

**№ 12 ЛАБОРАТОРИЯЛЫҚ ЖҰМЫС**  
**ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕРДІҢ ФОТОӨТКІЗГІШТІГІН ЗЕРТТЕУ**  
**ЖӘНЕ ФОТОГЕНЕРАЦИЯЛАНҒАН ЗАРЯД ТАСУШЫЛАРДЫҢ**  
**ӨМІР СҮРУ УАҚЫТЫН АНЫҚТАУ**

***Жұмыстың мақсаты:***

1. Жартылай өткізгіштердегі тепе-тең емес заряд тасушылардың генерацияның және рекомбинацияның негізгі заңдылықтарын зерттеу.
2. Жартылай өткізгіштердің фотоөткізгіштігін анықтайтын факторларды қарастыру.
3. Фототүрлендіргіштердің вольт-амперлік, жарықтық және инерциялық сипаттамаларын зерттеу.
4. Фотоөткізгіштіктің сөну әдісімен жартылай өткізгіш пластинаның көлемінде өмір сүру уақытын анықтау.

***Аспаптар және қосымша қондырғылар***

1. Жартылай өткізгіш аспаптардың сипаттамаларын өлшегіш Л2-56.
2. Екі каналды универсал осциллограф С1-70А.
3. Тікбұрышты импульстердің генераторы Г5-72.
4. Арнаулы сигналдардың генераторы Г6-27.
5. 15 В-ке дейін реттелетін тұрақты токтың қоректену блогы "АГАТ".
6. Кең жолақты жоғары жиілікті күшейткіш У3-29.
7. Өлшеуіш блогы.
8. Реттелетін жарықтандырғыш.

***ФОТОӨТКІЗГІШТІК ЖӘНЕ ЖАРЫҚТЫ ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕРМЕН ЖҰТУ***

Жартылай өткізгіштерде еркін заряд тасушылардың пайда болуына тек қана жылу әсері емес басқа процестер де энергия көзі ретінде әсер етеді: жылдам электрондармен соқтығысу  $\alpha$ -бөлшектермен соқтығысу, жарық әсерінен ионизациялану (фоторезистивті эффект) немесе басқа сәулелендірулер (рентген,  $\gamma$ -сәулелер), күшті өрістің әсерінен ионизация т.б. Бұл жағдайда еркін заряд тасушылар энергияның жұтылуынан пайда болатындықтан тордың жылулық энергиясы өзгеріссіз қалады. Онда тор және еркін заряд тасушылардың арасындағы жылулық тепе-теңдік бұзылады. Электрондар және өткізгіш кемтіктер (еркін заряд тасушылар) термодинамикалық тепе-теңдікке жатпайтын (концентрациясы және энергетикалық үлестіру бойынша) тепе-теңдіксіз заряд тасушылар деп аталады.

Тепе-теңсіз заряд тасушылардың саны аз болғасын, олармен сақталған артық энергиясы тор энергиясымен салыстарғанда аз болады, сыртқы қоздыруының қабаттасуы және түсуі тепе-теңдіктегі заряд тасушылардың концентрациясына ықпалын тигізбейді, заряд тасушылардың толық концентрациясы  $n$  немесе  $p$  тепе-тең ( $n_0, p_0$ ) және тепе-теңдіксіз ( $\Delta n, \Delta p$ ) заряд тасушылардың концентрациясының қарапайым қосындысына тең болады.

$$n = n_0 + \Delta n; \quad (1)$$

$$p = p_0 + \Delta p. \quad (2)$$

Тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың пайда болуы жартылай өткізгіштің өткізгіштігінің (кедергісінің) өзгеруіне келтіреді:

$$\sigma = \sigma_r + \Delta\sigma = q_0(n_0 u_n + p_0 u_p) + q_0(\Delta n u_n + \Delta p u_p), \quad (3)$$

мұнда  $\sigma_r$  - қаранғыдағы өткізгіштік,  $\Delta\sigma$  - тепе-теңдіксіз өткізгіштік (фотоөткізгіштік):

$$\Delta\sigma = q_0 (\Delta n u_n + \Delta p u_p) \quad (4)$$

Жартылай өткізгіштің электрлік кедергісінің өзгеруі тек қана электромагниттік сәулеленуден пайда болатын және оның қыздырылуымен байланыссыз *фоторезистив* эффект немесе ішкі фотоэлектрлік эффект деп аталады.

Фотондармен және тордың дефектілерімен әрекеттесу нәтижесінде тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың энергиясы тепе-теңдікте заряд тасушылардың энергиясына дейін төмендейді, сондықтан жартылай өткізгіштерде тепе-теңдіктегі заряд тасушылардың генерациясы тек қана еркін заряд тасушылардың қозғалғыштығын өзгертпей, концентрациясын өзгертеді деп есептеуге болады. Бірақ еркін заряд тасушылар жарықты жұтқанда олардың қозғалғыштығының өзгеруі мына себебптрден болуы мүмкін: 1) кемтіктердің бір өңірден екінші өңірге ауысқанда, 2) электрондардың бір өңірден екінші өңірге ауысқанда, 3) рекомбинациялық сәулелену әсерінен электрондардың қызуы.

Өткізгіштік өңірдегі электрондардың және валенттік өңірдегі кемтіктердің концентрациясы термодинамикалық тепе-теңдікте Ферми деңгеймен мына қатыстарымен байланысты:

$$n = N_c \exp((F - E_c)/kT) \quad (5)$$

$$p = N_v \exp((E_v - F)/kT), \quad (6)$$

мұнда  $N_c$  және  $N_v$  - сәйкес күйлердің өткізгіштік өңірде және валенттік өңірде эффектілік тығыздығы:

$$N_c = 2 (2 \pi m_n^* kT)^{3/2} h^{-3};$$

$$N_v = 2 (2 \pi m_p^* kT)^{3/2} h^{-3}; \quad (7)$$

$$E_c = 0; \quad E_v = E_g.$$

Тепе-теңдіксіз заряд тасушылар пайда болған кезде тасушылардың толық концентрациясы өзгереді, сондықтан Ферми деңгейінің орыны да өзгереді. Онда (5) және (6) қатыстардың аналогиясымен мынаны жазуға болады:

$$n = n_0 + \Delta n = N_c e^{\frac{F_n^* - E_c}{kT}} \quad (8)$$

$$p = p_0 + \Delta p = N_v e^{\frac{E_v - F_p^*}{kT}} \quad (9)$$

$F_n^*$  және  $F_p^*$  энергетикалық деңгейлері Ферми квазидеңгейлері деп аталады, электрондарға және кемтіктерге сәйкес, басқаша айтқанда  $F_n^*$  және  $F_p^*$  - термодинамикалық тепе-теңдіксіз өткізгіштік өңірдегі электрондық газдың және валенттік өңірдегі кемтік газдың химиялық потенциалдары. Термодинамикалық тепе-теңдіксіз жағдайда Ферми квазидеңгейлері тепе-теңдік жағдайындағы Ферми деңгейлерінің ролін атқарады, онда  $F_n^* \neq F_p^*$ . Тепе-теңдік жағдайларда  $n-n$  және  $p-p$  болғанда Ферми квазидеңгейлері Ферми деңгейлеріне  $F$  тең.

Теоретикалық есептер бойынша ((5) және (6) т е н д е у л е р д і қараныз) термодинамикалық тепе-теңдікте қаранғыда күйлердің электрондармен және кемтіктермен толу дәрежесі Фермидің бір деңгейін анықтайды  $F$  (сур.1, а). Электрондармен толу дәрежесі

Ферми деңгейінен өткізгіштік деңгейдің түбіне дейін энергетикалық ара қашықтығымен анықталады ( $E_c - F$ ), ал кемтіктермен толу дәрежесі - Ферми деңгейінен валенттік өңірінің жоғары шетіне дейін ( $F - E_v$ ).

Еркін заряд тасушылардың термалық емес қоздыру болған жағдайда (термодинамикалық тепе-теңдігі болмағанда) әрекеттесетін массалар заңы орындалмайды ( $pn \neq n_i^*$ ), ал деңгейлердің электрондармен және кемтіктермен толу дәрежесін анықтау үшін Ферми квазидеңгейлердің орналасуын білу керек (сур.1, б). Деңгейлердің электрондармен толуы өткізгіштік зонаның түбінен төмен орналасатын Ферми электрондардың квазидеңгеймен  $F_n^*$  анықталады, ал деңгейлердің кемтіктермен толуы - валенттік өңірінің жоғары шетінен жоғары орналасқан Ферми квазидеңгеймен  $F_p^*$  анықталады.

Жарық кванттарының жұтылуы кезінде ауысулардың үш түрі болуы мүмкін, олар фотоөткізгіштіктің пайда болуына келтіреді (сур. 2):

1) 1-ші ауысуы жарықтың меншікті жұтылуына сәйкес болады (кристалдың негізгі атомдарымен), ол әр жұтылған фотонға еркін электронның және еркін кемтіктің пайда болуады (меншікті фотоөткізгіштік) ( $\Delta n = \Delta p$ );

2) 4-ші ауысу жарықтың кристалда бекітілген кемтіктердің ж е т і л м е г е н д і г і н е н жұтылуына сәйкес, онда әр жұтылған фотонға бір еркін электрон және сәйкес келетін орталығына байланысты кемтік пайда болады;

3) 5-ші ауысуы мына жағдайға сәйкес: әр жұтылған фотон бос бекітілген деңгейге валенттік өңірден (акцепторды) электронды қоздырады, оның нәтижесінде еркін кемтік және байланған электрон пайда болады.

Қоспалы атомдар типті (түрлі) бекітілген күйлерінде фотоионизация кезінде (2 суреттегі і 4-ші және 5-ші ауысулар) тек қана бір типті заряд тасушылардың концентрациясы өседі (қоспалы фотоөткізгіштік). Онда екі жағдай болуы мүмкін: тепе-теңдіксіз заряд тасушылар негізгі бейтарап тасушылар болып табылады.

Егер тепе-теңдіксіз зарядтар бейтарап болса, ал олардың концентрациясы қаранғыдағы негізгі заряд тасушылардың концентрациясынан көп болса, онда жартылай өткізгішке жарық түскенде оның өткізгіштік типі өзгереді.

Жартылай өткізгіштердің меншікті атомдарын қоздыру үшін (ауысу 1, сур. 2) фотонның энергиясы  $h\nu_1 \geq \Delta E_a$  болу керек (қоспалы атомдарды қоздыру үшін (2-ші суреттегі 4 және 5 ауысулар)  $h\nu_4 \geq \Delta E_d$ ,  $h\nu_5 \geq \Delta E_a$  ( $\Delta E$ ,  $\Delta E_d$ ,  $\Delta E_a$  - меншікті, донорлық және акцепторлық атомдарға сәйкес энергиялары;  $\nu_1, \nu_4, \nu_5$  - жұтылатын жарыққа сәйкес жиіліктер).

Жарықтың фотоэлектрлілігі активті болған кезде, басқаша айтқанда еркін заряд тасушыларды тудыратын, толқынның максимал ұзындығы (фотоөткізгіштіктің қызыл шеті), мына қатыспен анықталады:

меншікті фотоөткізгіштік

$$\lambda_{\text{макс.і}} = ch/\Delta E \quad (10)$$

қоспалы фотоөткізгіштік

$$\lambda_{\text{макс.қосп.}} = ch/\Delta E_{\text{қосп.}} \quad (11)$$

Жарықтың жұтылуы келесі жағдайларда еркін заряд тасушыларды туғызбайды:

1) экситондық жұтылуы (сур. 2, 7-ші ауысу) электрлік бейтарап, электрон-кемтік байланыс жұптың пайда болуына келтіреді. Бірақ егер экситон (электрон-кемтік байланысты жұбі) торда қозғалғанда қосымша энергияны жұтқан нәтижесінде диссоцияланса, онда әр

экситон екі: еркін электрон және кемтік заряд тасушылардың пайда болуына келтіреді. Егер де экситон рекомбинацияланса, онда экситондық жұтылу өткізгіштіктің өсуіне келтірмейді;

2) жарықтың еркін заряд тасушыларда жұтылуы (сур. 2, 2-ші және 3-ші ауысулар) олардың концентрациясы өзгермейді, бірақ кейбір белгілі жағдайда олардың қозғалғыштығы өзгеруі мүмкін, онымен бірге өткізгіштігі де өзгереді.

3) жарықтың тордың тербелістерімен жұтылуы заряд тасушылар концентрациясының өсуіне тек қана екінші реттік эффектісі нәтижесінде болады, жарықтың жұтылуы фонондардың концентрациясын көбейтеді, олар заряд тасушыларды қоздыруға өз энергиясын береді.

**Заряд тасушыларды қармау, жабысу және рекомбинация процестері.** Егер электрондар және кемтіктер фотонның жұтылу нәтижесінде ерікті болса, онда олар тордың кез келген дефектісімен қармалғанша, немесе олар кристалдан электродтарға кеткенше еркін болып қала береді. Тасушыларды қармайтын орталықтар екі топқа бөлінеді:

1) жабысу орталықтары, онда қармалған тасушы жылулық қоздыру нәтижесінде қайтадан еркін күйге ауысу ықтималдығы қарама-қарсы зарядталған тасушымен рекомбинацияланатын ықтималдығынан жоғары болады (сур. 3, а, электрондық қақпандар 2 және 2', кемтікті қақпандар 1 және 1');

2) рекомбинация орталықтары, онда қармалған тасушы қарама-қарсы зарядталған тасушымен рекомбинациялану ықтималдығы қайтадан еркін күйде қоздырылу ықтималдығынан жоғары (сур. 3, а, кемтікті 3 және электронды 4 рекомбинация орталықтарымен қармау процесі).

Үш қарапайым рекомбинация процестерінің түрі сур. 3, б көрсетілген: 5-ші ауысу, онда еркін электрон кемтікпен тіке рекомбинациялады (түзу рекомбинация), 6-ші ауысу, онда электрон, кемтікті қармаған, қоздырылған орталықпен қармалады, 7-ші ауысу, онда кемтік, электронды қармаған қоздырылған орталықпен қармалады.

Көпшілік жағдайда рекомбинация қармау орталықтар арқылы өтеді, онда қоспалы орталықпен әуелі электрон қармалады, сонан кейін кемтік (9-ші ауысу), немесе керісінше, әуелі электрон қоспалы орталықтан валенттік өңірге түседі (кемтіктің қармауы), одан кейін қоспалы орталықтағы босаған деңгейге өткізгіштік өңірден электрон түседі (8-ші ауысу).

Тасушылардың рекомбинациясы кезінде, генерациясы кезіндегідей, энергия және импульстың сақталу заңдары орындалу керек. Рекомбинация кезінде жарық түрінде айырылып шығатын (сәулеленетін рекомбинациясы), немесе жылу түрінде (фотондар) айырылып шығатын (сәулеленбейтін рекомбинация), немесе басқа (еркін) электронға берілетін (соққы рекомбинациясы) энергия айырылып шығады.

**Заряд тасушылардың өмір сүру уақыты. Кванттық шығу.** Еркін тасушылардың өмір сүру уақыты  $\tau$  - ол тасушының өткізгіштікке қоспа (вклад) беретін уақыты, басқаша айтқанда қоздырылған электрон өткізгіштік өңірде ( $\tau_n$ ) немесе қоздырылған кемтік валенттік өңірде ( $\tau_p$ ) болатын уақыты. Еркін тасушының өмір сүру уақыты сол тасушының рекомбинациясы мезетімен немесе оның электр өрісімен кристалдан экстракция (сорып шығару) мезетімен шектеледі, егер осы кезде қарама-қарсы электродтан тура сондай тасушы пайда болмаса. Өмір сүру уақыты тасушы жиғышпен қармалғанда ұзулуі мүмкін, тасушы жиғыштан босағанда қайта жалғастырылады, немесе үзілмей жалғасуы мүмкін егер тасушы кристалдан өріспен экстрагирленетін уақыт мезетте кристалға тура сондай тасушы қарама-қарсы электродтан инъекцияланса.

Тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың рекомбинациясы жартылай өткізгіш аспаптардың жұмысына едәуір ықпалын тигізеді. Көлемдегі рекомбинацияны көлемдік өмір сүру уақыты

сипаттайды  $\tau_v$ , ал беттегі рекомбинациясын - беттік өмір сүру уақыты  $\tau_s$ .  $\tau_v$  - тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың артық концентрациясының  $\Delta n$  көлемдегі рекомбинация салдарынан концентрациясының өзгеру жылдамдығына қатынасы.

$$\tau_v = \frac{\Delta n}{\left| \frac{d\Delta n}{dt} \right|}$$

$\tau_s$  - жартылай өткізгіштің көлеміндегі тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың артық санының олардың бетіне қарай бағытталған жалпы ағынына қатынасы.

$$\tau_s = \frac{\int_V \Delta n dV}{\int_S j_s ds}$$

мұнда  $dS$  - бет элементі,  $j$  - заряд тасушылардағы токтың тығыздығы. Артық заряд тасушының өмір сүру уақыты

$$\tau = \frac{1}{NS\sigma}, \quad (12)$$

мұнда  $N$  - рекомбинация орталықтарының концентрациясы,  $S$  - қармау қимасы,  $v$  - рекомбинациялық орталыққа қатысты зарядтың жылулық қозғалысының орташа салыстырмалы жылдамдығы.

$N$  концентрациясы өте кең шекте өзгеруі мүмкін,  $10^{16} \text{ м}^{-3}$ -ден  $10^{25} \text{ м}^{-3}$ -ге дейін (кейбір өте таза кристалдарда). Кез келген рекомбинация орталығымен қармаудың қимасының шамасы  $S$  сол орталықтың манаындағы потенциалдың үлестірілуімен анықталады. Бейтарап орталықта қармау қимасы  $S$  реті бойынша атомдық өлшемдеріне сәйкес болады, басқаша айтқанда  $10^{-19} \text{ м}^2$ . Кулон заңы бойынша тартатын орталық үшін  $S=10^{-16} \text{ м}^2$ .

Бөлме температурасында электрондың жылдамдығы  $v$  жуықтап  $10^5 \text{ м/с}$  - ге тең.  $N$ ,  $S$ ,  $v$  шамаларды (12) берілуге қойғанда өмір сүру уақыты  $10^{-14}$ -ден  $10^9 \text{ с}$ -ке дейін аралықта өзгеру мүмкін.  $\tau$ -дың тәжірибелік шамалары  $10^{-10} \text{ с}$  немесе одан кем шамалардан  $10^{-2} \text{ с}$ -тан артық шамалардың арасында жатады.

$N$ ,  $S$ ,  $v$  әр түрлі шамаларымен сипатталатын рекомбинацияның бірнеше механизмдерінде заряд тасушының эффектілік (бақыланатын) өмір сүру уақыты түсінігін енгізеді:

$$\tau_{\text{эф}} = \frac{1}{\sum N_i S_i v} \quad (13)$$

мұнда  $S_i$ ,  $N_i$  - қармау қимасына және  $i$ -типті рекомбинация орталықтарының концентрациясына, сәйкес;  $v_i$  -  $i$ -типті рекомбинация орталығына байланысты алынған жылулық қозғалыстың орташа салыстырмалы жылдамдығы, немесе

$$\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \sum \frac{1}{\tau_i}, \quad (14)$$

мұнда -  $i$  рекомбинация механизмі үшін  $\tau_i$  сипаттамалы өмір сүру уақыты.

Эффектілік өмір сүру уақытын  $\tau_{\text{эф}}$  көлемдік  $\tau_v$  және беттік  $\tau_s$  рекомбинацияларына арналған бөлек өмір сүру уақыттардың құраушы ретінде қарастыруға болады, осы теңдеумен келіскенде

$$\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_s}. \quad (15)$$

Өмір сүру уақыты  $\tau_v$  жартылай өткізгіш материалдың санасы және оның жартылай өткізгіштік приборларды жасау үшін жарамдылық дәрежесі негізгі критерийлері болып табылады, ол кристалдан кристалға кең аумақта өзгереді, температурасына және химиялық қоспаларына тәуелді болады. Әр түрлі қоспалар әр түрлі дәрежеде заряд тасушылардың өмір сүру уақытына ықпалын тигізеді. Кейбір қоспалар (мысалы, германий және кремнийдегі алтын) тек қана активті рекомбинация орталықтары болып табылады, олардың донорлық немесе акцепторлық қасиеттері онша айқын болмаса да, олар заряд тасушылардың өмір сүру уақытын тез азайтады.

Өмір сүру уақыты  $\tau_s$  тек қана материалдың қасиеттеріне тәуелді емес, ол беттің күйіне, үлгінің өлшемдеріне, оның жасау технологиясына да тәуелді болады. Үлгінің жылтыр бетін химиялық өңдеу бетке жақын мандағы заряд тасушылардың жасау уақытын сондай шамаға өзгеруге мүмкіншілік береді, дnmек ондағы өлшенетін уақытты жартылай өткізгіштің көлеміндегі заряд тасушылардың өмір сүру уақыты деп есептеуге болады.

Жұтылған жарық ағынына есептелген *кванттық шығу* (ықтималдығы) деп, қоспалы өткізгіштік кезіндегі фототасушы жұптарды сандарының немесе заряд фототасушылардың  $\Delta n_1(r_1)$  сандарының жұтылған кванттардың жалпы сандарына  $N_1$  қатынасын айтады:

$$\beta_1 = \frac{\Delta n_1}{N_1}. \quad (16)$$

Жарықтың жұтылу механизмдерін қарастырғаннан осыны белгілі, кванттық шығуы екі ықтимал шамалардың бір мәніне ие болуы мүмкін: фотоактивті жұтулардағы бірлік шамасын немесе ноль шамасын фотоактивті емес жұтуларда қабылдайды. Бірақ тәжірибе бойынша өлшенетін  $r_1$  шамасы бірден кем де, артық та болуы мүмкін. Бірден кем кванттық шығуының шамасы жарықтың фотоактивті емес жұтылуларымен түсіндіріледі (экситондық - бос электрондармен, т.б.). Бір шамасынан асатын кванттық шығудың шамасын былай түсіндіруге болады, жартылай өткізгіш материалды энергиясы кванттың энергиясынан асатын сәулелермен нұрландырғанда, электрон мол кинетикалық энергияға ие болады, ол энергия электронның келесі соқтығыстарында тағы да бір немесе бірнеше ионизация актілерін тудыра алады.

**Фотоөткізгіштік релаксациясы. Фотоөткізгіштіктің жарықталану интенсивтілігіне тәуелділігі.** Жартылай өткізгішті энергиясы  $h\nu_1 \geq \Delta E$  немесе  $h\nu_2 \geq \Delta E$  квантпен жарықтандырылған кезде жарықтың жұтылуы еркін электрондардың және кемтіктердің пайда болуымен өтеді. Фотоөткізгіштіктің жарық интенсивтілігімен байланысын қарастырайық. Егер жартылай өткізгіштің бетіне  $\Phi_\lambda$  монохроматты ағын түссе, ал жартылай өткізгіштік бетінен жарықтың шағылысу коэффициенті  $r$  болса, онда жартылай өткізгішке кіретін ағынының шамасы

$$\Phi'_\lambda = (1-r)\Phi_\lambda. \quad (17)$$

Егер бір кванттың энергиясы  $h\nu$  болса, онда уақыт бірлігіндегі жартылай өткізгішке кіретін кванттардың саны  $N'$  болады

$$N' = \frac{\Phi'_\lambda}{h\nu} = \frac{(1-r)\Phi_\lambda}{h\nu}. \quad (18)$$

Егер жарықтың жұтылуының коэффициенті  $\alpha$  болса (бірлік қалыңдық қабатындағы бірлік интенсивтілігінің шоғынан жұтылған энергияның мөлшері), онда көлем бірлігінде уақыт бірлігі аралығында жұтылған кванттардың саны

$$N_1 = \alpha N' = \alpha \frac{\Phi'}{h\nu S}, \quad (19)$$

мұнда  $S$  - жартылай өткізгіштің ауданы.

Уақыт бірлігінде жартылай өткізгіштікке түсетін кванттардың  $N$  санын кейбір кезде жарықтың интенсивтігі деп атайды  $L$  ( $L = \Phi_\lambda / h\nu S$ ). "Жарық интенсивтілігі" терминді мөлшер сипаттамасы ретінде "жарық ағыны" немесе "жарықталыну" терминдерінің орнына қолданамыз, себебі олар кванттардың санына пропорционал (18-ші формуланы қараңыз), олардың нақтылы мазмұны мәнсіз болған жағдайда, олардың тек қана абсолют шамасынын кем немесе үлкендігін баса көрсету керек.

Жарықтың әр жұтылған кванты (фотон)  $\beta_i$  ықтималдығымен еркін тасушыны немесе бөлшектердің жұбын тудырсын, онда заряд тасушылардың генерациясының жылдамдығы (уақыт бірлігіндегі тепе-теңдіксіз генерацияланған заряд тасушылардың концентрациясы) мынадай болады:

электрондар үшін

$$\Delta n_1 = \beta_{1n} N_1 = \frac{\beta_{1n} \alpha (1-r) \Phi_\lambda}{h\nu S}, \quad \Delta n_1 = \beta_n \alpha L; \quad (20)$$

кемтіктер үшін

$$\Delta p_1 = \beta_p N_1 = \frac{\beta_p \alpha (1-r) \Phi_\lambda}{h\nu S}, \quad \Delta p_1 = \beta_p \alpha L, \quad (21)$$

мұнда  $\beta = (1-r)\beta_i$  - кванттық шығу (электрондардікі  $\beta_n$   $\beta_p$ ), түсетін жарық ағынына есептелген.

Егер фотоөткізгіштік бекітілген күйлерімен анықталатын болса онда  $\beta_n$  немесе  $\beta_p$  шамаларының біреуі нольге тең. Меншікті фотоөткізгіштік үшін (фундаментал жұтылуының ауданы)  $\beta_n = \beta_p = \beta$  және

$$\Delta n_1 = \Delta p_1 = \beta \alpha L. \quad (22)$$

Егер тек генерация процестері ғана болса, онда тепе-теңдіксіз тасушылардың концентрациясы  $t$  уақыт өтуімен сызықты заңдылық бойынша өзгертін еді.

$$\Delta n_1 = \Delta p_1 = \beta \alpha L t. \quad (23)$$

Негізінде тепе-теңдіксіз тасушылардың концентрациясы өскен сайын кері рекомбинация процесі өседі. Тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың генерация жылдамдығы жарықтандыру интенсивтілігі тұрақты болған кезде тұрақты болып қалады, онда рекомбинация жылдамдығы заряд тасушылардың генерация жылдамдығына тез жетеді және фототасушылардың тепе-тең концентрациясының стационарлық күйі орналасады.

Тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың концентрациясының уақыт бірлігіндегі өзгеруі заряд тасушылар генерациясының  $\Delta n_1$ ,  $\Delta p_1$  және рекомбинациясының  $\psi_n$ ,  $\psi_p$  жылдамдықтары арасындағы айырмашылығы болып табылады:

электрондар үшін

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = \Delta n - \psi_n; \quad (24)$$

кемтіктер үшін

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = \Delta p - \psi_p. \quad (25)$$

Жарықтандыру басталған кездегі тепе-теңдіксіз концентрациясының өсуі және оның жарықтандыру сөнгеннен кейін төмендеу процестері, басқаша айтқанда тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың релаксация құбылыстарын екі жеке қарапайым жағдайларды қарастырайық.

**Сызықтық рекомбинация.** Мұндай жағдай тепе-теңдіксіз электрондармен рекомбинацияланатын кемтіктердің көп концентрациясы р-типті жартылай өткізгіште пайда болады, мұнда кемтіктердің концентрациясы жарықталынудан тәуелді емес. Мұндай жағдайда электрондардың рекомбинация жылдамдығы тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың концентрациясына  $\Delta n$  пропорционал:

$$\psi_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad (26)$$

мұнда  $\tau_n$  - электронның орташа өмір сүру уақыты.

Егер тепе-теңдіксіз тасушылардың өмір сүру уақыты (кемтіктерге және электрондарға бірдей) олардың концентрациясына тәуелді болмаса, онда тек осы кезде рекомбинация жылдамдығы тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың концентрациясына пропорционал деп есептеуге болады.

$\psi_n$  және  $\Delta n$  шамаларын (22) теңдеуден (24)-ші теңдеуге қойсақ, онда алатынымыз:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = \beta \alpha L - \frac{\Delta n}{\tau_n}. \quad (27)$$

( $t=0$ ,  $\Delta n=0$  болғанда) бастапқы шарттарды ескеріп, (27)-ші теңдеуді шешкенде,  $\Delta n \ll p_0$  және  $p_0 \ll n_0$  деп есептесек мынаны аламыз:

тепе-теңдіксіз электрондардың концентрациясы үшін

$$\Delta n = \tau_n \beta \alpha L (1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}); \quad (28)$$

фотоөткізгіштік үшін

$$\Delta \sigma = \tau_n \beta \alpha L q_0 u_n (1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}). \quad (29)$$

$t \rightarrow \infty$  жағдайында стационар мәндері үшін аламыз:

тепе-теңдіксіз электрондардың концентрациясы

$$\Delta n_{ст.} = \tau_n \beta \alpha L, \quad (30)$$

фотоөткізгіштік үшін

$$\Delta \sigma = \tau_n \beta \alpha L q_0 u_n. \quad (31)$$

(29)-ші формуладан мынаны көруге болады:  $\Delta \sigma$  шамасы өзіннің стационарлық шамасы  $\Delta \sigma_{ст.}$ -на асимптотамен жақындайды. Осындай жағдайда  $\tau_n$  шамасын фотоөткізгіштіктің релаксация уақытының тұрақтысы деп атайды.



Егер жартылай өткізгіштің үлгісіне жарықтың түсуін үзсек, онда тасушылардың генерациясы тоқталады және (24)-ші теңдеуі мынадай түрде жазылады:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}. \quad (32)$$

( $t = 0$ ,  $\Delta n = \Delta n_{\text{ст}}$  болғанда) бастапқы шарттарды ескеріп, (32)-ші теңдеуді шешсек, онда мынаны аламыз:

тепе-теңдіксіз электрондар концентрациясы үшін

$$\Delta n = \tau_n \beta \alpha L e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad (33)$$

фотоөткізгіштік үшін

$$\Delta \sigma = \tau_n \beta \alpha L q_0 u_n e^{-\frac{t}{\tau_n}}. \quad (34)$$

Тепе-теңдіксіз өткізгіштіктің өсуі (29) және кемуі (34) қисықтары фотоөткізгіштіктің релаксация қисықтары деп аталады (сур. 4).

Сонымен сызықтық рекомбинация кезінде жарық лезде ажыратылса заряд тасушылардың тепе-теңдіксіз концентрацияның релаксациясы және фотоөткізгіштігі тепе-теңдіксіз заряд тасушылар жұбының өмір сүру уақытына сәйкес  $\tau_n$  уақыт тұрақтысымен экспоненциал заңдылығы бойынша өтеді. Ол релаксацияның қисықтарын зерттеп,  $\tau$  ( $\tau = \tau_n = \tau_p$ ) шамасын анықтауға мүмкіншілік береді.

**Квадраттық рекомбинация.** Бұл жағдай, мысалы, қараңғылық өткізгіштігі өте аз меншікті жартылай өткізгіште пайда болады, басқаша айтқанда тепе-теңдіксіз электрондардың және кемтіктердің концентрациясы бірдей болғанда тепе-тең тасушылардың концентрациясы жұықтап нольге тең болады және ионизация кезінде электрондар валенттік өңірден еркін өңірге ауысады. Мұндай жағдайда рекомбинация жылдамдығы тепе-теңдіксіз тасушылар концентрациясының квадратына пропорционал:

$$\psi = \gamma \Delta n \Delta p = \gamma (\Delta n)^2, \quad (35)$$

мұнда  $\gamma$  - пропорционалдық коэффициенті.

Жарықтандыруды қосқанда тепе-теңдіксіз тасушылардың (электрондардың) санының өзгеруінің толық жылдамдығы мына теңдеумен анықталады:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = \beta \alpha L - \gamma (\Delta n)^2. \quad (36)$$

Жарықтандыруды ажыратқанда

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\gamma (\Delta n)^2. \quad (37)$$

(36) және (37) теңдеулерін шешкенде, сызықтық рекомбинация кезіндегі шарттарға аналогиялық бастапқы шарттарды қолдансақ, мынаны аламыз: ұзақтығы жеткілікті тікбұрышты жарық импульспен жарықтандырсақ тепе-теңдіксіз концентрациясының релаксация қисықтарының өсуі және кемуі былайша анықталады:

өсуі үшін

$$\Delta n = \sqrt{\frac{\beta\alpha L}{\gamma}} th(\sqrt{\gamma\beta\alpha L} \cdot t) \quad (38)$$

кемуі үшін

$$\Delta n = \sqrt{\frac{\beta\alpha L}{\gamma}} \frac{1}{t\sqrt{\gamma\beta\alpha L + 1}}. \quad (39)$$

Осындай теңдеулерді тепе-теңдіксіз кемтіктер үшін де жазуға болады.

Жиғыштардың беттік рекомбинацияны, жұтылудың бір қалыпты еместігін және т.б. есептегенде, келтірілген теңдеулер соғұрлым күрделі болады.

(38) және (39) теңдеулерден байқалатыны, квадраттық рекомбинация жағдайында фотоөткізгіштердің концентрациясы өседі және әртүрлі заңдар бойынша кемиді және оны релаксацияның тұрақты уақытымен сипаттауға болмайды. Ондай жағдайда релаксацияны жазу үшін лездік өмір сүру уақытын енгізеді

$$\tau = \frac{1}{\gamma\Delta p}, \quad (40)$$

мұнда  $\gamma\Delta p$  - жеке электрон үшін алынған рекомбинацияның орташа ықтималдығы.

$\Delta p$  шамасы (валенттік зонадағы кемтіктердің концентрациясы) өзі жарықтың интенсивтілігіне және уақытқа (стационар емес жағдайда) тәуелді болғасын,  $\tau$  айнымалы шама болатындығы түсінікті, бірақ ол уақыттың әр мезетінде ерекше мағынада болады. Егер  $\tau$ -деп уақыттың лездік шамасын есептесек, онда (29) және (34) теңдіктер жалпы жағдайда фотоөткізгіштіктің релаксациясын жазуға жарайды, ал  $\tau$  - релаксациялық өмір сүру уақыты деп аталады, басқаша айтқанда  $\tau$  - жартылай өткізгіштіктің бетін қараңғылса фототасушылардың концентрациясы немесе фотоөткізгіштігі 63%-ке (2,7 есе рет) өзгеретін уақыт, концентрациясының немесе фотоөткізгіштіктің орныққан шамасына қатынасты алғанда.

Қоспалық жұтылу жағдайында тасушылардың генерация жылдамдығы ( $\beta\alpha L$ ) жарықтың интенсивтілігінің өзгеруімен сызықсыз өзгереді, себебі  $\alpha$  қоспалық аумағында жарықтың жұтылу коэффициенті тұрақты болып қала бермейді, ол жарықтың интенсивтілігі өскендіктен босағандығынан қоспалық орталықтардың анағұрлым азаяды. Жұтылу коэффициентінің  $\alpha$  қоспалық аумағындағы жарық интенсивтілігінен тәуелділігі қоспалық фотоөткізгіштіктің релаксация процестерінде өте маңызды.

Фотоөткізгіштіктің  $\Delta\sigma$  және фототоктың  $I_\phi$  (жартылай өткізгішке жарық түскен кездегі орныққан жарықталыну мен қараңғылық токтың арасындағы айырмашылығы) жарықтың интенсивтілігінен тәуелділігі рекомбинация түрімен (типімен) анықталады. Егер рекомбинация сызықты болса, онда заряд тасушылардың артық концентрациясы ((30) формуланы қараныз) және фотоөткізгіштіктің ((31) формуланы қараныз) жарық интенсивтілігіне пропорционал, сондықтан фототок та жарықтың интенсивтілігіне пропорционал:

$$\Delta\sigma \sim L, \quad I_\phi \sim L \quad (41)$$

Квадраттық рекомбинация кезінде артық концентрациясы ((38) теңдікті қараныз)  $\sqrt{L}$  пропорционал, сондықтан фотоөткізгіштік және фототок та жарық интенсивтілігінің түбір астындағы шамасына пропорционал:

$$\Delta\sigma \sim \sqrt{L}, \quad I_{\phi} \sim \sqrt{L}. \quad (42)$$

Тек қана интенсивтіліктері аз болғанда қоспалық фотоөткізгіштік аумағында фототок жарық интенсивтілігінен сызықты тәуелді. Жарық интенсивтіліктері үлкен болған кезде қоспалық орталықтары толық босағанда фототок қанығады.

Жалпы жағдайда фотоөткізгіштік  $m$  ынадай болады:

$$\Delta\sigma \sim L^{\alpha}, \quad (43)$$

мұнда  $\alpha$  - дәреже көрсеткіші, оның шамасы рекомбинация түрінен (типінен) және жарық интенсивтілігінен тәуелді.  $\alpha = 1$  болғанда фоторезистивтік эффект *сызықты* деп аталады,  $\alpha < 1$  болғанда - *сызықсыз*, ал  $\alpha > 1$  - *асасызықты*.

Фотоөткізгіштің  $\Delta\sigma$  жарық интенсивтілігіне  $L$  қатынасы жартылай өткізгіш заттың фотосезгіштігі деп аталды

$$\alpha_{\phi} = \frac{\Delta\sigma}{L}. \quad (44)$$

Жұмыс істеуі фоторезистивтік эффектке (фотоөткізгіштікке) негізделген фотоэлектрлік жартылай өткізгіштік аспап фотокедергі немесе фоторезистор деп аталады. Изоляцияланған төсенішке жабылған жартылай өткізгіш пластинкалар немесе қабықшалар фоторезисторлар болып табылады. Жартылай өткізгіш қабатқа электродтар бастырылады және барлық жүйені арнаулы патронның ішіне бекітеді.

Көрінетін жарықта сезгіш фоторезисторлардың өндірістік типтері (түрлері) күкіртті және селенді кадмийдің негізінде жасалған (ФС-К және ФС-Д); күкіртті және селенді қорғасынның негізінде жасалған спектрдің инфрақызыл аумағында сезгіш фоторезисторлар (ФС-А және СФ-4); рентген және гамма сәулеленуіне арналған күкіртті және селенді кадмийден жасалған фоторезисторлар (РГД және ГД) өндірістік типтері шығарылады.

Қарапайымдылығы және сенімділігі, сезгіштігінің жоғары және мөлшері кіші болғандықтан фоторезисторлар ғылым мен техниканың әр түрлі саласында кең қолданылады. Оларды фотоэлектрлік түрлендіргіштер (нұрды қабылдағыштар), өлшеуіш құрылғылар (түтінөлшеуіштер, люксметрлер т.б.), фотоэлектрлік реле және реттеуіштер (детальдарды автоматты сорттау т.б.) ретінде қолдануға болады.

## 2. Әдістің теориясы және қондырғының бейнеленуі

Фоторезисторлардың әр түрінің қолдану аумағы оның қасиеттерімен анықталады: вольт-амперлік және жарықтық сипаттамасымен, сезгіштігімен, қаранғыдағы кедергінің  $R_T$  жарықтағы кедергісіне  $R_C$  қатынасымен, уақыт тұрақтысымен  $\tau$ , фототоктық температураға тәуелділігімен (токтың температуралық коэффициентімен), жұмыс кернеуімен т.б.

Егер фоторезистор электр тізбегіне кернеу көзімен тізбектей жалғанса, онда қаранғыда онымен қаранғылық ток ағады  $I_T$ , ал оның беті жарықталынса тізбекте жарықтық ток ағады  $I_C$ . Орнатылған жарық токтың  $I_T$  және қаранғылық токтың  $I_C$  арасындағы айырмашылығы *фототок* деп аталады  $I_{\phi}$  ( $I_{\phi} = I_C - I_T$ ).

1. Фоторезистордың *вольт-амперлық сипаттамасы* деп қаранғылық токтың, жарықтық токтың және фототоктың фоторезисторларға түсетін жарық ағынының тұрақты шамасында фоторезисторға берілген кернеуден тәуелділігі аталады. Көпшілік фоторезисторларға бұл тәуелділік мына түрде болады:

$$I = CU, \quad (45)$$

мұнда  $C$  - пропорционалдық коэффициент, ол фоторезистордың типінен және жарықтың интенсивтігінен тәуелді.

Көпшілік фоторезистордың вольт-амперлық сипаттамалары сызықты болады, басқаша айтқанда кернеу өзгеруінің кең аумағында Ом заңы орындалады, ал әлсіз электр өрістерінің аумағында фоторезисторлар омдық кедергілер болып табылады. Кейбір фоторезисторларда, оларға қосылған кіші немесе үлкен кернеулер аумағында, сызықтықтан ауытқуы байқалады.

2. Фоторезистордың *жарықтық* (люкс-амперлік) *сипаттамасы* деп фоторезисторға өзгермейтін кернеу берілген жағдайда фототоктың жарық интенсивтілігінен (жарық ағынынан немесе жарықталынудан) тәуелділігін айтады.

Көбісінде практикада люкс-амперлік сипаттамалары жарықталынудың фототоктан тәуелділігі емес, ал жарықтық токтың немесе кедергінің жарықталынудан тәуелділіктері түрінде келтіріледі.

Фоторезисторлардың фототогының жарықталынудан тәуелділігі фотоөткізгіштіктің жарық интенсивтілігінен тәуелділігінен анықталады ((43)-ші формуланы қараныз) және жалпы жағдайда оның сипаттамасы сызықсыз болады.

$$I_{\phi} = C_1 \Phi^a U = C_1 U S^a E^a \quad (46)$$

мұнда  $C_1$  - пропорционалдық коэффициент,  $U$  - берілетін кернеу,  $\Phi$  - жарық ағыны,  $a$  - дәреже көрсеткіші, оның шамасы  $1, >1, <1$ ;  $S$  - фоторезистордың ауданы,  $E$  - жарықталынуы.

Фоторезистордың жарық сипаттамасын түсіру үшін  $U$  кернеуді орнатады (рұқсат шамалар шегінде) және жарықталынуды диафрагманың көмегімен өзгертіп, люксметрмен әр кезде  $E$  жарықталынуды және микроамперметрмен  $I_m$  және  $I_c$  өлшейді.  $I_{\phi}$  токты есептейді.

$I_{\phi} = a(E)_{U=const}$  тәуелдікті түсіреді және рұқсат шамаларының шегінде әр түрлі берілген кернеулерде оны бір координаттық системада график бойынша өрнектейді.

3. *Интегралдық сезгіштік* деп жұмыс кернеу кезіндегі фоторезистор тізбегінде ағатын фототоктың жарықты сезетін элементке қызу лампынан түсетін жарық ағынына тәуелділігін атайды. Лампының вольфрам сымы түстік температура  $T=2848$  К дейін қыздырылған.

$$K_u = I_{\phi} / \Phi. \quad (47)$$

Фоторезистордың *меншікті интегралдық сезгіштігі* деп фототоктың түсетін жарық ағынының шамасына және келтірілген кернеудің шамасына тәуелділігін атайды.

$$K_y = I_{\phi} / \Phi U. \quad (48)$$

4. Фоторезисторларды практикада қолдануда көпшілік жағдайларда фоторезисторларға жарық түскен кезде кедергінің неше есе өзгеруіне үлкен мән беріледі.

$$R_T / R_c = I_c / I_T \quad (49)$$

және кедергінің салыстырмалы өзгеруіне

$$\Delta R/R_T = ((R_T - R_C)/R_T) * 100\% \quad (50)$$

Жұмыс кернеу  $U_p$  және жарықталыну  $E$  үшін қараңғылық және жарықтық токтарды анықтайды, одан кейін кедергінің өзгеру еселігін есептейді. Фоторезистордың қараңғылық кедергісі және оған жарық түскен кезіндегі кедергісі Ом заңы бойынша есептеледі

$$R_T = U_p / I_T \quad (51)$$

$$R_C = U_p / I_C \quad (52)$$

5. Фототоктың *түсу уақытының тұрақтысы* (заряд тасушылардың релаксациялық өмір сүру уақыты, (40-ші теңдеуді қараныз)) - фоторезистордың беті қараңғыланса фототоктың  $e$  рет (63%-ке) кемитін уақыты. Ол фоторезистордың артық заряд тасушысының өмір сүру уақытымен байланысты инерциялығын сипаттайды ((12-ші) теңдеуді қараныз). Өмір сүру уақытын өлшеу 6, 7 суреттерде келтірілген сұлбалар бойынша өткізіледі.

6. Фоторезистордың жиіліктік сипаттамасын [ $I_\phi = f(\nu)$ ] зерттеу үшін бөші суреттегі сұлбаға синусоидалы тербеліс генераторын қосады. Жүктелме кедергіден түсірілген айнымалы кернеу  $R_n$  лампылы милливольтметрмен немесе осциллографпен өлшенеді. Ол фототокқа пропорционал ( $U_n = I_\phi R_n$ ).

### Жұмыс тапсырмасы

1. Жартылай өткізгіш аспаптардың сипаттамаларын өлшейтін қондырғының және реттелетін жарықтандырғыш көмегімен мынаны алыңыз: 1) 200 лк кезіндегі вольт-амперлік сипаттамасын, 2) фоторезистордағы жұмыс кернеу кезіндегі жарықтық сипаттамасын.

2. Зерттелетін фоторезистор үшін вольт-амперлік  $I_\phi = f(U)_{E=const}$  және жарықтық  $I_\phi = f(E)$  сипаттамаларын салыңыз.

3. Зерттелетін фоторезистор үшін: 1) интегралдық және меншікті сезгіштіктерді ( $K_u, K_m$ ); 2) қараңғылықтағы кедергіні  $R_k$ , жарық түскен кезіндегі кедергіні  $R_j$ , фотоөткізгіштікті  $\Delta\sigma$ , кедергінің өзгеру еселігін, жұмыс істейтін кернеу үшін және жарықтануы 200 лк болған кезде кедергінің салыстырмалы өзгерісін ( $(R_k - R_j)/R_k$ ) есептеніз.

4. Қондырғының сұлбесін жинаңыз (6, 7 сур. қар.), фоторезисторға тік бұрышты жарықтық импульстар түскен кездегі осциллографтың экранында тұрақты релаксациялық қисығын алыңыз.

5. Фоторезисторға тік бұрышты жарықтық импульстар түскен кезіндегі фототоктың релаксация қисықтарын салыңыз да уақыттың өсу  $\tau_{ос у}$  және төмендеу  $\tau_{том}$  тұрақтысын анықтаңыз.  $\tau_{том}$  өлшеу нәтижелері бойынша фоторезистордың жартылай өткізгішті материалындағы заряд тасушылардың релаксациялық (тиімділікті) өмір сүру уақытың бағаланыз.

6. Зерттелетін фоторезистордың жиілікті сипаттамасын түсіріп алыңыз.

**Ескерту.** Егер берілген жарықталынуда жұмыс кернеуі және шектелетін қуатына шашырау белгілі болса, жұмыс жасау алдында зерттелетін фоторезисторда берілген токтың шамасын есептеп алыңыз. Фоторезистордың барлық зерттеулерінде токты берілген шамасынан жоғарылатуға болмайды, немесе фоторезистордағы қуаттың шашырауын берілген фоторезистордың шектелген қуатынан және шашырауынан асырмау керек. Фоторезистордың жұмыс кернеуі жарықталынуға тәуелді (фоторезистордың паспорттың ол

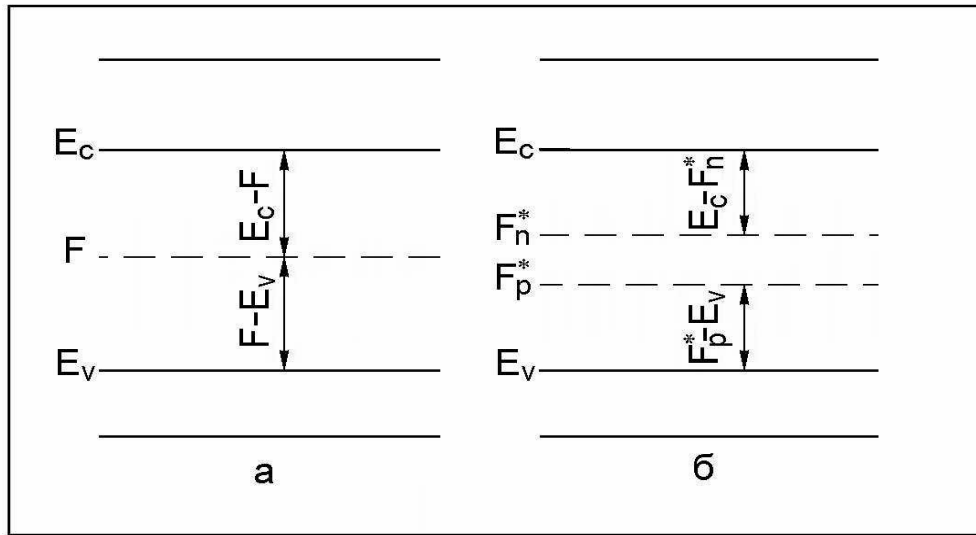
$E=200$  лк кезінде беріледі). Жоғары жарықталынуы кезінде фоторезистордың жұмыс кернеуі кемиді, ал жарықталынуы аз болғанда - өседі.

**Бақылау сұрақтар:**

1. Заряд тасушылардың қайсын тепе-тең, қайсын тепе-теңдіксіз деп атайды?
  2. Жарықтың кванттары жұтылған кезіндегі және рекомбинация кезіндегі электрондардың мүмкін болатын ауысуларын түсіндіріп беріңіз. Электрондардың түзу және түзу емес ауысулар дегеніміз не?
  3. Тепе-теңдіксіз тасушылардың генерация және рекомбинация механизмдерінің қайсысы аса ықтимал болады?
  4. Меншікті және қоспалы жартылай өткізгіштер үшін фотоөткізгіштіктің қызыл шекарасы қандай берілулермен анықталады?
  5. Жарықтың фотоэлектрлік белсенді емес жұтылуының механизмдерін атап шығыңыз.
  6. Тепе-теңдіксіз заряд тасушылардың өмір сүру уақыты деп нені айтады?
  7. "Кванттық шығу" түсінігінің физикалық мағынасы қандай?
  8. Стационарлық фотоөткізгіштіктің жарық интенсивтілігіне тәуелділігін түсіндіріп беріңіз.
  9. Жарықтың тік бұрышты импульстермен жарықтандырылған кезде пайда болатын фотоөткізгіштің релаксация процестерін түсіндіріп беріңіз.
  10. Фоторезисторлардың негізгі сипаттамалары қандай? Фоторезисторлардың вольт-амперлік, жарықтық, жиілікті және спектрлік сипаттамаларын түсіндіріп беріңіз.
  11. Уақыт тұрақтысының ( $\tau$ ) физикалық мағынасын түсіндіріп беріңіз. Ол тәжірибе бойынша қалай анықталады?
  12. Фоторезисторларды вакуумдық фотоэлементтермен салыстырғанда ерекшеліктері мен кемшіліктерін атап шығыңыз, фоторезисторлардың автоматикада және техникада қолдану мысалдарын келтіріп беріңіз.
- Фотондардың толық емес жұтылудың мысалы: (а) - құрылым,  $E_g$  жарық түсетін бетінен жартылай өткізгіштің тереңіне қарай өседі; (б) - спектрдің ұзынтолқынды бөлігі (пунктирмен) 3, 4 суреттер
- P-n-ауысуының орналасу тереңдігінің сезгіштік спектрінің қысқа толқынды ауданына тәуелділігі 5 сурет

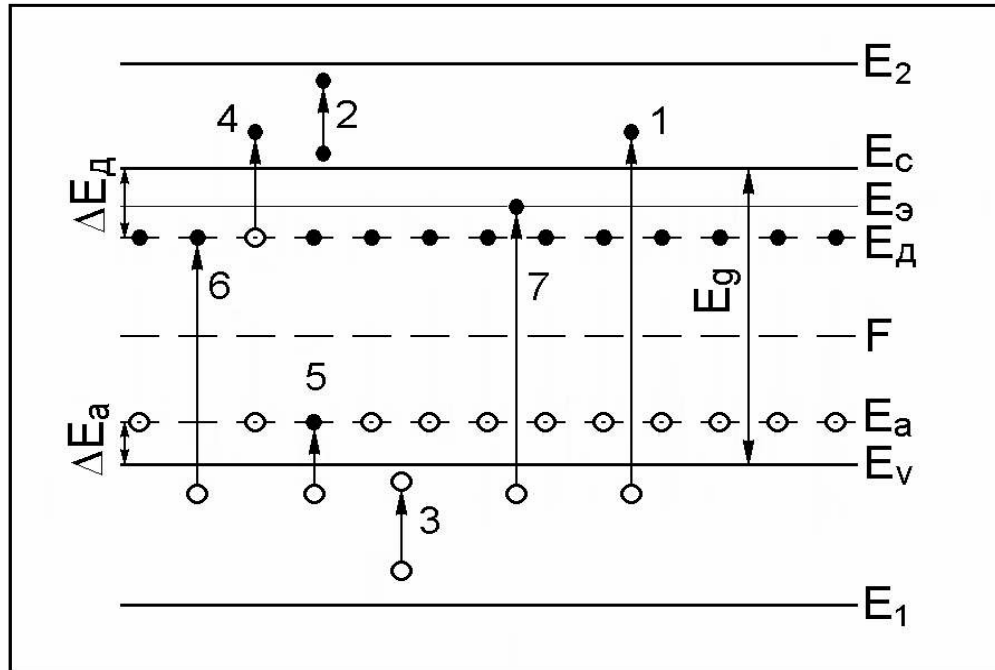
**ҚОЛДАНЫЛҒАН ШЫҒАРМА ӘДЕБИЕТТЕР**

1. Шалимова К. И. Физика полупроводников. М., Энергоатомиздат, 1985, 392 с.
2. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963, 494 с.
3. Лысов В. Ф. Практикум по физике полупроводников. М., Просвещение, 1976, 207с.



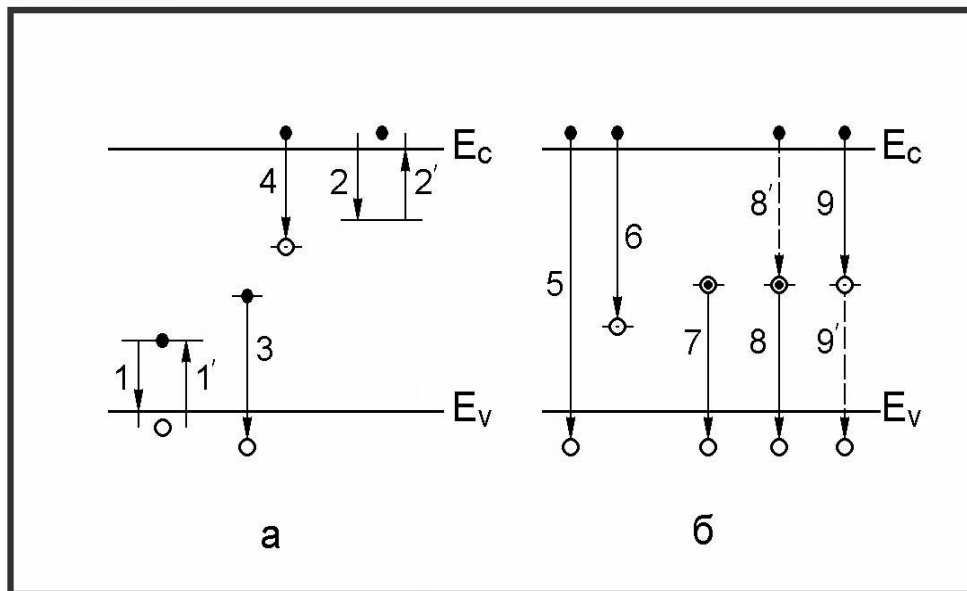
- а) Ферми деңгейінің жылулық тепе-теңдік кезіндегі орны;  
 б) Ферми квазидеңгейінің қалыпты (стационар) жағдайда оптикалық қоздырылуы.
- 1 сурет

Фотондар жұтылған кездегі жартылай өткізгіштегі электрондардың мүмкін болатын орын ауысулары.



- 1 - өңір-өңір ауысуы;  
 2, 3 - өңір ішінде ауысу  
 4, 5 - қоспа орталықтарының ауысу;  
 6 - қоспаның донорлық деңгейіне ауысу;  
 7 - экситон деңгейіне ауысу.

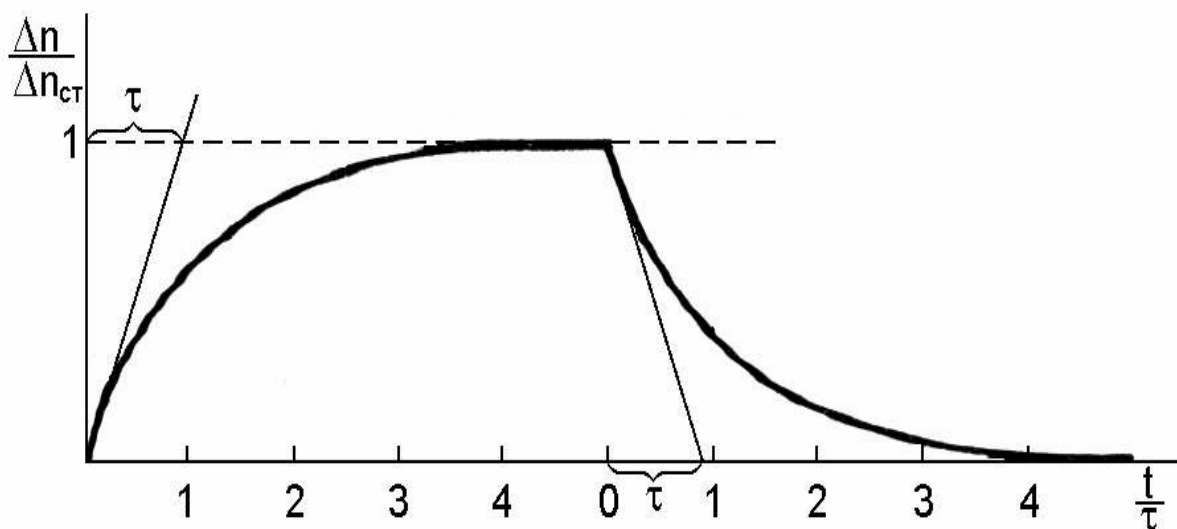
2 сурет



- а) жабысу және қармаудың мүмкін жолдарының сұлбесі
- б) заряд тасушылардың рекомбинациясы

3 сурет

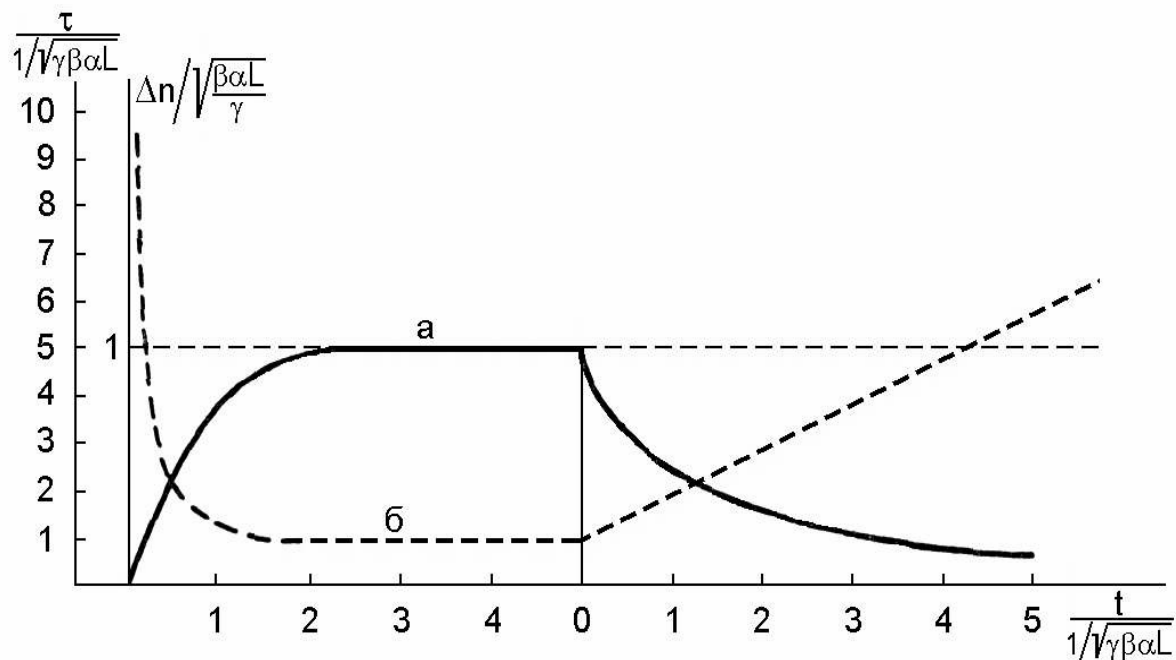
Жарықтың тікбұрышты импульстерімен қоздырған кездегі тепе-теңдіксіз концентрациясының релаксациясы. Сызықты рекомбинация жағдайы.



4 сурет.

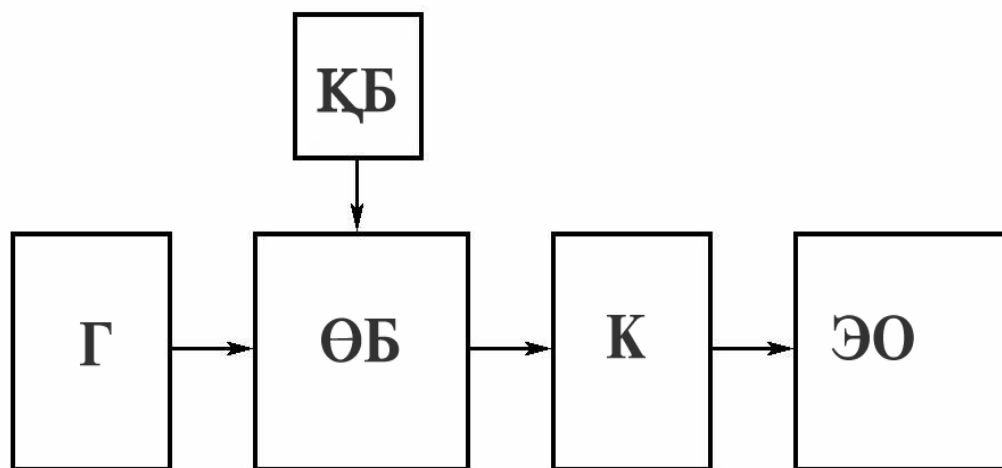


Квадраттық рекомбинация жағдайында жарықтық тікбұрышты импульстерімен қоздырылған кездегі лездік өмір сүру уақыты (б) және тепе-теңдіксіз концентрациялар релаксациясы (а)



5 сурет

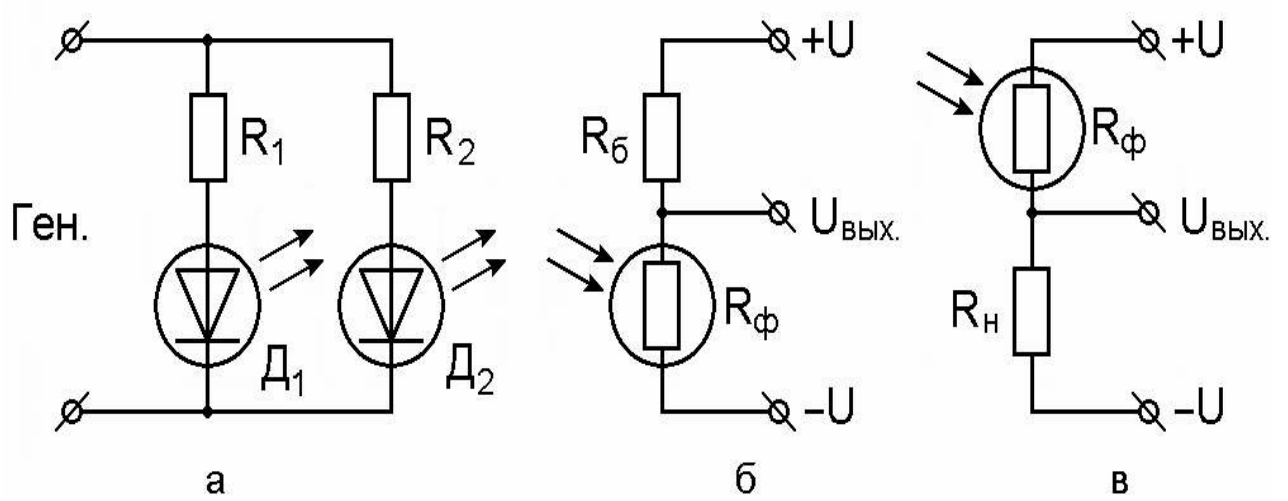
Фотоөткізгіштіктің өшу әдісі негізгі емес заряд тасушылардың өмір сүру уақытын өлшейтін қондырғының блок-сұлбесі



Г - импульсты генераторы, ӨБ - өлшеуіш блок, ҚП - қорек блогы, К - күшейткіш (қажет кезінде қосылады), ЭО - электронды осциллограф

6 сурет

Өлшегіш блогының сұлбесі



7 сурет