

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

奈米結構的空腔量子電動力學及量子傳輸(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2120-M-009-002-

執行期間：91年08月01日至92年12月31日

執行單位：國立交通大學電子物理學系

計畫主持人：褚德三

共同主持人：許世英，林俊源，朱仲夏，趙天生

計畫參與人員：陳岳男、鄭冶沙、林高進、林銘杰、林青彥、邱裕煌、簡贍瑞、
趙國勝、李哲明、唐英瓚、黃詩淳

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 6 月 2 日

一、奈米結構中的超輻射與量子傳輸

背景：

近年來，由於奈米技術的快速進展，許多新穎的奈米結構如奈米碳管(carbon nanotube)、量子環(quantum ring)等可以被製造出來。也由於這些結構新奇的物理特性及可能的應用，奈米科學的研究遂吸引了各種不同領域的研究者爭相投入。若從量子光學的角度，量子點(quantum dot)或量子環可扮演所謂人工原子的角色。和傳統量子光學最大的不同，就是人們可以運用製程的技術，在人工原子旁邊加上電極，控制電子的進出，這是傳統量子光學所不能達成的。也由於這樣的特性，使得量子點極有可能被廣泛的應用於光電、電子資訊，甚至量子計算。

方法：

我們利用 master equation 的方法，發展了在外加耦合電極下的量子點傳輸理論，並且利用前期研究超輻射現象的結果，探討在雙量子點中激子(excitons)超輻射對電流的影響。

結果與討論：

我們考慮了雙量子點被包夾在 p-i-n junction 中 (Fig. 1).

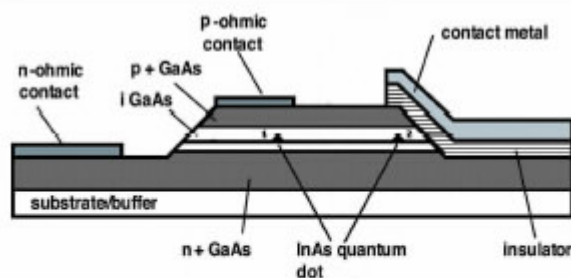


FIG. 1: Proposed device structure. Two InAs quantum dots are embedded in a p-i-n junction. Above dot 2 is a metal gate, which control the energy gap and orientation of the dipole.

Fig. 1

電子與電洞分別可以由 n-type 或 p-type GaAs 共振穿隧進入量子點 1 而形成量子點激子，由於與光子的交互作用(vacuum fluctuations)，此激子會再複合(引起自發輻射)而放出一個光子。

從我們的理論模型可知，隨著量子點間距離的變化，電流會呈現震盪的現象 (Fig. 2)，此即是超輻射的特徵，這意味著我們可以用電流的方式來檢測超輻射。

另外我們也發現到在此系統中存在著由環境所引起的糾纏態(Fig. 3)。在外加微型共振腔下，此糾纏態甚至可以達到最大值(maximum entangled states)。這重要的發現意味著我們可以利用環境中的噪音來產生量子計算中所需的糾纏態，而且這個糾纏態即使在兩個量子位元(Qubit)距離很遠時仍可以形成，這是傳統方法

所不能達到的。這些結果已發表在美國的物理期刊 Phys. Rev. Lett. **90**, 166802 (2003)。

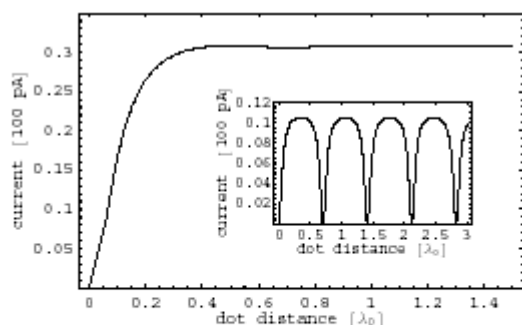


FIG. 2: Stationary tunnel current, Eq. (4), as a function of dot distance d . The interference effect is seen clearly (inset) by incorporating the system inside a rectangular microcavity. The vertical and horizontal units are 100 pA and λ_0 , respectively.

Fig.2

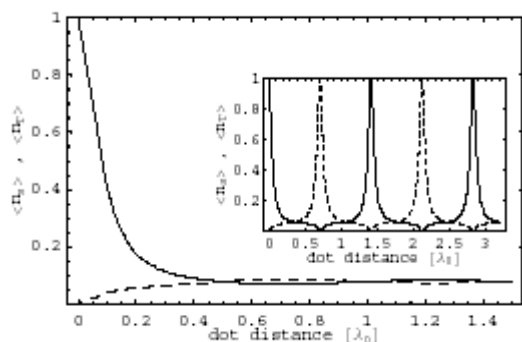


FIG. 3: Occupation probability of the entangled states n_S (solid line) and n_T (dashed line). The inset shows the results inside a rectangular microcavity.

Fig. 3

二、自由與吸附分子之轉動與受脈衝雷射作用之效應

簡介

近來高強度雷射在分子光學有很大的發展，其中分子的校直(Alignment)和偏向(Orientation)在立體動力學[1]、表面催化作用[2]、分子補捉[3]、分子聚焦[4]及奈米尺度設計[5]等方面扮演著重要的角色。在理論方面，Friedrich[6,7]等利用時變水丁格方程推論調整適當 picosecond 雷射脈衝作用於極性分子，使分子處在 pendular states 上，進而會使分子受到校直(Alignment)；Machholm[8]等認為 femtosecond 雷射脈衝如同 impulsive excitation 可產生非穩定波包，使分子偏向(Orientation)，這些波包是由許多自由分子波函數(球諧函數)所組成，因此藉由超短雷射脈衝作用在分子上，傳送衝量(impulsive momentum)給分子，來控制分子的校直(Alignment)或偏向(Orientation)；在實驗方面，Sakai[9]等利用靜電場和脈

衝雷射的結合驗證了 Friedrich 等所提出的理論。

目前我們研究兩個雙原子分子系統，兩極性分子之間受耦極矩作用(dipole-dipole interaction),脈衝雷射作用於其中一極性分子，使分子偏向受到雷射和耦極矩作用的共同影響，以探討兩者與分子偏向的關係。在這之前，我們也研究分子吸附於一固體表面系統，探討若對吸附分子施加穩定電場，則吸附分子能階結構，還有在有限溫度和不同強度靜電場下，吸附分子從固體表面脫附的情形。最後我們將延伸目前工作到量子傳輸課題上，考慮分子磁耦極矩與電子作用，以期了解電子傳輸與分子極矩之間關係，及外加超快脈衝對這種傳輸機制的影響等。

結果與討論

脈衝雷射作用兩個雙原子分子系統，如 Figure 1 所示。兩極性分子在不同距離下，對系統作用於一個雷射脈衝，會得到不一樣的分子偏向 $\langle \cos_{\theta} \rangle$ 和 $\langle \cos_{\theta}' \rangle$ ，其中 $\langle \cos_{\theta} \rangle$ 指受雷射作用分子的偏向(實線)， $\langle \cos_{\theta}' \rangle$ 是不受雷射作用分子的偏向(虛線)。

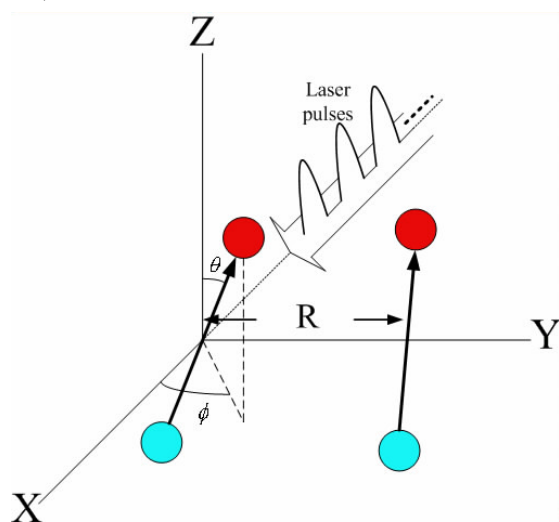


Fig. 1

如 Figure 2 所示。從而可知：當兩分子間距較大($R=3 \times 10^{-8} m$)(Figure 2(a))時，分子偏向會隨時間作規則變化,相反地，當分子間距較小時($R=1.5 \times 10^{-8} m$)時(Figure 2(c))，分子偏向則會隨時間變化呈現出不規則的變化情形，我們推論這種變化主要是受到分子間耦極矩作用，所造成的影響，使得分子偏向有規則和不規則變化等兩種情形。

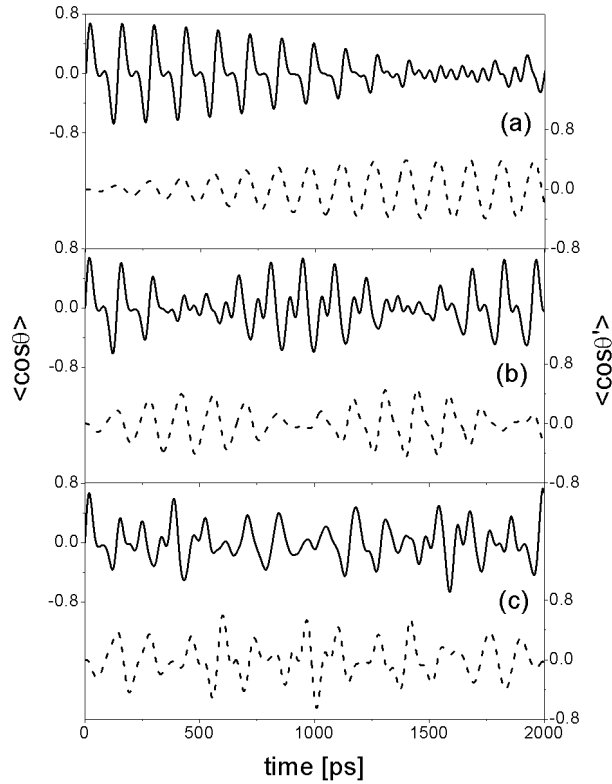


Fig. 2

另外我們對系統施加不同電場強度的週期脈衝雷射，得到不同的分子偏向變化，如 Figure 3 所示。在電場強度較小的週期脈衝雷射作用下 ($E_0 = 3 \times 10^6 \text{ V/m}$) (Figure 3(a))，分子的偏向會呈現規則變化，而在電場強度較大的週期脈衝雷射作用下 ($E_0 = 3 \times 10^7 \text{ V/m}$) (Figure 3(c))，分子的偏向則呈現混亂、不規則變化，我們推論此現象為混沌現象。

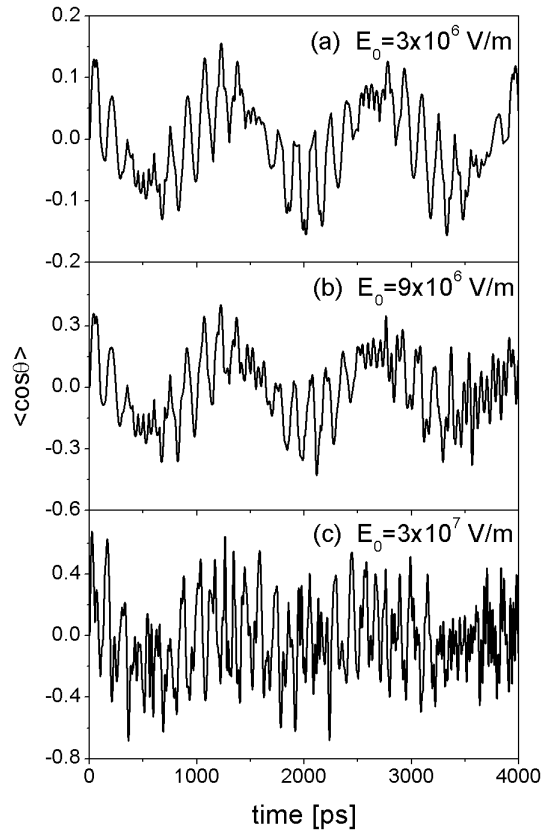
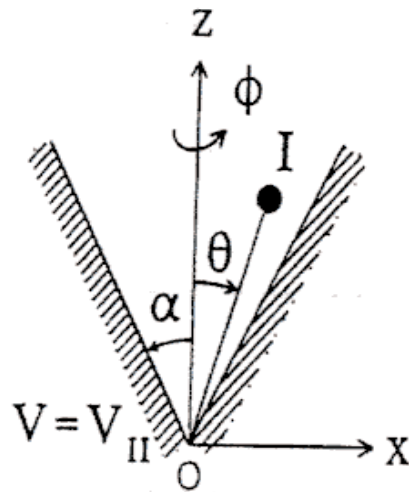


Fig. 3

在表面吸附分子系統方面，我們採用垂直吸附模型(Figure 4)，研究在不同電場強



度下之能階結構，

Fig. 4

如 Figure 5 和 Figure 6 所示，轉動能階隨電場強度有所變化，出現所謂的 Stark 效應。

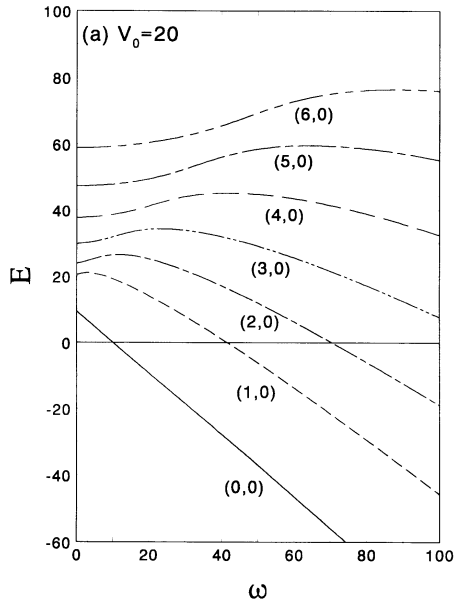


Fig. 5

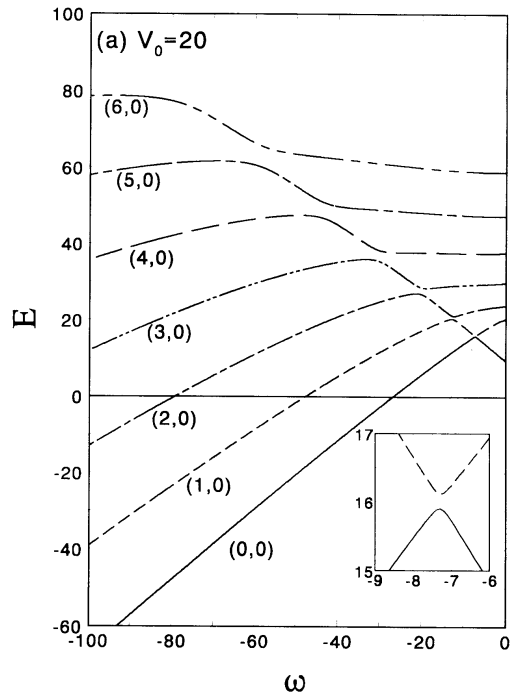


Fig. 6

Figure 7 說明吸附分子脫附情形(Franck-Condon factors)，顯示分子在受到不同電場強度下，有不一樣的脫附情況，最後我們 fitting 實驗證據[10,11]，發見我們的理論結果，可得到與實驗有很好的吻合，如 Figure 8 所示。目前我們已整理好這些數據，即將投稿中。

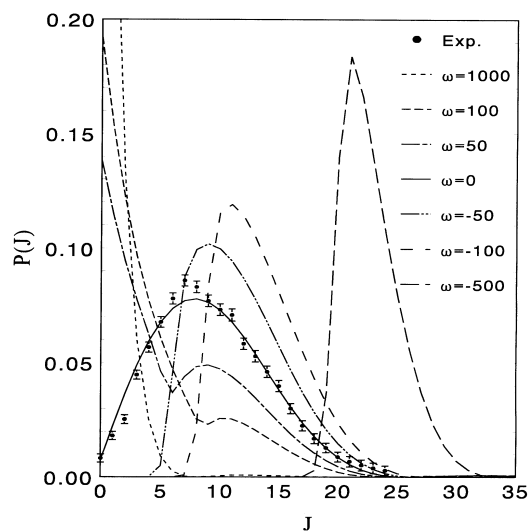


Fig. 7

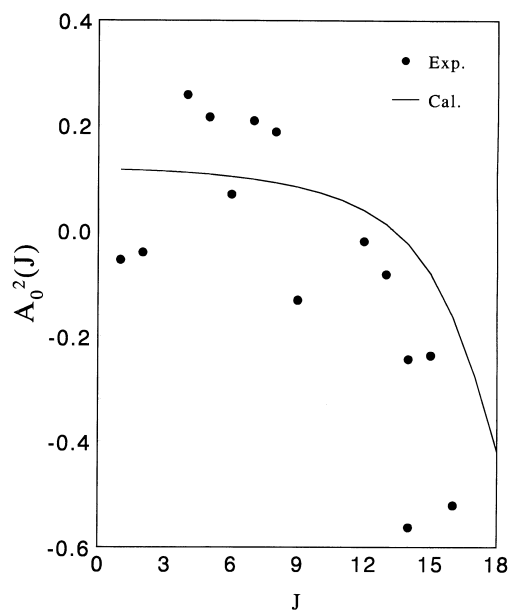


Fig. 8

参考文献

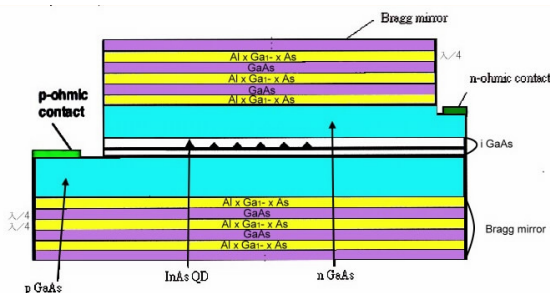
- (1) Special issue on Stereodynamics of Chemical Reaction [J. Phys. Chem. A 101, 7461 (1997)].
- (2) V. A. Cho and R. B. Bernstein, J. Phys. Chem. 95, 8129 (1991).
- (3) B. Friedrich, Phys. Rev. A 61, 025403 (2000).
- (4) H. Stapelfeldt, H. Sakai, E. Constant, and P. B. Corkum, Phys. Rev. Lett. 79, 2787 (1997).
- (5) T. Seideman, Phys. Rev. A 56, R17 (1997).
- (6) B. Friedrich and D. R. Herschbach, Phys. Rev. Lett. 74, 4623 (1995).
- (7) L. Cai, J. Marango, and B. Friedrich, Phys. Rev. Lett. 86, 775-778 (2001).
- (8) M. Machholm and N. E. Henriksen, Phys. Rev. Lett. 87, 193001 (2001).
- (9) H. Sakai, S. Minemoto, H. Nanjo, H. Tanji, and T. Suzuki, Phys. Rev. Lett. 90, 083001 (2003)
- (10) I. Beauport, K. Al-Shamery, and H.-J. Freund, Chem. Phys. Lett. 256, 641 (1996). [INSPEC]

三、空腔量子電動力學的實驗探討

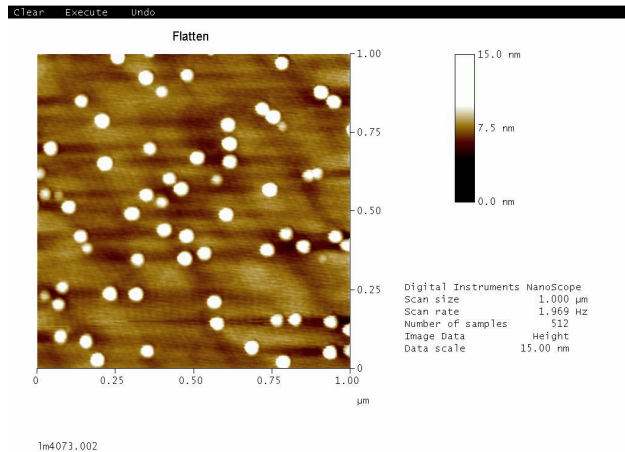
我們在空腔量子電動力學研究子題中的另一重點是探討從 p 及 n 型層半導體分別將電洞與電子注入夾層中的量子點，利用 Bragg mirrors 所構成的空腔及連接在 p 及 n 型層半導體的歐姆接點，以外加電場來控制量子點的能階(Stark effect)，並且改變 Bragg mirrors 的距離，以便觀察(1).在此微型共振腔中， Purcell effect 究竟如何影響電流，研究是否能用測量電性的方法去檢驗 Purcell effect。(2).利用測量電性的方法去檢驗超輻射現象。(3).利用測量電性的方法去檢驗量子糾纏態的建立及隨著空腔尺寸的變化情形。近年來由於長晶技術的發展，製造低維度的半導體量子結構的技術漸趨成熟，例如準二維的量子阱，準一維的量子線，準零維的量子點。其中，量子阱的研究非常多且成熟，已廣泛用於半導體元件，如半導體雷射、高電子移動率電晶體；量子線可用於量子傳輸上，如量子波導。而量子點的最終目標是發展人造原子，可經由材料的特性與幾何結構來控制其特性。在這方面有很多理論及實驗上的研究。我們設計了一個微型共振腔，見圖所示。此結構是以上下各十層的 $Al_xGa_{1-x}As$ (上下層分別由一層之 $x=1$ ，一層為 $x=0$ ，共 10-20 對，相間構成，每層厚度為 $\lambda/4$ ， λ 約為 800nm)組成的 Bragg mirrors 包住 n-GaAs- i-GaAs- p-GaAs(厚度約為 $\lambda/2$)，而 I-GaAs 則長有 InAs 之量子點(密度為 $10^7/cm^2$)。目前此結構正委由交大最具長量子結構經驗的研究群試製中，目前之量子點密度只能達 $10^9/cm^2$ ，見圖所示，仍尚未能達到我們的要求。目前正加緊嘗試中。

有關量子點尺寸分佈的情形，目前理論的計算多假設系統具有高度的對稱性，較難與實驗作定量的比較，本研究將使用自調式有限元素法來分析上述問題，目的在建立量子微結構模擬器度(PC 平臺)，能模擬分析實體並與實驗觀察作比較。

本計畫所需的微型空腔量子點結構是採用分子束磊晶法(Molecular Beam Epitaxy)製備(如圖),GaAs 基板的成長溫度大約在 520°C 左右,量子點的材質為 InAs,厚度約 2ML,量子點成長的速率約 0.0378ML/s，目前所製備的結構，雖不能用來研究上述三個研究目的中的第二及第三子題的實驗所需之量子點，但用來研究用測量電性的方法去檢驗 Purcell effect 之量子點，則應屬可行，因此目前另一方面試著再找出更適合的長晶參數，另一方面則著手準備檢驗 Purcell effect，唯量子點上下方之共振腔之磊晶與量子點歐姆接點之連接仍需找尋更適合的解決方法。



微型共振腔結構



子題二：奈米結構之高頻量子傳輸頻譜

為製作微型，在 2DEG 的電子須被侷限在特殊區域，此可利用電子束在異質接面上來寫出電極，在過去 10 個月內我們努力建立電子束蝕刻系統及技術，三位研一學生已參與此項工作。去年他們三位均曾在彰化師大吳仲卿教授處接受訓練。在今年一月已建立 Hatachi 掃描電子顯微鏡系統，直至目前樣品製作已接近完成，目前 mesa、電極及歐姆接點均已獲良好成果。圖 1(a) 及 (b) 係利用光及甲子束蝕刻技術法所得之微小結構。其上有五對電極，其間隙為 0.15, 0.13, 0.55, 0.13, 0.13 μm 。接來我們將可利用這些結構從事量子點接觸及量子點方面的研究。

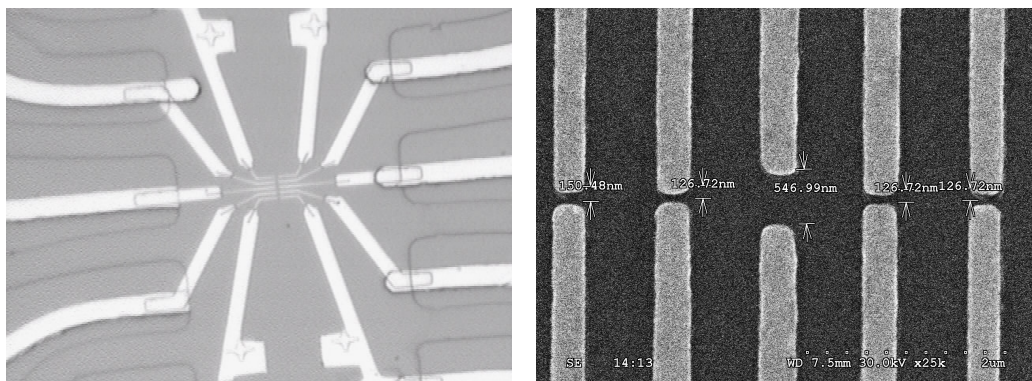


Figure 1. Quantum point contact pictures. (a) OM image of Mesas and 5 pairs of gate. (b) Close-up views of the 5 pairs of gate by SEM.

量子點接觸及量子點係製造於一二維電子氣系統(2DEG)中，而此 2DEG 則形成於以 MBE 長成的 GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs 異質界面之交界。為了研究這些量子元件的 coherence, charging, 及 spin effects，我們需要高 mobility 2DEG，其電子平均自由程達 100μm 的材料。去年我們已與 Israel 的 Braun center of Submicron Research 的 Dr.Umansky 連繫，他們的 MBE 可製出 mobility 高過 1 百萬 cm²/Vs. 的 2DEG，利用 Dr.Umansky 所提供的結構，我們應可完成計畫之目標。圖 2 示出 transport properties of a 在磁場(垂直薄膜表面)作用下的 2DEG.系統之電子傳輸性質。橫向傳輸 R_{xx}(H) 示出由於磁場所引起的 Landau level quantization 及在 2DEG.中的 step-like density of states 之典型的 Subnikov-deHaas 振盪 利用此振盪週期，我們可得樣品的 carrier concentration.

$$n_s = \frac{2e}{h} \frac{1}{\Delta(1/H)}$$

Hall resistance 也顯示出與平常線性很不同之行為。R_{xx} 的零點對應於 Hall resistance R_{xy} 的平臺。甚至在很弱磁場中我們亦可解析出這些平臺，顯示我們樣品之 mobility 確實很高。Carrier concentration 也可用 Hall measurement.測出 R_{xx}(H) 及 R_{xy}(H) 得出，相同結果為 n=1.4×10¹¹/cm². 考慮 R_{xx}(0) 樣品之 mobility 估計為 1×10⁶cm²/Vs.。由這些結果我們可得出樣品的物理特性。以及確定我們樣品製作的成功。

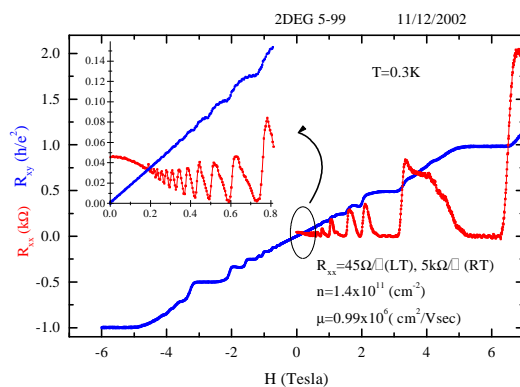


Figure 2, The normal quantum effect observed in longitudinal resistance R_{xx} and Hall resistance R_{xy} of a GaAs based 2DEG at 0.3K.

圖 3 示出一些實驗數據。電極縫隙寬約~235nm 而 gap distance ~320nm. 加上頁偏壓，使 2DEG 獲一負壓之 depletion 以限制.出一電子運動區。當 sweeping gate voltage V_g, 電子通道寬度即縮減，故我們可觀察到二維至準一維及消失不見(pinch off)的傳輸行為。圖 3, 可看到有很清楚的電導平台。利用實驗數據我們可利用 hard wall 及 parabolic model 來探討 channel width 及 gate voltage 之關係。

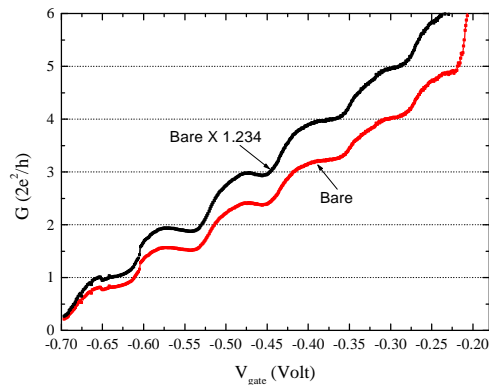


Figure 3. Quantized conductance observed in a narrow channel of 2DEG at 0.3K.

Figure 3. Quantized conductance observed in a narrow channel of 2DEG at 0.3K.

參加 2003 年美國物理年會(March Meeting)心得報告

一、會議日期：3/3~3/9

二、會議地點：Texas Austin

三、報告者：褚德三

四、方式：口頭報告(Oral)

五、題目：Current detection of superradiance in a double-dot system

六、參加會議過程：

第一天：由台北坐長榮航班直飛美國洛杉磯，再轉 AA 航班抵德州奧斯汀，隨後在大會堂註冊。

第二天：我的演講被排在第二天早上 8:48，由於前面報告有點延後，約 9:00 上台做完十分鐘的報告，報告的內容主要是我們最近所完成的工作。即是想利用一個雙量子點的系統(在基板上先鋪上一層 n 型 GaAs，然後再鋪上一層 intrinsic GaAs，在此層中設法長出很稀疏的 InAs 的量子點，然後以 intrinsic GaAs 覆蓋之，最後再鋪上一層 p 型 GaAs，鋪上電極。把這系統設法 incorporate 進入一個 planar micro-cavity 內，cavity 的上邊留一小窗，使一量子點恰位於窗下，而臨近的其他一個量子點上則鍍上 contact metal 當 gate，利用此 gate 上的 voltage 來調整第二量子點的能階(及線性 Stark 效應)，使兩個量子點的能階相同。然後從 p-contact 上輸入一個 hole 到第一量子點，利用庫倫作用使 n-contact 的電子也穿隧入第一量子點內。因而形成了 exciton

state，隨後 exciton 發生 recombination 而放出 radiation。若 gate voltage 能把第二量子點的能階調得與第一量子點的一樣，則此 radiation 即會被第二量子點吸收而發生 superradiance，同時也使窗口無輻射外射，p-及 n-contact 間的電流也因而停止。反之即有一個光子從窗口外射。因此這種結構可以產生單光子的放射。這種單光子的放射則係利用兩個量子點間的超輻射現象來達成的。我們更從理論上證明這種系統的超輻射現象會隨著 micro-cavity 的尺寸作週期性的變化。假如我們計算 Dicke 態的佔有率，我們更可證明這種系統會使單線及三重線的 Dicke 態產生量子糾纏，而且這種量子糾纏態也會隨著 micro-cavity 的尺寸作週期性的變化。當發生最大的單線糾纏時，三重線的糾纏變成最小，反之亦然。因此我們的量子糾纏可以在尺寸大的情形下存在，傳統的則否。這原因乃是因我們所引起的量子糾纏，其產生機制與傳統的不相同，傳統的是靠兩個次系統間的直接作用，因此與次系統的距離有很大的關係。而我們的量子糾纏是由於兩個次系統與共同的熱庫間的作用，因此只要兩個量子點間有耦合，則集體的衰變過程即會趨駛整個系統變成量子糾纏態。形月預期這些結果將對未來量子資訊領域的發展有重大的應用與貢獻。

第三天至第四天在會堂中聽別人做報告，了解當前凝體物理研究之熱門問題。

第五天白天：參觀德州大學奧斯汀分校物理系，發現他們的原子分子研究群正在以 BEC 從事有關黑洞及混沌的研究，真是極端有趣又重要的問題，這個研究群理論與實驗並重，目前所做的問題不僅重要而且是先驅的研究，而所用的儀器都是該實驗室舊有報廢，重新改裝組合而成，使人印象特別深刻；而非線性中心則以很基礎的儀器從事很尖端的研究，這個研究中心目前全美排名第一；奈米碳管實驗室從以簡單的 CVD 設備製造單壁均勻(1 奈米-2 奈米直徑)的奈米碳管、及對這些奈米碳管作特性分析、利用所製備之奈米碳管作元件製程等一以貫之，其他實驗室大都正在從事正熱門的研究，理論及實驗學家交往密切，深覺吾國基礎研究及實驗技術之不如人，而且夜郎自大心態比比皆是，另外參觀了機器房，一共 12 個專業技術人員(電子、玻璃、電腦)，敝系至今才得 3 人，且竟無車工技術員，可見欲提高學術研究，難矣哉。

第五天晚上：束裝返回國，於 3 月九日(星期天)早上到達桃園國際機場。

七、心得與感想：

(1) 從第五日分別與從事實驗與理論工作的學者進行較深入的討論及實地

參觀，觸發了許多研究上的想法外，也感觸良深。台灣的研究者一向花大錢買 commercial 儀器，一幅時間即金錢的樣子，但美國研究者卻從現有的 components 組合著手。花很少的錢，把一些用過的儀器及零件重組變成可測量新現象的嶄新儀器。因為自己組合，因此是世界上唯一的，故可做出世上唯一的好工作，而我們因為見買現成的，因此只能重覆別人的工作，天天炒冷飯，發表一些不看也可以的文章。

- (2) 感覺上目前在凝態物理的研究上，carbon nanotube、BEC 以及量子計算是比較熱門的領域，最近磁性半導體似乎開始興起，在會場裡，有關這方面的演講通常都擠滿了人。
- (3) 每年一大堆人花很多錢去參加國際會議，國科會應該好好評估這些人回國後所做的研究品質到底有沒有提昇，題目是否較見獨創性？還是每年出去學點皮毛，跟在別人後面做？事實上，國科會應該多考慮派遣博士生暑假時到國外實際參與人家的研究工作，學一些正確的研究態度，這樣恐怕會比讓一大堆研究工作已定型的教授出國取經，對真正提昇國內學術研製要有效及經濟許多。

八、此次報告之摘要：

We propose to measure the superradiance effect by observing the current through a semiconductor double-dot system. An electron and a hole are injected separately into one of the quantum dots to form an exciton and then recombine radiatively. We find that the stationary current shows oscillatory behavior as one varies the inter-dot distance. The amplitude of oscillation can be increased by incorporating the system into a microcavity. Furthermore, the current is suppressed if the dot distance is small compared to the wavelength of the emitted photon. This photon trapping phenomenon generates the entangled state and may be used to control the emission of single photon at predetermined times. The entanglement becomes an oscillation function of the inter-dot distance if the system is incorporated by a microcavity. This means even for remote separation between the two dots, the entanglement can still be achieved. This result is remarkably different from the conventional one and might be very important for the field of quantum information technology.

九、此次報告之投影片：共計十二張。