

Дәріс 12. Каскадты күн элементтері. Квантты нүктелерден тұратын Si негізіндегі каскадты күн элементтері

Дәрістің жоспары

1. Каскадты күн элементтері
2. Каскадты күн элементтерінің жұмыс істеу принципі
3. Каскадты күн элементтерінің қолданысы
4. Күн элементтерінің негізгі сипаттамалары

Заманауи КЭ көпшілігі бір p-n-ауысуға ие. Мұндай элементте еркін заряд тасымалдаушылары энергиясы тиым салынған аумақ еніне тең немесе жоғары фотондармен түзіледі. Яғни, бір ауысулы элементтің фотоэлектрлік дыбысы энергиясы тиым салынған аумақ енінен жоғары күн спектрінің бөлігімен шектелген, ал энергиясы аз фотондар қолданылмайды. Бұл қиындықтан шығу тиым салынған аумағының ені әр түрлі екі немесе одан да көп бірнеше қабатты құрылымды КЭ алуға мүмкіндік береді. Мұндай элементтер көп ауысымды, **каскадты** немесе тандемді деп аталады. Олар күн спектрінің айтарлықтай жоғары бөлігімен жұмыс істегендіктен, фотоэлектрлік түрлендіру тиімділігі жоғары.

Каскадты күн элементтерінің жұмыс істеу принципі

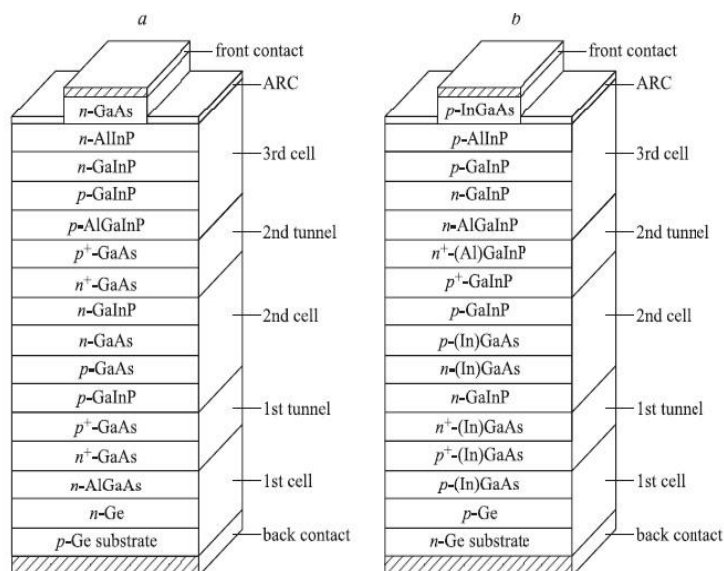
Суреттегі көп ауысымды күн элементінде бірлік фотоэлементтер бірінен соң бірі орнатылған, мұнда күн сәулесі алдымен тиым салынған аумақ ені ең жоғары элементке түсіп, энергиясы жоғары фотондар жұтылады. Жоғары қабатта жіберілген фотондар тиым салынған аумақ ені аз келесі элементке енеді.

Каскадты күн элементтерінің қолданысы

Каскадты фотоэлементтер ұзақ уақыттан бері күн батареяларының ПӘК арттыру тәсілі ретінде қарастырылып келеді.

Қазіргі уақытта каскадты күн элементтері ғарыш аппараттарын жабдықтауда қолданылуда. Алғашында жоғары ПӘК механикалық біріктірілген фотоэлементтерде алынды. Алайда тиімдісі монолитті құрылым болып табылады. Алғашқы көп қабатты құрылым германий төсенішінде өсірілді. Жоғарғы фотоэлемент $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$, ал төменгі GaAs қатты ерітіндісінде p-n ауысуға ие болды. Фотоэлементтер туннельді p-n ауысу реті бойынша біріктірілді. Онан соң процесске германий төсенішіндегі p-n-ауысуға ие үшінші каскад қосылды.

Каскадты күн элементтері



Сурет 1. Үшқаскадты күн элементінің көлденең қимасы

Суретте үшқаскадты күн элементінің көлденең қимасы көрсетілген. Төрті және бес қаскадты фотоэлементке ауысу кезінде олардың гетероқұрылымы күрделене түседі.

Күн сәулесінің спектрі	ПӘК, %					
	Мәні	Каскадтағы p-n ауысу саны				
		1	2	3	4	5
Жер төңірегіндегі жағдайларда	Теориялық	28	33	38	42	45
	Жоспардағы	23	28	33	36	38
	Жүзеге асырылған	21,8	27,2	29,3	-	-
Жердегі жағдайда	Теориялық	30	36	42	47	49
	Жоспардағы	27	33	38	42	44
	Жүзеге асырылған	25,1	30,3	31,0	-	-
Концентрациялы жердегі жағдайда	Теориялық	35	42	48	52	54
	Жоспардағы	31	38	43	47	49
	Жүзеге асырылған	27,6	31,1	34,0	-	-

Каскадты күн элементтерінің түрлі жағдайлар үшін теориялық, жоспарланған және қол жеткізген ПӘК мәндері

Бүгінде гетероқұрылым негізіндегі каскадты күн элементтерінің тиімділігі 35-40% құрайды.

Квантты нүктелерден тұратын Si негізіндегі каскадты күн элементтері

Наноқұрылымды каскадты күн элементтері ғарыштық күн батареяларында кремний элементтерінің аса жоғары тиімділігі үшін кеңінен қолданылады. Концентраторлы және бақылау жүйесі айтарлықтай жоғары өндіргіш құрылғының электр энергиясының мәні кремний күн батареяларына қарағанда жоғары.

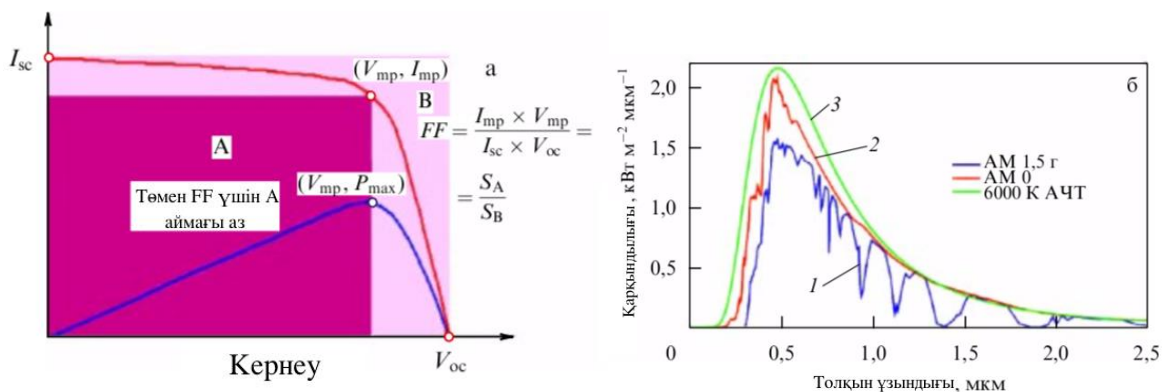


Кремний және наноқұрылым негізіндегі фототүрленгіштердің ПӘК арту динамикасы

Қазіргі кезде ПӘК жоғарылататын каскадты күн элементтерді қолданылады. Каскадты күн элементінде күн спекторы екі бөлікке бөлінеді: әрқайсысы әртүрлі материалдан жасалатын фотоэлемент көмегімен түрленетін көрінетін және инфрақызыл спектрлерге бөлінеді. Бұл кезде күн сәулелерінің энергия кванттарының жоғалуы төмендейді. Мысалы екі элементті каскадта ПӘК 40% асады.

Күн элементтерінің негізгі сипаттамалары

Барлық КЭ жұмысы пайдаланылатын материалдардың түріне қарамастан: бос жүріс кернеуі V_{oc} (open circuit), қысқа тұйықталу тоғы I_{sc} (short circuit), толтыру коэффициенті FF (fill factor) және пайдалы әрекет коэффициенті параметрлерімен сипатталады (ПӘК). Осы параметрлердің графикалық иллюстрациясы 1а-суретте берілген. Көрсетілген параметрлерді есептеу үшін маңызды бастапқы деректер құрылымдардың кванттық шығуын және бірінші кезекте кванттық тиімділікті анықтайтын КЭ спектрлік сипаттамалары болып табылады. Кванттық тиімділік (КТ) күн элементімен жиналған заряд тасымалдаушылар санының осы энергияның түсетін фотондарының санына қатынасы ретінде анықталады (спектрдің бірлік интервалында). Идеалды КЭ КТ рұқсат етілмеген аймақтың енінен көп фотон энергиясына тәуелді емес, ал энергиясы аз фотондар үшін КТ нөлге тең. КТ қисығы формасының ауытқуына идеалды қысқа толқынды және ұзын толқынды жұтылу спектрінің аймағында пайдалы энергияның жоғалуына әкелетін көптеген факторлар әсер етеді (кремнийлі КЭ-де, бірінші кезекте кремний беттерінің пассивация сапасы). Жұтылу спектрінің орталық аймағында шағылысудың шығындары, сондай-ақ фотоиндуцирленген тасымалдаушылардың диффузия ұзындығының төмен мәні анықтаушы болып табылады.

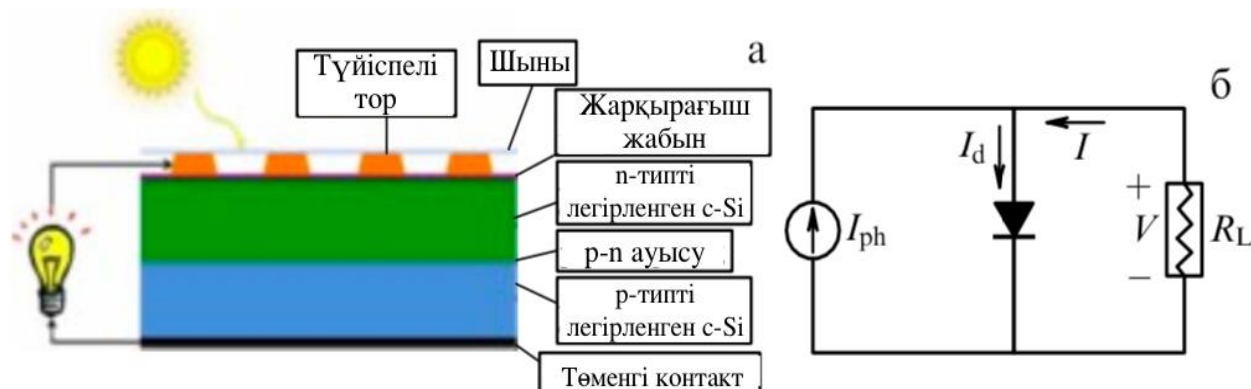


Сурет 1 - (а) Күн элементінің вольт-амперлік және ватт-амперлік сипаттамалары. (б) Жер бетіндегі күн сәулесінің спектрлері (AM-ауа массасы, AM 1,5G - 50° ендікте (1-қисық) және AM 0 - жер маңайындағы орбитада (2-қисық)). Салыстыру үшін Күн фотосферасының температурасымен абсолютті қара дене (АҚД) спектрі көрсетілген (3-қисық) [31, 5841 бет]

SR (photovoltaic spectral response) спектрлік сезімталдық КЭ-нің екінші маңызды сипаттамасы болып табылады, яғни фотоэлектрлік қабатта генерацияланатын фототоктың жиіліктердің бірлік интервалында жұтылған сәулеленің қуатына қатынасы. Кейбір материалдар (кристалды кремний, германий, негізгі көпкомпонентті жартылай өткізгіштер) үшін бөлме температурасында ω сәуле шығару жиілігіне SR тәуелділігі идеалды тәуелділікпен жуықтап ауыстырылуы мүмкін: $E_g = h\omega_g$ рұқсат етілмеген аймақ енінің төмен болатын энергиясы бар фотондар үшін $SR = 0$, және жоғары энергиясы бар фотондар үшін $SR = e/h\omega$ (мұнда e -электрон заряды, h - Планк тұрақтысы). Бірақ көптеген фотоэлектрлік материалдар үшін $SR(\omega)$ функциясы басқа түрге ие және температураға байланысты әр түрлі тәуелді. Кванттық тиімділік және спектрлік сезімталдық КЭ жиіліктерінің жұмыс диапазонын анықтайды.

Диодты типтегі КЭ-де фототок шамасы фотоэффект нәтижесінде жарықпен пайда болатын және р-п-ауысуымен немесе жартылай өткізгіш материалдардың шекарасымен бөлінетін зарядтың артық тасымалдаушылар санымен анықталады. Бұл түрде электрондар п-облысында, ал кемтіктер – р-облысында көрсетіледі. Идеалды КЭ-де фототок I_{ph} күн сәулесінің әсерінен туындайтын максималды ток болып табылады, яғни жарықтандырылған КЭ сыртқы тізбекте қысқа тұйықталған кезде пайда болатын қысқа тұйықталу тоғы I_{sc} . I_{sc} элемент ауданына s , әр түрлі энергиялы түсетін фотондар санына (яғни түсетін сәуле қарқындылығы мен оның спектріне) және оптикалық тиімділік деп те аталатын КЭ-нің пайдалы жұту коэффициентіне тәуелді. Бұл коэффициент түсетін жарық қуатының шығынымен анықталады, яғни шағылысу шығынымен, ал жұқақабыршақты КЭ-терінде - фотоэлектрлік қабат арқылы жарықтың паразиттік өту шығынымен анықталады.

Оптикалық тиімділік мүмкіндігінше 100%-ға жақын жасалады, ол үшін кеңжолалы оптикалық жарықтану және жарықты ұстап алу үшін арнайы құрылымдар қолданылады. КЭ-нің бірлік ауданынан алынатын фототокты бағалау есебі кезінде ($I_{ph} = I_{sc}/s$) $SR(\omega) P_A(\omega)$ жұтылған сәуле ағынының спектрлік тығыздығына көбейтіледі және спектрдің енімен интегралданады. $P_A(\omega)$ 1б-суретте көрсетілгендей пайдалы жұту коэффициентіне түсетін күн сәулесі ағынының спектрлік тығыздығының туындысы болып табылады. Мұндай қарапайым есептеу диодты КЭ-дегі фототок бетінің тығыздығының J_{ph} оптимистік бағалауын береді, ол өз кезегінде диод беттерінің пассивациялануы және заряд тасымалдаушыларының өмір сүру кезеңдерімен анықталатын тасымалдаушылардың бөліну ықтималдығына байланысты.



Сурет 2 - Кремний негізіндегі диодті типті КЭ: (а) торлы жоғарғы электродымен қарапайым нұсқа, (б) КЭ баламалы сызбасы. Кедергідегі R_L ток I диодтың қара тоғынан I_d және фототоктан I_{ph} тұрады [28, 1445 бет]

Фотодиодтың сыртқы тізбегіндегі ток диодтың қара тоғынан I_d (тікелей ығысу тоғынан) және фототоктан I_{ph} тұрады (2б-сурет). Сыртқы тізбектің үзілуі кезінде заряд тасымалдағыштардың бөлінуі п-аймақтағы электрондар санының және р-аймақтағы кемтіктер санының артуына, демек, р-п-ауысудың меншікті өрісіне қарама-қарсы келетін екінші электр өрісінің пайда болуына әкеледі. Бұл ретте тепе-теңдіктің жаңа жағдайы белгіленеді және тасымалдағыштардың диффузиялық тоғының I_d мәніне дейін ұлғаюы жүреді, бұдан әрі толық ток диод арқылы нөлге, ал оның ажыратылған клеммаларындағы кернеу бос жүріс кернеуіне V_{oc} тең болады. I_{sc} және V_{oc} КЭ-нен алуға болатын ток пен кернеудің максималды шамасы болып табылады, және де екі тиісті режимдерде өндірілетін қуат нөлге тең.

FF толтыру коэффициенті - фототокпен (қысқа тұйықталу тоғымен) және бос жүріс кернеуімен үйлескенде КЭ шығысындағы ең жоғары қуатты анықтайтын параметр. $FF I_{sc} V_{oc}$ туындысына КЭ-нің максималды қуатының қатынасы ретінде анықталады және КЭ

вольт-амперлық қисығына кіргізуге болатын тіктөртбұрыштың максималды ауданына тең (сурет. 1а).

ПӘК КЭ өндіретін қуаттың оған түсетін күн сәулесінің қуатына қатынасы ретінде анықталады және әр түрлі КЭ салыстыру параметрі болып табылады. ПӘК-ін интегралды (спектр бойынша) кванттық тиімділіктің туындысы түрінде келесі: толтыру коэффициенті, интегралды оптикалық тиімділік және, ақырында, шекті тиімділік (UCE) (ultimat conversion efficiency) деп аталатын көбейткіштерге ұсынуға болады. Айта кетейік, КЭ-нің интегралды оптикалық тиімділігі кейде КЭ-нің құрылысына ғана байланысты емес, сонымен қатар оптикалық жүйесіне де байланысты, егер КЭ-не жарықты шоғырландыра алса. Біріншіден, жарық шоғырландыруы қыздыруға ықпал етеді, бұл белгілі бір температура интервалында фототок үшін бос жүріс кернеуін зиян келтірмей арттыру үшін пайдалы болуы мүмкін. Екіншіден, фокусталған жарық жазық толқынға қарағанда жақсы жұтылады.

Берілген спектрде түсетін сәуленің шекті тиімділігі UCE спектрлік сезімталдыққа байланысты. UCE Шокли-Квайссер шегін (Shockley-Queisser limit), яғни максималды қолжетімді ПӘК-ін қояды. Математика бойынша бұл шектеу күн спектрінің жоғары жиілікті аймағында SR азаюынан пайда болады. Егер SR идеалға жақын жартылайөткізгіштің негізіндегі фотоэлемент ω_g жиілігімен және салыстырмалы ені 20%-дан аспайтын сәулелендірумен жарықтандырылса, онда мұндай фотоэлементтің шекті тиімділігі UCE 80 %-дан артық болады. Сондықтан таржолақты жарықта жұмыс істейтін фотоэлементтер үшін Шокли-Квайссердің шегі рөл атқармайды, олай болғанда кеңжолақты КЭ үшін UCE айтылғандай 30%-ға жақын болады.

КЭ-нің тиімді жұмысының негізгі шарттарын белгілеуге болады. Біріншіден, фотоэлектрлік қабаттың жұтылуының оптикалық коэффициенті түсетін сәуленің барлық энергиясын мүмкіндігінше жұтуды қамтамасыз ету үшін бірлікке жеткілікті жақын болуы тиіс. Екіншіден, фототудыратын тасымалдағыштар р-п-ауысуы бар фотоэлектрлік қабаттың екі жағынан түйіспелі электродтарда тиімді жиналуы тиіс. Үшіншіден, КЭ р-п-ауысудағы V_{oc} жоғары мәнін қамтамасыз ету үшін жеткілікті кедергінің оңтайлы биіктігіне ие, бірақ күн спектрінің фотондарын жұтуды болдырмау үшін соншалықты үлкен емес болуы тиіс. Төртіншіден, күн элементімен тізбекті қосылған сыртқы тізбектің толық кедергісі жүктемеге максималды қуатты беру өлшемдеріне сәйкес келуі тиіс, яғни КЭ кедергісіне тең болуы тиіс.

Дәрісті бекіту сұрақтары:

- 1 Каскадты күн элементінің жұмыс істеу принципін түсіндіріңіз
- 2 Si негізіндегі күн элементтері қалай жұмыс істейді?
- 3 Күн элементінің негізгі сипаттамаларын атаңыз

Әдебиеттер тізімі:

1. Алфимова, М.М. Занимательные нанотехнологии / М.М. Алфимова. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. - **823** с.
2. В.И. Марголин и др. Введение в нанотехнологию / В.И. Марголин и др. - М.: Лань, 2012. - 464 с.
3. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 416 с.