



國立臺灣師範大學物理研究所

在Si/Ge 超晶格中的折疊聲學聲子之研究

Raman Study of Folded Acoustic Phonons in Si/Ge Superlattices



指導教授：賈至達 博士

研究生：陳 炳

日期：91年8月15日





摘要

一、超晶格結構

1. 以 Rytov 理論及光彈性力學擬合少數週期 ($N=3\sim 5$) 超晶格的晶層厚度。
2. 以光彈性力學擬合折疊聲學聲子的強度。
3. 超晶格中的鍺層粗糙程度。

二、鍺層之 E_1 能帶

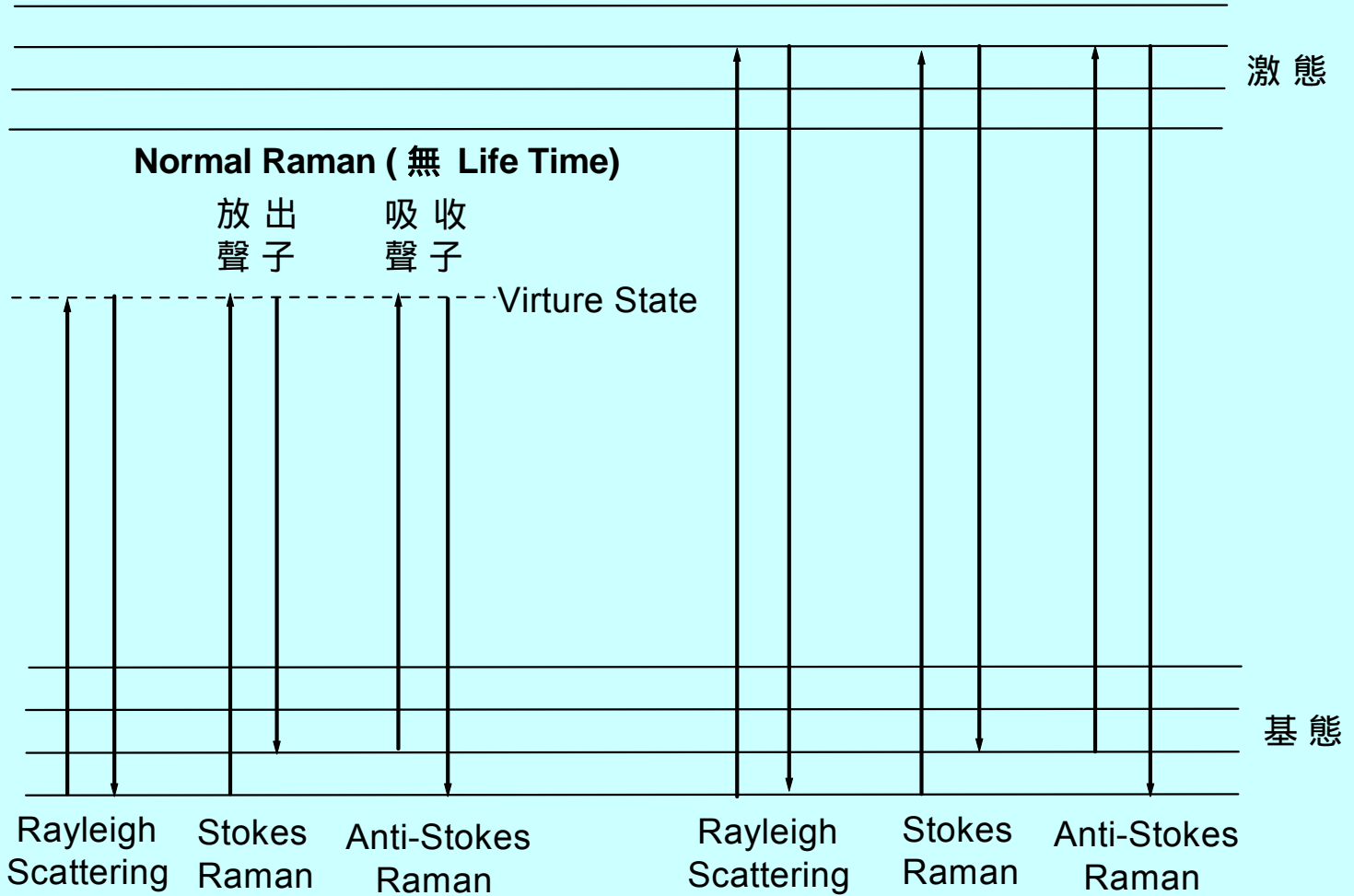
1. 由連續性散射理論探討鍺的能帶。
2. 超晶格的螢光光譜。

三、結論

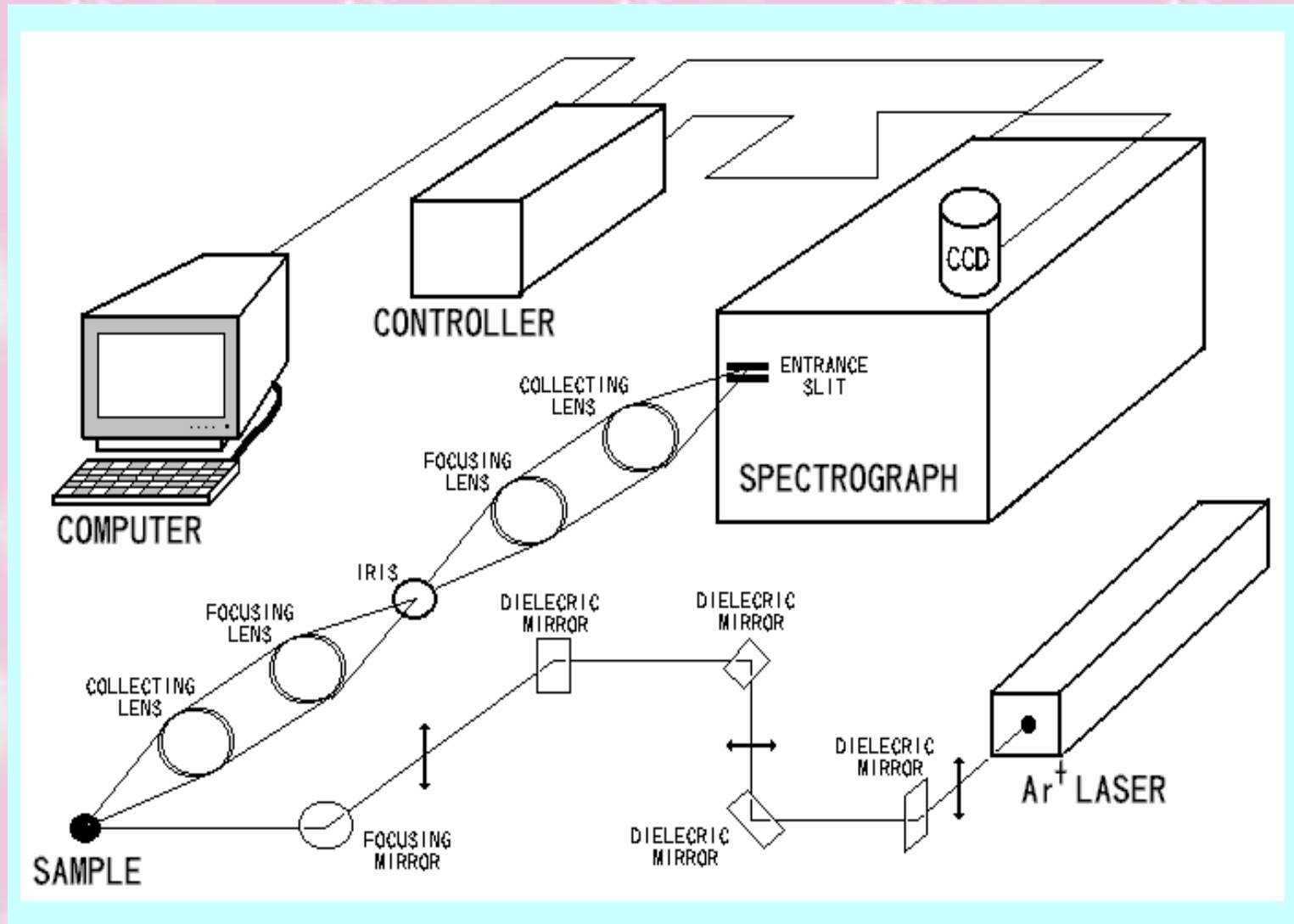


拉曼光譜

Resonance Raman (有 Life Time)

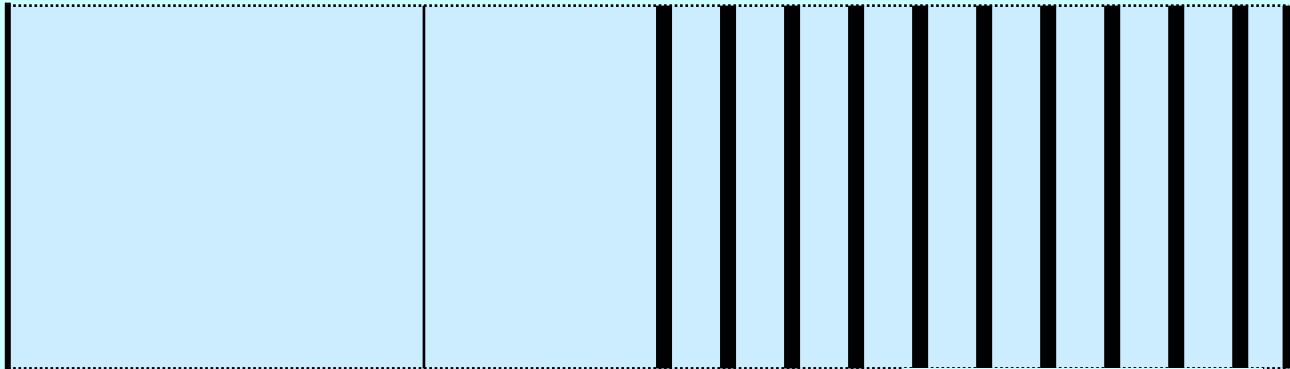


實驗裝置圖 (Macro)





超晶格的結構圖

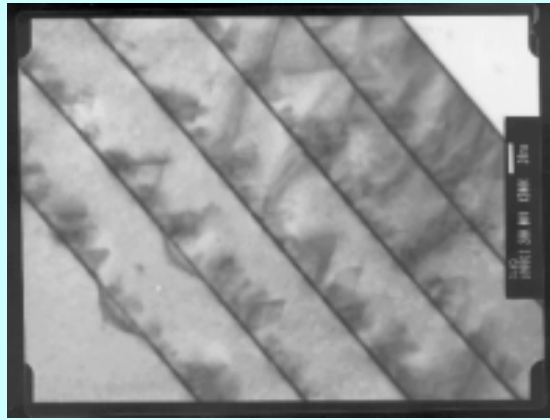


—————→ [001] 方向

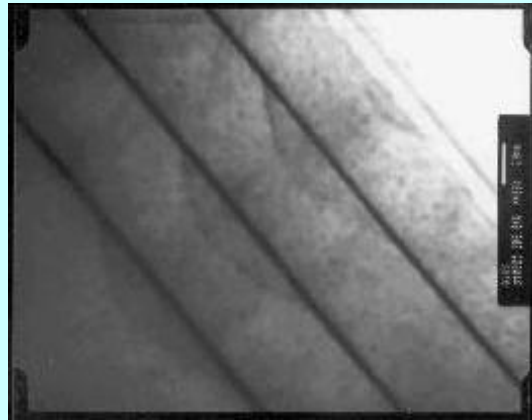
晶圓	緩衝層	超晶格	頂蓋
(Wafer)	(Buffer Layer)	(Super Lattice)	(Cap)
Si	Si:200nm	Si/Ge	Si or Ge

□ 為 Si ■ 為 Ge

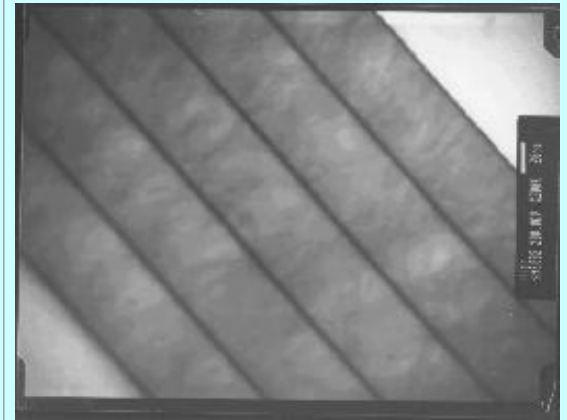
MBE 樣品的 TEM 圖



N105



N106



N107

生長方式：MBE (分子束磊晶法)



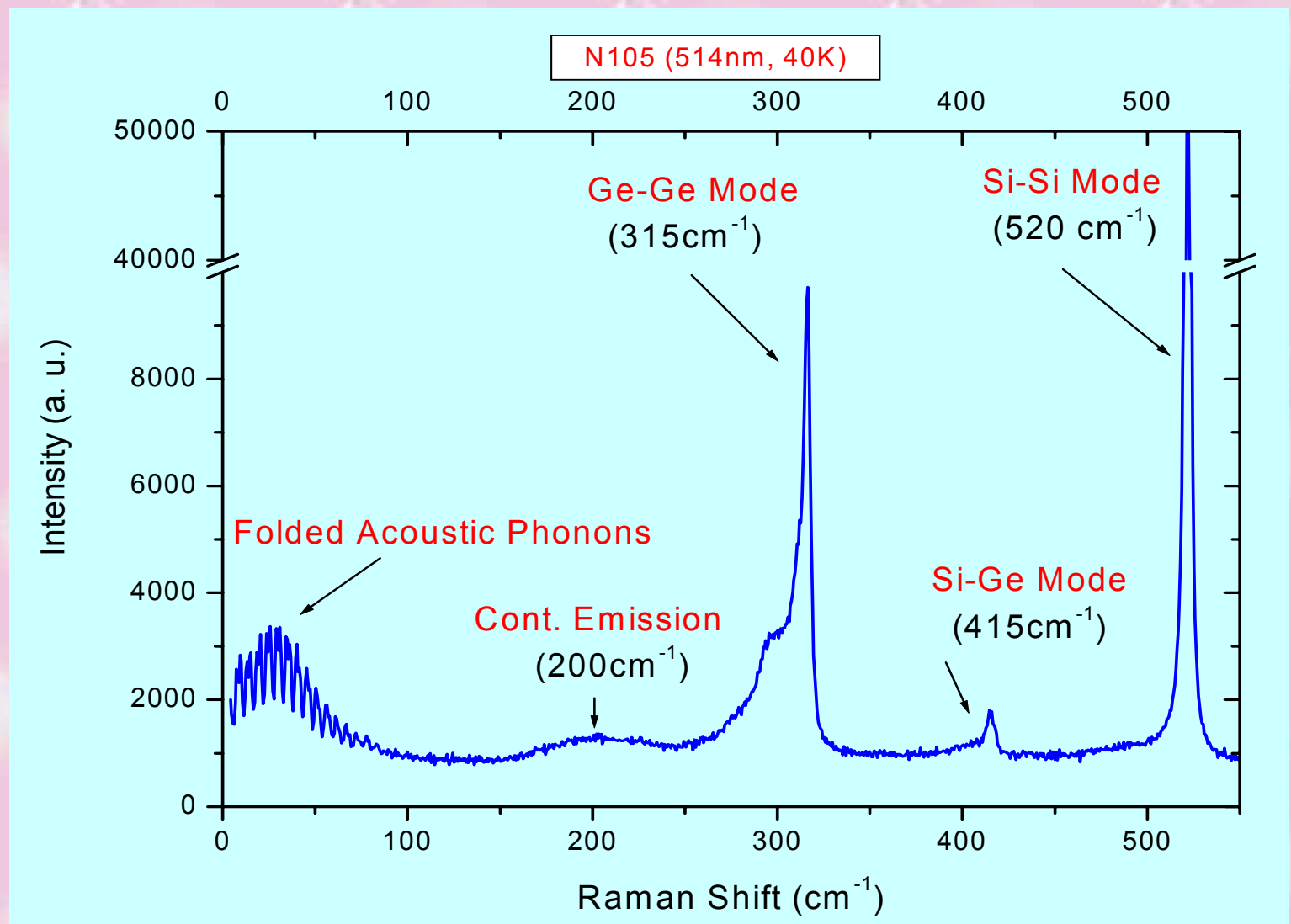
MBE樣品的生長條件

編號	N105	N106	N107
週期數(N)	5	3	5
週期(d)	52.2 nm	53.8 nm	55.4 nm
Si層厚度 (d_1)	50.0 nm	50.0 nm	50.0 nm
Ge層厚度 (d_2)	2.2 nm	3.8 nm	5.4 nm

生長溫度： Ge:260
Si:450



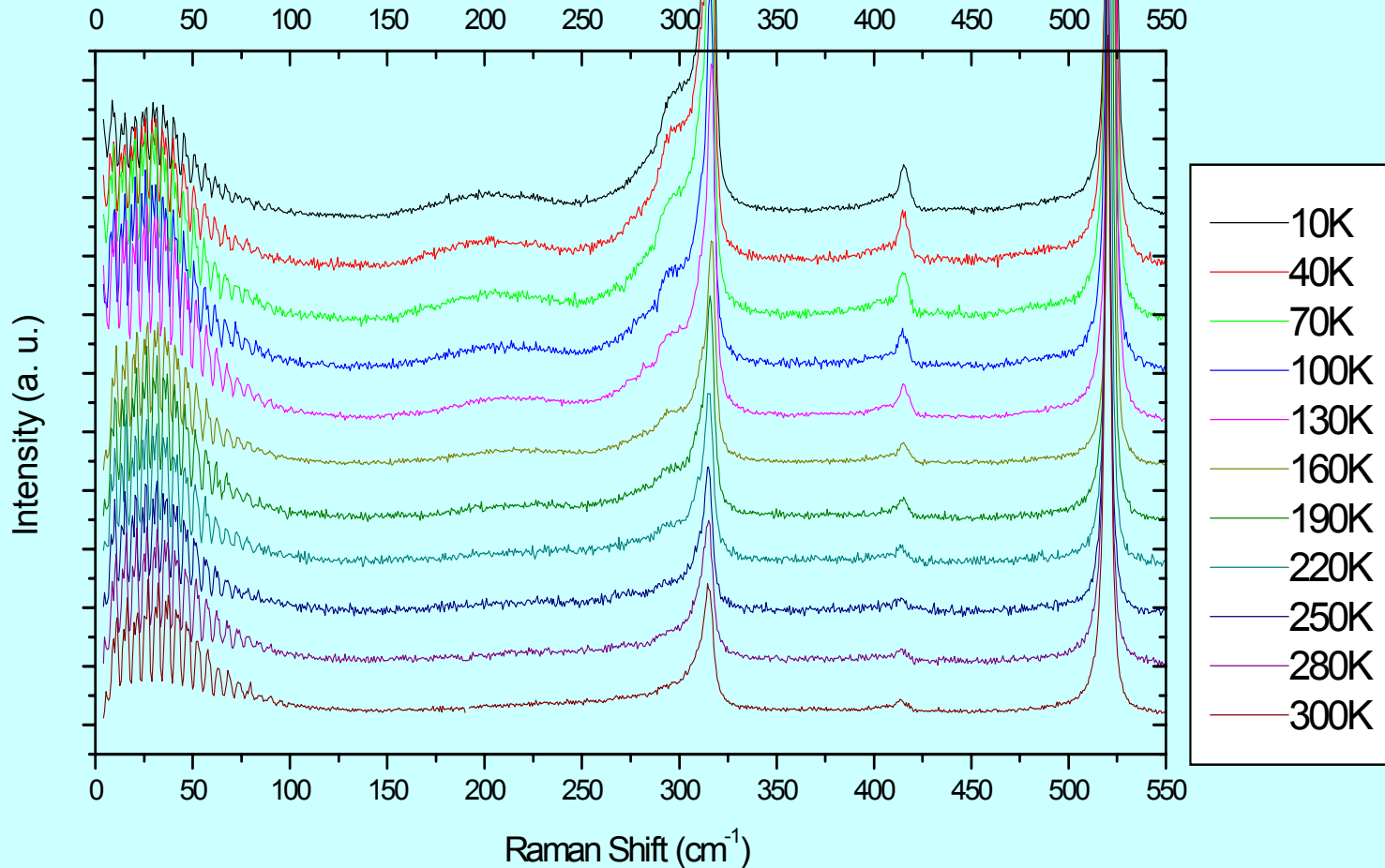
N105 的拉曼光譜





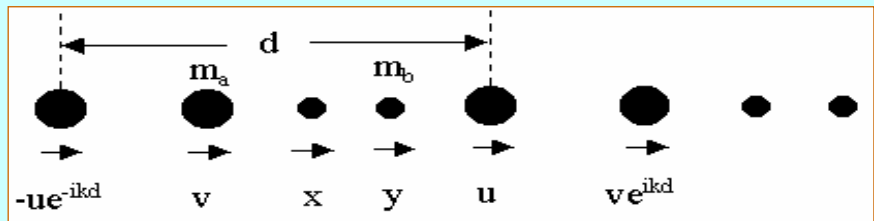
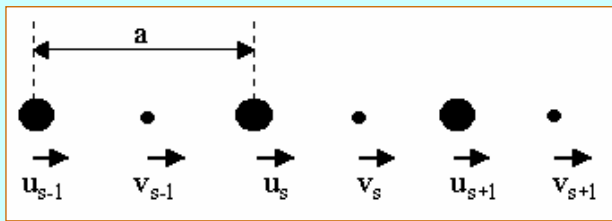
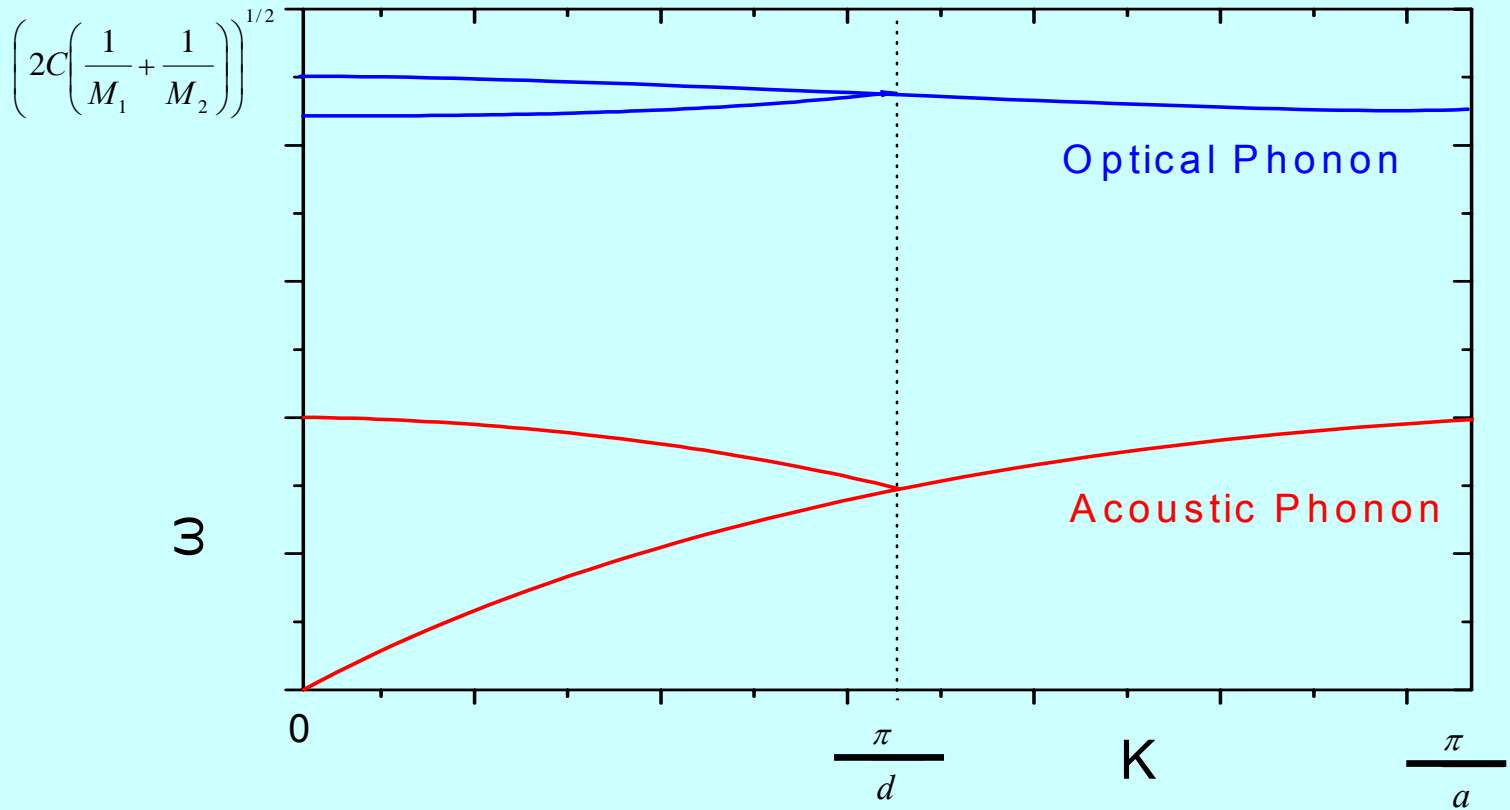
各溫度下的拉曼光譜

N105 (514nm, 10K~300K)





縱向折疊聲子的形成





折疊聲子 - Rytov 理論

$$= | V_{SL}(q + 2\pi m/d) |$$

$$m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

雙重線的分裂值

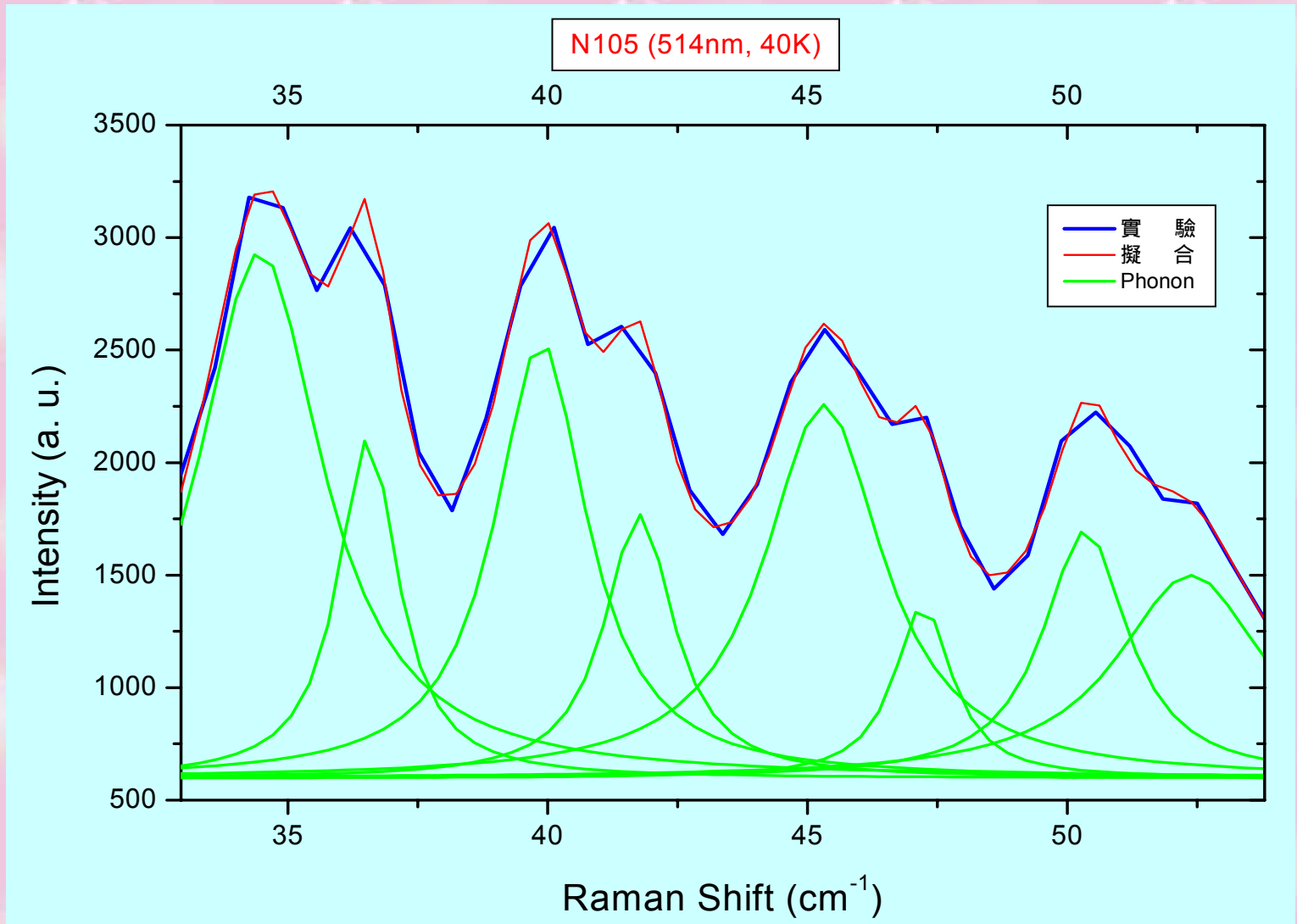
$$= 2 V_{SL} \cdot q$$

超晶格中的聲速 V_{SL} 為

$$V_{SL} = d \left[\frac{d_1^2}{V_1^2} + \frac{d_2^2}{V_2^2} + \left(K + \frac{1}{K} \right) \frac{d_1 d_2}{V_1 V_2} \right]^{-1/2}$$



N105分裂的雙重線



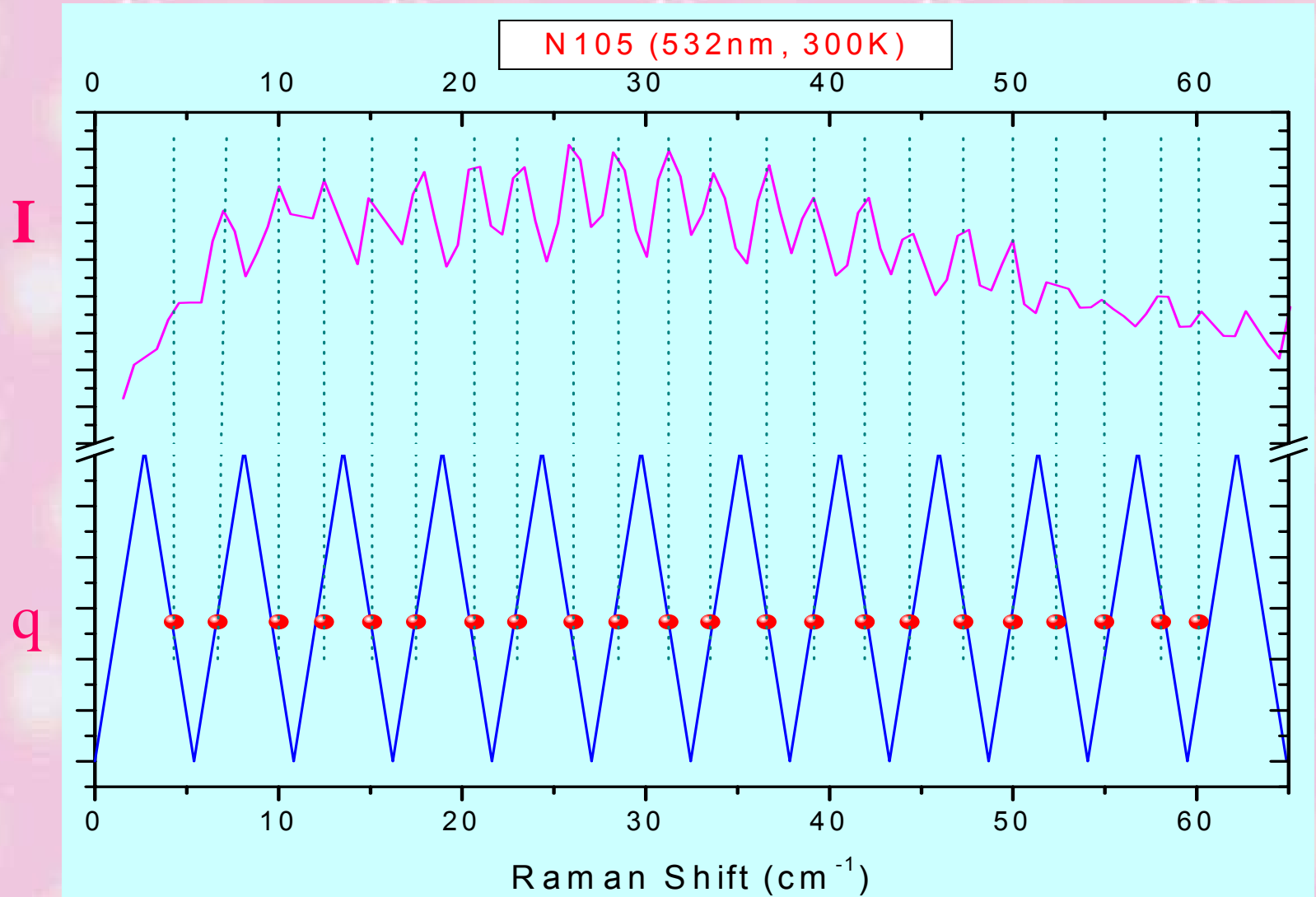


N105折疊聲子之擬合

Folded Acoustic Phonon In Si/Ge superlattice N105 (300K)							
LA	(nm)	nSi	nGe	dSi(nm)	dGe(nm)	$V_{LSi}(m/s)$	$V_{LGe}(m/s)$
	514.532	4.23	4.56	49.65	2.12	8433	4914
縱	N_{SL}	Si	Ge	K	$K+1/K$	$V_{SL}(m/s)$	$q (m^{-1})$
波	4.24	2330	5323	1.331	2.082	8171.929	19164866
m	+理論	Shift 理論 (cm^{-1})	Shift 實驗 (cm^{-1})	- 理論	Shift 理論 (cm^{-1})	Shift 實驗 (cm^{-1})	
0	1.566E+11	0.8		1.5661E+11	0.8		
1	1.148E+12	6.1		8.3527E+11	4.4		
2	2.14E+12	11.4	11.1	1.8271E+12	9.7	9.1	
3	3.132E+12	16.6	16.4	2.819E+12	15.0	14.5	
4	4.124E+12	21.9	21.7	3.8109E+12	20.2	19.8	
5	5.116E+12	27.2	27.2	4.8028E+12	25.5	25.3	
6	6.108E+12	32.4	32.6	5.7947E+12	30.8	30.7	
7	7.1E+12	37.7	37.8	6.7866E+12	36.0	36.0	
8	8.092E+12	43.0	43.1	7.7784E+12	41.3	41.4	
9	9.084E+12	48.2	48.2	8.7703E+12	46.6	46.6	
10	1.008E+13	53.5	53.6	9.7622E+12	51.8	52.1	
11	1.107E+13	58.8	58.9	1.0754E+13	57.1	57.4	
12	1.206E+13	64.0	64.0	1.1746E+13	62.4	62.5	
13	1.305E+13	69.3	69.2	1.2738E+13	67.6	67.9	
14	1.404E+13	74.6	74.4	1.373E+13	72.9	72.9	
15	1.503E+13	79.8		1.4722E+	78.2	77.8	

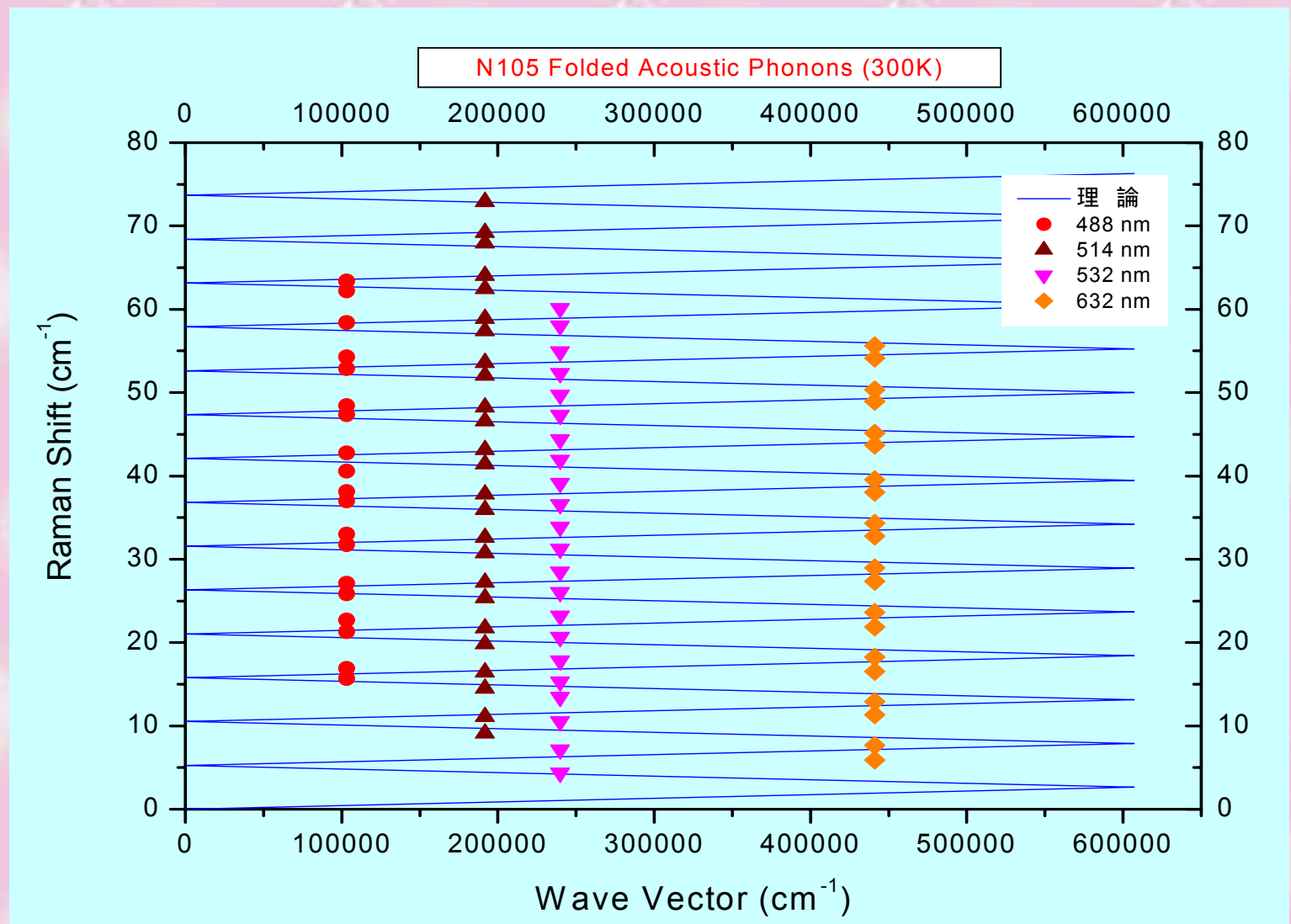


N105的折疊聲學聲子





N105折疊聲子圖





結 論

樣品 編號	MBE 生長條件		拉曼 FAP 擬合	
	矽層厚	鍺層厚	矽層厚	鍺層厚
N105	50	2.2	49.65	2.12
N106	50	3.8	45.98	3.78
N107	50	5.4	45.95	5.01

單位：nm

- ❖ 用 Rytov 光彈性理論擬合超晶格的晶層厚度，在週期數甚少時，仍可得到不錯的結果。



折疊聲子的相對強度

由光彈性力學得到折疊聲子拉曼散射強度比為

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{(P_b - P_a)}{P_0^2} \frac{\sin^2 \left(m \pi \frac{d_1}{d} \right)}{\pi^2 m^2} \eta$$

$$\eta = \frac{\omega_m (n_m + 1)}{\omega_0 (n_0 + 1)}$$

I : 聲子強度

d_1 : 矽層厚度

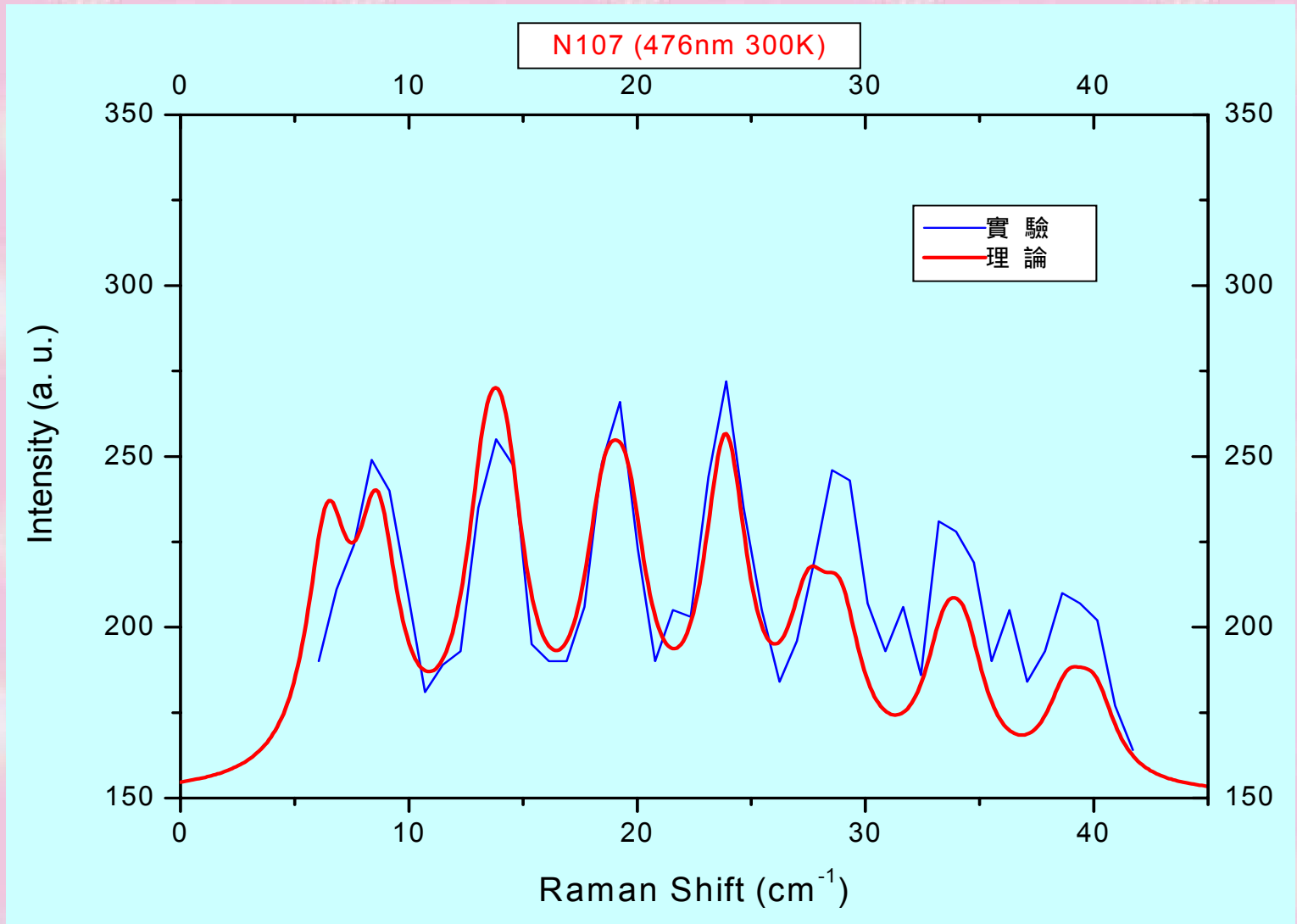
ω : 聲子頻率

P : 光彈性係數

n : 聲子數對溫度之波色因子



N107 折疊聲子的強度擬合





結 論

各樣品以476nm雷射光做強度擬合結果

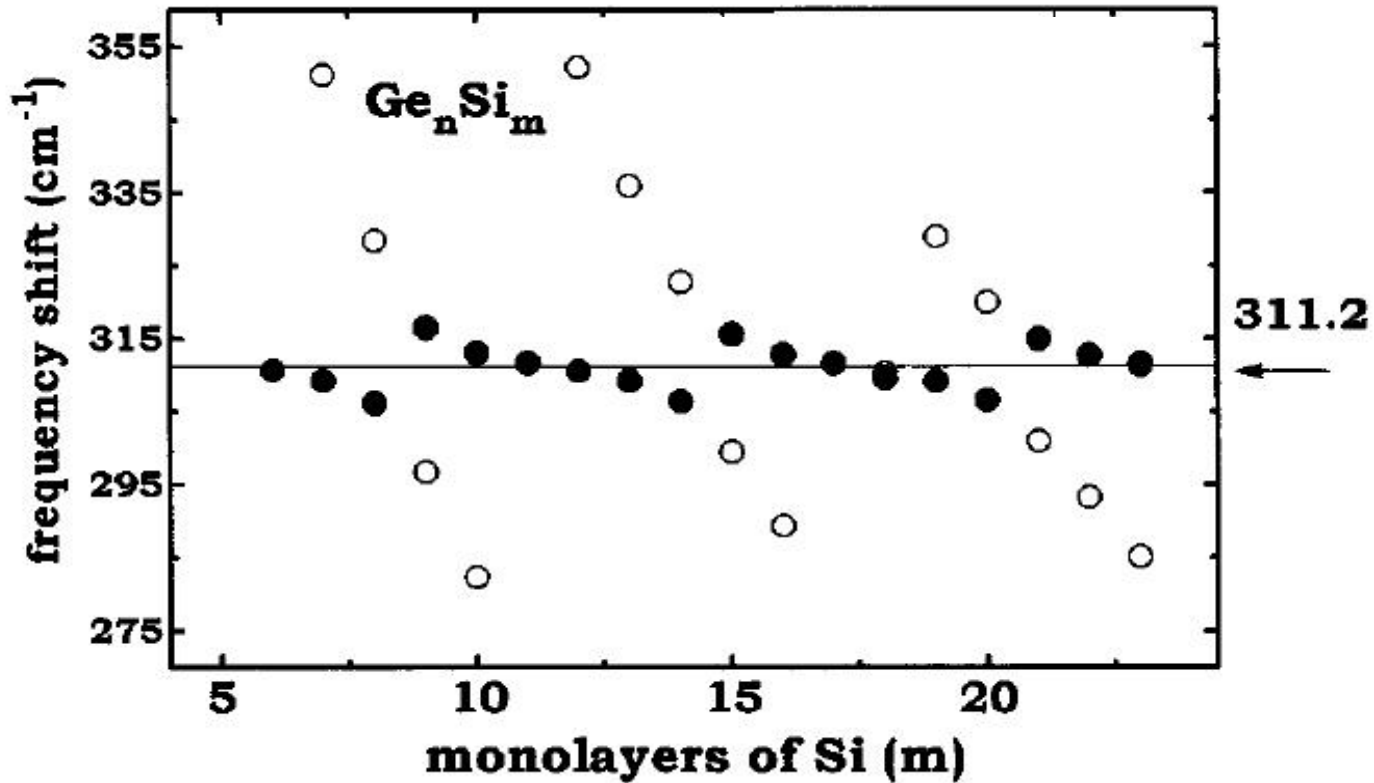
樣品編號	MBE生長條件 (d_1/d)	FAP強度擬合 (d_1/d)
N105	0.96	0.96
N106	0.93	0.93
N107	0.90	0.93

❖ 以光彈性力學擬合折疊聲學聲子的強度時，在遠離共振能隙的位置，大致上可以吻合得不錯。



鍺層的粗糙程度

Ge-Ge Peak 的 Raman Shift 呈週期性變化



M. A. Araujo Silva, E. Ribeiro, P. A. Schulz, F. Cerdeira, and J. C. Bean, Phys. Rev. B **53**, 15871.(1995)



鍺層的厚度估算

$$I(\omega) = n\alpha \frac{\Gamma_n}{(\omega - \omega_c)^2 + \Gamma_n^2}$$

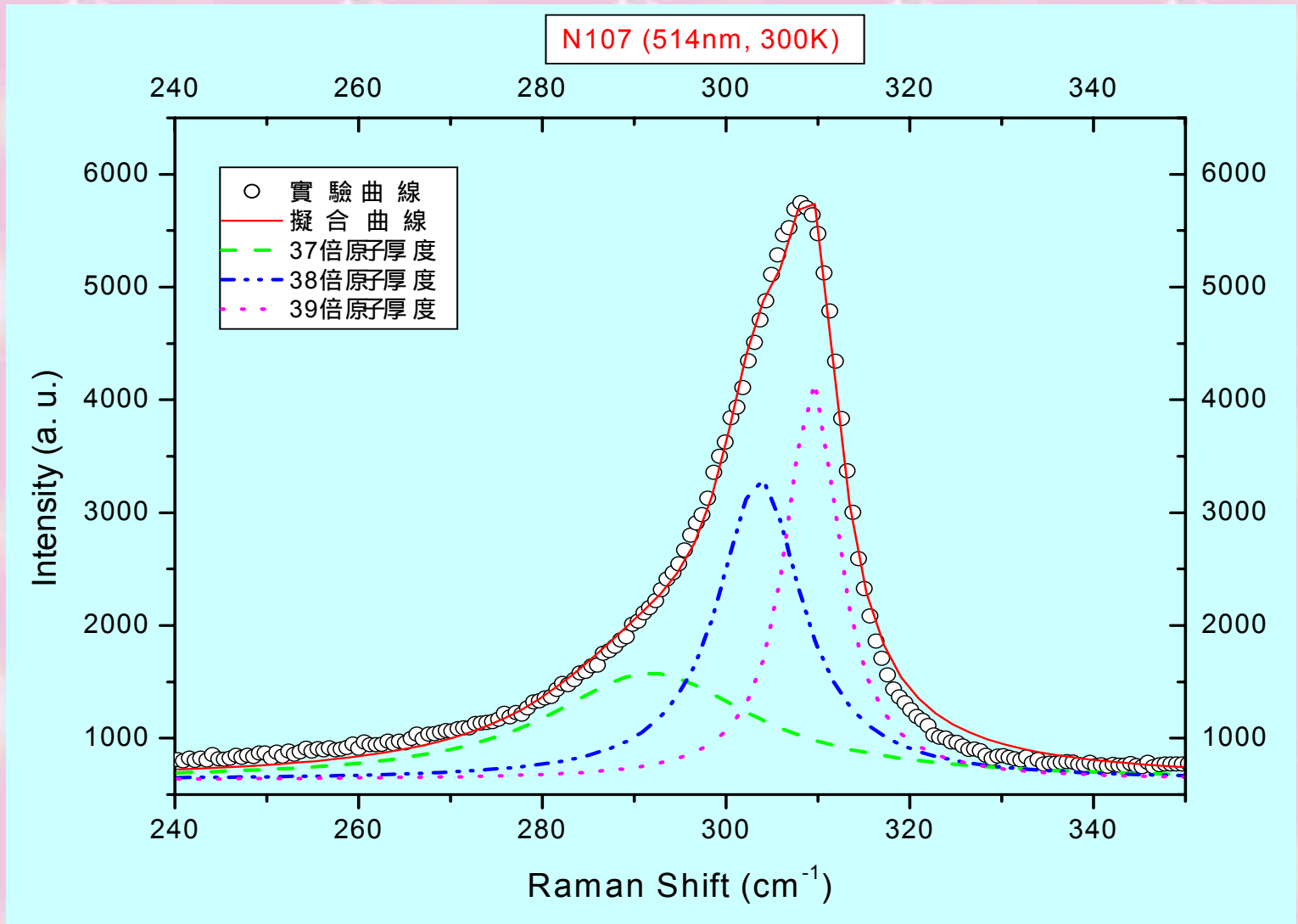
$$\alpha = \frac{I(\omega_c) \cdot \Gamma}{n}$$

$$d = \frac{\sum d_n \times \alpha_n}{\sum \alpha_n}$$

I : 拉曼散射強度 ; ω : 頻率 ; Γ : 散射截面 ;
 Γ_n : 半高寬 ; d : 鍺層厚度 (取散射截面的加權平均)



N107 Ge層厚度 (514nm, 300K)





結 論

各樣品的鍺層厚度擬合

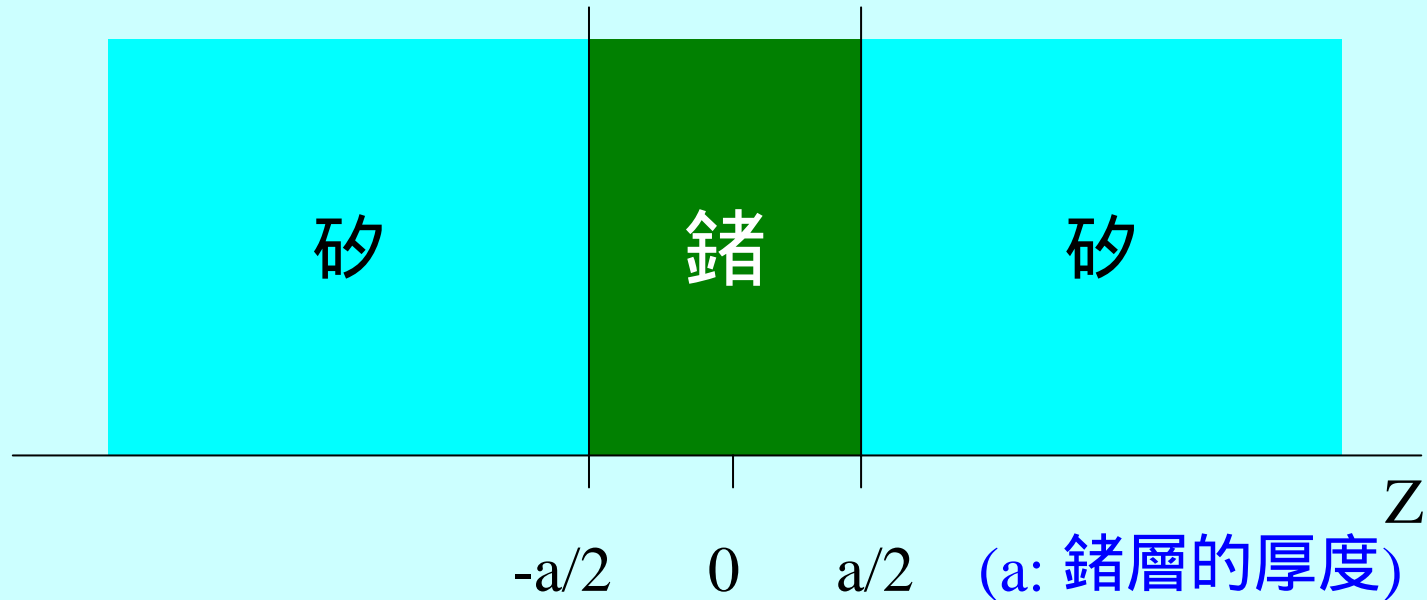
樣品	MBE生長條件	TEM圖	拉曼FAP	粗糙度
N105	2.2	2.46	2.12	2.22
N106	3.8	3.78	3.78	3.83
N107	5.4	4.44	5.01	5.37

單位：nm

❖ 由Ge-Ge Peak 的散射頻率可估算超晶格中的鍺層平均厚度，誤差 < 1 %。



鍺層的連續性散射



被侷限在鍺量子井中的電子波函數為

$$\phi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{a}} \frac{\cos \pi N z}{a} \quad N=1, 3, 5, \dots$$

$$\phi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{a}} \frac{\sin \pi N z}{a} \quad N=2, 4, 6, \dots \quad N \text{ 為次能帶量子數}$$



連續性散射的強度

$$I_{(\omega)} \cong \sum_{q_z} \frac{q_z^2}{q_z} \frac{\sin^2 \frac{aq_z}{2}}{\left(\frac{aq_z}{2}\right)^2} \times (n_q + 1) \cdot \delta(\omega_l - \omega_s - \omega_{qz})$$

$$\times \left[\sum_N \left((\omega_l - \omega_g) + i \frac{\gamma_e + \gamma_h}{2} \right)^{-1} \left((\omega_g - \omega_s) + i \frac{\gamma_e + \gamma_h}{2} \right)^{-1} \left(\frac{4N^2}{4N^2 - \left(\frac{aq_z}{2}\right)^2} \right) \right]^2$$

ω_g : 能帶頻率 ω_l : 入射光頻率 ω_s : 散射光頻率

ω_{qz} : 聲子頻率 n_q : 聲子數對溫度的波色因子

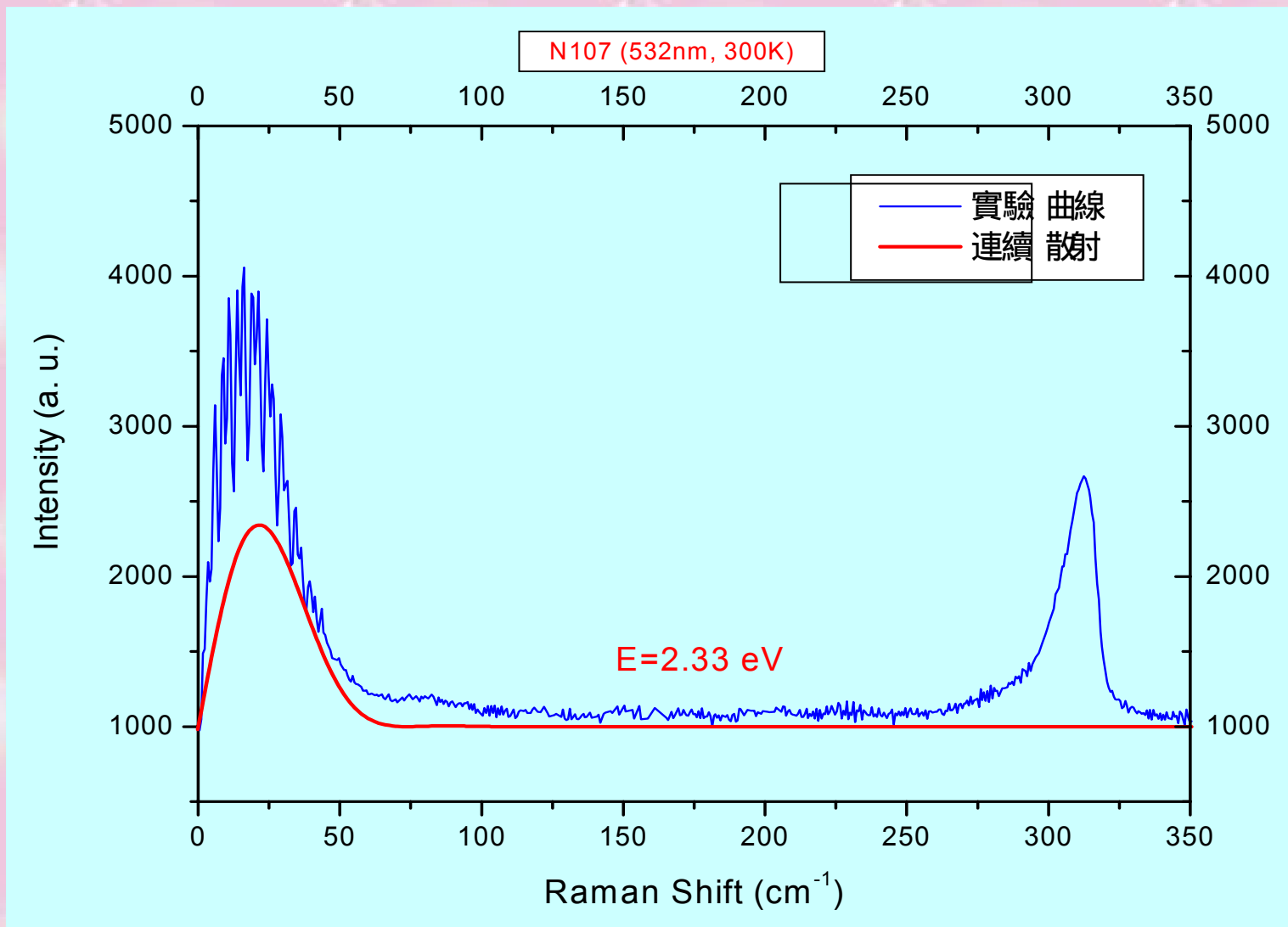
γ_e, γ_h : 電子、電洞散射訊號半高寬。

V. F. Sapega, V. I. Belitsky, T. Ruf, H. D. Fuchs, M. Cardona, and K. Ploog, Phys. Rev. B, Vol. **46**, 16005.(1992)

G. Höhler, Karlsruhe, *Phonon Raman Scattering in Semiconductors, Quantum Wells and Supperlattices*, P. 69~74. (1998)

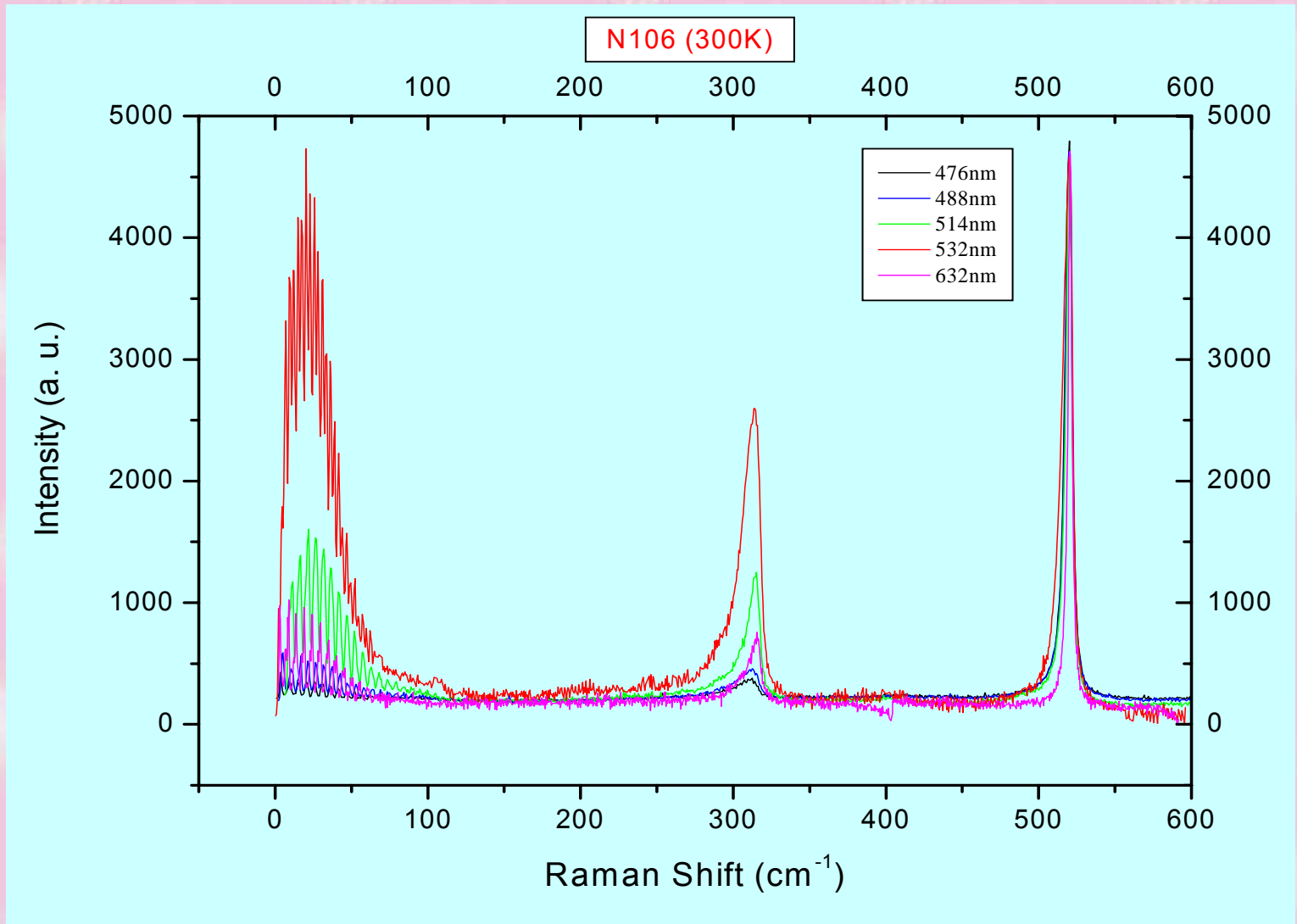


N107連續性散射 (532nm, 300K)



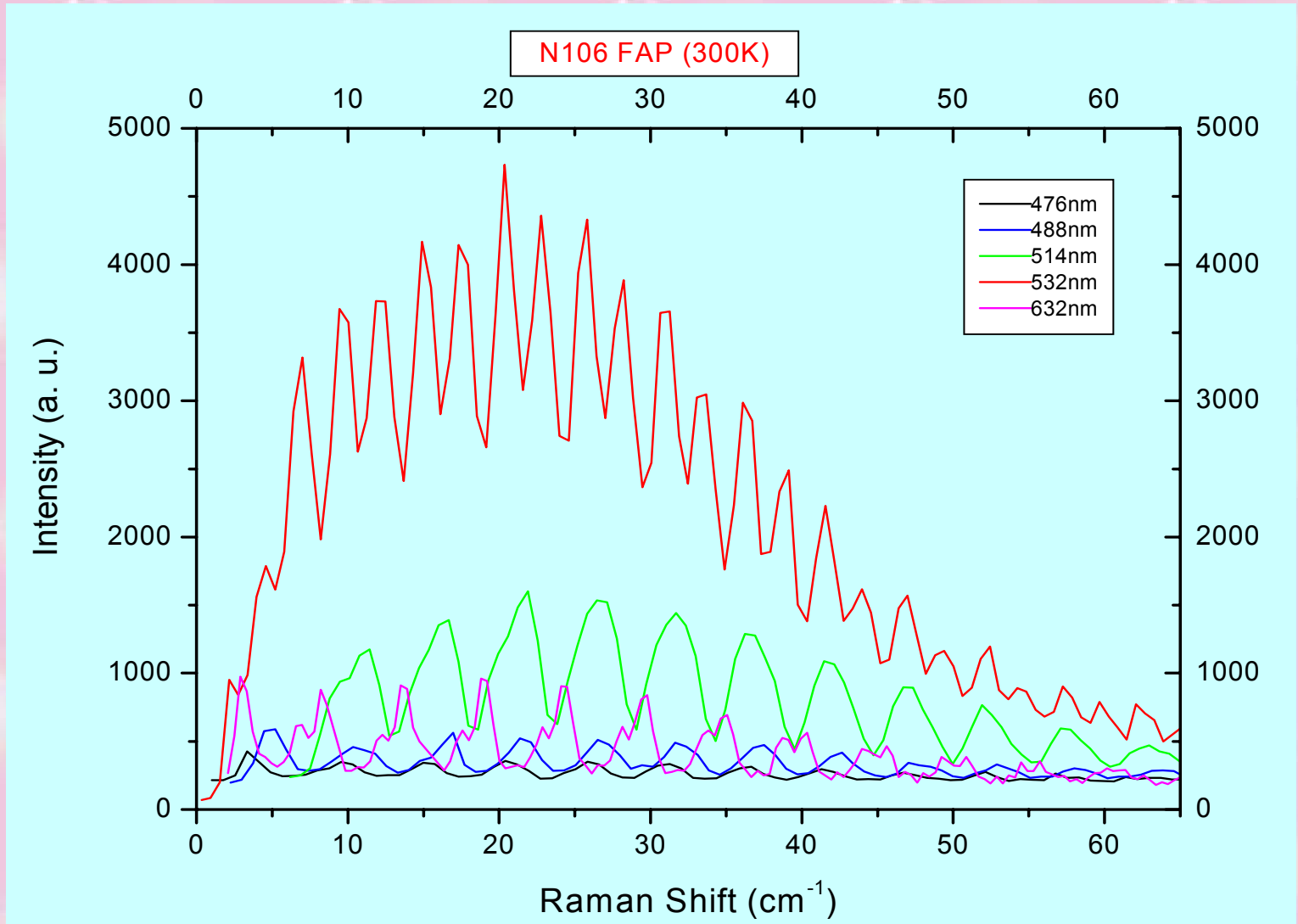


N106 各波長拉曼光譜



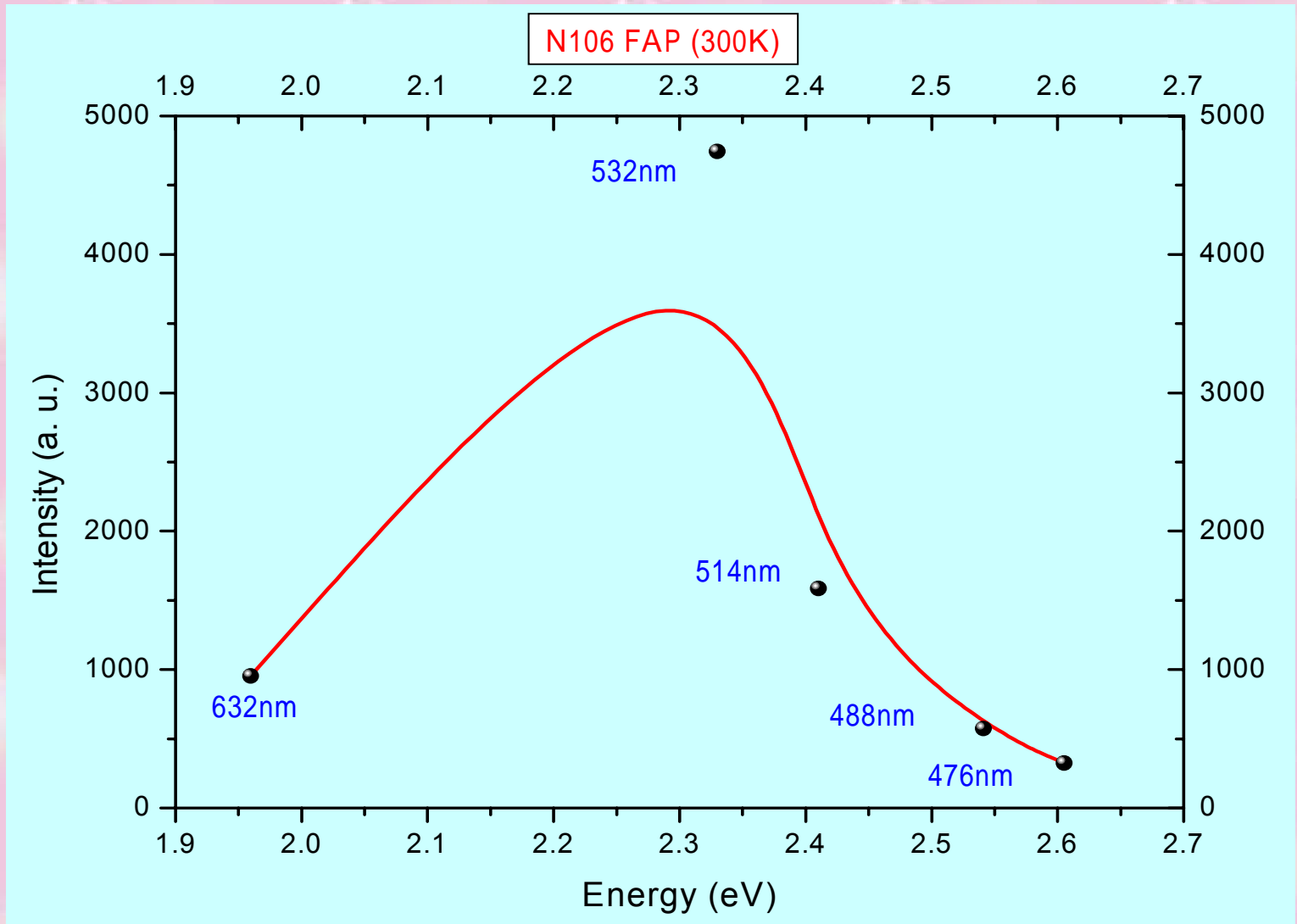


N106 FAP 的共振現象



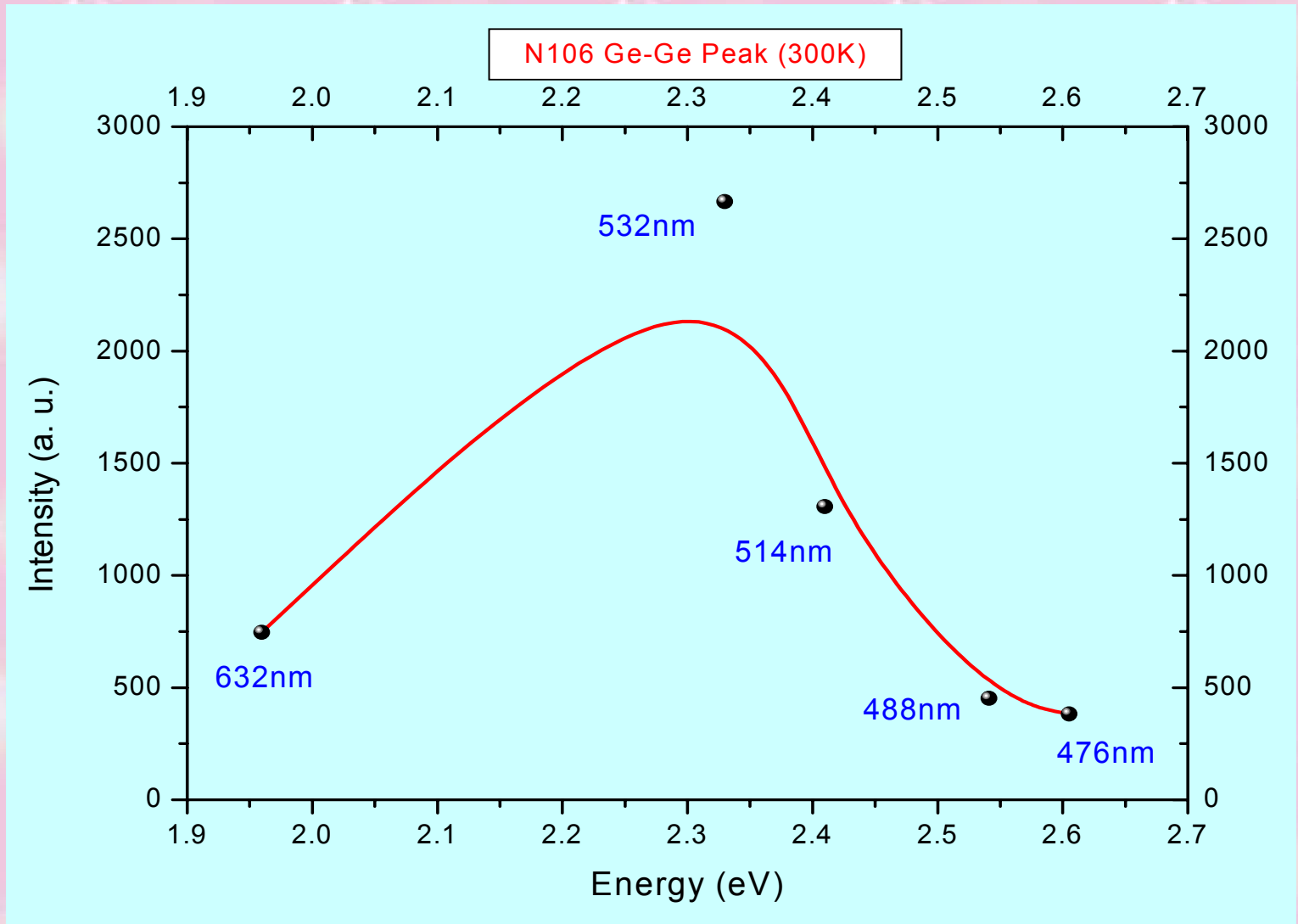


N106 FAP 強度與波長



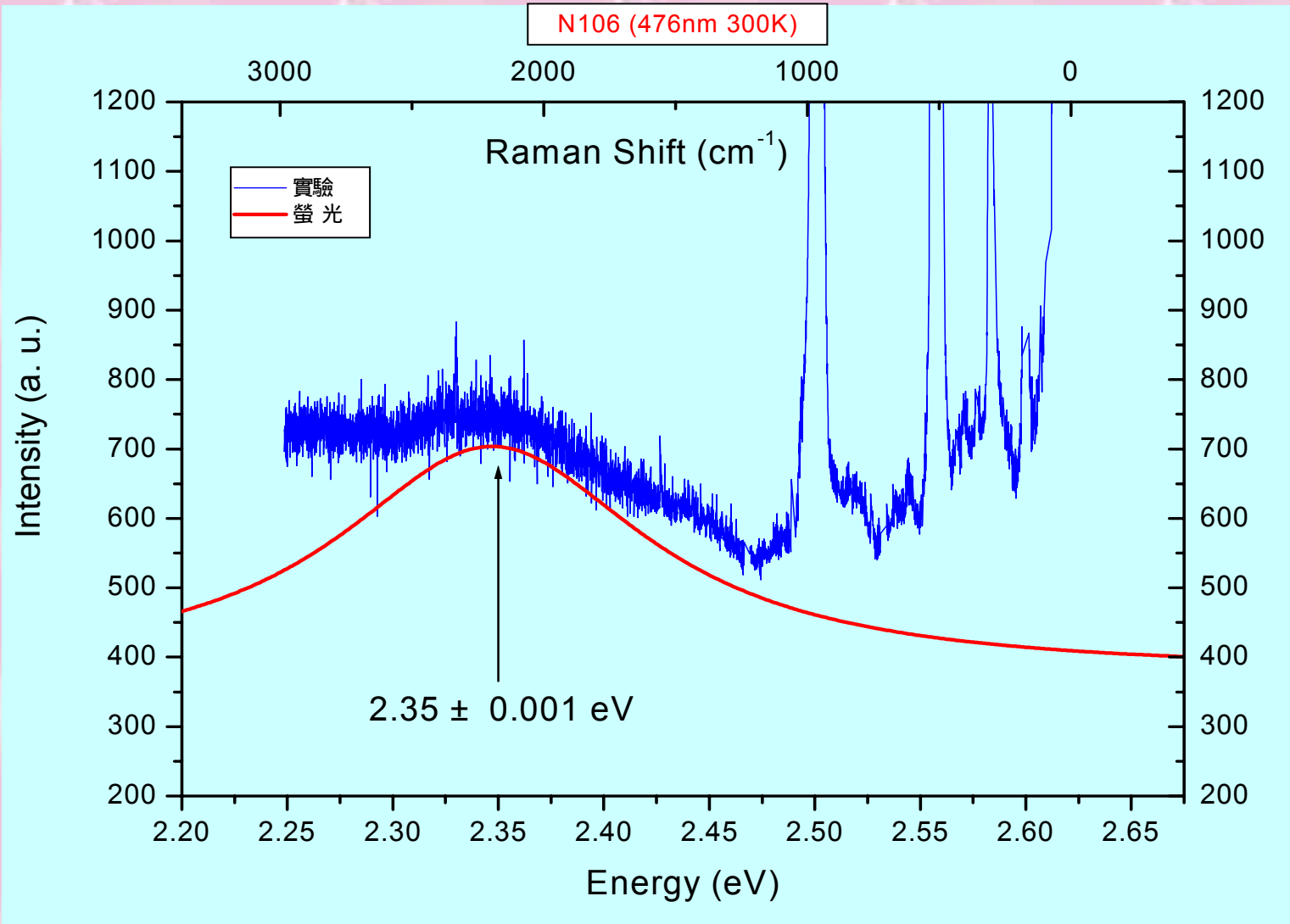


N106 Ge-Ge Peak 強度與波長



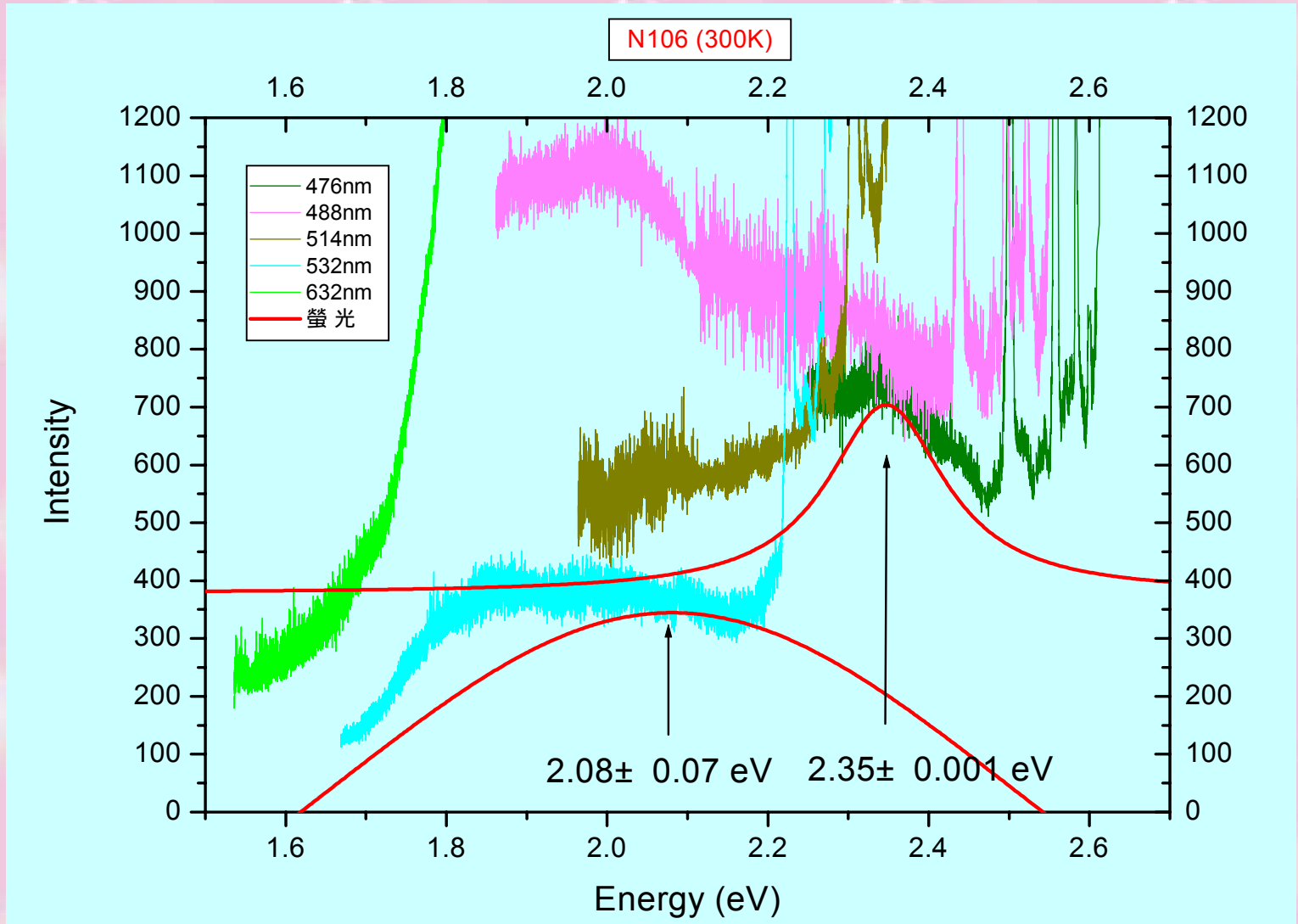


N106 螢光光譜 (476nm, 300k)





N106 螢光光譜 (各波長, 300K)





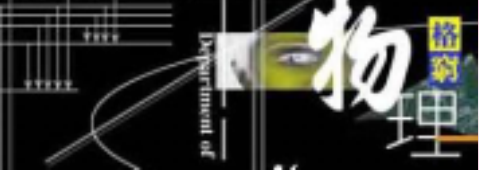
結 論

- ❖ 樣品N107在300K時，用532nm的光，發現在2.33eV，有連續性散射訊號。
- ❖ 樣品N105~N107由Ge-Ge Peak 得知銻的共振帶在波長532nm(2.33eV)附近。
- ❖ 各樣品之螢光效應，約發生在1.99eV至2.35eV，分佈甚寬。



總 結

- ❖ Rytov 理論可以成功預測少數週期之超晶格的FAP拉曼位移。
- ❖ 由拉曼FAP可以擬合矽、鍺層之厚度。
- ❖ 由光彈性力學可以擬合非共振區的折疊聲學聲子強度，並獲得 d_1/d 值。
- ❖ 以線性鏈模式（LCM）討論 Ge-Ge Mode可以計算鍺層的粗糙度和 d_2 值。
- ❖ 超晶格的共振能隙在532nm (2.33eV) 附近，且分佈範圍甚廣。



謝謝 指導

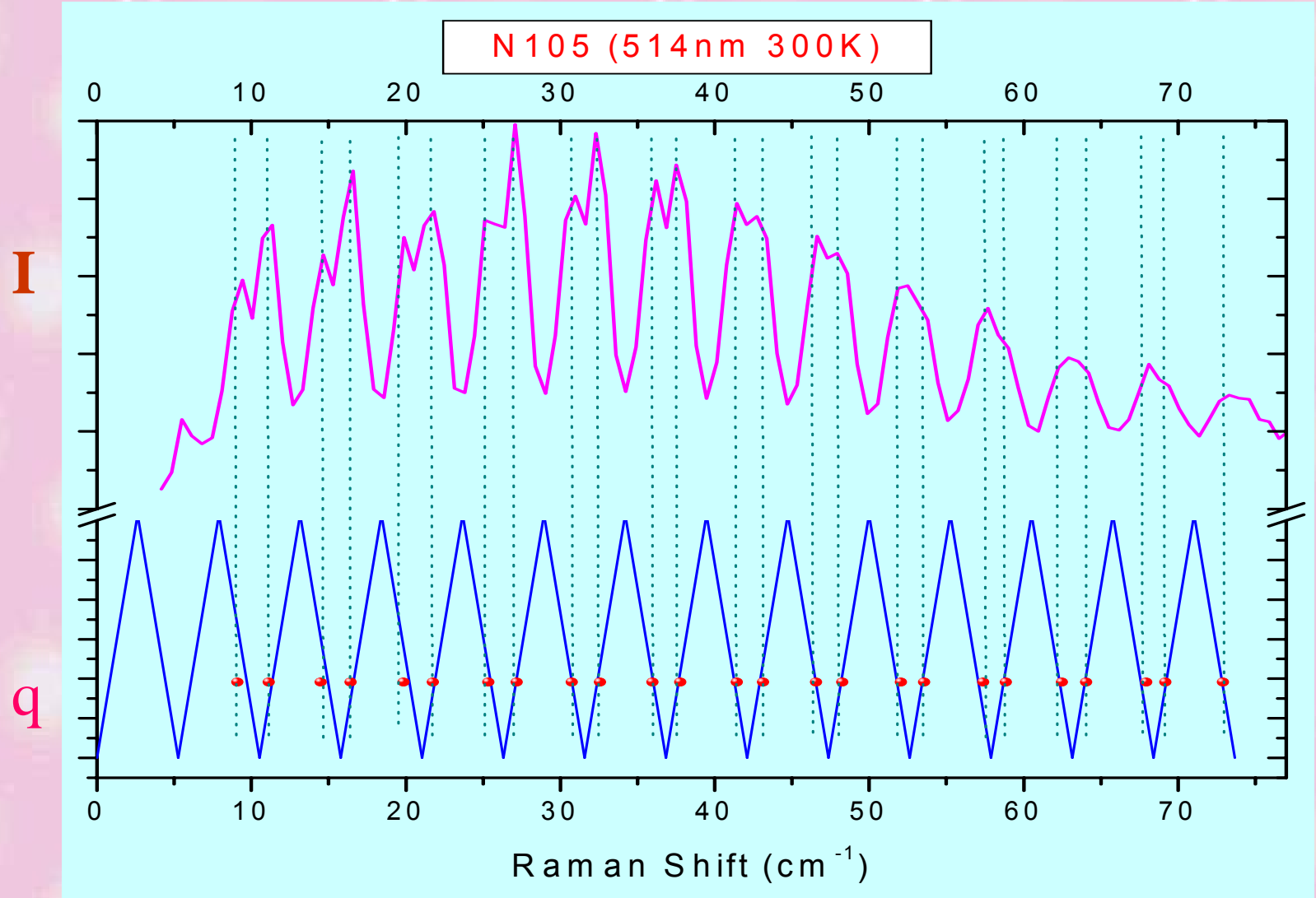


謝謝

敬敬指導

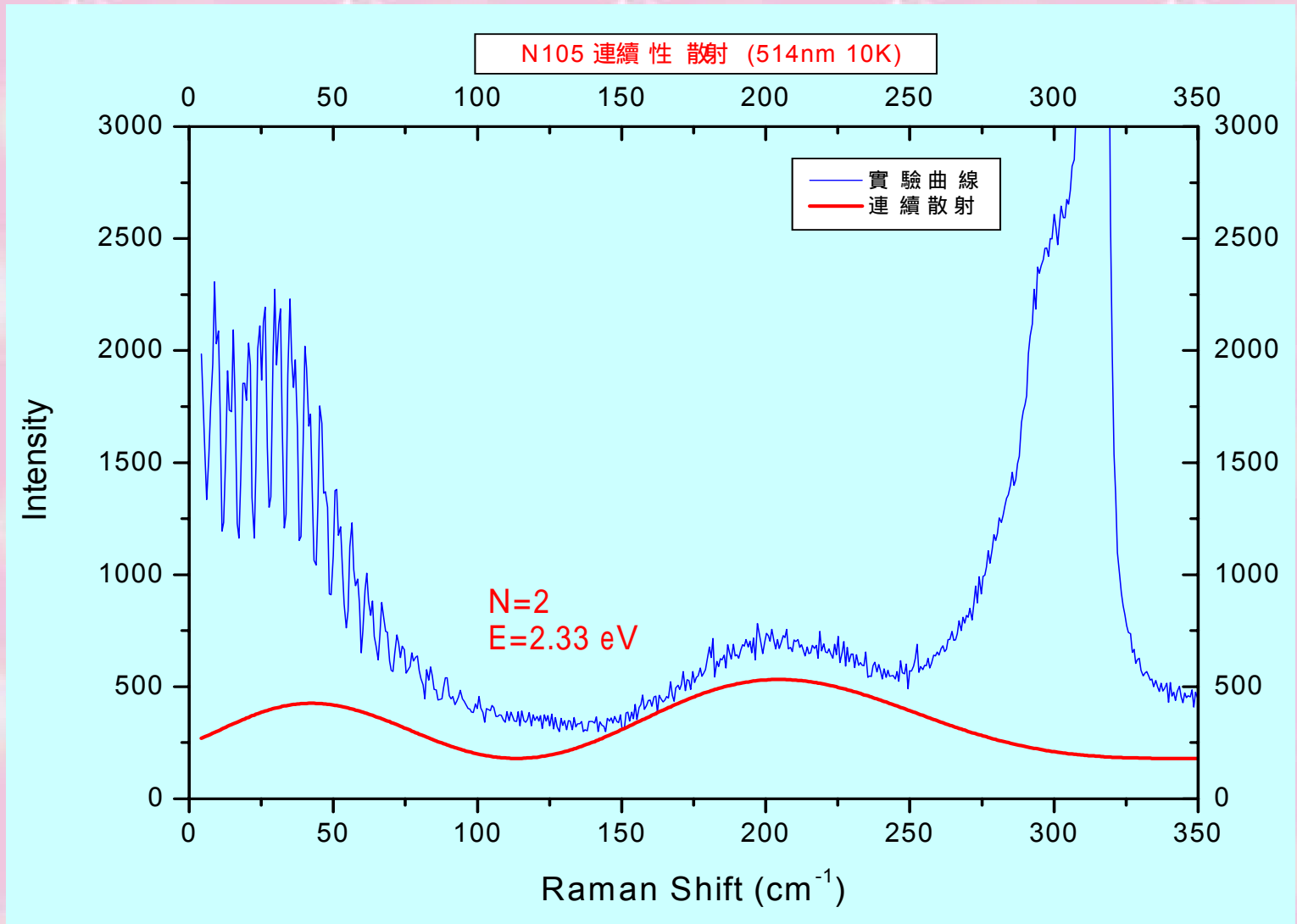


N105的折疊聲學聲子



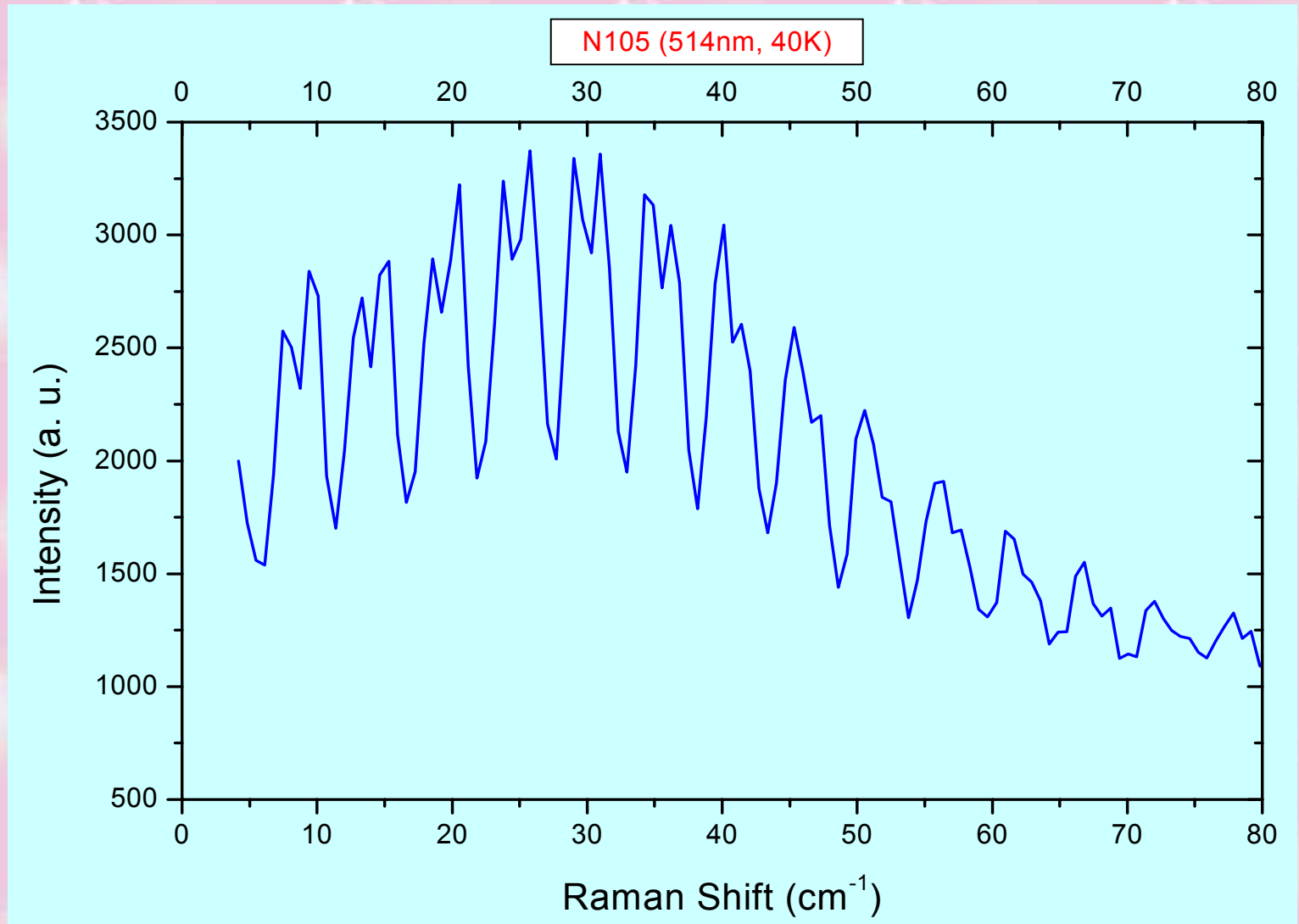


N105 連續性散射 (514nm, 10K)



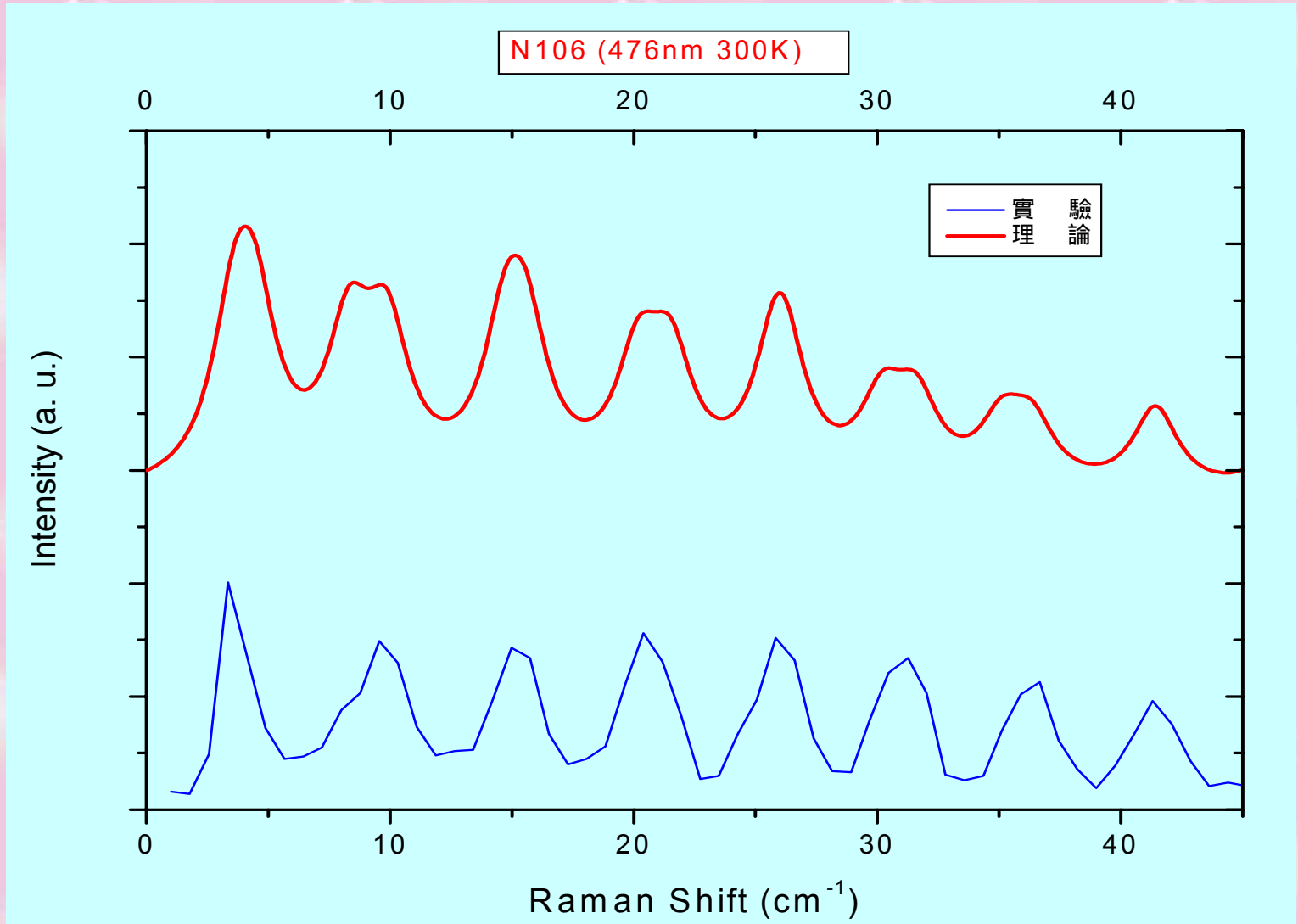


N105 的折疊聲子圖



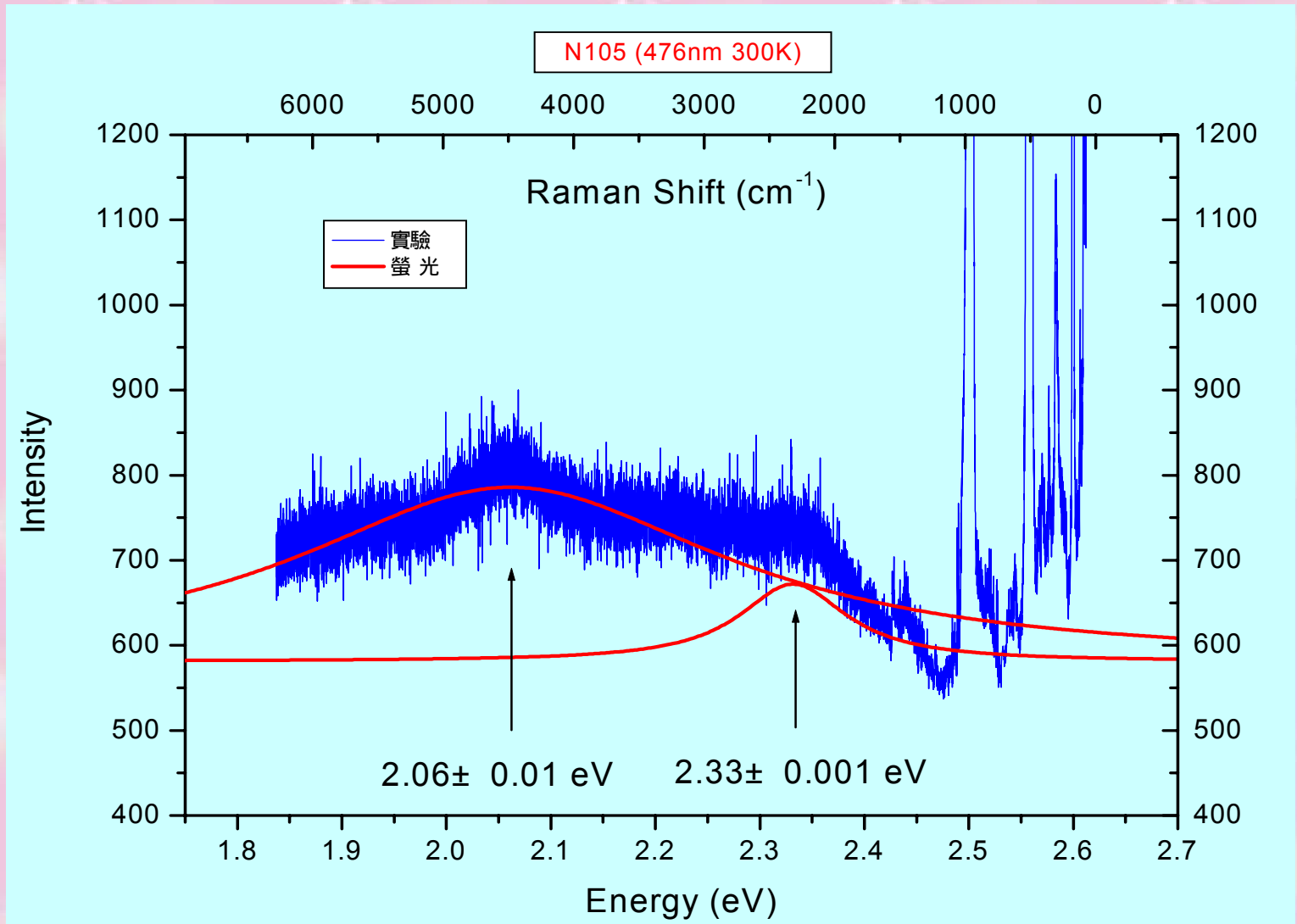


N106 折疊聲子的強度擬合



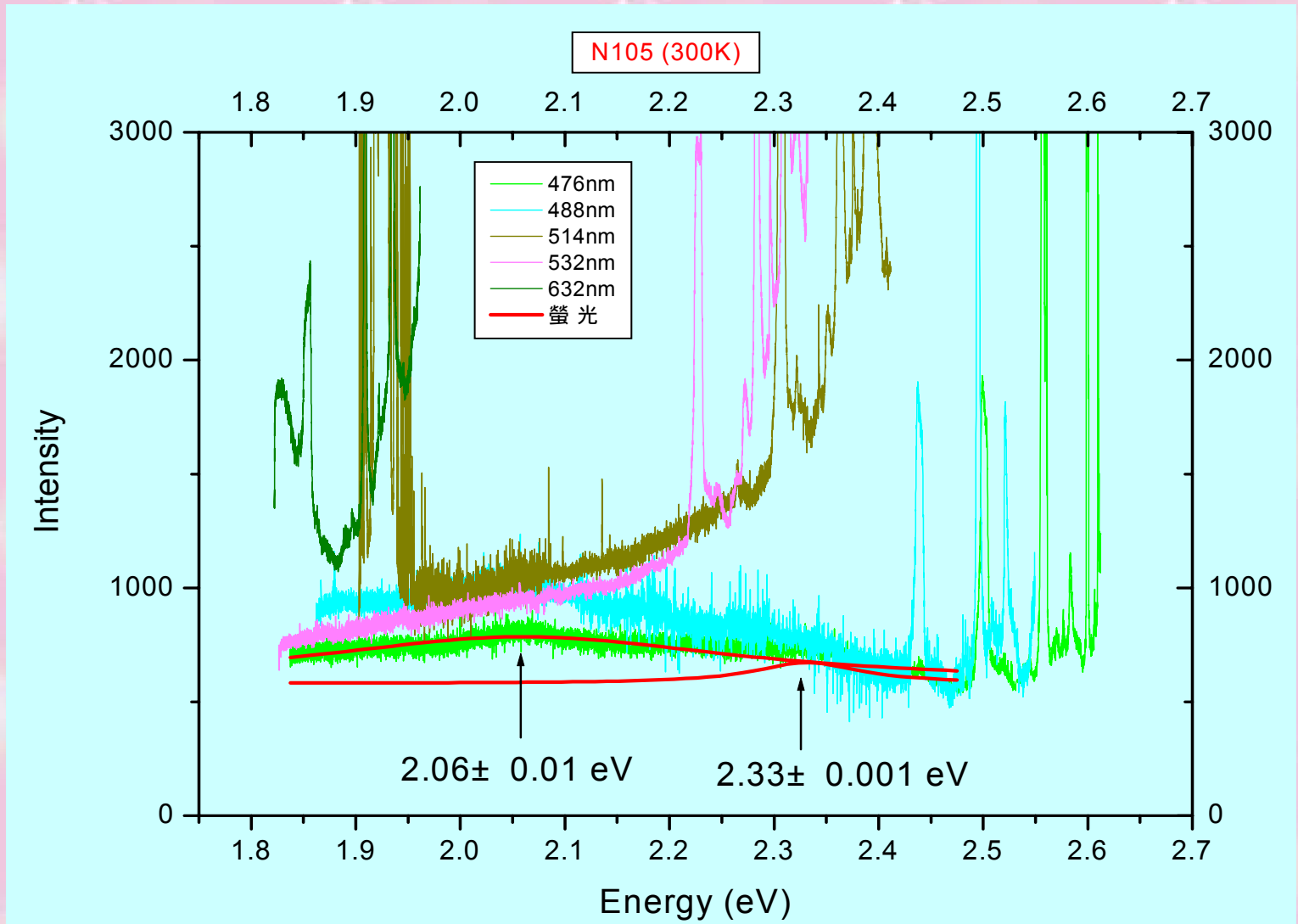


N105 螢光光譜 (476nm, 300k)





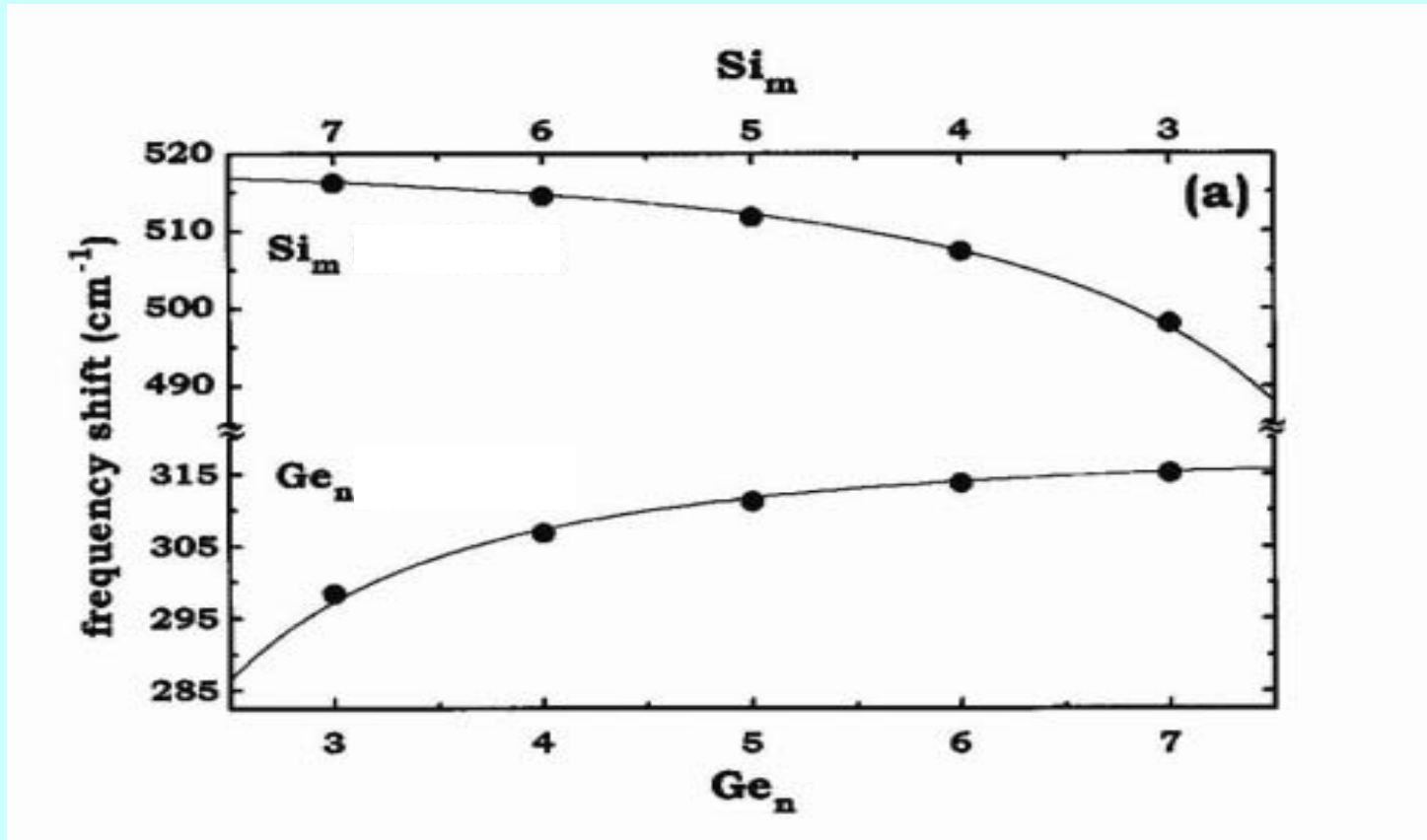
N105 螢光光譜 (各波長, 300K)





Ge-Ge Peak 與鍺層的厚度

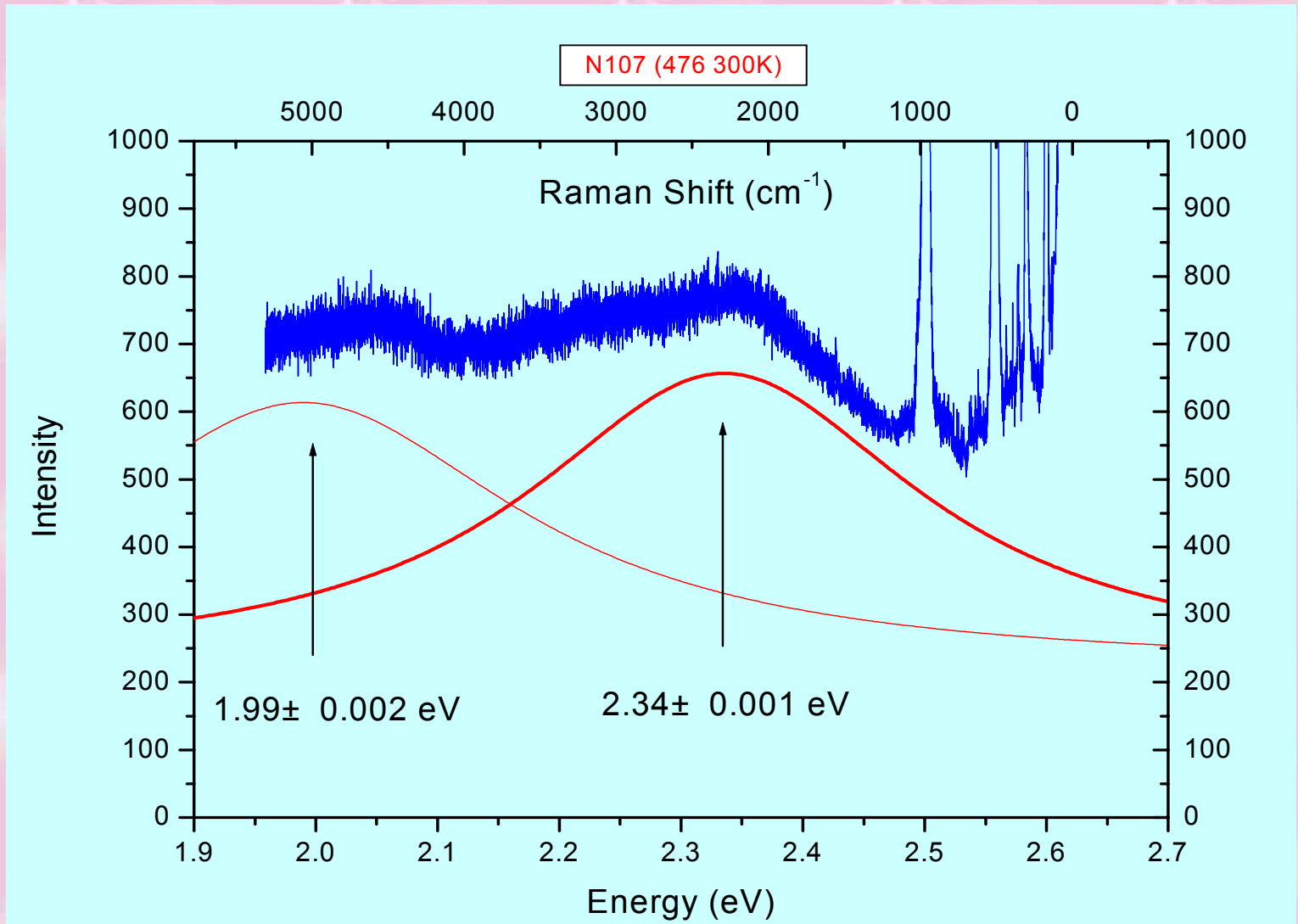
Ge-Ge Peak 的 Raman Shift 隨鍺層增厚而增大



n : 鍺層厚度，以晶層厚度為單位。



N107 螢光光譜 (476nm, 300k)





N107 螢光光譜 (各波長, 300K)

