碩士學位論文

많은 골짜기 구조를 갖는 물질의 가로 및 세로 자기포논공명 효과에 대한 연구

濟州大學校 大學院

物理學科

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金 志 妍

1997年 12月

많은 골짜기 구조를 갖는 물질의 가로 및 세로 자기포논공명 효과에 대한 연구

指導敎授 柳 在 演

金 志 妍

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

1997년 12월

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金志妍의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長: _____

委 員: _____

委 員: _____

濟州大學校 大學院

1997년 12월

A study of transverse and longitudinal magnetophonon resonances in matters with many-valley structure

Ji-Yon Kim
(Supervised by professor Jai-Yon Ryu)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF NATURAL SCIENCES

DEPARTMEANT OF PHYSICS
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1997 年 12 月

목 차

Summary 1

Ⅰ. 서 론 2

Ⅱ. 계의 모델 4

Ⅲ. 이완율과 자기전도도와의 관계 7

Ⅳ. 결과 및 고찰 11

Ⅴ. 결 론 15

Ⅵ. 참고 문헌 16

Ⅶ. 부 록 25

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Summary

Using the general expression for the nonlinear dc conductivity devloped by Ryu et al, the transverse and longitudinal magnetophonon resonances in semiconductor with many-vally structure such as n-type Ge and n-type Si are investigated for the regions in which intracollisional field effects are not valid. Our results show that resonance peak positions for the intervalley scattering by phonons strongly depend on the difference in the effective mass between the initial and final states, which are same for the longitudinal and transverse configuration. In the case of the magnetic field direction parallel to the <100>, <110>, and <111> direction, it is also shown that the results of n-type Ge and n-type Si for the transverse and longitudinal configuration are in good agreement with the experimental values of some authors in the literature.

제주대학교 중앙도서관

Ⅰ. 서 론

자기포논 공명효과 (magnetophonon resonance effect: MPR effect)는 전자의 이완산란기구 (즉, 에너지 획득과 손실과정), 전자와 포논간의 상호작용에 기인한 자기전도도 진동의 감쇠현상 (Nicholas 1985), 내부 충돌장효과 (Barker 1978), 및 자기전도도 진동의 자기장 역수 (1/B)에 대한 주기성에 관련된 포논 에너지의 결정 (Eaves등 1970)등과 같은 반도체의 수송성질를 조사하는데 유용한 수단으로 사용된다.

많은 골짜기구조를 갖는 물질계인 n형 게르마늄과 n형 실리콘의 자기포논 공명효과에 대한 많은 연구가 이론적 및 실험적 관점에서 이루어졌다 (Nicholas 1985, Eaves 등 1970, Hamaguchi 등 1983, Harper 등 1973, Ridley 1993, Yamada 등 1992, Futagawa 등 1993, Portal 등 1974). 자기포논 공명은 약한 전기장과 강한 자기장하에서 전자와 세로 광성포논과의 상호작용에 의해서 포논의 에너지가 두 Landau에너지 준위 차이의 정수배가 될 때 공명이 일어난다 (Nicholas 1985). n형 게르마늄과 n형 실리콘의 자기포논 공명 스펙트럼은 복잡한 포논분지와 전도전자의 다양한 골짜기간 전이때문에 매우 복잡하게 나타난다 (Portal 등 1974). 게르마늄과 실리콘 등과 같은 많은 골짜기(valley) 구조를 갖는 반도체 물질들은 자기장 방향에 따라 각 골짜기마다 다른 전자의 유효질량을 가지므로 한 골짜기내에서의 자기포논 공명현상과는 달리 유효질량 차이에 기인한 골짜기간 자기포논 공명산란이 일어난다 (Hamaguchi 등 1990).

전류방향과 자기장방향이 동일한 경우에 대응하는 세로 자기전도도에 대한 연구로써, Hamaguchi등 (1983)은 강한 전기장하에서는 X-점 포논 방출에 의한 골짜기간 자기포논 공명현상은 자기장이 36T에서 나타나고, 광학 포논의 방출에 기인한 골짜기내 자기포논 공명현상은 자기장이 45T에서 나타난다고 제시하였다. 또한, 약한 전기장에서는 자기장이 12T와 23T에서 자기전도도의 주기성이 관측되는데, 이들 주기성은 각각 에너지가 115.5K인 골짜기간 X-점 T. A. 포논과 전자와의 산란과정에서 한 개의 포논만 관여하는 단일 포논과정과 두 개의 포논이 관여하는

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2중 포논과정 또는 2차 조화과정에 기인한다는 것을 제시하였다.

또한, 최근에 Futagawa 등 (1993)은 자기장을 n형 게르마늄의 <100>, <110> 및 <111> 방향으로 걸어 골짜기간 세로 자기포논 공명현상을 실험적으로 관측하였다. 자기장이 <100>방향으로 걸리는 경우를 제외한 그들의 결과는 골짜기간 유효질량 차이에 의해서 나타나는 골짜기간 자기포논 공명조건에서 잘 설명이 된다.

전류방향과 자기장방향이 서로 수직인 경우에 대응하는 가로 자기전도도에 대한 연구는 Harper 등 (1973)이 자기장을 n형 게르마늄의 <100>와 <110>방향으로 걸어 실험적으로 관측하였고, Eaves 등 (1970)은 자기장을 n형 게르마늄의 <100>와 <111>방향으로 걸어 자기포논 공명현상을 실험적으로 관측한 바 있다. 또한, 최근에 Ridley (Ridley 1993)는 자기장이 n형 게르마늄의 <100>방향으로 걸릴때 가로 자기전도도가 자기장의 함수로 진동하는 것을 관측하여 자기포논 공명현상을 설명하였다.

한편, n형 실리콘의 자기포논 공명효과에 대한 연구로는 Yamada 등 (1990)이 격자온도 80K에서 자기장을 <100>와 <110>방향으로 걸어 세로 자기전도도를 측정하여 골짜기간 자기포논 공명현상을 관측하였다. 그들은 실험결과를 설명하기 위하여 기본 자기장 B_F 를 도입하였고, 전자와 포논과의 골짜기간 산란이 서로 평행한 g-전이와 서로 수직한 f-전이에 의한 현상으로 설명한 바 있다. 그러나 n형 실리콘의 가로 자기전도도에 대한 연구는 현재까지 이루어지지 않는 상태이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

본 연구에서는 강한 전기장에서의 양자 수송이론 (Ryu 등 1991)을 토대로 하여, n형 게르마늄이나 n형 실리콘과 같은 많은 골짜기구조를 갖는 물질계에 적용할 수 있는 자기포논 공명이론을 도출하여 이 결과를 n형 게르마늄과 n형 실리콘에 적용하고자 한다. Ⅱ장에서는 계의 모델을 기술하고, Ⅲ장에서는 양자 수송이론에서 얻은 결과로부터 이완율과 세로와 가로 자기전도도를 구한다. Ⅳ장에서는 Ⅲ장에서 주어진 자기포논 공명조건을 사용하여 n형 게르마늄과 n형 실리콘에 자기장이 <100>, <110>와 <111>방향으로 걸리는 경우에 대한 공명현상을 조사하고 실험결과와 비교검토하고, Ⅴ장에서는 결론을 맺고자 한다.

Ⅱ. 계의 모델

결정 고체내에서 포논장과 상호작용하는 전자계의 전체 해밀토니안 (H)은

$$H = H_E + H_{ph} + H_{e-ph} \tag{2.1}$$

$$H_E = \sum_{\alpha}\sum_{\alpha'} \langle \alpha \mid h_e \mid \alpha' \rangle a_{\alpha}^{\dagger} a_{\alpha'} \tag{2.2}$$

$$H_{ph} = \sum_{q} \hbar \omega_q (b_q^{\dagger} b_q + 1/2) \tag{2.3}$$

$$H_{e-ph} = \sum_{q}\sum_{\alpha\alpha'} [\langle \alpha \mid \gamma_q \mid \alpha' \rangle b_q + [\langle \alpha \mid \gamma_q^{+} \mid \alpha' \rangle b_q^{+}] a_{\alpha}^{\dagger} a_{\alpha'} \tag{2.4}$$

와 같이 주어진다. 이때 H_E 와 h_e 는 각각 다전자계의 해밀토니안과 단일전자 해밀토니안을 나타내고, α 는 단일전자의 고유상태에 관련된 양자수이며, $a_{\alpha}^{\dagger}(a_{\alpha})$는 전자의 생성(소멸)연산자이다. 또한, H_{ph} 와 H_{e-ph} 는 각각 포논 해밀토니안과 전자와 포논간의 상호작용 퍼텐셜에 대응하는 해밀토니안이고, $\gamma_q(\equiv C(q)\exp(i\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{r}))$는 포논의 종류에 관계되는 상호작용 연산자이고 $C(\boldsymbol{q})$는 전자와 포논간의 상호작용 퍼텐셜이다. 그리고 $b_q^{\dagger}(b_q)$는 각각 운동량이 $\hbar\boldsymbol{q}$, 에너지가 $\hbar\omega_q$ 인 포논의 생성(소멸)연산자이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

좌표계를 타원체 에너지 표면의 장축과 평행하게 z 축을 취하고, z 축에 각 θ 만큼 경사진 정자기장 $B = B(\sin\theta, 0, \cos\theta)$과 균일한 외부전기장이 작용할 때 단일 전자 해밀토니안은

$$h_e = \frac{1}{2}(\boldsymbol{P} + e\boldsymbol{A}) \begin{pmatrix} \frac{1}{m_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_l} \end{pmatrix} (\boldsymbol{P} + e\boldsymbol{A}) \tag{2.5}$$

로 주어진다. 여기서 $\boldsymbol{A}$는 벡터퍼텐셜이고, $\boldsymbol{P}$는 운동량 연산자이며, m_t와 m_l은

각각 전도대의 타원체 에너지면에 대한 세로와 가로 유효질량 성분을 나타낸다. 백터퍼텐셜에 대한 Landau gauge를 $A = B(-y\cos\theta, 0, y\sin\theta)$로 택하고, 전도대내의 s골짜기에 대한 단일 전자의 규격화된 고유함수와 에너지 고유치를 각각 구하면

$$\langle r|\lambda s\rangle = \langle r\ |N, k_x, k_z, s\rangle = U^s(r)F_\lambda(r) \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_\lambda^s = (N+\frac{1}{2})\hbar\omega_s + \frac{\hbar^2}{2m_B^s}\left(\frac{k\cdot B}{B}\right)^2 \tag{2.7}$$

을 얻을 수 있다. 여기서 N(=0,1,2,...)와 s는 각각 Landau준위 지수와 전도대 골짜기의 지수를 나타내고,

$$y_\lambda^s = \frac{\hbar}{eBm_B^s}(-m_l k_x\cos\theta + m_t k_z\sin\theta) \tag{2.8}$$

k_x와 k_z는 각각 x와 z방향의 전자 파수벡터 성분이다. 식 (2.6)에서 $U^s(r)$은 s골짜기의 Bloch 함수이며, 포락함수(enlope function) $F_\lambda(r)$은

$$F_\lambda(r) = \frac{1}{L_xL_z}\Phi_N(y-y_\lambda^s)\exp(ik_xx+ik_zz) \tag{2.9}$$

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

로 주어진다. 또한, 식 (2.7)에 있는 $\omega_s(=eB/m_s^*)$는 사이클로트론 진동수를 의미하고, m_B^s는 자기장 방향의 유효질량을 나타낸다. 이때 m_s^*와 m_B^s는

$$\frac{1}{m_s^{*2}} = \frac{\cos^2\theta}{m_t^2} + \frac{\sin^2\theta}{m_tm_l} \tag{2.10}$$

$$m_B^s = m_l\cos^2\theta + m_t\sin^2\theta \tag{2.11}$$

로 주어진다. 식 (2.9)의 $\Phi_N(y)$는 조화진동자의 고유함수이고, L_x와 L_z는 각각 x와 z방향의 규격화된 길이이다. Bloch함수의 세포 주기부분은 전자의 파수벡터 k와 자기장 B의 세기에 무관하다고 가정하면 $U^s(r)$은 단위세포로 규격화되고,

반면에 $F_\lambda(\boldsymbol{r})$은 결정에서 규격화된다.

$$\int_C U^{s*}(\boldsymbol{r})U^{s'}(\boldsymbol{r})d^3r = \delta_{s,s'} \tag{2.12}$$

$$\int_\Omega F^*_\lambda(\boldsymbol{r})F_{\lambda'}(\boldsymbol{r})d^3r = \delta_{\lambda,\lambda'}\delta_{N,N}\delta_{k_x,k_x}\delta_{k_z,k_z} \tag{2.13}$$

여기서 C는 단위세포의 체적이고 $\Omega\ (=L_xL_yL_z)$는 실공간에서 결정의 체적을 의미한다. 식 (2.7)과 식 (2.9)로부터 방향에 따라 에너지 준위가 달라지게되고 전자의 궤도중심이 이동함을 볼 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅲ. 이완율과 자기전도도와의 관계

세로와 가로 자기전도도를 구하기 위해서 류 등 (1991)이 구한 직류 비선형 전기전도도 $\sigma_{kl}(E)(k, l=x, y, z)$의 일반식에 내부 충돌장효과를 무시하고 식 (2.6)과 식 (2.7)을 이용하면 다음과 같이 세로와 가로 자기전도도를 얻을 수 있다.

$$\sigma_{kl} \cong \frac{\hbar}{\Omega} \sum_{\lambda s} \sum_{\lambda' s'} \langle \lambda s | j_l | \lambda' s' \rangle \langle \lambda' s' | j_k | \lambda s \rangle \frac{f(\varepsilon_\lambda^s) - f(\varepsilon_{\lambda'}^{s'})}{\varepsilon_\lambda^s - \varepsilon_{\lambda'}^{s'}} A_{\lambda' s', \lambda s} \tag{3.1}$$

$$A_{\lambda' s', \lambda s}(E) = \frac{\Gamma_{\lambda' s', \lambda s}}{(\varepsilon_\lambda^s - \varepsilon_{\lambda'}^{s'} - \triangle_{\lambda' s', \lambda s})^2 + \Gamma_{\lambda' s', \lambda s}^2} \tag{3.2}$$

여기서 세로 자기전도도에 대해서는 $l=x, k=z$이고, 가로 자기전도도에 대해서는 $l=k=y$이다. 또한, 식 (3.1)에서 j_k는 k성분을 갖는 단일 전자 전류밀도 연산자이고, $f(\varepsilon_\lambda^s)$는 에너지 ε_λ^s를 갖는 s골짜기에서의 Fermi-Dirac분포함수이며, $\triangle_{\lambda' s', \lambda s}$와 $\Gamma_{\lambda' s', \lambda s}$는 각각 $|\lambda s\rangle$와 $|\lambda' s'\rangle$상태사이 전자와 포논의 상호작용에 의해서 나타나는 선이동과 이완율를 나타낸다.

식 (3.1)에 주어진 단일 전자 전류밀도 연산자의 행렬요소는 식 (2.6)와 식 (2.9)을 사용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \lambda s \mid j_l \mid \lambda' s' \rangle &= \langle N, k_x, k_z, s \mid \left(-\frac{e}{m_t} \right) P_l \mid N, k_x, k_z, s \rangle \\ &= \delta_{ss'} \langle \lambda \mid \left(-\frac{e}{m_t} \right) P_y \mid \lambda' \rangle + \delta_{\lambda\lambda'} \langle s \mid \left(-\frac{e}{m_t} \right) P_y \mid s' \rangle \end{aligned} \tag{3.3}$$

여기서 Kronecker기호는 선택규칙을 나타내므로 식 (3.3)의 오른쪽 첫 번째 항은 전자의 골짜기내 전이에 대한 선택률을 나타내고, 두번째 항은 골짜기간 전이에 대한 선택률을 나타낸다. 식 (3.3)을 유도하기 위하여 포락함수는 세포 주기함수와 비교하여 천천히 변한다는 가정을 하였다. 여기서 골짜기간 전이만 고려하면,

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

식 (3.1)의 단일 전자 전류밀도 연산자의 행렬요소는

$$\langle \lambda s|j_l|\lambda' s'\rangle\langle \lambda' s'|j_k|\lambda s\rangle = S_{lk}(s,s')\,\delta_{\lambda\lambda'} \tag{3.4}$$

$$S_{lk}(s,s') = \langle s|j_l|s'\rangle\langle s'|j_k|s\rangle \tag{3.5}$$

과 같이 표현할 수 있고 세로와 가로 자기전도도는 식 (3.1), 식 (3.4) 및 식 (3.5)로부터

$$\sigma_{kl} \cong \frac{\hbar}{\Omega}\sum_{\lambda}\sum_{ss'} S_{lk}(s,s')\frac{f(\varepsilon_\lambda^s) - f(\varepsilon_{\lambda'}^{s'})}{(\varepsilon_\lambda^s - \varepsilon_{\lambda'}^{s'})^3}\,\Gamma_{\lambda' s',\lambda s} \tag{3.6}$$

와 같이 간단한 형태로 쓸 수 있다. 식 (3.6)을 얻기 위해서 s골짜기의 Landau 에너지와 s'골짜기의 Landau 에너지준위 사이의 차이가 전자와 포논의 상호작용으로 나타나는 선이동보다도 크다는 가정을 하였다. 이러한 가정은 자기포논 공명현상을 관찰하기 위한 조건으로 작용한다.

산란과정에 대한 1차 Born 근사로부터, $|\lambda s\rangle$와 $|\lambda' s'\rangle$상태사이의 전이에 관련된 이완율 Γ의 행렬성분은 일반적으로

$$\Gamma_{\lambda' s',\lambda s} = \pi\sum_q [(N_q+1)M_+ + N_q M_-] \tag{3.7}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

로 주어진다(Ryu 등 1991, Suzuki 1992). 여기서 N_q 는 에너지 $\hbar\omega_q$를 갖는 포논에 대한 Bose-Einstein분포함수이고, M_+와 M_-는 각각

$$M_+ = \sum_{\lambda_1 s_1} [|\langle \lambda s'|\gamma_q|\lambda_1 s_1\rangle|^2\,\delta(\varepsilon_{\lambda_1}^{s_1} - \varepsilon_\lambda^s + \hbar\omega_q)$$
$$+ |\langle \lambda_1 s_1|\gamma_q^+|\lambda s\rangle|^2\,\delta(\varepsilon_{\lambda_1}^{s_1} - \varepsilon_\lambda^s + \hbar\omega_q)]$$
$$M_- = \sum_{\lambda_1 s_1} [|\langle \lambda s'|\gamma_q^+|\lambda_1 s_1\rangle|^2\,\delta(\varepsilon_{\lambda_1}^{s_1} - \varepsilon_\lambda^s - \hbar\omega_q)$$
$$+ |\langle \lambda_1 s_1|\gamma_q|\lambda s\rangle|^2\,\delta(\varepsilon_{\lambda_1}^{s_1} - \varepsilon_\lambda^s - \hbar\omega_q)] \tag{3.8}$$

로 주어지고 이것들은 각각 포논의 방출과 흡수과정에 대응하는 물리량이다. 이때

γ_q 는 식 (2.4)에서 주어진 전자와 포논간의 상호작용 연산자이다. 식 (3.8)의 $\sum'$ 는 γ_q의 대각성분을 제외한다는 것을 나타낸 것이고, $\sum_{\lambda S}$는 s골짜기의 3중합기호 $\sum_{\lambda}\sum_{k_x}\sum_{k_z}$를 의미한다. 또한 식 (3.8)의 이완율에 포함되어 있는 δ-함수는 단일 포논의 충돌 (흡수 또는 방출)과정에 대한 에너지 보존을 나타내는 것으로, 전자가 한 양자상태에서 다른 양자상태로 전이가 일어날 때의 포논에너지 흡수 또는 방출을 한다는 것을 의미한다. 따라서 자기포논 공명은 이러한 조건에서 발생하게 된다. 식 (2.6)을 사용하여 식 (3.8)에서 주어진 전자와 포논사이의 상호작용 연산자의 행렬요소를 구하면

$$|\langle \lambda s|\gamma_q|\lambda' s'\rangle|^2 \simeq \begin{cases} |C(q)|^2 K(N,N',u)\delta_{k_x,k_x'+q_x}\delta_{k_z,k_z'+q_z} & (\text{골짜기내 산란}) \\ |C(q)|^2 F_{\lambda s,\lambda' s'}(q) & (\text{골짜기간 산란}) \end{cases} \tag{3.9}$$

$$K(N,N',u) = \frac{N_n!}{N_m!}\exp(-u)u^{N_m-N_n}[L_{N_n}^{(N_m-N_n)}(u)]^2 \tag{3.10}$$

$$F_{\lambda s,\lambda' s'}(q) = |\langle \lambda s|\exp(iq\cdot r)|\lambda' s'\rangle|^2 \tag{3.11}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$u = \left(\frac{l_B^2}{2}\right)\left[q_y^2 + \left(\frac{m_t}{m_s^* m_B^s}\right)^2 (m_t q_z \sin\theta - m_t q_x \cos\theta)^2\right] \tag{3.12}$$

로 주어진다. 여기서 $N_n = Min(N,N')$, $N_m = Max(N,N')$이고 $L_m^{(n)}$는 연관된 Laguerre 다항식이다. 식 (2.7), 식 (3.8) 및 식 (3.9)을 사용하면 골짜기내 산란과 골짜기간 산란에 대하여 다음과 같이 보다 간단한 표현을 얻을 수 있다.

$$M_i^{intra} \approx \left(\frac{2}{\hbar}\right)|C(q)|^2 \sum_{p=1}|J_{NN\mp P}(u)|^2 \delta(P\omega_s - \omega_q) \tag{3.13}$$

$$M_i^{inter} \approx 2|C(q)|^2 \sum_{s'\neq s}\sum_{\lambda}|F_{\lambda S,\lambda' S'}(q)|^2 \delta\left[(N'+\frac{1}{2})\hbar\omega_{s'} - (N+\frac{1}{2})\hbar\omega_s \pm \hbar\omega_q\right] \tag{3.14}$$

여기서 P는 상수이고, δ -함수내의 $\pm$기호는 포논방출과 흡수과정을 의미한다. 식 (3.13)과 식 (3.14)를 얻기 위해서 다음과 같은 근사

$$\delta(x+a) = \sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\left(\frac{a}{x}\right)^n\delta(x) \approx \delta(x) \qquad (x \gg a\text{일 때}) \tag{3.15}$$

를 사용하였다. 그러므로 이완율(또는 자기전도도)는 식 (3.6), 식 (3.7), 식 (3.13), 및 식 (3.14)로부터 다음과 같은 자기포논 공명조건을 얻을 수 있다.

$$P\omega_s = \omega_q \qquad \text{(골짜기내 산란)} \tag{3.16}$$

$$(N'+\frac{1}{2})\hbar\omega_{s'} = (N+\frac{1}{2})\hbar\omega_s \pm \hbar\omega_q \qquad \text{(골짜기간 산란)} \tag{3.17}$$

식 (3.16)은 두 골짜기간의 전이에서 유효질량이 동일한 경우에 해당되는 자기포논 공명조건을 나타내고, 식 (3.17)내의 포함된 $\omega_s(=eB/m_s^*)$에서 볼 수 있는 것처럼, 식 (3.17)은 골짜기간의 전이에 대한 처음과 나중 상태사이의 유효질량이 다른 경우의 자기포논 공명조건을 나타낸다. 위의 두 식은 가로와 세로 자기전도도에서 동일한 공명조건을 갖는다는 것을 주목하여야 한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅳ. 결과 및 고찰

이 장에서는 식 (3.16)과 식 (3.17)을 이용하여 n형 게르마늄과 n형 실리콘에 대한 세로와 가로 자기포논 공명정점 위치를 얻고 실험결과와 비교하였다.

n형 게르마늄의 전자는 운동량 보존과 에너지 보존에 의해서 골짜기내 산란과 골짜기간 산란에 각각 관련되는 Γ점과 X점에 있는 포논과의 상호작용만 허용하므로 (Payne, 1965), 가능한 포논은 Γ점[$LO-TO(37.7meV)$], X_4점 [$TO(34.2meV)$], X_3점[$TA(9.93meV)$], 그리고 X_1점[$LA-LO(29.8meV)$]이다. (Nilson과 Nelin, 1971, 부록3 참조). 이러한 가능한 포논을 사용하여 n형 게르마늄에 대한 가로 자기포논 공명현상은 그림 1, 그림 2와 그림 3에서 자기장의 함수로 나타내었다.

그림 1은 자기장 방향이 B//<100>일 때, 처음과 나중 골짜기에서 전자의 유효질량 m_s^*가 모두 동일한 0.135 m으로 주어지는 경우에 대한 가로 자기포논 공명정점 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 초기 골짜기에서 있는 전자의 Landau에너지 준위지수에 따라 에너지를 자기장 함수로 나타낸 것이고, 파선(dashed line)과 짧은 점선(dotted line)들은 각각 X_4점과 Γ점에서의 포논에 관련하여 전자가 포논을 방출하여 나중 골짜기로 전이했을 때의 Landau에너지 준위지수에 따른 에너지를 자기장 함수로 나타낸 것이다. 실선과 점선의 교차점은 자기포논 공명이 나타나는 정점 위치를 나타낸다. 그리고 원과 사각형으로 표시된 것은 각각 Harper 등의 실험결과 (Harper 등 1973)와 Eaves 등의 실험결과 (Eaves 등 1970)이다. 선들이 교차하는 점은 이론적으로 가능한 모든 공명정점을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 이들의 실험결과는 이론적으로 가능한 공명정점의 일부에서 나타나는 것을 알 수 있고 이론적인 결과와는 좋은 일치를 보여주고 있다.

그림 2는 자기장의 방향이 B//<110>일 때의 가로 자기포논 공명정점 위치를 나타낸 것이다. 이러한 경우에서는 초기 골짜기의 전자의 유효질량 m_{si}^*은 0.099 m

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이고, 나중 골짜기에서의 전자의 유효질량 m_{sf}^{*}가 0.36 m으로 주어진다. 그림에서 나타낸 실선과 점선은 그림 1에서 설명한 것과 동일하고, 원은 Harper의 실험결과 (1973)를 표시하였다. 또한, 자기장의 방향이 B//<111>일 때의 결과는 그림 3에 나타내었다. 이런 경우에는 초기 골짜기에서의 전자의 유효질량 m_{si}^{*}은 0.082 m이고, 나중 골짜기에서의 전자의 유효질량 m_{sf}^{*}은 0.207 m이다. 여기서 실선은 그림 1에서 설명한 것과 동일한 것이고 점선은 X_4점에 대응하는 것이며, 사각형은 Eaves의 실험결과 (1970)이다. 그림에서 보는 바와 같이, 자기포논 공명정점 위치는 결정축에 대해서 자기장 방향에 따라 변함을 알 수 있다. 또한, 이론적 결과는 Eaves (1970)와 Harper (1973)의 실험결과와 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

자기장이 n형 게르마늄의 <100>, <110>와 <111>의 방향으로 걸리는 경우에 대한 세로 자기포논 공명현상을 각각 그림 4, 그림 5 및 그림 6에 나타내었다.

그림 4는 자기장 방향이 B//<100>인 경우로써, 그림에 나타낸 조건은 그림 1에서와 동일하고, 파선과 짧은 점으로 이루어진 선(dash-dotted line), 파선(dashed line), 그리고 짧은 점으로 이루어진 선(dotted line)은 각각 X_3점, X_1점, 및 Γ점에 대응하는 것이며 삼각형은 Hamaguchi 등의 실험결과 (Hamaguchi 등 1983)를 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이, 이론적 결과는 단일 포논 과정에 의한 36T, 45T와 12T의 주기를 갖는 Hamaguchi 등의 실험결과와 일치하지만 공명현상이 일어나지 않는 Futagawa의 실험결과와는 다르다는 것을 알 수 있다. 공명현상이 일어나지 않는 Futagawa의 실험결과에 대한 원인은 아직까지 명확하게 이해되지 않는 부분으로 이에 대한 더 많은 연구가 이루어져야 한다고 생각한다.

그림 5는 자기장 방향이 B//<110>일 때의 세로 자기포논 공명정점 위치를 나타낸 것이다. 여기서 사용된 조건은 그림 2와 동일하며 점선은 그림 4와 동일하고, 사각형은 Futagawa 등의 실험결과를, 원은 Yamada 실험결과를 표시하였다. 또한 그림 6에서는 자기장 방향이 B//<111>일 때의 세로 자기포논 공명정점 위치를 나타낸 것이다. 여기서 사용된 모든 조건은 그림 3과 동일하고, 점선은 그림 4와 동일한 것이고 사각형은 Fudakawa 등의 실험결과를 나타내었다. B//<110>에 대한

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

결과는 Yamada 등 (1992)의 실험 결과와 Futagawa 등 (1993)의 실험결과와 일치하며, B//<111>에 대한 결과는 Futagawa 등의 실험결과와 일치한다는 것을 알 수 있다.

n형 실리콘은 운동량과 에너지 보존법칙에 의해 g-전이와 f-전이가 가능하므로, 포논에 대한 분산관계식에서 에너지를 구할 수 있다. g-전이에 대해 포논이 가능한 에너지 $\hbar\omega_q$ 는 11.62meV, 18.41meV, 62.18meV와 62.86meV이고, f-전이에 대해서는 18.5meV, 23.8meV, 43.8meV, 49.61meV, 57.22meV와 59.3meV이 된다. Yamada 등의 실험결과 및 이론 결과와 가능한 포논에너지를 토대로 식 (3.16)과 식 (3.17)을 사용하여 세로 자기포논 공명정점 위치를 표 1과 2에 나타내었다. 표 1에서 Yamada드의 이론결과는 자기장 방향이 B//<100>일 때, 기본 자기장 B_{FM} 이 82T이며, 처음 골짜기에서 전자의 유효질량 m_{c1} 이 0.425 m이고 나중 골짜기에서 유효질량 m_{c2} 이 0.2 m인 것을 나타낸 것이다. 그리고 표 2는 자기장의 방향이 B//<110>일 때, 기본 자기장 B_{FN} 은 106T이며 초기 골짜기의 전자의 유효질량 m_{c1} 이 0.255 m이고, 나중 골짜기에서 전자의 유효질량 m_{c2} 이 0.425 m으로 주어질 때를 나타낸 것이다. 여기서 B_{exp} 와 B_{theory} 는 각각 Yamada 등의 실험 및 이론결과를 나타내고 B_{our} 는 본 논문에서 제시된 이론결과의 공명자기장을 나타낸다. Yamada 등 (1992)은 자기장 방향이 B//<100>와 B//<110>에 대한 그들의 실험결과를 설명하기 위하여 기본 자기장 B_F 를 도입하여 실험값과 일치하는 전이과정과 이론적인 결과를 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이, 82T와 106T에서 Yamada 등 (1992)이 도입한 기본 자기장 B_F 을 사용하여 구한 포논에너지는 각각 47.49meV와 48.15meV인데, 이것은 분산관계식에서 나타나는 포논에너지와 차이가 있다는 것을 주목하여야 하여야 한다. 그 결과, 전이에 관여하는 Landau에너지 준위가 Yamada 등 (1992)이 제시한 결과와 운동량과 에너지 보존법칙을 사용하여 구한 본 논문의 결과와는 다소 차이가 남을 알 수 있다. Yamada 등이 제시한 이론결과가 그들의 실험결과와 잘 일치를 한다고 할지라도 기본 자기장의 도입에 따른 포논에너지가 운동량 및 에너지 보존법칙에 의해서 구한 포논에

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

너지와는 다르므로, Yamada 등 (1992)이 제시한 기본 자기장을 도입하여 설명하는 방법보다는 본 논문에서 제시된 분산관계식으로부터 자기포논 정점을 조사하는 것이 보다 더 타당하다고 생각된다. 그리고 실험결과와 제시된 결과사이에 약간의 차이가 발생하는데, 그 이유는 식 (3.8)에서 $x \gg a$일 때, $\delta(x+a) \approx \delta(x)$ 근사를 사용한 결과로 추정된다. 그러나, 이것에 대한 좀 더 상세한 연구가 이루어져야 한다고 판단된다. 제시된 이론결과식에서 가로 자기포논 공명정점의 위치와 세로 자기포논 공명위치가 동일하므로 가로 자기포논 공명정점의 위치를 예측하는 것이 가능하지만 이러한 현상에 대한 실험이 지금까지 이루어지지 않은 관계로 직접적인 비교는 할 수 없는 상태이다. 그러므로 이것에 대한 보다 많은 실험이 요구된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

V. 결 론

본 논문에서는 류 등(1991)이 제시한 강한 전기장에서의 양자 수송이론을 토대로, 내부 충돌장 효과를 무시한 경우, n형 게르마늄이나 n형 실리콘과 같은 많은 골짜기구조를 갖는 물질계에 적용할 수 있는 자기포논 공명이론을 제시하고 주어진 자기포논 공명조건을 얻었다. 이러한 공명조건은 가로와 세로 자기전도도에서 동일하게 일어난다는 것을 알 수 있었다. 또한, 이 결과를 사용하여 자기장이 n형 게르마늄의 <100>, <110>와 <111>방향으로 걸리는 경우에 대한 가로와 세로 자기포논 공명정점 위치를 구하고, 기존의 실험결과와 비교하였다. 가로 자기포논 공명정점에 대해서는 기존에 보고된 Harper 등의 실험결과와 Eaves 등의 실험결과를 사용하여 비교하였다. 세로 자기포논 공명정점에 대해서는 Hamaguchi 등의 실험결과와 Futagawa의 실험결과를 사용하여 비교하였고, 이론결과와 기존의 실험결과가 잘 일치하였다. 그러나 자기장이 <100>으로 걸릴 때만 Futagawa의 실험결과와 다르다는 것을 알 수 있다. 공명현상이 일어나지 않는 Futagawa의 실험결과에 대한 원인은 아직까지 명확하게 이해되지 않는 부분으로 이에 대한 더 많은 연구가 이루어져야 한다. n형 실리콘에 있어서는 자기장이 <100>와 <110>방향으로 걸릴 때의 세로 자기포논 공명정점 위치를 구하고 기존에 보고된 Yamada 등의 이론 및 실험결과와 비교하였다. 그 결과, n형 게르마늄과 n형 실리콘 등의 많은 골짜기 구조를 갖는 물질에서의 자기포논 공명정점에 대한 이론결과는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. n형 실리콘에 있어서 가로 자기포논 공명정점에 대해서는 실험결과가 부족하여 비교할 수 없었지만, 공명정점 위치를 이론결과로부터 예측이 가능하리라 생각한다.

제주대학교 중앙도서관

Ⅵ. 참고 문헌

Barker, J. R., 1973. ***J. Phys.C* 6**, 2663 ; 1978. Solid State Electron.**21**, 197.

Eaves, L., R. A. Stradling and R. A. Wood, 1970. Proc. X Int.Cont.Phys. Semicond., Cambridge, p 818 ; L. Eaves, R. A. Stradling, R. J. Tidley, J. C. Portal and S. Askenazy, 1975. ***J. Phys. C* 8**, 1034.

Futagawa, H., K. Yamada, N. Kamata, A, Kowata and C. Hamaguchi, N. Miura, 1993. ***J. Phys. Soc. Jpn.,* 62**,4407.

Gradshteyn, I. S and I. M. Ryzhik, 1965. Table of Integrals, Series, and Products (Academic,New York).

Hamaguchi, C., N.Mori, 1990, ***Physica B* 45**, 4536.

Hamaguchi, C., Y. Hirose, and K. Shimomae, 1983. Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, Proceedings of the International Symposium, G.Landwehr(Ed.) p423.

Harper, P. G., J. W. Hodby, and R. A Stradling, 1973. ***Rep. Progr. Phys.* 37**, 1.

Nicholas, R. J., 1985. ***J. Prog. Quant. Electro.* 10**, 1.

Nilsson , G and G. Nelin, 1971. ***Phys. Rev. B* 3**, 364.

Payne, R. T., 1965. ***Phys. Reb. 139,*** A 570.

Portal, J. C., L. Eaves, S. Askenazy and R. A. Stradling, 1974. ***Solid State Commun. 14***, 1241.

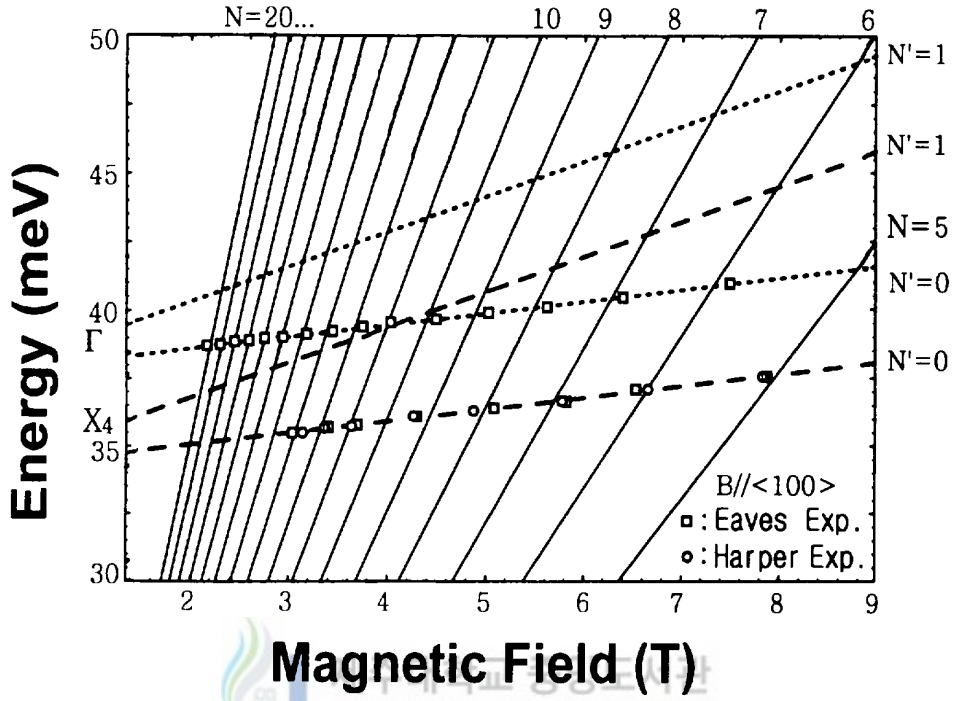
Ridly,B. K., 1993. Quantum Processes in Semiconductors, Claredon Press, Oxford, p.316.

Ryu, J. Y and S. D. Choi, 1991. ***Phys. Rev. B* 44**, 11328.

Suzuki, A., 1992. ***Phys. Rev. B* 45**, 6731.

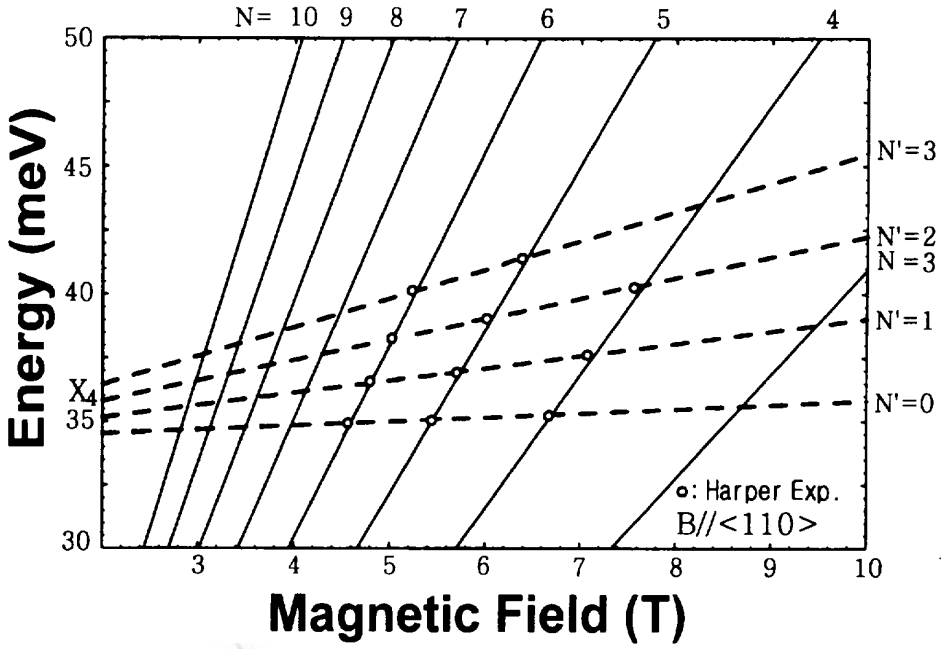
Yamada, K., N. Miura, N. Kamata and H. Futagawa, 1992. ***Phsica B* 177**, 461.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



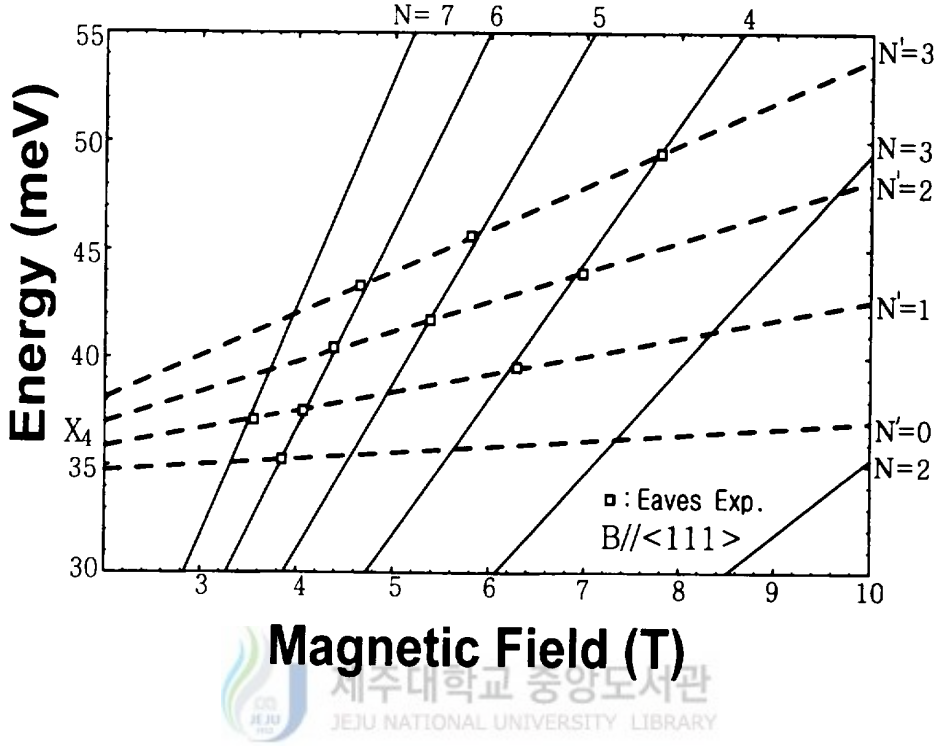
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.1. Energy diagrams of n-Ge in the transverse configuration are plotted as a function of magnetic field for B//<100>. The dashed and dotted lines are for X_4-point and Γ-point, respectively. The quantum number of the Landau level for $m_s^* = 0.135m$ is indicated for each line. The circles and the squares represent the experimental values of Harper et al. and Eaves et al., respectively.



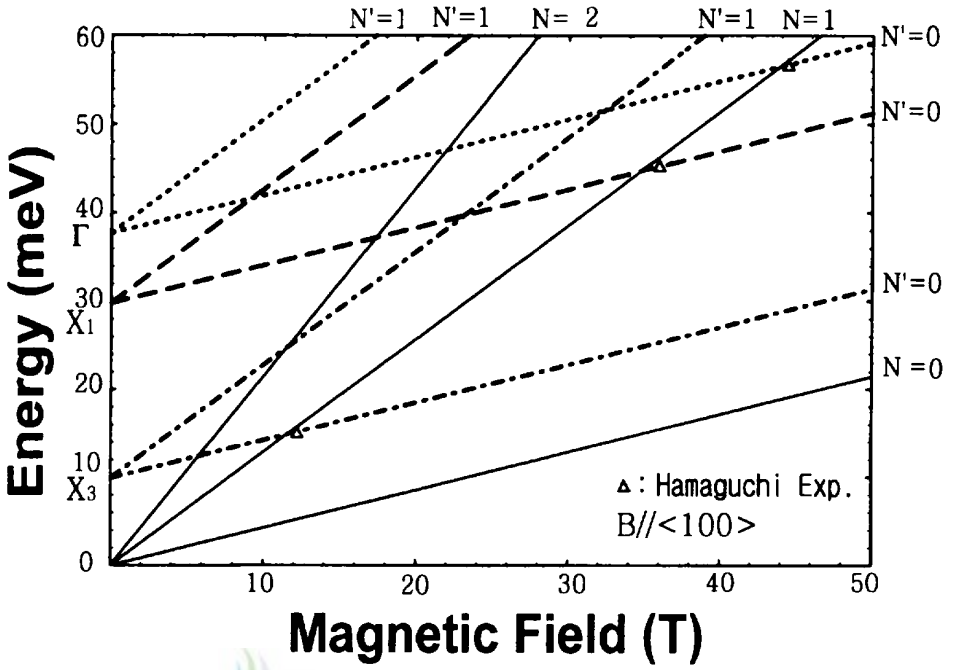
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.2. Energy diagrams of n-Ge in the transverse configuration are plotted as a function of magnetic field for B//<110>. The dashed and dotted lines are for X_4-point and Γ-point, respectively. In the case of B//<110>, the solid and dashed lines are for $m_c^* = 0.099m$ and for $m_c^* = 0.36m$, respectively. The circles and the squares represent the experimental values of Harper et al. and Eaves et al., respectively.



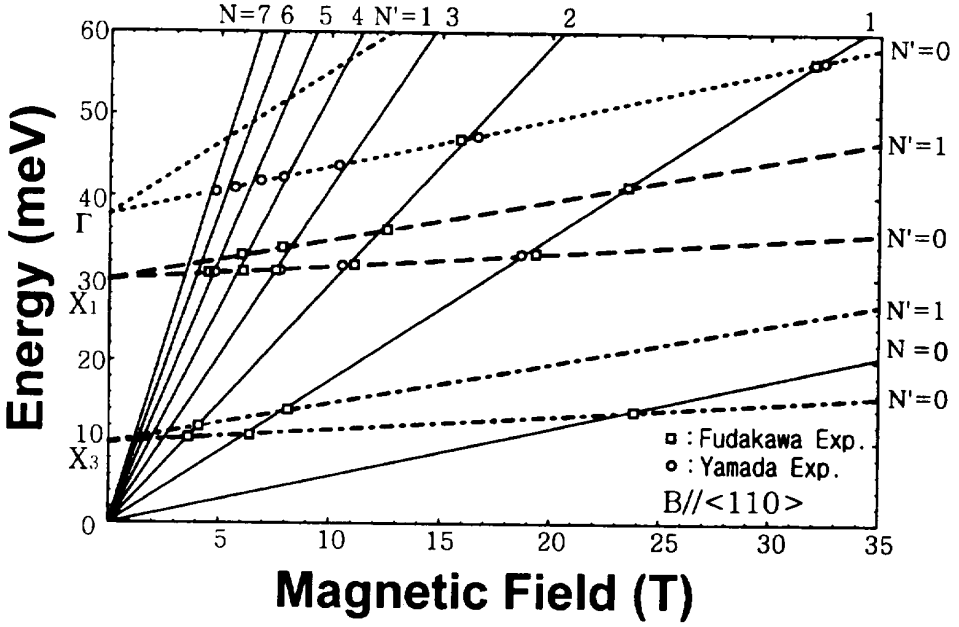
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.3. Energy diagrams of n-Ge in the transverse configuration are plotted as a function of magnetic field for B//<111>. The dashed and dotted lines are for X_4-point and Γ-point, respectively. In the case of B//<111>,the solid and dashed lines are for $m_t^* = 0.082m$ and $m_t^* = 0.207m$, respectively. The circles and the squares represent the experimental values of Harper et al. and Eaves et al., respectively.



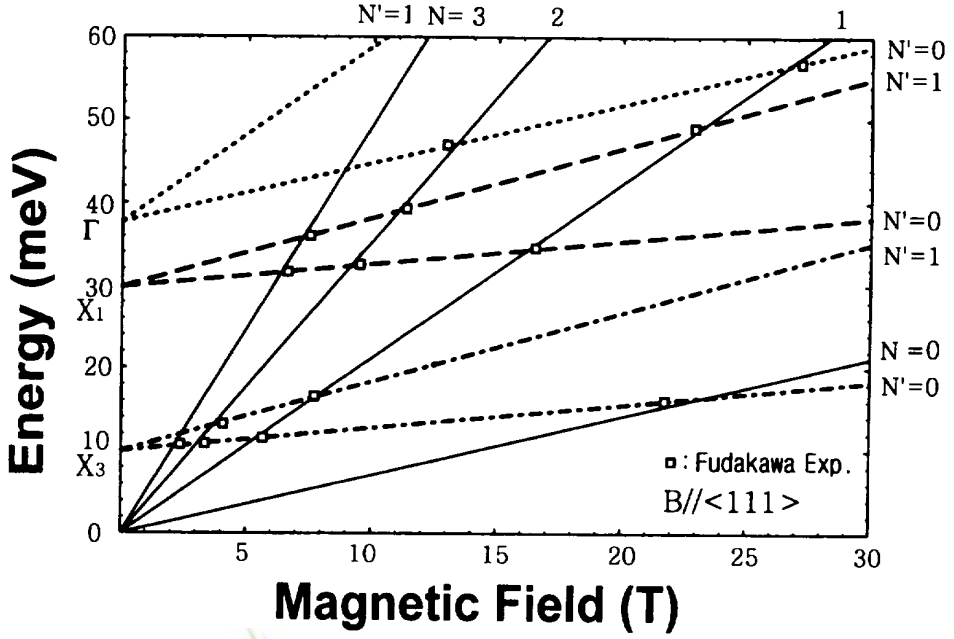
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.4. Energy diagrams of n-Ge in the longitudinal configuration are plotted as a function of magnetic field for B//<100>. The dash-dotted, dashed, and dotted lines are for X_3-point, X_1-point, and Γ-point, respectively. In the case of B//<100>, the quantum number of the Landau level for $m_t^* = 0.135m$ is indicated for each line. The circles, squares, and triangles represent the experimental values of Yamada et al., Futagawa et al., and Hamaguchi et al., respectively.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.5. Energy diagrams of n-Ge in the longitudinal configuration are plotted as a function of magnetic field for B//<110>. The dash-dotted, dashed, and dotted lines are for X_3-point, X_1-point, and Γ-point, respectively. In the case of B//<110>, the solid and dotted lines are for $m_t^* = 0.099m$ and the dash-dotted and dashed lines are for $m_t^* = 0.36m$, respectively. The circles, squares, and triangles represent the experimental values of Yamada et al., Futagawa et al., and Hamaguchi et al., respectively.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.6. Energy diagrams of n-Ge in the longitudinal configuration are plotted as a function of magnetic field for B//<111>. The dash-dotted, dashed, and dotted lines are for X_3-point, X_1-point, and Γ-point, respectively. In the case of B//<111>, the solid and dotted lines are for $m_t^* = 0.082m$ and the dash-dotted and dashed lines are for $m_t^* = 0.207m$, respectively. The circles, squares, and triangles represent the experimental values of Yamada et al., Futagawa et al., and Hamaguchi et al., respectively.

* 표 1. B//<100> , m_{c1} = 0.425 m , m_{c2} = 0.2 m , B_{FM} =82T ($\hbar\omega_p$ 단위:meV)

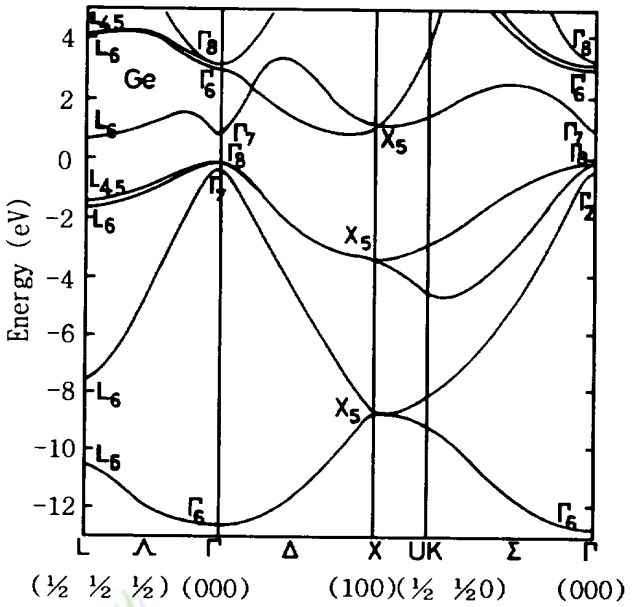
Yamada의 실험결과(B_{exp})	Yamada의 이론결과(B_{theory})		본 논문의 이론결과(B_{our})							
	$\hbar\omega_p$ =47.49	천 이	$\hbar\omega_p$ =11.62	천 이	$\hbar\omega_p$ =18.41	천 이	$\hbar\omega_p$ =62.18	천 이	$\hbar\omega_p$ =62.86	천 이
25.2	25.11	M3-N0			25.13	M1-N0	25.18	M4-N0	25.45	M4-N0
19.2	19.22	M4-N0					20.39	M5-N0	20.62	M5-N0
15.6	15.58	M5-N0	15.87	M1-N0			14.78	M7-N0	14.94	M7-N0
13.1	13.09	M6-N0			14.03	M2-N0	13.00	M8-N0	13.13	M8-N0
11.3	11.29	M7-N0					11.59	M9-N0	11.72	M9-N0
9.9	9.92	M8-N0			9.74	M3-N0	9.53	M11-N0	9.64	M11-N0
8.9	8.85	M9-N0	8.86	M2-N0			8.75	M12-N0	8.85	M12-N0
8.0	7.99	M10-N0					8.09	M13-N0	8.18	M13-N0
7.2	7.28	M11-N0			7.45	M4-N0	7.03	M15-N0	7.11	M15-N0
6.7	6.69	M12-N0					6.60	M16-N0	6.67	M16-N0
6.1	6.18	M13-N0	6.15	M3-N0	6.04	M5-N0	6.22	M17-N0	6.29	M17-N0
5.7	5.75	M14-N0					5.88	M18-N0	5.63	M19-N0
5.3	5.37	M15-N0					5.30	M20-N0	5.36	M20-N0
5.0	5.04	M16-N0			5.07	M6-N0				
4.7	4.75	M17-N0	4.70	M4-N0						
4.2	4.26	M19-N0			4.38	M7-N0				
29.3	29.35	M3-N1					28.30	M4-N1	28.61	M4-N1
21.6	21.61	M4-N1					22.40	M5-N1	22.64	M5-N1
17.6	17.10	M5-N1			17.72	M2-N1	18.53	M6-N1	18.73	M6-N1
14..2	14.15	M6-N1					13.78	M8-N1	13.93	M8-N1
11.9	12.07	M7-N1	11.19	M2-N1	11.38	M3-N1	12.21	M9-N1	12.34	M9-N1
10.5	10.52	M8-N1					10.96	M10-N1	10.06	M11-N1
9.3	9.32	M9-N1					9.10	M12-N1	9.20	M12-N1
8.2	8.37	M10-N1			8.38	M4-N1	8.39	M13-N1	8.48	M13-N1
7.5	7.60	M11-N1	7.18	M3-N1			7.78	M14-N1	7.34	M15-N1

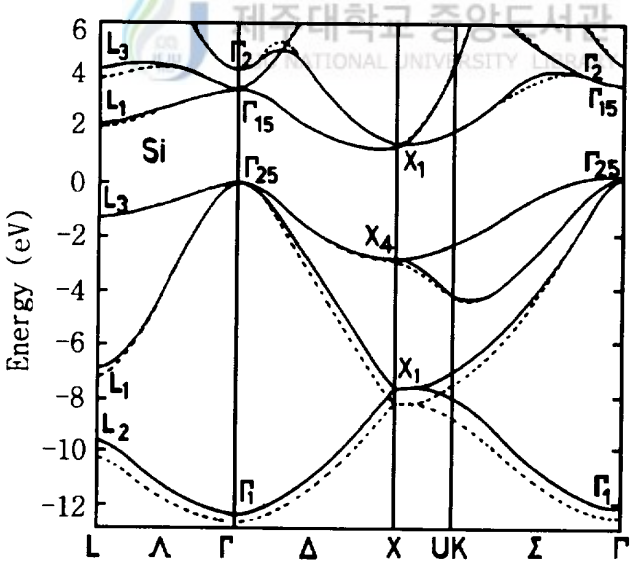
* 표 2. B//<110> , m_{c1} = 0.255 m , m_{c2} = 0.425 m , B_{FN} =106T ($\hbar\omega_p$ 단위:meV)

Yamada 실험결과 (B_{exp})	Yamada이론 결과(B_{theory})		본 논문의 이론결과(B_{our})											
	$\hbar\omega_p$ = 48.15	천 이	$\hbar\omega_p$ = 18.5	천 이	$\hbar\omega_p$ =23.8	천 이	$\hbar\omega_p$ = 48.3	천 이	$\hbar\omega_p$ = 49.61	천 이	$\hbar\omega_p$ = 57.22	천 이	$\hbar\omega_p$ =59.3	천 이
33.3	33.10	N3-M0	33.94	N1-M0			33.23	N3-M0	34.13	N3-M0				
25.2	25.24	N4-M0			23.82	N2-M0	25.32	N4-M0	26.00	N4-M0	24.22	N5-M0	25.10	N5-M0
20.6	20.34	N5-M0	18.51	N2-M0			20.45	N5-M0	21.00	N5-M0	20.31	N6-M0	21.05	N6-M0
17.1	17.10	N6-M0			16.38	N3-M0	17.15	N6-M0	17.61	N6-M0	17.49	N7-M0	18.13	N7-M0
14.6	14.72	N7-M0					14.77	N7-M0	15.16	N7-M0	15.36	N8-M0	14.18	N9-M0
12.9	12.93	N8-M0	12.73	N3-M0	12.48	N4-M0	12.97	N8-M0	13.31	N8-M0	12.35	N10-M0	12.79	N10-M0
11.5	11.52	N9-M0					11.56	N9-M0	11.87	N9-M0	11.24	N11-M0	11.65	N11-M0
10.4	10.39	N10-M0			10.01	N5-M0	10.42	N10-M0	10.70	N10-M0	10.32	N12-M0	10.70	N12-M0
9.3	9.46	N11-M0	9.70	N4-M0			9.49	N11-M0	9.75	N11-M0	9.54	N13-M0	9.19	N14-M0
8.7	8.69	N12-M0					8.71	N12-M0	8.95	N12-M0	8.87	N14-M0	8.58	N15-M0
8.2	8.03	N13-M0			8.45	N6-M0	8.06	N13-M0	8.27	N13-M0	8.28	N15-M0	8.05	N16-M0
7.7	7.46	N14-M0	7.83	N5-M0			7.49	N14-M0	7.69	N14-M0	7.77	N16-M0	7.58	N17-M0
6.9	6.97	N15-M0			7.28	N7-M0	6.99	N15-M0	7.18	N15-M0	6.92	N18-M0	7.17	N18-M0
6.5	6.54	N16-M0	6.57	N6-M0			6.56	N16-M0	6.74	N16-M0	6.56	N19-M0	6.79	N19-M0
6.3	6.16	N17-M0			6.39	N8-M0	6.16	N17-M0	6.16	N17-M0	6.23	N20-M0	6.46	N20-M0
29.5	29.44	N4-M1			32.75	N2-M1	29.54	N4-M1	30.33	N4-M1	27.38	N5-M1	28.37	N5-M1
23.0	23.04	N5-M1					23.12	N5-M1	23.74	N5-M1	22.49	N6-M1	23.31	N6-M1
18.2	18.92	N6-M1			20.15	N3-M1	18.98	N6-M1	19.50	N6-M1	19.08	N7-M1	17.17	N8-M1
16.3	16.06	N7-M1	15.67	N3-M1			16.11	N7-M1	16.54	N7-M1	16.57	N8-M1	15.17	N9-M1
14.0	13.94	N8-M1			14.56	N4-M1	13.99	N8-M1	14.37	N8-M1	14.64	N9-M1	13.59	N10-M1
10.9	11.04	N10-M1	11.31	N4-M1	11.39	N5-M1	11.08	N10-M1	11.37	N10-M1	10.86	N12-M1	10.36	N12-M1
10.0	10.00	N11-M1					10.03	N11-M1	10.30	N11-M1	9.99	N13-M1	9.59	N13-M1
9.3	9.14	N12-M1	8.85	N5-M1	9.36	N6-M1	9.17	N12-M1	9.41	N12-M1	9.26	N14-M1	8.94	N14-M1
8.0	8.41	N13-M1					8.44	N13-M1	8.66	N13-M1	8.07	N16-M1	8.36	N16-M1

Ⅶ. 부 록

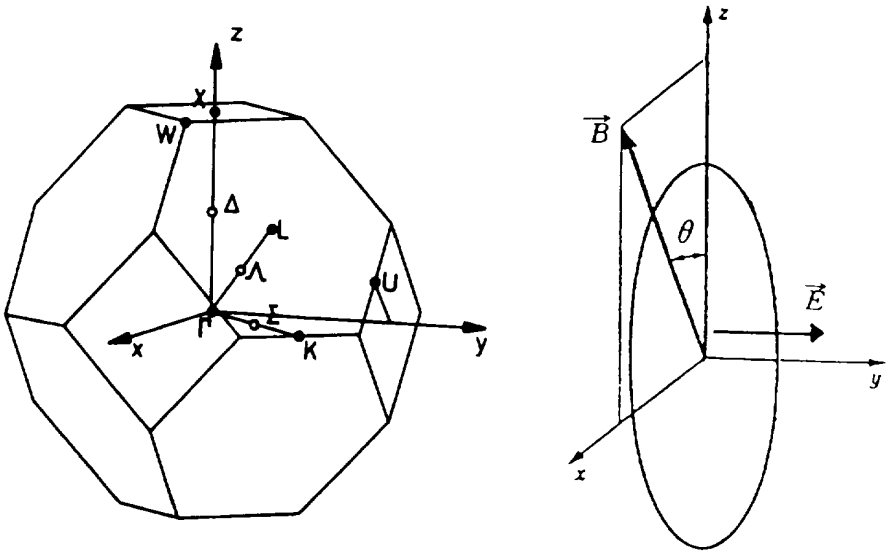
부록 (1) : 슈도퍼텐셜로 계산된 Ge과 Si의 에너지 밴드





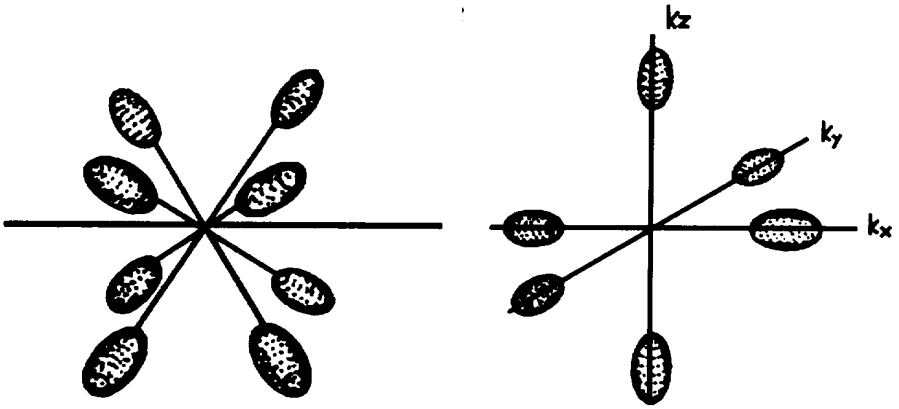
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

부록 (2) : fcc격자의 제 1 Briilouin 영역과 전도대의 자기장 방향

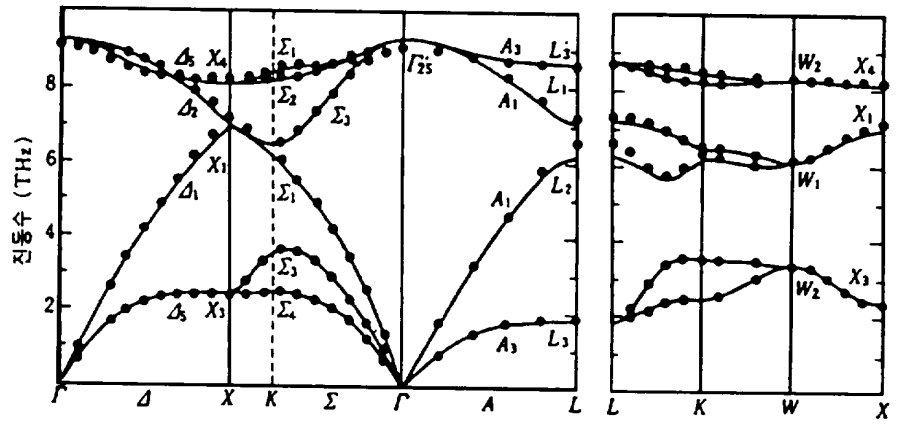


부록 (3) : 게르마늄과 실리콘의 전도대 에너지면

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

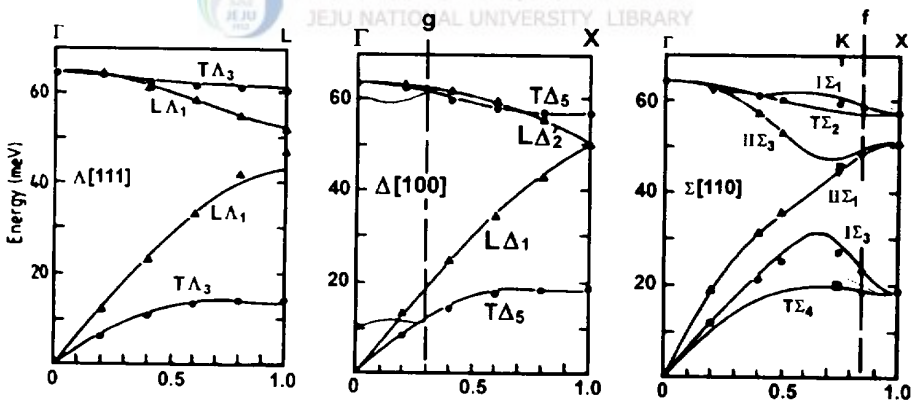


부록 (4) : 확장된 결합 전하 모델에 의한 Ge의 포논 분산관계
(실선은 이론결과, 점은 측정치)

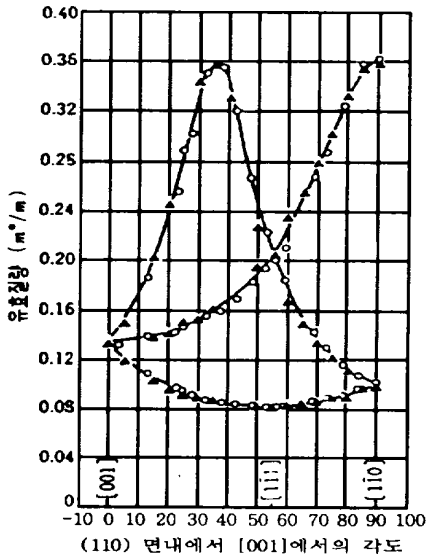


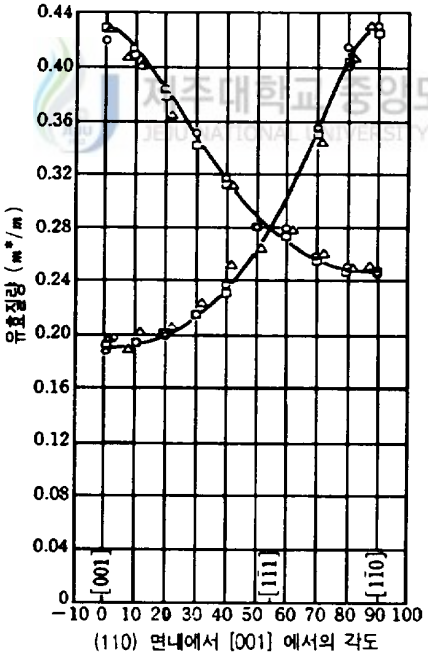
부록 (5) : n형 Si에 대한 포논 분산관계

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



부록 (6) : 게르마늄과 실리콘의 사이클로트론 공명에 의한 유효질량





제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY