

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Құттыбай Н.Б.

Электроника негіздері

«Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар», «Өндірістік электроника және басқару жүйелері» мамандықтары бойынша білім алушы студенттерге арналған

Алматы

5 Дәріс

Тақырыбы: Меншікті және аралас жартылай өткізгіштер. р - n ауысу. Контактілі потенциалдар айырмасы. Жартылай өткізгіштердегі заряд тасымалдаушылардың инжекциясы және экстракциясы

Дәрістің мақсаты мен міндеттері:

Дәрістің мақсаты: Меншікті және аралас жартылай өткізгіштердің физикалық қасиеттерімен, р-п ауысудың түзілу механизмдерімен, контактілі потенциалдар айырмасымен, сондай-ақ жартылай өткізгіштердегі заряд тасымалдаушылардың инжекциясы мен экстракциясы процестерімен таныстыру.

Жартылай өткізгіштік құрылымдардың жұмыс істеу принциптерін түсініп, болашақта электрондық компоненттерді (мысалы, диодтар, транзисторлар) талдау және қолдану үшін қажетті теориялық базаны меңгеруі тиіс.

Міндеттері:

1. Меншікті және аралас жартылай өткізгіштердің физикалық табиғатын түсіндіру.
2. Донорлық және акцепторлық қоспалардың әсерінен жартылай өткізгіштердің электр өткізгіштігінің өзгеру механизмін талдау.
3. р-п ауысудың түзілу процесін және оның энергетикалық диаграммасын түсіндіру.
4. Контактілі потенциалдар айырмасының физикалық мәнін және оны анықтайтын факторларды қарастыру.
5. Заряд тасымалдаушылардың инжекциясы мен экстракциясы процестерінің физикалық мәнін ашу.
6. р-п ауысудың диодтық қасиеттерін және жартылай өткізгіш құрылғылардың жұмыс принципін сипаттау.

Түйінді ұғымдар мен терминдер

- Меншікті жартылай өткізгіш (Intrinsic Semiconductor) — құрамында қоспалар жоқ, таза жартылай өткізгіш материал (мысалы, Si, Ge).
- Аралас (легирленген) жартылай өткізгіш (Extrinsic Semiconductor) — құрамында арнайы қоспалар (донорлар немесе акцепторлар) бар жартылай өткізгіш.
- n-типті жартылай өткізгіш — негізгі заряд тасымалдаушылар электрондар болып табылатын материал.
- р-типті жартылай өткізгіш — негізгі заряд тасымалдаушылар кемтіктер (дырыстар) болып табылатын материал.
- Донорлық деңгей — өткізгіштік аймаққа жақын энергетикалық деңгей, ол электрондарды оңай береді.
- Акцепторлық деңгей — валенттік аймаққа жақын энергетикалық деңгей, ол электрондарды қабылдайды.

- p-n ауысу (p-n переход) — p және n типті аймақтардың түйісуінен пайда болатын құрылым.
- Тосқауылдық қабат (Depletion Region) — заряд тасымалдаушылары жоқ, электр өрісі бар аймақ.
- Контактілі потенциал (V_{bi}) — p және n аймақтарының Ферми деңгейлерінің теңесуі нәтижесінде пайда болатын ішкі потенциал айырмасы.
- Инжекция (Injection) — тасымалдаушылардың бір аймақтан екінші аймаққа сыртқы өріс әсерінен өту процесі.
- Экстракция (Extraction) — заряд тасымалдаушылардың ауысу аймағынан сыртқа шығарылуы.
- Тура және кері қосылу (Forward and Reverse Bias) — p-n ауысуға сыртқы кернеудің оң және теріс бағытта берілу режимдері.

Дәріс жоспары

1. Меншікті және аралас жартылай өткізгіштер
 2. p-n ауысу (p-n переход)
 3. Контактілі потенциалдар айырмасы
 4. Заряд тасымалдаушылардың инжекциясы және экстракциясы
- Білімді бекітуге арналған сұрақтар
- Қорытынды
- Әдебиеттер тізімі

1. Меншікті және аралас жартылай өткізгіштер

Меншікті жартылай өткізгіштер (Intrinsic Semiconductors)

Меншікті жартылай өткізгіштер — бұл химиялық таза, яғни құрамында бөгде қоспалары жоқ немесе олардың концентрациясы өте аз мөлшерде болатын жартылай өткізгіш материалдар. Мұндай жартылай өткізгіштердің классикалық мысалдарына кремний (Si) және германий (Ge) жатады. Олар периодтық жүйенің IV тобында орналасқан және олардың әр атомында 4 валенттік электрон болады.

Температура абсолют нөлден жоғары болған кезде, жылулық энергияның әсерінен кейбір электрондар валенттік аймақтан (валенттік зонадан) өткізу аймағына (өткізгіштік зонаға) өтіп, электрон-кемтік жұптары түзеді. Яғни, бір электрон өткізгіштік аймаққа өткен кезде, оның орны бос қалады — бұл бос орын кемтік деп аталады. Ол да заряд тасымалдаушы ретінде қарастырылады.

Электрон мен кемтік — меншікті заряд тасымалдаушылар.

Меншікті жартылай өткізгіште электрондар мен кемтіктердің концентрациясы тең болады, себебі олар әрқашан жұппен пайда болады:

$$n=p=n_i,$$

мұндағы:

n — электрондардың концентрациясы,

p — кемтіктердің концентрациясы,

n_i — меншікті тасымалдаушылар концентрациясы, ол температураға тәуелді.

Энергетикалық аймақтар диаграммасы:

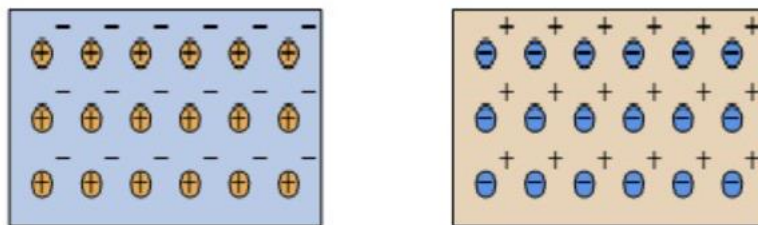
Меншікті жартылай өткізгіштің энергетикалық құрылымы 3 негізгі аймақтан тұрады:

❖ Валенттік аймақ (Valence Band) — толық электрондармен толтырылған аймақ.

❖ Өткізгіштік аймақ (Conduction Band) — электрондар еркін қозғала алатын аймақ.

❖ Тыйым салынған аймақ (Forbidden Gap, Band Gap) — екі аймақ арасындағы энергетикалық айырма.

Кремний үшін $E_g \approx 1.1$ эВ, германий үшін $E_g \approx 0.66$ эВ.



Аралас жартылай өткізгіштер (Extrinsic Semiconductors)

Аралас (немесе легирленген) жартылай өткізгіштер — бұл жартылай өткізгіш материалдарға арнайы қоспалар енгізу арқылы олардың электр өткізгіштігін айтарлықтай арттыру тәсіліне негізделген материалдар. Бұл процесс легирлеу деп аталады.

Қоспалардың түріне қарай жартылай өткізгіш екі типке бөлінеді: n-типті және p-типті.

n-типті жартылай өткізгіш (Negative Type)

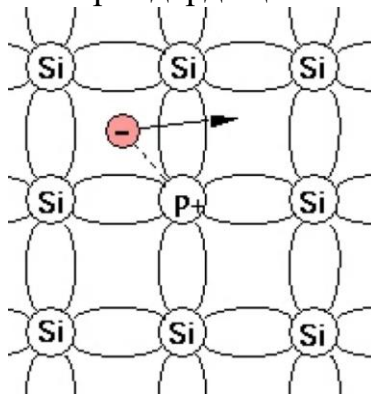
n-типті жартылай өткізгіш алу үшін донорлық қоспалар енгізіледі. Бұл қоспалар — V топ элементтері (мысалы, фосфор, мышьяк, сурьма), олардың әр атомында 5 валенттік электрон бар.

Кремний кристалдық торында фосфор атомы кремний атомының орнына орналасқанда, ол 4 көрші атоммен байланыс түзе отырып 4 электронын жұмсайды, ал 5-ші электрон байланыссыз қалады.

Бұл 5-ші электрон байланыспаған, және өте аз энергиямен өткізгіштік аймаққа өте алады — яғни, ток тасымалдауға қатысады.

Бұл жағдайда электрондар негізгі тасымалдаушылар, ал кемтіктер — қосымша (minority carriers).

Энергетикалық диаграммада донорлық деңгей — өткізгіштік аймаққа жақын орналасқан, сондықтан электрондардың өткізгіштік аймаққа өтуі жеңіл.



p-типті жартылай өткізгіш (Positive Type)

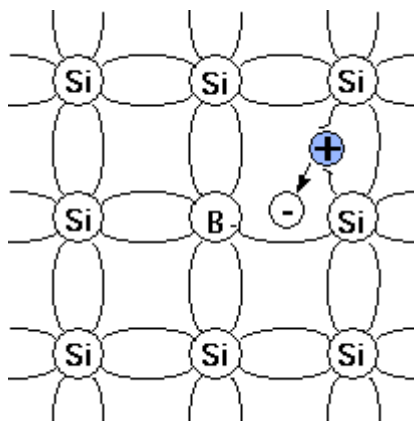
p-типті жартылай өткізгіш алу үшін акцепторлық қоспалар енгізіледі. Бұл қоспалар — III топ элементтері (мысалы, бор, индий, алюминий), олардың 3 валенттік электроны бар.

Кремнийдің 4 байланысына бор атомы тек 3 электронмен қатысып, бір байланыс толық болмай қалады.

Бұл электрон жетіспеушілігі нәтижесінде кемтік пайда болады. Электрондар сол кемтікті толтыру үшін қозғалады, ал бұл қозғалыс сырттай кемтіктің қозғалысы ретінде қарастырылады.

Мұнда кемтіктер — негізгі тасымалдаушылар, ал электрондар — қосымша.

Энергетикалық диаграммада акцепторлық деңгей — валенттік аймаққа жақын орналасады, және валенттік аймақтан электрон акцепторға өткенде кемтік қалады.



2. p-n ауысу (p-n переход)

p-n ауысу — бұл электрондық техникадағы ең маңызды құрылымдардың бірі. Ол әр түрлі типтегі (p және n) жартылай өткізгіштердің бір кристалл ішінде байланысуы арқылы түзіледі. Бұл құрылым негізінен жартылай өткізгіш диодтардың, транзисторлардың, күн батареяларының және басқа да көптеген электрондық құрылғылардың жұмыс істеуінің негізі болып табылады.

2.1. p және n типті аймақтардың түзілуі

n-типті жартылай өткізгіште негізгі тасымалдаушылар — электрондар, артық электрондар донорлық қоспалар арқылы пайда болады.

p-типті жартылай өткізгіште негізгі тасымалдаушылар — кемтіктер, яғни акцепторлық қоспалар электрон жетіспеушілігін туғызады.

Егер бір жартылай өткізгіш кристаллдың бір жағына донор, ал екінші жағына акцептор қоспаларын енгізсе, онда бұл аймақтар арасында p-n ауысу пайда болады.

2.2. Диффузия процесі

p-n ауысу пайда болған сәтте, екі аймақтың негізгі тасымалдаушылары бір-бірінің аймағына қарай қозғала бастайды:

n-аймақтағы электрондар — p-аймаққа қарай жылжиды (электрондардың жоғары концентрациясынан төменге қарай),

p-аймақтағы кемтіктер — n-аймаққа қарай қозғалады.

Бұл процесс диффузия деп аталады — яғни тасымалдаушылар концентрация айырмашылығынан қозғалады.

2.3. Декомпенсацияланған зарядтар және тосқауылдық аймақ (depletion region)

Электрондар мен кемтіктер өз аймағын тастап, көршілес аймаққа өткенде, олар рекомбинацияланады — яғни бір-бірін бейтараптандырады.

Нәтижесінде:

- ❖ n-аймақтағы донор иондары (оң зарядты, электрондарын жоғалтқан) орнында қалады,

- ❖ p-аймақтағы акцептор иондары (теріс зарядты, артық электрон алған) да қозғалмай қалады.

Бұл қозғалмайтын зарядтар қабаты p-n түйісу аймағында тұрақты ішкі электр өрісін тудырады және тосқауылдық қабат деп аталатын аймақ түзіледі.

Тосқауылдық аймақ (depletion region) — бұл аймақта бос заряд тасымалдаушылар жоқ, яғни ток өте алмайды.

2.4. Ішкі электр өрісі және тепе-теңдік

Қозғалмай қалған зарядтардан туындаған ішкі электр өрісі:

- ❖ n-аймақтан келген электрондарды p-аймаққа одан әрі өтуге кедергі жасайды,

- ❖ p-аймақтан келген кемтіктерге де n-аймаққа өтуге кедергі болады.

Осылайша, диффузияны тежейтін тепе-теңдік орнайды, яғни:

- ❖ Тасымалдаушылардың табиғи қозғалысын тежейтін байланыс потенциалы (контактілі потенциал) пайда болады.

- ❖ Бұл потенциалдың мәні шамамен 0.6–0.7 В (кремний үшін) және 0.3 В (германий үшін).

2.5. p-n ауысудың диодтық қасиеті

- ❖ p-n ауысу бір бағытты өткізгіштікке ие болады, яғни ол:

- ❖ Тік (тура) кернеу қосылғанда — ток өткізеді,

Кері кернеу қосылғанда — ток өткізбейді (тек өте аз ток — кері ток ағады).

Тура қосылу (Forward bias):

- ❖ p-аймақ оң кернеуге, n-аймақ теріс кернеуге қосылады.

- ❖ Ішкі өріс азайып, тосқауыл қабаты жойыла бастайды.

- ❖ Заряд тасымалдаушылар тосқауылды өтіп, ток жүреді.

Кері қосылу (Reverse bias):

- ❖ p-аймақ теріс, n-аймақ оң кернеуге қосылады.

- ❖ Ішкі өріс күшейеді, тосқауыл қабаты кеңейеді.

- ❖ Негізгі тасымалдаушылар бөгеледі, ток тек аздаған қосымша тасымалдаушылармен өтеді.

2.6. Графикалық және энергетикалық диаграмма

Энергетикалық диаграмма:

- ❖ n-аймақтың өткізгіштік аймағы жоғары орналасады, себебі онда еркін электрондар көп.

- ❖ p-аймақта валенттік аймақ төменірек, кемтіктер бар.

Байланыс кезінде Ферми деңгейі теңесіп, тосқауыл биіктігі қалыптасады.

3. Контактілі потенциалдар айырмасы

p-n ауысу аймағында потенциалдар айырмасы қалыптасады, оны контактілі потенциал деп атайды.

- ❖ Бұл потенциал айырмасы электрондардың p-аймаққа, кемтіктердің n-аймаққа өтуін тежейді.

- ❖ Тепе-теңдік күйінде сыртқы ток жүрмейді.

Контактілі потенциалдың шамасы температура мен қоспалар концентрациясына тәуелді:

$$V_{bi} = (kT/q) * \ln((N_a N_d) / n_i^2)$$

мұндағы:

V_{bi} — ішкі потенциал,

N_a, N_d — акцепторлар мен донорлар концентрациясы,

n_i — меншікті тасымалдаушылар концентрациясы,

k — Больцман тұрақтысы,

T — абсолют температура,

q — электрон заряды.

4. Заряд тасымалдаушылардың инжекциясы және экстракциясы

Инжекция (Injection)

Инжекция — сыртқы кернеу берілгенде аз мөлшердегі тасымалдаушыларды ауысу аймағына енгізу.

Мысалы, р-п ауысуға тікелей кернеу берілгенде:

❖ р-аймақтан кемтіктер п-аймаққа өтеді,

❖ п-аймақтан электрондар р-аймаққа өтеді.

Бұл құбылыс инжекцияланған тоқты туғызады.

Экстракция (Extraction)

Экстракция — керісінше, кері кернеу берілгенде:

❖ Ішкі өріс тасымалдаушыларды байланыс аймағынан сыртқа шығарады,

❖ Негізгі тасымалдаушылар кері қарай қозғала алмайды,

❖ Ток болмайды немесе өте аз — кері қанығу тогы.

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

1. Меншікті жартылай өткізгіш дегеніміз не және оның негізгі қасиеттері қандай?
2. Аралас жартылай өткізгіштер қалай түзіледі және легирлеудің мақсаты неде?
3. п-типті және р-типті жартылай өткізгіштердің негізгі айырмашылығын түсіндіріңіз.
4. Донорлық және акцепторлық қоспалар қандай элементтерден тұрады және олардың рөлі қандай?
5. р-п ауысу қалай түзіледі және тосқауылдық қабаттың физикалық мәні неде?
6. Контактілі потенциалдың шамасы қандай факторларға тәуелді?
7. р-п ауысу кезінде тура және кері қосылу кезінде не болады?
8. Заряд тасымалдаушылардың инжекциясы дегеніміз не және ол қай жағдайда жүреді?
9. Экстракция процесі қалай жүзеге асады және оның физикалық мәні қандай?
10. р-п ауысудың диодтық қасиеті неліктен тек бір бағытта ток өткізеді?

Қорытынды:

Жартылай өткізгіштер физикасы — заманауи электрониканың іргетасы. Бұл лекцияда біз жартылай өткізгіштердің түрлерін, қоспалар арқылы олардың

қасиеттерін басқару мүмкіндігін, сондай-ақ p-n ауысудың түзілу механизмін және оның тоқты бір бағытта өткізу қабілетін қарастырдық.

Бұл ұғымдар — жартылай өткізгіш құрылғылардың (диод, транзистор және т.б.) жұмыс принциптерін түсінудің негізі болып табылады. Алынған білімдер сіздерге болашақта электрондық схемалар мен құрылғыларды талдау, жобалау және қолдану барысында үлкен пайдасын тигізеді.

Әдебиеттер тізімі:

1. Сахнов В. А. Физика и техника полупроводников: учебник для вузов — М.: Высшая школа, 2008.
2. Касаткин А. П. Основы электроники. Полупроводниковые приборы — М.: Радио и связь, 2007.
3. Нисенбойм Я. И. Физика полупроводников — М.: Наука, 2004.
4. Седра А., Смит К. Микроэлектронные схемы — М.: Издательство Лаборатория Базовых Знаний, 2011.
5. Мухина И. И. Физика полупроводников и полупроводниковые приборы — М.: МГТУ им. Баумана, 2015.
6. Трофимов Ю. Н. Электроника и микропроцессорная техника — М.: Форум, 2010.
7. Neamen D. A. Semiconductor Physics and Devices — New York: McGraw-Hill, 2012.
8. Streetman B. G., Banerjee S. Solid State Electronic Devices — Pearson Education, 2015.
9. Millman J., Halkias C. Electronic Devices and Circuits — Tata McGraw-Hill, 2010.
10. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices — Wiley-Interscience, 2006.