

투과전자현미경의 상형성 기본원리 및 응용

조 남 희

한국과학기술연구원 재료연구단

1. 서론

전자 빔을 이용하여 확대된 상을 얻고자 하는 노력은 1920년대에 시작되었다. 원형으로 일정한 분포를 이루고 있는 자장에 전자가 입사했을 경우 자장은 광학에서의 렌즈와 같은 역할을 한다는 사실이 1925년경에 Busch에 의해 밝혀졌고 유사한 현상이 전기적인 전하를 갖는 개구에서도 발견되었다. 자석렌즈 등을 이용하여 확대된 상을 얻기 위하여 전자 빔을 이용한 첫 시도가 1930년대 초반 Knoll과 Ruska 등에 의해 시도되었으며, 이어서 Krause 등에 의하여 매우 초보적인 전자현미경이 출현하게 되었다.

전자현미경은 초기부터 생·의학 분야 뿐 아니라 무기재료의 연구에도 이용되었으며, 당시의 시편 제작은 주로 replica 기술에 의존하는 간접적인 방법을 사용하였다. 이후에 Hirsch 등에 의해 개발된 전기적으로 얇게 시편을 만드는 방법의 출현은 전자현미경의 시편 준비에 대한 기술적인 대혁신으로 간주된다. 이 기법에 의하여 제조된 얇은 금속 시편들을 전자 빔이 투과할 수 있게 되었으며 투과된 빔에 의하여 형성된 상으로부터 재료 내부의 실상이 실험적으로 밝혀지게 되었다. 전자빔이 시편(금속 또는 일부 비금속 재료)의 내부(1,000~3,000 angstrom 두께)를 투과하여 밝혀 내는 실험적인 결과들은 이전까지 이론적으로만 제기됐던 재료 내부의 격자결함들에 대하여 가히 혁명적이라고 할 수 있는 이해의 증가를 가져왔다. 특히 전위, 적층결함, 계면 등과 연관된 여러 의문점들, 침전물 2차상의 결정학적 방향성 등에 대하여 매우 많은 실험적 연구들이 행해지게 되었으며, 재료연구의 새로운 시대가 열렸다고 볼 수 있다.

현재까지 전자현미경을 생산하는 주요 업체는 일본

의 JEOL, HITACHI, 독일의 SIEMENS, 화란의 PHILIPS 등인데, 분해능의 개선, 고분해 위상콘트라스트형성, 미세한 화학분석 등을 위해 자석렌즈의 개량, 고전압가속장치(~1.5MV), 미세한 빔 probe 형성(수 angstrom), 다양한 분석 시스템 등의 부착 등이 시도되고 있다. 국내에는 주로 JEOL과 PHILIPS 회사의 제품들이 도입되어 우수 연구기관과 대학에서 이들을 이용하여 재료연구를 행하고 있다.

본 고에서는 투과전자현미경의 기본구성, 기본적인 상형성 원리, 그리고 이를 이용한 재료연구의 경우들을 고찰해 보고자 한다.

2. 투과전자현미경의 구성

2. 1. 전자파동, 자석렌즈, 분해능^{1~4}

전자들은 전하를 갖는 입자로서 이들의 행로는 이들과 연관된 진폭을 갖는 파동으로서 묘사된다. 즉, de Broglie의 물질파설에서 제시된 파동과 입자의 양면성으로부터 전자의 파동파장 λ 는 전자 빔과 연관된 특정한 값을 갖게 된다. 전자의 질량(m), 속도(v)로부터 전자파동의 파장(λ)은 $\lambda=h/mv$ 로 표시된다(h는 Planck 상수). 전자현미경에서 입사전자의 속도(v)는 전자총 내의 가속전압(E)에 의해 결정되며, 따라서 E라는 전압차에 의해 가속되는 전자의 파장은 아래 식과 같이 나타난다.

$$\lambda=h/(2mEe)^{1/2} \quad (1)$$

실제 사용되는 가속전압은 수백 kV에 해당되며 상응하는 전자속도는 빛의 속도에 근접하게 된다(예, 100kV: $v/c=0.54$, 1MV: $v/c=0.94$). 따라서 가속된

Table 1. Relativistic wavelengths(λ) and velocities as a fraction of the velocity of light(v/c) of electrons of various energies(E).

E(kV)	λ (nm)	v/c
100	0.0037	0.5482
200	0.00251	0.6953
500	0.00142	0.8629
1000	0.00087	0.9411
X-ray	~0.1	
green light	550	

전자파의 파장 계산에서는 relativistic 교정을 (1)식에 첨가해야 한다. Table 1에서 주요 가속 전압에 따른 전자파동의 파장들을 X선과 가시광선의 파장과 함께 보여 주고 있다.

‘전자현미경’ 단어에 ‘현미경’이 포함되어 있듯이 상을 얻기 위해서는 대물을 효과적으로 확대시킬 수 있는 렌즈가 필요하다. 즉 대물과의 상호작용 결과 발생하는 전자 빔들을 굴절 및 focus시키는 역할을 렌즈가 하게 되는데, 전자현미경에서 주로 이용되는 렌즈는 자석렌즈이다. Fig. 1에서 유리렌즈와 비교하여 자석렌즈를 개략적으로 보여 주고 있다. 이 자석렌즈는 전류가 흐르는 코일이 순철에 의해 둘러싸여 있으며, 원심 내

부쪽에 놓여 있는 작은 틈새 부근에서 코일 내의 전류 흐름에 따라 발생하는 자장이 집중하게 된다. 전하 e와 속도 v를 갖는 전자가 광축에 평행하게(또는 매우 작은 각도를 갖고서) 이 자장 내에 접근하여 통과할 때에, 자장 (B)에 의하여 아래와 같은 힘(F)을 받게 된다.

$$\vec{F} = e[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (2)$$

이 힘은 전자진행 방향과 자장 방향에 대하여 수직인 방향으로 작용하게 되므로 입사전자는 나선형의 궤도를 따라서 자장 내를 진행하게 된다. 한 지점에서 광축에 여러 각도로 출발한 전자들은 나선형 궤도에서 회전주기가 같고 진행 방향의 속도는 같다고 볼 수 있으므로(입사각도가 매우 작음) 궁극적으로 전자 빔에 대하여 볼록렌즈와 같은 역할을 한다. 즉 코일 내에 흐르는 전류는 광학에서의 유리렌즈의 가시광선에 대한 굴절의 역할을 하게 되며, 자석렌즈의 경우는 특정한 각도를 갖는 상의 회전이 발생한다. 따라서 자석렌즈는 광학렌즈와 유사하게 아래의 식들이 적용될 수 있다.

$$1/a + 1/b = 1/f, \quad M = b/a \quad (3)$$

이 식에서 a와 b는 각각 대물과 렌즈, 그리고 렌즈와 상면간의 거리를 나타내며, M은 배율을 의미한다.

현미경의 기본 목표는 대물을 가능한 한 최대의 분해능을 갖고서 확대된 상을 얻는 것이다. 분해능은 대물 내의 상호간에 분별할 수 있는 최단 두 지점 거리로 정의할 수 있다. 틈새간의 거리가 r_1 인 선형 격자를 갖는 대물의 상형성을 고려할 때, 각각의 틈새에서 빠져 나가는 빔들이 상면에서 결합하여 각각의 틈새에 상관되는 위치에서 상을 형성한다. 광학의 상형성에서 Abbe 이론이 적용 가능한데, α 가 입사전자 빔과 산란 전자 빔간의 각도이고, r_1 이 산란점간의 거리일 때 α 각에 해당하는 첫번째 최대강도(상면에서)는 이웃 산란점으로부터의 빔에 대해 파장의 일배만큼의 행로차를 가져야 한다. 따라서 r_1 이 작을수록 α 는 커야 한다. 보다 수학적인 처리에 의해서 아래와 같은 분해능과 파장, 그리고 α 와의 관계가 성립된다(α 가 매우 작을 경우).⁵

$$r_1 = 0.6\lambda / \alpha \quad (4)$$

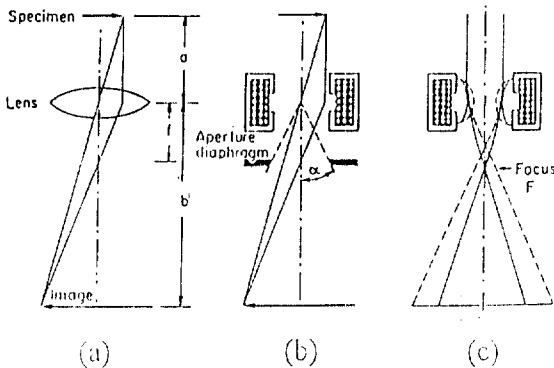


Fig. 1. Lenses in light and electron optics. a) glass lens in light optics, b) electromagnetic lens in electron optics. c) magnification due to weak coil current.

자석렌즈에서 발생하는 여러 가지의 렌즈결합 때문에 분해능의 저하를 가져오는데, 대부분의 결합들은 최근의 전자현미경 개선에 의하여 교정이 가능하다. 그러나 자석렌즈의 구면수차는 렌즈 자체가 갖는 결합이므로 이의 분해능에 미치는 영향을 고려해야 하며 분해능과의 관계는 아래 식과 같이 나타난다.

$$r_2 = C_s \alpha^3 \tag{5}$$

전자현미경에서 렌즈에 의한 상형성과정에서는 광축과 매우 인접해 있는 전자 빔들만이 참여해야 하며, 따라서 개구의 사용은 필수적이다. 개구의 크기와 상관된 (4)식에서의 α 의 영향과 렌즈의 구면수차에 의한 영향 등이 실제 렌즈의 분해능에 함께 작용하게 되어, 최대 분해능은 아래 식에서처럼 위의 두 인자를 함께 고려하여 (4)식과 (5)식으로부터 적절한 α 값(α_D)에서 결정된다.

$$r = \lambda^{3/4} C_s^{1/4} \quad (\alpha = (\lambda / C_s)^{1/4}) \tag{6}$$

2. 2. 투과전자현미경의 구성^{1,4,6}

투과전자현미경에서 기본작동을 위한 주구성은 전자 빔 발생 및 조명부분, 대물렌즈, 상확대부분, 그리고 상기록부분 등으로 크게 4 부분으로 구성되어 있다 (Fig. 2).

전자 빔 발생 장치는 3 극진공관과 유사하며 텅스텐 또는 LaB₆를 필라멘트로 이용하며 이들을 가열하여 양극과의 사이에 놓인 전압차에 의해서 열이온적 방사된 전자가 가속되는데, 그리드 역할을 하는 Wehnelt 통에 의해서 빔들이 집적, 교차되는(cross-over) 부분이 생긴다. 이 corss-over 부분이 condenser 렌즈의 대물면이 되어서 시편의 상단 표면에 focus되게 된다. 흔히 사용되는 이중 condenser 렌즈에 의하여 60~90 μ m 직경을 갖는 cross-over 부분이 시편 상단에서 2~10 μ m 직경을 갖는 전자 빔 입사가 가능하다.

시편위치에서 2.5mm 정도 아래에 대물렌즈가 놓여 있으며, 대물렌즈에 의해서 대물에 의해 산란, 회절된 빔들이 focus되어 대물렌즈에서 2.5mm 정도 아래에 위치한 후초점면(back focal plane)에서 회절 패턴이, 그리고 대물렌즈에서 4.5cm 정도 아래에 놓인 상면(image plane)에 상이 각각 생성된다. 후초점면과 상

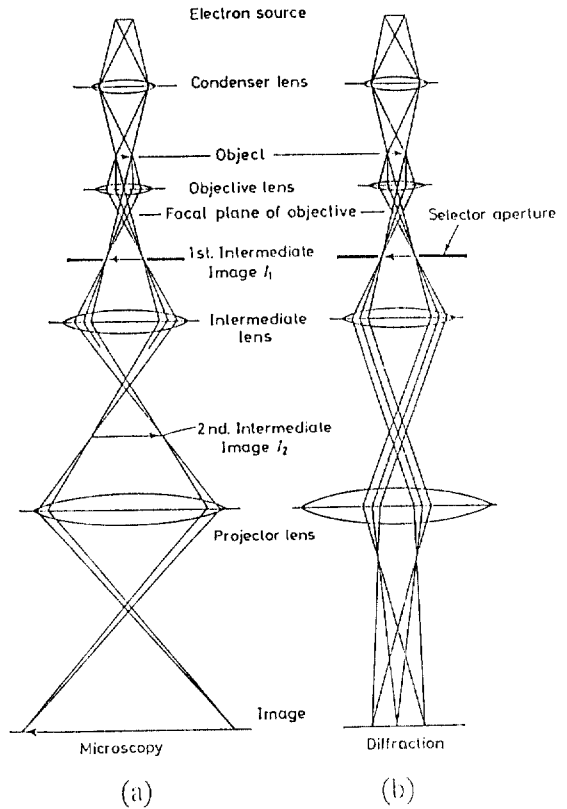


Fig. 2. Ray paths in the electron microscope (a) under microscopy conditions and (b) diffraction conditions.

면에 대물렌즈 개구와 selected area 개구가 각각 놓이게 된다.

상면에서는 대물이 20배 정도로 확대되어 상으로 나타나며, 이 상면이 중간렌즈(intermediate lens)의 대물면이 되어 중간렌즈의 상면에 확대되어 나타나며 이후 1~2개의 projector lens들에 의해 확대되어 스크린에서 우리 눈에 보이게 된다. 회절 패턴을 관측하기 위해서는 대물렌즈의 후초점면이 중간렌즈의 대물면이 되어 Fig. 2(b)에서처럼 스크린에 확대되어 나타난다.

위의 주구성 부분의 작동을 위해서 부속 시스템으로 가속전압 발생을 위한 고전압발생기, 현미경 원통 내에서 전자들의 다른 이물질과의 상호작용을 막기 위한 진공시스템, 렌즈와 진공장비를 위한 냉각시스템, 현미경을 외부진동으로부터 격리시키는 장치 등이 필요하다. 부가적인 성능을 투과전자현미경에 부여하기 위하

여 주사장치(scanning unit), X-선 측정기, 전자에너지 손실 측정기, Fourier 변환 시스템 등이 첨가된다.

3. 상형성 원리^{1,4,8}

3. 1. 비정질 시편

전자 빔이 시편에 입사하게 되면, 입사전자들이 시편 내의 원자들에 의하여 산란이 발생한다. 산란에는 탄성 산란과 비탄성산란이 있으며, 회절 및 상형성에 연관된 탄성산란에 대해서만 여기에서 언급하겠다. 전자의 산란은 모든 방향으로 발생하는데, 전방산란(forward scattering) 방향으로 산란강도가 가장 크게 나타나며, 산란각도가 커짐에 따라서 그 강도는 감소한다. 산란의 물리적 원인은 입사 전자의 전기적 전하와 원자핵의 양성자와의 Coulomb 상호작용으로써, 핵의 질량이 크기 때문에 입사전자는 원자핵의 위치 변동 없이, 즉 에너지 전달 없이 행로가 바뀌게 된다.

Fig. 3은 산란이 상형성에 미치는 영향을 개략적으로 나타내고 있다. 이 그림에서 시편 위의 평행한 화살표는 입사 빔을 표시하고 있으며, 시편은 대물렌즈 앞부분의 초점 근처에 놓여 있다. 대물개구는 대물렌즈의 후초점면에 놓여 있다. 이 그림에서 시편이 밝게 나타난 부분과 어둡게 나타난 부분이 원소 A와 원소 B로 각각 구성되어 있으며, B의 원자번호가 A의 원자번호보다 훨씬 크다고 가정하자. 밝게 표시된 시편부분에

입사된 전자들은 비교적 적은 방해를 받고서 시편을 투과하며, 검게 표시된 시편부분에 입사된 전자들은 시편 내의 원자핵의 전하가 A보다 크기 때문에 산란의 정도가 심하게 되어 큰 산란각도에서 산란강도가 상대적으로 큰 값을 갖게 된다. 후초점면에 놓인 대물개구에 의해서 일정한 산란각도 이상의 산란전자들은 상형성에 기여하지 못하고 차단당하게 되며, 따라서 검게 표시된 시편 하단 표면을 떠나서 상형성에 참여하는 전자들의 숫자는 상대적으로 작게 되어 밝게 표시된 부분보다 상면에서 어둡게 나타나게 된다.

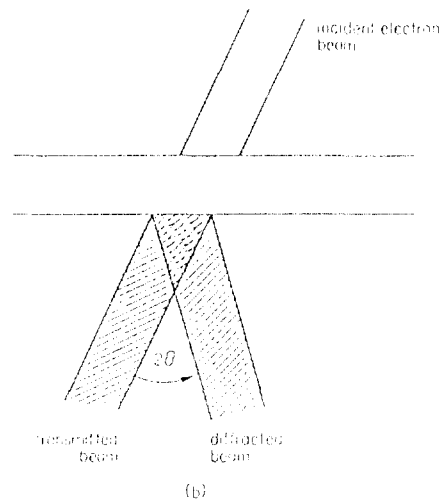
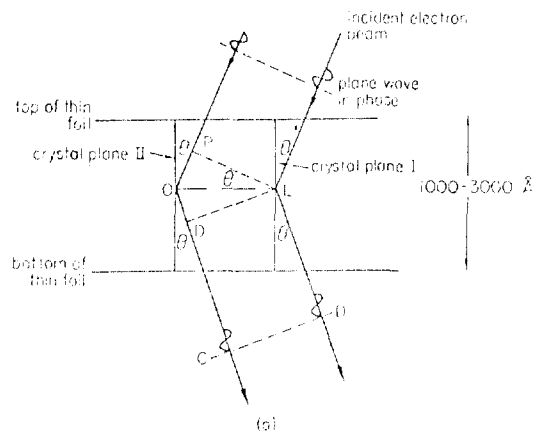


Fig. 4. Reflection at the Bragg angle θ from crystal planes in a thin foil electron microscope specimen. (b) The relationship between incident, transmitted and diffracted beams for a transmitting specimen.

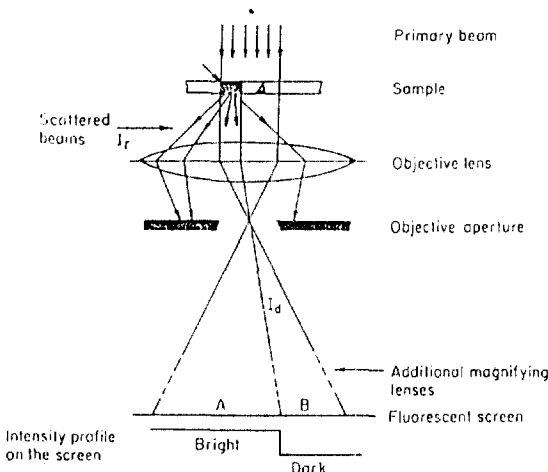


Fig. 3. Image formation in amorphous samples.

이처럼 시편 내에서의 원자번호의 차이가 국부적인 산란 정도에 미치는 영향에 의해서 비정질 시편에서 콘트라스트가 발생하는데, 이외에도 시편 두께, 또는 질량 밀도(mass density) 등의 차이에 의해서 콘트라스트가 생성된다.

3. 2. 결정질 시편

결정질 시편에서는 앞 절에서 언급한 입사전자가 시편 내의 각 원자와의 산란 뿐 아니라 전자의 파동성을 고려해야 한다. 즉 각 원자가 모든 방향으로 2차파를 발생시키는 요인으로 역할을 하며 원자배열에 기인한 주기적인 빔 행로차가 발생하게 된다. Fig. 4에서 보듯이 전자 빔(λ)이 특정한 결정면(면간거리= d)에 일정한 각(θ)으로 입사했을 때 첫째 면, 둘째 면에서 반사된 빔들간의 행로차가 전자파장의 정수배가 되면 보강간섭을 일으키게 된다. 즉 입사 빔이 격자면과 θ 라는 입사각도를 가질 때 입사 빔은 아래의 회절조건(Bragg 식)을 만족시키게 되어 결과적으로 회절 빔을 형성하게 된다.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (7)$$

Fig. 5는 대물에 의해 회절된 빔들이 대물렌즈에 의해서 후초점면에 점패턴이 발생하고, 전방산란 빔에 의

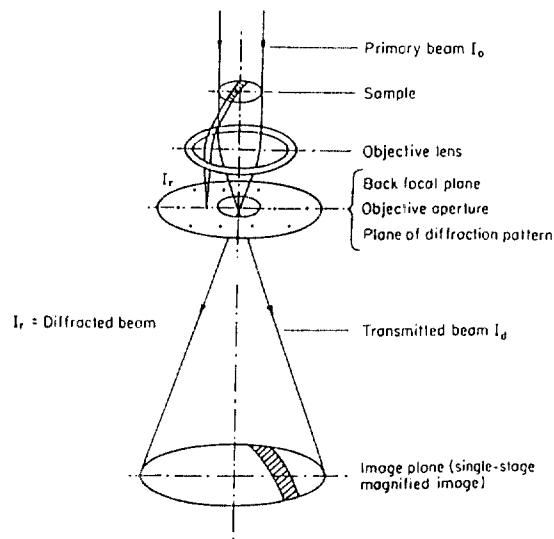


Fig. 5. Image formation in crystalline samples.

해서 상면에 상이 형성되는 과정을 개략적으로 나타내고 있다. 시편 내에서 빔줄 그어진 부분의 특정 결정면이 입사 빔에 대하여 Bragg 회절조건을 정확히 만족시키고 결과적으로 발생된 회절 빔이 대물개구에 의하여 차단된다면, 상면에서 형성되는 상에서는 이 부분이 밴드 모양으로 시편의 다른 부분과 구별되는 콘트라스트를 발생시키게 된다. 이처럼 특정 부분의 회절에 의해서 입사 빔에서 빔강도가 감소를 일으켜 발생하는 콘트라스트를 회절콘트라스트 또는 진폭콘트라스트라고 한다.

반면에 후초점면에서의 여러 회절빔들이 대물개구에 의하여 통과되고 상면에서 이들이 재결합을 할 때 위상차이에 의하여 상이 형성되는 양태를 위상콘트라스트라 하며, 이는 시편의 구조를 분석하는 데 유용한 구조상을 형성하는 기본원리가 된다. Fig. 6에서 상형성의 3가지 양태를 나타내고 있다.

시편으로부터 얻을 수 있는 회절상의 유형에는 명시야상, 암시야상, 약암시야상 등이 있다.

명시야상

후초점면에서 대물개구가 전방회절 빔을 통과시키도록, Fig. 6a에서처럼 놓이게 되어 다른 회절 빔들은 차단되게 된다. 이 그림에서 입사전자 빔이 통과하는 시편 내에서 특정 부분이 정확히 Bragg 회절조건을 만족시킨다고 가정하자. 이러한 부분은 다결정에서 특정한 한 입자이거나 또는 얇은 단결정상에서 흔히 목격할 수 있는 국부적인 시편의 구부러짐에 의해 생기는 부분일 수 있다. 이러한 경우에 입사전자 빔 중에서 많은 양의 전자들이 회절되며, 따라서 대물개구에 의해 차단되어, 결과적으로 밝은 바탕 위에 어둡게 콘트라스트가 발생하게 된다. 즉 명시야상이 형성되는 것이다.

암시야상

후초점면에서 대물개구가 Fig. 6b에서 보여 주듯이, 전방회절 빔이 아닌 특정한 한 회절 빔을 통과시켜 상 콘트라스트가 생기는 경우를 암시야상이라 한다. 이러한 유형의 상형성은 후초점면에서 대물개구를 이동시켜 원하는 특정 회절 빔이 대물개구를 통과하게 함으로써 이루어질 수 있다. 이 경우에는 이 회절조건을 만족시키는 부분만이 어두운 바탕 위에서 밝게 나타난다. 즉 암시야상이 생성된다. 어떠한 회절 빔 hkl 도, 단지 시편 stage의 조작에 의하여 회절조건을 만족시킬 수

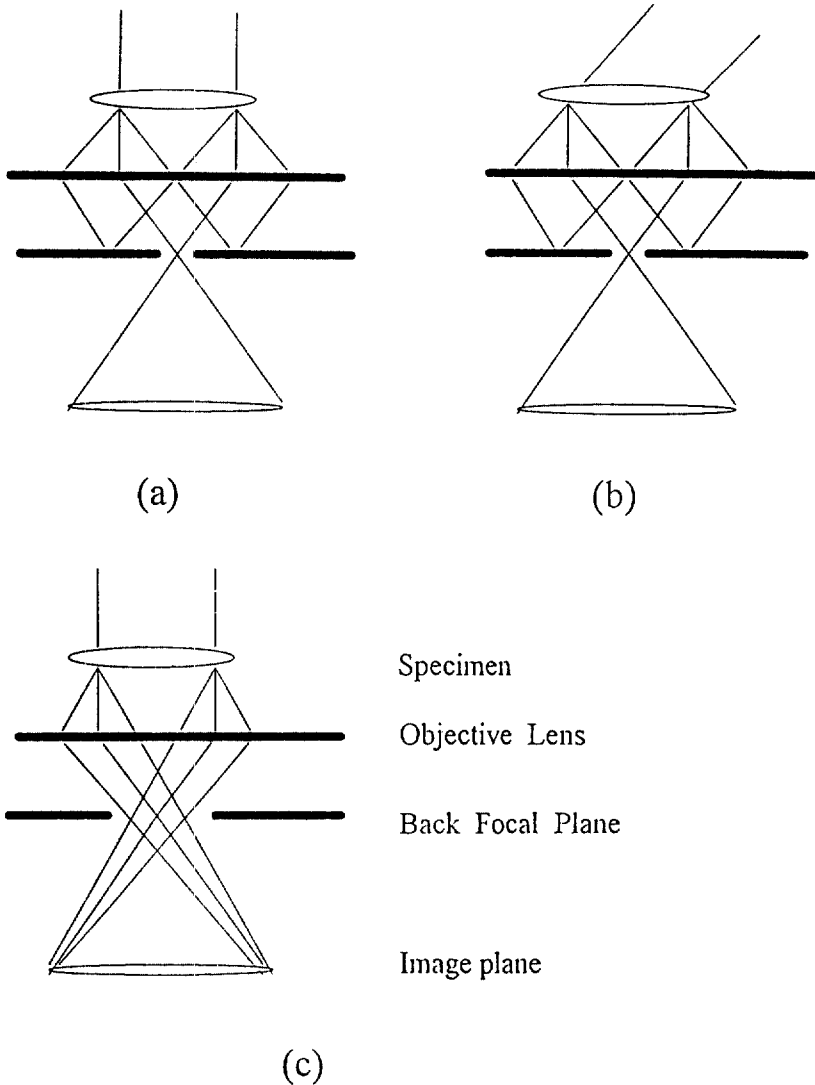


Fig. 6. Ray diagram of imaging methods in TEM. (a) Bright-field imaging, (b) Dark-field imaging, (c) High-resolution imaging.

있다면, 암시야상을 생성시킬 수 있다. 비정질 시편으로부터도 대물개구를 산란 링에 놓음으로써 위와 유사한 암시야상을 만들 수 있으며, 이러한 상의 강도는 일반적으로 낮다.

그러나 대물개구를 움직임으로써 광축에 평행하지 않은 빔이 상형성에 기여하게 되면 렌즈 자체가 갖고 있는 구면수차 때문에 상의 질이 떨어지게 된다. 이를 극복하기 위해서 다소 힘이 들지만 입사빔을 구부려서

(tilt) 통과시키고자 하는 회절 빔이 광축에 평행되게 하여 상형성을 이룰 수 있게 한다. 이 경우에는 상형성 빔이 광축에 평행하므로 상의 질을 유지할 수 있게 된다.

암시야상의 장점 중의 하나는 상형성시(명시야상) 뚜렷이 규명이 되지 않는 결정부류나 방향성을 시편의 나머지 결정부분과 확연히 분별해 낼 수 있다는 점이다. 이러한 결정상으로부터의 상형성에는 앞 절에서 언

급했던 질량 콘트라스트의 영향이 중첩되어 나타남을 고려해야 한다.

4. 결정결함 연구에의 응용

4.1. $\bar{g} \cdot \bar{b}$ 소멸기준

결정격자로 된 시편으로부터 산란 및 회절된 회절 빔의 진폭은 kinematical 조건하에서 Bragg 조건과 시편 내의 격자배열에 의해서 아래와 같이 표현된다.^{1)~4,6~8}

$$\begin{aligned} \Phi_r &= f_r \int \exp[2\pi i(\bar{g} + \bar{s}) \cdot (\bar{r} + \bar{R})] dV \\ &= f_r \int \exp[2\pi i\bar{g} \cdot \bar{R}] \exp[2\pi i\bar{s} \cdot \bar{r}] dV \end{aligned} \quad (8)$$

위 식에서 \bar{R} 은 결정격자 내의 국부적인 원자위치가 완전격자로부터 \bar{R} 만큼 변위를, \bar{s} 는 회절 빔 \bar{g} 가 완전한 Bragg 회절조건으로부터 이탈 정도를 각각 나타낸다. 위의 \bar{R} 벡터와 \bar{s} 값이 특정한 회절 빔의 진폭에 미치는 영향은 실제 결정시편 내의 격자결함 등을 분석하는 데 유용하게 이용될 수 있다. 특히 $2\pi\bar{g} \cdot \bar{R}$ 의 값이 0이 되는 조건을 만족시키는 회절 빔들을 파악함으로써 전위, 적층결함, 계면 등과 같은 격자결함과 상관된 변위벡터 \bar{R} 을 구할 수 있게 되며, 이는 전위 및 면결함 구조분석에 기본적으로 많이 이용된다.

4.2. 약암시아상을 이용한 전위구조연구^{2,10}

결정시편 내에 국부적으로 존재하는 전위나 면결함, 특히 low angle 계면과 연관된 전위 network 등의 Burgers vector 결정에 위의 $\bar{g} \cdot \bar{R}$ 기준을 이용하고자 특정 빔(\bar{g}) 등을 이용하여 두 빔(two beam) 조건하에서 기록된 암시아상에서의 콘트라스트를 얻는다. 이 경우에 결함과 상관된 높은 콘트라스트를 얻는 한 방법으로서 약빔(weak beam)기법을 이용한다.

이 기법은 전방회절전자 빔이 아닌 특정한 회절 빔을 이용하여 상을 얻는다는 데는 암시아상과 같으나, 상형성에 관련한 회절 빔의 회절이탈상수를 특정한 값을 갖도록, 회절조건을 조절하여 원하는 정도의 콘트라스트를 얻을 수 있다. 이 기법은 결정의 국부적인 왜곡에 대하여, 보다 자세한 정보를 얻기 위해서 Cockane 등에 의해서 소개되었으며¹¹, 전위 core 또는 분리(dissociation)에 대한 연구에 진요히 사용될 수 있다.

전위의 약빔상과 연관된 회절과정을 개략적으로

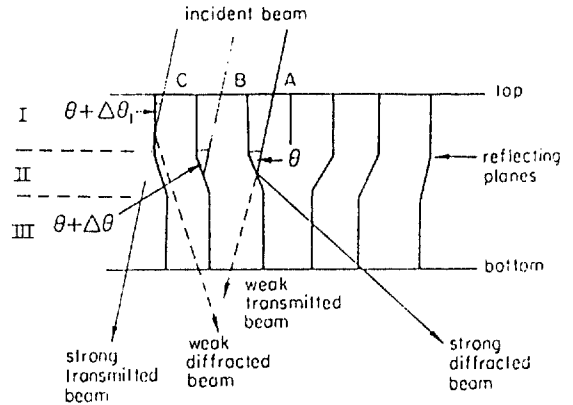


Fig. 7. A schematic diagram indicating that strong diffraction only occurs near the core of a dislocation under overall kinematical diffraction conditions.

Fig. 7에서 보여 주고 있다. 이는 칼날전위의 경우로써 격자면이 I과 III의 level에서는 뒤틀림이 없으나 전위 존재에 의하여 II level에서 격자왜곡이 있다. 입사 전자 빔이 level I과 III의 격자에 대하여는 Bragg 회절 조건으로부터 상당히 이탈된(s 가 큼) 회절조건을 가지나 level II에서는 격자왜곡에 따른 국부적 회절조건이 만족시켜 주는 경우를 가정할 수 있다. 즉 전위 core에 인접한 부분에서의 변형장에 의해 강하게 Bragg 회절($s \ll 1$)이 일어나게 된다. 또한 강한 회절이 전위선의 위나 아래에서 발생하지 않기 때문에 상의 폭은 시편 내의 전위 core의 깊이에 무관하며 약암시아상에서는 검은 바탕에 뚜렷한 하얀 선으로 나타나게 된다. 실험적으로 시편을 tilting함으로써 바탕결정의 회절이탈 상수의 값을 조절할 수 있으므로 원하는 분해능을 갖도록 상의 폭을 조절할 수 있다. 결정결함의 구조분석을 위해서는 위의 회절조건에서 특히 두 빔 회절조건이 될 수 있도록 가능한 한 노력을 해야 할 것이다.

4.3. $\Sigma=1$ 계면에서 격자이동²

$\Sigma=1$ 계면은 계면 양쪽의 입자들의 방향성은 같으나 계면에서 격자이동(rigid-body translation)에 의해 혼히 발생한다. 계면에서의 격자이동(R)은 계면을 경계로 한 두 결정을 통과하는 전자 빔에 위상변화(x)를 초래하며, 특정한 회절 빔(\bar{g})에 대하여 $\alpha=2\pi\bar{g} \cdot \bar{R}$

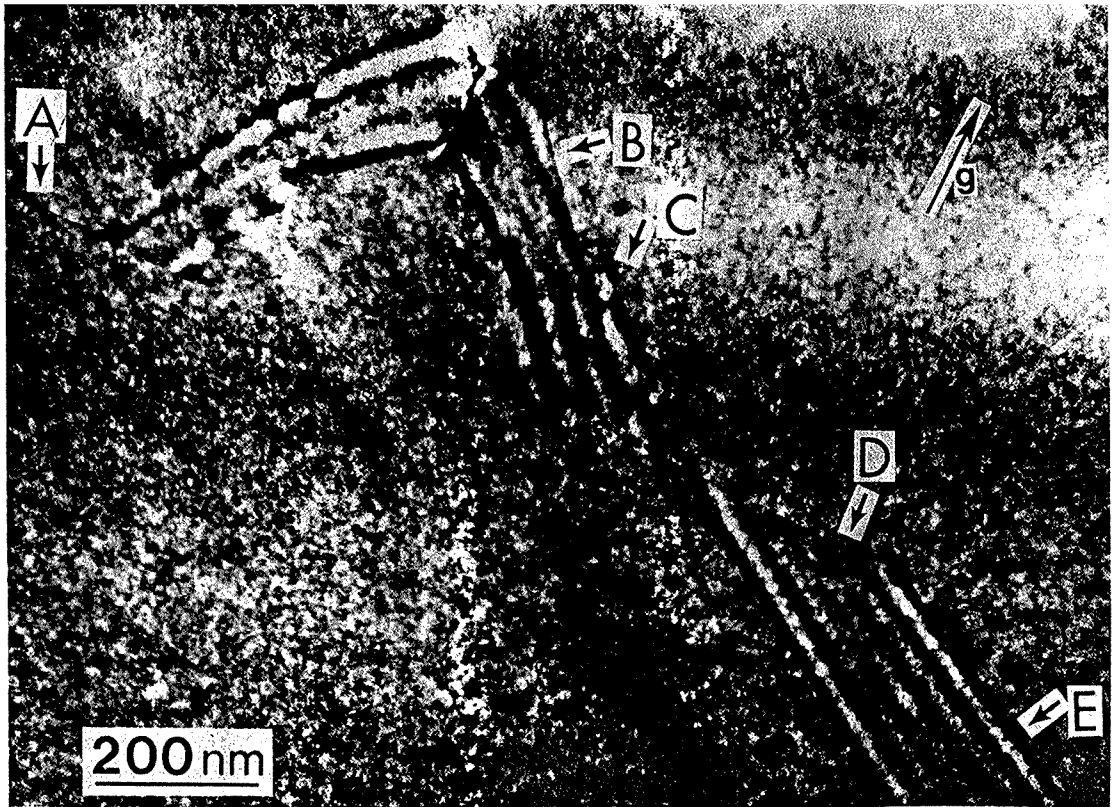


Fig. 8. Bright-field image of a $\Sigma=1$ antiphase boundary. Fringe contrast is shown at the boundaries inclined to the electron beam direction. Well-defined faceting planes are observed at A, B, C, D and E.

을 갖게 한다. 결과적으로 회절콘트라스트에서 입사 전자 빔에 비스듬하게 놓인 계면은 α -줄무늬 콘트라스트를 갖는다(Fig. 8). α 가 작은 값을 갖지만 줄무늬의 강도는 α 에 민감하며 매우 미세한 격자이동도 관측이 가능하며, $\vec{g} \cdot \vec{R}$ 의 콘트라스트 소멸기준에 의하여 비선형적인 두 회절벡터(\vec{g}_1, \vec{g}_2)를 이용하여 이동벡터의 방향을 측정할 수 있다.

격자이동의 정량은 계면이 입사 빔에 평행하게 놓인 조건에서 기록된 고분해전자현미경 사진에서 행해질 수 있으며, 이 경우에는 계면을 중심으로 10 angstrom 이내의 극부적인 계면상이나 계면에서 멀리 떨어진 matrix상의 분석 등을 통하여 그 값을 얻게 된다. 반면에 α -줄무늬의 콘트라스트와 컴퓨터모사에 의한 줄무늬의 비교에 의해서 \vec{R} 의 값을 구할 수 있다.

4. 4. 계면원자구조¹²

구조상(structure image)은 여러 회절 빔들의 재결합에 의해서 상면에서 상이 형성되므로 상은 시편 내의 산란인자의 실제 분포를 나타내며, 현미경과 시편의 특정한 실험조건하에서 시편의 원자배열의 분해연구가 가능하다. 이러한 투과전자현미경 방식을 고분해전자현미경이라 하며 1970년대에 angstrom 단위의 분해능을 갖는 전자현미경의 출현과 더불어 크게 발전하였다. Fig. 9는 GaAs의 tilt 계면으로부터 얻은 고분해전자현미경 사진으로서 밝고 어두운 부분들이 각각 [110] GaAs 투영에서 Ga-As 원자 column과 이들로 둘러싸인 channel에 해당되고 Ga-As 상호위치를 확인하여 실제로 계면에서의 주기적인 원자배열을 규명할 수 있다¹³.

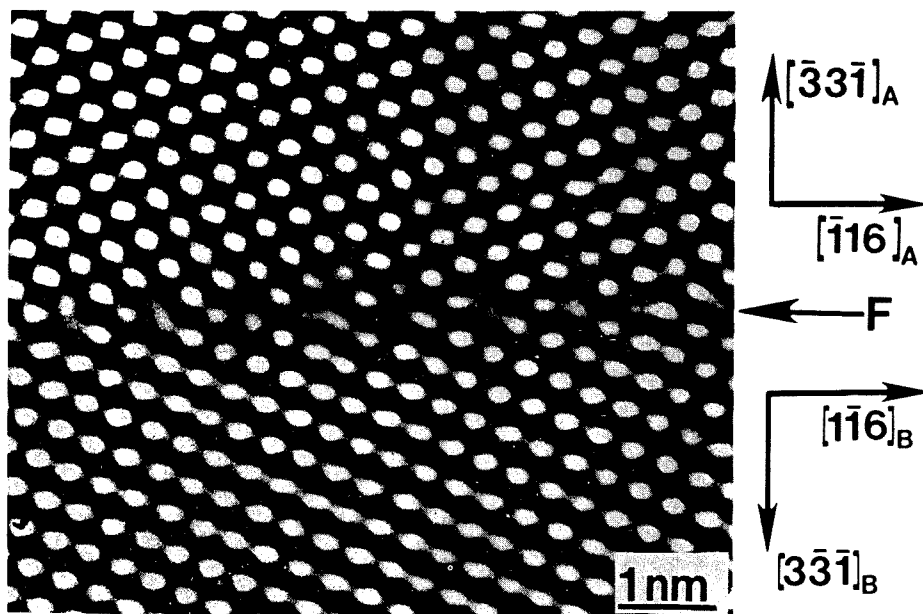


Fig. 9. High-resolution transmission electron micrograph of a $\Sigma=19$ tilt grain boundary in GaAs.

References

1. P. B. Hirsch, A. Howie, R. B. Nichol, D. W. Pashley, and M. J. Whelan, "Electron Microscopy of Thin Crystals" Butterworths, London(1965).
2. J. W. Edington, "Practical Electron Microscopy" Macmillan Press Ltd.(1974).
3. L. Reimer, "Transmission Electron Microscopy" Springer-Verlag Berlin Heidelberg(1984).
4. M. Heimendahl "Electron Microscopy of Materials" Academic press(1980).
5. F. A. Jenkins and M. E. White, "Fundamentals of Optics" McGraw-Hill, New York(1951).
6. R. D. Heidenreich, "Fundamentals of Transmission Electron Microscopy" John Wiley & Sons, Inc., (1964).
7. G. Thomas and M. Goringe, "Transmission Electron Microscopy of Materials" Wiley, New York(1979).
8. P. J. Grundy and G. A. Jones, "Electron Microscopy in the Study of Materials" Edward Arnold Publ., (1976).
9. J. M. Cowley, "Diffraction Physics" North-Holland Publishing Co., NY(1975).
10. D. J. H. Cockayne, in "Diffraction and Imaging Technique in Materials Science" ed. S. Amelinckx, R. Gevers, J. Van Landuyte, p.153, (1978).
11. D. J. H. Cockayne, I. L. F. Ray, and M. J. Whelan, *Phil. Mag.*, **20**, 1265(1969).
12. J. C. H. Spence, "Experimental High Resolution Electron Microscopy" Oxford Univ. Press(1980).
13. N. H. Cho, K. S. Hong, and C. B. Carter, *Analytical Science and Technology*, **5**(1), 121(1992).