

矽、鍺超晶格樣品之拉曼光譜研究

Raman study of Ge/Si(100) superlattices

指導教授：賈至達 博士

研究生：林建宏

日期：中華民國 九十一年 六月

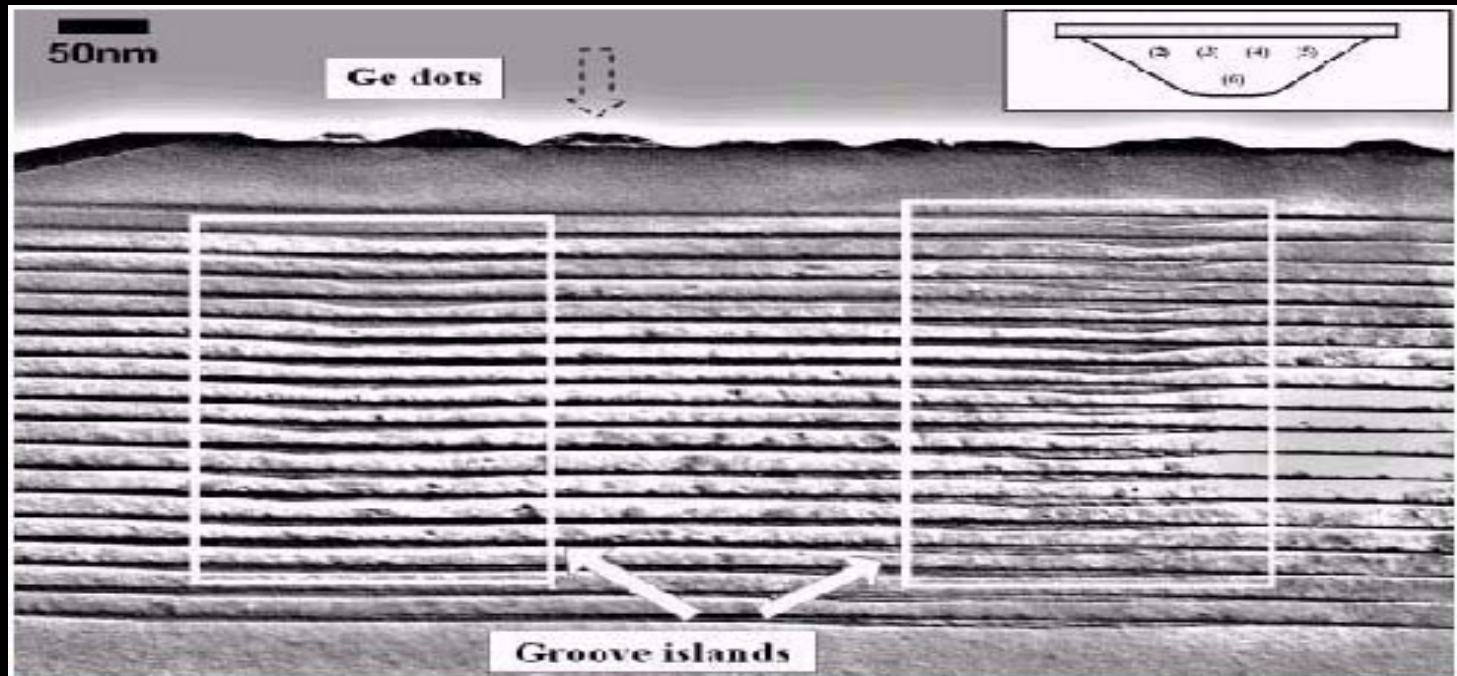


摘要

- 超晶格Si、Ge層厚度：Rytov理論模型及光彈力學
- 超晶格鍺層粗糙程度
- E_1 能帶：連續性散射理論與螢光光譜
- FAP和Optical Phonon：變溫拉曼光譜
- 結論



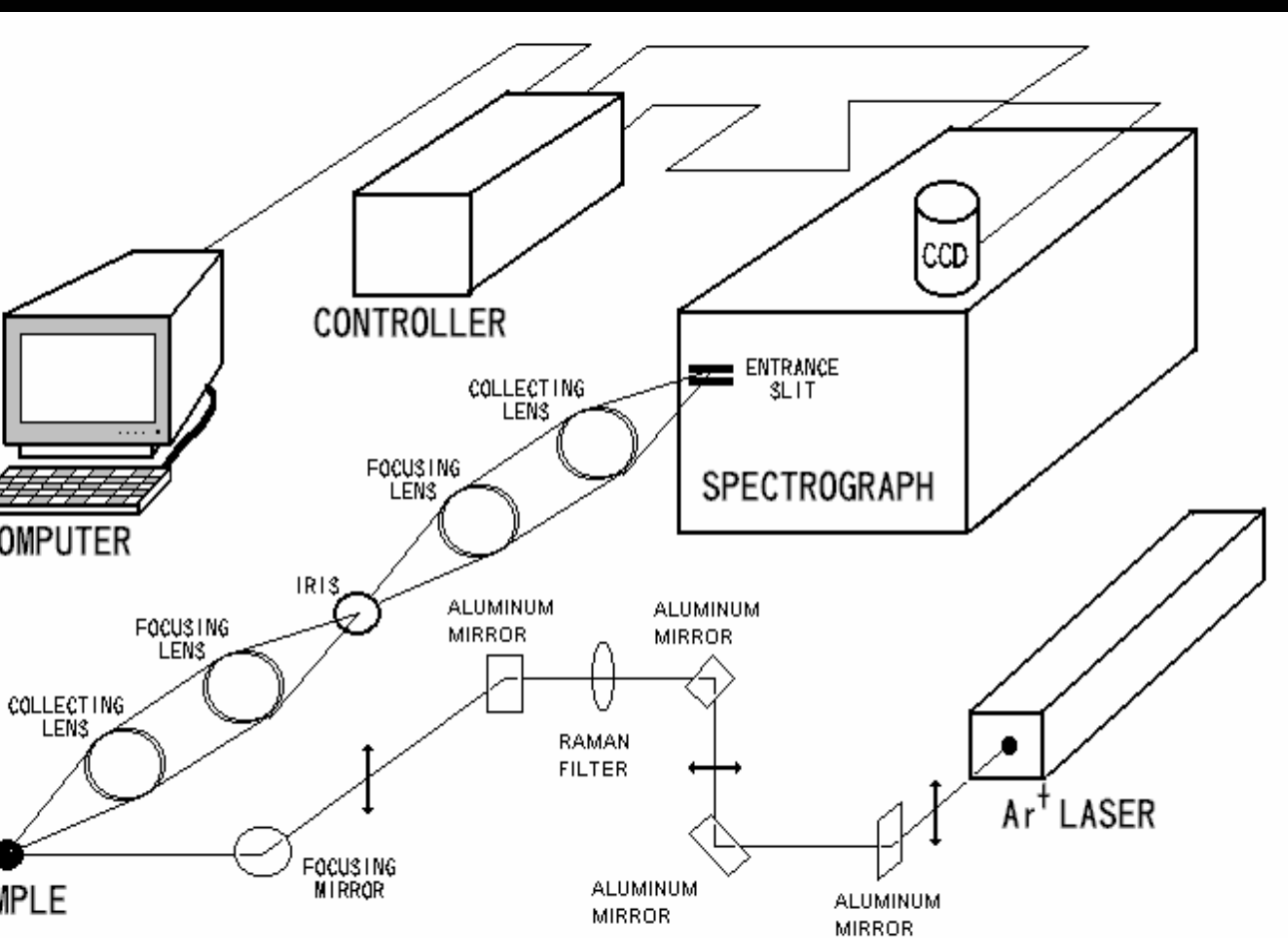
矽、鍺超晶格樣品



19週期

樣品編號	Ge層成長時間 (秒)	溫度 ()
21	8	350
22	10	300
23	12	250

拉曼光譜儀的裝置



主要雷射：

Ar⁺ Laser

457nm

476nm

488nm

514.5nm

He-Ne Laser

632.8nm

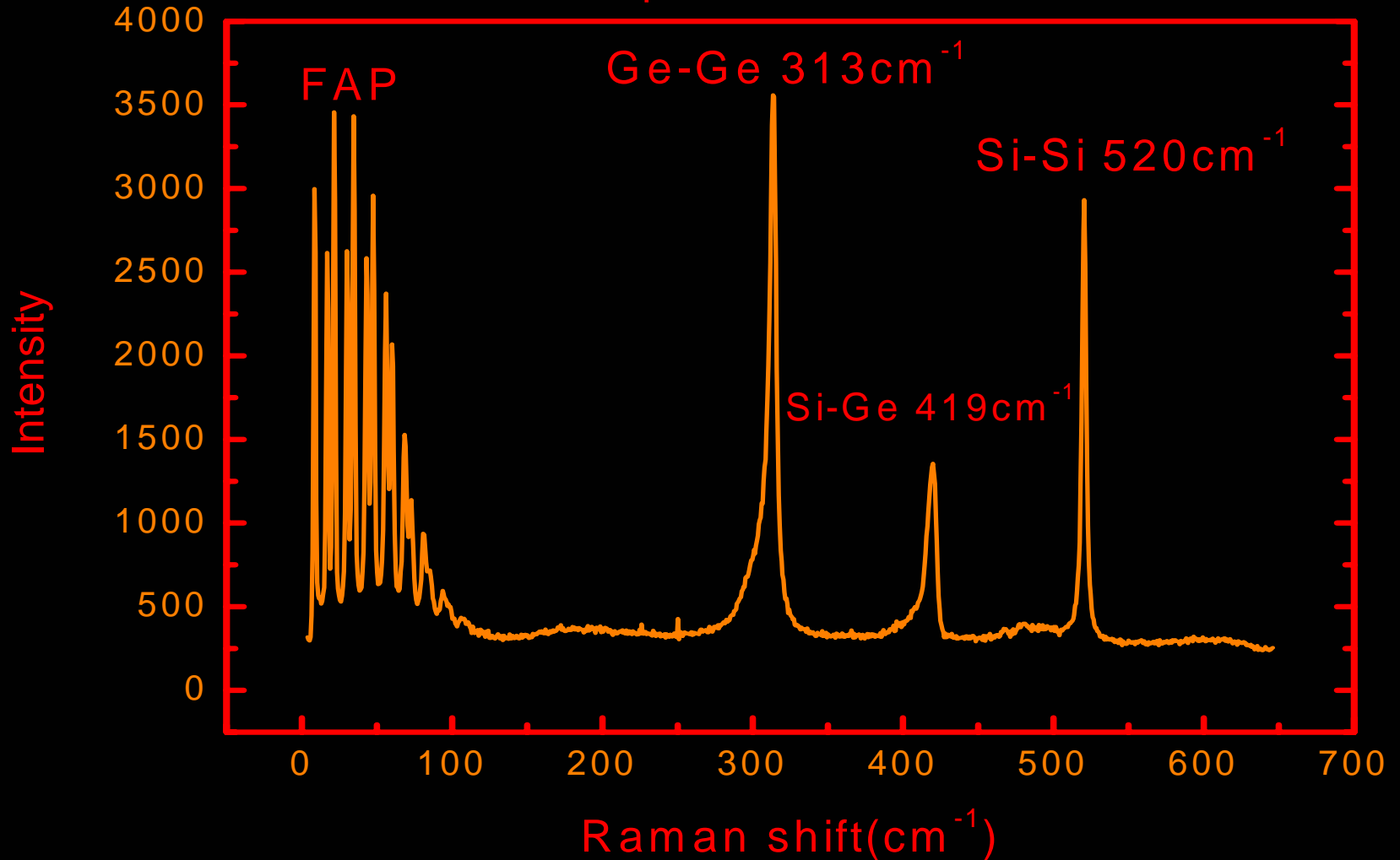
DDP YAG

Laser

532.22nm

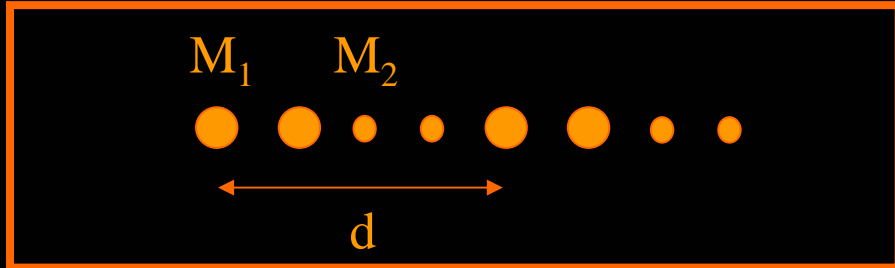
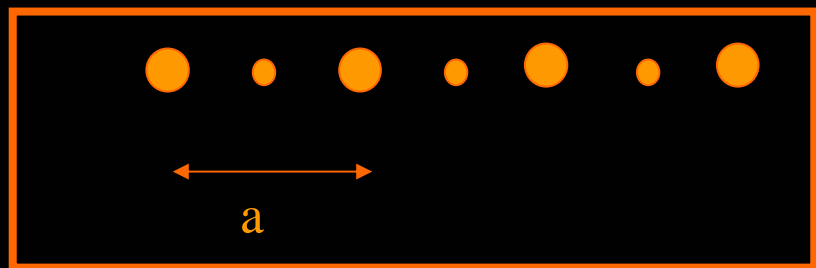
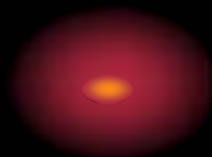
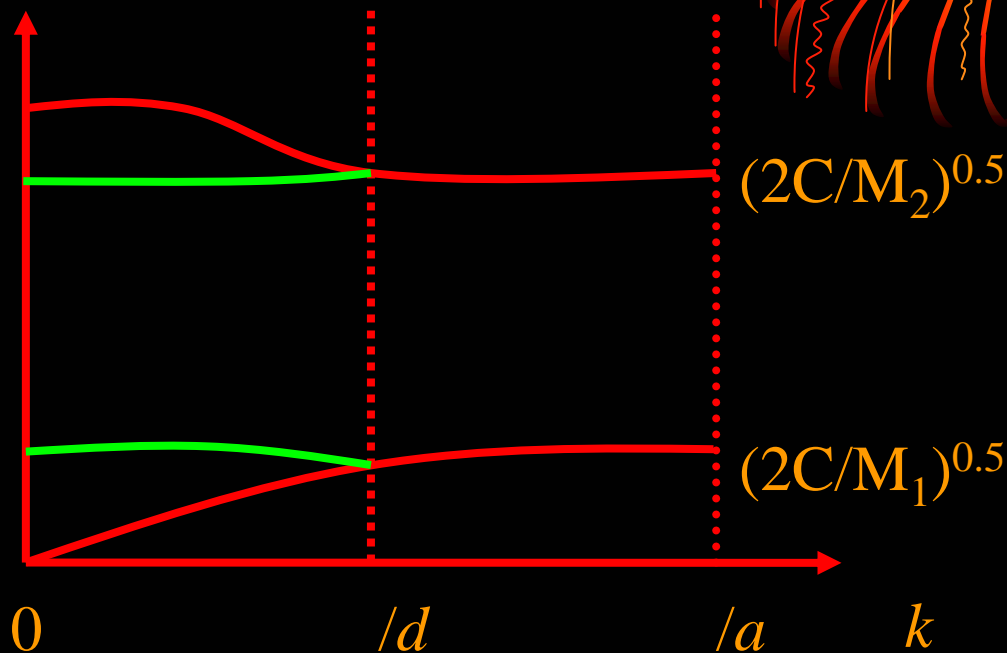
樣品拉曼光譜

Sample 21 514.5nm 300K



縱向折疊聲子形成

$$2C(1/M_1+1/M_2)^{0.5}$$



Rytov色散關係

$$\cos(qd) = \cos\left(\frac{\omega d_1}{V_1}\right) \cos\left(\frac{\omega d_2}{V_2}\right) - \frac{1}{2} \left(K + \frac{1}{K} \right) \sin\left(\frac{\omega d_1}{V_1}\right) \sin\left(\frac{\omega d_2}{V_2}\right)$$

ω : 折疊聲子頻率

d : 超晶格週期

V : 聲速

$$K = \frac{2V_2}{V_1}$$

ρ : 密度

Rytov色散關係—線性近似

$$\omega = \left| V_{SL} \left(q + \frac{2\pi m}{d} \right) \right|$$

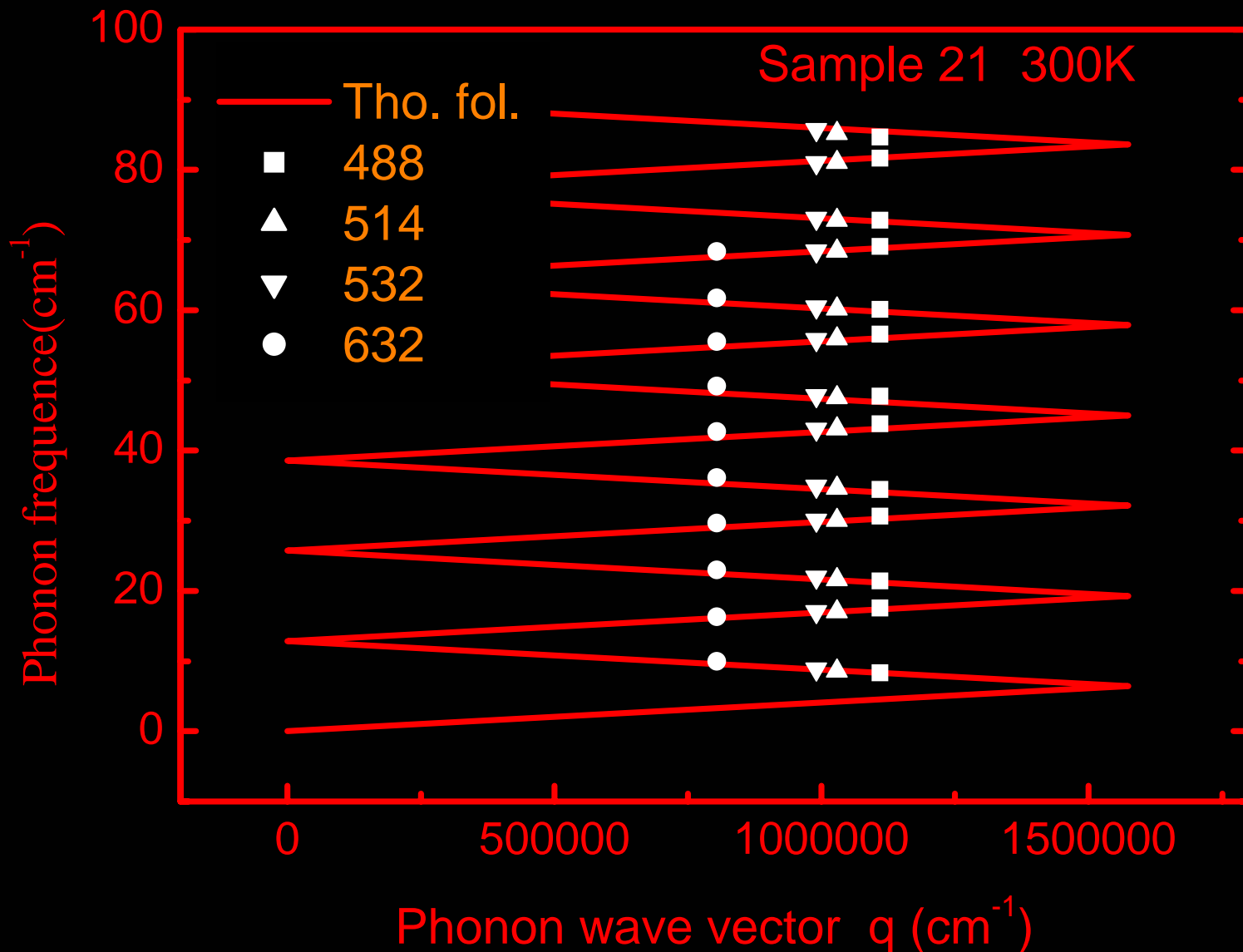
$$V_{SL} = d \left[\frac{d_1^2}{V_1^2} + \frac{d_2^2}{V_2^2} + \left(K + \frac{1}{K} \right) \frac{d_1 d_2}{V_1 V_2} \right]^{-1/2}$$

$$q = \frac{4\pi n_{SL}(\lambda)}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{4(n_{SL}(\lambda))^2} \right]$$

$$n_{SL}^2 = (n_1^2 d_1 + n_2^2 d_2) / d$$

- ω : 折疊聲子頻率
- V_{SL} : 樣品中等效聲速
- q : 入射雷射在樣品
- d : 超晶格週期
- V : 聲速
- $K = \rho_2 V_2 / \rho_1 V_1$
- ρ : 密度
- λ : 光在真空中波長
- n_{SL} : 等效折射率
- m : 折疊量子數
0, ±1, ±2, ±3.....

Rytov色散關係擬合



縱向折疊
聲學聲子
(LA)

折疊聲子拉曼散射強度

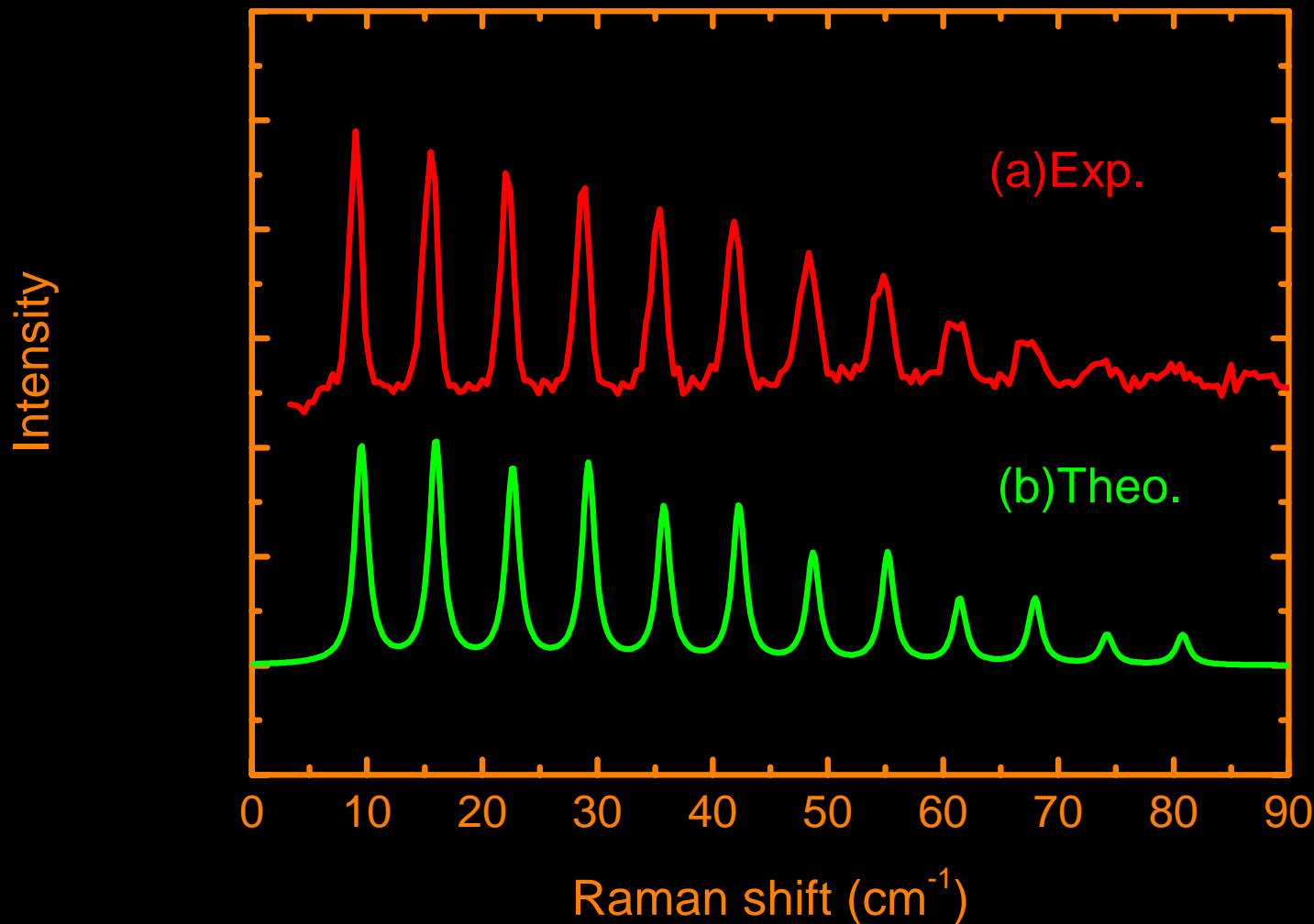
$$\frac{I_m}{I_{Brill}} = \frac{(P_b^{12} - P_a^{12}) \sin^2(m\pi \frac{d_1}{d})}{P_0^2 \pi^2 m^2} \eta$$

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

n_0 為量子數 $m=0$ 的聲子數目對溫度分布，為 Bose-Einstein 分佈， n_m 為量子數 m 的聲子數目對溫度分布， ω_0 為量子數 $m=0$ 的聲子頻率， ω_m 為量子數 m 的聲子頻率。

折疊聲子強度擬合

Sample21 300K 632.8nm



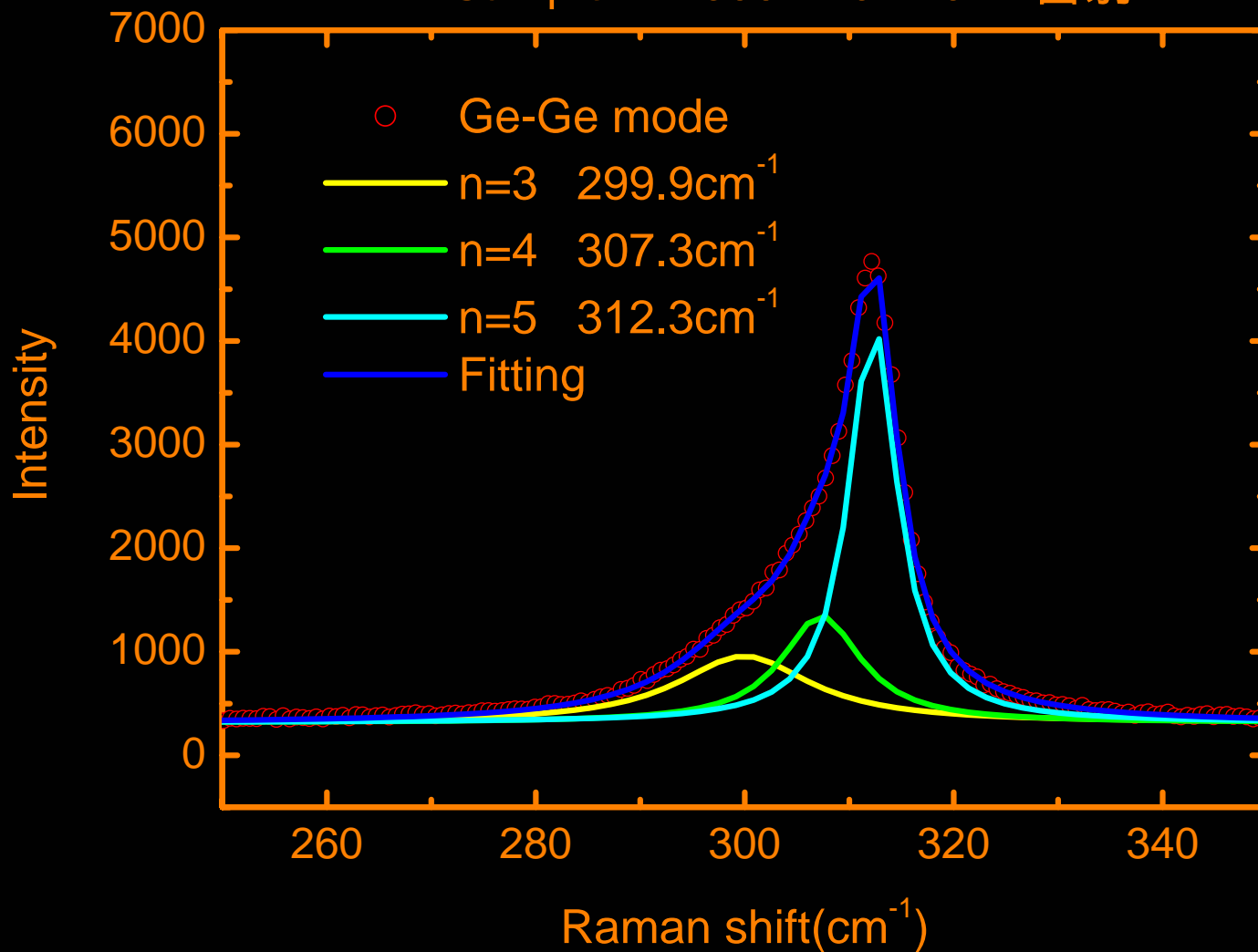
縱向折疊
聲學聲子
(LA)

超晶格樣品厚度擬合

樣品21	Si厚度(nm)	Ge厚度(nm)	厚度比 d_1/d	超晶格週期 d (nm)
TEM圖	15±2	3±2	0.83	18±4
光譜擬合	17.5±0.6	2.40±0.08	0.88	19.9±0.7
樣品22				
TEM圖	17±2	2±2	0.90	19±4
光譜擬合	15.8±0.5	2.30±0.08	0.90	18.1±0.6
樣品23				
TEM圖	20±2	2±2	0.91	22±4
光譜擬合	19.6±0.7	2.50±0.09	0.89	22.1±0.8

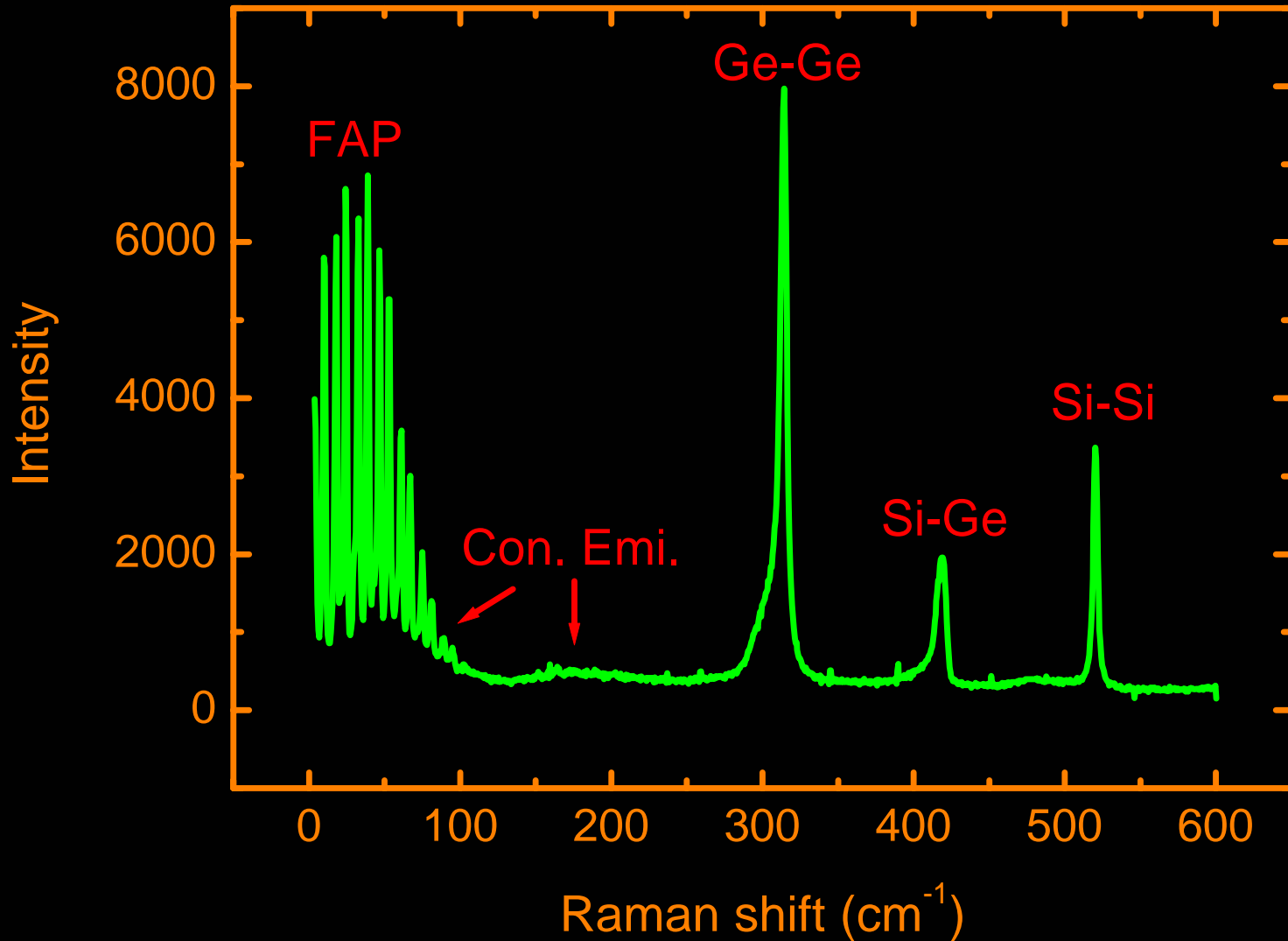
鍺層平整度

Sample 21 300K 514.5nm雷射



連續性散射

Sample 22 300K 532nm Laser



連續性散射強度



$$\omega) \cong \sum_{q_z} \frac{q_z^2}{q_z} \frac{\sin^2 \frac{aq_z}{2} (n_q + 1)}{\left(\frac{aq_z}{2}\right)^2} \left(\begin{matrix} l \\ s \\ q \end{matrix} \right)$$

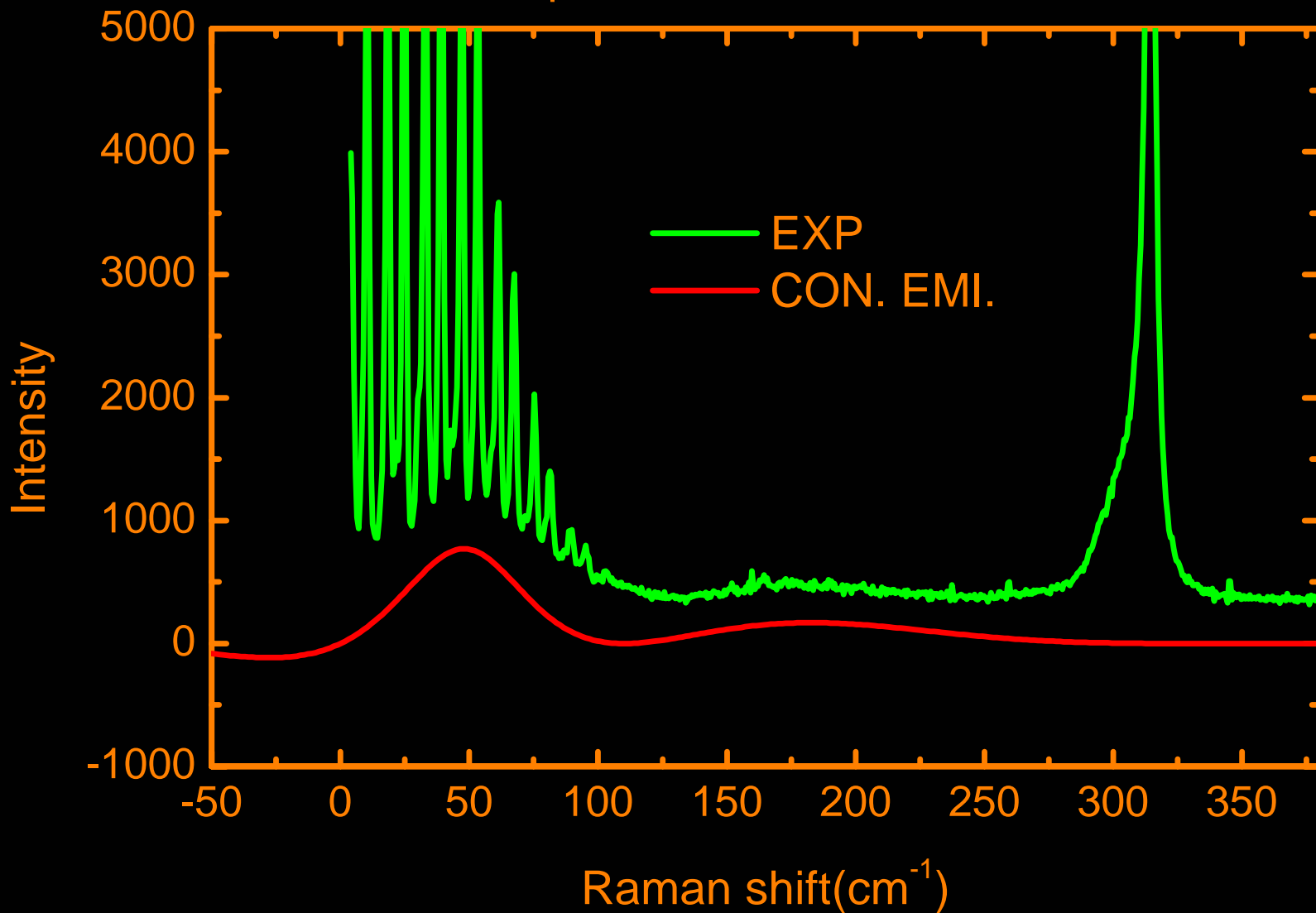
$$\times \left| \sum_N \left(\Omega_N + i \frac{\gamma_e + \gamma_h}{2} \right)^{-1} \left(\Omega_N - \begin{matrix} l \\ s \end{matrix} + i \frac{\gamma_e + \gamma_h}{2} \right)^{-1} \times \frac{4N^2}{4N^2 - \left(\frac{aq_z}{2}\right)^2} \right|^2$$

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. (1992)

連続性散射擬合

sample225 532nm laser 300K



擬合所得樣品共振能隙

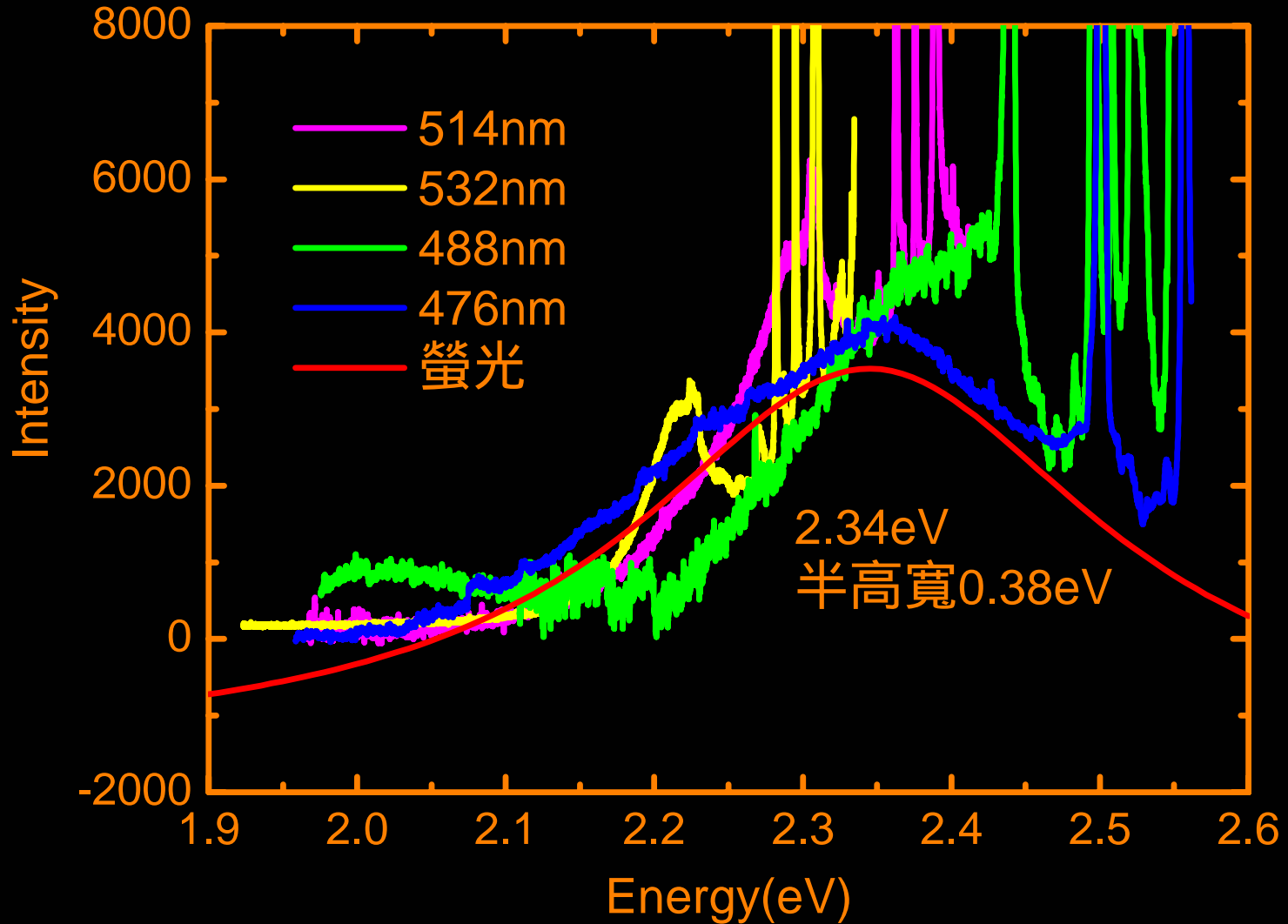
	488nm雷射光譜擬合	514nm雷射光譜擬合	532nm雷射光譜擬合	Ref. E_1 實驗數值 (鍺塊材)
樣品21	2.52	2.42	2.34	2.22
樣品22	2.53	2.42	2.32	
樣品23	2.53	2.42	2.34	

L. Viña, S. Logothetidis, and M. Cardona, Phys. Rev. B, Vol **30**, 1979 (1984)

K. L. Teo, S. H. Kwok, P. Y. Yu, and Soumyendu Guha, Phys. Rev. B, Vol. **62**, 1584.(1999)

螢光光譜

Sample23 300K

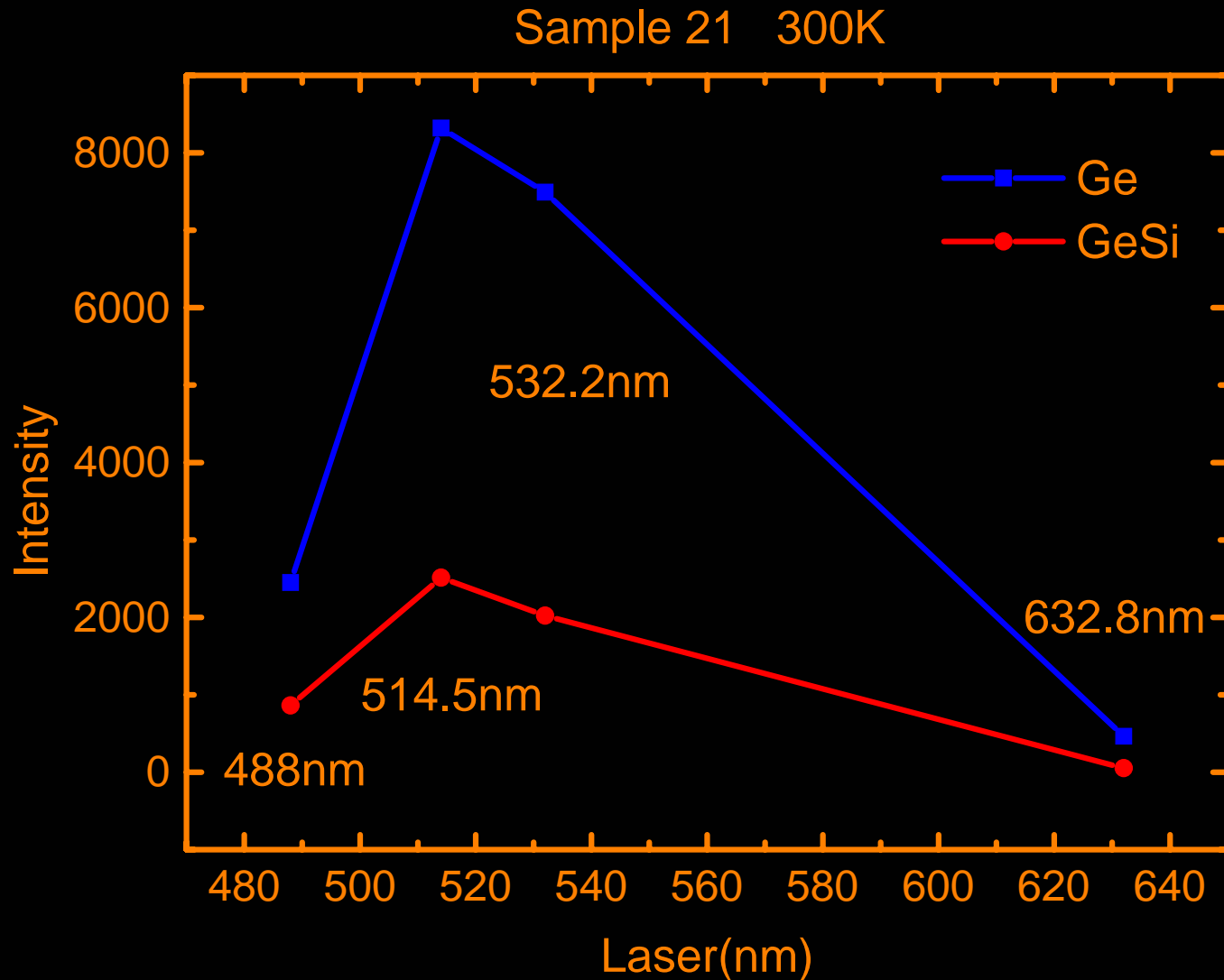


螢光光譜結果



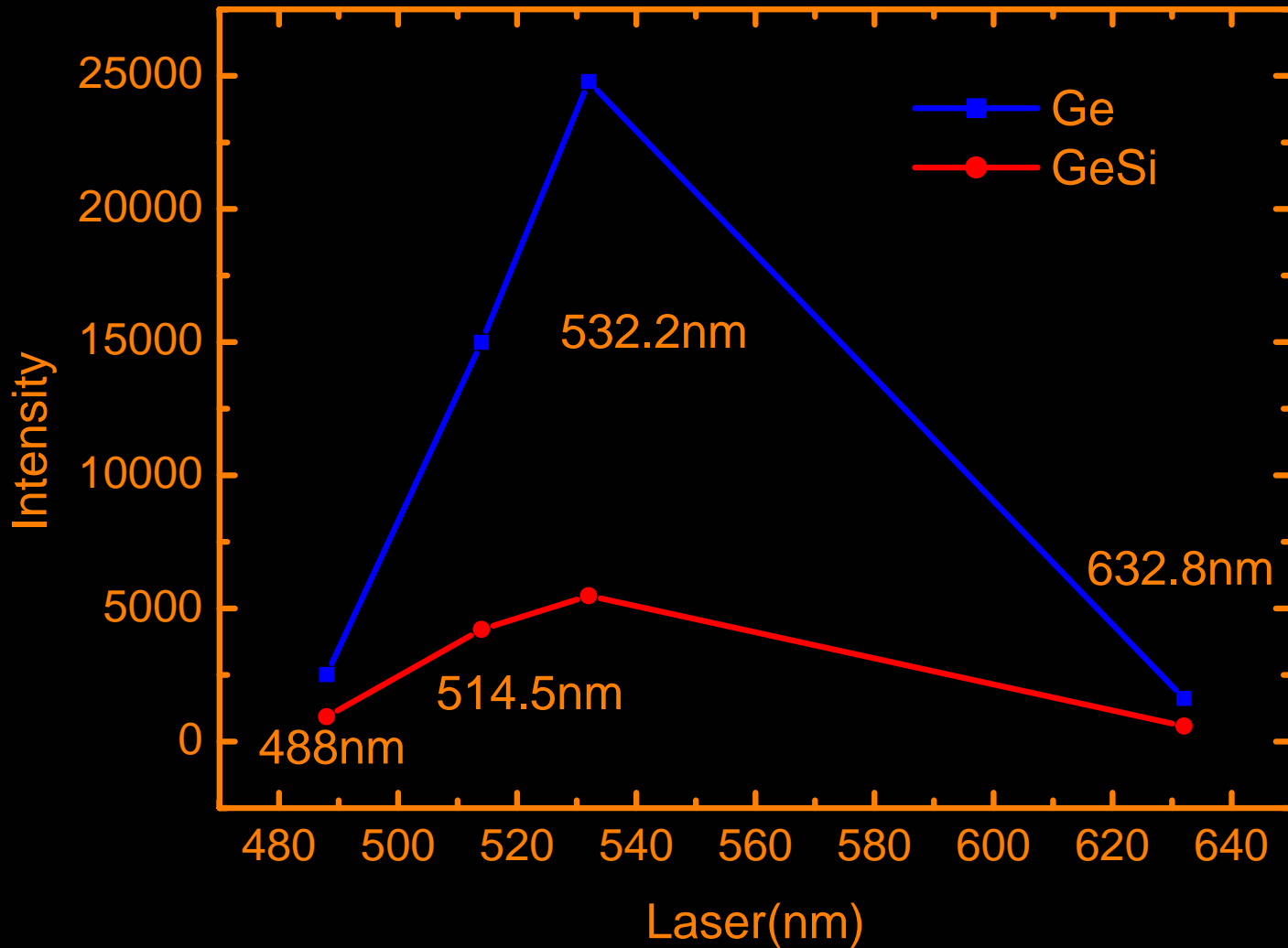
樣品	鍺層厚度 (nm)	光譜螢光中心 (eV)	螢光光譜 半高寬
21	2.40±0.08	2.40±0.05	0.3eV
22	2.30±0.08	2.33±0.05	0.3eV
23	2.50±0.09	2.34±0.05	0.4eV

相對於Si-Si聲子強度

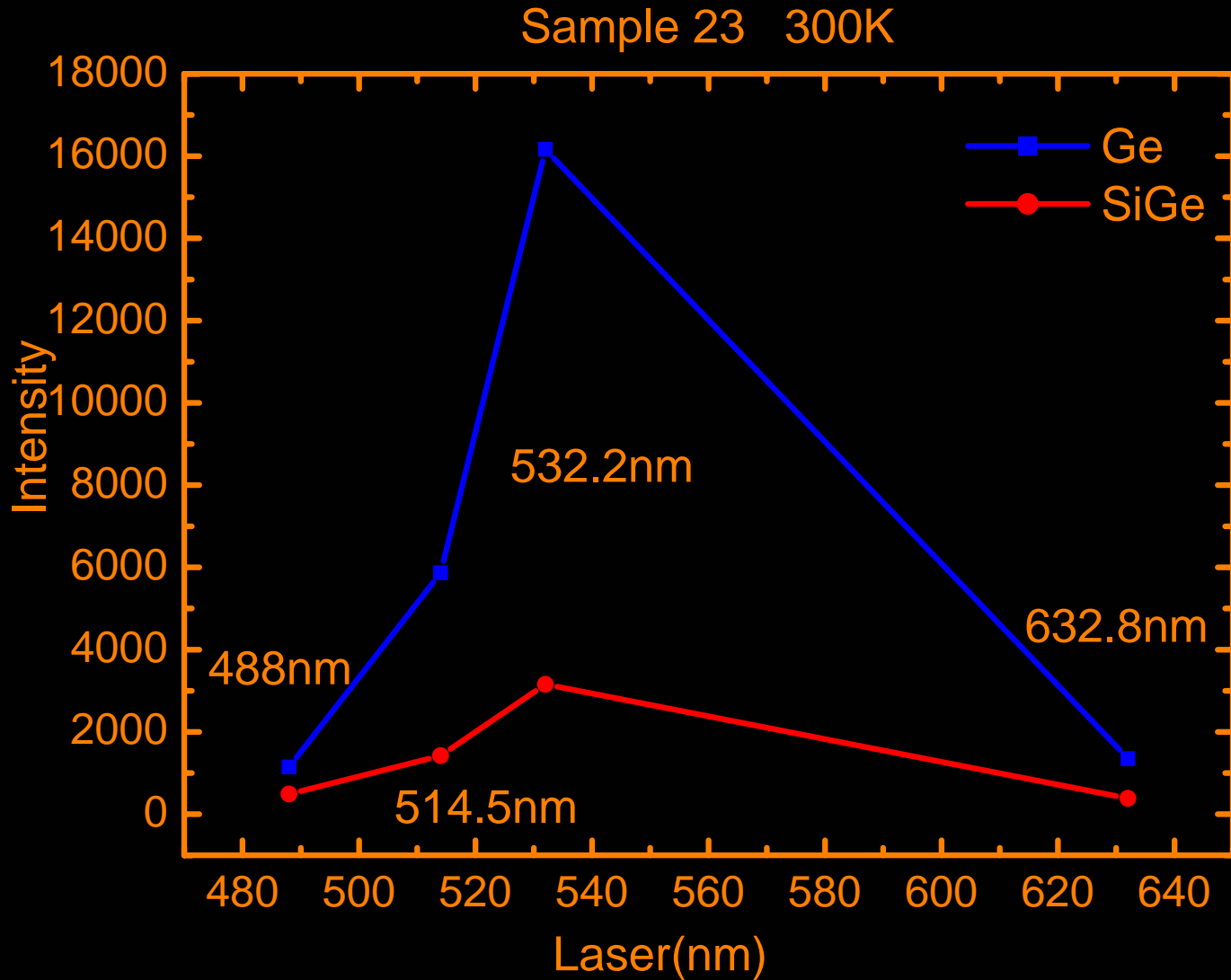


相對於Si-Si聲子強度

Sample 22 300K

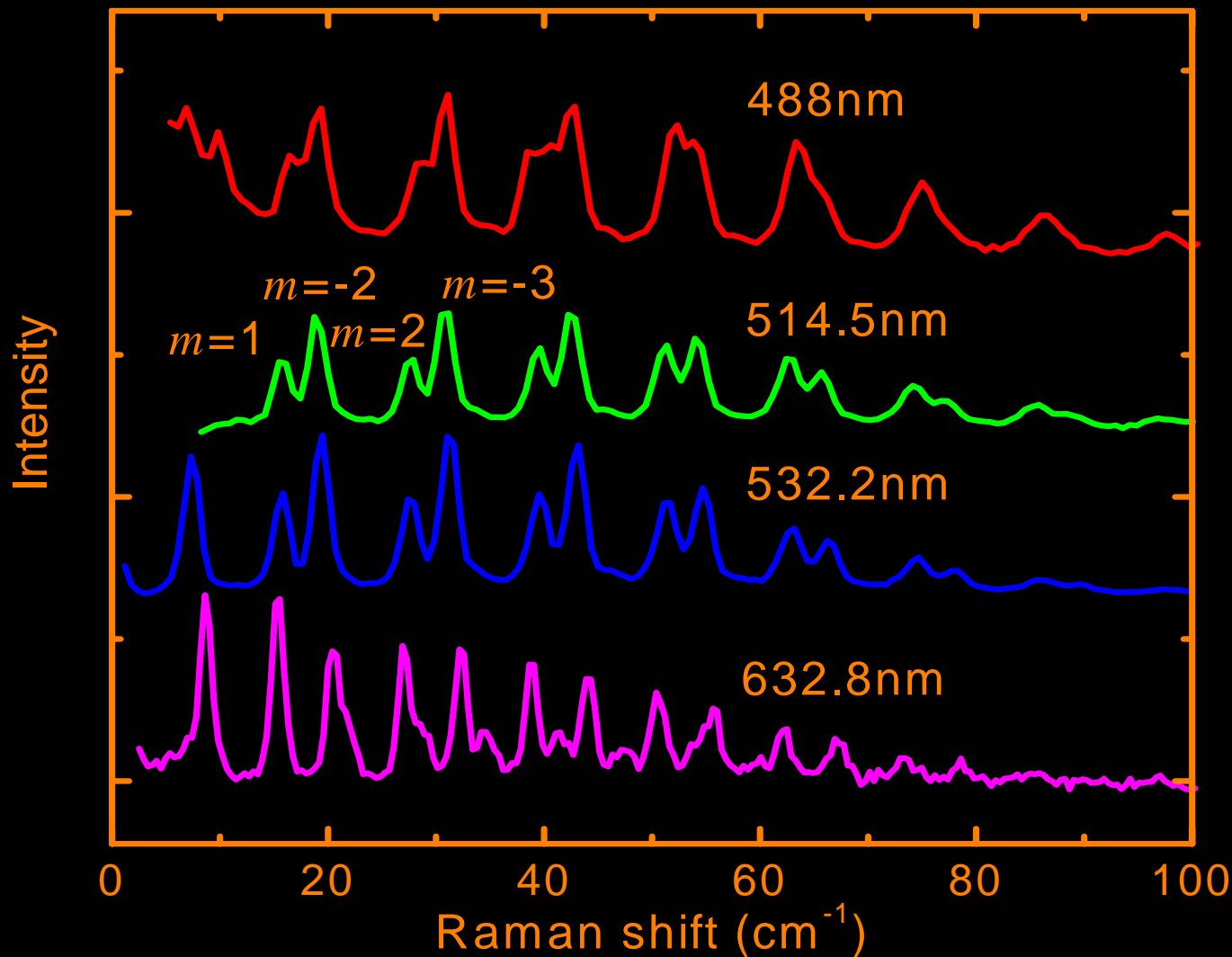


相對於Si-Si聲子強度



折疊聲子強度

Sample23 300K



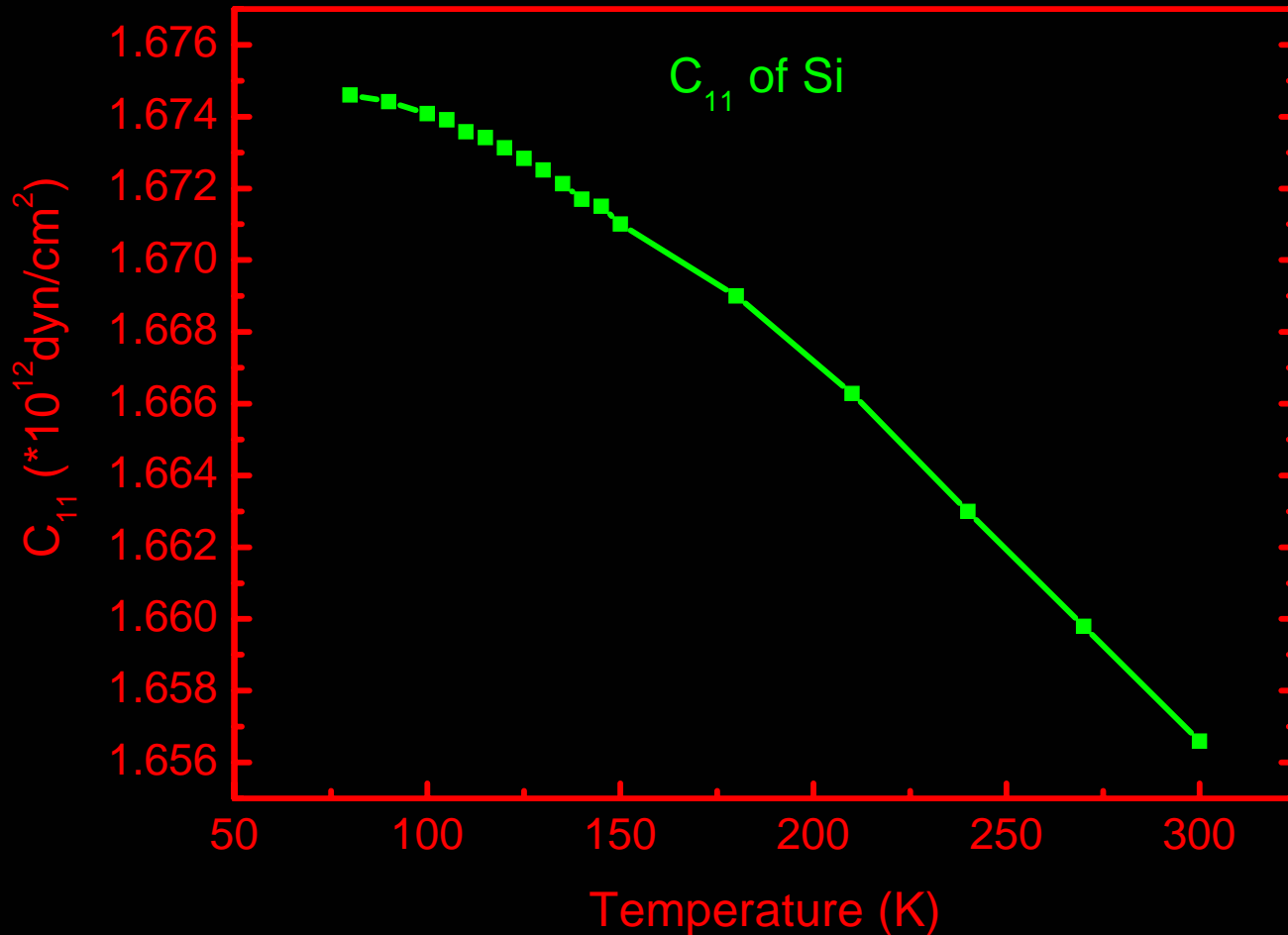
改變矽鍺超晶格樣品溫度

超晶格樣品厚度、聲速、折射率隨溫度不同而改變。在立方晶系中沿[100]方向傳播的縱波，其群速為：

$$V = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}$$

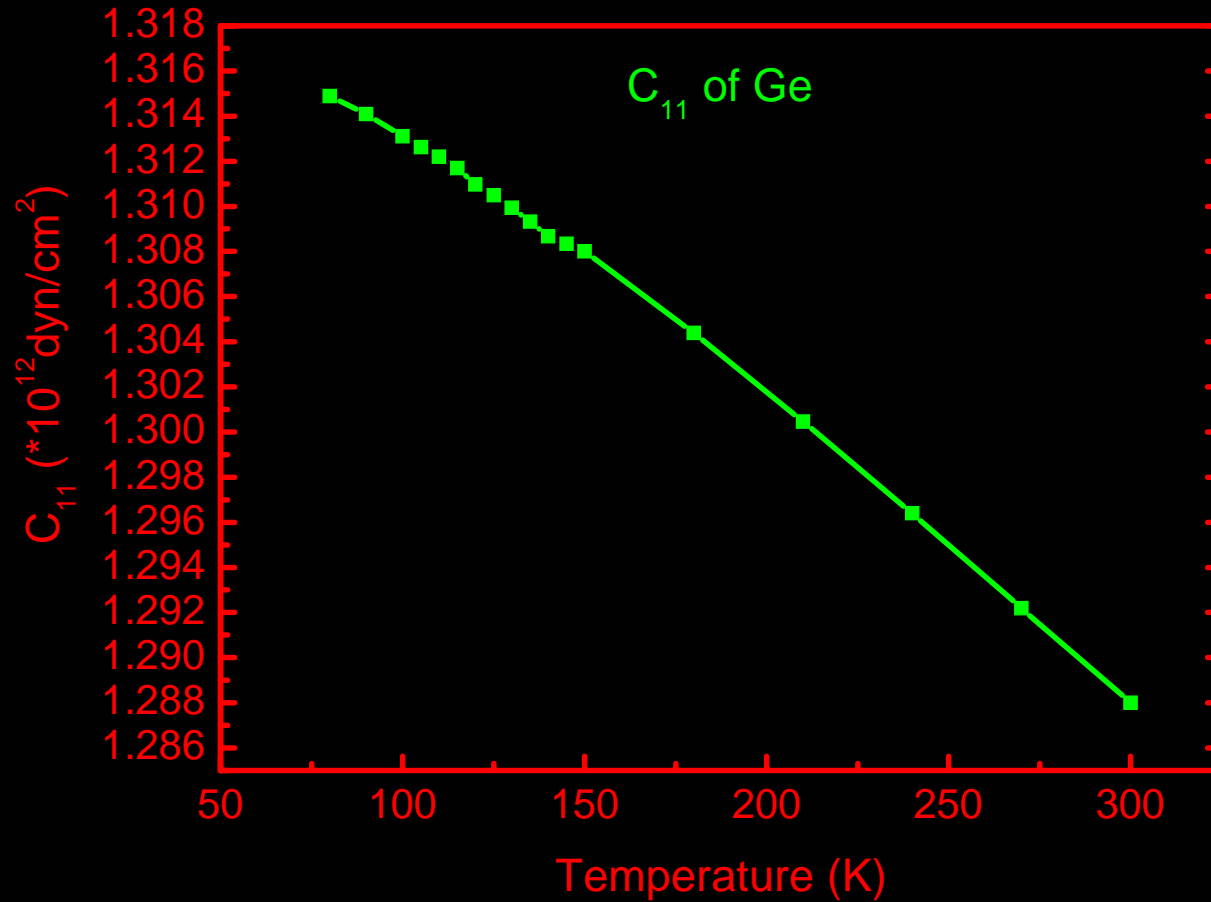
C_{11} 為[100]方向晶格彈力常數， ρ 為體密度

矽：彈力常數-溫度



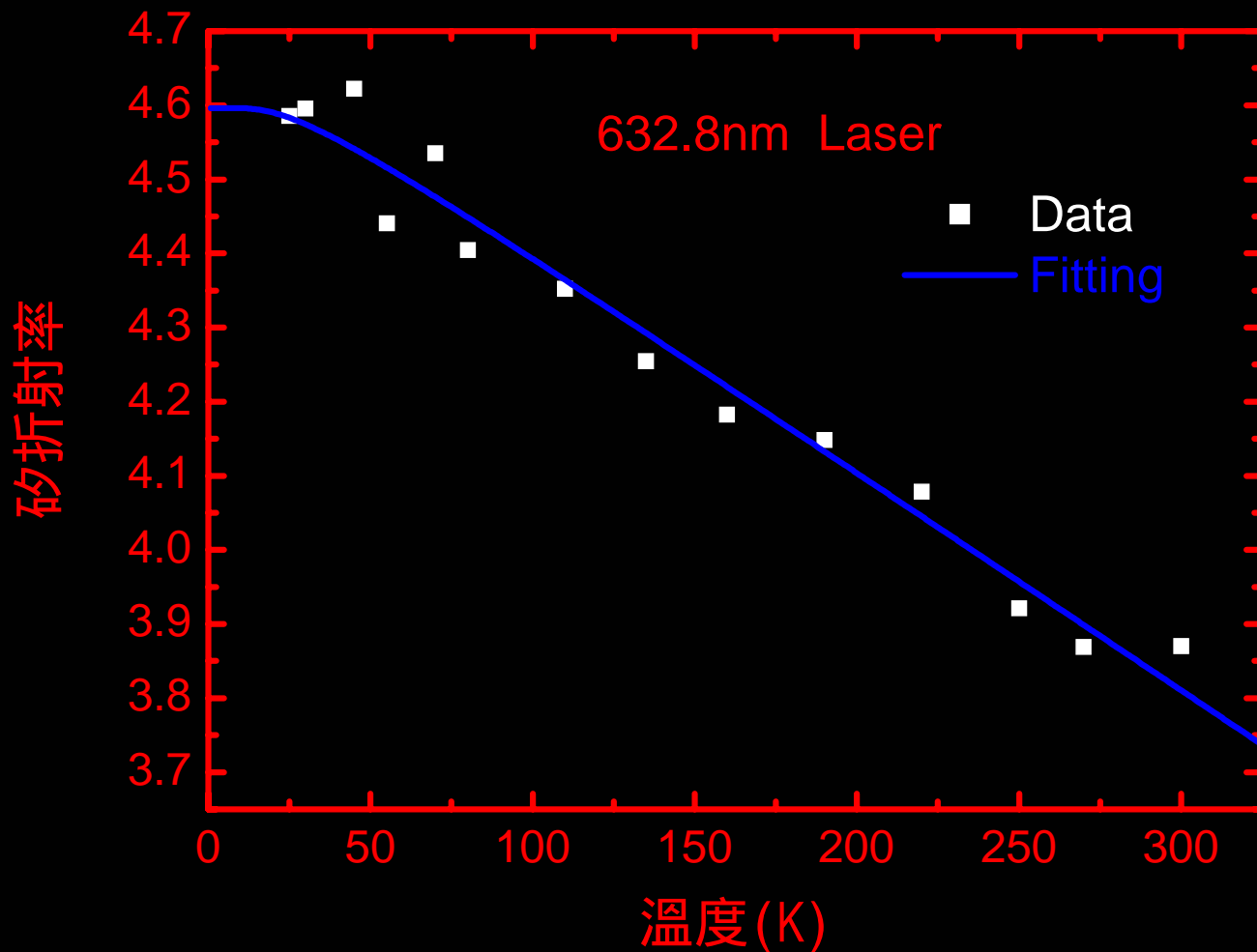
$$C_{11} = 1.70138 - 0.02644 \times \left(1 + \frac{2}{e^{\frac{406.78075}{T}} - 1} \right) \times 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$$

鍺：彈力常數-溫度



$$C_{11} = 1.33415 - 0.0176 \times \left(1 + \frac{2}{e^{\frac{241.83664}{T}} - 1} \right) \times 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$$

矽：折射率-溫度

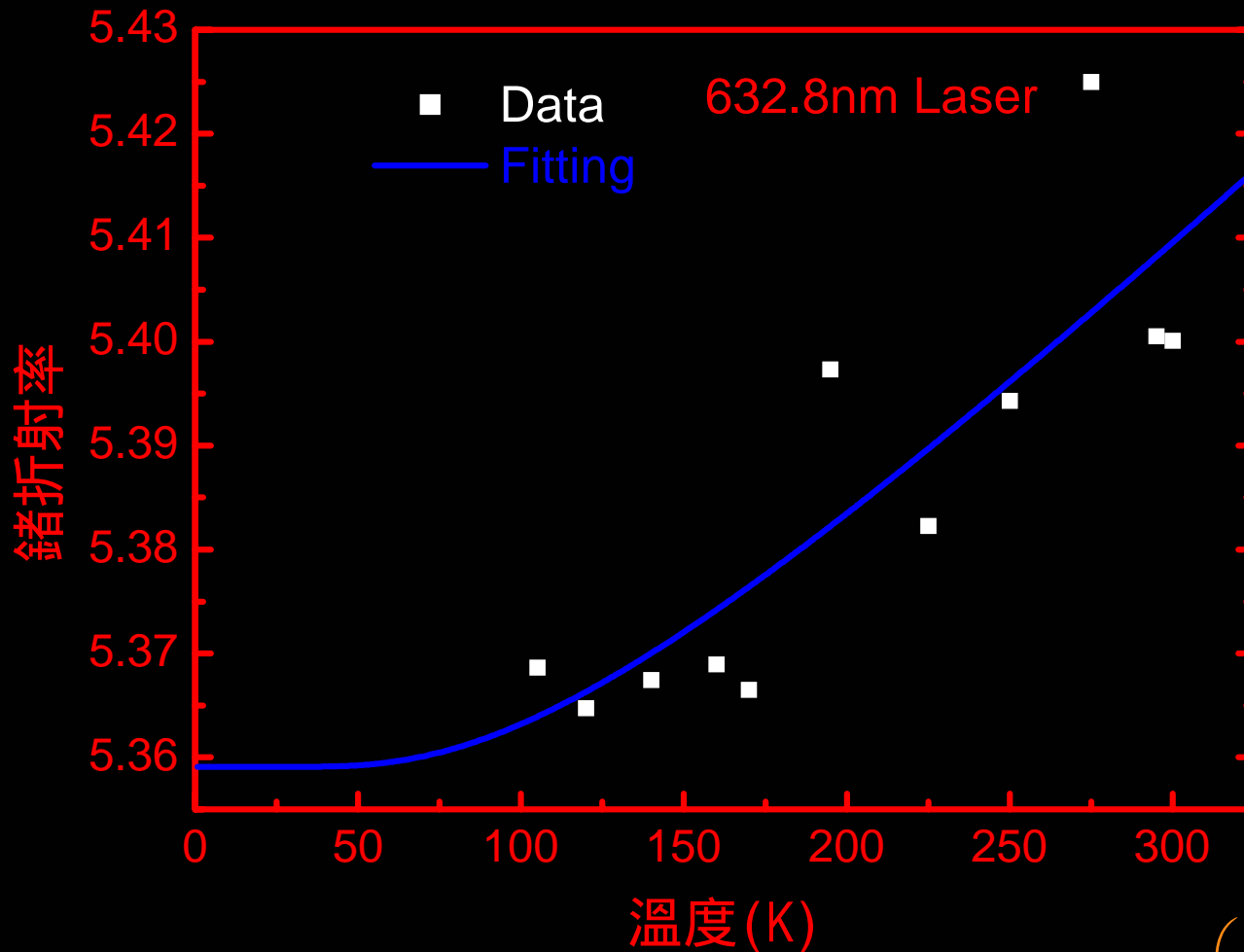


$$n_{Si} = 4.6996 - 0.10325 \times \left(1 + \frac{2}{e^{70/T} - 1} \right)$$

Lautenschlager, M. Garriga, L. Viña, and M. Cardona, Phys. Rev. B, Vol. 36, 21 (1987)

Viña, S. Logothetidis, and M. Cardona, Phys. Rev. B, Vol 30, 1979 (1984)

鍺：折射率-溫度



$$n_{Ge} = 5.31115 + 0.04758 \times \left(1 + \frac{2}{e^{\frac{317.90904}{T}} - 1} \right)$$

理論計算折疊聲子-溫度

632.8nm雷射入射時，考慮聲速、折射率隨溫度變化帶入理論式求得相對於300K時10K的頻率位移約：

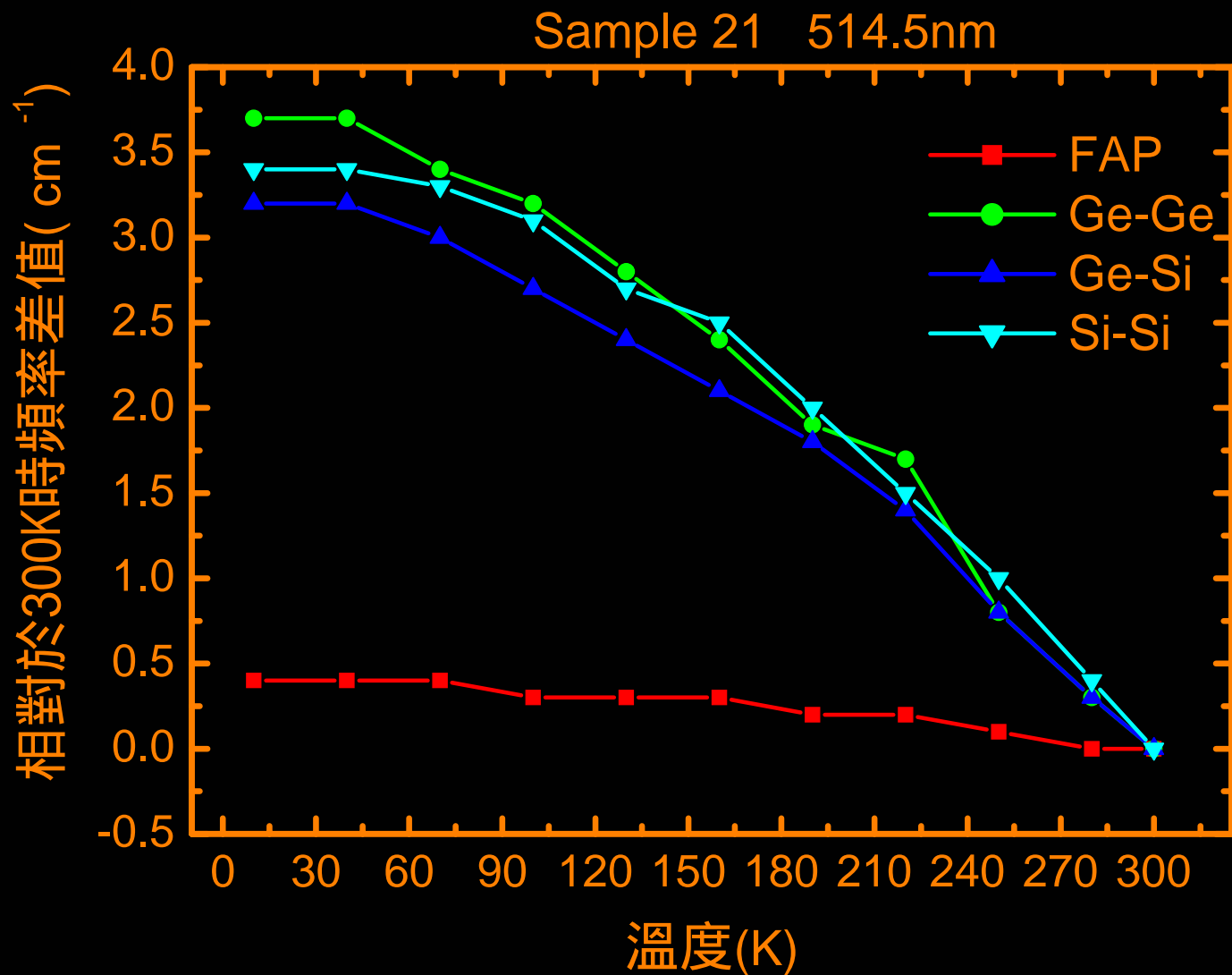
$$0.64\text{cm}^{-1}$$

而實驗所得為

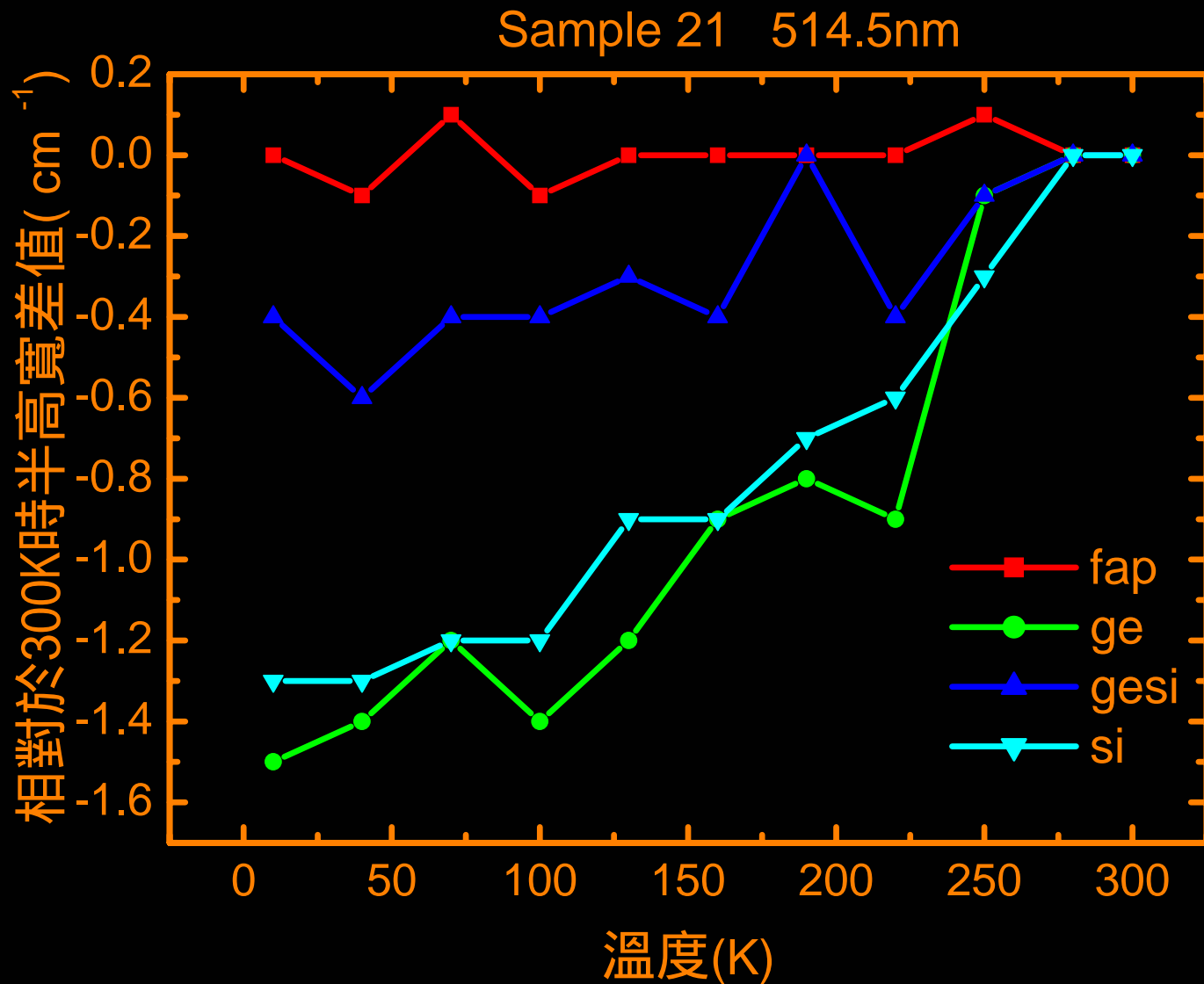
$$0.57\text{cm}^{-1}$$



相對於300K時頻率差值



相對於300K時半高寬差值



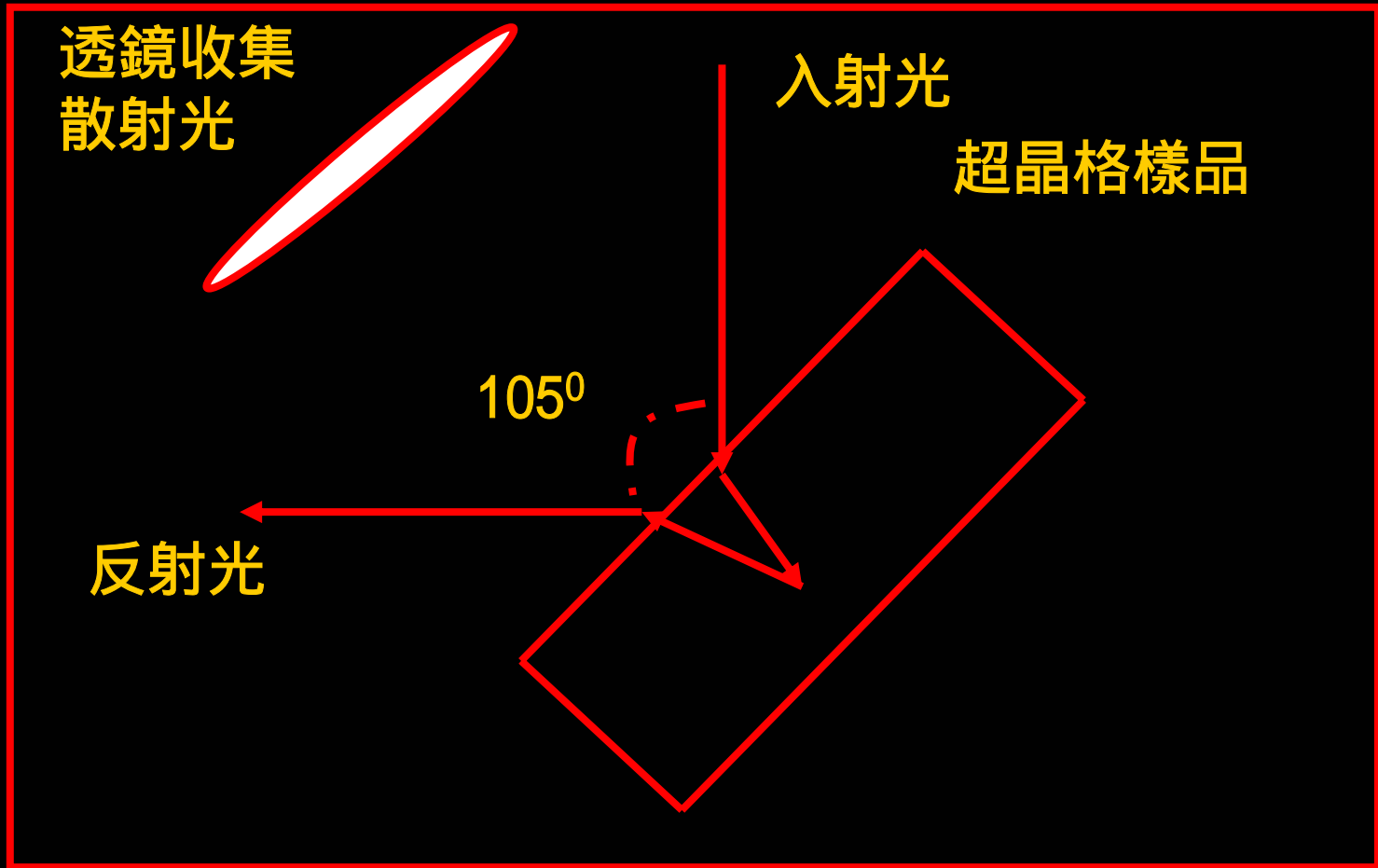
結論



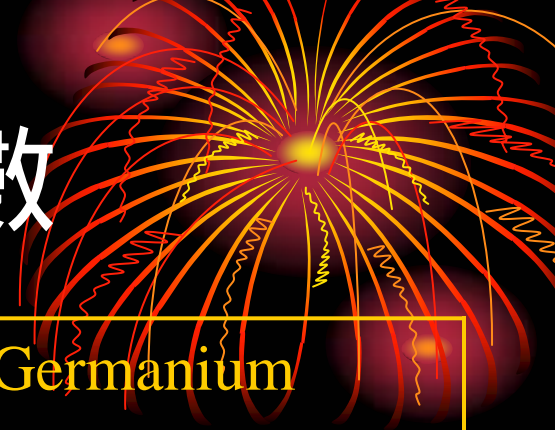
- Rytov理論及光彈力學得到印證。
- 由拉曼散射光譜求得Si/Ge超晶格矽、鍺層平均厚度誤差在3.5%以內。
- 鍺層2.33eV的 E_1 能帶非常寬，類似連續性能帶結構。
- 300K~10K，折疊聲子拉曼譜線主要受折射率和聲速的影響。



散射光收集



矽、鍺晶格常數



	Silicon		Germanium	
溫度 (K)	$A_0(\text{\AA})$	$L(10^{-6}\text{K}^{-1})$	$A_0(\text{\AA})$	$L(10^{-6}\text{K}^{-1})$
0	5.42982	0	5.65235	0
25	5.42982	-0.01737	5.65235	-0.0473
50	5.42980	-0.2826	5.652346	0.116
100	5.42969	-0.3446	5.65266	2.283
150	5.42970	0.4997	5.65358	4.021
200	5.42996	1.4146	5.65486	4.959
250	5.43045	2.1125	5.65635	5.493
298	5.43106	2.5940	5.65788	5.826
300	5.431092	2.6110	5.65795	5.838
350	5.43185	2.9709	5.65964	6.091

鍺層厚度比較

鍺層厚度 (nm)	21號樣品	22號樣品	23號樣品
TEM圖	3±2	2±2	2±2
折疊聲子擬合	2.40±0.08	2.30±0.08	2.50±0.09
由分布比例計算	2.34±0.07	2.29±0.04	2.34±0.06

折疊聲子強度比

Sample 23 300K

