

## 2.6 Ионная имплантация

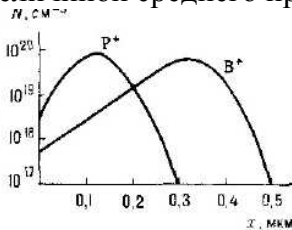
**Ионная имплантация** (ионное внедрение, ионное легирование) - введение примесных атомов в твёрдое тело бомбардировкой его поверхности ускоренными ионами. При ионной бомбардировке мишени происходит проникновение ионов в глубь мишени. Внедрение ионов становится существенным при энергии ионов  $E > 1$  кэВ.

Замечание. Формально ионной имплантацией следовало бы называть облучение поверхности твердого тела атомами или атомарными ионами с энергией не менее 5-10 энергий связи атома в решетке облучаемой мишени (тогда до остановки ион или атом пройдет не менее 2-3 межатомных расстояний, т.е. внедрится, “имплантируется” в объем мишени). Однако, мы по традиции термином “ионная имплантация” называем здесь более узкий диапазон энергий - от 5-10 кэВ до 50-100 кэВ.

Движущиеся частицы в результате многократных столкновений постепенно теряют энергию, рассеиваются и в конечном итоге либо отражаются назад, либо останавливаются, распределяясь по глубине. Энергетические потери обусловлены как взаимодействием с электронами мишени (неупругие столкновения), так и парными ядерными (упругими) столкновениями, при которых энергия передается атомам мишени в целом и резко изменяется направление движения частицы.

При высоких энергиях и малых прицельных параметрах ядра сталкивающихся частиц сближаются на расстояния, меньшие радиусов электронных орбит, и их взаимодействие описывается кулоновским потенциалом. При низких энергиях существенно экранирование ядер электронами. Обычно раздельно рассматривают взаимодействие движущегося иона с электронами (свободными и на внешних оболочках атомов) и взаимодействие между ядрами иона и атома мишени, считая оба механизма потерь аддитивными, а среду однородной и изотропной (теория Линдхарда-Шарфа-Шютта, ЛШШ). Теория предсказывает, что удельные потери энергии с ростом энергии иона в зоне упругих столкновений проходят через максимум а затем убывают. Удельные потери в неупругих столкновениях с ростом энергии возрастают по коренному закону. При очень больших скоростях энергиях ион движется в мишени как голое ядро и удельные потери энергии убывают с дальнейшим её ростом.

Траектория иона представляет собой сложную ломаную линию, состоящую из отрезков пути между элементарными актами рассеяния на большие углы. Функция распределения стабилизированных ионов по глубине образца имеет максимум (расстояние точки максимума от поверхности определяется величиной среднего пробега ионов данной энергии (**Рис.12**).



**Рис.12.** Распределения по глубине  $x$  ионов В и Р, внедрённых и Si:  $\epsilon=100$  кэВ, доза ионов  $10^{13}$  см $^{-2}$ . Для ионов В  $R_{cp}=300$  нм,  $\Delta R=73$  нм, для Р  $R_{cp}=124$  нм,  $\Delta=46$  нм, ( $N$  — число ионов 1 см $^3$ ).

Важными характеристиками процесса ионной имплантации являются т. н. проективный пробег иона  $R_{пр}$  — проекция траекторного пробега на направление первонач. движения частицы, а также распределение имплантированных атомов по  $R_{пр}$ , т. е. по глубине  $x$  (при бомбардировке по нормали к поверхности мишени). Распределение по  $x$  частиц, имплантированных в аморфную мишень, характеризуется ср. пробегом  $R_{cp}$  среднеквадратичным разбросом пробегов  $\Delta R$  и параметром  $S_k$ , определяющим асимметрию распределения Пирсона (**Рис.12**). Эти величины зависят от  $M_1$ ,  $M_2$  и  $\epsilon_0$ . При  $S_k = 0$  распределение Пирсона переходит в гауссовское. При ионной имплантации в монокристаллы распределение внедрённых частиц по глубине может видоизменяться из-за каналирования заряженных частиц. Изменяя в процессе ионной имплантации энергию ионов, можно получить распределение внедрённой примеси по глубине желаемой формы.

Полное число атомов примеси  $N$ , которое может быть имплантировано в твердотельную мишень через единицу поверхности, ограничивается распылением, если коэффициент распыления  $S$  (число атомов мишени, выбиваемых одним ионом) больше доли внедряющихся частиц  $\alpha=1-k$  ( $k$  — коэффициент отражения). В пренебрежении диффузией

$$N_n \approx n_s \bar{R}_{пр} \quad (14)$$

где  $n_s = \alpha n_0 / S$  — концентрация примеси у поверхности в установившемся режиме. Если  $S < \alpha$ , концентрация имплантированных атомов будет монотонно расти с увеличением дозы ионов.

Наиболее широко ионная имплантация применяется для легирования полупроводников с целью создания р-п-переходов, гетеропереходов, низкоомных контактов. Ионная имплантация позволяет вводить примеси при низкой температуре, в том числе примеси с малым коэффициентом диффузии, создавать пересыщенные твёрдые растворы. Ионная имплантация обеспечивает точную дозировку вводимой примеси, высокую чистоту (сепарация пучка ионов по массам), локальность, а также возможность управления процессом с помощью электрических и магнитных полей. Для устранения образующихся при ионной имплантации радиационных дефектов и перевода внедрённых атомов в регу-

лярные положения используют высокотемпературный прогрев. Ионную имплантацию в металлы применяют с целью повышения их твердости, износоустойчивости, коррозионной стойкости, создания катализаторов, изменения коэффициента трения и т. п. При больших дозах, когда концентрация внедренной примеси сравнима с  $n_0$ , возможно образование новых соединений. Ионная бомбардировка позволяет вводить примесь не только из пучка, но и из пленки, предварительно нанесенной на поверхность мишени (имплантация атомов отдачи и ионное перемешивание). Бомбардировка ионами может сопровождаться наращиванием имплантируемого материала. Пленки, полученные ионным осаждением, имеют высокую плотность и хорошую адгезию к подложке.

Достоинства ионной имплантации:

1. Возможность вводить (имплантировать) любую примесь, любой элемент Периодической Таблицы. Возможность легировать любой материал.
3. Возможность вводить примесь в любой концентрации независимо от ее растворимости в материале подложки.
4. Возможность вводить примесь при любой температуре подложки, от гелиевых температур до температуры плавления включительно.
5. Возможность работать с легирующими веществами технической чистоты и даже с их химическими соединениями (тоже любой чистоты).
6. Изотопная чистота легирующего ионного пучка (т.е. возможность легировать не только исключительно данным элементом, но и исключительно данным изотопом этого элемента).
7. Легкость локального легирования (с помощью хотя бы элементарного механического маскирования).
8. Малая толщина легированного слоя (менее микрона).
9. Большие градиенты концентрации примеси по глубине слоя, недостижимые при традиционных методах с неизбежным диффузионным размыванием границы.
10. Легкость контроля и полной автоматизации технологического процесса.
11. Совместимость с планарной технологией микроэлектроники.

Физические эффекты, сопровождающие ионную имплантацию собраны в **Табл.1.**

**Табл. 1.** Основные физические эффекты, сопровождающие ионную имплантацию.

Индекс эффекта	Наименование физического эффекта	
1	Химическое легирование	
2	Нарушение кристаллической структуры материала мишени	
	2.1	Нарушение стехиометрии материала мишени
3	Радиационное стимулирование процессов	
	3.1	Стимулирование дефектообразующей радиацией
	3.2	Стимулирование неразрушающей радиацией
	3.3	Постимплантационное стимулирование
4	Геттерирование дефектов и подвижных примесей	
5	Механические напряжения	
6	Образование макроскопических дефектных структур	
7	Фазовые переходы	
8	Диффузионные эффекты	
	8.1	Диффузионное перераспределение примеси
	8.2	Диффузия дефектов

Ограничения, лимитирующие возможности ионной имплантации:

1. **Возможность вводить любую примесь** иногда ограничена свойствами рабочего вещества ионного источника:

- а) слишком высокая рабочая температура
- б) химическая или температурная нестойкость,
- в) чрезмерная токсичность,
- г) коррозионная активность.

2. **Возможность легировать любой материал** в действительности означает только возможность ввести, внедрить атомы легирующего вещества внутрь объема мишени. Если понятие “легирование” означает еще и вполне определенное положение в кристаллической решетке мишени, то здесь возможности ионной имплантации во многих случаях не намного больше, чем, например, диффузии. Другое ограничение - радиационная стойкость материала мишени. Условия облучения таковы, что декомпозиция сложных материалов имеет место при имплантации почти всегда (из-за испарения или распыления какой-либо компоненты химического соединения).

3. **Возможность вводить примесь в любой концентрации** ограничена сверху коэффициентом распыления слоя. Кроме того, примесь, введенная сверх предела растворимости, при отжиге дефектов, как правило, выделяется в виде преципитатов другой фазы.

4. **Низкие температуры легирования** характерны только для таких систем, где состояние кристаллической решетки несущественно. Если же нарушенную решетку нужно восстановить после имплантации, то выигрыш в температуре по сравнению, например, с диффузионным легированием становится существенно скромнее.

5. Преимущество **технической чистоты легирующих веществ** изредка омрачается необходимостью осушки вещества либо устранения из него легкоионизирующихся посторонних примесей

6. **Изотопная чистота ионного пучка** отнюдь не означает изотопной же чистоты легирования. Перераспыление деталей имплантационной установки быстрыми ионами и неконтролируемое вбивание этого распыленного вещества в легированный слой может существенно испортить свойства слоя, поэтому требуются ухищрения, для исключения попадания на легируемую поверхность посторонних веществ.

7. **Локальность легирования** при имплантации обеспечивается механическим маскированием либо накладными трафаретами-масками. Здесь неприятность связана с вбиванием материала маски в легированный слой.

8. **Малая толщина легированного слоя** хороша в микроэлектронике, но отнюдь не является достоинством в металлургических применениях.

9. **Большие градиенты концентрации примеси по глубине.** Расчетные градиенты (по распределению пробегов ионов) реально никогда не получаются из-за размытия профиля, обусловленного радиационным стимулированием диффузии примеси.

10. **Легкость контроля и автоматизации процесса** во многих установках используется, но до идеала - полностью автоматизированной технологической линии - еще далеко.

Важно также помнить, что в настоящее время ионная имплантация одна из самых дорогостоящих.

Итак, ионная имплантация с сепарацией по массам - уникальный по своим возможностям метод исследования и модификации поверхностных слоев. Уникальный и по спектру легирующих примесей, и по спектру обрабатываемых материалов, и по диапазону концентраций примеси в легированном слое. Однако эта уникальность хороша только для исследовательских, поисковых целей. Как только выявляются перспективы практического использования найденных примесей, концентраций и толщин легированного слоя, так сразу же надо искать, опробовать и отрабатывать альтернативные технологии, обеспечивающие те же или близкие результаты.