

## 반도체 결정

### 1. 결정의 종류

고체는 **단결정**, **다결정**, **비정질** 이 세가지로 나눌 수 있다. 이 세가지가 모두 반도체에 쓰이므로 잘 구별할 필요가 있다.

**결정**이라함은 '분자의 규칙적인 배열' 이라고 정의 할 수 있다. 이 규칙적인 배열이 고체 전체에 균일하게 이루어져 있으면 **단결정**이라 한다.

그런데 부분적으로는 결정을 이루지만 전체적으로는 하나의 균일한 결정이 아닌 경우를 **다결정**이라 부른다.

**비정질**이라 함은 고체이지만 분자가 무작위로 배열되어 규칙이 없는 경우를 말한다.



Fig.1 결정구조

다이아몬드는 단결정이다. 돌맹이는? 보통은 다결정이다.

그리고 대부분의 금속은 다결정이다. 이 다결정과 단결정은 경계가 애매하다.

예를 들어보자, 만약에 부분 부분의 결정이 1 센티미터 정도되는 결정이 모인 집합은 단결정인가 다결정인가?

그것은 상황에 따라 정의될 수 있을 것이다. 지름이 20 센티되는 8 인치 실리콘 웨이퍼 (wafer) 전체의 크기를 생각하면 이것은 물론 다결정이라고 해야한다.

16 메가디램 (Mega DRAM, 1Mega=100 만)은 기억셀의 전체 길이가 2 마이크로 (micrometer=1/1000 미리)이 못 된다.

이 트랜지스터 입장에서 보면은 1cm 의 크기는 단결정으로 보일 것이다.

그러므로 단결정과 다결정은 그것을 사용하는 상황이 어떤가에 따라 단결정, 다결정이 정의 된다.

그러나 여기서 우리가 관심이 있는 것은 반도체 제조공정이므로 이 관점에서는 웨이퍼 전체가 하나의 결정인 단결정인 것만이 단결정으로 본다.

비정질 구조를 가진것으로 우리 주위에 흔히 볼수 있는것은 유리다. 유리는 비정질이기 때문에 갖가지 모양으로 가공하기 쉽다고 한다.

유리가 석영같은 다결정이나 단결정이었으면 유리컵이나 거울을 만들기 훨씬 어려웠을 것이다. 금속을 초고속으로 냉각시켜도 비정질이 된다.

여담이지만 고체물리를 하는 사람은 이 비정질 고체를 액체로 분류하기도 한다.

때로는 액체 중에서도 결정 구조를 가진 경우가 있다.자연상태에서 저절로 결정을 이루는 것이 아니라 외부에서 전압을 걸어주었을 때 결정과 같이 규칙적인 배열 구조가 나타나는것이다.이것을 액정 (liquid crystal),즉 액체 결정이라 부르며 이것은 LCD (liquid crystal display)에 사용되는데 전자시계, 전자 계산기에 쓰여 왔고 앞으로 평면 TV 에도 쓰이게 될 물질이다.반도체에서 대부분의 chip 은 단결정 웨이퍼에다 제작을 한다.

그러나 트랜지스터의 게이트는 다결정 실리콘으로 만든다.그리고 DRAM 의 저장용 커패시터는 비정질 실리콘으로 만들고 앞서말한 LCD 를 구동하는 트랜지스터도 보통 비정질 실리콘으로 제작하며 이것을 TFT-LCD 라 부른다.

## 2. 결정구조

자연상태에서 결정의 종류는 축의 기울어짐과 축의 길이 차이 등에 따라 14 가지 형태로 크게 구분된다. 그중에서 우리가 다루는 반도체물질인 실리콘,게르마늄,갈륨비소 등의 결정은 **cubic 구조** (x,y,z 축이 모두 직각이며 길이가 같은 구조) 이므로 이것만 생각하기로 한다.

Cubic 구조는 **SC(Simple Cubic)**, **FCC(Face Centered Cubic)**, **BCC(Body Centered Cubic)**, **Diamond**, **Zincblende** 구조로 나눌 수 있다.

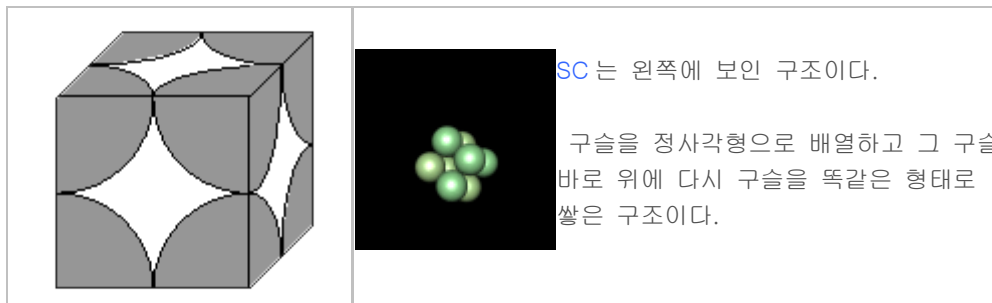


Fig.2-1

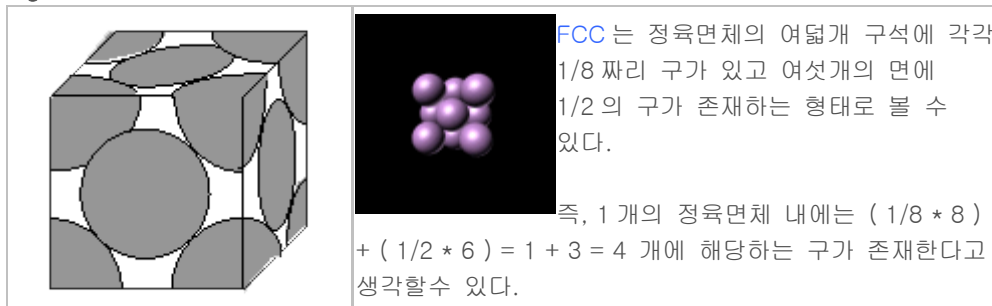


Fig.2-2



Fig.2-3

그림만으로 결정구조에 관한 이해가 쉽지 않다면 다음처럼 구슬을 쌓아 SC, FCC 와 BCC 구조를 만드는 것을 가정해 보자.

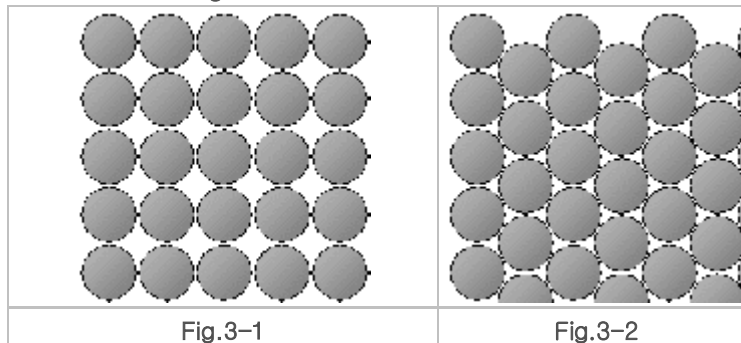
즉 크기가 일정한 정육면체의 상자에 구슬을 규칙적으로 넣는 방법을 생각해 보는 것이다.

맨먼저 구슬을 일렬로 배열하고 그 옆에 또다시 일렬로 구슬을 배열하고 싶다면 여러분은 어떻게 쌓을까? 여기에는 두가지 방법이 있는데 하나는 Fig.2-1 과 같이 배열하는 방법이고 또 하나는 Fig.2-2 와 같이 배열하는 방법이다.

여러분에게 배열해 보라고 하면 아마 심중팔구는 Fig.2-2 와 같이 쌓을 것이다. 보다 안정적으로 보이지 않는가?

만약 Fig.2-2 와 같이 쌓으려면 Fig.2-2 보다 좀더 주의가 필요할 것이다.

Fig.2-2 모양으로 바닥 전체를 쌓으면 Fig.2-3 와 같이 될 것이다. 그 윗층에 다시 구슬을 쌓아 보자.



그러면 여러분은 그 아래층의 구슬 바로 위에 또다른 구슬을 쌓을 수 있을까? 아마 구슬이 미끄러져 네 개의 구슬 사이의 골속으로 가게 될 것이다.

즉 이런 식으로 아래층 구슬 바로 위에 위층 구슬을 쌓기란 아주 힘들 것이다.

아래층 구슬 바로위에 위층 구슬을 쌓는 것이 SC 구조이며 따라서 자연계에서 이런 불안정한 SC 구조는 거의 존재하지 않는다.

그러면 맨 아래층은 Fig.3-1 와 같이 쌓고 네개의 구슬 사이의 골속에 그 윗층의 구슬을 쌓고 그 위에 다시 맨 아래층과 같이 쌓는 것은 SC 구조 보다는 훨씬 안정적일 것이다.

이러한 구조가 바로 BCC 구조이다. (실은 이 BCC 구조는 Fig.3-1 처럼 원자가 서로 딱 붙어 있는 것은 아니고 사이가 벌어져 있다)

그런데 맨 아래층을 Fig.3-1 와 같이 쌓는 것보다 Fig.3-2 와 같이 쌓는 것이 보다 더 수월할 것임을 알수 있다.

맨 아래층은 Fig.3-2 와 같이 쌓고 3 개의 아래층에 구슬 3 개가 만나는 경계점 (가장 깊이 파여있으므로)에 다시 구슬을 쌓아 아래층과 같은 배열을 가진, 그렇지만 약간 이동한 그런 형태로 쌓을 수 있을 것이다.

그 윗층 3 번째층도 마찬가지로 쌓을 것이다. 이러한 구조가 바로 FCC 구조이다.(이때 3 번째층은 첫 번째층과 똑같은 위치에 가지 않고 두 번째 층의 골 속에 배열하되 첫 번째 층과 다른 위치에 있는 것이 FCC 이다. 특히 3 번째층이 첫 번째 층과 같은 위치에 있는 구조를 HCP(hexagonal closed packed)라고 한다.

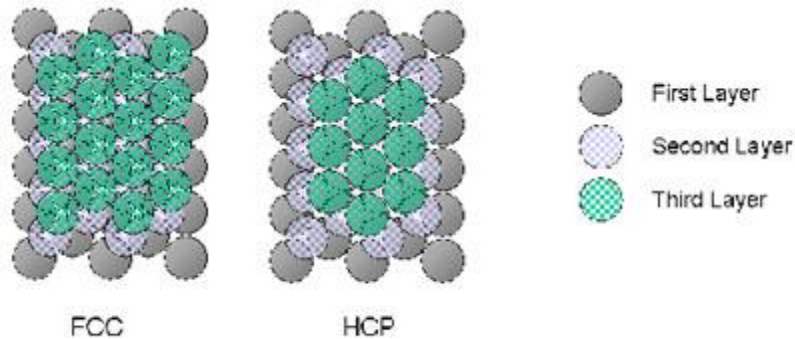


Fig.4 First layer = Third layer

이제 보다 안정적인 FCC 가 훨씬 쌓기가 쉽다는 것을 느낄 수 있을 것이다.자연계에서도 마찬가지로 FCC 구조를 가진 원자가 압도적으로 많다.

Fig.1 에 보인 하나의 격자의 한변의 크기를 **격자 상수 (lattice constant)** 라 한다.

그러면 단결정 실리콘은 어떤 구조일까? 앞에서 말한 3 가지 어느것도 아닌 **diamond 구조**를 지니고 있다.

Diamond 구조를 이야기 하기전에 **zinc-blende 구조**를 먼저 이야기 하자.

오른쪽의 3 차원 구조로 보여 지고 있는 것이 **zinc-blende 구조**이다 .

**Zinc-blende 구조**는 서로다른 두개의 원자에 각각의 원자는 서로 FCC 구조를 지니고 있다.

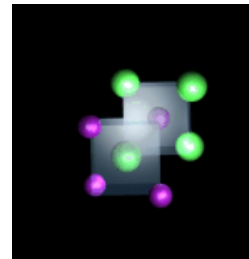


Fig.5

이 두 종류의 원자로된 두개의 FCC 를 서로 결합을 시키는데 하나의 FCC 사이에 다른 FCC 를 그림 5 와 같이 x,y,z 를 격자 상수의 1/4 만큼씩 이동시킨 상태로 끼워 넣는 구조이다.

그림 5 를 다시보면 A 원자는 A 원자끼리 FCC 이고 B 원자는 B 원자 끼리 FCC 구조인데 이 둘이 서로 겹쳐있는 구조이다.

diamond 구조는 그림 5 의 zinc-blende 구조와 동일한데 다만 두 종류의 다른 원자로 이루어 진것 이 아니라 같은 원자로이루어져 있다.

다시 말하면 FCC 구조를 두개 만들고 이 두개를 겹치는데 하나의 FCC 구조는 다른 것과 x 축, y 축, z 축으로 각각 1/4 씩 이동하여 겹쳐둔 구조이다.

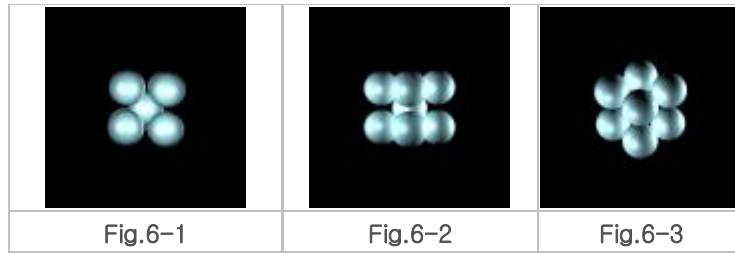
실리콘과 Ge 은 diamond 구조를 이루고 있으며 갈륨비소 화합물 반도체는 zinc blende 구조를 이루 고 있다.

### 3. 밀러 index

결정구조에서 주목해야할 점은 어떠한 결정을 특정한 면으로 자를때 그 자르는 방향에 따라서 자른면의 모양이 다르게 나타난다는 것이다.

BCC 구조를 예로 들면 만약 BCC 구조를 x 축에 직각인 방향으로 자르면 Fig.6-1 와 같이 될것이고 x 축과 y 축에 45 도 방향으로 자르면 Fig.6-2 와 같은 원자 배치 구조로 보일 것이다.

또한 대각선 방향으로 자르면 Fig.6-3 와 같은 구조가 된다.



전자가 이 결정들 사이를 지나가고 있다고 한다면 어떤 방향으로 진행하는가에 따라서 전자가 느끼는 원자 배치 구조는 다르게 보일 것이다.

뒤에 배우겠지만 전자는 실리콘에서 어떤 결정 방향으로 진행하는가에 따라서 그 성질이 달라지며 반도체 제조 공정에서도 어떤 방향으로 실리콘 산화막을 성장시키는가에 따라서 성장속도가 달라진다.

따라서 결정의 특정한 방향과 면을 표시하는 표현방법이 필요하다.

이제 결정의 방향과 절정면을 표시하는 표현 방법을 알아보자. 그림 7에서 보는 바와 같이 결정에 대해 x, y, z 축을 설정한다.

Cubic 구조의 결정에서는 xyz를 서로 바꿔도 동일하다.

먼저 방향을 표시할 때에는 결정격자의 크기를 1로 잡고 진행 방향의 xyz 축의 좌표를 표시한다.

예를 들어 그림 7에서 a 방향은[100], b는 [110]이다. 마찬가지로 c는 [111]이 된다.

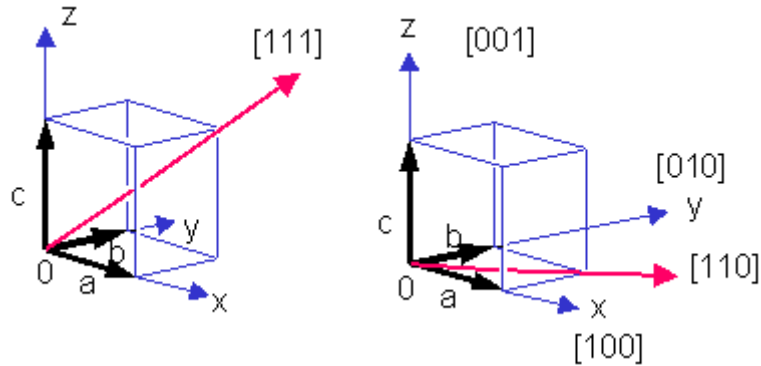


Fig.7

그러면 d는 어떻게 될까? [111/2]일까? 물론 틀린건 아니지만 관습상 간단한 정수를 곱해 괄호 안을 정수로 표시하여 [221]이 된다.

면을 표시하는건 좀더 복잡하다. 먼저 면이 xyz 축과 만나는 점을 표시하고 그것의 역수를 취하여 간단한 정수 곱이 되도록 만든다.

예를 들어 Fig.8-1은 xyz 축과 만나는 점이  $(1 \infty \infty)$ 이고 그것의 역수는  $(1 \ 0 \ 0)$ 이므로 이것은 (100)면이 된다.

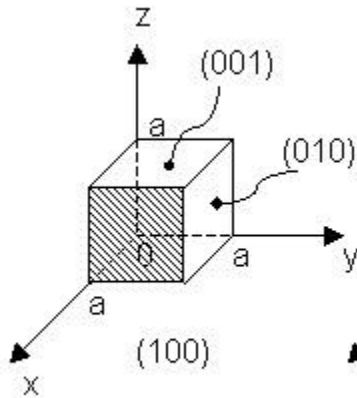


Fig. 8-1

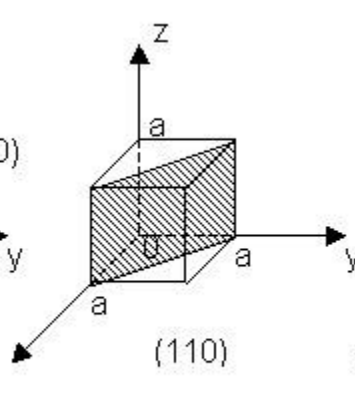


Fig. 8-2

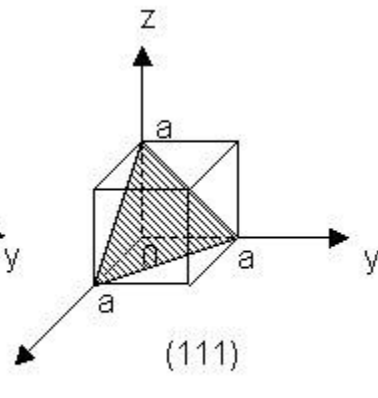


Fig. 8-3

만약 Fig.8-2 는 xyz 축과의 교점이 (111) 이고 그 역수도 (111)이므로 이것은 (111)면이 된다.  
 Fig. 8-3 는 교점이(112)이고 그 역수는 (1 1 1/2)인데 정수 2 를 곱하여 (221)면이 되는 것이다.  
 이렇게 교점의 역수를 취하는 이유는 수학에서 어떤 면을 표현할 때 그 면과 직각이 되는 선의 값으로 표현하는 것이 여러 가지로 편리하기 때문이다.  
 Fig.7 와 Fig.8-2 를 비교해보면 (111)면은 [111]방향과 서로 수직이 된다.  
 또한 Fig.7 와 Fig.8-3 는 서로 직각으로 만나는데 그 방향은 [221]이고 그 면은 (221)이 된다.  
 여기서 방향을 표시할 때는 [ ]를 사용하고 면을 표시할 때에는 ( )를 사용했는데 각각 방향과 면을 표시하는 기호로 약속한 것이다.  
 여기서 [100] 과 [010]방향을 비교해 보자.  
 BCC 든 FCC 든 SC 든 사실 이 두 방향은 동일한 배치를 보여 준다.  
 [110]과 [101],[011]은 모두 같은 방향을 의미하므로 이것들을 통칭하는 대표 값이 필요하게 된다. 그래서 이것을 <100>, <110>이라고 하자.  
 물론 <010>이라고 쓰고 대표 값이라고 해도 상관은 없다.  
 그러므로 여기서 <>라는 기호를 사용하는 것은 결정에서 이 기호로 표시되는 방향이 나머지 동일한 의미가 되는 방향들을 통칭한다는 의미라고 이해하자.  
 마찬가지로 면에 대해서도 (100) 면과 (010), (001)면은 동일한 면을 의미하며 이것을 통칭하여 {100} 면이라고 표시한다.  
 (110), (101),(011) 또한 {110}으로 통칭할 수 있다. 여기서 { }기호를 사용하여 대표 면을 표시함을 주목하자.  
 뒤에 에너지 밴드를 공부할때 이러한 방향에 따른 특성들을 관찰하게 된다.

또한 실리콘 웨이퍼에서 그 웨이퍼의 결정 방향이 얼마인 웨이퍼라는 것을 표시할 때 이러한 방법을 사용한다.

어쨌든 다결정 실리콘 웨이퍼위에 칩을 제작하는 경우를 생각해 보자. 다결정 실리콘은 작은 단결정들의 집합이라고 생각할수 있고 , 그 단결정 실리콘(Grain 이라고도 한다)의 경계면에 트랜지스터가 만들어 진다면 여기서 많은 누설전류를 발생시킨다.  
 만약 어떤 트랜지스터가 다행히 그 경계면을 지나가지 않는다면 누설전류가 작은 특성을 보일 것이고 또 어떤 트랜지스터의 소스나 드레인의 접합면이 그 경계를 지나가게 된다면 또한 많은 누설전류를 일으킨다.  
 또 채널 영역에 이 접합면이 지나가면 누설전류뿐아니라 전류구동능력이 뚝 떨어진다. 만약 수 백만 수천만개의 트랜지스터가 집적된 칩에서 이러한 특성을 보인다면 당연히 작동 불가능 할 것이다. LCD 는 그 특성상 유리기판에 트랜지스터를 만들어야 한다.  
 이 유리기판에는 단결정 실리콘을 붙일수가 없으므로(유리는 비정질이므로 결정이 규칙적으로 만들어지지 않는다) 이 경우에는 차라리 비정질 실리콘을 사용한다. 이렇게 되면 모든 트랜지스터가 누설전류가 크고 전류 구동능력이 형편없이 떨어지지만 차라리 들쭉날쭉한 것 보다는 낫다.

그리고 반도체 칩은 빠른 속도가 중요하지만 LCD에서는 트랜지스터가 빠른동작을 할 필요가 없다.LCD의 작동 속도가 원래 느리기 때문이다.

