

半導體研究之新領域：Mesoscopic Physics in Quantum Devices

中山大學物理學系及材料研究所 羅奕凱、謝光宇、杜立偉、蔡振凱

一、前言

半導體之研究領域一般而言可分為三個部份：(1)半導體物理、(2)半導體元件與(3)半導體材料。此三部份彼此之間互相影響，互相合作，而使半導體之技術得以提昇，知識得以擴大。往往在元件製造上的突破（例如奈米結構之元件），可引發出新物理之發現，進一步設計出新的“人造材料”（artificial materials），而藉由對新材料物理性質之了解，我們可以製成更理想的電子元件。早期的例子有 1973 年獲諾貝爾獎的 Leo Esaki 發明了半導體二極體，此乃是因為量子力學中電子在半導體 p-n junction 的“穿隧效應”（tunneling effect）所導致之結果。隨著半導體晶體成長技術的快速進步，提高了材料之品質，縮小了元件之尺寸，邁向高效率之“高速電子元件”（high speed electronic devices）之理想。然而此三部份亦不宜分割，各自獨立研發之結果遇到瓶頸不易突破。而且藉由半導體材料與元件製造技術之突破，我們有機會製成原子大小尺寸之“人造材料”，進而設計理想之電子系統，以研究低維度電子之量子效應，進而發現新的物理現象。例如 1985 年 K. von Klitzing 即是在“金屬氧半導體場效電晶體”（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, MOSFET）中發現“量子霍爾效應”（Quantum Hall Effect）而獲得諾貝爾獎。在經多年之研究與發展，R. B. Laughlin, H. L. Stormer 和 D. C. Tsui 三位進一步在 High Electron Mobility Transistor (HEMT) 結構中發現了“分數量子霍爾效應”（Fractional Quantum Hall Effect, FQHE），而於 1998 年獲得諾貝爾獎。而這些物理新現象之發現有賴於元件技術之突破，材料品質之提昇，提供理想之人造電子系統方可發現。因此本文將從三方面來探討半導體研究之新領域：Mesoscopic physics in quantum devices。

二、Mesoscopic Physics in Quantum Devices

在探討 Mesoscopic physics 前，我們先定

義量子元件（quantum devices）。當半導體製造技術突破後，樣品尺寸可縮小至 10^{-9} 米，即所謂的 nano-structures（奈米結構），此時電子的運動不再是傳統之古典力學可描述，必須利用量子力學之原理加以修正，而表現出新的量子效應。因此所謂的“量子元件”（quantum devices）是指元件之功能有賴於量子效應之運作。例如前面所提 Esaki diode 是由於量子力學之穿隧效應；MOSFET 是由於電子受量子井之限制（quantum confinement）而形成二維電子氣之結果。另外，如一維的量子線（quantum wires），零維的量子點（quantum dots）皆是本文所討論的量子元件。在了解量子元件之定義之後，我們再介紹什麼是“Mesoscopic Physics”，基本上從字面上看它是界於“巨觀”（macroscopic）的古典物理可描述系統，與“微觀”（microscopic）的原子尺寸大小（約 1 angstrom, Å）之間。因此在 Mesoscopic Structure 中量子效應已經不可忽略，而半導體元件之大小正位於數百奈米（~100 nm）之間。所以近年來在量子元件之研究中皆可觀測到其量子效應，藉由了解其量子效應而控制其功能以設計新的“邏輯元件”。因此，在物理上樣品尺寸大小可以用某些特定長度來定義，如(1)費米電子波長或(2)平均自由路徑（mean free path）。

在古典物理描述電子運動時，因碰撞而改變其波向量（wave vector, k ），因此兩次碰撞之間所經歷的平均時間稱為 relaxation time，而所經過的路徑平均值稱為“平均自由路徑”。換言之，在 relaxation time 之時間範圍內或在“平均自由路徑”之距離內，電子的 k 值不會被改變，亦即不會被散射（scattering）。因此，早期此“平均自由路徑”被用來定義 Mesoscopic Structure：若樣品尺寸結構之大小與該樣品之“平均自由路徑”相當時，我們可稱其為 Mesoscopic Structure。此時電子的波動特性會展現出來，而描述電子運動宜用量子力學，而不適宜用古典力學。由於電子的“平均自由路徑”隨樣品內的雜質多寡而變化甚大，而且樣品的物理性質是由費米表面（Fermi

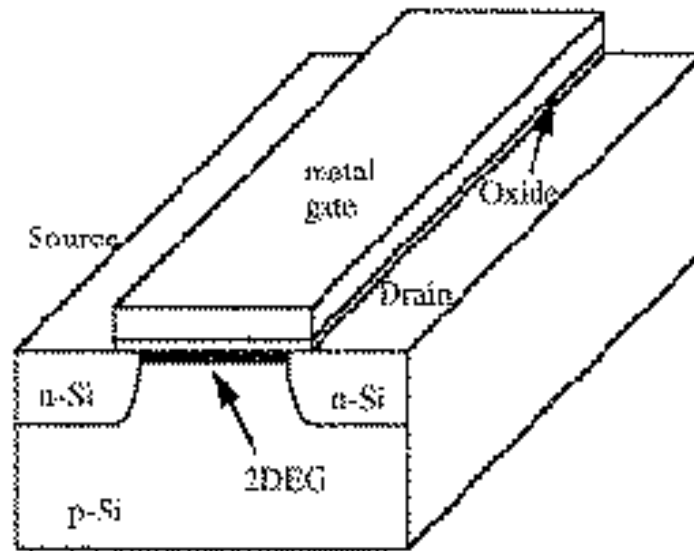


Fig. 1 Schematic diagram of Si-MOSFET

surface) 附近之電子所主導，因此電子的費米波長 (Fermi wavelength), $\lambda_F = 2\pi k_F$, 是更客觀之物理量來界定 Mesoscopic Structure。費米波長只與樣品的電子密度相關，例如在一般的金屬如金、銀、銅等，它們的 λ_F 約等於幾個 angstrom (\AA)，而在半導體元件，如二維的 GaAs/AlGaAs, $\lambda_F \sim 400 \text{\AA}$ 左右。因此我們可以定義樣品尺寸大小 (假設其為長方體三邊為 L_x, L_y, L_z)，如下：

- (1) $\lambda_F \ll L_x < L_y < L_z$ ：三維電子系統 (3D)
- (2) $L_x < \lambda_F \ll L_y < L_z$ ：二維電子系統 (2D)
- (3) $L_x < L_y < \lambda_F \ll L_z$ ：一維電子系統 (1D)
- (4) $L_x < L_y < L_z \ll \lambda_F$ ：零維電子系統 (0D)

由於半導體晶體成長技術已成熟到可以輕易成長奈米結構 (nano-structures) 之樣品，而其費米波長又相當長 $\lambda_F \sim 400 \text{\AA}$ ，因此，用半導體元件樣品來探討 Mesoscopic Physics 變成可行。以下我們將敘述最近在此新領域之研究結果。

三、二維電子系統 (Two-dimensional Electron System)

二維電子系統首先是在 Si-MOSFET (如圖一) 中的 depletion layer 發現，經由外加電壓 (gate bias) 而在 source 與 drain 兩極間形成可導電的二維電子氣 (Two-Dimensional Electron Gas, 2DEG)。隨著晶體成長技術的進步，在 GaAs/AlGaAs 異體結構 (heterostructure) 或量子井 (quantum well)，電子受位能障 (potential

barrier) 的限制，而局限於 GaAs 層的量子井中，形成二維電子氣。如果在 GaAs 量子井與 n-type AlGaAs 位能障之間加上一層 undoped AlGaAs 的 spacer 將可減少 2DEG 與 n-type AlGaAs 離子間的庫倫散射 (如圖二)，而使 2DEG 的電子游動率 (electron mobility) 提高非常多，形成所謂的 HEMT 結構 (High Electron Mobility Transistor)。在此結構下的電子游動率可輕易地達到 $\mu > 10^6 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。而且在低溫條件下，一些量子效應，如量子霍爾效應，分數量子霍爾效應及 Shubnikov-de Hass 效應等皆可在這些量子井結構中觀察到。在圖二中電子是沿著 GaAs 量子井運動，可是如果 GaAs/AlGaAs 設計成如圖三的双 barrier structure，此時在上、下兩個金屬極之間電子是垂直運動。因受兩個位能障 AlGaAs 之限制，在 GaAs 量子井內的電子能階會量子化成不連續的 2DEG subbands，當上、下兩極加上電壓時，唯有當費米能階與 subbands 之能階相同時才會產生量子穿遂效應 (resonant tunneling effect) 而造成通路。藉由此量子穿遂效應 double barrier structure 可被用來製造發光的 resonant tunneling diode 或 resonant tunneling bipolar transistor。

以上所舉的例子是說明如何利用 2DEG 之量子效應設計不同性質的量子元件，然而 2DEG 本身亦有許多物理性質是有待探討的。例如不同材料所形成的量子井結構，因材料能帶性質之不同而形成所謂的第二型量子井 (Type II Quantum Well)，最有名的例子即是 InAs/GaSb

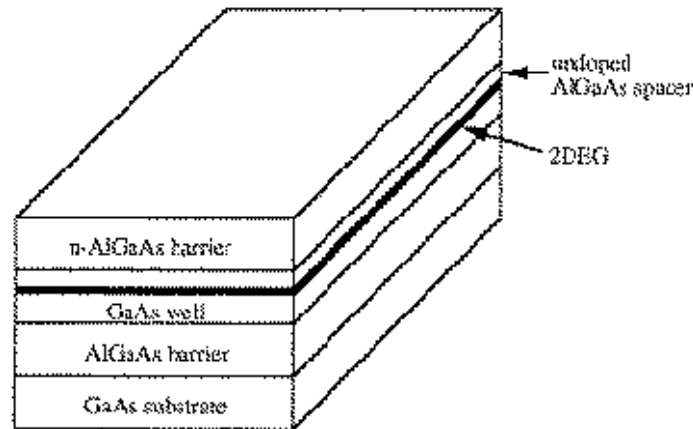


Fig. 2 GaAs/AlGaAs modulation-doped HEMT structure

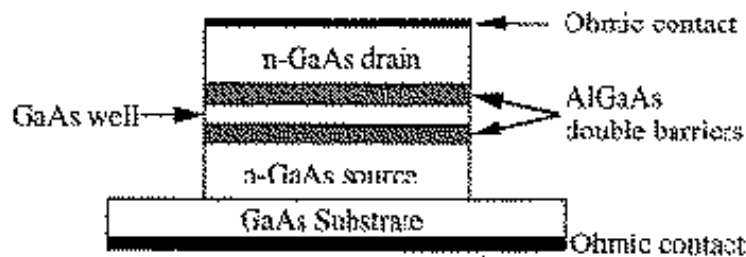


Fig. 3 GaAs/AlGaAs double barrier structure

第 II 型量子井結構。在此第 II 型量子井中因 InAs 的導帶 (conduction band) 位在 GaSb 的價帶 (valence band) 之下, 形成量子井時, 在 GaSb 價帶的電子會流向 InAs 的導帶之中, 而留下電洞在 GaSb 的價帶之上。所以在第 II 型量子井結構中, 電子與電洞同時存在於不同空間中 (電子位於 InAs well, 電洞位於 GaSb barriers 中)。在這難得的二維電子-電洞系統中, 它的基態 (ground state) 理論上可形成 intrinsic ground exciton state, 而且形成電子-電洞的 exciton 後, 其 spin 不再是 $1/2$, 而是 Boson 的零或 1, 所以在很低溫時會產生 Bose-Einstein condensation 之現象[1]。因此, 欲觀察 Bose-Einstein condensation 之現象必須證明 ground state exciton 之存在, 而最有可能觀察到的樣品即是第 II 型的 InAs/GaSb 量子井系統。到目前為止, 尚無直接證據證明其存在, 但是 J. P. Cheng 等在 InAs/AlGaSb 的紅外線 cyclotron resonance 實驗中觀測到新的 x-line transition, 而其性質與理論上的 exciton 性質相似, 而宣

稱觀測到了 intrinsic ground exciton state [2]。然而經精確的能帶理論計算後, 本校的蔣志純教授等 (J. C. Chiang et al.) 計算出 InAs 的 conduction band 與 GaSb 的 valence band 混合後 (hybridization), 在磁場下造成 Landau level mixing effect 亦可產生 x-line transition, 與紅外線 cyclotron resonance 之實驗相一致[3]。到目前為止, 在第 II 型量子井中是否存在 intrinsic ground exciton state, 尚待直接證據證明, 而此 Bose-Einstein condensation 亦是半導體物理研究中二維電子系統尚未解決之問題。

四、Quantum Wire and Quantum Dot

當 MOSFET 與 HEMT 中電子導電層的厚度 (L_x) 比導電電子的費米波長 ($\lambda_F \approx 400 \text{ \AA}$) 小, 而形成二維電子氣時, 電子的波動特性即顯現出來, 例如 quantum interference 所造成的 weak localization 和 electron-electron interaction 形成的量子效應等。這些量子效應在理論上有早期的 P. W. Anderson 及後來的 P. A. Lee 等研

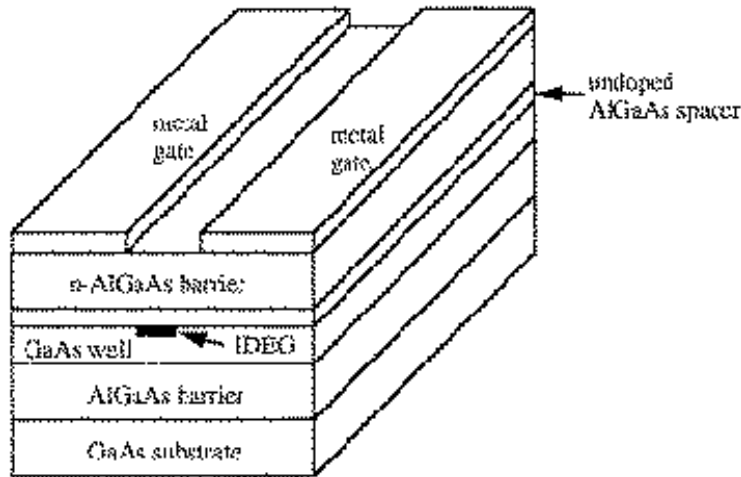


Fig. 4 1D quantum wire in split-gate HEMT structure

究探討過，且在二維電子系統中得到證明[4]。如果 MOSFET 與 HEMT 兩種結構用來限制電子自由度的方式能夠結合，以限制電子層的厚度 (L_x) 與寬度 (L_y) 皆比費米波長小，則二維電子氣即變成一維電子系統。最簡單的例子即是在 HEMT 上面加一對 split-gate，當加上 gate voltage 時，原來在 GaAs 的二維電子氣因受 gate voltage 所產生的電場作用而集中於中間狹長的位能井中，如果狹長的位能井的厚度 (L_x 約等於量子井 GaAs 厚度) 和寬度 (L_y 約等於 split-gate 之間距) 皆比電子的費米波長較小，則電子的自由度變成一維的而形成所謂的量子線 (Quantum Wire)，請看圖四。而在一維的量子線中，電子的波動性更顯現出來，由於量子效應使其通過狹長的量子線的電導亦成階梯式的量子化現象 (quantization of conductance, [5])，如果在理想的 quantum wire 中，一維的電子系統其量子化的電導可寫為

$$G = \frac{2e^2}{h} N$$

其中 N 是穿越費米能階的 number of subbands，而量子化的單位 ($2e^2/h$) 正是 van Wees 實驗中階梯之單位[5]。一維電子系統電導之量子化可說是 quantum wire 結構的重要發現 (在一維電子氣的 quantization of conductance 類似於在二維電子氣的 quantum Hall effect)。

利用 Split-Gate 可以把 HEMT 中的 2DEG (i.e. $L_x < \lambda_F \ll L_y < L_z$) 變成一維的 quantum wire (i.e. $L_x < L_y < \lambda_F \ll L_z$)，同樣地經由特別

設計的 gate，例如圖五的 gates 1, 2, 3, 4, C, F，HEMT 中的 2DEG 亦可變成零維的 quantum dot (i.e. $L_x < L_y < L_z \ll \lambda_F$)。在圖五中經由 gate 1 和 2，可形成兩個位能障 (barrier) 把電子局限於 Q 中，而形成零維的量子點 (quantum dot)。因在 quantum dot 中的電子能階是不連續，所以亦被稱為“人造原子” (artificial atom)，能階如圖五。量子點 Q 中的不連續能階可以由 gate C 來控制，當量子點 Q 中的能階 (E_0, E_1, E_2) 跨過費米能階 E_F 時，電導 (conductance) 會出現最大值，所以改變 gate C 之 voltage 時，source 與 drain 之間的 conductance 會隨一個個的 subbands (E_0, E_1, E_2) 做週期性的振盪，此即所謂的 Coulomb blockade oscillation。在圖三的双 barrier structure 或圖五的 quantum dot 結構中，藉由兩個位能障 (potential barriers) 的 Coulomb blockade 之效應，及小心控制不連續能階，例如控制圖五中的 gate C voltage，則可得到每次只讓一個電子穿過位能障之 Single-Electron Tunneling (SET) 元件。

以上所提造成 quantum wire 或 quantum dot 的元件結構可以有不同的方法或不同的磊晶技術，或直接以蝕刻方式造成一維或零維的電子系統，這也說明了半導體材料的多樣性，而在 mesoscopic scale 尺寸大小上，其量子特性可被人類所控制與應用。

五、Application of Quantum Devices

量子元件之最主要應用可分為兩部份：(1)

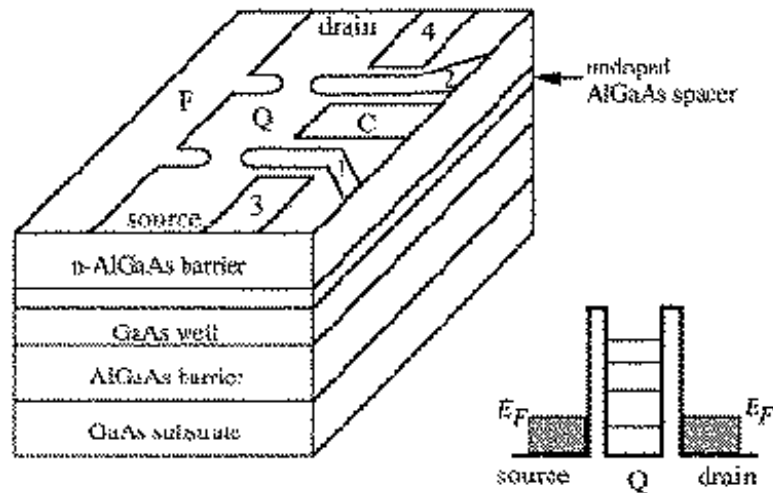


Fig. 5 Schematic diagram of quantum dot at point Q, controlled by gates 1, 2, and C. Inset: 0D quantum dot.

發光二極體(LED)和雷射(LD), (2) high speed electronic device, 如 single electron transistor 和 logic circuit。分述如下：

1. 發光二極體和雷射 (LED, LD)

以半導體量子井結構來作 LED 和 LD 已經是非常普遍, 早期的雷射二極體 (LD) 光束是由側邊 (edge) 射出, 最近由表面射出雷射光束的 Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) 等皆是以量子井為主要結構。基本上其物理性質大致都已經清楚, 唯一尚待克服的是材料特性, 例如製造紅光或黃光的 LED 或 LD 可用很成熟的材料如 GaAs、AlGaAs、AlInP、AlInAs 等來製成量子井。然而藍光材料如 GaN 與 ZnSe 之磊晶技術尚未成熟, 是目前最熱門的半導體研究題目之一 [6]。另外 Quantum Dot Laser, 因其體積小, 耗電少的優勢被認為是下一代的半導體雷射。

2. high speed electronic device :

以量子井結構做成的 HEMT 元件, 已經有效的把電子的游動率 (mobility) 提昇了許多。再經由元件設計亦可把二維電子系統變成一維的 quantum wire 或零維的 quantum dot。例如以 double barrier structure 所做成的 resonant-tunneling bipolar transistor, 因其體積小、耗電少、速度快, 漸被廣泛應用。另外這一、二年被提到的利用 quantum dot 做成的 single-electron device 來執行邏輯線路 (logic circuit) 的指令。

例如圖六(a), 由四個 quantum dot 所組成的 unit cell。每個 cell 放兩個電子於左右兩邊, 而只有上下兩個 quantum dot 間有一維通道 (1D channel) 允許電子上下游動。因庫倫力作用此 unit cell 的簡單電子組態有兩種如圖六(a), 可定義為邏輯指令 “1” 和 “0”。若把多個 cell 並排成一列, 則從左邊輸入 “1” 之指令, 結果右邊輸出的指令亦為 “1”, 如圖六(b)。但是當 cell 的排列方式變成圖六(c)時, 則左邊輸入指令是 “1”, 但右邊輸出指令變成 “0”, 而達到 “inverter circuit” 之功能。如此可把 quantum dot 的優點融入積體電路 (VLSI) 中, 這個利用 quantum dot 做成的邏輯線路 (圖六) 稱為 Quantum Cellular Automation (QCA), 成為今年三月 (2000 march) 美國物理年會非常熱烈的話題。

六、結語

台灣在半導體的研究領域仍以傳統的元件代工與設計為主, 而由科學園區與各大學的電機系主導。近來半導體材料的開發漸受重視, 而應用的材料由傳統的 Si-MOSFET 到 GaAs/AlGaAs, 及最近的 GaN 等。然而半導體物理之研究從物理材料到元件, 尚無法有效整合。我們希望半導體之研究, 從物理、材料到元件能夠結合, 使台灣在元件代工與設計之優勢能夠強化, 新材料之開發與半導體物理之研究皆能齊頭並進。

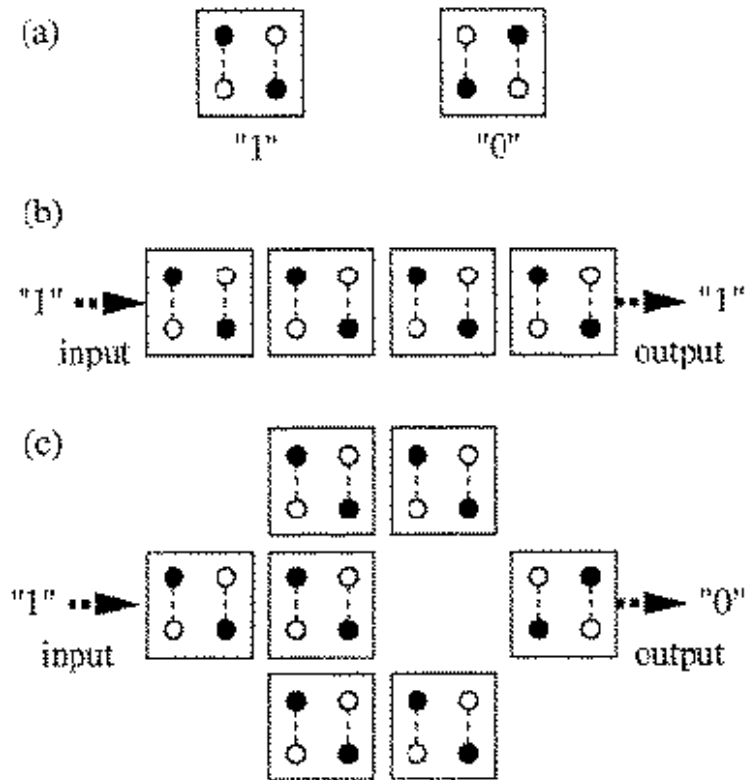


Fig. 6 Quantum dot device for logic circuit

參考資料

- [1] S. Datta, M. R. Melloch and R. L. Gunshor, *Phys. Rev., B* **32**, 2607 (1985); Y. Naveh and B. Laikhtman, *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 900 (1996).
- [2] J.-P. Cheng, J. Kono, B. D. McCombe, Ikai Lo, W. C. Mitchel and C. E. Stutz, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 450 (1995).
- [3] J.-C. Chiang, S.-F. Tsay, Z. M. Chau and Ikai Lo, *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 2053 (1996); *Phys. Rev., B* **56**, 13242 (1997).
- [4] P. A. Lee and T. V. Ramakrishnan, *Rev. Mod. Phys.* **57**, 287 (1985); Ikai Lo, S. J. Chen, L.-W. Tu, W. C. Mitchel, R. C. Tu and Y. K. Su, *Phys. Rev., B* **60**, R11281 (1999).
- [5] B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der marel and C. T. Foxon, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 848 (1988).
- [6] Ikai Lo, K. Y. Hsieh, S. L. Hwang, L.-W. Tu, W. C. Mitchel and A. W. Saxler, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2167 (1999).