

สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (optical properties) ของสารกึ่งตัวนำทำให้รู้ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ และจากการศึกษานี้ประกอบกับทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง (band theory of solids) ทำให้อธิบายสมบัติเชิงไฟฟ้า (electrical properties) ของสารกึ่งตัวนำได้ ตลอดจนสามารถทำนายถึงความเป็นไปได้ของอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่ประดิษฐ์ขึ้นจากสารกึ่งตัวนำนั้น

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโฟโตรีเฟลกแทนซ์ (photorefectance = PR) และการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึก เพื่อศึกษาขนาดของช่องว่างและลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานในผลึกกึ่งตัวนำนั้น

ทฤษฎีเกี่ยวกับโฟโตรีเฟลกแทนซ์ (theory of photorefectance)

มอดูเลชันสเปกโทรสโกปี (modulation spectroscopy) คือการวัดและการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงในแสงสเปกตรัมของสารตัวอย่าง เนื่องจากการทำให้การวัดอยู่ในเงื่อนไขที่มอดูเลตปรากฏการณ์นี้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับการศึกษสมบัติเชิงแสง และ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกหรือเป็นฟิล์มบาง (bulk or thin film) เช่น โครงสร้างวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor heterostructure) และโครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างหน้าของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor interfaces) การวัดมอดูเลชันนั้นสามารถกระทำได้จากหลายทางด้วยกัน เช่น มอดูเลชันด้วยสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก พัลส์ความร้อน (heat pulse) และความเค้นแบบแกนเดียว (uniaxial stress)

สเปกตรัมรีเฟลกแทนซ์ที่มอดูเลตและฟังก์ชันไดอิเล็กทริก

ปริมาณที่เป็นหลักมูลซึ่งพรรณนาถึงการตอบรับไดอิเล็กทริกของวัสดุ ที่มีต่อสนาม

แม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ ฟังก์ชันไดอิเล็กทริก

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = \varepsilon_1(\omega, \vec{k}) + i\varepsilon_2(\omega, \vec{k}) \quad (4.1)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของสองตัวแปร อันได้แก่ความถี่เชิงมุม ω และเวกเตอร์คลื่น \vec{k} (wave vector) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การแปรผันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย \vec{k} สามารถที่จะตัดทิ้งได้ หมายความว่า ε จะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร ω แต่เพียงอย่างเดียว

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega) \quad (4.2)$$

โดยที่ฟังก์ชันไดอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับสภาพสะท้อนเฟรสเนล R (Fresnel reflectivity) [36] ดังนี้

$$R = \left| \frac{n-n_a}{n+n_a} \right|^2 \quad (4.3)$$

ในที่นี้

$$n^2 = \varepsilon \quad (4.4)$$

$$n_a^2 = \varepsilon_a \quad (4.5)$$

สมการ (4.3) แสดงสภาพสะท้อนเฟรสเนล R สำหรับกรณีที่แสงตกกระทบตั้งฉากให้กับผิวหน้าของระบบฐานรองล้อมรอบ (substrate-ambient system) โดยที่ n คือดรรชนีหักเหเชิงซ้อนของฐานรอง และ n_a คือดรรชนีหักเหของแอมเบียน (ambient) ซึ่งมีค่าเท่า 1 สำหรับปริภูมิอิสระ (free space) โดยนำใช้สมการ (4.2), (4.3), (4.4) และ (4.5) จะสามารถเขียน R ให้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับฟังก์ชันไดอิเล็กทริก โดยมี ε_1 คือส่วนจริงและ ε_2 คือส่วนจินตภาพ ดังนั้น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง ε ก็จะทำให้ R ค่อยเปลี่ยนแปลงไปด้วย ที่น่าสนใจก็คือปริมาณ $\frac{\Delta R}{R}$ ซึ่งแสดงรูปทรงเส้น (lineshape) ของสเปกตรัมรีเฟล็กแทนซ์ที่มอดูเลต โดยนำใช้สมการ (4.3), (4.4) และ (4.5) เราจะได้

$$\frac{\Delta R}{R} = Re \left[\frac{2n_a}{(\varepsilon - \varepsilon_a)} \Delta \varepsilon \right] \quad (4.6)$$

$$= Re[(\alpha - i\beta)\Delta \varepsilon] \quad (4.7)$$

$$= \alpha \Delta \varepsilon_1 + \beta \Delta \varepsilon_2 \quad (4.8)$$

การแสดงความหมายโดยทั่วไปของฟังก์ชันไดอิเล็กทริก

เพโทรฟฟ์ (Petroff) [36] ได้พรรณนาการแสดงความหมายโดยทั่วไปสำหรับฟังก์ชันไดอิเล็กทริก ε ของสารกึ่งตัวนำโดยผ่านสถานะบลอค (Bloch states) $\varphi_n(\vec{k}, r)$ กับพลังงาน $E_n(\vec{k})$ ของดรรชนีแถบ n และเวกเตอร์คลื่น \vec{k} ในการประมาณแบบ 1 อิเล็กตรอน (one-electron approximation) เพโทรฟฟ์ พบว่า

$$\varepsilon(E, \Gamma) = 1 + \frac{4\pi e^2 \hbar^2}{m^2 E^2} \sum_{\vec{k}, c, v} \left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2 \left[\frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma} + \frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) + E + i\Gamma} \right] \quad (4.9)$$

ฟังก์ชันไดอิเล็กทริกทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพ และยังเป็นฟังก์ชันที่มีสองตัวแปร อันได้แก่ พลังงานของโฟตอน $E = \hbar\omega$ และพารามิเตอร์ความกว้างของเฟโนเมโลจิคัล Γ (phenomelological broadening parameter) ซึ่งเป็นตัวตอบสนองสำหรับกลไกการกระเจิงที่ทำให้เกิดแทรนซิชัน (transition) ดังนั้น เมื่อไม่มีกลไกการกระเจิง Γ จะมีค่าเท่ากับศูนย์

ในสมการ (4.9) e คือ ประจุไฟฟ้าสมบูรณ์ของอิเล็กตรอน

\hbar คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

$n = c, v$ ใช้แสดงแถบการนำและแถบเวเลนซ์ตามลำดับ

\hat{e} คือ เวกเตอร์หน่วยโพลาริเซชัน (unit polarization vector) ของ

สนามโฟตอน

$$\vec{P}_{cv}(\vec{k}) = \langle \varphi_{c\vec{k}} | \vec{P} | \varphi_{v\vec{k}} \rangle \quad \text{คือ เมทริกซ์อีลิเมนต์ของโมเมนตัม}$$

(momentum matrix element) ที่ได้จากหลักการเลือกเฟ้นแทรนซิชัน (selection rules of transition)

$$E_{cv}(\vec{k}) = E_c(\vec{k}) - E_v(\vec{k}) \quad \text{คือ พลังงานแถบภายใน (interband}$$

energy)

สมการ (4.9) ประกอบด้วย 3 พจน์ด้วยกันคือ พจน์ของค่าคงที่ พจน์ของเรโซแนนซ์

$\frac{1}{E_{cv}(\vec{k})-E-i\Gamma}$ และพจน์ที่ไม่เรโซแนนซ์ $\frac{1}{E_{cv}(\vec{k})+E+i\Gamma}$ มีเพียงแต่พจน์เรโซแนนซ์เท่านั้นที่มีส่วน
เหมาะสมกับโครงสร้างของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ (photoreflectance spectrum)

การขยายเฉพาะที่ล้อมรอบจุดวิกฤตในแบบจำลองพาราโบลาเชิงเดี่ยว

จากสมการ (4.9) จะทำความเข้าใจได้เกี่ยวกับธรรมชาติของสเปกตรัมไดอิเล็กทริก
โดยพิจารณาการรวมของฟังก์ชัน $f(k)$ (sum over k) ในบริลลันโซนที่หนึ่ง

$$\sum_k^{1stBZ} f(k) = 2 \int_{BZ} f(k) \rho_k dk \quad (4.10)$$

ซึ่ง ρ_k คือ จำนวนของเวกเตอร์ยินยอม k (allowed k vector) ที่แจกแจงอยู่ใน บริลลันโซน ต่อ
หน่วยปริมาตร เท่ากับ $(\frac{1}{2\pi})^3$ และแฟกเตอร์ 2 มาจากการยินยอมของสถานะเดียวกันของ
อิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นและสปินลง จะได้

$$\varepsilon(E, \Gamma) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3 k \left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2 \times \left[\frac{1}{E_{cv}(\vec{k})-E-i\Gamma} + \frac{1}{E_{cv}(\vec{k})+E+i\Gamma} \right] \quad (4.11)$$

อินทิเกรต $\int_{BZ} d^3 k$ ชอนความหมายทางฟิสิกส์ที่สำคัญเอาไว้ โดยมีการชดเชยด้วยการแทนความ
หมายนี้ด้วยการอินทิเกรต $\int_s dE \int \frac{dk_1 dk_2}{\left| \nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}) \right|}$ อินทิเกรตนี้คือพื้นผิวพลังงานคงที่ (constant
energy surface) ที่กำหนดด้วย $E_{cv}(\vec{k}) = E_s$ กับสองตัวแปร k_1 และ k_2 ที่บอกตำแหน่งของ
จุดบนพื้นผิว จากนั้นเราสามารถเขียนฟังก์ชัน ε ได้ดังนี้

$$\varepsilon(E, \Gamma) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} \int_s dE \int dk_1 dk_2 \frac{\left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2}{\left| \nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}) \right|} \times \left[\frac{1}{E_{cv}(\vec{k})-E-i\Gamma} + \frac{1}{E_{cv}(\vec{k})+E+i\Gamma} \right] \quad (4.12)$$

สมการ (4.12) มีจุดที่ไม่ปกติ (singularity) อยู่กับแต่ละ k สำหรับคู่แถบ (แถบการนำ และ
แถบเวเลนซ์)

ซึ่ง
$$\nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}) = 0 \quad (4.13)$$

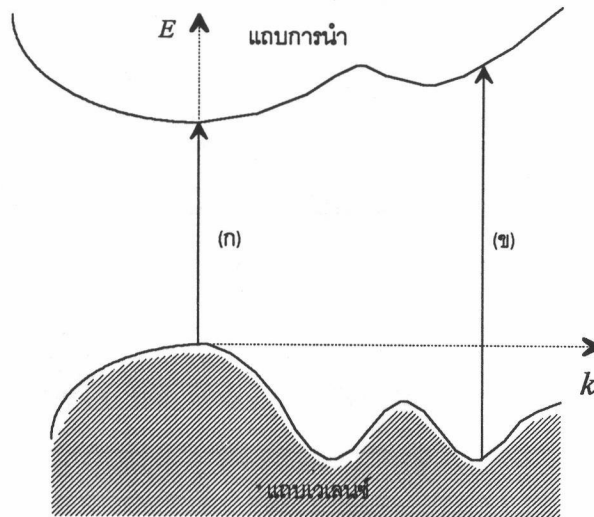
เรียกจุดที่ $\vec{k} = \vec{k}_j^{cv}$ ซึ่งเป็นผลเฉลย (solution) ของสมการ (4.13) ว่า จุดวิกฤต (critical point)

เนื่องจาก
$$\nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}) = \nabla_{\vec{k}} E_c(\vec{k}) - \nabla_{\vec{k}} E_v(\vec{k})$$
 สมการ (4.13) จะเป็นจริง

ถ้า
$$\nabla_{\vec{k}} E_c(\vec{k}) = \nabla_{\vec{k}} E_v(\vec{k}) = 0 \quad (4.14)$$

หรือว่า
$$\nabla_{\vec{k}} E_c(\vec{k}) = \nabla_{\vec{k}} E_v(\vec{k}) \neq 0 \quad (4.15)$$

อีกประการหนึ่ง สามารถที่จะหาดำแหน่งของจุดวิกฤตอยู่ในแผนภาพหนึ่งของแถบพลังงาน สำหรับคู่แถบ (แถบการนำและแถบเวเลนซ์) ที่อ้างถึง โดยการเปรียบเทียบความชัน (slope) $\nabla_{\vec{k}} E(\vec{k})$ ของแถบการนำและแถบเวเลนซ์ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) คือแทนที่ชัน ณ จุดวิกฤตโดยสอดคล้องกับ สมการ (4.14) และ (4.15) ตามลำดับ

บริเวณล้อมรอบจุดวิกฤตดังกล่าวนี้ จะนำไปสู่โครงสร้างที่สำคัญในสเปกตรัมของ โฟโตมอดูเลชัน (photomodulation spectra) ด้วยการวิเคราะห์รูปทรงเส้น (lineshape) ของสเปกตรัม อาจสามารถทราบถึงชนิดของจุดวิกฤตได้ [37]

จากแบบจำลองอย่างง่ายตายของพาราโบลา เราจะพิจารณาทริแวนล้อมรอบของจุดวิกฤต โดยการขยาย $E_{cv}(\vec{k})$ ในรูปแบบอนุกรมของเทเลอร์ (Taylor's series) จนถึงพจน์พาราโบลาล้อมรอบจุดวิกฤต j

$$E_{cv}(\vec{k}) = E_{cv}(\vec{k}_j^{cv} + \Delta \vec{k}) \quad \text{ซึ่งว่า} \quad \Delta \vec{k} = \vec{k} - \vec{k}_j^{cv}$$

ที่นี้

$$E_{cv}(\vec{k}) \cong E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) + \nabla E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) \Delta \vec{k} + \nabla^2 E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) \frac{(\Delta \vec{k})^2}{2} \quad (4.16)$$

เนื่องจาก

$$\nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) = 0 \quad \text{ดังนั้น}$$

$$E_{cv}(\vec{k}) \cong E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) + \frac{1}{2} \hbar^2 \left[\frac{(k_x - k_{jx}^{cv})^2}{\mu_{xx}^{cv}} + \frac{(k_y - k_{jy}^{cv})^2}{\mu_{yy}^{cv}} + \frac{(k_z - k_{jz}^{cv})^2}{\mu_{zz}^{cv}} \right] \quad (4.17)$$

โดยที่ $\mu_{xx}, \mu_{yy}, \mu_{zz}$ คือ ส่วนประกอบในแนวทแยงมุมของเทนเซอร์ของมวลส่วนกลับ (reciprocal mass tensor) กำหนดด้วย

$$\mu_{cv}^{-1}(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar^2} \vec{\nabla}_{\vec{k}} \vec{\nabla}_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}) \quad (4.18)$$

สมมติให้จุดวิกฤตเชิงเดี่ยวเป็นจุดกำเนิด (origin) โดยการนำใช้ระบบโคออร์ดิเนตเฉพาะที่ (x, y, z) (local coordinate system) จะสามารถย่อ $E_{cv}(\vec{k})$ ในสมการ (4.17) สามารถเขียนได้เป็น

$$E_{cv}(\vec{k}) = E_g + \frac{1}{2} \hbar^2 \left(\frac{k_x^2}{\mu_{xx}} + \frac{k_y^2}{\mu_{yy}} + \frac{k_z^2}{\mu_{zz}} \right) \quad (4.19)$$

สามารถกำหนดชนิดของจุดวิกฤตด้วยตัวเลขของมวลลบ (number of negative mass)

- 0 สำหรับ จุดต่ำสุด (M_0)
- 1 สำหรับ จุด อานม้า (M_1)
- 2 สำหรับ จุด อานม้า (M_2)
- 3 สำหรับ จุดสูงสุด (M_3)

ดังนั้น จึงสามารถเขียนฟังก์ชันไดอิเล็กทริกอยู่ในรูปของการทับซ้อนของฟังก์ชันเฉพาะที่

(superposition of local function)

$$\varepsilon(E, \Gamma) = \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} \left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2 \int \frac{d^3 k}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma} \quad (4.20)$$

ด้วยการตัดพจน์ที่ไม่เรโซแนนซ์และพจน์ค่าคงที่ทิ้ง เพราะว่า พจน์เหล่านี้จะให้โครงสร้างของสเปกตรัมที่มอดูเลตไม่เด่นชัด

แทนสมการ (4.19) ลงไปในสมการ (4.20) แล้วทำอินทิเกรตสำหรับ 1, 2 หรือ 3 มิติ (โดยว่า มวลสองอัน หนึ่งอัน หรือ ไม่มีมวล μ_{ii} จะเป็นอนันต์) จะได้

$$\varepsilon(E, \Gamma) = \frac{Q}{E^2} D_x K_y K_z i^{l+1} (E - E_g + i\Gamma)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ 1 มิติ} \quad (4.21)$$

$$= \frac{Q}{E^2} D_x D_y K_z i^{l+2} \ln(E_g - E + i\Gamma) \quad \text{สำหรับ 2 มิติ} \quad (4.22)$$

$$= \frac{2\pi Q}{E^2} D_x D_y D_z i^{l+1} (E - E_g + i\Gamma)^{\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ 3 มิติ} \quad (4.23)$$

ซึ่งว่า

$$Q = \frac{e^2 \hbar^2}{\pi m^2} \left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2$$

$$D_i = \left(\frac{2|\mu_{ii}|}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad i = x, y, z$$

K_i คือ cutoff lengths ในบริลลันโซน สำหรับ 1 และ 2 มิติ

l คือ ตัวเลขของมวลลบ

ฟังก์ชันไดอิเล็กทริกที่มอดูเลต (modulated dielectric function)

เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าประยุกต์ (\vec{E}) ผลของสนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์คลื่นของสถานะบอลลอด จาก \vec{k} เป็น $\vec{k} - \frac{e\vec{E}}{\hbar}$ การแทนที่นี้จะแสดงถึงความเป็นจริงที่ว่า สนามไฟฟ้าเป็นตัวผสมฟังก์ชันคลื่นทั้งหมดซึ่งมีส่วนประกอบตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ขนาดของการผสม (mixing) จะกำหนดได้ด้วยพารามิเตอร์เวลา t

Aspnes [36] ได้พิจารณาอนุพันธ์ของการตอบรับไดอิเล็กทริก (dielectric response)

ในสมการ (4.11) ในแง่การเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา (time gauge) ซึ่ง ε ถูกแสดงในรูปของการแปลงเวลาแบบฟูเรียร์ (Fourier time transform) ของโอเปอเรเตอร์กระแสที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent current operator) [38] และแสดงความหมายของ ε ในกรณีที่ย้ายดาของคู่แถบ (แถบการนำ - แถบเวเลนซ์) เชิงเดี่ยวด้วยการตัดพจน์เรโซแนนซ์และพจน์ค่าคงที่ในสมการ (4.11) ที่ Aspnes ได้ให้ข้อเสนอว่า ทั้งพจน์ที่ไม่เรโซแนนซ์และพจน์ค่าคงที่ไม่มีส่วนช่วยให้โครงสร้างของสเปกตรัมที่มอดูเลตคมชัดขึ้น ดังนั้นจึงสามารถเขียน

$$\varepsilon(E, \Gamma) = \frac{ie^2\hbar}{\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3k \left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2 \int_0^{2\infty} \exp\left[-\frac{i(E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma)t}{\hbar} \right] dt \quad (4.24)$$

ในการบวก $E_{cv}(\vec{k})$ จะต้องเปลี่ยนแปลงเป็น

$$E_{cv}\left(\vec{k} - \frac{e\vec{\xi}t}{\hbar}\right) \cong E_{cv}(\vec{k}) + \frac{1}{2\hbar^2} e^2 (\vec{\xi} \cdot \nabla_{\vec{k}})^2 E_{cv}(\vec{k}) t^2 \quad (4.25)$$

$$\cong E_{cv}(\vec{k}) + \frac{1}{2\mu_{//}} e^2 \left| \vec{\xi} \right|^2 t^2 \quad (4.26)$$

ซึ่งว่า พจน์อันดับที่หนึ่งของ t หายไปจากสมการ (4.13) และ $\mu_{//}$ คือมวลของพาหะที่กระโดดระหว่างแถบ (interband mass) ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แทนสมการ (4.25) และ (4.26) ลงไปในสมการ (4.24) และนำใช้สมมาตรของเอกซโพเนนเชียลในอินทิเกรชันที่ผันกลับได้ตามเวลา (the exponent in time-reversal invariance) ที่เสนอโดย Aspnes [36]

$$\exp\left[\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} x dt \right] = \exp(xt) \quad (4.27)$$

สามารถหา

$$\varepsilon(E, \vec{\xi}, \Gamma) = \frac{ie^2\hbar}{\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3k \left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2 \int_0^{2\infty} \exp\left[-\frac{i(E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma)t}{\hbar} \right]$$

$$\times \exp\left[-\frac{i\Omega^3 t^3}{3}\right] dt \quad (4.28)$$

ซึ่งว่า $\hbar\Omega$ คือพลังงานแคแร็คเทอริสติก (characteristic energy) ที่ได้จากพจน์ของพลังงานของพาหะที่กระโดดระหว่างแถบ (interband energy) $E_{cv}(\vec{k})$ หรือ มวลลดทอนของพาหะที่กระโดดระหว่างแถบ (interband reduced mass) $\mu_{//}$ ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ด้วย

$$(\hbar\Omega)^3 = \frac{e^2(\vec{\xi} \cdot \nabla_{\vec{k}})^2 E_{cv}(\vec{k})}{8} \quad (4.29)$$

$$= \frac{e^2 \hbar^2 \xi^2}{8\mu_{//}} \quad (4.30)$$

ในลิมิตที่สนามไฟฟ้าต่ำ $\vec{\xi}$ มีค่าน้อยพอ หมายความว่า $\hbar\Omega \ll \Gamma$ เอกซิโพเนนเชียลของ $(-\frac{\Gamma t}{\hbar})$ (ที่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นใน t ซึ่งตัดอินทิเกรตในสมการ (4.28) ข้างหน้าของพจน์ $-\frac{i\Omega^3 t^3}{3}$ ทิ้ง) ต่างจาก 0 อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นเราสามารถขยาย

$$\exp(-\frac{i\Omega^3 t^3}{3}) \cong 1 - \frac{i\Omega^3 t^3}{3} \quad (4.31)$$

แทนสมการ (4.31) ลงไปในสมการ (4.28) เราจะสามารถหา

$$\varepsilon(E, \vec{\xi}, \Gamma) = \varepsilon(E, 0, \Gamma) + \Delta\varepsilon(E, \vec{\xi}, \Gamma) \quad (4.32)$$

โดยว่า

$$\Delta\varepsilon = \frac{e^2 \hbar}{3\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3 k \left| \hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k}) \right|^2 \Omega^3 \int_0^\infty t^3 \exp\left[-\frac{i(E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma)t}{\hbar}\right] dt \quad (4.33)$$

t^3 สมมูลให้กับ $[-i\hbar \frac{\partial}{\partial E}]^3$ และในที่สุดก็จะได้

$$\Delta\varepsilon = \frac{(\hbar\Omega)^3}{3E^2} \frac{\partial^3}{\partial E^3} [E^2 \varepsilon(E, 0, \Gamma)] \quad (4.34)$$

สมการ (4.34) ไม่เพียงแต่แสดงฟังก์ชันไดอิเล็กทริกที่มอดูเลตในลิมิตสนามไฟฟ้าต่ำเท่านั้น ยัง

เป็นปฏิภาคกับอนุพันธ์อันดับสาม (third derivative) ของฟังก์ชันไดอิเล็กทริกที่ไม่มอดูเลตในส่วนพลังงานโฟตอน $E = \hbar\omega$ แต่ว่ารูปทรงเส้น (lineshape) ของ $\Delta\epsilon$ ไม่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า และแอมพลิจูดของรูปทรงเส้นนี้เพิ่มขึ้นแบบตรงๆ ดังกำลังสองของสนามไฟฟ้า และตั้งส่วนกลับมวลของพาหะที่กระโดดระหว่างแถบตามทิศทางของสนามไฟฟ้า

ฟังก์ชันเชิงรูปทรงเส้นของสเปกตรัมรีเฟลกแทนซ์ที่อิเล็กโตรมอดูเลต

จากสมการ (4.7) สเปกตรัมรีเฟลกแทนซ์ที่มอดูเลตก็คือ

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re}[(\alpha + i\beta)\Delta\epsilon] \quad (4.35)$$

ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำเป็นก้อนผลึก (bulk semiconductor) การแสดงความหมายทั่วไปของฟังก์ชันไดอิเล็กทริกที่ไม่มอดูเลตสำหรับ 3 มิติ (ดังสมการที่ 4.23) จะถูกนำไปใช้และแทนลงในสมการ (4.34) จะได้

$$\Delta\epsilon = \frac{\pi}{4} Q D_x D_y D_z i^{l+1} (\hbar\Omega)^3 [E - E_g + i\Gamma]^{-\frac{5}{2}} \quad (4.36)$$

จากนั้นแทนสมการ (4.36) นี้ลงในสมการ (4.7) จะได้การแสดงความหมายของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ (photoreflectance spectrum) ที่เป็นฟังก์ชันของ E ดังนี้

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \text{Re} \left[C e^{i\theta} (E - E_g + i\Gamma)^{-\frac{5}{2}} \right] \quad (4.37)$$

ซึ่งว่า $C e^{i\theta} = \frac{1}{4} (\alpha + i\beta) \pi Q D_x D_y D_z i^{l+1} (\hbar\Omega)^3$

สมการ (4.37) ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวที่สำคัญด้วยกันคือ

C คือ แอมพลิจูด (amplitude)

θ คือ แฟกเตอร์เฟส (phase factor)

E_g คือ พลังงานช่องว่าง (energy gap)

และ Γ คือ พารามิเตอร์ความกว้าง (broadening parameter)

การทดลองและผลการทดลอง

การเตรียมพื้นผิวของชั้นผลึก

เทคนิคการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์เป็นเทคนิคที่ตรวจวัดแสงซึ่งสะท้อนมาจากชั้นผลึกตัวอย่าง อุปกรณ์และวิธีการวัดของเทคนิคนี้จะนำเสนอในหัวข้อต่อไป ดังนั้น ความเรียบของผิวหน้าของชั้นผลึกตัวอย่างที่นำมาวัดจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อผลรับของการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์นี้ เช่น เมื่อผิวหน้าของสารตัวอย่างมีความเรียบมาก ๆ ก็จะได้สัญญาณที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนความสมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์ของเนื้อผลึกตัวอย่างนั้นจะรู้ได้จากค่า พารามิเตอร์ต่างๆ ในผลรับจากการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ เช่น ค่าพลังงานของการเปลี่ยนแปลง ระดับพลังงาน E_g (energy interband transition) พารามิเตอร์ความกว้าง Γ (broadening parameter) แฟกเตอร์เฟส θ (phase factors) และแอมพลิจูด C (amplitude) เป็นต้น

กรรมวิธีที่จะทำให้ผิวหน้าของชั้นผลึกตัวอย่างเรียบดีนั้นสามารถกระทำได้ด้วยหลายวิธี อาจกระทำได้ด้วยกลไกการขัด ด้วยการกัดผิวหน้าในระบบสุญญากาศ หรือ ด้วยสารละลายเคมีต่างๆ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกเอากลไกการขัดด้วยมือและเปิดผิวหน้าของชั้นผลึกตัวอย่างด้วยสารละลายเคมี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การขัดผิวหน้าของชั้นผลึก

นำชั้นผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องสตริงซอและทำ ความสะอาดตามขั้นตอน ดังที่กล่าวในบทที่ 2 มาขัดผิวหน้าด้านที่ต้องการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ที่ละเอียดที่สุดเท่าที่จะหาได้ (เบอร์ 1200 หรือ 1500 ก็ได้) วางแผ่นกระดาษทรายน้ำลงบนแผ่นกระจกที่มีความกว้างพอเหมาะแล้วเทน้ำดีไอออไนซ์ลงไปเล็กน้อย วางชั้นผลึกที่ต้องการขัดลงไปโดยให้ด้านหน้าที่ต้องการขัดลงสัมผัสกับแผ่นกระดาษทราย ใช้นิ้วมือที่สวมถุงมืออย่างเรียบร้อยแล้วกดลงบนชั้นผลึก เริ่มขยับ นิ้วซ้ายและเบาๆ อย่างสม่ำเสมอ โดยวนนิ้วมือที่มีชั้นสารอยู่ให้เป็นรูปวงกลมตามทิศทางใดหนึ่งแล้วแต่สะดวก กระทำเช่นนี้หลายๆ รอบแล้วสังเกตดูผิวหน้าของชั้นผลึกที่ขัดจนแน่ใจว่าผิวหน้าของชั้นผลึกนั้นเรียบดีพอสมควร ปราศจากรอยขีดแล้วจึงหยุดการขัด นำชั้นผลึกที่ขัดแล้วไปล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์อีกครั้งเพื่อให้ผิวหน้าที่ขัดแล้วสะอาดขึ้น หลังจากนั้นก็นำเอาชั้นผลึกดังกล่าวไปขัดด้วยผงขัดอลูมินาขนาด

ไมครอน (micropolish) ชนิด C , A และ B ตามลำดับ แล้วขัดเงาต่อด้วยผงขัดเพชร (diamond paste) ซึ่งมีขนาดดังรายละเอียดต่อไปนี้

ผงขัดเงาชนิด C เป็นผงแห้งของแกมมาอลูมินา (gamma alumina) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 micron

ผงขัดเงาชนิด A เป็นผงแห้งของแอลฟาอลูมินา (alpha alumina) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 micron

ผงขัดเงาชนิด B เป็นผงแห้งของแอลฟาอลูมินา (alpha alumina) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 micron

ผงขัดเพชรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 micron

การขัดผิวหน้าของชิ้นผลึกให้ได้ความเงาด้วยผงขัดและผงขัดเพชรนั้นจะต้องปฏิบัติตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

เทผงขัดเงาชนิด C ลงไปบนแผ่นกระดาษสำหรับใช้ขัดโดยเฉพาะในปริมาณที่พอเหมาะ (หนึ่งช้อนเล็ก) กระดาษสำหรับขัดนี้ถูกวางอยู่บนแผ่นกระจกที่แห้งและสะอาดดีปราศจากฝุ่นละออง เหน้าดีไอออไนซ์ลงไปเล็กน้อยพอให้ผงขัดเปียกแล้ววางชิ้นผลึกลงไป ใช้นิ้วมือกดลงชิ้นผลึกเบาๆแล้วค่อยๆขยับนิ้วมือวนไปให้ทั่วบริเวณพื้นที่ของกระดาษที่มีผงเปียกอยู่ โดยวนให้เป็นวงกลมตามทิศทางแล้วแต่สะดวก ทำวนไปวนมาหลายรอบแล้วนำชิ้นผลึกขึ้นมาล้างเพื่อสังเกตผิวหน้าที่ขัด เมื่อเห็นเป็นเงาพอสมควรแล้วจึงหยุดการขัด ล้างชิ้นผลึกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ให้สะอาดและขัดต่อด้วยผงขัดชนิด A และ B ตามลำดับต่อไป เมื่อเปลี่ยนผงขัดจะต้องเปลี่ยนกระดาษขัดเป็นแผ่นใหม่พร้อมๆกัน ขั้นตอนการขัดด้วยผงขัดชนิด A และ B นี้ปฏิบัติเหมือนการขัดด้วยผง C ทุกประการ การขัดด้วยผงทั้ง 3 ชนิดนี้จะทำให้พื้นผิวหน้าของชิ้นผลึกมีความเรียบและเป็นเงาที่ละเอียดแตกต่างกันตามลำดับขนาดของผงขัด ข้อควรระวัง เวลาทำการขัดหากพบว่าเส้นใยกระดาษปรากฏขึ้นบนกระดาษอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อกระดาษ ก็ควรจะละเว้นเนื้อที่กระดาษช่วงนั้น เพราะว่า เส้นใยที่กล่าวนี้อาจทำให้ผิวของชิ้นผลึกถูกขีดเป็นร่องอันจะทำให้ความเรียบและความเป็นเงาของพื้นผิวลดลง เมื่อเสร็จการขัดด้วยผงขัดอลูมินาแล้วก็สืบทอดการขัดเงาด้วยผงขัดเพชรต่อไป วางกระดาษเฉพาะสำหรับขัดลงบนแผ่นกระจกที่แห้งและสะอาด เทผงขัดเพชรลงไปเล็กน้อยบนแผ่นกระดาษนั้นโดยทาเป็นระยะห่างๆกันทั่วแผ่นกระดาษ วางชิ้นผลึกลงไปแล้วกดเบาๆด้วยนิ้วมือ ทำเหมือนการขัดด้วยผง ตลอดระยะเวลาที่ทำการขัดควรจะเอาชิ้นสารขึ้นมาดูเป็นครั้งๆไปจนแน่ใจที่สุดแล้วว่าพื้นผิวหน้าของชิ้นผลึกที่ขัดแล้วนั้นเป็นเงาดีสม่ำเสมอจึงหยุดการขัดได้ นำชิ้นผลึกที่ขัดแล้วไปล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์เพื่อล้างสิ่งสกปรกออกให้ได้มากที่สุด ชิ้นผลึกที่ผ่านการขัดด้วยผงขัดเพชรแล้วจะมีคราบไขมัน

ติดอยู่ ดังนั้นจึงนำชิ้นผลึกนี้ไปล้างด้วยกดล้างไขมันไตรคลอโรเอธิลีน (trichloroethelene) ติดตามด้วยอะเซโตน (acetone) และเมทานอล (methanol) ตามลำดับ จากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลายๆครั้งจนแน่ใจว่าสะอาดพอแล้วจึงเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน หลังจากนั้นก็สามารถนำเอาไปวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ได้

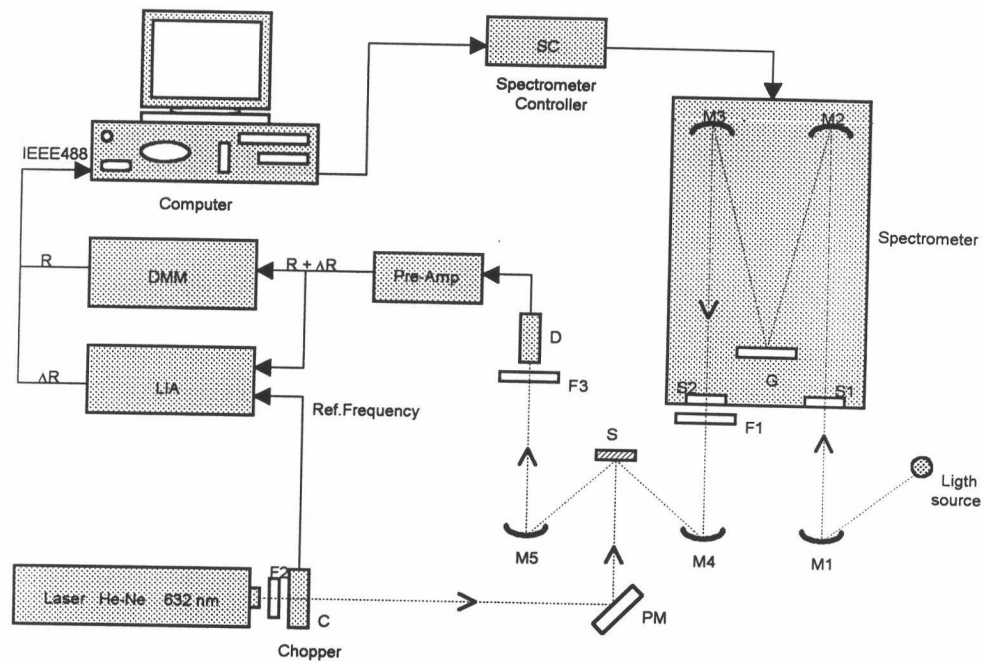
การเปิดผิวหน้าของชิ้นผลึกสารกึ่งตัวนำ

ชิ้นผลึกที่ผ่านกรรมวิธีการขัดดั่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะมีผิวหน้าเรียบและเป็นเงาพอสมควร แต่ความเรียบและความเป็นเงาของผิวผลึกนี้อาจจะไม่เพียงพอต่อการให้ผลรับของการวัดที่ชัดเจน ดังนั้น จึงต้องทำการเปิดผิวหน้าของชิ้นผลึกโดยวิธีการกัดผิว (etching) ด้วยสารละลายเคมีโบรมีนเมทานอล (bromine + methanol) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยทำให้พื้นผิวหน้าของชิ้นผลึกมีความเงาขึ้น ดังมีขั้นตอนต่อไปนี้ ผสมสารละลายเคมีโบรมีนกับเมทานอล (ในอัตรา 0.2% ของ bromine ใน 100 cm³ ของ methanol) จะได้สารละลายโบรมีนเมทานอลที่มีสีส้มค่อนข้างอ่อน นำชิ้นผลึกที่ขัดเงาเรียบร้อยแล้ววางใส่ แท่นเฉพาะรองรับชิ้นผลึกซึ่งทำด้วยเทฟลอน (teflon) โดยไม่ให้ผิวหน้าด้านเป็นเงาสัมผัสกับแท่นรองรับ จุ่มแท่นรองรับที่บรรจุชิ้นผลึกอยู่แล้วลงในสารละลายเคมิลบรอมีนเมทานอลและทิ้งไว้เป็นเวลา 5 - 10 วินาที แล้วจึงนำขึ้นมาอย่างรวดเร็วและจุ่มลงในสารละลายเจือจางเมทานอลทันทีเพื่อให้สารละลายโบรมีนเมทานอลเจือจางลงให้มากที่สุด หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลายๆครั้งจนแน่ใจว่าสะอาดดีแล้วจึงนำขึ้นมาเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน เก็บไว้ในกล่องที่สะอาดเตรียมพร้อมในการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ต่อไป ข้อควรระวัง จังหวะการนำเอาชิ้นผลึกจุ่มลงหรือนำเอา ขึ้นจากสารละลายโบรมีนเมทานอลสารละลายเจือจางเมทานอลและน้ำดีไอออไนซ์ควรจะทำอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟิล์มบางของโบรมีนเคลือบติดบนผิวของชิ้นผลึก อันจะทำให้การสะท้อนของแสงจากพื้นผิวหน้าของผลึกลดน้อยลง การผสมสารละลายเคมีโบรมีนเมทานอลทุกครั้งควรจะทำอย่างระมัดระวังและกระทำในสถานที่ที่สามารถถ่ายเทอากาศได้ เช่น ในตู้ดูดควัน (fume hood) เพราะว่า โบรมีนเป็นสารเคมีที่อันตรายต่อสุขภาพมากที่สุด ควรสวมถุงมืออย่างให้หนาพอและใส่หน้ากากชนิดป้องกันไอพิษด้วย

ระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์

ระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่ใช้ในการวัดครั้งนี้ถูกปรับปรุงจากสภาพเดิมโดย

นายณรงค์ แสงแก้ว (นิสิตปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์) โดยใช้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของเครื่องควบคุมสเปกโตรมิเตอร์ และเก็บข้อมูลของการวัด



รูปที่ 4.2 แสดงระบบวัดไฟโตรีเฟลกแทนซ์

รูปที่ 4.2 แสดงระบบวัดไฟโตรีเฟลกแทนซ์ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) ซึ่งเป็นหลอดไฟทังสเตน (tungsten filament light bulb) ขนาด 250 W

สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ซึ่งใช้เป็นเครื่องกำเนิดแสงเอกรงค์

กระจกเว้า (concave mirrors) M1 , M2 , M3 , M4 และ M5

ช่องแคบเดี่ยว (single slit) S1 และ S2

เกรตติง G (grating)

แผ่นกรองแสง (long passed filters) F1 , F2 และ F3

กระจกราบ PM

เครื่องตัดแสง C (chopper)

หัววัดแสง D ซึ่งเป็นหัววัดแสงชนิดเจอร์มาเนียม (germanium detector)
 เครื่องควบคุมสเปกโทรมิเตอร์ SC (spectrometer controller)
 เครื่องขยายสัญญาณขั้นต้น Pre-Amp. (pre-amplifier)
 ลอคอินแอมพลิไฟเออร์ LIA (lock-in amplifier)
 โวลต์มิเตอร์ DMM (digital multimeter)
 เครื่องให้กำเนิดลำแสงเลเซอร์ (laser He-Ne 632 nm) ซึ่งมีความยาวคลื่น 6328 อังสตรอม
 คอมพิวเตอร์ (personal computer)

แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกสะท้อนโดยกระจกเว้า M1 และผ่านไปยังช่องแคบเดี่ยว S1 แล้วจะถูกสะท้อนต่อโดยกระจกเว้า M2 ไปยังเกรตติง G ซึ่งจะทำหน้าที่ให้กำเนิดแสงเอกรงค์ โดยที่เกรตติงจะแยกแสงออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ ตกกระทบบนกระจกเว้า M3 สะท้อนไปยังกระจกเว้า M4 โดยผ่านช่องแคบเดี่ยว S2 และแผ่นกรองแสง F1 หลังจากนั้นแสงจะถูกสะท้อนไปตกกระทบบนตำแหน่งวางชิ้นผลึกตัวอย่าง S แล้วสะท้อนต่อไปยังกระจกเว้า M5 ผ่านแผ่นกรองแสง F3 เข้าไปตกกระทบบนหัววัดแสง D เพื่อให้แสงสะท้อนจากชิ้นผลึกตัวอย่างถูกมอดูเลตจะต้องใช้ลำแสงเลเซอร์เข้าไปรบกวน โดยยิงลำแสงเลเซอร์ผ่านแผ่นกรองแสง F2 และผ่านเครื่อง ตัดแสง C ไปยังกระจกราบ PM แล้วสะท้อนไปตกกระทบบนผิวหน้าที่เป็นของชิ้นผลึกตัวอย่างสัญญาณที่ถูกรบกวน (ΔR) และไม่ถูกรบกวน (R) จะถูกเก็บด้วยหัววัดแสง D แล้วขยายให้สัญญาณโตขึ้นด้วยเครื่องขยายสัญญาณขั้นต้น Pre-Amp. หลังจากนั้นส่งเข้าเครื่อง ลอคอินแอมพลิไฟเออร์ LIA เพื่อคัดเลือกแต่สัญญาณที่มีความถี่เดียวกันกับเครื่องตัดแสงเท่านั้น พร้อมทั้งขยายสัญญาณให้อยู่ในช่วง 0 - 10 V สัญญาณจะถูกส่งผ่านระบบเชื่อมโยงให้แก่คอมพิวเตอร์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและนำไปวิเคราะห์ต่อไป

การวัดโพโตรีเฟลกแทนซ์

การมอดูเลตก็คือ การรบกวนระบบเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมนี้สามารถนำมาวิเคราะห์โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้

การฉายแสงเลเซอร์เข้าไปยังสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการมอดูเลตขึ้นในสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกมาจากสารเนื่องจากสนามไฟฟ้าในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอนุพันธ์อันดับสามของฟังก์ชันไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำที่ไม่มอดูเลต ในกรณีที่สาร

กึ่งตัวนำเป็นก้อนผลึก (bulk) ฟังก์ชันไดอิเล็กทริกที่ไม่มอดูเลตสำหรับ 3 มิติจะถูกนำไปใช้และจะได้สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์เป็นฟังก์ชันของพลังงานโฟตอน $E = \hbar\omega$ ดังสมการ [39]

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \text{Re} \left[C e^{i\theta} (E - E_g + i\Gamma)^{-n} \right] \quad (4.38)$$

สำหรับใน 3 มิติ $n = 5/2$

โดยที่ C คือ แอมพลิจูด

E_g คือ พลังงานช่องว่าง

Γ คือ ความกว้างของยอดแหลม หรือ พารามิเตอร์บรอดเดนิง์

θ คือ แฟกเตอร์เฟสซึ่งเป็นตัวกำหนดความไม่สมมาตรของยอดแหลม

ทั้งหมดนี้คือพารามิเตอร์ (band structure parameters) เพื่อศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกเอาผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 มาทำการวัดโฟตรีเฟลกแทนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 12, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280 และ 300 เคลวิน ตามลำดับ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในผลึกกึ่งตัวนำที่ปลูกได้ โดยการปรับอุณหภูมิที่เครื่องควบคุม อุณหภูมิ (closed cycle refrigerator system of air products) การวัดแต่ละครั้งจะเก็บค่าโฟตรีเฟลกแทนซ์ทุกๆ 1 อังสตรอม แต่ละจุดเก็บข้อมูลเป็นจำนวน 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณและเก็บเป็นข้อมูลไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ต่อไป การเก็บข้อมูลหนึ่งครั้งจะใช้เวลาประมาณ 3 ถึง 4 วินาทีหรือเดินเครื่อง สเปกโตรมิเตอร์ 1 อังสตรอมต่อ 3 ถึง 4 วินาที

นำชิ้นผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ซึ่งมีเนื้อที่ประมาณ 1 cm^2 และความหนาประมาณ 0.7 mm ที่ได้ผ่านการขัดผิวหน้า (ด้วยกระดาษทรายน้ำ ผงขัด และ ผงเพชรตามลำดับ ตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นของบทนี้) ให้เป็นเงาดีแล้ว มาติดตั้งแทนวางขึ้นสารในห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) โดยให้ผิวหน้าด้านที่เป็นเงาอยู่ด้านนอก เปิดระบบปั๊มเพื่อทำการสูบน้ำออกจากห้องสุญญากาศและเดินเครื่องควบคุมอุณหภูมิจนให้มีความดันในอันดับ 1.5×10^{-4} Torr จากนั้นเดินเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลง การปั๊มสูบน้ำออกต้องทำเป็นระยะ ๆ ตลอดระยะเวลาการทดลองเมื่อพบว่าความดันในห้องสุญญากาศหากสูงกว่าความดันที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้มีละอองน้ำเกาะที่หน้าต่างแก้วควอทซ์ที่แสงส่องผ่านขณะทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้อันผิดพลาดไป เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 70 K แล้วก็

ปิดวาล์วที่เชื่อมต่อระบบกับปั๊มสุญญากาศ เนื่องจากระบบสามารถรักษาสุญญากาศไว้ได้ด้วยตนเอง ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (12K) จากนั้นจึงเริ่มทำการวัดจากอุณหภูมิต่ำขึ้นมาที่อุณหภูมิสูงตามต้องการ

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ตั้งแต่ความยาวคลื่น 9000 อังสตรอม จนถึง 14400 อังสตรอม และเก็บข้อมูลทุกๆ 1 อังสตรอม ได้ข้อมูลทั้งหมด 2701 จุดต่อการวัด 1 ชุดที่อุณหภูมิต่ำ

จากการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ดังกล่าวนี้จะได้สัญญาณ 2 ส่วนคือ สัญญาณ R เป็นส่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนแสง และ ΔR เป็นส่วนของการสะท้อนแสงเนื่องจากการมอดูเลต ซึ่งสามารถแสดงผลของบางชุดเป็นตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะถูกนำมาหารกัน ซึ่งจะได้กราฟที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta R/R$ กับพลังงานโฟตอน ดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 พบว่าในสเปกตรัมของโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ($\Delta R/R$) ที่ได้มีส่วนสูงปรากฏขึ้นมาเป็นยอดแหลม (peak) เห็นได้อย่างชัดเจน และยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความสูงและตำแหน่งของยอดแหลมไปกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

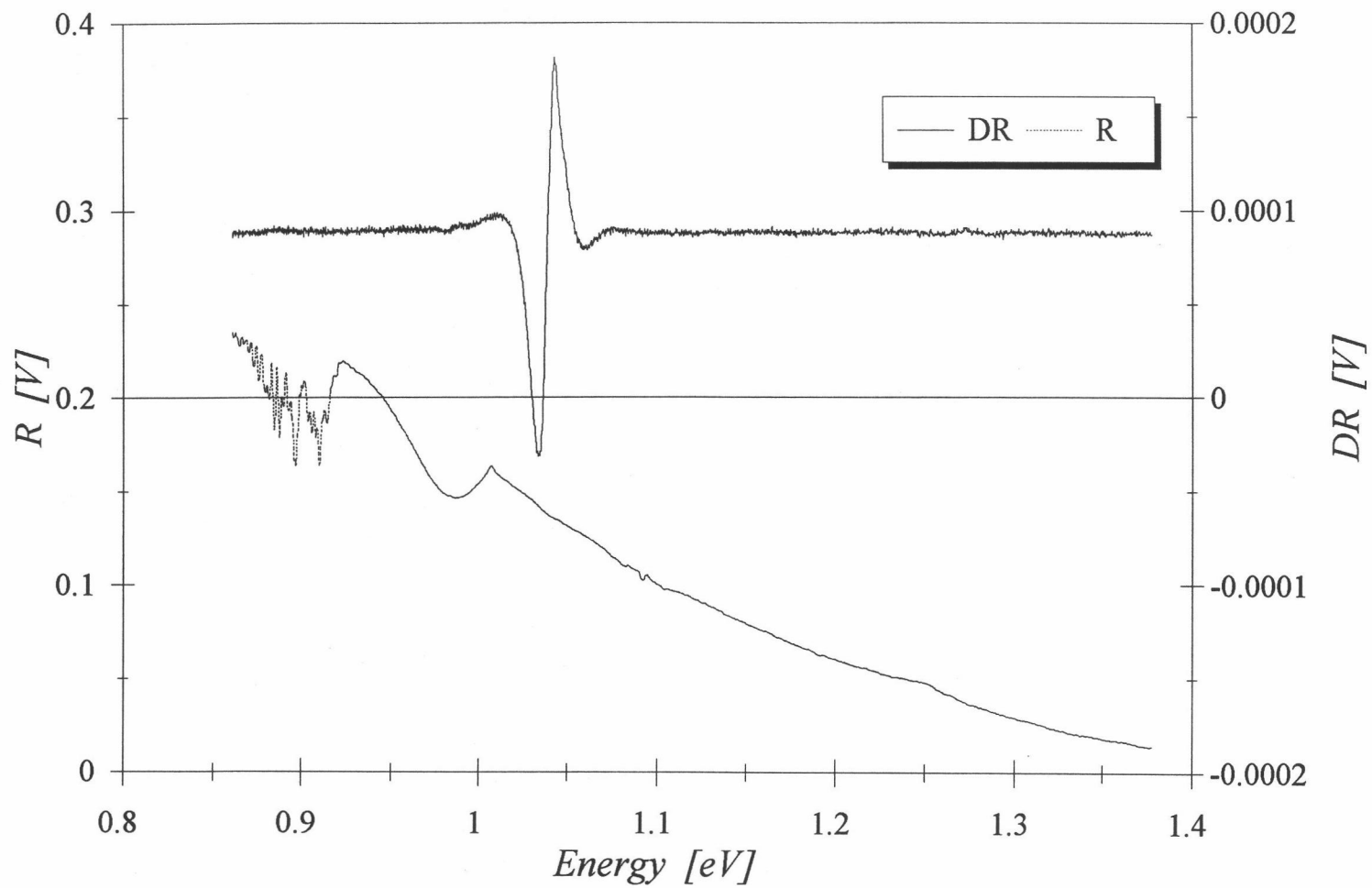
จากนั้นนำข้อมูล $\Delta R/R$ ที่ได้มาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น C, θ , Eg และ Γ โดยนำใช้โปรแกรมฟิตติง (fitting program) ด้วยสมการ

$$\frac{\Delta R}{R}(\Phi) = \frac{C \sin^{5/2} \Phi}{\Gamma^{5/2}} \cos\left(\frac{5}{2}\Phi - \theta\right) \quad (4.39)$$

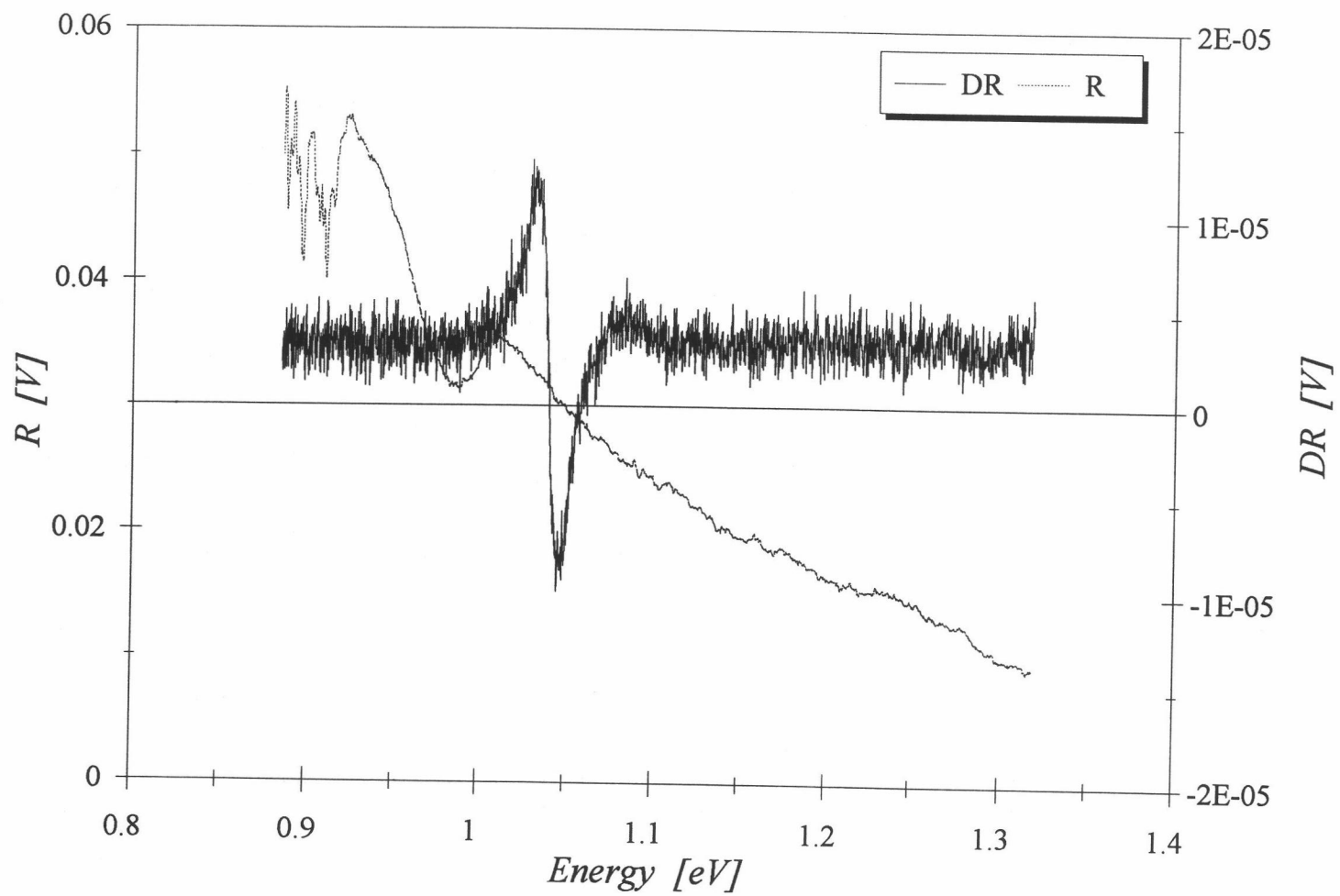
ซึ่งเป็นส่วนจริง (real part) ของสมการที่ (4.38) โดยที่ $\Phi = \arctan\left[\frac{\Gamma}{E-E_g}\right]$ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกกึ่งตัวนำซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชั้นผลึกโปรแกรมฟิตติงข้อมูล $\Delta R/R$ ที่ใช้ครั้งนี้สามารถฟิตได้ในกรณี 1 และ 2 แทรนซิชั่นของพาหะการฟิตจะแยกออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การฟิตครั้งที่หนึ่งจะเป็นการฟิตข้อมูล (data) ของ $\Delta R/R$ ที่ได้จากการวัดด้วยการคำนวณ Cal1 (calculation 1) จากนั้นจะได้ข้อมูล Data - Cal1 ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จะทำการฟิตครั้งที่สองด้วยการคำนวณ Cal2 (calculation 2) ผลรวมของ Cal1 กับ Cal2 คือผลของการฟิตข้อมูลของยอดแหลมนั้นเอง จากการสังเกตรูปทรงของยอดแหลมที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่วัดได้จำนวน 19 ชุดตามการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ (เริ่มจากอุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูง) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำไม่สามารถที่จะฟิตด้วยกรณี 1 แทรนซิชั่นได้ เพื่อเป็นการยืนยันและแน่ใจ ได้นำเอาชั้นผลึกตัวอย่างออกมาล้างและทำความสะอาดตามขั้นตอนดังที่กล่าวมาข้างต้นของบดนี้ แล้วเริ่มวัดคืนเป็นครั้งที่สอง ซึ่งได้ผลการวัด

เหมือนเดิมทุกอย่าง หลังจากนั้นก็นำข้อมูลสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ $\Delta R/R$ ที่ได้มาทำการพิต โดยเปรียบเทียบด้วยการพิตในกรณี 1 แทรนซิชั่นกับกรณี 2 แทรนซิชั่น จาก รูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 ที่แสดงผลของการพิตข้อมูล $\Delta R/R$ ที่อุณหภูมิ 50, 100 และ 300 K ด้วยกรณี 1 แทรนซิชั่น ส่วนรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 แสดงผลของการพิตข้อมูล $\Delta R/R$ ที่อุณหภูมิ 50, 100 และ 300 K ด้วยกรณี 2 แทรนซิชั่น เห็นได้ว่าการพิตข้อมูล $\Delta R/R$ ที่ 50 K และ 100 K ด้วยกรณี 2 แทรนซิชั่นมีความเหมาะสมและเป็นไปได้มากกว่าการพิตด้วยกรณี 1 แทรนซิชั่น พารามิเตอร์ที่ได้ทั้งสองชุดมีค่าต่างกัน นั่นแสดงว่าเกิดมียอดแหลมสองยอดขึ้นอยู่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะสังเกตเห็นยอดแหลมทั้งสองแยกออกจากกันอย่างชัดเจนในสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่วัดได้ ส่วนว่าผลการพิตข้อมูล $\Delta R/R$ ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยทั้งกรณี 1 และ 2 แทรนซิชั่นได้รับผลใกล้เคียงกัน พารามิเตอร์ทั้งสองชุดที่ได้จากการพิตด้วย 2 แทรนซิชั่นนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถที่จะพิตด้วย 1 แทรนซิชั่นได้ จากการพิตข้อมูลดังกล่าวจะได้ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังตารางที่ 4.1 โดยเฉพาะค่าของ E_g จะบอกตำแหน่งของยอดแหลมในสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 4.15(ก) และ 4.15(ข) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของยอดแหลมทั้งความสูงและทั้งตำแหน่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยที่ตำแหน่งของยอดแหลมจะสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 12 K ถึง 160 K หลังจากนั้นตำแหน่งของยอดแหลมจะค่อยๆลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 160 K จนถึง 300 K

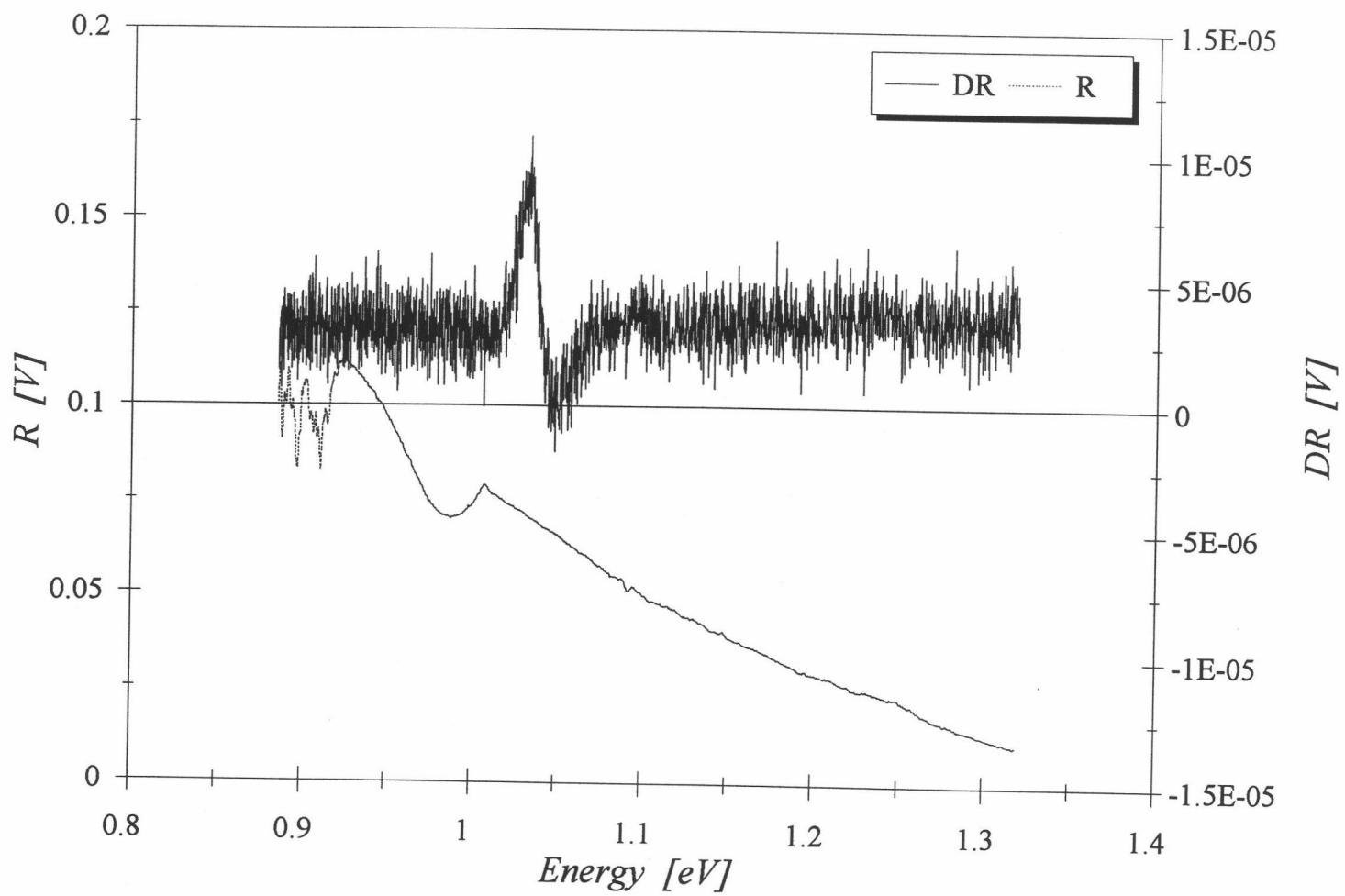
นำค่าพารามิเตอร์ E_g , Γ และ θ ที่พิตได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มาเขียนเป็นกราฟให้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 พบว่า พารามิเตอร์ทั้งสองชุดที่พิตได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างสอดคล้องกันตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงว่ายอดแหลมทั้งสองยอดเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปกับอุณหภูมิจริง



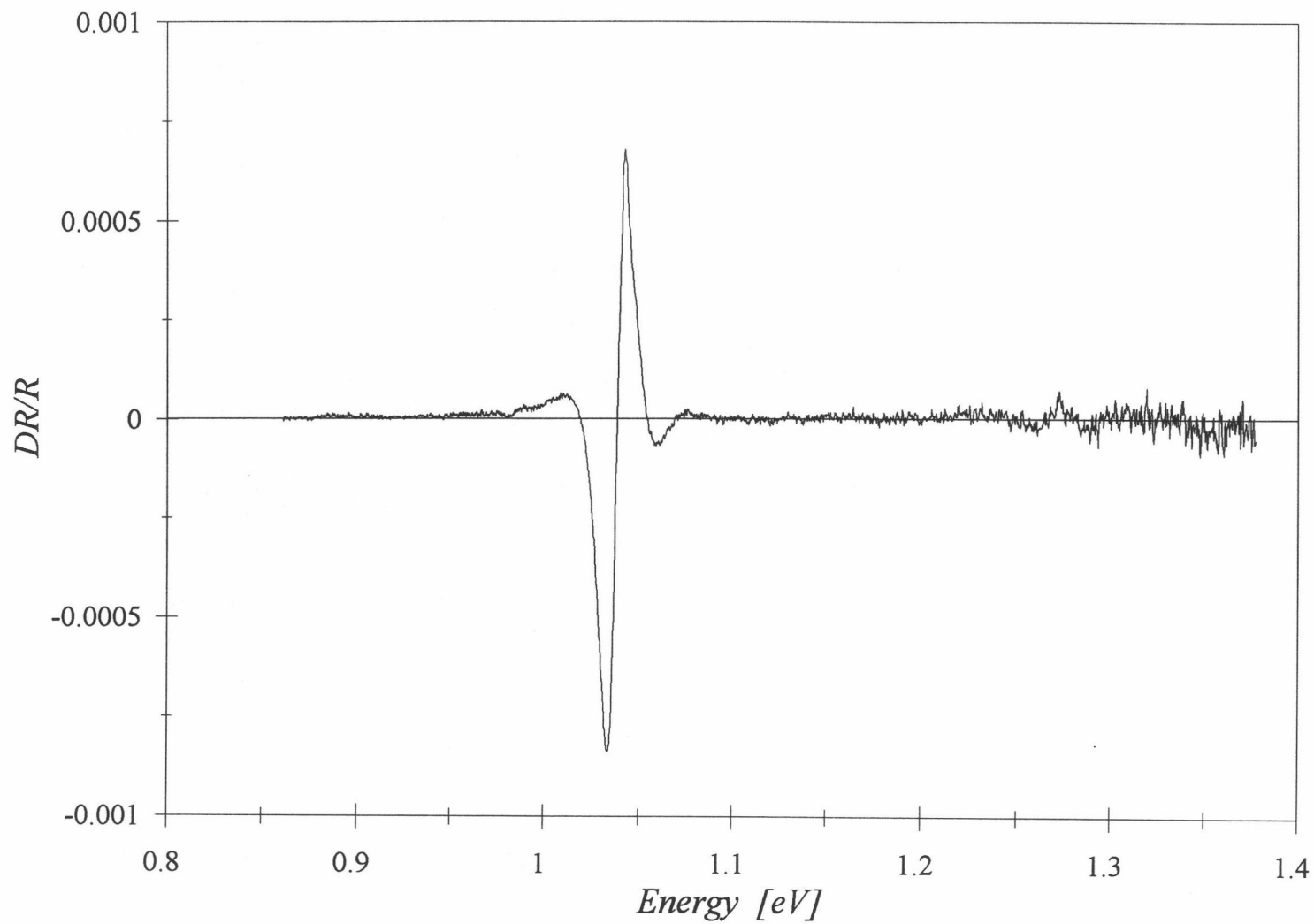
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ ΔR กับพลังงานของโฟตอน
จากการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 30 K



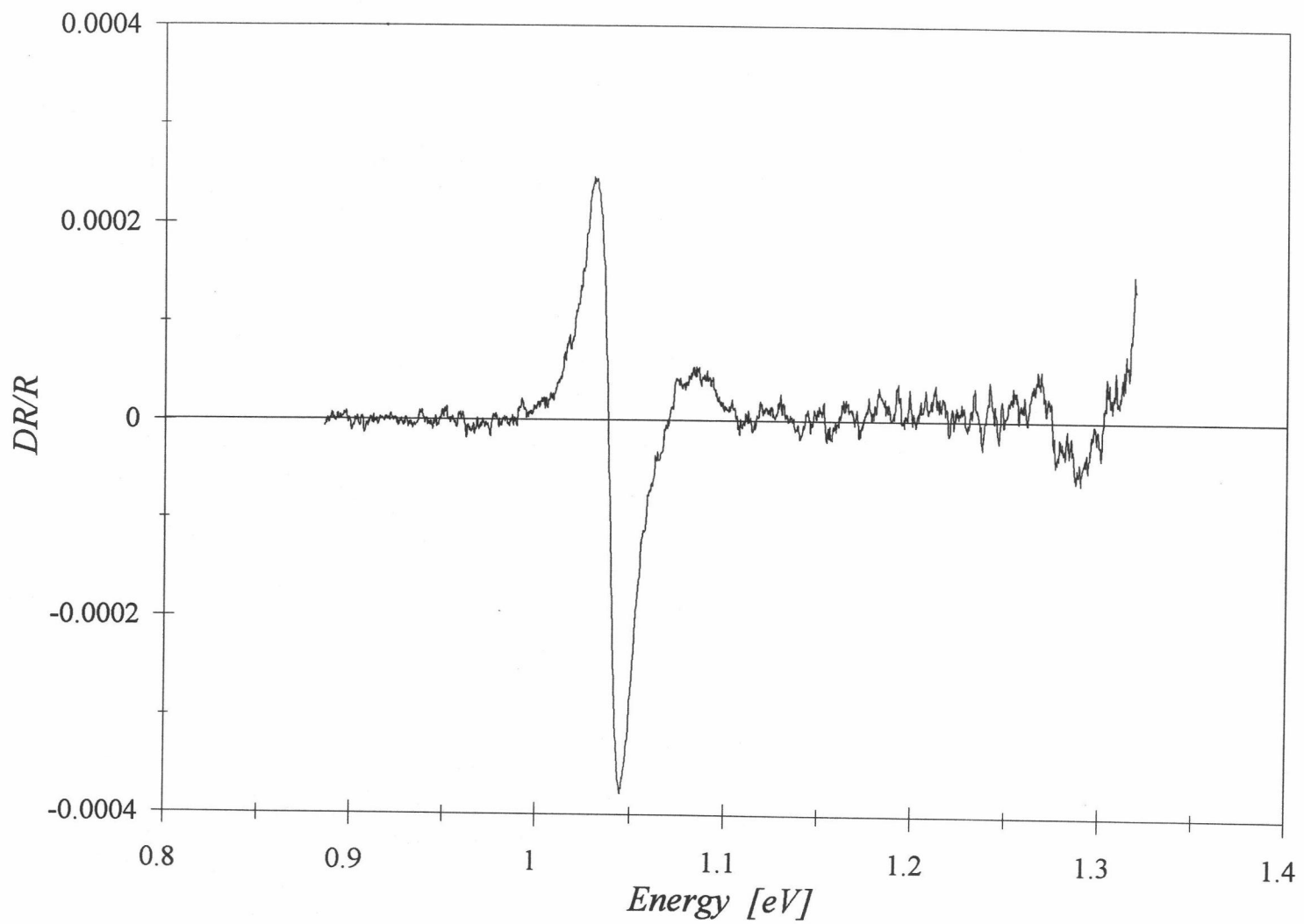
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ ΔR กับพลังงานของโฟตอน
จากการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 100 K



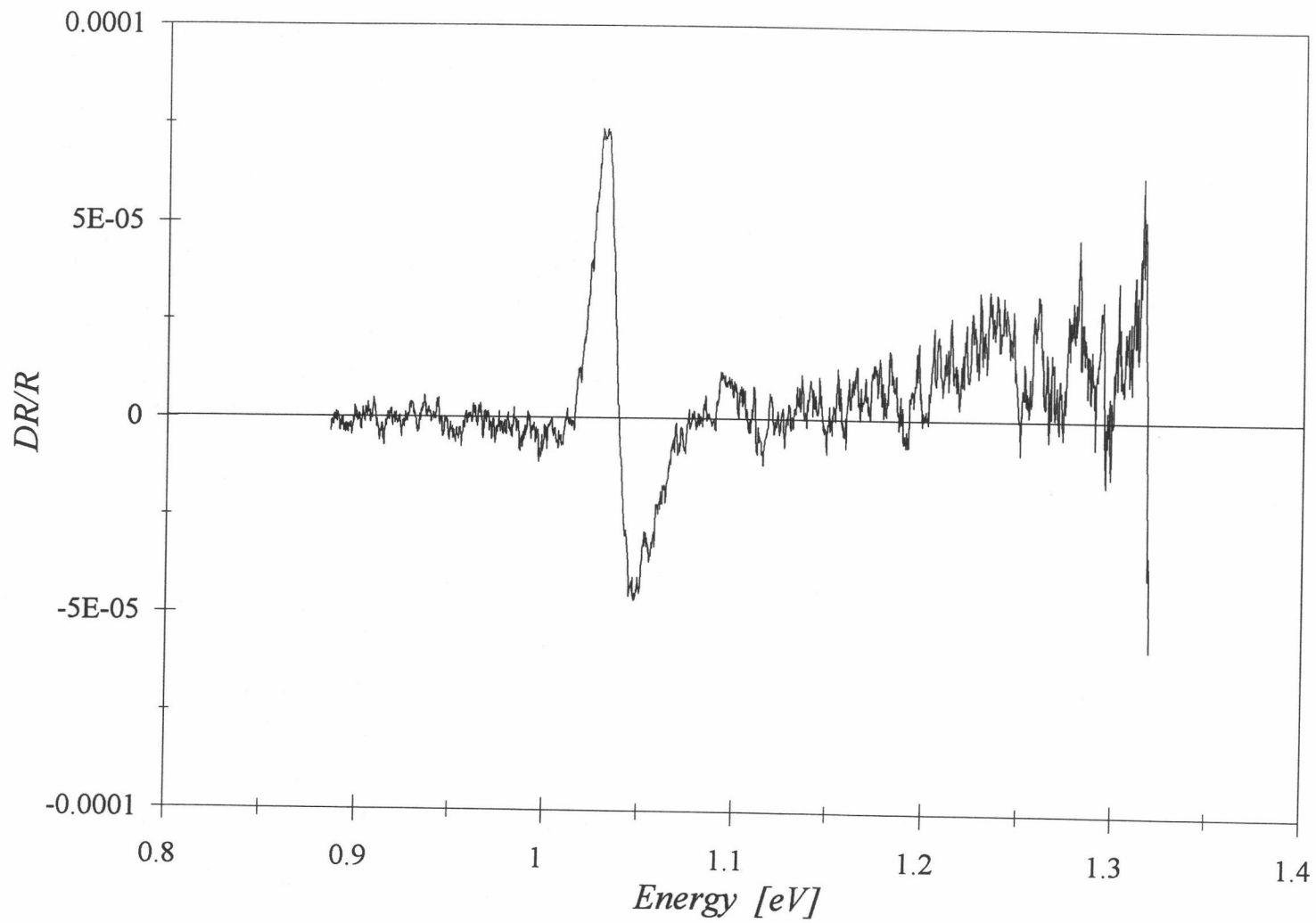
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ ΔR กับพลังงานของโฟตอน
จากการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 200 K



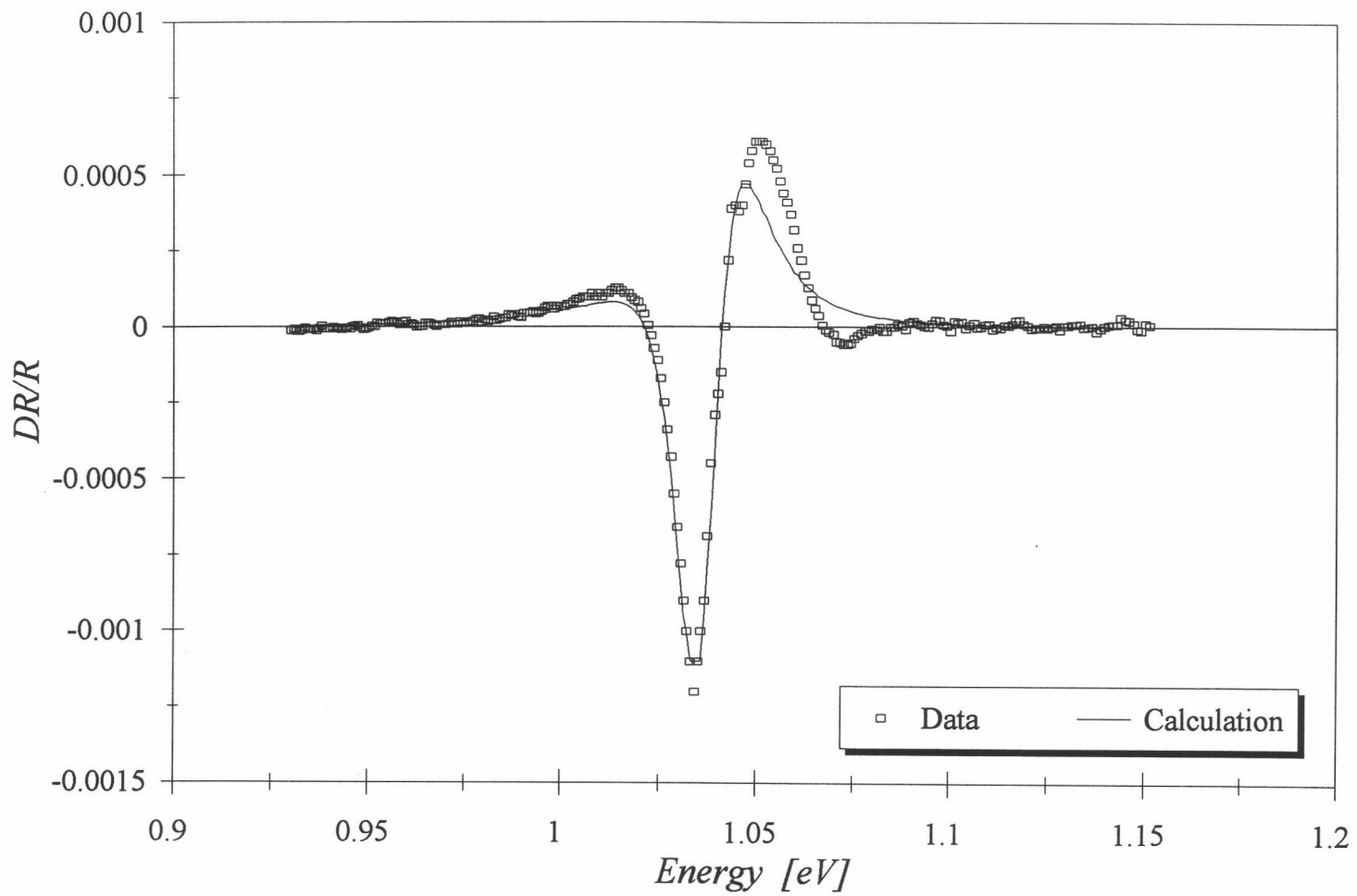
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta R/R$ กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด
โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 30 K



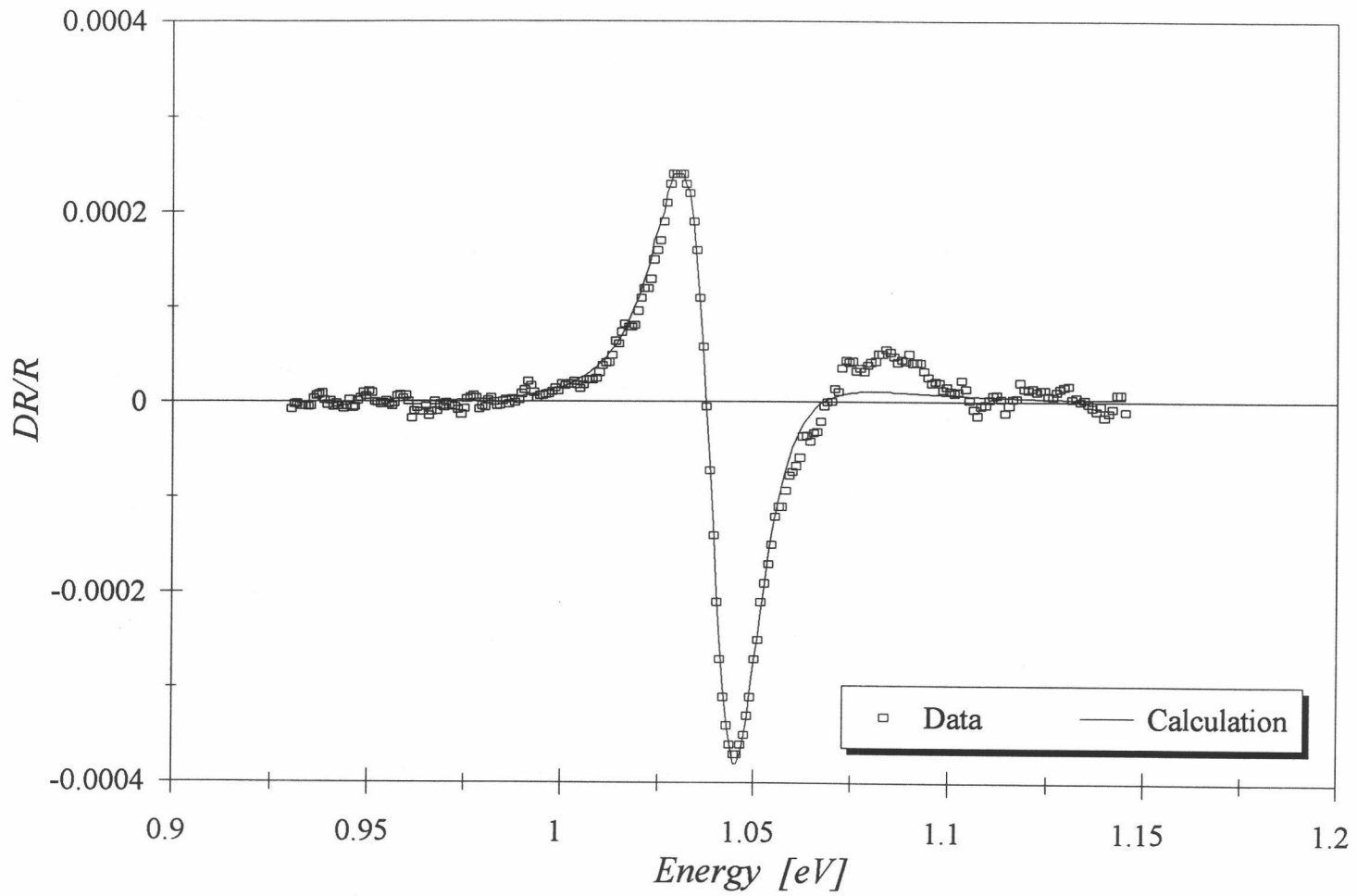
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta R/R$ กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด
โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISa3 ที่อุณหภูมิ 100 K



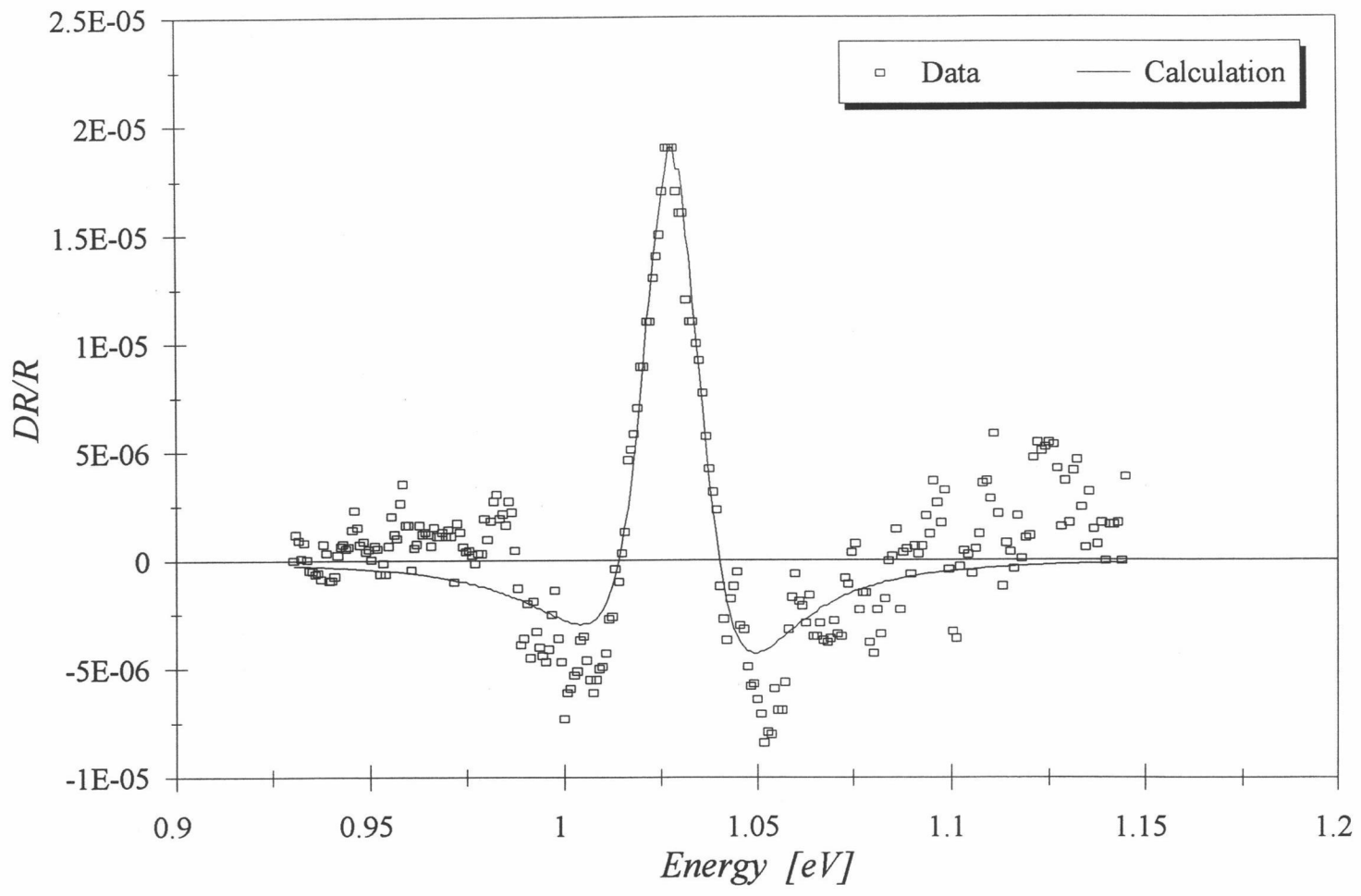
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta R/R$ กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด
โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 200 K



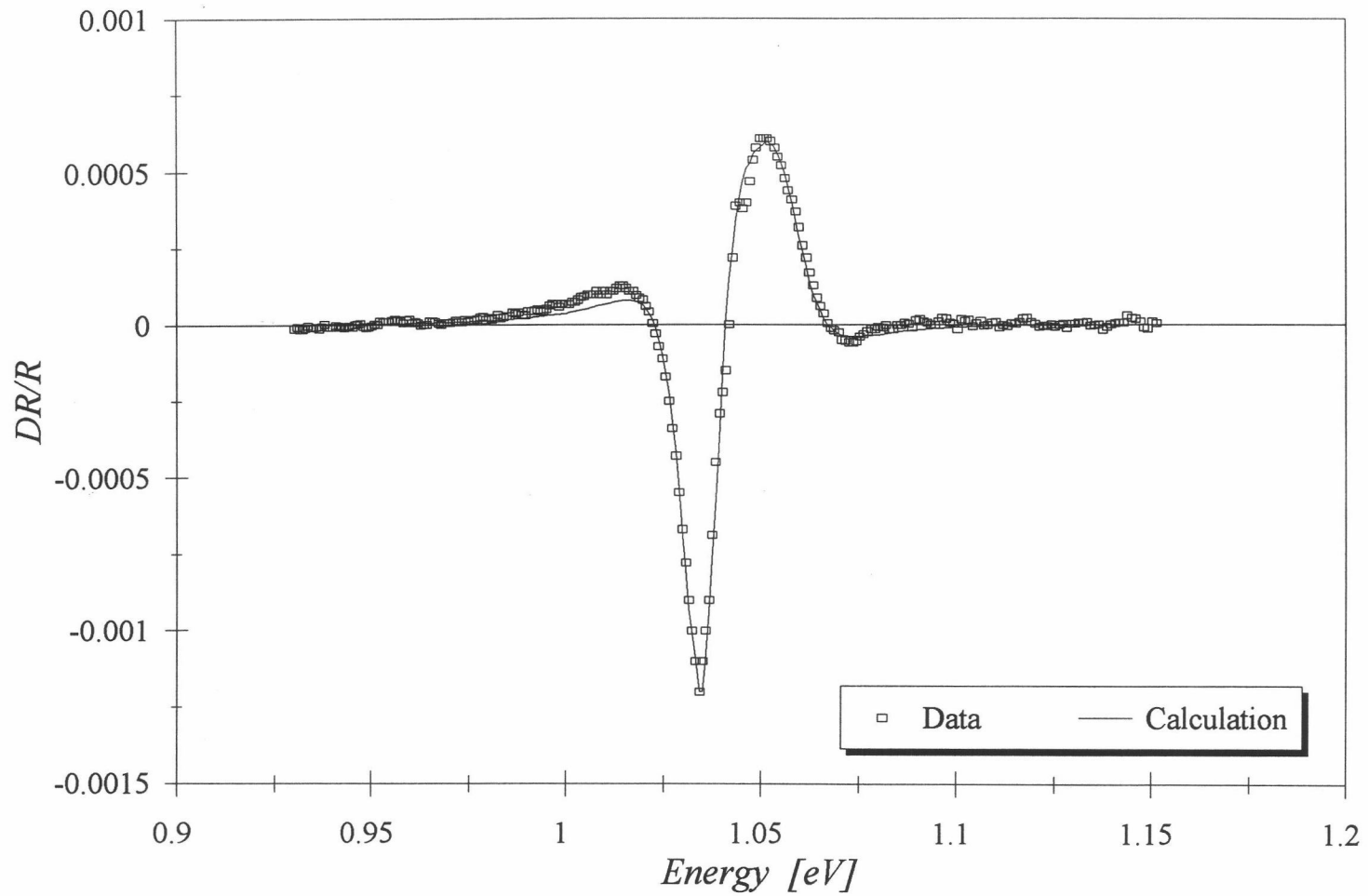
รูปที่ 4.9 แสดงผลการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 50 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิงกรณี 1 แทรนซิชั่น



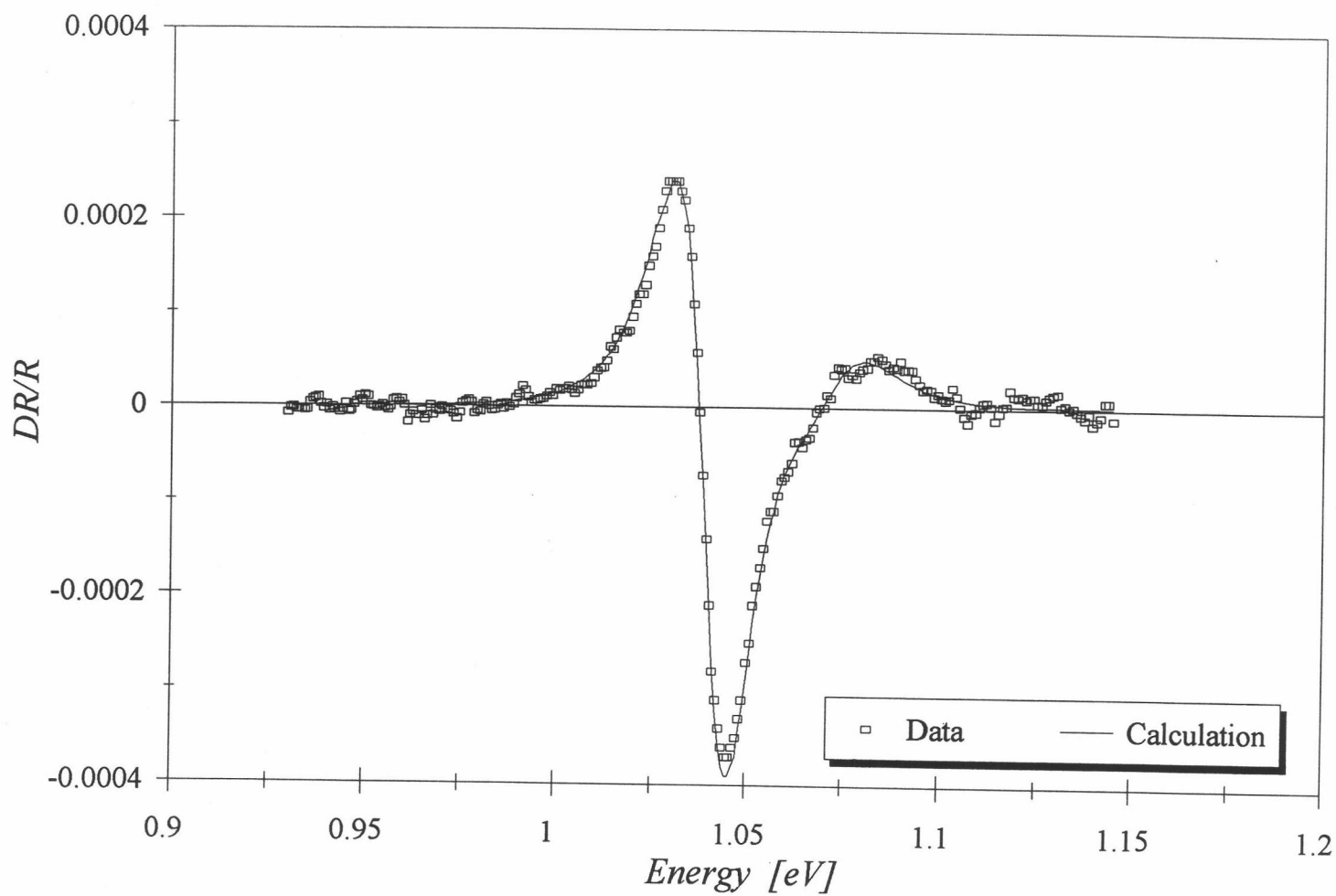
รูปที่ 4.10 แสดงผลการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึก กิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 100 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิงกรณี 1 แทรนซิชั่น



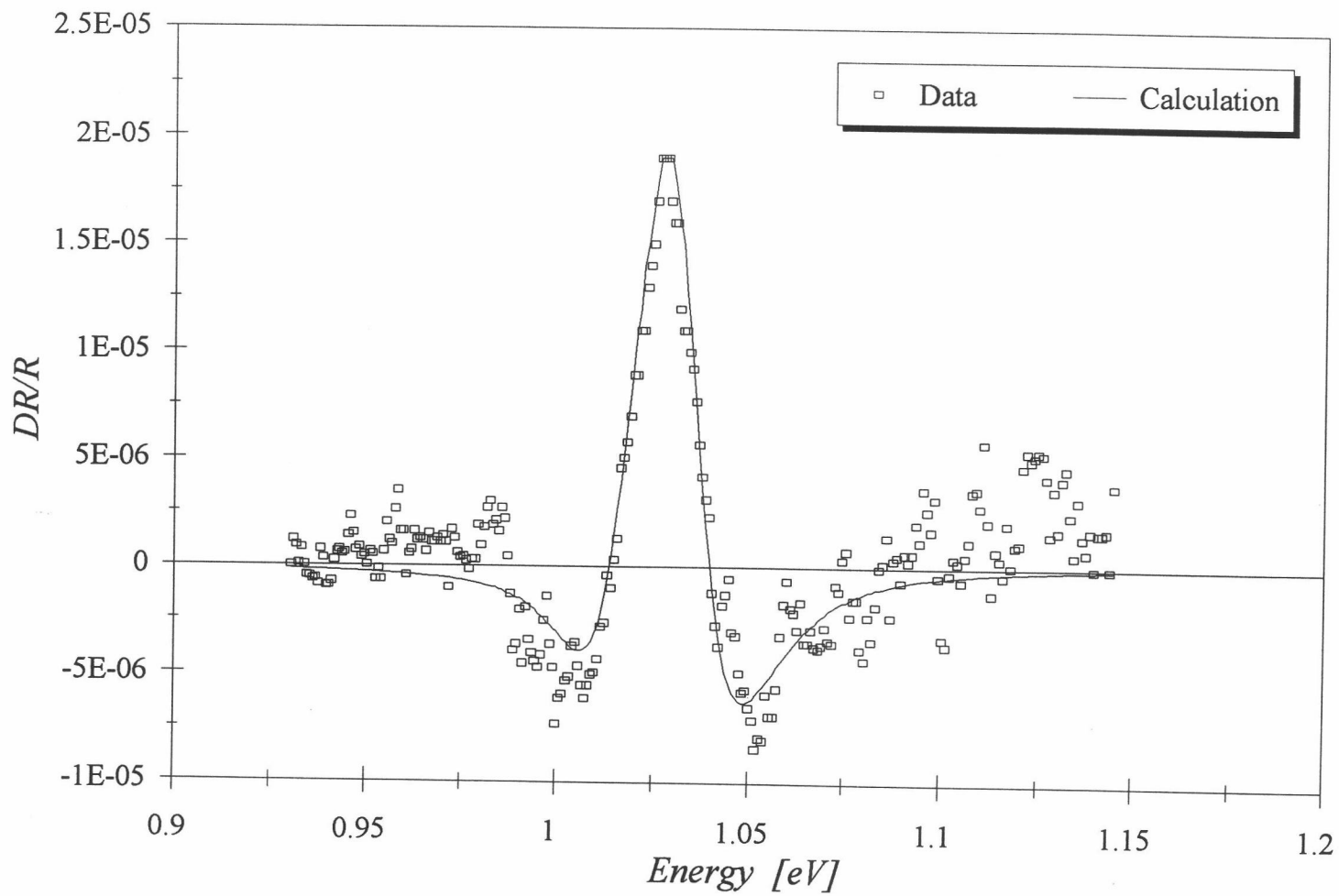
รูปที่ 4.11 แสดงผลการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึก กิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิงกรณี 1 แทรนซิชั่น



รูปที่ 4.12 แสดงผลการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึก กิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 50 K ด้วยโปรแกรมฟิตติ้งกรณี 2 แทรนซิชั่น



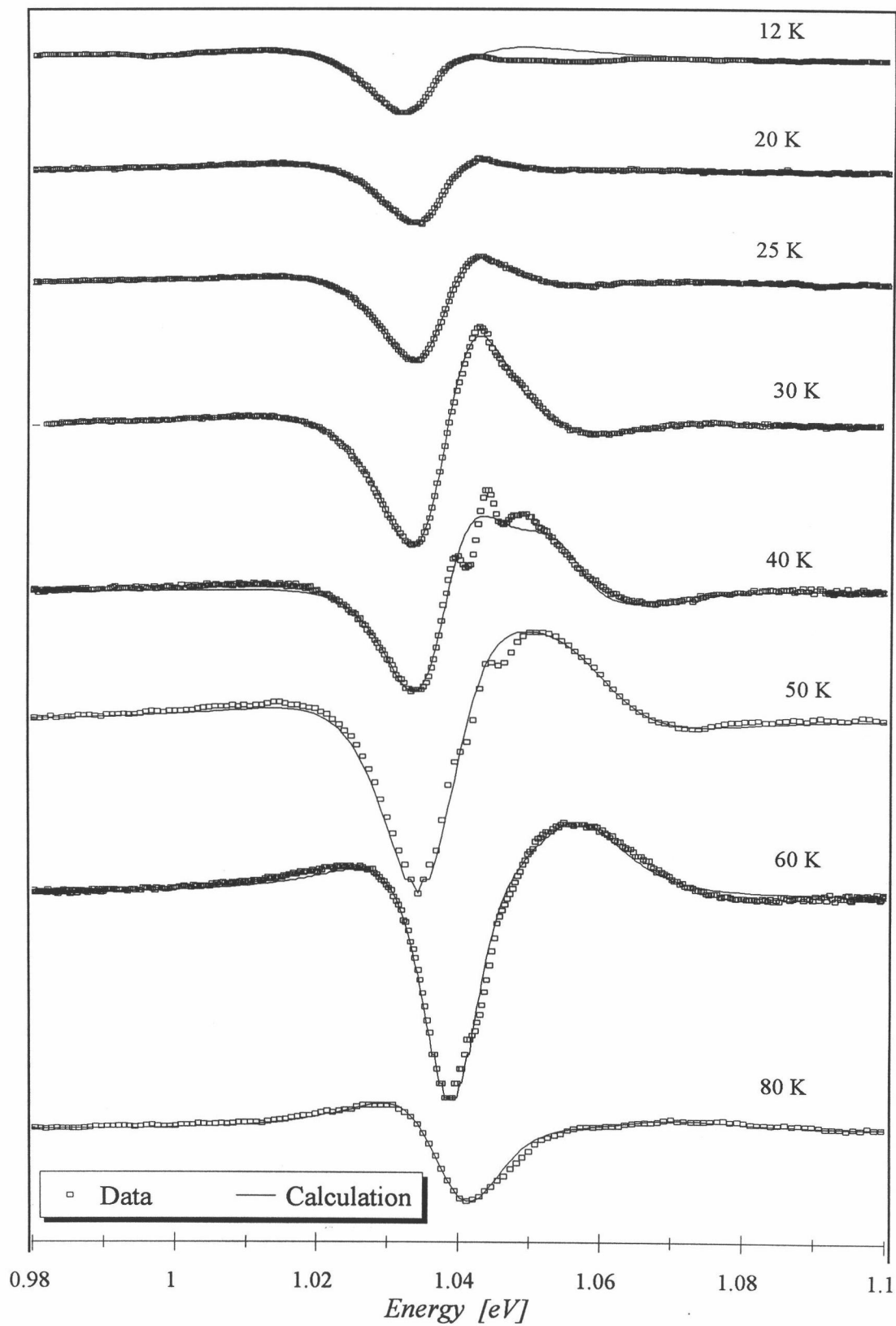
รูปที่ 4.13 แสดงผลการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึก กิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 100 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิงกรณี 2 แทรนซิชั่น



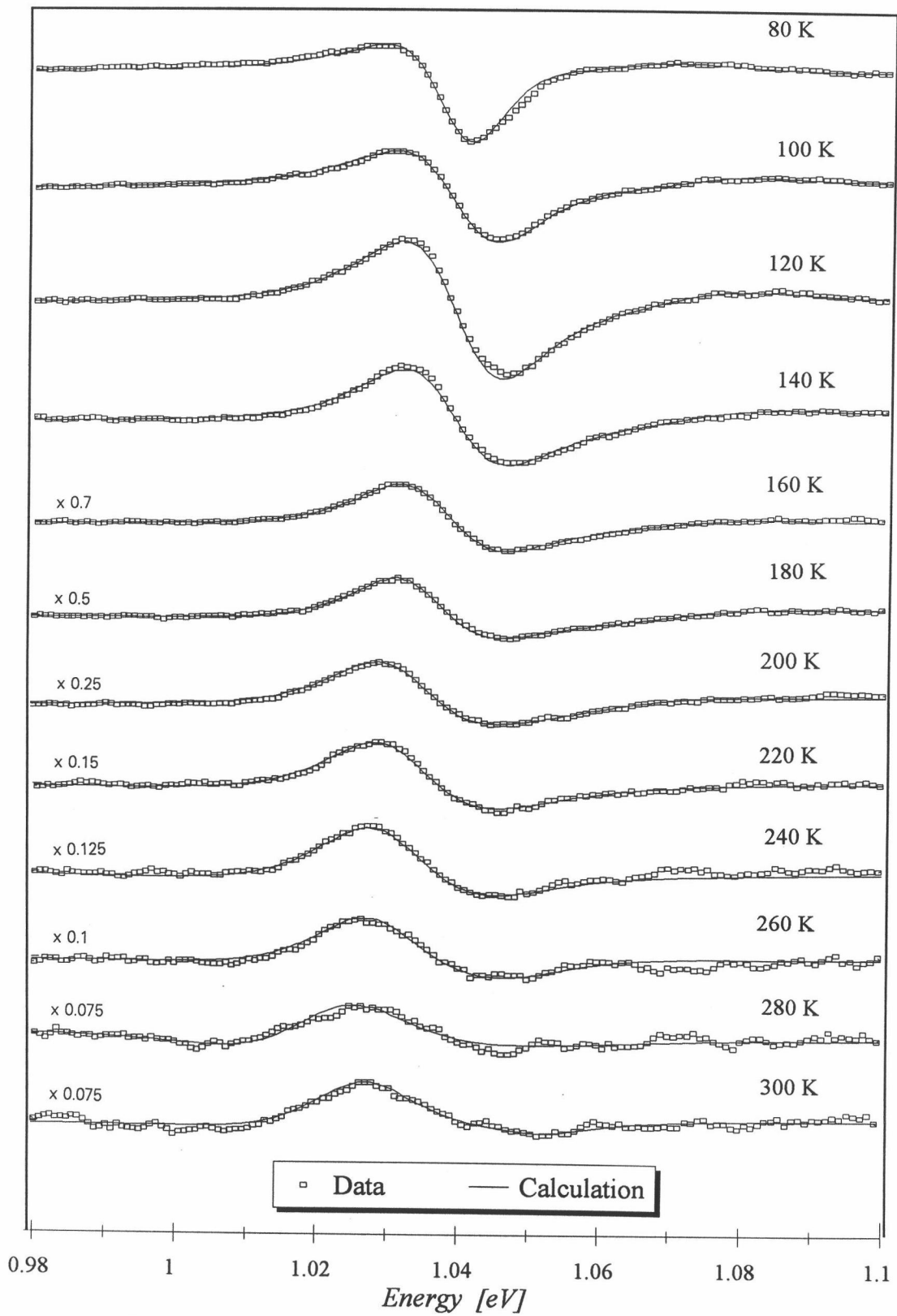
รูปที่ 4.14 แสดงผลการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึก กิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยโปรแกรมฟิตติงกรณี 2 แทรนซิชั่น

อุณหภูมิ (K)	ค่าของพารามิเตอร์					
	Eg1 (eV)	Eg2 (eV)	Γ_1	Γ_2	θ_1	θ_2
12	1.033	1.038	0.00597	0.01343	1.048	4.293
20	1.033	1.037	0.00921	0.01954	3.314	5.393
25	1.037	1.042	0.01024	0.02662	3.569	5.113
30	1.038	1.047	0.01033	0.02753	3.468	5.351
40	1.037	1.055	0.01615	0.01853	2.703	6.102
50	1.036	1.055	0.01127	0.01488	1.304	4.191
60	1.040	1.056	0.00988	0.01403	0.977	3.326
80	1.040	1.066	0.01153	0.01739	0.176	2.709
100	1.040	1.073	0.01455	0.02023	-0.329	2.787
120	1.040	1.072	0.01444	0.02272	-0.632	2.718
140	1.039	1.073	0.01490	0.02665	-0.878	2.554
160	1.038	1.075	0.01524	0.02665	-1.140	2.954
180	1.036	1.068	0.01483	0.02719	-1.342	1.959
200	1.034	1.060	0.01622	0.02642	-1.390	1.645
220	1.033	1.054	0.01714	0.02719	-1.480	1.959
240	1.031	1.049	0.01806	0.02494	-1.748	2.064
260	1.029	1.047	0.01760	0.02410	-1.968	0.890
280	1.025	1.045	0.01933	0.02353	-2.634	0.198
300	1.015	1.032	0.01804	0.01917	-4.410	-1.679

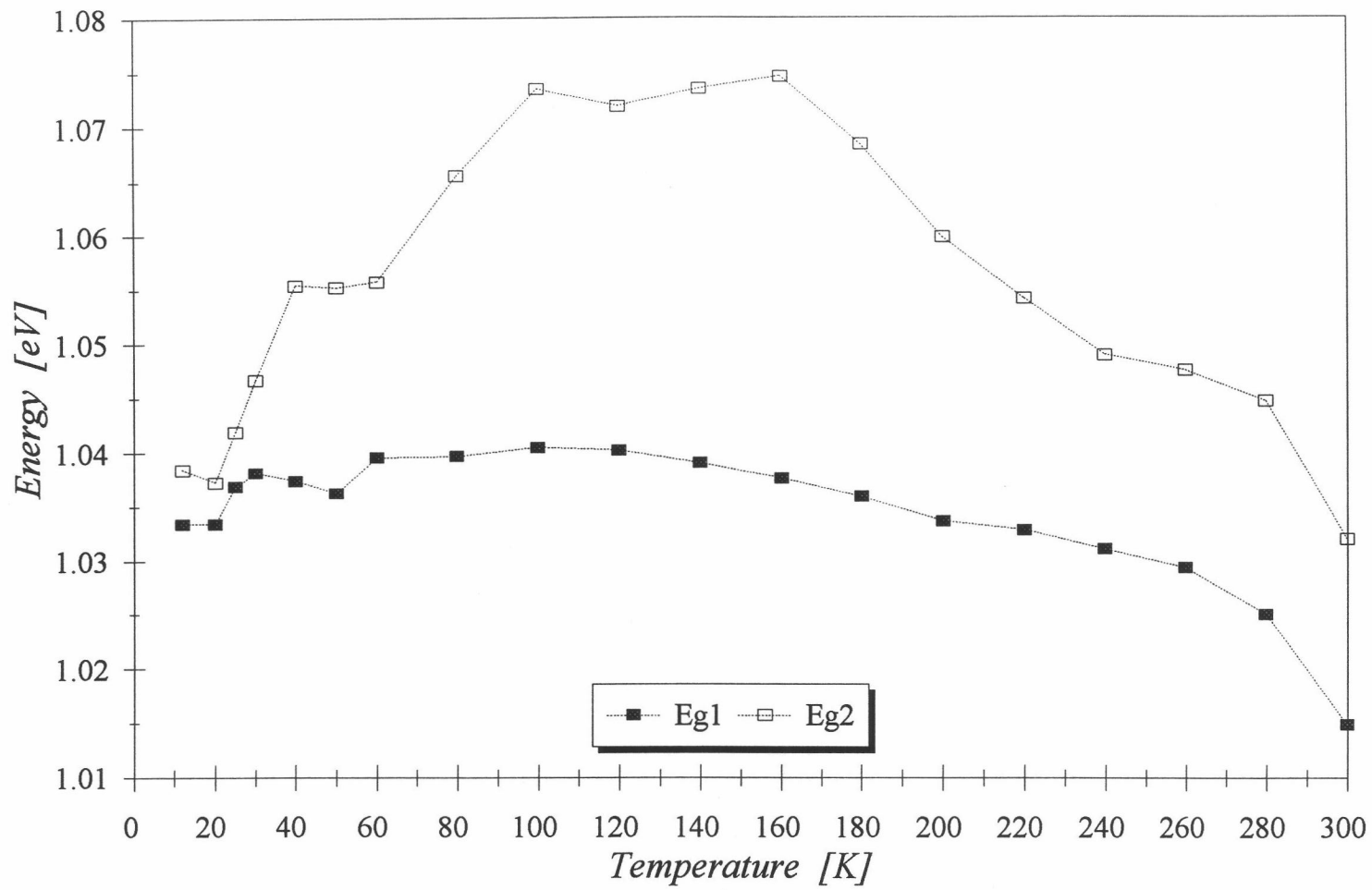
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตข้อมูล
ยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ



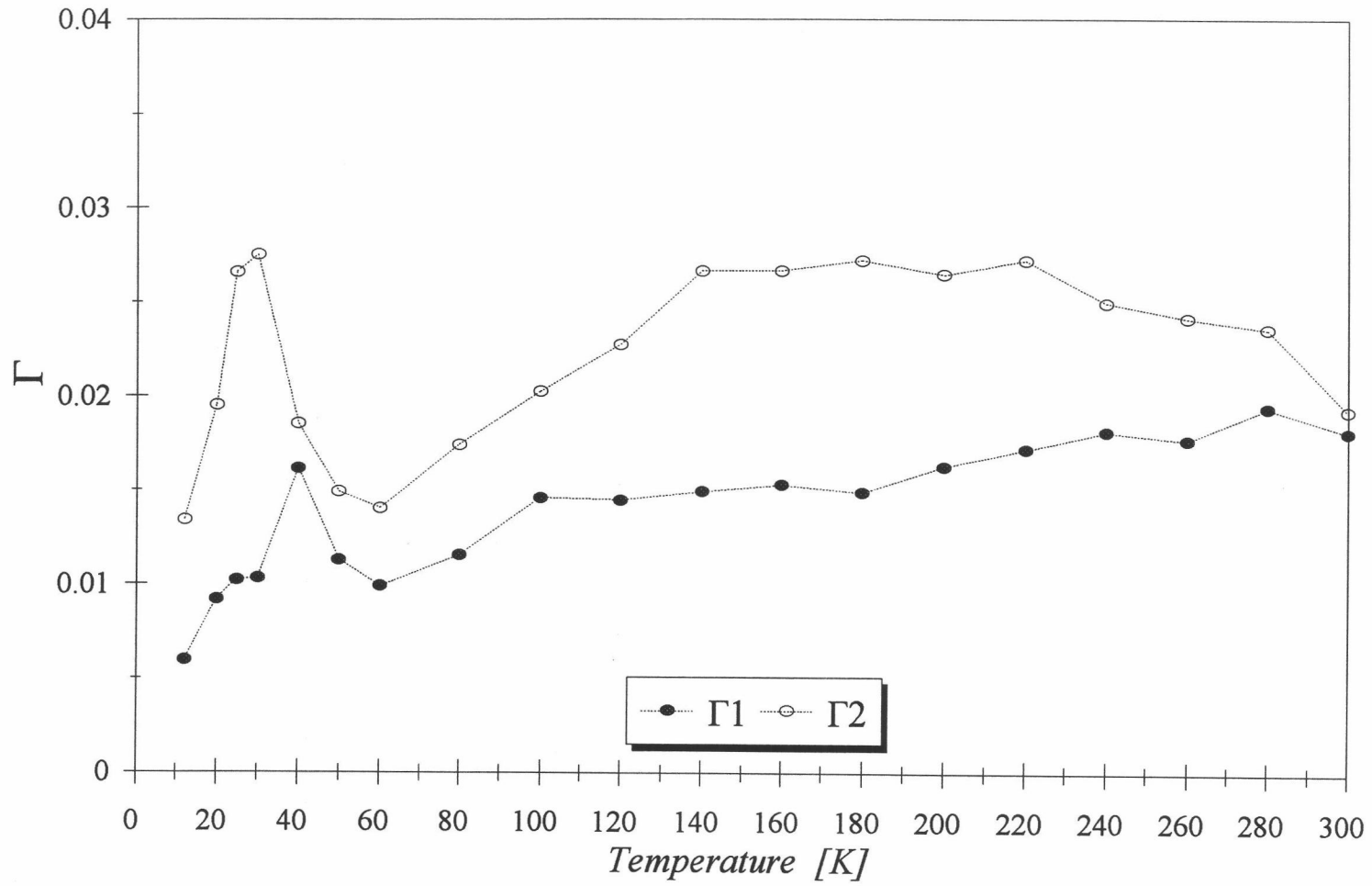
รูปที่ 4.15(ก) สรุปลภาพผลของโฟโตเรเพลกแทนซ์ที่อุณหภูมิ 12 K จนถึง 80 K



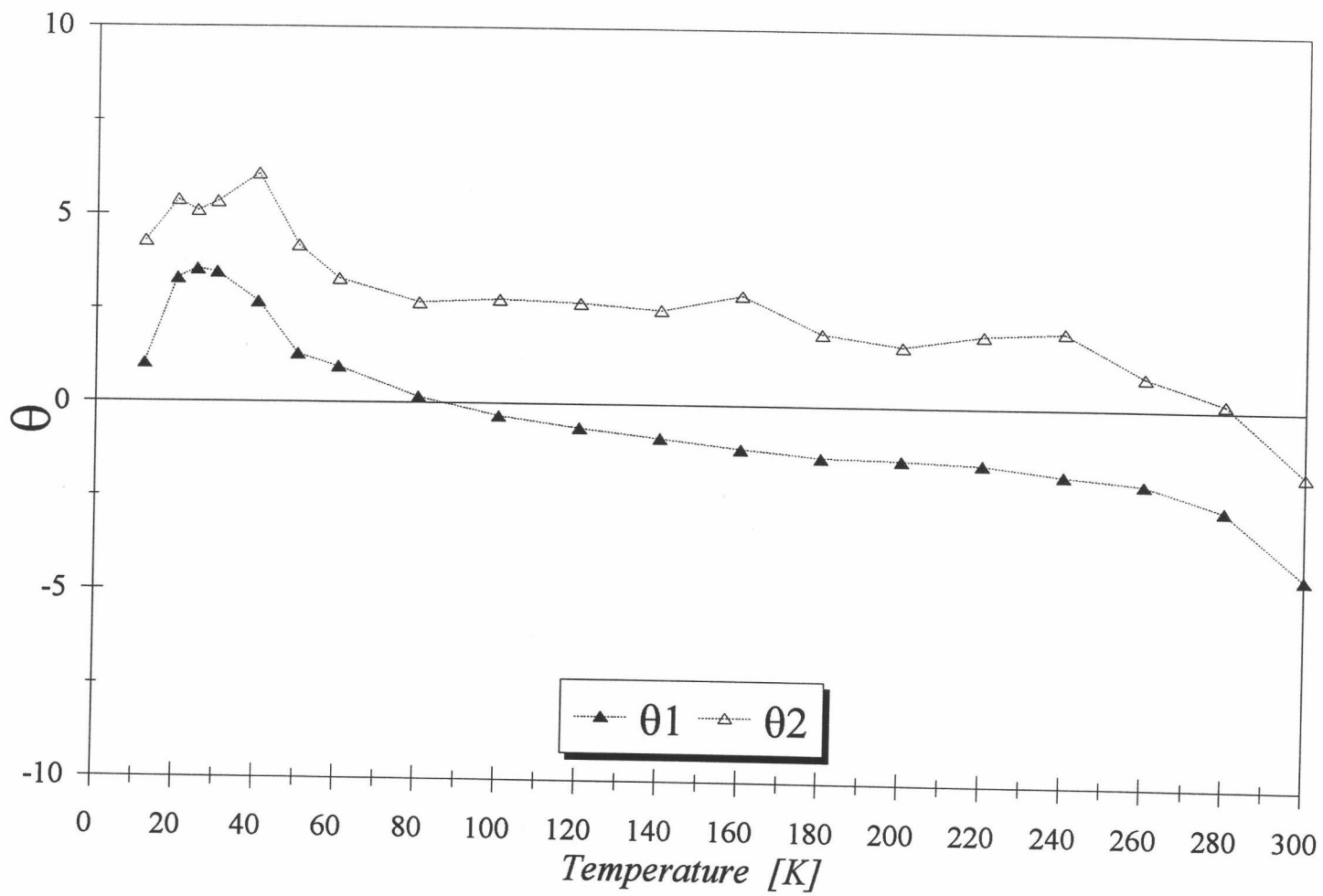
รูปที่ 4.15(ข) สรุปลักษณะของโฟโตคอนดักเตอร์ที่อุณหภูมิ 80 K จนถึง 300 K



รูปที่ 4.16 แสดงค่าเบี่ยงเบนของ Eg จากการพิตยอดแหลมของสเปกตรัม
โฟโตรีเฟลกแทนซ์สัมพันธ์กับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.17 แสดงค่าเบี่ยงเบนของ Γ จากการพิตยอดแหลมของสเปกตรัม
โฟโตรีเฟลกแทนซ์สัมพันธ์กับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.18 แสดงค่าเบี่ยงเบนของ θ จากการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัม
ไฟโตรีเฟลกแทนซ์สัมพันธ์กับอุณหภูมิ

ที่อุณหภูมิต่ำยังพบอีกว่ามียอดแหลมขนาดเล็กมากปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งตั้งแต่ 1.27 ถึง 1.28 eV ซึ่งอาจเป็นยอดแหลมที่สามที่ปรากฏขึ้นในสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่วัดได้ สังเกตเห็นได้ที่อุณหภูมิ 30, 40, 60 และ 80 K เมื่อนำเอาข้อมูล DR/R ของยอดแหลมดังกล่าวนี้ มาวิเคราะห์ด้วยการฟิตโดยใช้โปรแกรมฟิตติงด้วยกรณี 1 แทรนซิชั่น ผลการฟิตข้อมูลของยอดแหลมที่กล่าวนี้แสดงในรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 จากการฟิตจะได้ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.2

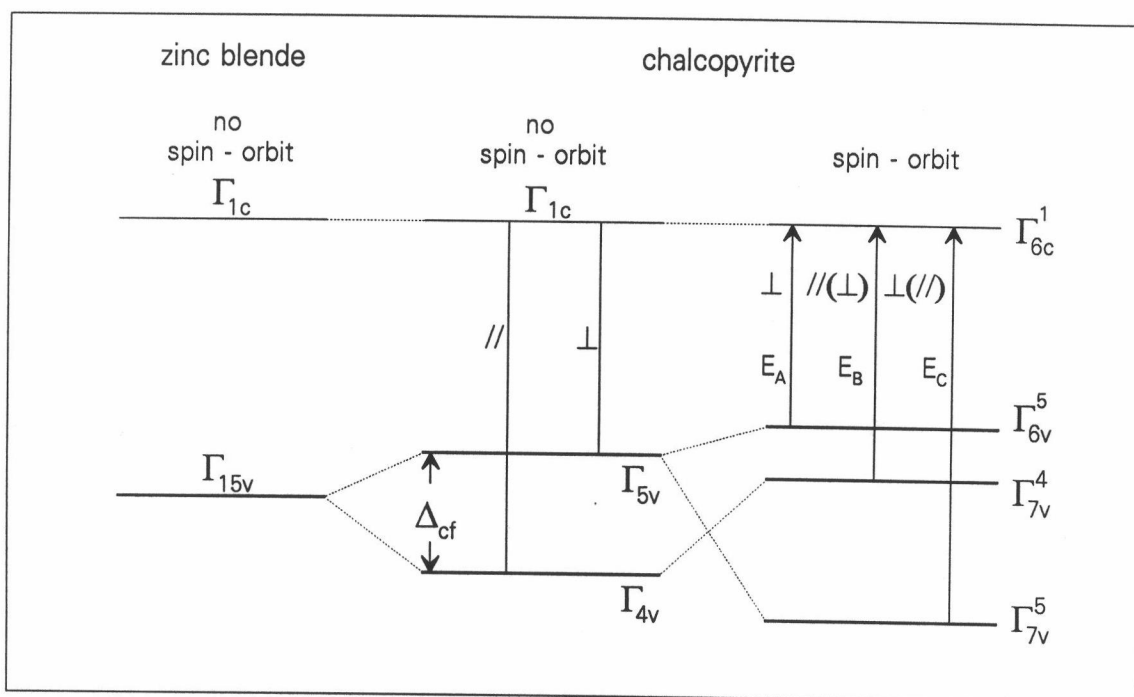
อุณหภูมิ (K)	ค่าของพารามิเตอร์		
	E_g (eV)	Γ	θ
30	1.273	0.00690	-2.345
40	1.279	0.01815	-2.569
60	1.280	0.01976	-3.932
80	1.277	0.00821	1.200

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตยอดแหลมที่สามของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 30, 40, 60 และ 80 K

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองวัดโฟตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 (CISA3) ครั้งนี้ ได้ทำการวัดทั้งหมดจำนวน 19 ชุดซึ่งเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นผลึกตั้งแต่ 12 K จนถึง 300 K ตามลำดับ จากการวัดพบว่ามียอดแหลมของสเปกตรัมโฟตรีเฟลกแทนซ์ $\Delta R/R$ ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน ข้อมูลสเปกตรัมโฟตรีเฟลกแทนซ์ทุกชุดถูกนำมาฟิตโดยใช้โปรแกรมฟิตติงด้วยสมการ (4.39) ที่เป็นส่วนจริงของสมการ (4.38) ในกรณี 1 และ 2 แทรนซิชั่นเพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ E_g , Γ , θ และ C ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นำมาวัด การฟิตข้อมูลของยอดแหลมได้ดำเนินไปด้วยการฟิตในกรณีที่มี 1 และ 2 แทรนซิชั่นของพาหะจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำ พบว่าการฟิตด้วย 1 แทรนซิชั่นนั้นพอจะ

ทำได้ในช่วงอุณหภูมิสูง (260 K ถึง 300 K) ส่วนที่อุณหภูมิต่ำลงไปใช้การพิตด้วย 2 แทรนซิชันมีความเหมาะสมกว่ามาก จากการพิตได้ค่าพารามิเตอร์จำนวน 2 ชุดซึ่งมีค่าแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ณ บริเวณที่เกิดยอดแหลมนั้นปรากฏว่ามียอดแหลมอยู่สองยอด ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ใกล้เคียงกันมาก (ซ้อนกันอยู่) ยากต่อการสังเกต ยอดแหลมที่หนึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานของยอดแหลมที่สอง ยอดแหลมทั้งสองมีการเลื่อนตำแหน่งไปกับอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าเป็นผลมาจากโครงสร้างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ จากรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงแผนภาพการแยกของแถบเวเลนซ์ที่มีผลมาจากการบิดเบี้ยวของผลึกเนื่องจากการอัดตัวของโครงสร้างผลึกตามแกน z ของสารซาลโคไพไรท์ [40] เชื่อว่ายอดแหลมที่หนึ่งเป็นผลจาก

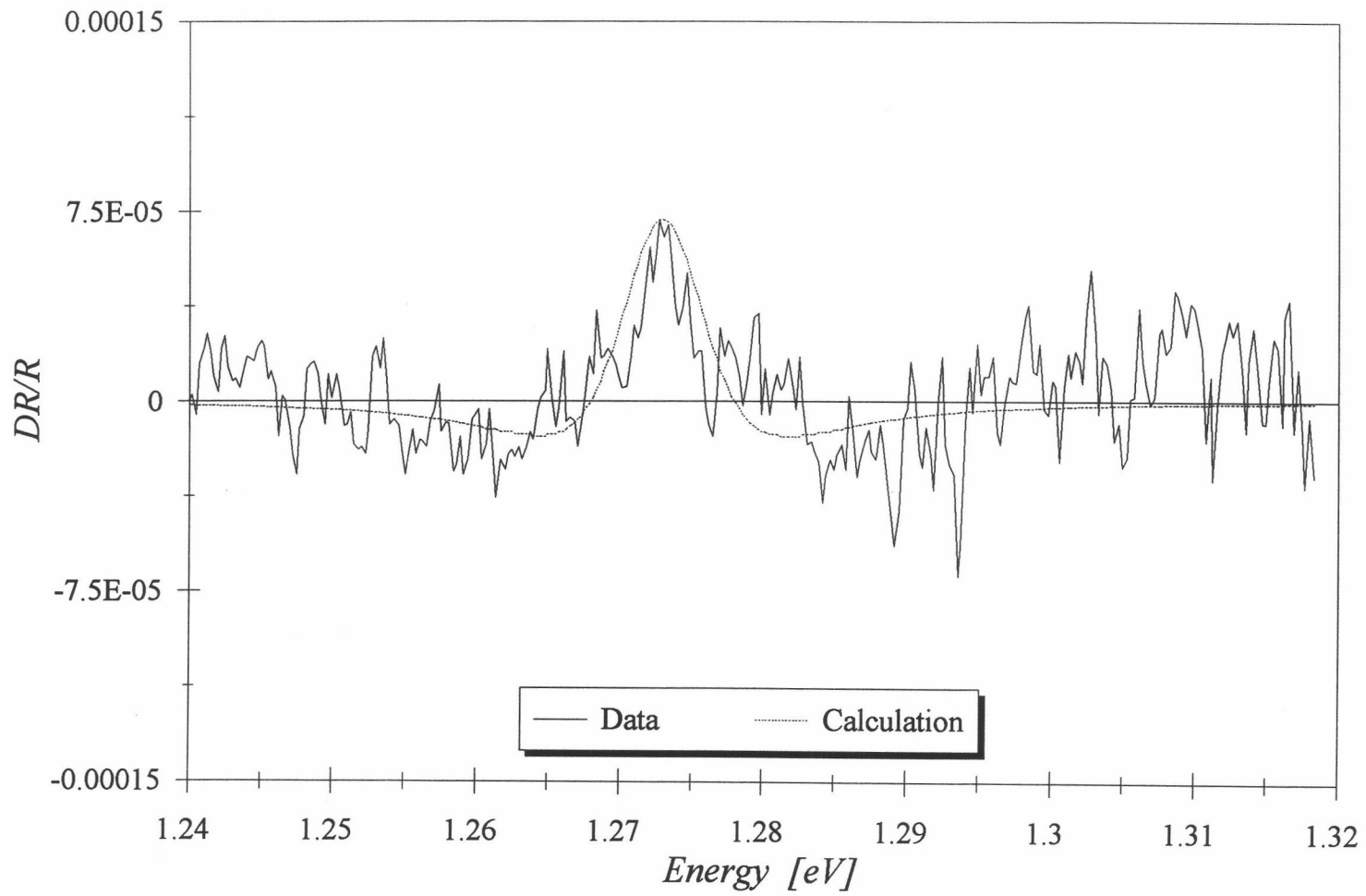


รูปที่ 4.23 แสดงแผนภาพการแยกของแถบเวเลนซ์ในสารประกอบกึ่งตัวนำซาลโคไพไรท์สำหรับพอยทิฟ Δ_{cf} และ Δ_{so} (Δ_{cf} คือการแยกเนื่องจากสนามศักย์ของผลึก และ Δ_{so} คือการแยกเนื่องจากสปิน กับ ออร์บิต) [40]

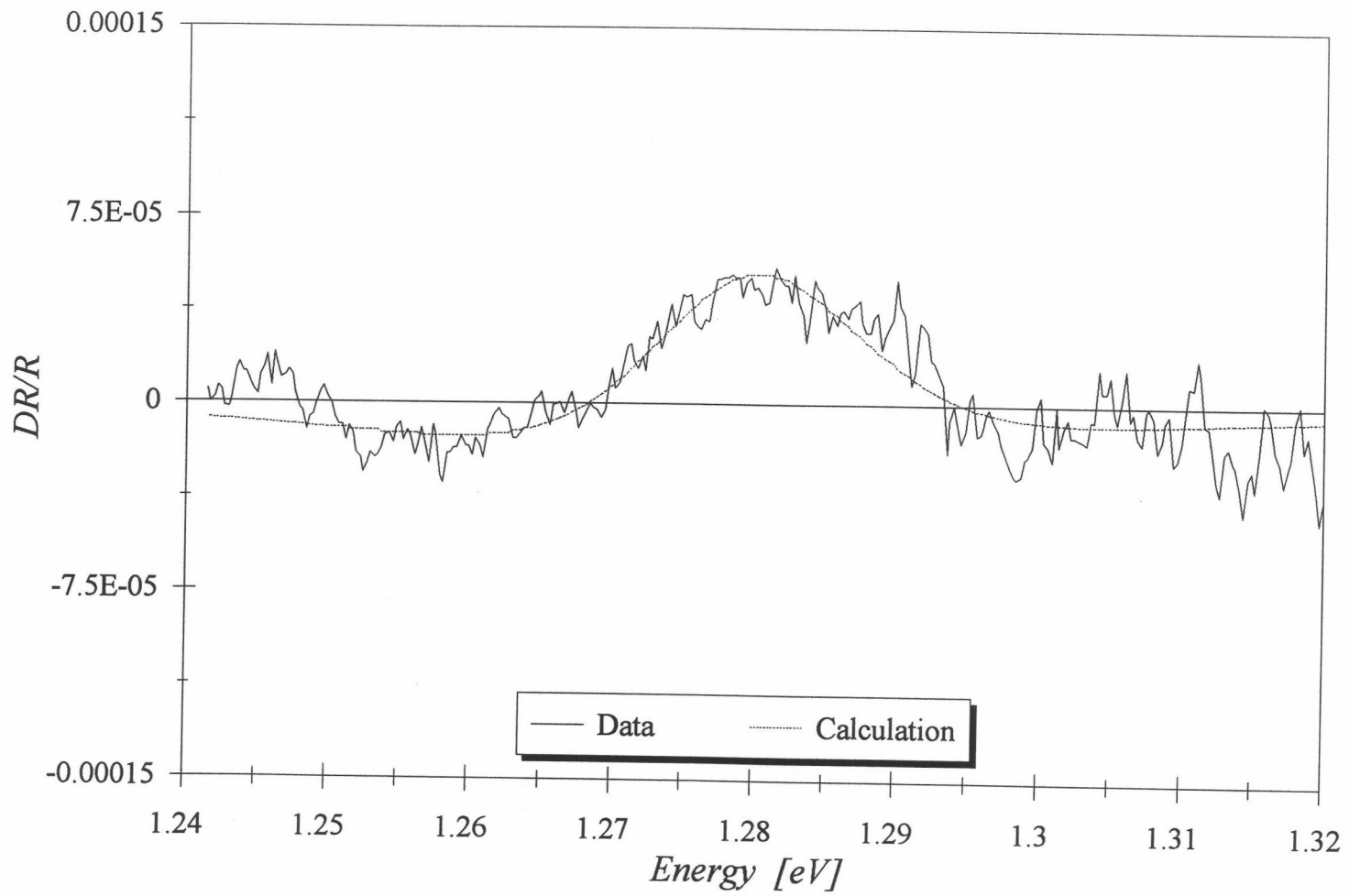
แถบเวเลนซ์แถบบนสุดเนื่องจากมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ สำหรับยอดแหลมที่สองซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิแตกต่างออกไป อาจเป็นผลจากแถบ

เวเลนซ์ที่แยกออกมาเนื่องจากสนามศักย์ของผลึกที่ไม่เป็นลูกบาศก์ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดของการแยกของแถบเวเลนซ์ดังกล่าวกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พบว่า มีการแยกออกไม่มาก สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า c/a ที่บริเวณ นี้ของ CuInSe_2 [41] ซึ่งพบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าค่าของ Δ_{cf} ซึ่งขึ้นกับค่า $(2 - c/a)$ เพิ่มขึ้นไม่มาก (เฉพาะ CIS33 มีค่า $c/a = 2.0026$) หากเปรียบเทียบกับผู้อื่นได้รายงานไว้ ($\Delta_{\text{cf}} \approx 0.006$) [40] การแยกของแถบเวเลนซ์จึงไม่มากขึ้นเท่าที่ควร ทำให้ยอดแหลมที่หนึ่งและยอดแหลมที่สองอยู่ที่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมากยอดแหลมทั้งสองนี้เปลี่ยนแปลงความสูงและเลื่อนตำแหน่งไปกับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 12 K ถึง 160 K ยอดแหลมจะเลื่อนตำแหน่งสูงขึ้น หลังจากนั้นจนถึง 300 K ยอดแหลมจะลดตำแหน่งลงมาอีกครั้ง

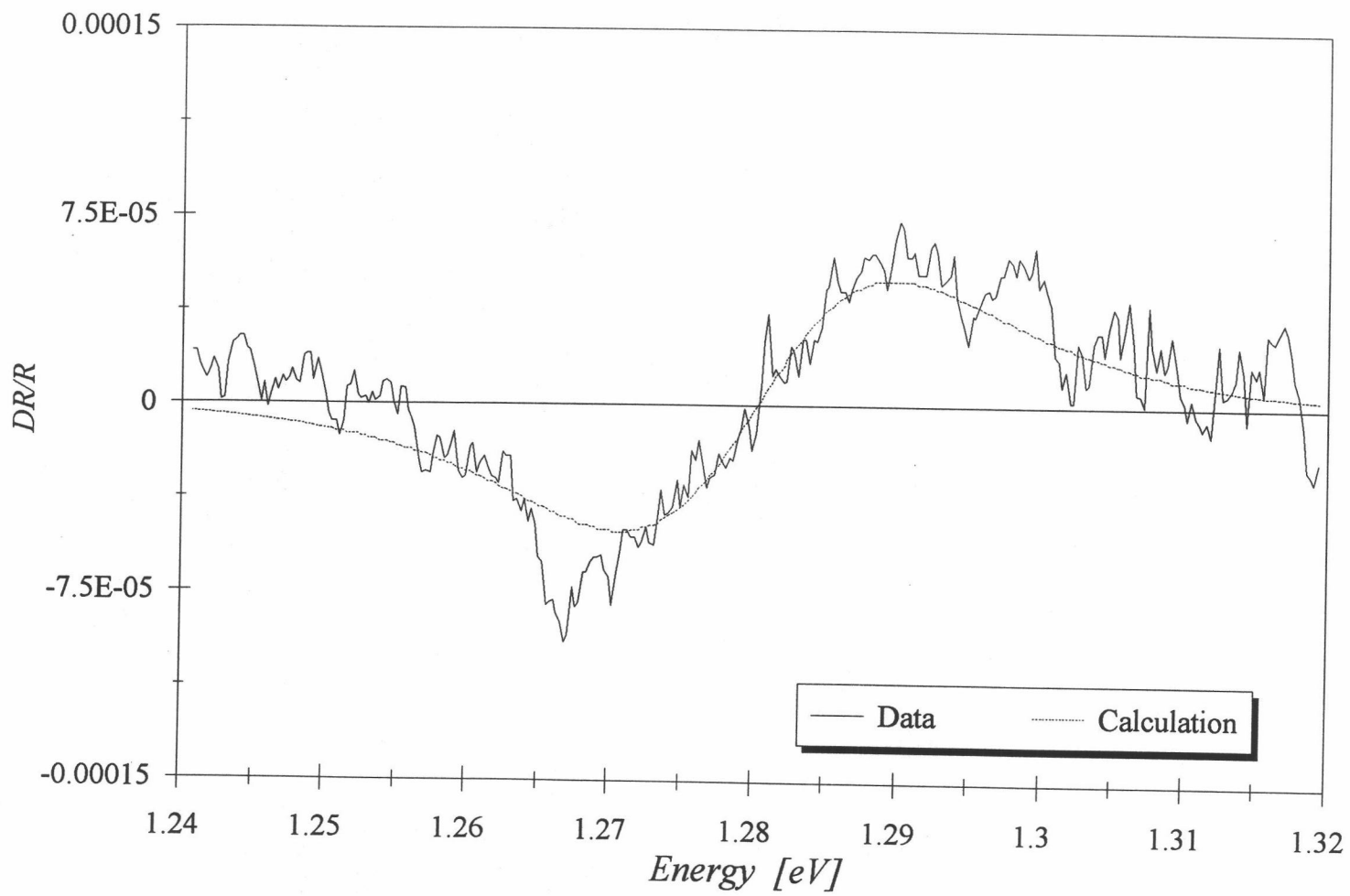
จากการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่อุณหภูมิ 30, 40, 60 และ 80 K พบว่ามียอดแหลมขนาดเล็กมาก ซึ่งอาจเป็นยอดแหลมที่สามที่ปรากฏขึ้น จากการฟิตข้อมูลของยอดแหลมนี้พบว่ามีความถี่อยู่ในช่วง 1.27 ถึง 1.28 eV แต่ยังไม่สามารถที่จะยืนยันได้อย่างชัดเจน เนื่องจากหัววัดแสงที่ใช้วัดในการทดลองครั้งนี้มีความสามารถวัดได้ชัดเจนในช่วงพลังงานต่ำ ดังนั้น สัญญาณ $\Delta R/R$ ที่ได้จึงไม่ชัดเจน จะต้องมีหัววัดแสงที่มีความสามารถวัดในย่านพลังงานสูงกว่านี้จึงจะสามารถวิเคราะห์กับยอดแหลมนี้ได้อย่างชัดเจน คิดว่าคงจะเป็นแนวทางการวิจัยในโอกาสต่อไป



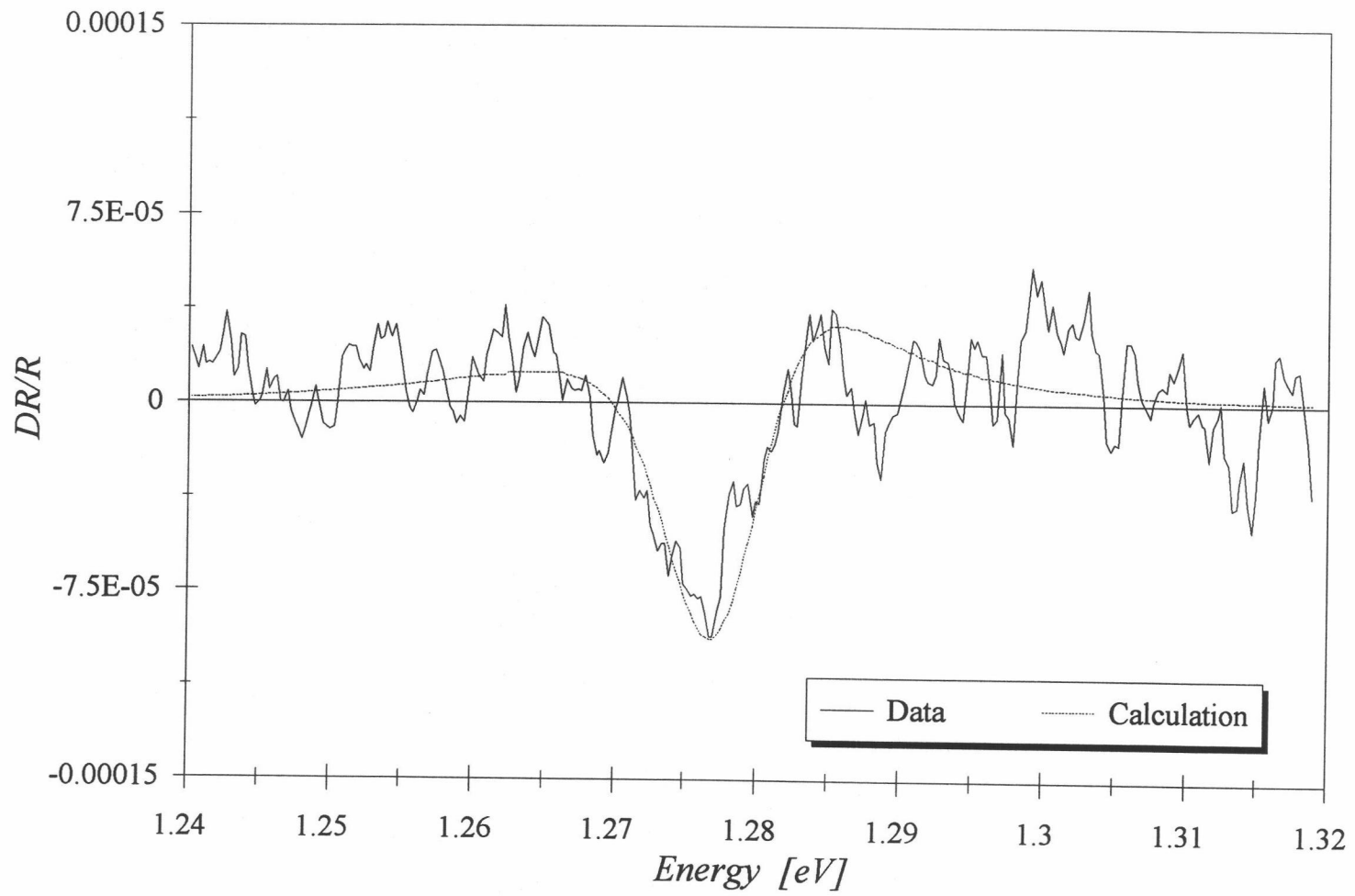
รูปที่ 4.19 แสดงผลการฟิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 30 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิงกรณี 1 แทรนซิชั่น



รูปที่ 4.20 แสดงผลการฟิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 40 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิงกรณี 1 แทรนซิชั่น



รูปที่ 4.21 แสดงผลการฟิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ของผลึกกิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 60 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิฟเฟอเรนเชียล 1 แทรนซิชั่น



รูปที่ 4.22 แสดงผลการฟิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ของผลึกกิ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 80 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิ้งกรณี 1 แทรนซิชั่น