

Чиптерді өндіру технологиясы. Микросұлбалар және оларды жасау технологиясы туралы жалпы мәліметтер. Өндіріс процестерінің негіздері. Шала өткізгішті микросұлбалар. Фотолитография. Легірлеу.

Монокристалды кремний

- Монокристалды кремний бүгінгі күні іс жүзінде барлық электрондық жабдықта қолданылатын кремний чиптері үшін негізгі материал болып табылады. Mono-Si сонымен қатар күн батареяларын өндіруде фотоэлектрлік, жарықты сіңіретін материал ретінде қызмет етеді.
- Mono-Si тек өте таза кремнийден тұратын табиғи жартылай өткізгіш ретінде, р- немесе n-типті кремний алу үшін бор немесе фосфор сияқты басқа элементтерді қосу арқылы қоспалануы мүмкін. Жартылай өткізгіштік қасиеттерінің арқасында монокристалды кремний соңғы бірнеше онжылдықтағы - кремний дәуірінің ең маңызды технологиялық материалы, өйткені оның қолжетімділігі электроника және IT революциясы болатын электрондық құрылғыларды жасау үшін қажет болды.

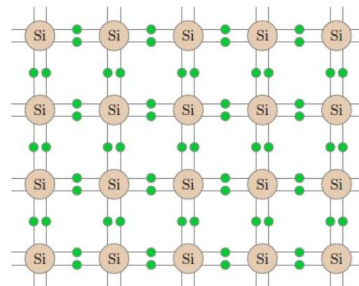


Рис. 4. Кристаллическая решётка кремния

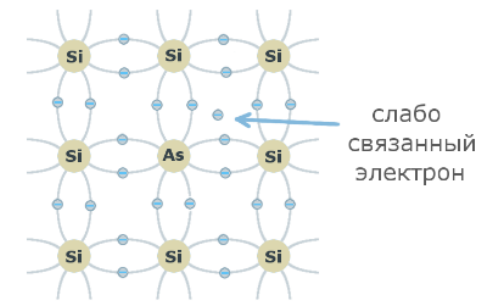
Электроникада қолданысы

- Монокристалды кремнийдің негізгі қолданылуы интегралдық схемаларды механикалық қолдау болып табылады. Цохральски процесінен жасалған құймалар қалыңдығы шамамен 0,75 мм пластинкаларға кесіліп, жылтыратылады және әдеттегі жалпақ субстратты алу үшін жылтыратылады, оның үстіне микроэлектрондық құрылғылар легирлеу немесе иондық имплантация, өрнектеу, әртүрлі материалдарды тұндыру және фотолитографиялық үлгілеу сияқты әртүрлі микро өңдеу процестері арқылы құрастырылады.
- Жалғыз үздіксіз кристалл электроника үшін өте маңызды, өйткені түйіршіктер шекаралары, қоспалар және кристаллографиялық ақаулар материалдың жергілікті электрондық қасиеттеріне айтарлықтай әсер етуі мүмкін, бұл өз кезегінде тізбектерге кедергі жасау арқылы құрылғының жұмысына әсер етеді. Мысалы, кристалдық жетілдірілмеген жағдайда өте ауқымды интеграциялық (VLSI) құрылғыларын құру іс жүзінде мүмкін емес еді, онда миллиардтаған транзисторлық тізбектер сенімді жұмыс істеуі керек, микропроцессорды құру үшін бір микросхемада біріктірілген. , электроника жоғары қуатты кремний монокристалдарын жасауға көп қаржы жұмсады
- Күн панельдерінде. Монокристалды кремний жоғары тиімді фотоэлектрлік (PV) құрылғылар үшін де қолданылады. Құрылымдық кемшіліктерге қойылатын талаптар микроэлектроника қолданбаларына қарағанда қатаңырақ болғандықтан, күн батареялары үшін төмен дәрежелі күн кремнийі (Sog-Si) жиі қолданылады. Осыған қарамастан, монокристалды кремний фотоэлектрлік өнеркәсібі электроника өнеркәсібі үшін жылдам моно-Si өндіру әдістерін дамытудан үлкен пайда тапты.

Жартылай өткізгішті **легірлеу**

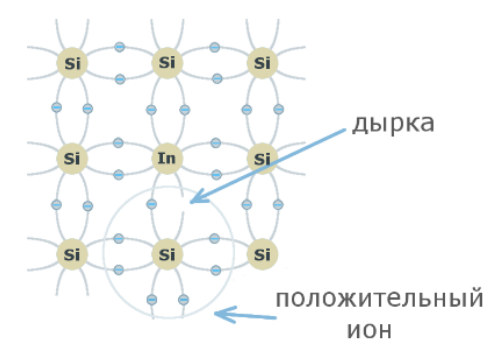
- Жартылай өткізгіштердің өткізгіштігін арттыру үшін оларды қоспалармен – валенттілігі басқа химиялық элементтер атомдарымен арнайы ластайды. Жартылай өткізгішке қарағанда валенттік электрондары аз қоспалар **акцепторлар** деп аталады. Валенттілігі жоғары қоспалар **донор** болып табылады. Бұл процестің өзі жартылай өткізгіш қоспалар деп аталады. Шамамен қатынас миллион жартылай өткізгіш атомға бір қоспа атомы болып табылады.

Электрондық өткізгіштік



- Кремний жартылай өткізгішіне **бес валентті** мышьяк атомын (As) қосамыз. Төрт валенттік электрондар арқылы мышьяк төрт көршілес кремний атомдарымен коваленттік байланыстар орнатады. Бесінші валенттік электрон үшін жұп қалмайды және ол атоммен әлсіз байланысқан болады.
- Электромагниттік өрістің әсерінен мұндай электрон оңай жұлынып, зарядталған бөлшектердің реттелген қозғалысына (электр тогы) тартылады. Электронды жоғалтқан атом бос бос орны бар **оң зарядты ионға айналады - Кемтік**.
- Кремний жартылай өткізгішінде мышьяк қоспасы бар тесіктердің болуына қарамастан, бос зарядтың негізгі тасымалдаушылары электрондар болып табылады. Мұндай өткізгіштік электронды, ал электронды өткізгіштікке ие жартылай өткізгіш **N-типті жартылай өткізгіш** деп аталады.

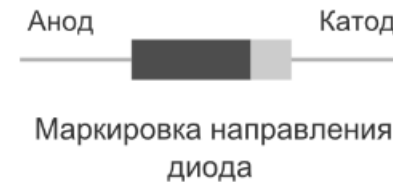
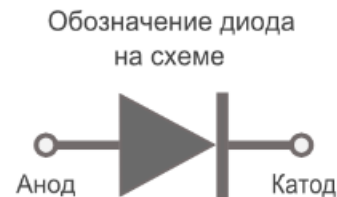
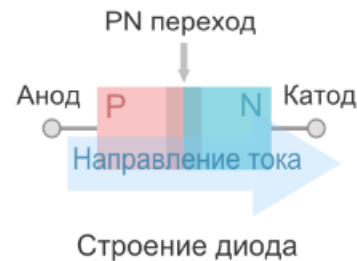
Кемтіктік өткізгіштік



- Кремний кристаллына **үш валентті индий атомын** (In) енгізейік. Индий тек үш көрші кремний атомдарымен коваленттік байланыс орнатады. Төртінші «көрші» үшін индийде бір электрон жетіспейді. Бұл жетіспейтін электронды индий атомы көрші кремний атомдарының коваленттік байланысынан алуға болады.
- **Индий атомы теріс зарядты ионға айналады** да, көрші атомдардың коваленттік байланысында бос орын (тесік) пайда болады. Өз кезегінде, көрші коваленттік байланыстағы электрон бұл жерге секіре алады. Нәтиже - кристалдағы тесіктердің хаотикалық айналуы.
- Егер сіз жартылай өткізгішті электромагниттік өріске орналастырсаңыз, саңылаулардың қозғалысы реттелген болады, яғни. электр тогы пайда болады. Осылайша, тесіктердің өткізгіштігі қамтамасыз етіледі. Кемтіктері бар жартылай өткізгіш **Р-типті жартылай өткізгіш деп аталады.**

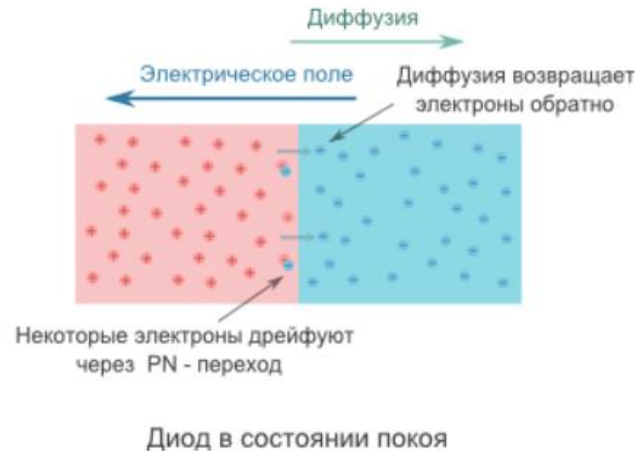
Жартылай өткізгіш диод

- Жартылай өткізгішті диод - бір PN өткелінен тұратын ең қарапайым жартылай өткізгіш құрылғы. Оның негізгі қызметі – **электр тогын бір бағытта өткізіп**, оның қарама-қарсы бағытта өтуіне жол бермеу. Диод N және P типті жартылай өткізгіштердің екі қабатынан тұрады.
- P және N қосылыстарының түйіскен жерінде PN түйісуі пайда болады. **P-ге қосылған электрод анод деп аталады. N-ге қосылған электрод катод деп аталады.** Диод токты анодтан катодқа бағытталған бағытта өткізеді және оны кері өткізбейді.



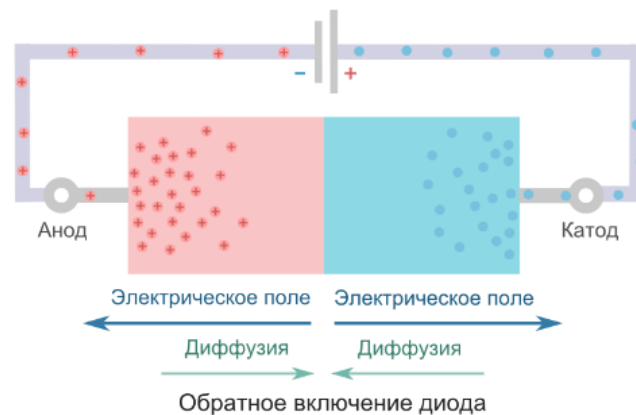
Тыныштықтағы диод

- Жартылай өткізгіш диод тыныштықта болған кезде PN өткелінің ішінде не болатынын көрейік. Яғни, анодқа да, катодқа да кернеу қосылмаған кезде. N бөлігінде бос электрондар - теріс зарядталған бөлшектер бар. P бөлігінде оң зарядталған иондар - тесіктер бар. Нәтижесінде таңбалары әртүрлі зарядты бөлшектер орналасқан жерде оларды бір-біріне тартатын электр өрісі пайда болады. Осы өрістің әсерінен N бөлігінен бос электрондар PN түйісу арқылы P бөлігіне ағып, кейбір тесіктерді толтырады. Нәтижесінде наноамперде өлшенетін өте әлсіз электр тогы. Нәтижесінде P бөлігіндегі заттың тығыздығы артып, **диффузия** (заттың біркелкі концентрацияға бейімділігі) пайда болады, бөлшектерді N жағына кері итереді.



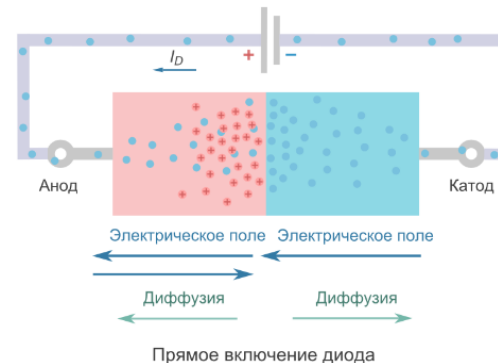
Диодты кері байланыс

- Енді жартылай өткізгіш диод өзінің негізгі функциясын - токты тек бір бағытта өткізуді қалай орындайтынын көрейік. Қуат көзін қосайық - плюс катодқа, минус анодқа. Өртүрлі полярлық зарядтар арасында пайда болатын **тартылыс күшіне сәйкес N электрондары плюсқа қарай жылжи бастайды және PN түйісуінен алыстайды**. Сол сияқты, P-ден тесіктер минусқа тартылады, сонымен қатар PN түйісуінен алыстайды. Нәтижесінде электродтардағы заттың тығыздығы артады. Диффузия күшіне еніп, заттардың біркелкі тығыздығына ұмтылып, бөлшектерді кері итереді. Көріп отырғанымыздай, **бұл күйде диод ток өткізбейді**. Кернеу артқан сайын PN өткелінде зарядталған бөлшектер азаяды.

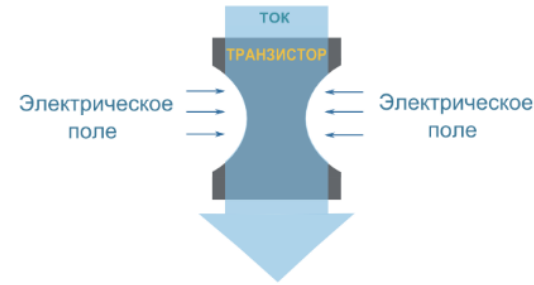


Тікелей диодты қосу

- Біз қуат көзінің полярлығын өзгертеміз - плюс анодқа, минус катодқа. Бұл позицияда полярлығы бірдей зарядтар арасында кері итеруші күш пайда болады. Теріс зарядталған электрондар терістен алыстап, рп өткеліне қарай жылжиды. Өз кезегінде, оң зарядталған тесіктер плюстен итеріліп, электрондарға бағытталған. PN түйісуі әртүрлі полярлық зарядталған бөлшектермен байытылған, олардың арасында электр өрісі пайда болады - PN өткелінің ішкі электр өрісі. Оның әсерінен электрондар P жағына қарай жылжи бастайды. Олардың кейбіреулері саңылаулармен қайта бірігеді (атомдардағы электрон жетіспейтін орынды толтырады). Қалған электрондар батареяның оң жағына асығады. **Идентификаторлық ток диод арқылы өтті.** жартылай өткізгішті диодты тікелей қосу Шатаспау үшін электр тізбектеріндегі ток бағыты электрон ағынының бағытына қарама-қарсы екенін еске сала кетейін.

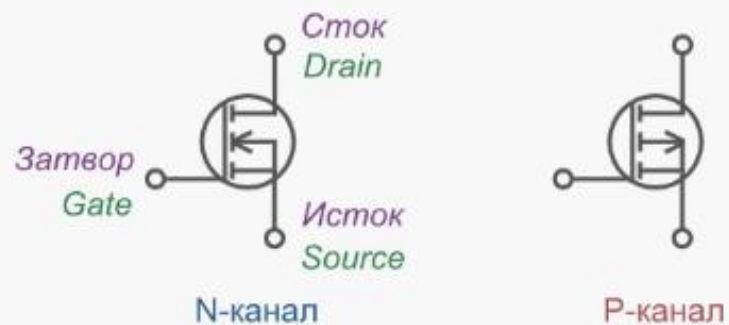
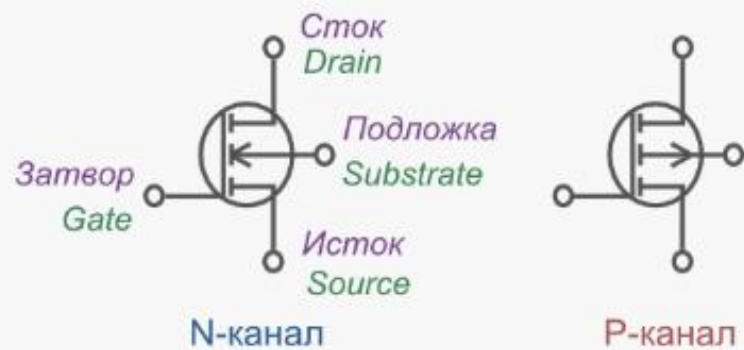


Өрістік транзистор

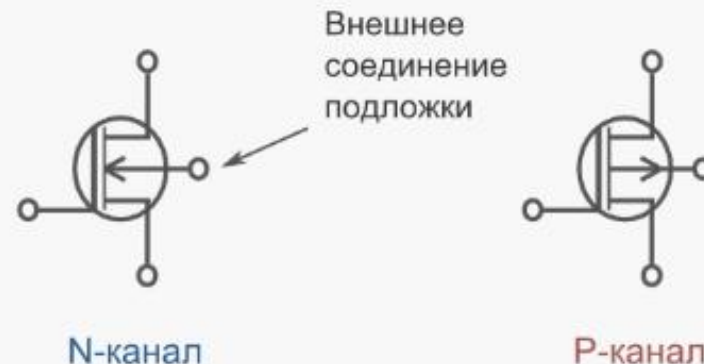


Принцип действия полевого транзистора

- Оқшауланған қақпалы өрістік транзистор – бұл қақпасы диэлектрлік қабат арқылы жартылай өткізгіштің өткізгіш арнасынан электрлік оқшауланған транзистор. Осыған байланысты транзистор өте жоғары кіріс кедергісіне ие (кейбір модельдер үшін ол 10^{17} Ом жетеді). Өрістік транзистордың осы түрінің, сондай-ақ басқару PN түйісуі бар өрістік транзистордың жұмыс принципі құрылғының өткізгіштігіне сыртқы электр өрісінің әсер етуіне негізделген.
- Өрістік транзистордың жұмысы Физикалық құрылымы бойынша оқшауланған қақпалы өрістік транзистор MOS транзисторы (металл-оксид-жартылай өткізгіш) немесе MOS транзисторы (металл-диэлектрлік-жартылай өткізгіш) деп аталады. Құрылғының халықаралық атауы - MOSFET (металл-оксид-жартылай өткізгіш-өріс-әсері-транзистор).
- MOS транзисторлары екі түрге бөлінеді - кірістірілген арнасы бар және индукциялық арнасы бар. Әрбір типте N-арнасы және P-арнасы бар транзисторлар бар.



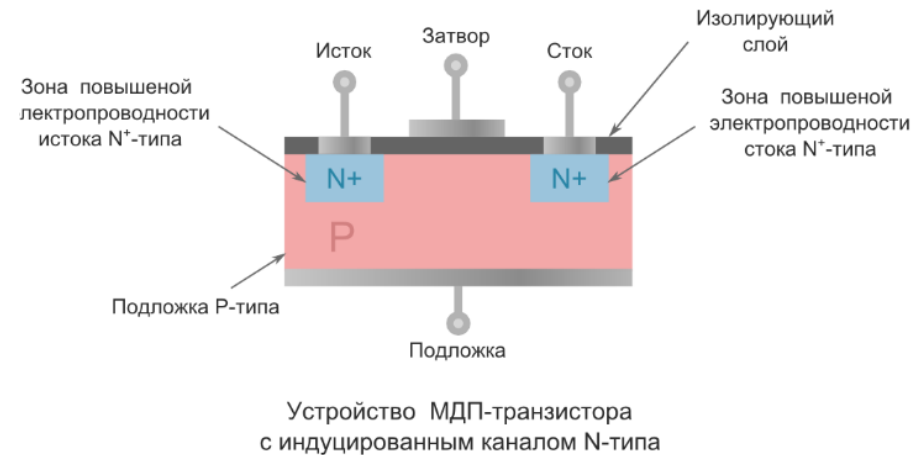
Обозначение на схеме MOSFET
с индуцированным каналом



Обозначение на схеме MOSFET
со встроенным каналом

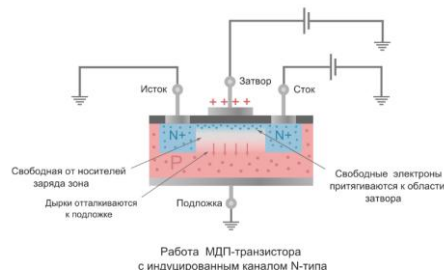
Индукцияланған арнасы бар MOS транзисторы (MOSFET) құрылғысы.

- Р-типті электр өткізгіштігі бар жартылай өткізгіштің негізінде (субстратында) (N-арнасы бар транзистор үшін) N⁺-типті электрөткізгіштігі жоғары екі аймақ жасалады. Мұның бәрі диэлектриктің жұқа қабатымен жабылған, әдетте кремний диоксиді SiO₂. Диэлектрлік қабат арқылы ағызу және “көз” деп аталатын N⁺ типті аймақтардың металл өткізгіштері өтеді. Диэлектриктің үстінде металл қақпа қабаты орналасқан. Кейде қорғасын “көзбен” қысқа тұйықталған субстраттан да шығады



N-типті индукцияланған арнасы бар MOS транзисторының (MOSFET) жұмысы.

- Исток мен сток арасындағы кез келген полярлық кернеуді қосамыз. Бұл жағдайда электр тогы ағып кетпейді, өйткені N+ аймақтарының арасында электрондардың өтуіне жол бермейтін P аймағы бар. Әрі қарай, егер U_{zi} көзіне қатысты қақпаға оң кернеу берілсе, электр өрісі пайда болады. **Ол оң иондарды (саңылауларды) P аймағынан субстратқа қарай итереді.** Нәтижесінде қақпаның астындағы тесіктердің концентрациясы төмендей бастайды және олардың орнын қақпадағы оң кернеумен тартылған электрондар алады. U_{zi} өзінің шекті мәніне жеткенде, қақпа аймағындағы электрон концентрациясы тесік концентрациясынан асып түседі. Дренаж мен көз арасында N-типті электрөткізгіштігі бар жұқа арна пайда болады, ол арқылы ток I_c ағып өтеді. U_{zi} транзисторының қақпасындағы кернеу неғұрлым жоғары болса, соғұрлым арна кеңірек болады, демек, ток соғұрлым көп болады. Өрістік транзистордың мұндай жұмыс режимі байыту режимі деп аталады. Оқшауланған өрістік транзистордың жұмысы. P-типті арнасы бар MOS транзисторының жұмыс принципі бірдей, тек көзге қатысты қақпаға теріс кернеу қолданылуы керек.



Индукцияланған арнасы бар MOS транзисторының ток кернеуінің сипаттамалары (CV-сипаттамасы)

- Оқшауланған қақпасы бар өрістік транзистордың ток кернеуінің сипаттамалары басқару PN түйісуі бар өрістік транзистордың ток кернеуінің сипаттамаларына ұқсас. а) графигінен көрініп тұрғандай, бастапқыда ток $I_{си}$ $U_{си}$ кернеуінің артуына тура пропорционалды түрде артады. Бұл аймақ омдық аймақ (Ом заңы қолданылады) немесе қанығу аймағы (транзисторлық арна заряд тасымалдаушылармен қаныққан) деп аталады. Содан кейін, арна максималды дерлік кеңейген кезде, ток $I_{си}$ $U_{си}$ жүзінде өспейді. Бұл аймақ белсенді аймақ деп аталады. $U_{си}$ белгілі бір шекті мәннен асқанда (PN өткелінің бұзылу кернеуі) жартылай өткізгіштің құрылымы бұзылып, транзистор қарапайым өткізгішке айналады. Бұл процесті қалпына келтіру мүмкін емес және құрылғы жарамсыз болады.

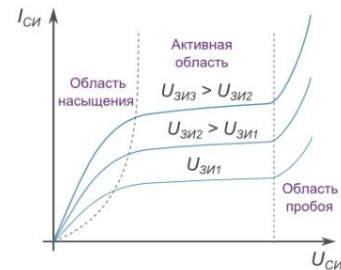


График а)
Стоковые (выходные) характеристики
МДП-транзистора с индуцированным
каналом

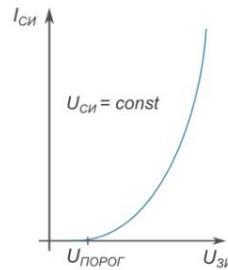


График б)
Стоко-затворная характеристика
МДП-транзистора с индуцированным
каналом
Активация
Чтобы активировать

Фотолитография

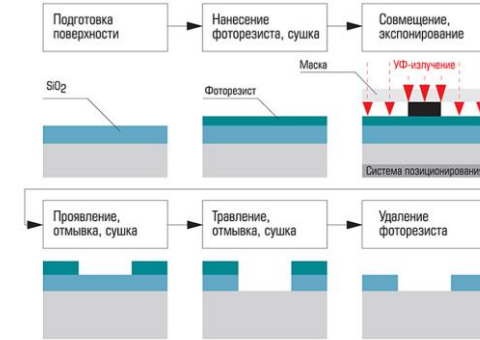
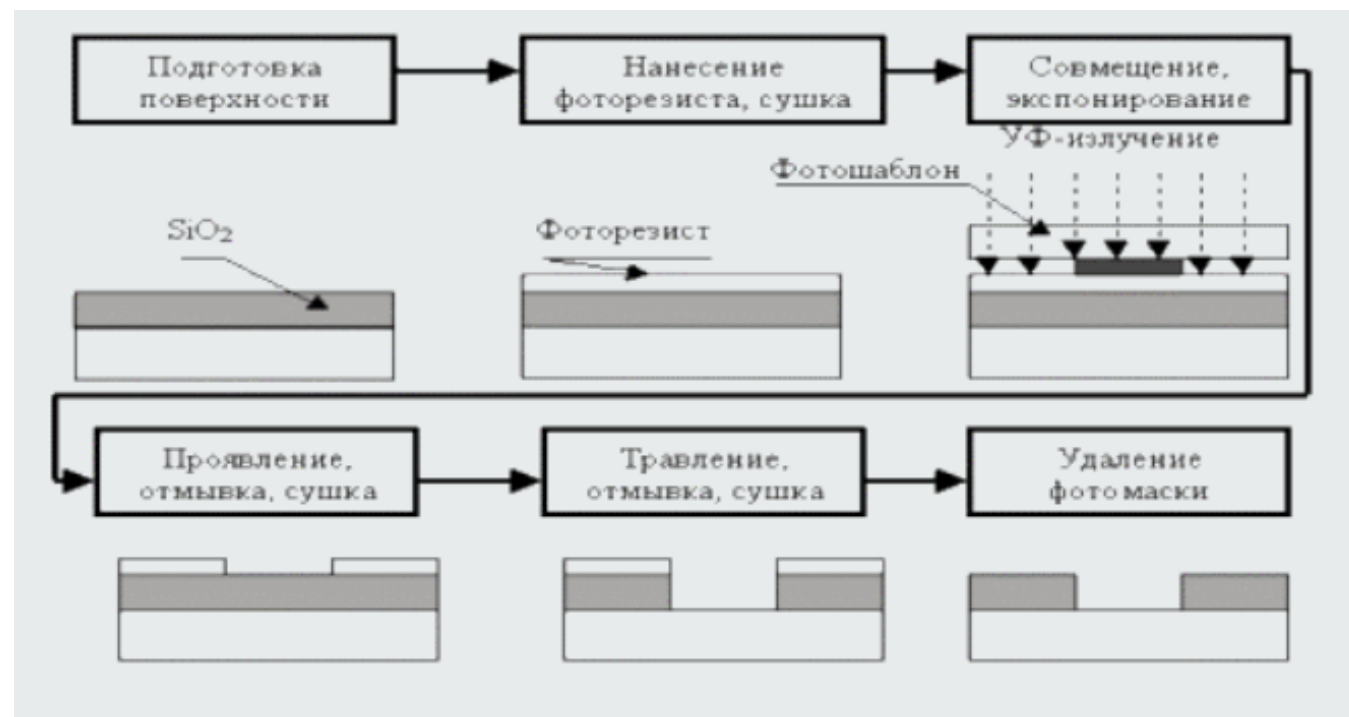
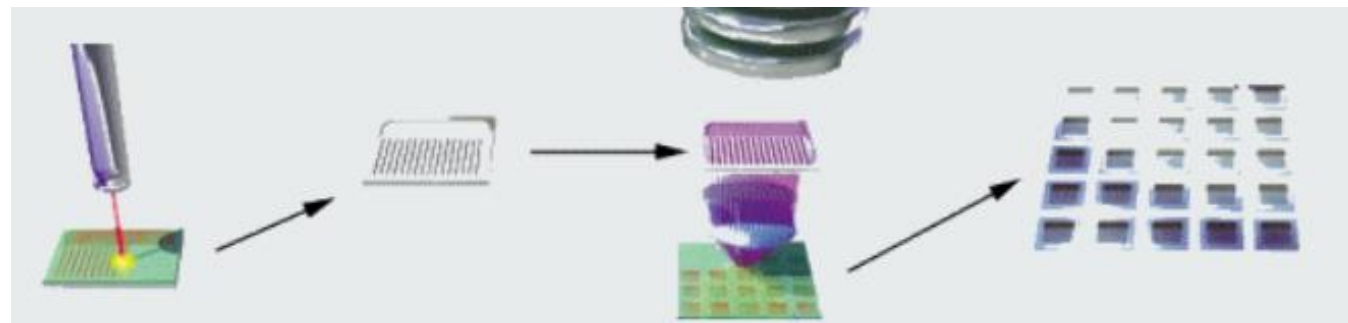


Рисунок 1. В процессе изготовления микросхем операция фотолитографии на одной пластине повторяется многократно, и каждое новое изображение должно очень точно совмещаться с предыдущим

- Микроэлектроникадағы фотолитографияның мақсаты қажетті чип топологиясын алу үшін кремний субстратында берілген кескінді қалыптастыру болып табылады. Мұны істеу үшін кремний субстратына материалдың жұқа қабаты қолданылады, одан үлгі қалыптасуы керек. Бұл қабатқа оптикалық жүйе және фотомаска (маска) арқылы сәулеленетін фотосезімтал материал — фоторезистор қолданылады. Фотолитографияның бұл түрінде қолданылатын маска жобаланған үлгінің үлкейтілген трафареттері болып табылады. Фоторезисті кейінгі өңдеуден кейін вафлиде көрсетілген үлгі қалады. Сәулелену толқынының ұзындығы неғұрлым қысқа болса, алынған үлгі элементтерінің өлшемі соғұрлым аз болады. Чипті өндіру процесінде бір пластинкадағы фотолитография операциясы бірнеше рет қайталанады және әрбір жаңа кескін алдыңғы суретпен өте дәл туралануы керек (1-суретті қараңыз).



Фотолитография процесінің негізгі кезеңдері

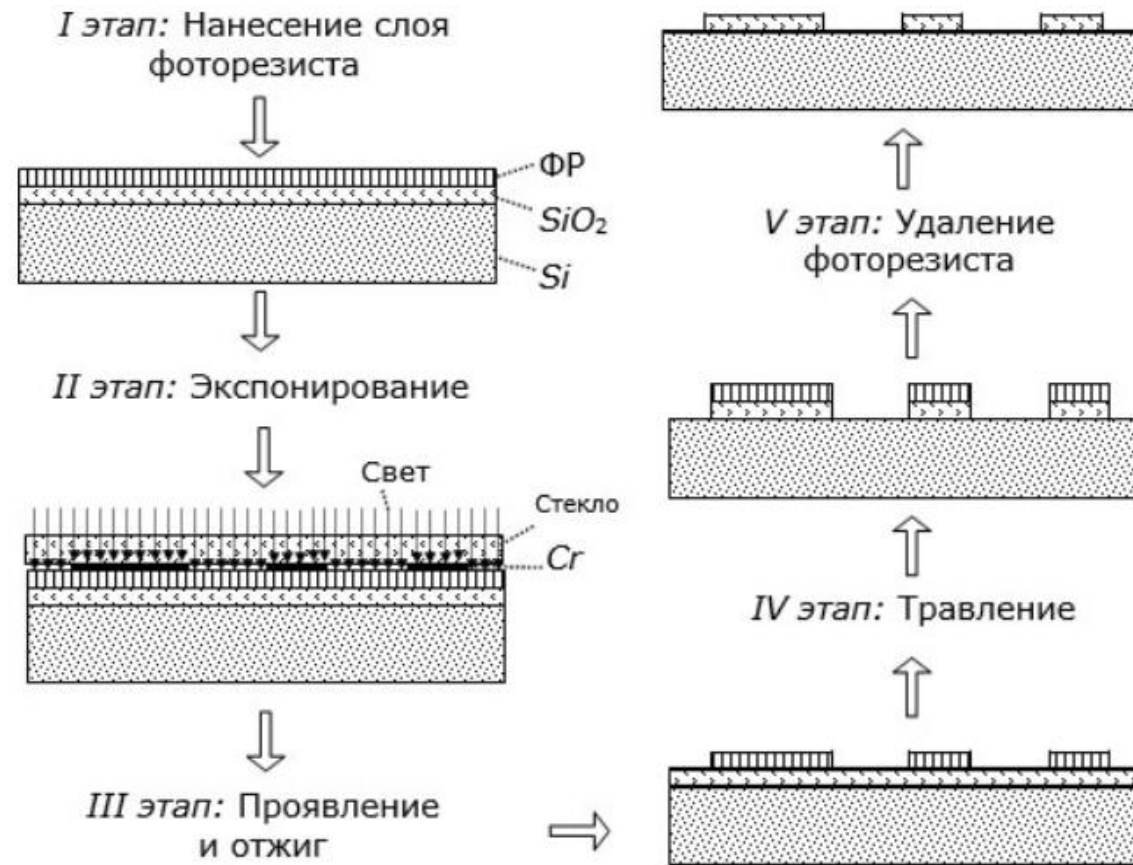


Рис. 2.8. Основные этапы технологического процесса фотолитографии

- Бірінші кезеңде субстратты тазалау, фоторезисттік қабатты жағу және кептіру технологиялық операциялары орындалды. Органикалық фоторезистілер, әдетте, центрифугалау арқылы, ал бейорганикалықтар вакуумды тұндыру арқылы қолданылды. II кезеңде фотомасканы төменгі, әлдеқашан құрылымдалған қабаттың топологиясымен дәл туралау, фотомасканы фоторезисттік қабатқа басу және жарыққа әсер ету технологиялық операциялары орындалды. Фотомаска, әдетте, жарыққа мөлдір шыны пластинадан және жарыққа мөлдір емес хром бөліктерінен тұрды. Фоторезисттің ашық аймақтары еритін болды (басқа нұсқада ерімейтін). III кезеңде дамыту операциясы орындалды, оның барысында фоторезисттің ашық аймақтары ерітілді және жойылды. (Басқа нұсқада, ашылмаған жерлер ерітілді және жойылды). Алынған фоторезисттік маска еріткішті кетіру және химиялық төзімділікті жақсарту үшін жоғары температурада күйдірілді. IV кезеңде фоторезисттік маска арқылы қабаттың ашық жерлері оюланған (химиялық немесе физикалық әдістермен) және жойылған. V кезеңде фоторезисттік маска да алынып, беті тазартылды, кептірілді және алынған құрылымның көрсетілген топологияға сәйкестігі тексерілді.
- Фотомаскалар фотолитография көмегімен де жасалды. Бастапқы (анықтамалық) фотомаскалар автоматтандырылған жоғары дәлдіктегі машиналарда - «фотоштампталарда» жасалды. Фоторезисттік қабатпен қапталған фотомаска дайындамасы дәл координаттар кестесі арқылы жарық сәулесінің астына жылжытылды. Өлшемі автоматты түрде өзгертілетін оптикалық конденсатор мен ауыстырылатын диафрагмалардың көмегімен тікбұрышты немесе дөңгелек көлденең қиманың жарық сәулесі қалыптастырылды. Экспозициядан кейін координаталық кесте дайындаманың келесі бөлігін жарық сәулесінің астына жылжытты, ал келесі экспозиция орындалды. Осылайша, компьютерлік чипті жобалау жүйесі арқылы дайындалған берілген бағдарлама бойынша кезең-кезеңімен дайындамада барлық қажетті топология, соның ішінде арнайы туралау белгілері пайда болды. Экспозициядан кейін фоторезист әзірленіп, хром қабатына мөлдір терезелер қаланған. Қосалқы (жұмыс) фотомаскалар фотолитография үрдісін қолдана отырып, негізгісін қолданып жасалды.
- 1-дәрісте біз электромагниттік толқындардың дифракциясы құбылысына байланысты оптикалық микроскоптардың рұқсаты көрінетін жарықтың толқын ұзындығының шамамен жартысынан аспайтынын атап өттік. Бұл шектеу фотолитографияға да қатысты. Толқын ұзындығы 400 нм күлгін сәулені пайдаланғанның өзінде фотолитографияның рұқсат ету қабілеті 200 нм-ден аспайды. Сондықтан микросұлба элементтерінің минималды өлшемдері 1 микронға жақындағанға дейін, рұқсатты арттыру жолдарын іздеу басталды.
- Бір жол эволюциялық болды - олар сәйкес фотомаскалар арқылы қысқа толқын ұзындығы сәулеленуге - ультракүлгін сәулеге, синхротрондық сәулеленуге, соның ішінде толқын ұзындығы шамамен 200 нм немесе одан аз вакуумдық ультракүлгінге әсер ету үшін қондырғыларды әзірлей бастады. Кр (248 нм), Ar (197 нм) немесе F₂ (157 нм) диапазонындағы эксимер лазерлері қазір осындай қысқа толқынды жарық көзі ретінде пайдаланылады. Бұл жобалық және технологиялық стандарттарды шамамен 100 нм дейін жеткізуге мүмкіндік берді. Қосымша мүмкіндіктер 1,5-тен жоғары сыну көрсеткіші бар батыру сұйықтығын пайдалану арқылы қамтамасыз етіледі. Бұл фотолитографияның рұқсатын бірдей факторға (сыну көрсеткіші сияқты) арттыруға мүмкіндік береді. Дамудың эволюциялық жолындағы келесі қадам фоторезисттердің экстремалды ультракүлгін (толқын ұзындығы 10 нм ретті және көп айналы оптика) немесе рентгендік сәулеленудің әсері болды. Бұл технологиялар сәйкесінше «EUVL» және «Рентген литографиясы» деп қысқартылған. Сапалы автоматтандырылған кешенді жабдық қазір мұндай әдістердің өнімділігін сағатына шамамен 100 пластинка деңгейіне дейін жеткізуге мүмкіндік берді.

Фотолифография және оның мәселелері

- Соңғы уақытқа дейін дизайнның ең жетілдірілген стандарттарына, яғни элементтердің минималды өлшеміне 193 нм толқын ұзындығында проекциялық фотолифографияны қолдану арқылы қол жеткізілді, оның мүмкіндіктері литографияның ажыратымдылығының дифракция шегінен шама ретімен асып кетті. оптикалық жүйенің көмегімен алуға болатын топологиялық элементтің ең аз өлшемін анықтайтын оптикалық жүйе. Сондықтан фотолифография машинасын жасаушылар минималды дизайн стандарттарына қол жеткізу үшін айтарлықтай күш жұмсады, нәтижесінде оптикалық жүйелер айтарлықтай қымбаттады (2-суретті қараңыз). Жоғары ажыратымдылықтағы литографиялық линзалар нарығын негізінен монополияландырған және шын мәнінде литографиялық жабдықтың жалғыз өндірушісі болып табылатын Carl Zeiss компаниясының заманауи литографиялық линзалары биіктігі 170 см-ге дейін, диаметрі 600 мм-ге дейін, шамамен 40 қамтиды. өте жоғары сапалы линзалар мен шағылыстыратын оптикалық элементтер және салмағы 800 кг-ға дейін. Бұл линзаның масштабы 2-суретте анық көрінеді.



фото 2. Традиционный проекционный фотолитограф компании ASML. В центре виден объектив

- Соңғы бірнеше жылда микроэлектроникада 13,5 нм толқын ұзындығындағы EUV проекциялық фотолитография қолданылды, бұл 10 нм - 7 және 5 нм-ден аз рұқсатқа қол жеткізуге мүмкіндік берді және мүмкін, Тайваньдық TSMC компаниясы уәде еткендей. , тіпті 3 нм. EUV литографиясы үшін қондырғыларды құрудағы мәселе 13,5 нм толқын ұзындығында мұндай жарықтың барлық белгілі оптикалық материалдардың қарқынды жұтылуына байланысты дәстүрлі жарық көздерін және дәстүрлі оптиканы пайдалану мүмкін еместігінде. Сондықтан мұндай оптикалық жүйелерде сәйкес интерференциялық жабыны бар айналар қолданылады (3-суретті қараңыз). Мұндай қондырғылардың күрделілігі олардың құны, біз атап өткендей, қазірдің өзінде 200 миллион долларға жетеді (3-суретті қараңыз).



Фото 3. EUV-фотолитограф компании ASML

