

圖 4.25 $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ 異質磊晶層分別在(a)磷化鎵基材; (b)具有直線圖形轉移層之磷化鎵基材; (c)砷化鎵基板上之穿透式電子顯微鏡影像。

為了驗證異質磊晶層成分不受應力影響，四元合金的成分必須要被精確的求得，而成分鑑定是利用穿透式電子顯微鏡的繞射影像來決定其晶格常數改變量，接著再利用 EDX (energy dispersive X-Ray spectroscopy) 分析成分，分析成分的目的為了要求得四元合金 $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ 的 x 值，經由晶格常數反推以及 EDX 分析成分，其 x 值為在砷化鎵晶格匹配基材上為約為 0.17 (原子百分比)，另外，在直線圖形的磷化銦鎵上，其四元合金的 x 值亦為 0.17，實驗的誤差小於 1%。表 4.1 為 $(Al_{0.17}Ga_{0.83})_{0.5}In_{0.5}P$ 磊晶層的晶格常數分別在砷化鎵與直線圖形磷化銦鎵基材之晶格常數。

表 4.1 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 在不同的基材之繞射圖形分析

	GaAs sub.	Line patterned $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ sub.
r (111) Distance of the diffraction patterns	0.70 cm	0.70 cm
L Camera length	100 cm	100 cm
λ Wavelength of electron (200 KeV)	0.0251 Å	0.0251 Å
d (d spacing)	3.2597 Å	3.2597 Å
a (Lattice constant)	5.646 Å	5.646 Å

(註: $r/L = \lambda/d$)

當相同的磊晶層成長在不同的基材，會因為晶格常數不匹配或是磊晶層的應力導致成分有差異，一般來說，除非改變 y 的值， $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ 四元合金 x 值改變並不能改變其晶格常數，這是因為原子結構的關係，因此，四元合金磊晶層在不同的基材上晶格常數一致，大致上只能決定 y 值是相同的， x 值還需由 EDX 來分析，前述的分析結果指出其成分在直線圖形磷化銦鎵基材上不會有太大的變化，表示這磊晶層未受基材改變因素影響太大，說明了磊晶層沒有受到基材改變而受影響。

4.4.7. $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ 異質磊晶層光子激光(Photo Luminescence; PL)能譜圖

光學性質是一般發光材料最重要的性質，因此，PL 量測就顯的格外重要，PL 是一種鑑定結晶品質的方法，另外亦能從光譜上決定異質磊晶層的殘留應力，如圖 4.26 所示，在砷化鎵基板上($Al_{0.17}Ga_{0.83}$) $_{0.5}In_{0.5}P$ 異質磊晶層的 PL 能譜波峰之波長 (峰值波長) 是 613.2 nm，在磷化鎵基材上的異質磊晶層沒有明顯的訊號被偵測收集到，然而，在直線圖形基板上的磷化鎵鎵基材上其峰值波長為 613 nm。砷化鎵基材上的異質磊晶層因為晶格相匹配的原因，所以能夠輕易的觀察到峰值波長，磷化鎵基材上收集不到訊號的原因是在異質磊晶層中具有高密度的穿透差排和缺陷(圖 4.25(a))，造成的這現象的理由就是 3.7%的晶格不匹配，這些缺陷在晶體中扮演著電子的捕捉陷阱中心 (Trap center)，陷阱中心會降低電子-電洞再結合的效率，因此，光子訊號會的大大降低，當然就沒有訊號可以收集，另外，在直線圖形磷化鎵在磷化鎵基材上，結晶的狀況大大的被改善，波長紅位移只有 0.2 nm 以下，其 PL 的強度比起砷化鎵基材衰減了 20%，而 PL 的半高寬 (FWHM) 與砷化鎵基材上的相同，而量測誤差小於 1 nm，然而，這 20%的衰減可能是由於局部的接合介面缺陷或者些微的表面粗糙度所造成，但是，由一個更具說服力的原因是，可能是由直線圖形處無異質磊晶層區域所造成。

圖 4.27 指出了 PL 強度隨距離變化的關係圖，圖中指出 PL 最低的兩處相距了大約 500 μm ，衰退程度明顯的能夠被觀察的到，這圖形是收集 613 nm 峰值波長的強度訊號，因此，可以推測這衰退處剛好是在直線圖形處，而其餘的區域就是異質磊晶的區域，磊晶層的區域 PL 強度中間為最高，往近直線圖形處的強度會漸漸的減少，而中間的 PL 強度是直線圖形處的 4 倍，這結果可以明顯的觀察出，上述 PL 強度的衰退或許是由這原因造成，亦證明了 50 nm 的磷化鎵鎵轉移層的確是有作用在。而另一方面此圖也記錄了 PL 半高寬與距離的關係，一般而言半高寬大小關係著異質磊晶層晶體狀態的好壞，PL 半高寬越窄代表晶體品質越好，在非直線圖形區域 PL 半高寬為 16.4 nm，靠近直線的圖形的區域會漸漸增加，在直線圖形區域半高寬增加到 23.5 nm，增加了大約兩倍之多，可能是接合轉移層邊緣處會有一些缺陷或應力，這些缺陷會影響到後續異質磊晶層，因此，才會有這種邊緣磊晶品質接近直線圖形時慢慢衰退的狀況。

4.4.8. 快速退火對異質磊晶層的影響

在光電元件的應用上磊晶結構的熱穩定性是非常重要的，熱往往會導致元件衰退或者元件損壞，但在光電元件的製程中為了合金化的目的常常需要執行快速退火(Rapid Thermal Annealing ; RTA)，為了就是產生良好的歐姆接觸。當材料具

有不同的熱膨脹係數（前面章節提過磷化鎵和砷化鎵具有不同的熱膨脹係數），執行快速退火的過程中會造成光電元件的特性改變甚至破裂，為確定材料間的熱漲係數不會影響材料應有的原始特性，這磊晶層將執行快速退火實驗，退火的溫度分別為 400、500、600°C 時間皆是 30 秒，圖 4.28 是磷化鋁銻鎵異質磊晶層於快速退火後的 PL 圖譜。在沒退火之前其 PL 波峰波長為 613 nm，然而，快速退火後的波峰波長依然落在 613 nm，由此 PL 圖譜沒有觀察到任何波峰波長位移，因此，能夠比較明確的推斷無熱應力的影響，即使，兩材料具有不同的熱膨脹係數。

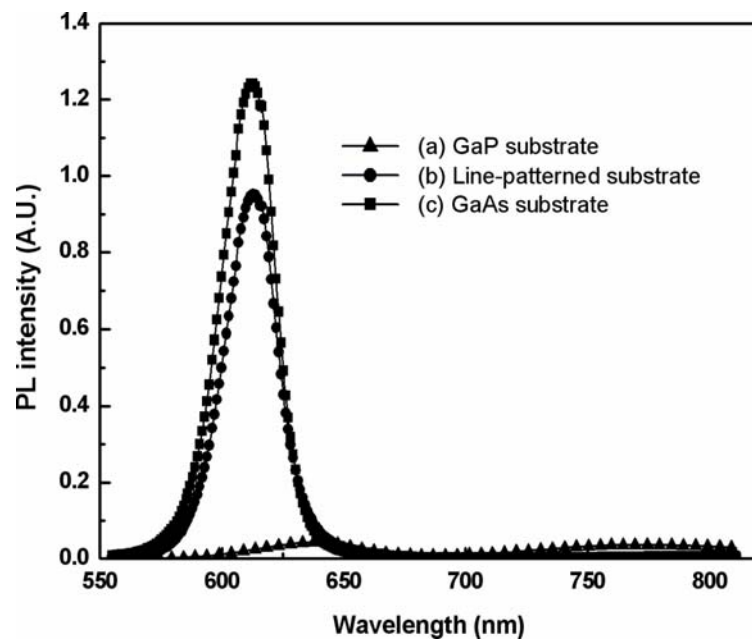


圖 4.26 $(Al_{0.17}Ga_{0.83})_{0.5}In_{0.5}P$ 異質磊晶層分別在(a)磷化鎵基材; (b)具有直線轉移層基材; (c)砷化鎵基材上之 PL 能譜圖

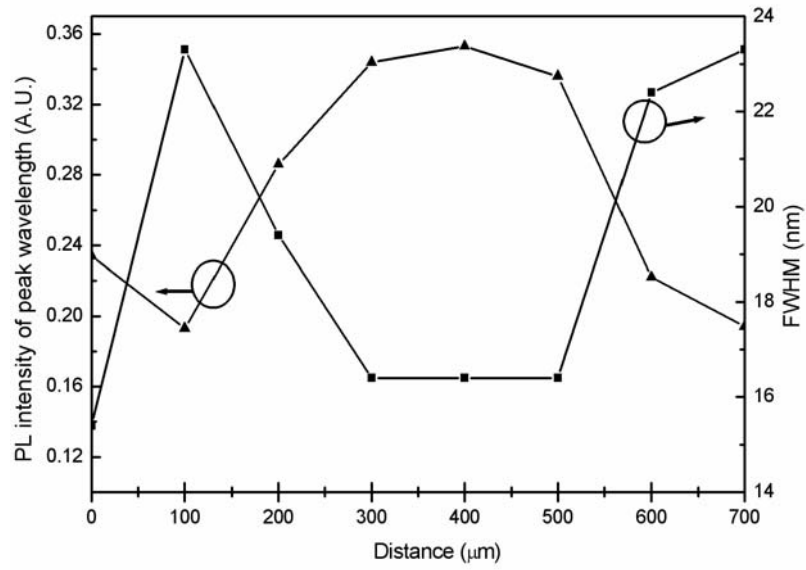


圖 4.27 $(\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 異質磊晶層 PL 峰值波長的強度與 PL 半高寬隨距離之變化

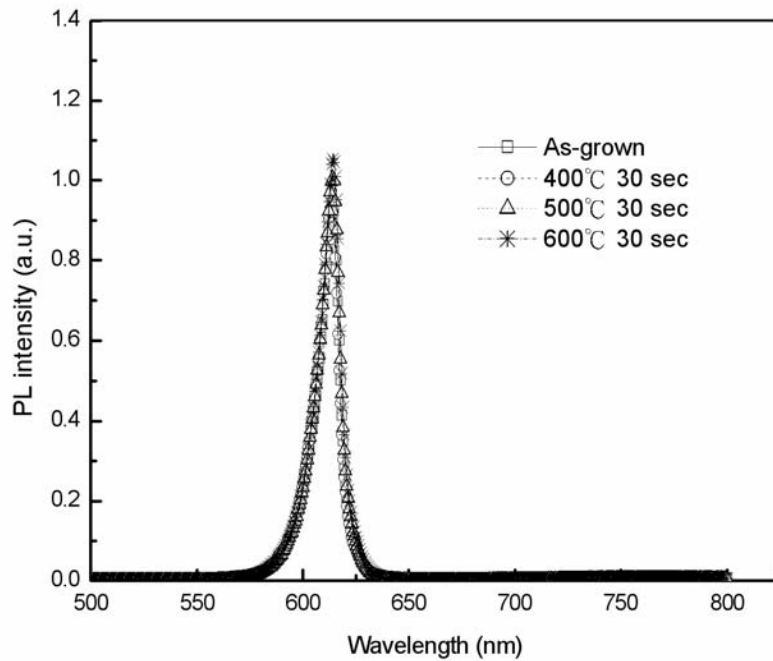


圖 4.28 $(\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 異質磊晶層在具直線圖形轉移層基材上於不同溫度下執行快速溫度退火 PL 的變化

4.5. 結論

砷化鎵 (GaAs) 晶片上的直線圖形磷化銦鎵 ($\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$) 被使用來當作介質層接合在磷化鎵 (GaP) 基材上，當砷化鎵晶片被去除掉之後，有直線圖形的磷化銦鎵被使用來進行磷化銦鋁 ($\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$) 和磷化鋁銦鎵 ($(\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$) 的異質磊晶，直線圖形磷化銦鎵和異質磊晶層的介面、電性 (I-V)、表面狀況 (AFM) 及光學 (PL) 等性質指出了磷化鋁銦鎵異質磊晶層與磷化鎵晶格不匹配的問題被成功的解決，並且能將異質磊晶層成功的成長在磷化鎵基材上。

一般來說，在執行晶格常數有差異之異質磊晶時臨界厚度 (Critical thickness) 顯的非常重要，因為，當異質磊晶成長超過臨界厚度時會使異質磊晶層產生高密度的缺陷，Mathews and Blakeslee 的異質磊晶臨界厚度理論一直被重視著，〔35〕圖 4.29 就是臨界厚度和晶格常數差異的關係圖，以磷化鎵與磷化鋁銦鎵 3.7% 的晶格常數差異，臨界厚度約為 $0.005 \mu\text{m}$ (5 nm)，但是，此實驗的異質磊晶層已經到達了 1000 nm 卻不見高密度的缺陷，成功的突破了異質磊晶臨界厚度的限制。

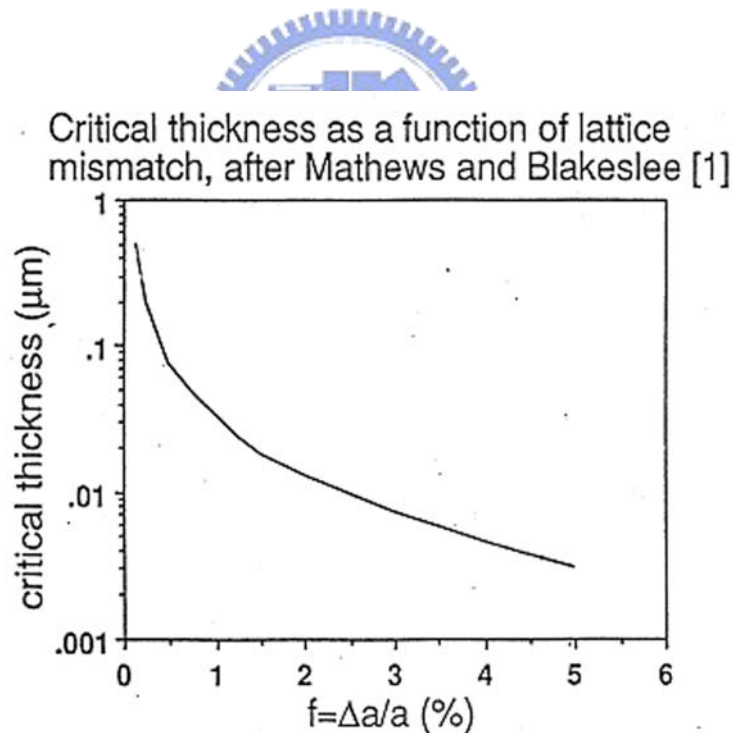


圖 4.29 臨界厚度和晶格常數差異的關係圖〔35〕

4.6. 參考文獻

- [1] F. A. Kish, F. M. Steranka, D. C. DeFever, D. A. Vanderwater, K. G. Park, C. P. Kuo, T. D. Osentowski, M. J. Peanasky, J. G. Yu, R. M. Fletcher, D. A. Steigerwald, M. G. Craford, and V. M. Robbins, “Very high-efficiency semiconductor waferbonded transparent-substrate $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaP}$ light-emitting diodes”, Appl. Phys. Lett., 64, pp.2839-2841, May 1994.
- [2] Y. Ohiso, H. Okamoto, R. Iga, K. Kishi, K. Tateno, C. Amano, “1.55- μm buried-heterostructure VCSELs with InGaAsP/InP-GaAs/AlAs DBRs on a GaAs substrate”, IEEE Journal of Quantum Electronics, 37, pp.1194-1202, September 2001.
- [3] R. H. Horng, D. S. Wu, S. C. Wei, and C. Y. Tseng, M. F. Huang, K. H. Chang, P. H. Liu, and K. C. Lin, “AlGaInP light-emitting diodes with mirror substrates fabricated by wafer bonding”, Appl. Phys. Lett., 75, pp.3054-3056, November 1999.
- [4] Y. Okuno, K. Uomi, M. Aoki, T. Taniwatari, M. Suzuki, and M. Kondow, “Anti-phase direct bonding and its application to the fabrication of InP-based 1.55 μm wavelength lasers on GaAs substrates”, Appl. Phys. Lett., 66, pp.451-453, January 1995.
- [5] G. E. Höfler, D. A. Vanderwater, D. C. DeFever, F. A. Kish, M. D. Camras, F. M. Steranka, and I.-H. Tan, “Wafer bonding of 50-mm diameter GaP to AlGaInP-GaP light-emitting diode wafers”, Appl. Phys. Lett., 69, pp.803-805, August 1996.
- [6] M. Bruel, B. Asper and A.J.A HervÉ, “Smart-Cut: A New Silicon On Insulator Material Technology Based on Hydrogen Implantation and Wafer Bonding”, Jpn. J. Appl. Phys., 36, pp.1636-1641, March 1997.
- [7] J. Wan, R. Venugopal, M. R. Melloch, H. M. Liaw, and W. J. Rummel, “Growth of crack-free hexagonal GaN films on Si(100)”, Appl. Phys. Lett., 79, pp.1459-1461, September 2001.
- [8] L. Wang, X. Liu, Y. Zan, J. Wang, D. Lu, and Z. Wang, Wurtzite GaN epitaxial growth on a Si(001) substrate using $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ as an intermediate layer”, Appl. Phys. Lett., 72, pp.109-111, January 1998.
- [9] X. Zhang, S. Chua, P. Li, K. Chong, and Z. Feng, “Enhanced optical emission from GaN films grown on a silicon substrate”, Appl. Phys. Lett., 74, pp.1984-1986, April 1999.

- [10] Y. H. Luo, J. Wan, R. L. Forrest, J. L. Liu, G. Jin, M. S. Goorsky, and K. L. Wang, “Compliant effect of low-temperature Si buffer for SiGe growth”, Appl. Phys. Lett., 78, pp.454-456, January 2001.
- [11] T. Ueno, T. Irisawa, Y. Shiraki, A. Uedono, S. Tanigawa, R. Suzukic, T. Ohdairac, T. Mikado, “Characterization of low temperature grown Si layer for SiGe pseudo-substrates by positron annihilation spectroscopy”, Journal of Crystal Growth 227, pp 761-765, July 2001.
- [12] E. M. Rehder, C. K. Inoki, T. S. Kuan, T. F. Kuech, “SiGe relaxation on silicon-on-insulator substrates: An experimental and modeling study”, J. Appl. Phys., 94, pp.7892-7903, December 2003.
- [13] T. Tezuka, N. Sugiyama, S. Takagi, “Dislocation-free relaxed SiGe-on-insulator mesa structures fabricated by high-temperature oxidation”, J. Appl. Phys., 94, pp.7553-7559, December 2003.
- [14] C. W. Pei, B. Turk, W. I. Wang, and T. S. Kuan, “Mechanism of the reduction of dislocation density in epilayers grown on compliant substrates”, J. Appl. Phys., 90, pp.5959-5963, December 2001.
- [15] F. E. Ejeckam, Y. H. Lo, S. Subramanian, H. Q. Hou, and B. E. Hammons, “Lattice engineered compliant substrate for defect-free heteroepitaxial growth”, Appl. Phys. Lett., 70, pp.1685-1687, March 1997.
- [16] Y. H. Lo, U. S. Pat. No.5,981,400 ,1999.
- [17] D. Hull and D. J. Bacon, Introduction to Dislocations, Vol. 37, p184,1984.
- [18] G. Kästner, U.Gösele, T. Y. Tan, “A model of strain relaxation in hetero-epitaxial films on compliant substrates”, Appl. Phys. A, A 66, pp.13-22, January 1998.
- [19] Z. H. Zhu, R. Zhou, F. E. Ejeckam, Z. Zhang, J. Zhang, J. Greenberg, Y. H. Lo, H. Q. Hou, and B. E. Hammons, “Growth of InGaAs multi-quantum wells at 1.3 μm wavelength on GaAs compliant substrates”, Appl. Phys. Lett., 72, pp.2598-2610, May 1998.

- [20] St. Senz, G. Kästner, U. Gösele, and V. Gottschalch, "Relaxation of an epitaxial InGaAs film on a thin twist-bonded (100) GaAs substrate", Appl. Phys. Lett., 76, pp.703-705, February 2000.
- [21] D. A. Vanderwater, I.-H. Tan, G. E. Höfner, D. C. Defever, and F. A. Kish, "High-Brightness AlGaInP Light Emitting Diodes", Proc. IEEE, 85, pp.1752-1764, November 1997.
- [22] Z. L. Liao and D. E. Mull, "Wafer fusion: A novel technique for optoelectronic device fabrication and monolithic integration", Appl. Phys. Lett., 56, pp.737-739, February 1990.
- [23] P. Kopperschmidt, St. Senz, R. Scholz, and U. Gösele, "'Compliant' twist-bonded GaAs substrates: The potential role of pinholes", Appl. Phys. Lett., 74, pp.374-376, January 1999.
- [24] Z.C. Zhang, S.Y. Yang, F. Q. Zhang, B. Xu, Y. P. Zeng, Y. H. Chen, Z. G. Wang, "In_{0.25}Ga_{0.75}As films growth on the thin GaAs/AlAs buffer layer on the GaAs(001) substrate", Applied surface science, 217, pp.268-274, July 2003.
- [25] Y. Yu, X. Qin, B. Huang, J. Wei, H. Zhou, J. Pan, W. Chen, Y. Qi, X. Zhang, and Z. Ren, "MOCVD growth of strain-compensated multi-quantum wells light emitting diode", Vacuum, 69, pp.489-493, January 2003.
- [26] C. P. Kuo, S. K. Vong, R. M. Cohen, and G. B. Stringfellow, "Effect of mismatch strain on band gap in III-V semiconductors", J. Appl. Phys., 57, pp.5428-5432, June 1985.
- [27] R. H. Esser, K. D. Hobart, and F. J. Kub, "Directional diffusion and void formation at a Si (001) bonded wafer interface", J. Appl. Phys., 92, pp.1945-1949, August 2002.
- [28] S. Mack, H. Baumann, U. Gösele, H. Werner, and R. Schlögl, "Analysis of Bonding-Related Gas Enclosure in Micromachined Cavities Sealed by Silicon Wafer Bonding", J. Electrochem. Soc., 144, pp.1106-1111, March 1997.
- [29] Y. S. Wu, R. S. Feigelson, R. K. Route, D. Zheng, L. A. Gordon, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Improved GaAs Bonding Process for Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation", J. Electrochem. Soc., 145, pp. 366-371, January 1998.

- [30] K. Tone, M. Yamada, Y. Ide, and Y. Katayama, “Characterization of Oxidized GaAs (001) Surfaces Using Temperature Programed Desorption and X-Ray Photoelectron Spectroscopy”, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, 31, pp.L721-L724, June 1992.
- [31] R. H. Horng, , W.C. Peng, D.S. Wu; W. J. Ho, Y.S. Huang, “Surface treatment and electrical properties of directly wafer-bonded InP epilayer on GaAs substrate”, Solid-State Electronics, 46, pp.1103-1108, August 2002.
- [32] S. J. Jain, M. Willander, and H. Maes, “Stresses and strain in epilayers, stripes and quantum structures of III-V compound semiconductors”, Semicond. Sci. Technol., 11, pp.641-647, January 1996.
- [33] F. A. Kish, D. A. Vanderwater, M. J. Peanasky, M. J. Ludowise, S. G. Hummel, and S. J. Rosner, “Low-resistance Ohmic conduction across compound semiconductor wafer-bonded interfaces”, Appl. Phys. Lett., 67, pp.2060-2062, October 1995.
- [34] Z.C. Zhang, S.Y. Yang, F.Q. Zhang, B. Xu, Y.P. Zeng, Y.H. Chen, and Z.G. Wang, “In_{0.25}Ga_{0.75}As films growth on the thin GaAs/AlAs buffer layer on the GaAs(001) substrate”, Applied Surface Science, 217, pp.268–274, July 2003.
- [35] J. W. Mathews and A. E. Blakeslee, “Defects in epitaxial multilayers. I. Misfit dislocations”, J. Crystal Growth, 27, pp.118-125, December 1974.