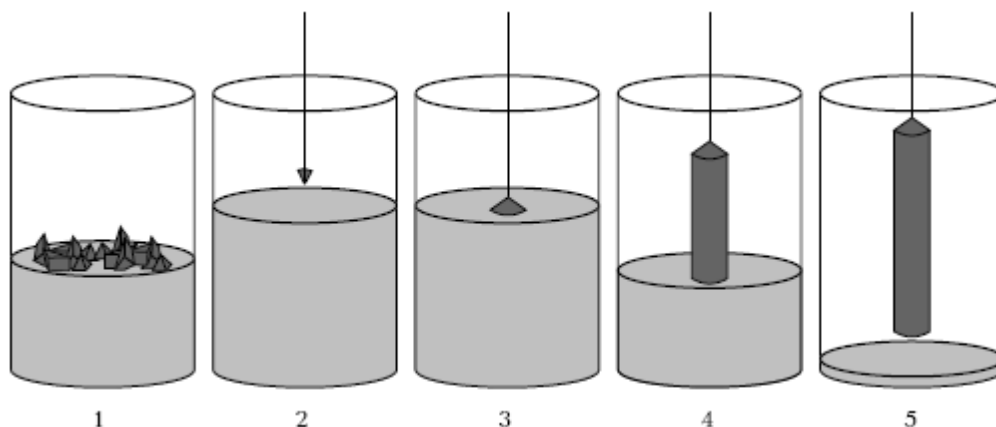
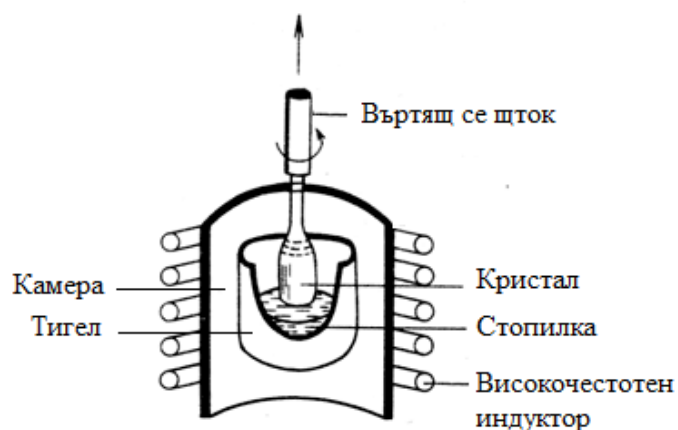


Израстване и пречистване на монокристали. Легиране на полупроводници.

Метод на Чохралски. Методът се използва за израстване на монокристали на различни вещества. Този метод осигурява високо структурно съвършенство на получените монокристали. Схемата на метода е показана на фиг. 1.



Фиг.1. Процес на израстване на монокристал по метода на Чохралски:
1 – разтопяване на поликристалите, легиране; 2 – спускане на щока;
3 – начало на израстването на кристала; 4 – изтегляне на монокристалата от стопилка;
5 – готовият монокристал с остатъка от стопилката.



Фиг.2. Камера с индукционно нагряване за израстване на кристали.

Вътре в херметичната камера се създава вакуум или защитна газова среда – фиг. 2. Пречистеният поликристален материал се поставя в индукционно нагрят тигел и се получава стопилка на материала. Така се прави при израстване на силиций и германий. Обикновено при израстване на сложни съставни кристали в тигела се поставят окиси – фиг.2. Така е при израстването на литиевия ниобат LiNbO_3 (смесват се литиев окис и ниобиев окис), $\text{YAG:Nd} - \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (итриево алуминиев гранат с добавка на неодим, смесват се итриев окис и алуминиев окис). Щокът със затравката се спуска до контакт със стопилката и бавно се изтегля нагоре, като едновременно се върти. Въртенето осигурява изравняване на температурата на стопилката и равномерно разпределение на примесите, които се поставят в стопилката.

Недостатъци на метода са:

- замърсяването на кристала с кислород, който може да дойде от кварцовия тигел

(SiO₂) или от околната среда;

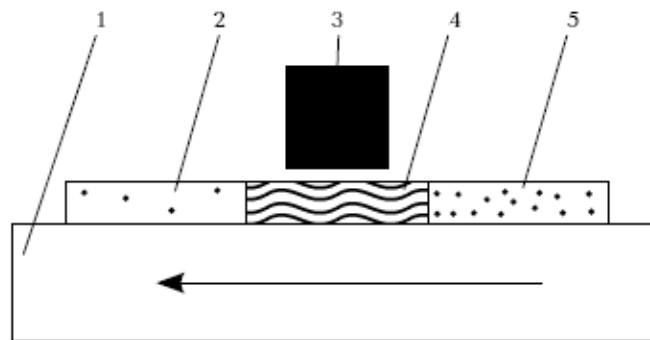
- появата на различни дефекти, много често точкови и дислокации, които се образуват от термичните напрежения, създадени от нееднородното разпределение на температурата в монокристала.

Метод на зонно топене. Методът е основан на нееднаквата разтворимост на примесите в течната и твърдата фаза, които се намират в състояние на равновесие.

Отношението на концентрацията на примесите в твърдата $N_{\text{тв}}$ и течна $N_{\text{теч}}$ фаза се нарича коефициент на разпределение: $k_0 = N_{\text{тв}}/N_{\text{теч}}$.

Методът на зонно топене е ефективен при $k_0 < 1$, т.к. тогава примесите се избухват в обема на стопилката.

Процесът протича в атмосфера на защитни газове – фиг.3.



Фиг. 3. Схема на метода на зонно топене:

1 – тигел, 2 – пречистена зона с малка част примеси, 3 – нагревател, 4 – разтопена зона, 5 – замърсена зона. Със стрелка е означено направлението на движение на тигела.

Подложеният на пречистване монокристал се поставя в графитов тигел. С помощта на индуктор, захранван от високочестотен генератор, се получава тънка разтопена зона в началото на образеца, която бавно се премества по дължината на слитъка (булата). Примесите, за които $k_0 < 1$, се концентрират в разтопената зона и се преместват заедно с нея в края на слитъка. Изискваната степен на чистота определя колко пъти да се повтори този процес. Обикновено е от 5 до 8 пъти. За ускоряване на процеса на пречистване се създават няколко разтопени зони.

Съществуват модификации на този метод. За химически активни в стопилката вещества се използва безтигелно зонно топене. Същността на метода се заключава в това, че разтопената зона се задържа между твърдите части на слитъка от силите на повърхностно напрежение. Такъв процес се провежда във вакуум или в атмосфера на защитни газове. При топенето във вакуум става изпарение на примеси от стопилката, което позволява ефективно пречистване на образеца от кислорода.

Кристалите, израстнали по метода на зонното топене имат по-малко съдържание на кислород от кристалите израстнали по метода на Чохралски. Но те пък имат по-голям брой структурни дефекти и по-нееднородни свойства.

Легиране на полупроводници.

За създаване на p-n преход, полупроводниковите материали се легираат. Легирането може да се осъществи както в процеса на израстването на монокристалите, така и на следващ

стадий от обработката. Съществуват много методи за легиране на полупроводникови материали. Ще разгледаме основните от тях.

Дифузия. Най-простият начин е *термичната дифузия на примеси*. Дифузията има три механизма на осъществяване: обмяна на места с примеси от едно равновесно състояние в друго, движение на примесите по ваканциите и движение на примесите по междувъзлията.

Термичната дифузия на примеси има редица недостатъци:

- Невъзможност за използване на легиращите материали в чист вид (Р – взривоопасен; As, Sb – отровни). Използват се техни производни.
- За увеличаване на скоростите на процеса, той трябва да се проведе при високи температури, което води до преразпределение на по-рано внесените примеси.
- Изотропността на процеса води до странична дифузия, което е недопустимо в субмикронните технологии.
- Използването на много материали като дифузанти по много причини е ограничено.
- Максималната концентрация на примеси е на повърхността на подложката.

Лазерно легиране. Това е процес на въвеждане на примеси при въздействието на лазерно лъчение. Лазерното легиране позволява да се направи локално нагриване на участък от образеца и относително просто да се регулира температурата.

По начина на доставяне чрез лазерно излъчване се различават две схеми: права и обратна. В *правата схема* лазерният лъч попада на легираната повърхност. В *обратната схема* лазерът облъчва обратната страна на подложката. При използване на обратната схема енергията на излъчените кванти трябва да е по-малка от ширината на забранената зона, защото в противен случай би се погълнала от подложката.

Съществуват пет начина на доставяне на легиращите смеси.

1. Легиране от газова фаза под действието на лазерно нагриване на повърхността на подложката. Лазерното лъчение се използва само за нагриване на повърхността на образеца. Затова използваното лазерно лъчение от една страна трябва да има малки стойности на коефициента на оптично поглъщане в газова среда, т.е. не трябва енергията му да е по-голяма от енергията на дисоциация $E_{\text{дис}}$ на молекулите на газа, а от друга страна голям коефициент на оптично поглъщане в материала на подложката $E_{\text{д}}$:

$$E_{\text{д}} \ll h\nu \ll E_{\text{дис}}.$$

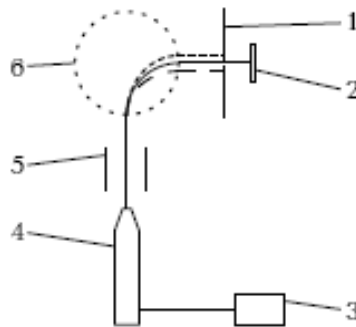
Освен това подложката трябва да има високи адсорбционни способности към примесните атоми.

2. Фотолитично лазерно легиране. Енергията на лазерното лъчение се използва за дисоциация на атомите на газа и за нагриване на повърхността на подложката. Затова енергията трябва да е по-голяма от енергията на дисоциация и от ширината на забранената зона.
3. Имплантационно-лазерно легиране. Този начин позволява да се подобри качеството и допълнително да се образува легиран слой, получен по метода на йонна имплантация и лазерно отгриване. За провеждането на имплантационно-

лазерно легиране е необходимо силно поглъщане на светлината в повърхностния слой на полупроводника, поради което енергията на излъчените кванти трябва да е по-голяма от ширината на забранената зона.

4. Лазерно легиране от контактния слой. Лазерното лъчение се насочва към повърхността на полупроводника, върху която предварително е нанесен слой от легиращото вещество. Дебелината на слоя трябва да е прецизно определена. При голяма дебелина на слоя трудно се създава висока температура на контактната граница. При малка дебелина на слоя не се достига необходимата дълбочина на легиращия слой.
5. Лазерната имплантация на примесите се осъществява по обратната схема, което позволява да се използват лазери със съществено по-малки мощности. При това се осъществява топене на контактната област, дифузия и имплантация. В този случай се получават полупроводници с ниско съдържание на примеси, т.к. те предизвикват поглъщане на енергията на лазерното излъчване в легируемия образец.

Йонно легиране. Това е процес на внедряване на примеси в подложката чрез бомбардирането на повърхността и с примесни йони – фиг. 4. Енергията на йоните се придава от електрическо поле с напрежение стотици киловолти.



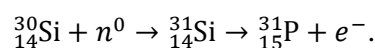
Фиг.4. Схема на установката за йонно легиране:

- 1 – диафрагмен процеп, 2 – подложка, 3 – източник на високо напрежение,
4 – източник на йони, 5 – фокусираща система, 6 – магнитен сепаратор.

Преимущество на този метом се явяват ниските работни температури, големият брой приложими примеси, възможността точно да се управляват примесите, относително просто управление на профила на разпределение на внедрените йони на легиращите примеси.

Радиационно легиране. Този метод има големи възможности. Осъществява се под действието на поток неутрони, насочен към кристала и имащ голяма проникваща способност. Това позволява да се получат монокристали с еднородно разпределение на примесите. Даденият метод се използва предимно за получаване на високоомни кристали на силиция.

В природния силиций се съдържа 3,09% устойчив изотоп $^{30}_{14}\text{Si}$. При облъчване с неутрони този изотоп се превръща в нестабилен изотоп $^{31}_{14}\text{Si}$, имащ период на полуразпад 9438s, по-малко от 3 часа, който на свой ред се превръща в устойчив изотоп $^{31}_{15}\text{P}$:



За премахване на образувалите се дефекти се прилага високотемпературно отгряване.