сәулелердің қатарына кіретін фотондар азырақ энергияға ие болады.

Фотон энергиясы  $\varepsilon$  сәулелену жиілігіне  $\nu$  пропорционал екендігі анықталды:

$$\varepsilon = h\nu,$$

мұндағы  $h$ - Планк тұрақтысы ( $6,624 \cdot 10^{-27}$  эрг·сек),

Фотон энергиясы  $\varepsilon$  неғұрлым үлкен болса, демек жиілік  $\nu$  үлкен болған сайын электромагниттік сәулеленудің корпускулярлық структурасы да соғұрлым оңай анықталады. Рентгендік немесе  $\gamma$ -сәулелердің ағынында көпшілік жағдайда корпускулярлық қасиеттер байқалады.

Фотон энергиясы  $\varepsilon$  неғұрлым аз болса, демек жиілік  $\nu$  аз болған сайын сәулеленудің толқындық структурасы да соғұрлым үлкен деңгейде анықталады. Ұзын толқындық сәулелену ағыны (радиотолқын) өзінің толқындық қасиеттерін ғана оңай аңғарады, ал корпускулярлық қасиеттерді аңғармайды десе де болады.

Көрінетін жарық электромагнитті сәулелену шкаласында жиіліктің немесе толқын ұзындығының өте тар интервалынан орын алады: 0,4-0,8 мк. Көрінетін жарықтың шалаөткізгіштің бетіне түскен кезінде болатын физикалық құбылыстарды суреттегенде көрінетін жарықты әр түрлі энергиялардың фотонының ағыны ретінде қарастыруға болады.

Кремний фототүрлендіргіштері сияқты барлық шалаөткізгішті құрылғылар  $p$  және  $n$  типті өткелі бар екі шалаөткізгіштен тұратын жүйені құрайды, ол өткелдер бір бірімен тығыз байланыста болады. Қарама қарсы өткелдер арасындағы өтпелі аймақ (шекара) шалаөткізгішті материалдың ішінде орналасады да, электронды-кемтік алуы немесе  $p$ - $n$  алуы деп аталады.

$p$ - $n$  алуының бір жағында еркін электрондар ( $n$ -облыс), ал екінші жағында кемтіктер ( $p$ -облыс) артығымен болғандықтан осы еркін ток

тасымалдаушылардың әрқайсысы олардың кемдігі байқалған шалаөткізгішті материалдың бөлігіне өтуі мүмкін (жылулық өздік диффузия). Осылайша кемтіктер р-облыстан n-облысқа, ал электрондар n-облыстан р-облысқа ауыса алады.

Алайда, негізгі ток тасымалдаушылардың бұл диффузиясы шексіздікке дейін жалғаса бермейді. Шын мәнісінде, шалаөткізгіште электрондардың р-облысына диффузиясы оны теріс зарядтайды, ал n-облыс одан электрондардың кейбір бөлігінің кетуіне байланысты оң зарядталады. Кемтіктердің өздік диффузиясы да сол бағытта жүреді, демек р-облыс теріс зарядталып, n-облыс оң зарядталады. Диффундеуші кемтіктер мен электрондар көлемді зарядтардың екі қабаты ретінде р-n өткелде жинақталып, осы қабаттар арасында потенциалдар айырмашылығын туындатады. Бұл жағдайда қараңғыда р-n өткел жағында р-облыстан теріс, ал n-облыстан оң көлемді зарядтар жинақталады, ол 4, а суретте көрсетілген. Осы көлемді зарядтардан құралған электрлік өріс ары қарайғы р-n ауысу арқылы токтың негізгі заряд тасымалдаушыларының өздік диффузиясына кедергі келтіреді.

Әр түрлі шалаөткізгішті құрылғыларды (фототүрлендіргіштер, күштік түзеткіштер, диодтар, фотодиодтар, триодтар, фототриодтар, т.б) жасауға мүмкіндік беретін құбылыстар р-n ауысуда потенциалдық барьердің туындауымен түсіндіріледі.

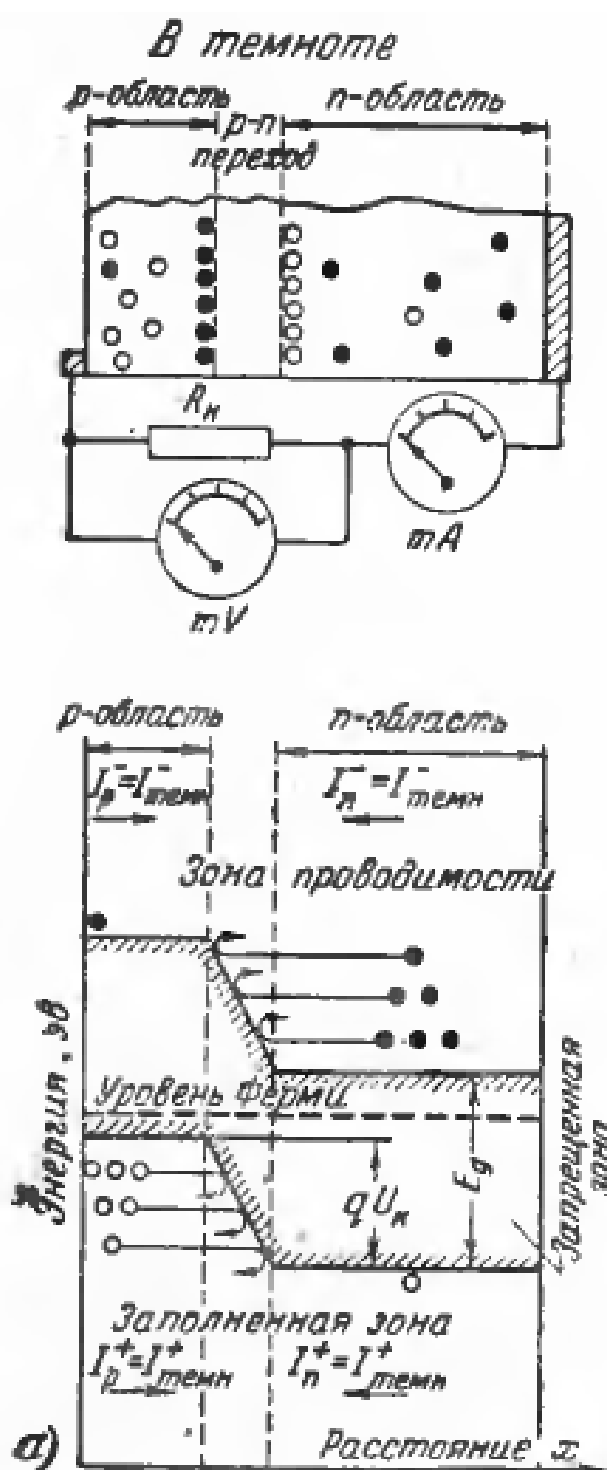
## **ЖАРЫҚ ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНА**

### **ТҮРЛЕНДІРУ ПРОЦЕСІ**

Жарықтың әсерінен шалаөткізгіштің атомдары қозып, кристаллдың n- және р- облыстарда қосымша электронды-кемтіктік жұп пайда болады. Ол 4, б-г суретте көрсетілген. Пайда болған электрондар мен кемтіктер р-n өткел бағытына да әр түрлі бағыттарда орын ауыстырады.

Потенциалды барьердің бар болуы әсерінен электронды-кемтіктік ауысу негізінен оған диффундеуші негізгі емес ток тасымалдаушыларын бөледі. Бұндай бөлудің нәтижесінде кристаллдың n-облысында артық электрондар, ал р-облыста артық кемтіктер жинақталады. Фототүрлендіргіштің n-облысында артық электрондардың және р-облысында артық кемтіктердің жинақталуы көлемді зарядтың компенсациясына алып келеді. Жарықтың әсерінен туындаған электрлік өріс р-типті қабаттың сол жағын оң, ал n-типті қабаттың оң жағын теріс зарядтайды. Пластинканың n- және р-облыстары арасында фото э.қ.к пайда болады. Жарықтың әсерінен пайда болған артық

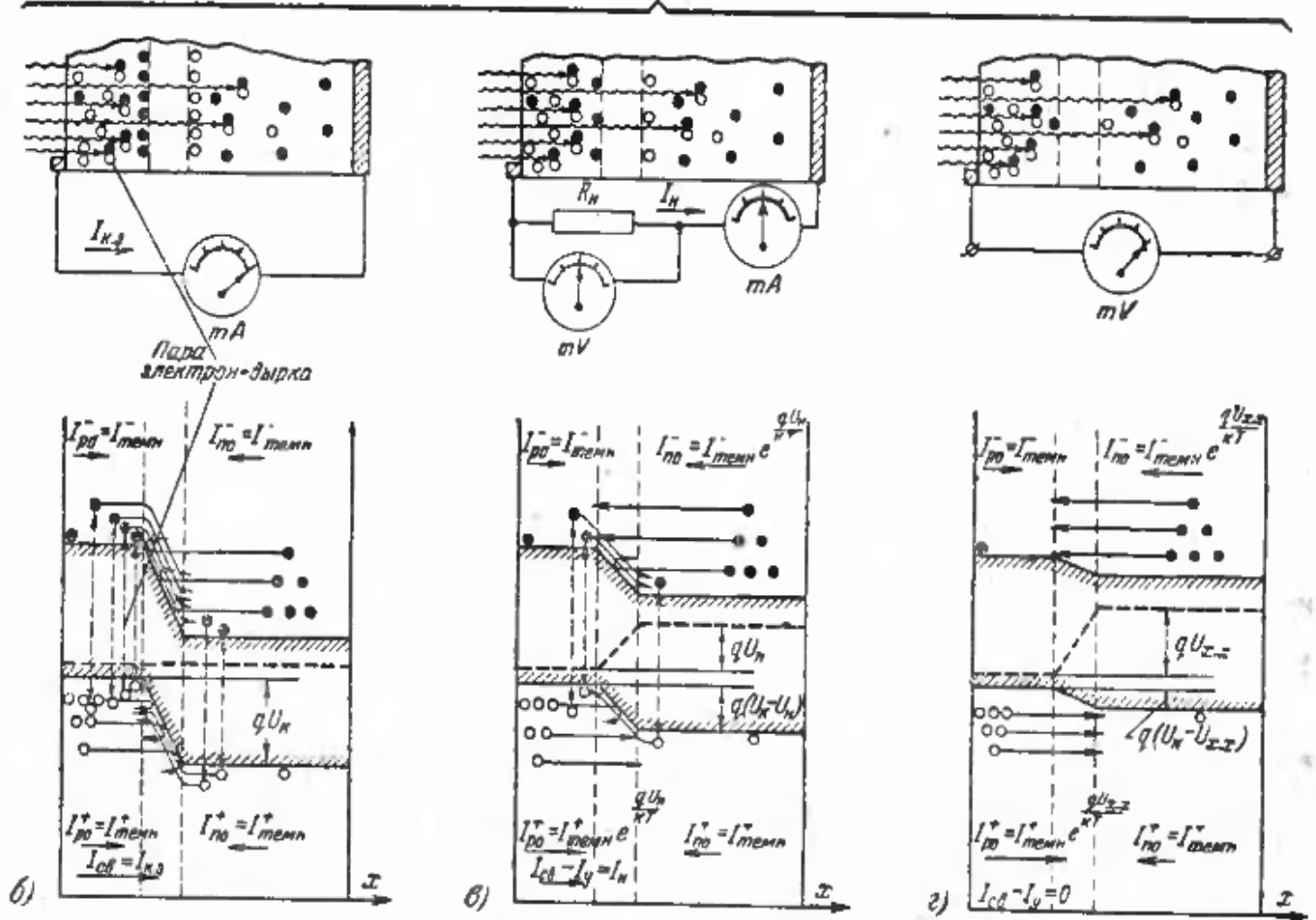
ток тасымалдаушыларының р-п ауысуындағы концентрациясы және фото э.қ.к шамасы сыртқы фототүрлендіргіш тізбегіне қосылған жүктеме кедергісіне және жарық ағынының интенсивтілігіне тәуелді.



4 сурет. Күн энергиясының фотоэлектрлік түрлендіргішінің жұмысын көрсететін схема.

а – қараңғыда р-п ауысу арқылы өтетін негізгі және негізгі емес тасымалдаушылар бір бірін компенсациялайды, суммарлы ток нолге тең болады;

При освещении



б – қысқа тұйықталу режимінде жарықтың әсерінен пайда болған уақытынан бері р-п өткелге жеткен артық негізгі емес ток тасымалдаушылар сыртқы тізбек тұйықталған болғандықтан одан өтеді, токтың циркуляциясы жүруі мүмкін.

в – сыртқы тізбек жүктеме кедергісіне  $R_H$  тұйықталған кезде жарықтың әсерінен пайда болған уақытынан бері р-п өткелге жеткен артық негізгі емес ток тасымалдаушылардың бір бөлігі өткелдегі потенциалды барьерді азайтуға жұмсалған болса, екінші бөлігі сыртқы кедергі мен өткелде токты туындатады.

г – бос жүріс режимінде жарықтың әсерінен пайда болған уақытынан бері р-п өткелге жеткен артық негізгі емес ток тасымалдаушылар потенциалды барьерді төмендетуге жұмсалған.

Жоғарыда 4,г суретте көрсетілгендей фототүрлендіргіштің тізбегі тұйықталмаған болса ( $R_H = \infty$ ), онда барлық өткелмен бөлінген артық ток тасымалдаушылар максималды мүмкін шамаға жетіп р-п ауысуда

жинақталады, өткелде потенциалды барьерді компенсациялайды да бос жүріс кедергісіне тең  $U_{xx}$  фото э.қ.к туындатады.

4 суреттегі схеманы күрделендірмеу үшін тек қана потенциалды барьерді құрайтын заряд тасымалдаушылар шартты түрде көрсетілген.

Егер фототүрлендіргіш 4,б суретте көрсетілгендей қысқа тұйықталған болса ( $R_H = 0$ ), онда өткелмен бөлінге артық ток тасымалдаушылар осы қысқа тұйықталған тізбек арқылы циркуляция жасай алады, осылайша олар токтың максималды мәнін - қысқа тұйықталу тогын  $I_{к.з}$  туындатады. Соның өзінде р-п өткелде ешқандай артық зарядтардың шоғыры пайда болмайды. Потенциалды барьер қараңғыдағы биіктігіндей биіктікке ие болады және түрлендіргіштің фото э.қ.к нолге тең болады.

4,в суретте көрсетілгендей фототүрлендіргіш қандай да бір соңғы кедергіге  $R_H$  тұйықталған болса, өткелмен бөлінген артық ток тасымалдаушылардың бір бөлігі өзінің энергиясын потенциалды барьерді төмендетуге демек, кернеу  $U_H$  құрауға жұмсайды, ал артық тасымалдаушылардың қалған бөлігі жүктеме арқылы ток  $I_H$  құрайды.

4 суретте төмендегі энергетикалық схемалар арқылы қараңғыны жарықтандырған кездегі р-п ауысудағы құбылыстарды көрсеткен ыңғайлы. Мұнда абцисса осі бойынша фототүрлендіргіш тереңдігіне (координаттар басы оның бетіне сәйкес келеді)  $x$  қашықтығы қалдырылған, ал ордината осі бойынша (кейбір масштабта) заряд тасымалдаушылардың (кемтіктер мен электрондар) энергиясына қалдырылған. Айта кететін бір жайт, электрондардың энергиясының өсуіне төменнен жоғарыға қарай көрсетілген бағыт сәйкес келеді, демек схемада кемтік неғұрлым төмен, ал электрон неғұрлым жоғары салынса, олар соғұрлым жоғары энергияға ие.

Мұндай энергетикалық схемада (4,а суретте төменде) шалаөткізгішті материал үш зона түрінде көрсетіледі: толтырылған зона немесе валентті байланыс зонасы, ені  $E_g$ -ға тең тыйым салынған зона және өткізгіш зонасы. Шалаөткізгіште электрондар тек өткізгіш зонада болғанда ғана орын ауыстыра алады (осылайна олар электр тогын тудырады). Электрондар донорлық қоспаның атомынан немесе өзінің шалаөткізгішінің атомынан бөлініп қозу күйінде ғана өткізгіш зонада болады. Кемтіктер тек валенттік зонада ғана орын ауыстыра алады. Еркін кемтіктердің пайда болуы шалаөткізгіштің атомынан акцепторлық қоспаның атомына немесе өткізгіш зонаға электрондардың өтуіне негізделген.

Келтірілген энергетикалық схемаларды күрделендірмеу үшін суретте тек қана еркін кемтіктер мен электрондар көрсетілген. Шалаөткізгіштің р- және n- облыстарының қосылған жерінде потенциалды барьердің пайда болуына байланысты зоналар шекарасында ауытқулар байқалады.

Энергетикалық схемаларды пайдалана отырып, осы бөлімде айтылған сұрақтарды толығырақ қарастырайық.

Өткізгіштігі кристаллдық торына енгізілген донорлық немесе акцепторлық қоспалардың концентрациясымен анықталатын реалды шалаөткізгішті материалда негізгі ток тасымалдаушыларымен қатар негізгі емес ток тасымалдаушыларының да аздаған мөлшері болады. Соңғыларының концентрациясы шалаөткізгішті материалдың қасиеттерімен және қоршаған ортаның температурасымен анықталады. Шалаөткізгіште негізгі емес ток тасымалдаушыларының концентрациясы көп болған сайын, негізгі ток тасымалдаушыларының концентрациясы азая береді..

Кез келген типті қоспалы шалаөткізгіште еркін электрондар концентрациясы  $n_{эл}$  мен кемтіктердің концентрациясы  $n_d$  арасында, басқаша айтқанда негізгі және негізгі емес ток тасымалдаушылар арасында келесі формуламен анықталатын байланыс болады:

$$n_{эл} n_d = n_0^2, \quad (1)$$

Мұндағы  $n_0$  – меншікті шалаөткізгіштегі немесе басқаша айтқанда қоспасыз шалаөткізгіштегі кемтіктер немесе электрондар концентрациясы.

Р-n ауысу арқылы негізгі тасымалдаушылардың қозғалысы үшін потенциалдық барьер кедергі болса (4,а суретте төменде), кері бағытта кедергі болмайды (суретте негізгі емес заряд тасымалдаушылардың р-n ауысу арқылы қозғалысы көрсетілмеген).

Еркін емес ток тасушылардың саны негізгі ток тасушылардың санымен салыстырғанда әлдеқайда аз болғандықтан негізгі емес тасымалдаушылардың өткел арқылы бұл кері ағыны өте аз шамаға ие.

Алайда электрік нейтралдық шартын сақтау үшін негізгі емес тасымалдаушылардың өткел арқылы кері бағыттағы ағыны дәл осындай негізгі тасымалдаушылардың тура бағыттағы ағынымен шамалас болу керек. Сондықтан қараңғыда р-n өткелде потенциалды барьердің биіктігі  $U_k$  автоматты түрде негізгі емес тасымалдаушылардың ағыны негізгі

тасымалдаушылардың ағынымен теңесетіндей орнатылады. Бұл негізгі тасымалдаушылар барьерді асып өтетіндей үлкен энергияға ие.

4,а суретте төменде қараңғыдағы осындай жағдайдың схематикалық бейнесі көрсетілген. Тепе-теңдік жағдайда шалаөткізгіштегі р- және n- облыстарында Ферми деңгейі бір деңгейде болады. Фототүрлендіргіштің жақсы сапасы үшін  $U_k$  шамасы неғұрлым биік болғаны дұрыс.

Тыйым салынған зонаның белгілі бір кеңдігімен сипатталатын шалаөткізгішті материал үшін негізгі тасымалдаушылардың кері тогының шамасы немесе басқаша айтқанда кері қанығу тогы аз болған сайын потенциалды барьердің биіктігі жоғары болады. Бұл түсінікті де, себебі кері қанығу тогының аз шамасының тепе-теңдік жағдайында болуы үшін негізгі тасушылардың ағынының өткел арқылы азырақ шамасы қажет болады. Бұл жағдай р-n өткелдегі потенциалдық барьердің жоғары шамасын қамтамасыз етеді. Айтылғандардан байқайтынымыз,  $U_k$  шамасының жоғарғы мәнін қамтамасыз ету үшін фототүрлендіргіштердің өндірісіне қараңғыда негізгі емес ток тасымалдаушыларына ие болатын шалаөткізгішті материал қолданған дұрыс. Бұдан өзге мұндай нәтижеге шалаөткізгіштің тыйым салынған зонасы қалыңырақ болғанда немесе материалда р-облыстарында да, n-облыстарында да негізгі ток тасымалдаушылары жоғары дәрежеде донорлармен және акцепторлармен қаныққан болса жетуге болады. Осы себепті де кремнийдің германийге қарағанда артықшылығы көп. Германийде тыйым салынған зонасының ені азырақ болғандықтан қараңғыда негізгі емес ток тасымалдаушылары кремнийдікіне қарағанда көбірек болады. Осылайша тыйым салынған зонасы кремнийдікінен қалыңырақ болып табылатын кадмий-теллур ( $E_g=1,5$  эв) сияқты материалдарда р-n өткелде потенциалды барьер де биігірек болады. Тыйым салынған зонасы қалыңырақ ( $E_g=2-2,25$  эв) материалдарды пайдалану барысында  $U_k$  шамасының жоғарғы мәніне қарамастан фототүрлендіргіштің сапасы нашарлайды (3 суретте). Сапаның төмендеуі шалаөткізгіштің бетіне түскен кванттардың энергиясы 2-2,25 эв-тан төмен болуымен түсіндіріледі, яғни электронды-кемтіктік жұптар құрыла алмайды.

Р- n ауысудағы фото э.қ.к-тің пайда болу теорияларының біріне тоқтала кетейік.

Айтылып өткендей, қараңғыда тепе-теңдік жағдайында негізгі және негізгі емес ток тасымалдаушылары бір бірін толықтырады. Сондықтан солдан оңға бағытын оң деп қабылдап, келесі теңдікті аламыз:



$$\left. \begin{aligned} I_p^- - I_n^- &= 0; \\ I_p^+ - I_n^+ &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

немесе

$$I_p^+ + I_p^- - I_n^- - I_n^+ = 0,$$

мұндағы  $I_n^+$ - n-облысынан p-облысына ток кемтіктерінің абсолютті мәні (негізгі емес тасушылар)

$I_n^-$ - n-облысынан p-облысына ток электрондарының абсолютті мәні (негізгі тасушылар)

$I_p^+$ - p -облысынан n -облысына ток кемтіктерінің абсолютті мәні (негізгі емес тасушылар)

$I_p^-$ - p -облысынан n -облысына ток электрондарының абсолютті мәні (негізгі тасушылар)

4 суретте (төменде) осы токтардың шамалары мен олардың бағыттары стрелкамен белгіленген, электрондар тогы өткізгіш зонада, ал кемтіктер тогы валенттік зонада. Стрелкалардың ұзындықтары токтардың шамасына пропорционал.

Қараңғыдағы токтардың шамалас мәндері үшін келесі белгіленулерді енгіземіз:

$$\left. \begin{aligned} I_n^- &= I_p^- = I_{\text{темн}}^-; \\ I_n^+ &= I_p^+ = I_{\text{темн}}^+. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Қараңғыда бұл токтардың барлығында артық тасушылар болмай, тең болатындықтан фототүрлендіргіштің сыртқы тізбегінде ток жүрмейді.

Енді p-облыс жарықтанған деп санайық. Жұтылған фотондардың энергиясының әсерінен онда артық ток тасушылары жұп (электрон-кемтік)

құрайды. Жарықтың әсерінен р-облыста көбейген онсыз да көп кемтіктің концентрациясын елемеуге де болады.

Сондықтан жарықтану әсері р-облыстағы негізгі емес ток тасушыларының, яғни электрондардың концентрациясының артуына ғана алып келгендіктен, р-облысынан п-облысына өтетін ток та артады. Жарықтанудан туындаған бұл электронды токты  $I_{св}$  (4,б және в сурет) белгілейміз. Басқаша айтқанда,  $I_{св}$  ток жарықтану кезінде түрлендіргішпен генерацияланған ток болып табылады, ол жарық әсерінен туындаған, (р-п өткелге жеткенше рекомбинацияланып үлгермеген электрондар мен кемтіктердің эффективті ағынына тең,

Токтың  $I_{св}$  туындауы тепе-теңдікті бұзады. Р-облыстан келе жатқан артық негізгі емес тасушылар тогы көлемді п-облыс жақтан р-п облысында жинақталған оң зарядтың компенсациясына алып келеді, осылайша ол р-п ауысуда потенциалдық барьердің төмендеуі байқалады (4,в сурет).

Шалаөткізгіштің екі облысында да Ферми деңгейі одан зоналардың энергетикалық қашықтығы ток тасымалдаушыларының жылулық энергиясын анықтайтындай етіп орналасқан, бірақ нәтижесінде ол екі облыста да сәйкес келмейді. Энергетикалық шкала бойынша екі облыстағы Ферми деңгейінің айырмашылығы  $qU$  туындысына тең, мұнда  $q$  – электрон заряды, ал  $U$  – жарықтану нәтижесінде пайда болған потенциалдар айырымы. 4,в суретте  $U=U_H$ , мұндағы  $U_H$ –жүктеме кедергісіне  $R_H$  түскен кернеу.

Фото э.қ.к шамасын немесе  $U_{xx}$  (бос жүріс кернеуі) анықтау үшін тұйықталмаған тізбек жағдайын қарастырайық (4,г сурет). Жарықтану кезінде потенциалдық барьердің төмендеуі негізгі емес тасымалдаушылар ағынының өсуіне алып келеді (электрондардың п-облыстан р-облысқа және кемтіктердің р-облыстан п-облысқа).

Төмендеген барьерді асып өте алатын негізгі тасымалдаушылар саны барьердің биіктігі төмен болған сайын арта береді.

Потенциалды барьердің биіктігінің төмендеу шамасына ( $U$   $U_{xx}$  шамасына дейін өскенде) қарай өткелде фототоктық зарядтау қасиеті жылулық негізгі тасымалдаушылардың көбеюімен компенсацияланады. Стационарлы күйде р-п ауысу арқылы зарядтардың ағыны сыртқы тізбек тұйықталмағандықтан екі бағытта да бір бірін теңестіреді, ортақ ток нөлге тең.

Осы жағдайға сәйкес келетін фото э.қ.к табу үшін токтың бағытын ескере отырып, келесідей жазуға болады:

$$I_{\text{св}} + I_{\text{р0}}^+ + I_{\text{р0}}^- - I_{\text{п0}}^+ - I_{\text{п0}}^- = 0^* \quad (4)$$

Жарықтану әсерінен туындаған негізгі емес тасымалдаушылардың өсуі  $I_{\text{св}}$  токпен ескерілгендіктен, тең негізгі емес тасушылардың тогы қараңғыда да өз мәнінде өзгеріссіз қалады.

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{п0}}^+ &= I_n^+ = I_{\text{темн}}^+; \\ I_{\text{р0}}^- &= I_p^- = I_{\text{темн}}^- \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Басқа жағынан, жоғарыда айтылғандай жарықтану кезінде негізгі тасымалдаушылардың тогы потенциалды барьердің р-п өткелде төмендеуі нәтижесінде өсіп тең болады:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{п0}}^- &= I_n^- e^{\frac{qU_{\text{х.х}}}{kT}} = I_{\text{темн}}^- e^{\frac{qU_{\text{х.х}}^{**}}{kT}}; \\ I_{\text{р0}}^+ &= I_p^+ e^{\frac{qU_{\text{х.х}}}{kT}} = I_{\text{темн}}^+ e^{\frac{qU_{\text{х.х}}}{kT}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Мұндағы  $e$  – натуралды логарифмдердің негізі ( $e \approx 2,72$ );

$q$ -электрон зарды ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  К);

$T$ -абсолютті температура;  $0^\circ \text{C}$   $T$  үшін  $273^\circ \text{K}$ ;

$k$ -больман тұрақтысы ( $1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/град) =  $0,86 \cdot 10^{-4}$  эв/град.

(5) және (6) қатынастарын ескере отырып, (4) теңдеу мынандай түрге келтіріледі:

$$I_{\text{св}} - (I_{\text{темн}}^- - I_{\text{темн}}^+) \left( e^{\frac{qU_{\text{х.х}}}{kT}} - 1 \right) = 0,$$

немесе

$$I_{\text{св}} - I_{\text{н.т}} \left( e^{\frac{qU_{\text{х.х}}}{kT}} - 1 \right) = 0, \quad (7)$$

Мұндағы  $I_{н.т}$  – қараңғыдағы р-п ауысу арқылы кемтіктік және электронды токтардың негізгі емес тасушыларының алгебралық суммасы.  $I_{н.т}$  деп бекітілген (запорном) бағытта фототүрлендіргішке электрлік батареяны қосатын болса р-п ауысу арқылы токты түсінуге болады. Сондықтан кері қанығу тогы деп те атайды. Құраушылардың біреуінің көптігіне байланысты  $I_{н.т}$  ток кемтіктік немесе электрондық болуы мүмкін.

Жеке жағдайларда n-типті кремнийден жасалған фотоэлектрлік түрлендіргіште акцепторлық қоспаның термодиффузиясынан құралған р-облыс n-облыстағы электрондар концентрациясына қарағанда кемтіктердің үлкен концентрациясымен сипатталады. Сондықтан р-облысынан n-облысына кері электронды тогы  $I_{темн}^-$  n-облысынан р-облысына өткен кемтіккі токтан  $I_{н.т}^+$  кем болады, сондықтан  $I_{н.т} \approx I_{темн}$  деп алуға болады.

(7) теңдікті логарифмдеу арқылы фото э.қ.к-ті немесе бос жүріс кернеуін анықтауға болады:

$$U_{х.х} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{св}}{I_{н.т}} + 1 \right). \quad (8)$$

(8) теңдіктен көретініміз, жарықтану тұрақты болған кезде  $I_{н.т}$  ток аз болған сайын  $U_{хх}$  да арта түседі.

4,г суретте төменде бос жүріс режимі схематикалық түрде салынған. Жарық ағынының белгілі бір интенсивтілігі кезінде өткелдегі потенциалдық барьер максималды шамаға төмендеген, ал р- және n-облыстары арасында потенциалдар айырымы бар. Оны жарықтанған фототүрлендіргіштің контактарына жоғары омды вольтметр қосу арқылы өлшей аламыз. Сыртқы тізбек тұйықталмағандықтан ондағы ток нөлге тең. Жарықтың әсерінен пайда болған негізгі емес ток тасушыларының р-п ауысу арқылы ағынын (7) формуладан көретініміздей негізгі ток тасымалдаушыларымен теңестірілген.

Егер фотоэлектрлік түрлендіргіш сыртқы кедергімен  $R_H$  тұйықталған (4,в суретте төменде) болса, (7) теңдеудің оң жағына осы кедергі арқылы жүріп өтетін токты  $I_H$  жазған дұрыс. Соның нәтижесінде фототүрлендіргіштегі кернеу төмендейді де  $U_H$  тең болады.

Сондықтан

$$I_{св} - I_{н.т} \left( e^{\frac{qU_H}{kT}} - 1 \right) = I_H, \quad (9)$$

немесе

$$I_{\text{св}} - I_{\text{y}} = I_{\text{н.т}}, \quad (10)$$

мұнда  $I_{\text{y}}$  арқылы p-n ауысу арқылы негізгі тасушылардың ағынынан тұратын утечка тогы белгіленген.

Жүктемедегі кернеу мынаған тең болады

$$U_{\text{н}} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{\text{св}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{н.т}}} + 1 \right). \quad (11)$$

Бөлме температурасына жақын температура, яғни 20-30<sup>0</sup> С үшін коэффициент  $\frac{kT}{q}$  0,025-0,026 тең және жақшаның ішіндегі 1-ді ескермей (себебі  $I_{\text{н.т}}$  мөлшері өте аз) келесі теңдікті аламыз:

$$U_{\text{н}} \approx 0,026 \ln \left( \frac{I_{\text{св}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{н.т}}} \right) \approx 0,059 \lg \left( \frac{I_{\text{св}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{н.т}}} \right). \quad (12)$$

Бұл теңдікке келесі теңдік аналогті болып саналады:

$$I_{\text{н}} \approx I_{\text{св}} - I_{\text{н.т}} (e^{39U_{\text{н}}} - 1). \quad (13)$$

(9) және (10) теңдеулер фототүрлендіргіштің жүктеме сипаттамасының ортақ теңдеулері болып саналады.

4,6 суретте қысқа тұйықталу режимі схематикалық түрде көрсетілген. N- және p-облыстары арасында ешқандай потенциалдар айырымы жоқ. Жарықтың әсерінен пайда болған p-n өткелге жеткен артық негізгі емес ток тасымалдаушылар p-n өткелде бөлініп артық негізгі ток тасымалдаушыларына айналады. Артық тасымалдаушылардың тепе-теңдігі сыртқы тізбекте қысқа тұйықталу тогының  $I_{\text{к.з}}$  жүруінен орнатылады.