

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

以分子束磊晶所長半導體光電元件介觀物理之研究(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2112-M-009-033-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學電子物理學系(所)

計畫主持人：黃凱風

報告類型：精簡報告

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 94 年 6 月 1 日

計劃期中報告

本計劃目前進行順利，繼續有不錯之結果產出，但因本系系館搬遷實驗室在過去三個月均在搬遷狀態，特別是分子束磊晶系統之搬遷相當費時，且搬遷完成後，實驗仍需花費相當長的時間調整恢復，最近仍然投入在 MBE 系統之調校工作，預計至九月中可完全回復原來工作狀態。先前大面積之元件均為去年所長，故元件製作及量測分析工作，仍能順利進行。另外，我們成長了 $1.3\mu\text{m}$ 微米之飽和吸收體 +DBR，預計可做 $1.3\mu\text{m}$ 雷射之鎖模研究應可在第一年計劃完成時獲得成果。

本計劃主要目標利用分子束磊晶法所長光電元件，特別是垂直共振腔面射型雷射，利用其近場及遠場發光特性研究中 mesoscopic physics 特別是 mesoscopic 系統之波函數。報告第一部份主要針對 SU(2)理論做一說明，PO(1,1)及 PO(2,1)形成之原因有較詳細之討論，第二部份則為計劃中較新之結果，特別針對本徵態與 PO(1,1)疊加及 2×2 , 3×3 及 4×4 之 PO(1,1)做完整之理論與實驗之說明。

第一部份 同調波與雷射橫模

1.1 彈子球檯模型

方形彈子球是彈子球中最簡單的其中一種，其週期性軌道如前章所提及，其中最簡單的為 (1,1)、(2,1)、(3,1)。根據 Bohr 的相對應原理，當量子數趨近於無大時，可以和古典相對應。但在二維的方形無限位能井中，當量子數很大時，其波函數卻不會和古典有所對應。在本章利用 SU(2)，將能量相近的幾個本徵態 配上相位相疊加後，發現和古典的 PO 有著很好的對應。在實驗中，由於 Schrödinger 和 Helmholtz 方程式的相似，所以面射型雷射(VCSEL)的橫模可視為波函數的解。方形腔中的橫模一般都可以發現集中在古典的 PO 軌道，這個結果使我們確信週期性軌道的波函數比本徵態更能夠解釋介觀物理系統裡的現象。

1.2 SU(2)同調波

Pollet 等人提出了二維量子簡諧振盪相關的本徵態，經過 SU(2)所得的波函數是特別的簡單而且侷限在和古典相對應的橢圓軌跡，數學上，SU(2)可確保經由疊加幾個本徵態 $\phi_{K,N-K}(x,y)$ 其中 N 為一整數而 $K = 0,1,2,3,\dots,N$ ；可得到 $\psi_{N,M}(x,y;\phi)$ 在空間上 $\Delta x \Delta y$ 有最小的不確定性，其中 x、y 為卡氏座標系中的兩變數。在二維的方形彈子球也就是大家一般熟悉的無限位能井中，其本徵態為

$$\phi_{K,N-K}(x,y) = \frac{2}{a} \sin[(K+1)\frac{\pi x}{a}] \sin[(N-K+1)\frac{\pi y}{a}] \quad K = 0,1,\dots,N \quad (1.1)$$

在二維卡氏座標系統下，經由 SU(2)所得到的波函數為[5]

$$\begin{aligned} \psi_{N,M}^{p,q}(x,y;\phi) = & \frac{(2/a)}{\left[\sum_{K=J}^{N-J} \binom{N}{K} \right]^{1/2}} \sum_{K=J}^{N-J} \binom{N}{K}^{1/2} \cos(K\phi) \\ & \times \sin[p(K+1)\frac{\pi x}{a}] \sin[q(N-K+1)\frac{\pi y}{a}] \end{aligned} \quad (1.2)$$

圖 1-1、1-2 分別描述不同參數 ϕ 、 M 、 N 、 p 、 q 對波函數 $\psi_{N,M}^{p,q}(x,y;\phi)$ [8] 的影響

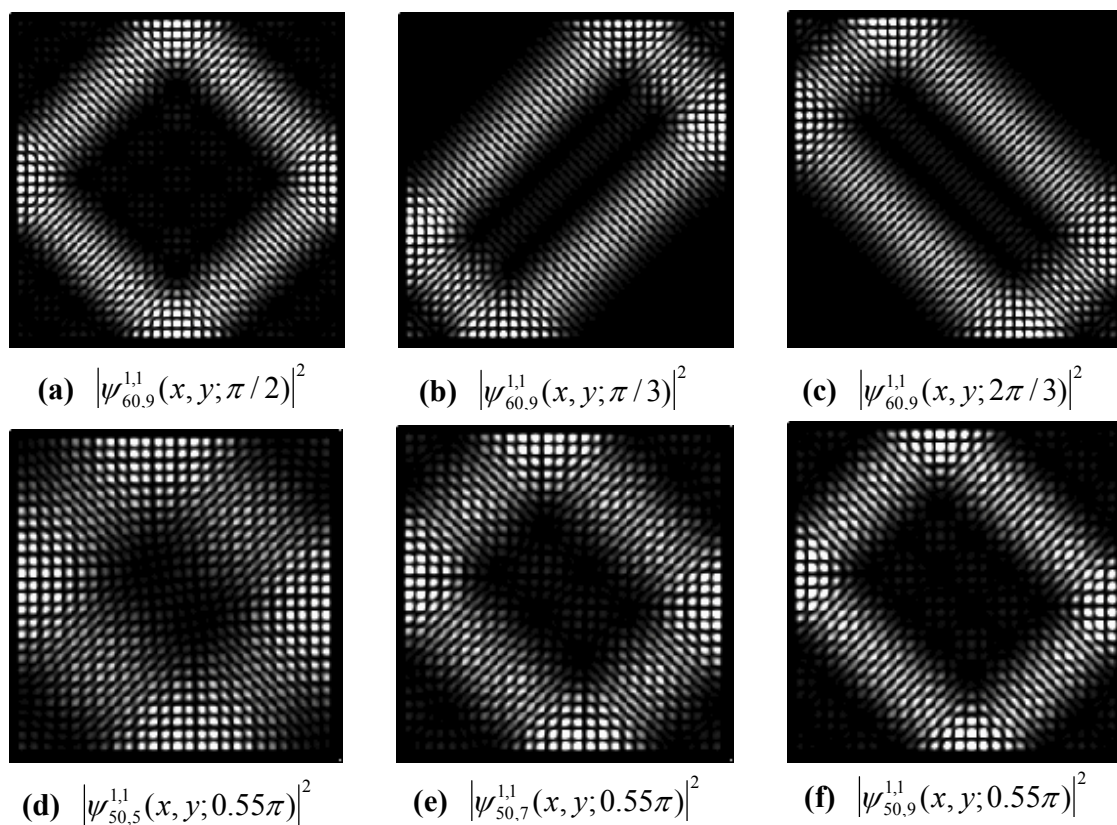
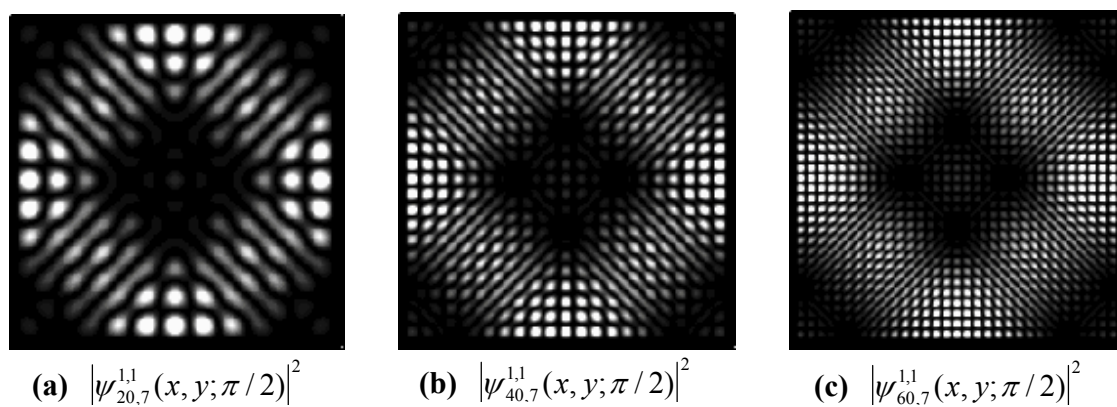


圖 1-1 (a)(b)(c) 是 ϕ 和 $\psi_{N,M}^{p,q}(x,y;\phi)$ 的關係，當固定 $p=1, q=1, N=60, M=9$ 由圖可明顯看出， ϕ 決定了 PO 的起點；而 (d)(e)(f) 則探討了 M 和 $\psi_{N,M}^{p,q}(x,y;\phi)$ 當 M 愈大，其波函數會越侷限， $M=N-2J+1$ 代表著選取的本徵態的個數。



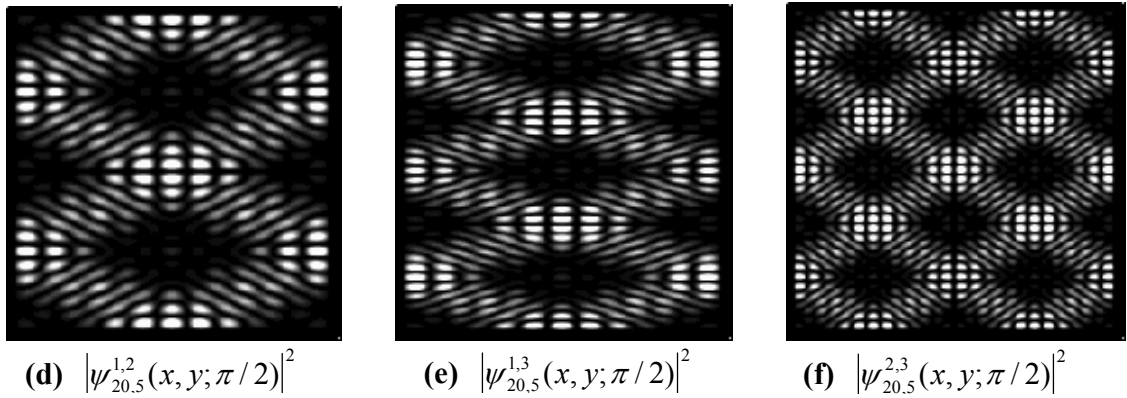


圖 1-2 (a)(b)(c)是當固定 $p=1, q=1, \phi=0.5\pi, M=7, N$ 和 $\psi_{N,M}^{p,q}(x, y; \phi)$ 的關係；而 (d)(e)(f) 則探討 p, q 和 $\psi_{N,M}^{p,q}(x, y; \phi)$ 的關係， p, q 的數值決定了 (p, q) 的 PO。

在(3.2)式中很有趣的是 ϕ 這一項，當每一個本徵態有了一個相位差 ϕ 時，相疊加後新的波函數，就會有古典的 PO 可以相對應，其情形就好像馬或者是蜈蚣在行走時，他們的每一隻腳必然要配合著很好的相位差，才能夠順利的往前行走，一旦其中一隻腳的相位配合不好產生錯亂，其他的每一隻腳就沒辦法很順利的接下去；同樣的，每一個本徵態的相位若是配合不好，就不會有一最侷限的波函數產生(如圖 1-3(b))。

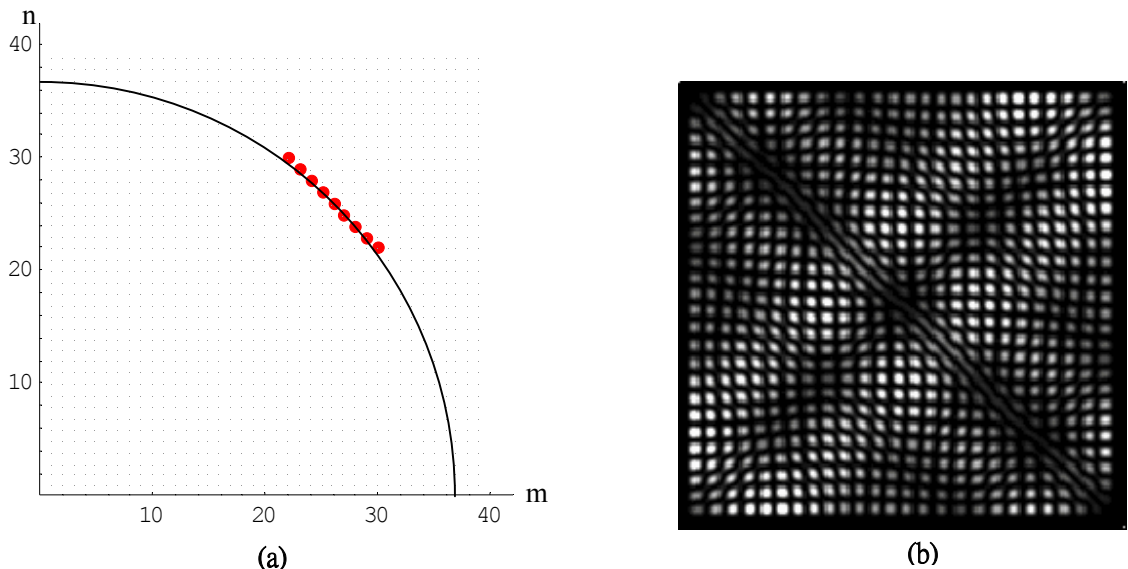


圖 1-3 (a) 在方形彈子球中的本徵態 K-space，每一個灰點代表不同本徵態，而黑色的實線代表 $m^2 + n^2 = 26^2 + 26^2$ ，大的黑點則是圖 3-1(d)(e)(f)所選取的本徵態 (b) 利用程式產生一亂數相位，將本徵態疊加後所產生的波函數，其相位分別為 $0.05\pi, 0.55\pi, 0.18\pi, 0.06\pi, 1.42\pi, 0.61\pi, 1.09\pi$

圖 1-1 (d)(e)(f)是固定 $N=50$ ， $\phi = 0.55\pi$ ，分別取 5-9 個本徵態所描繪出的圖，當所選取的本徵態越多時，波函數就會侷限在更小的區域；而每一個本徵態

$\varphi_{m,n}(x, y) = 2/a \sin[m(\pi x/a)] \sin[n(\pi y/a)]$ 所對應的特徵能量如下

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 (m^2 + n^2) \quad (3.3)$$

本徵態相對應的能量可以用兩個正整數 m 、 n 來表示，圖 1-3(a)即是 1-1(d)(e)(f)中所選取的本徵態，這些本徵態並不是簡併，但卻是很接近簡併的，

1.3 微型共振腔(VCSEL)

在討論面射型雷射的橫模前，我們先簡化其結構來加以討論，考慮一大方形孔徑和很窄的增益介質的三維共振腔結構，DBR 的結構幾乎僅允許單一波長，而氧化出的方形孔徑定義出了彈子球的橫向邊界。波向量可以分解成 k_z 和 k_t 兩個分量，其中 k_z 垂直方向出光的分量，而 k_t 則是橫向波向量的分量，而由於垂直方向的超短腔結構，因此 k_z 是波向量中的主要分量，而在橫向的二維邊界為 $40 \times 40 \mu m^2$ 因此 $k_z \gg k_t$ 。在橫向氧化出的二維邊界中，由於氧化的邊界和半導體有很大的折射率差異且因為波向量的 k_z 分量遠大於橫向的 k_t 分量，因此光子在邊界上會有全反射的行為，所以可將其視為在邊界位能無限高的堅固牆裡。此外，在 VCSEL 中的鏡子是 DBRs，可以被假設為沒有曲率的平面鏡，光子可以被考慮為一粒子被侷限在邊界位能為無限高且方形裡位能為零的二維無限位能井中，而在垂直的出光方向則經由 DBR 耦合到外面，因此將電場的分佈簡單的以 $E(x, y, z) = \psi(x, y) \exp(-jk_z z)$ 來表示，在分離出波函數的 z 方向後，Helmholta equation 可以寫為一二維的形式 $(\nabla_t^2 + k_t^2)\psi(x, y) = 0$ 同時在邊界由於全反射 $\psi(x, y) = 0$ ，使得光子好像撞倒一堅固的牆，面射型雷射因此提供一良好工具來研究量子彈子球的問題，而邊界可以利用半導體技術使其形成任何形狀，來作不同邊界行為的研究。

由 VCSEL 所得到的實驗和經過 SU(2)疊加後的 PO(1,1)有著很好的對應，但在

(1,2)就有相當明顯的差異，其主要差異在 PO 的交會點所產生的干涉條紋，理論計算的結果會和 x 方向平行(圖 1-2(d))，但實驗的干涉條紋是和 y 方向平行(圖 1-4 (b))。

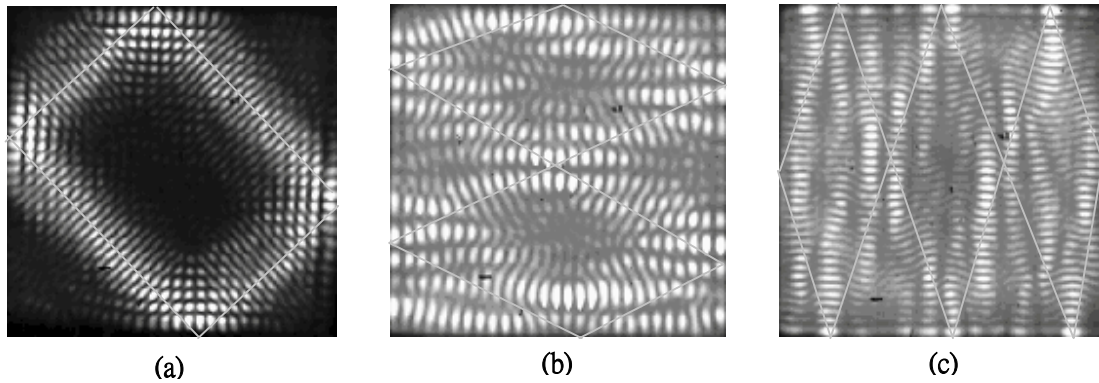


圖 1-4 (a) $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ 的方形 VCSEL 在溫度為 220K 的近場實驗結果-PO(1,1)
 (b) $40\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ 的方形 VCSEL 在溫度為 276K 的近場實驗結果-PO(1,2) (c)
 $40\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ 的方形 VCSEL 在溫度為 276K 的近場實驗結果-PO(1,2)

要解釋這一矛盾的原因，我們可先由 VCSEL 探討起，當將電流灌入 VCSEL 且經過降溫後，由於 VCSEL 在出光方向的超短腔結構，因此只允許在縱模只有單一波長，而 VCSEL 不可避免的還是會有一個頻寬，因此在橫模方向就會允許不只一單一頻率被鎖住(locking)，對應到 K-space 圖 3-3(a)就不再是四分之一的圓線，而是一個四分之一的圓環，降低溫度不僅可以減少熱透鏡效應的影響，同時由於半導體的能階亦會隨著溫度降低而變大，所以 K-space 上的圓環半徑也會隨之變大，因此在相同的元件上，就可以看到更高階的不同行為。當在做 SU(2)本徵態的疊加時，PO(1,1)所選取的本徵態，事實上就是斜率為-1 的線上的本徵態，但實驗中所能擷取到的本徵態是為一圓環，因此 PO(1,1)所選取的本徵態要同時在圓環和斜率為-1 的線上(如圖 1-5(a))，其恰巧和直接用 SU(2)所選取的本徵態是一樣的，故和實驗有著極佳的對應；而在 PO 為(1,2)所選取的本徵態是斜率為-2 直線上的本徵態，其和圓環的交點如圖 3-5(b)所示，其和直接使用 SU(2)所選取的本徵態是不同的，故造成實驗和理論計算的落差。

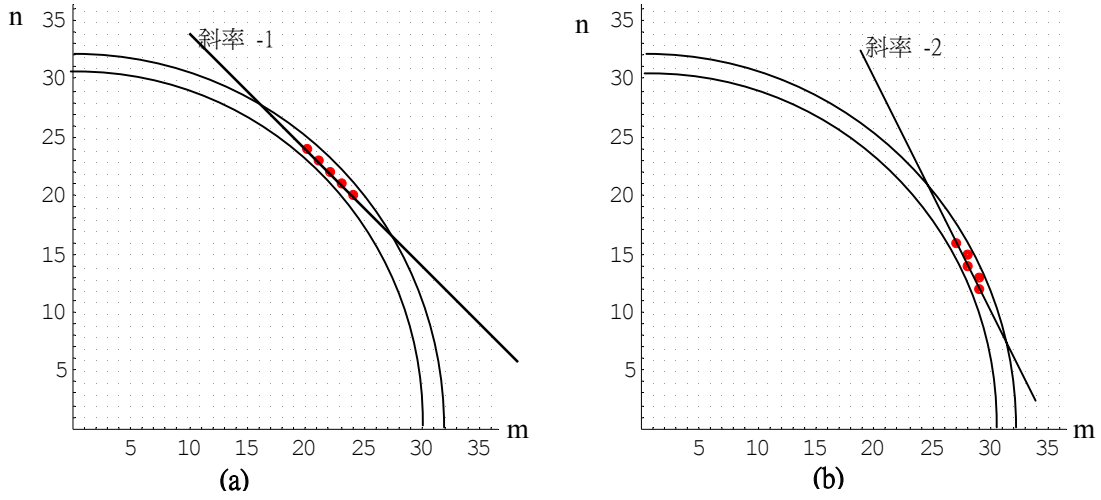
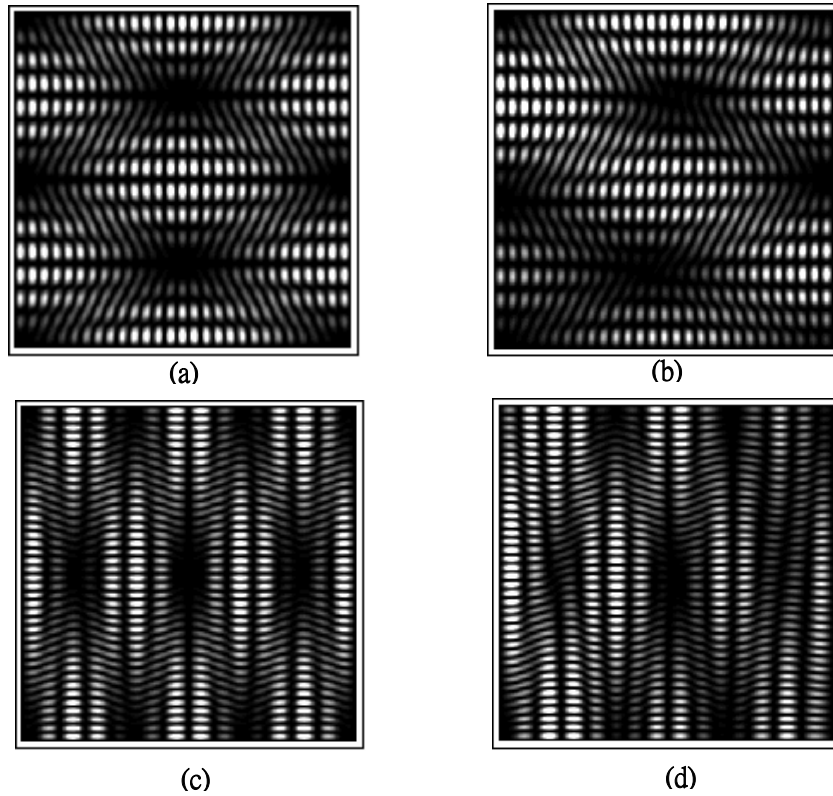


圖 1-5 (a)黑點代表 $PO(1,1)$ 在斜率為-1 和圓環的交點所選取的本徵態 (b) 和斜率-2 的直線相交的 3 黑點為 $SU(2)$ $PO(1,2)$ 所選取的本徵態，其他兩黑點則為交點附近所選取到的其他本徵態

另外，值得注意的是在圓環的大小相同時，斜率比-1 大或小時所選取到的本徵態，不會僅有 $SU(2)$ 所選取的本徵態，圖 1-5(b)不在線上的兩點即代表非 $SU(2)$ 所選取的本徵態，當摻雜這兩項疊加後， PO 軌道就會有如實驗般不對稱的情形。

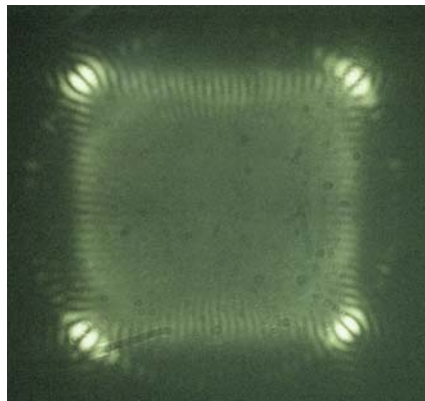


- 圖 1-6 (a) 疊加方形彈子球本徵態 $\varphi_{27,16}$ 、 $\varphi_{28,14}$ 、 $\varphi_{29,12}$ 配合相位差 $\pi/2$ ，
 $\psi(x, y; \pi/2) = \cos(0 \cdot \pi/2)\varphi_{27,16} + \cos(1 \cdot \pi/2)\varphi_{28,14} + \cos(2 \cdot \pi/2)\varphi_{29,12}$ ，所產生的圖案
 (b) $\psi(x, y; \pi/2) = \cos(0 \cdot \pi/2)\varphi_{27,16} + \cos(1 \cdot \pi/2)\varphi_{28,14} + \cos(2 \cdot \pi/2)\varphi_{29,12}$
 $-0.36 \cdot \varphi_{28,15} + 0.33 \cdot \varphi_{29,13}$
 (c) 疊加方形彈子球本徵態 $\varphi_{10,40}$ 、 $\varphi_{13,39}$ 、 $\varphi_{16,38}$ 配合相位差 $\pi/2$ ，
 $\psi(x, y; \pi/2) = \cos(0 \cdot \pi/2)\varphi_{10,40} + \cos(1 \cdot \pi/2)\varphi_{13,39} + \cos(2 \cdot \pi/2)\varphi_{16,38}$ ，所產生的圖案
 (d) $\psi(x, y; \pi/2) = \cos(0 \cdot \pi/2)\varphi_{10,40} + \cos(1 \cdot \pi/2)\varphi_{13,39} + \cos(2 \cdot \pi/2)\varphi_{16,38}$
 $+0.53 \times \varphi_{12,39} + 0.38 \times \varphi_{14,39} - 0.4 \times \varphi_{15,38}$

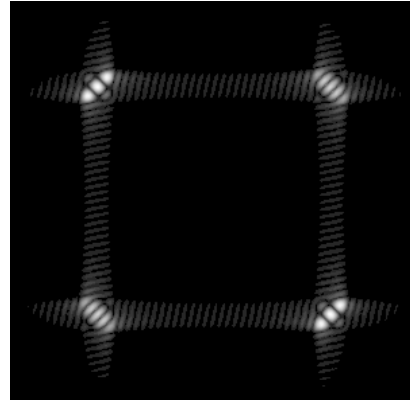
圖 1-6(a)是選取 SU(2)所選取的本徵態，配上 $\pi/2$ 的相位後所計算出的波函數；而 1-6(b)是再額外加上非 SU(2)所選取的本徵態，由圖可明顯看出和實驗一樣 PO(1,2)的對稱性，已經被破壞掉。而在 PO(3,1)時，是圓環和斜率為-1/3 線交會處的本徵態，如圖 1-14，由圖也可以看出其有更多非 SU(2)所選取的本徵態，也因此，其在空間的不確定範圍愈大，且愈不對稱。當 PO 為(1,1)時，斜率-1 的線和圓環的交點是在圓環角度為 45 度附近，當直線和圓環相交的角度離 45 度愈遠時，非 SU(2)所選取的本徵態會愈來愈多，此外，SU(2)所能選取到的本徵態亦會較少，當交點的角度距離 45 度愈遠時愈不容易形成 PO。

光學的遠場強度分佈，即是近場經過傅利葉轉換後可獲得，而在量子力學中座標空間經由傅利葉轉換後可以得到動量空間；最近 Bäcker 和 Schubert 也透過傅利葉轉換，來獲得本徵函數的遠場分佈情形，以其對彈子球有更好的瞭解，而透過 VCSEL 的遠場量測，可以輕易的就得到彈子球在動量空間的分佈情形。圖 1-7(a)是相關圖 1-4(a)的鑽石形狀波函數實驗中所得到的遠場圖案，可以明顯看出遠場的強度分佈在 45°、135°、225°、315°的地方有較強的分佈，這和近場中彈子球動量方向的四個方向是一致的；圖 1-7(b)是經由理論圖 1-2(c)中的鑽石形波函數所計算出的遠場波函數分佈情形，實驗和理論的相符使我們確信，我們的理論模型是有效的。

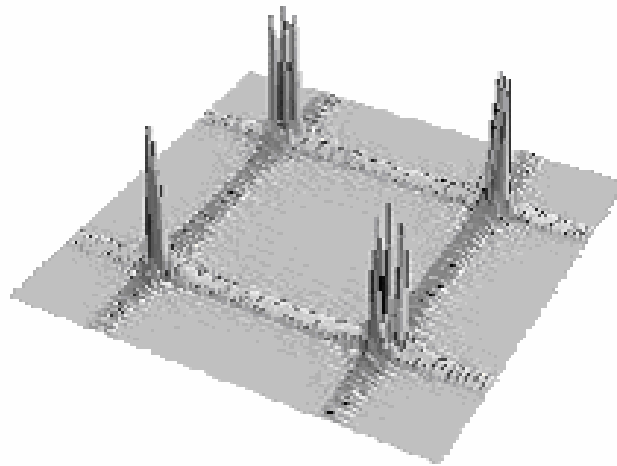
遠場的強度分佈同時也提供了近場的解析工具，當近場的波函數是由多個 PO 所組成時，由於同時多個不同的 PO 互相干涉的結果，在近場裡無法分辨，但在遠場卻可以清晰的將其解析出來。圖 1-8(a)是 VCSEL 的遠場分佈情形，清楚的可以看出在 45°、135°、225°、315°和 26°、154°、206°、334°附近有較強的分佈，其所對應的



(a)



(b)



(c)

圖 1-7 (a) 相關於圖 1-4(a)的近場條紋所得到的實驗遠場條紋 (b) 經由圖 1-2(c)座標空間的波函數所算出的向量空間波函數 (c) (b)圖的三維分佈情形

是 $PO(1,1)$ 和 $PO(1,2)$ 的遠場分佈，圖 1-8(c)是 $PO(1,1)$ 和 $PO(1,2)$ 互相干涉後的強度分佈情形，在近場的波函數完全無法給我們任何的資訊，但當將之作傅氏轉換後(圖 1-8(b))，很清楚的可以解析出其是由 $PO(1,1)$ 和 $PO(1,2)$ 所組成的圖案。

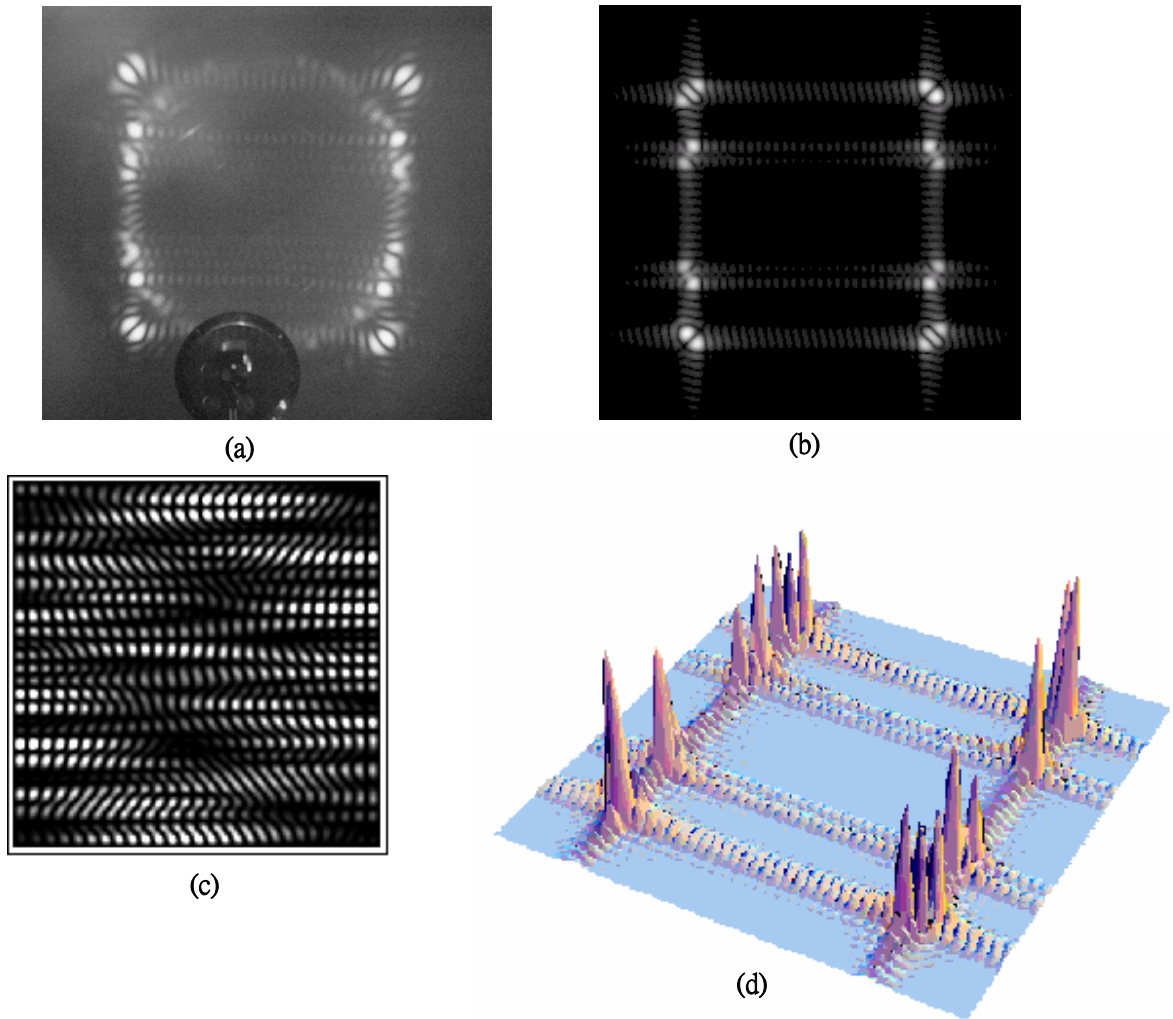


圖 1-8 (a) VCSEL 實驗的遠場分佈 (b) 經由(c)作傅氏轉換後理論計算出的遠場分佈 (c) 結合 PO(1,1)和 PO(1,2)的近場分佈情形 (d) (b)圖的三維分佈情形

第二部份

2.1 PO 和本徵態的糾纏

由於光學的遠場分佈即是量子力學中的動量空間分佈情形，因此可藉由實驗的遠場分佈，得知 K -space 上所選取的本徵態；圖 1-7(a)的遠場分佈可以清楚的告訴我們，系統所選取的本徵態會如圖 1-5(a) 中所示在圓環 45° 附近；但當圓環上有一個本徵態的能量和 45° 所選取的本徵態能量很接近時，系統就會有機會在其他角度的地

方同時選取這個本徵態，得到的圖案就會介於本徵態和和古典週期性軌道的圖案。圖 2.1 即是 VCSEL 實驗結果和理論計算的結果，本徵態和 PO 交會的地方有很特殊的干涉節點產生，將能量以 m,n 來作表示，在 45° 時的能量為 $28^2 + 29^2 = 1625$ ，而在大角度本徵態 $(10,39)$ 能量為 $10^2 + 39^2 = 1621$ ，由於能量差異很小本徵態 $\varphi_{10,39}$ 同時亦被系統所選取。

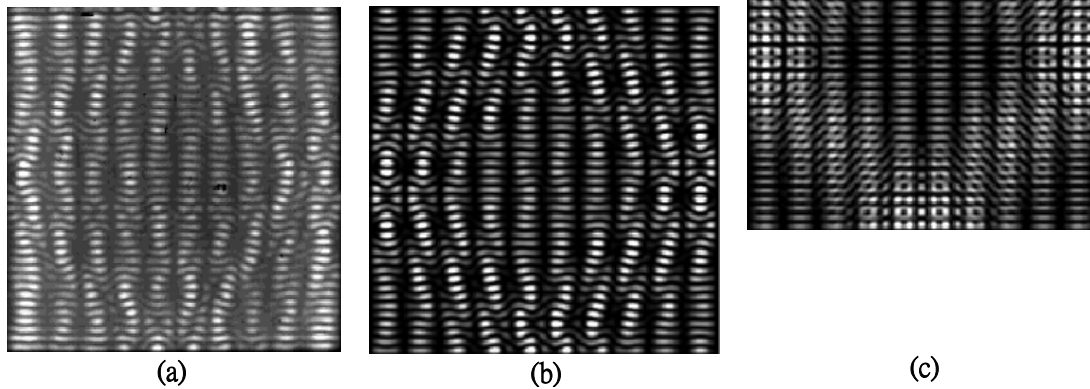


圖 2-1 (a) VCSEL 在 276K 實驗的近場量測結果 (b) PO(1,1)和本徵態 $\varphi_{10,39}$ 疊加後理論計算的結果 (c) PO(1,1)和本徵態 $\varphi_{10,39}$ 強度疊加後理論計算的結果

在這裡我們特別也將本徵態和 PO 的強度作疊加，如 圖 3-9(c)，強度相加代表著 PO 和本徵態彼此間相互獨立，並沒有同時為系統所選取。

2.2 方形彈子球中的多個週期性軌道(PO)

在方形的面射型雷射裝置中，近場的實驗圖案中常常可以觀察到不只一個的週期性軌道，如圖 2.2(a)即是方形面射型雷射同時選取了兩個(1,1)的週期性軌道，實驗中觀察到的現象甚至可以有多達四個(1,1)的週期性軌道。

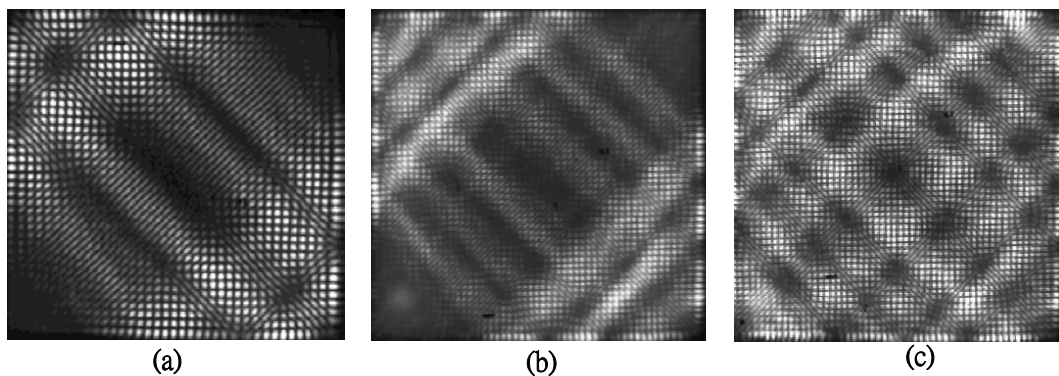


圖 2-2 (a) VCSEL 兩個 PO(1,1)實驗量測結果 (b) VCSE 三個 PO(1,1) 實驗量測結果(c) VCSE 四個 PO(1,1) 實驗量測結果

推測形成多個 PO(1,1)可能的原因有兩種，其一為使用相同的 SU(2)相關的本徵態使其每一個 PO(1,1)有不同的相位，自然使的每一個 PO(1,1)的起點不同，調控每一個 PO(1,1)的相位即可以調控每一個週期性軌道的相對位置；另一種方法則是雷射系統在選取本徵態時有機會選取到不只一個的 SU(2)相關本徵態，如圖 2-7 即是雷射系統同時選取到兩個 SU(2)相關本徵態，我們將在下面的探討分析兩種方法，討論其不同之處。

當圓環半徑選取適當時，圓環在 45°附近有機會選取到兩個斜率-1 的本徵態如圖 2-7，因此實驗會有機會出現兩個(1,1)，圖 2-3(a)即是實驗中兩個(1,1)的情形，值得注意的是實驗圖中左上方和右下方波函數分佈的不對稱情形，當選取分別選取 L1 和 L2 上的本徵態形成 PO 產生干涉後，的確也產生了這種不對稱的情形。

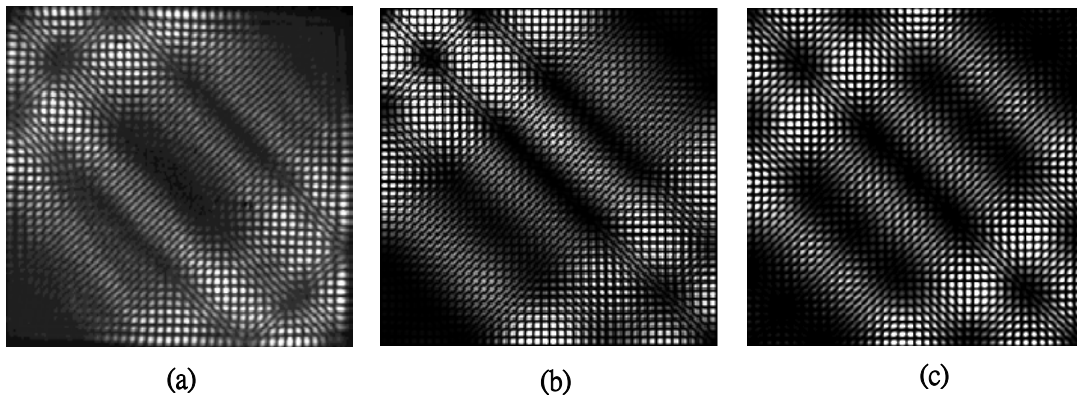


圖 2-3 (a) VCSEL 實驗的近場量測結果 (b) 由 L1 和 L2 分別形成兩個(1,1)互相干涉後的強度分佈 (c) 選取相同的 SU(2)相關本徵態理論計算結果

圖 2-4(b)和(c)的最大不同之在於，利用相同的 SU(2)相關本徵態所計算出來的結果，於空間上並不會有分佈不對稱的情形，僅有當雷射在 r 方向如圖圖 2-5 選取到兩組 SU(2)相關本徵態，疊加後才會在空間上有如實驗強度分佈不對稱的情形，因此在兩個 PO(1,1)分佈不對稱的情形下，我們可以確信其形成的原因為雷射系統在 r 方向也選取了另一組的 SU(2)相關本徵態。將這些想法同樣的放到四個 PO(1,1)的模擬，一樣的，相同的

SU(2)相關本徵態配上四種不同的相位有著很好的對稱性；而在 r 方向選取四個 SU(2)相關本徵態，由於 PO(1,1)數目變多，每一個 PO(1,1)必須相對的要選取更多的 SU(2)相關本徵態，才能在有限的空間可鑑別，而因為選取的本徵態變多在空間的不對稱會不若在兩個 PO(1,1)般，由於選取的本徵態少造成空間上有顯著的不對稱性，觀察圖 2-4(b)，PO 的軌跡僅有小部分的扭曲。

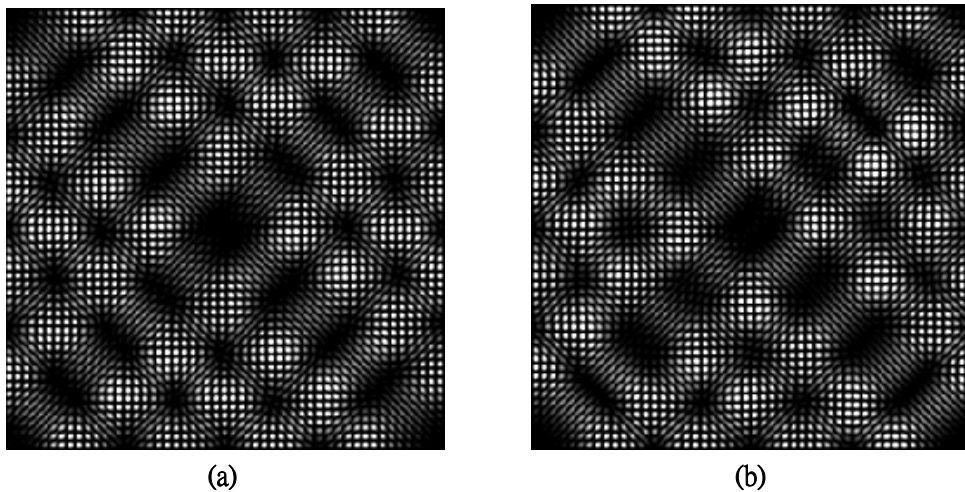


圖 2-4(a) 選取相同的 SU(2)相關本徵態分別配上四個不同相位理論計算結果(b)在 r 方向選取四個(1,1)互相干涉後的強度分佈

多個 PO(1,1)的原因除了我們前面所探討的兩個因素外，在這裡我們另外作了一個很有趣的探討；由於面射型雷射裡載子濃度的不平均，造成方形彈子球台底部的不平坦，在第四章我們將會有更詳盡的探討，在這裡我們假設底部的高度分佈像一小山丘，靠近邊界的地方是較低的地方，將計算出來的本徵態利用 SU(2)選取疊加後，得到了如圖 2-5 的圖案，讓多個 PO(1,1)同時形成的原因又多了一樣，也就是彈子球平台底部的不平坦。

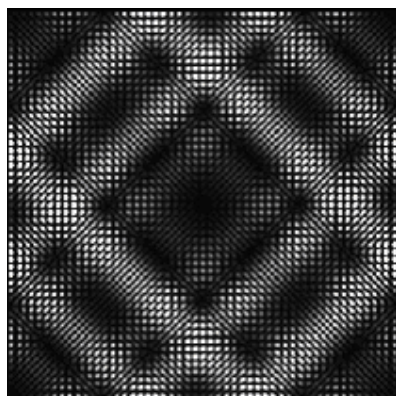


圖 2-5 考慮彈子球平台底部為一類似小山丘的底部經由 SU(2)疊加後所得到的結果

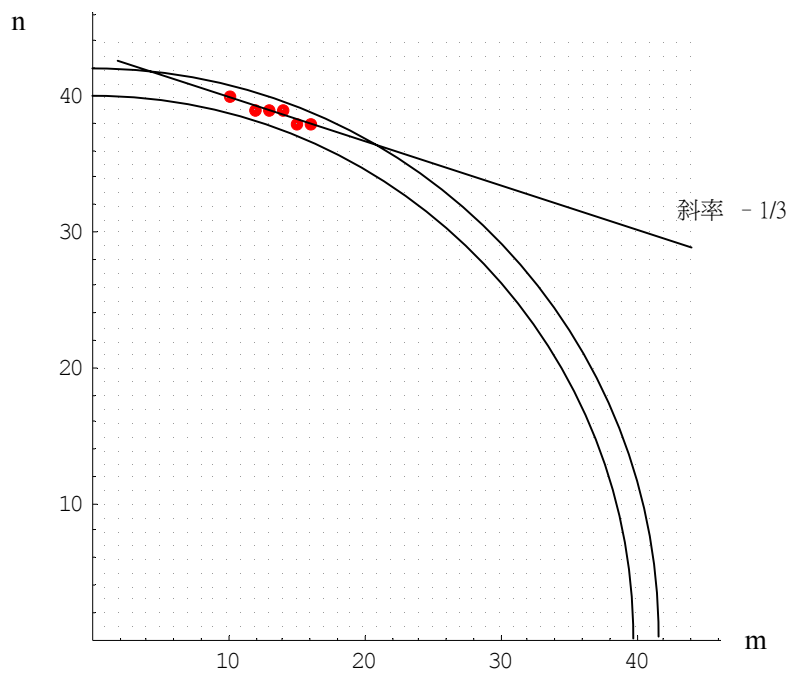


圖 3-13 PO(3,1)所選取的本徵態

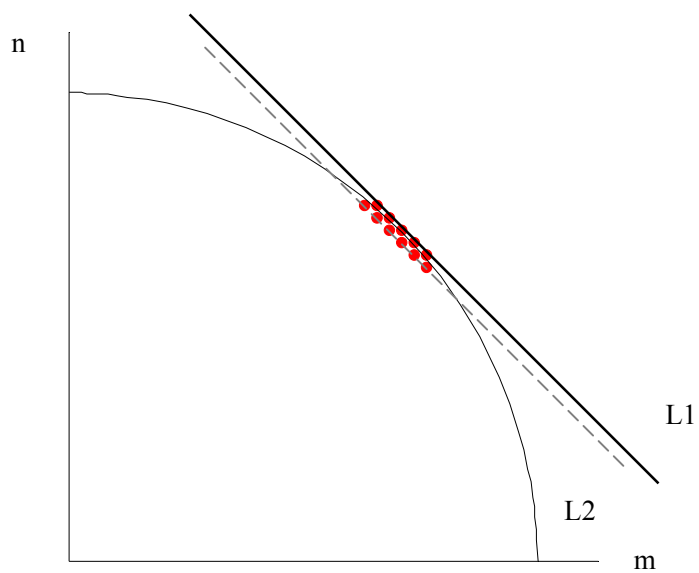


圖 2-7 兩個 PO(1,1)所選取的本徵態

ICONO/LAT 2005 會議報告

黃凱風

國立交通大學電子物理系

會議時間:2005/5/11~5/15

International Conf. on Coherent and Nonlinear Optics(ICONO 2005), International Conf. on Lasers, Application, and Technologies (LAT 2005)

會議於2005年5月11日至15日於俄國聖彼德堡舉行，本人在ICONO中發表論文一篇” “Polarization properties and length scales of patterns in vertical-cavity surface-emitting lasers”此論文係在周五報告，被安排在 Nonlinear space - Time Dynamics之第二篇論文，此論文係與德國T. Ackemann教授與白俄羅斯N. Loiko教授合作發表。以下就針對參與會議與過程中所見所聞提出心得報告。

本會是在俄國舉行之非線性光學及雷射應用會議，性質恰與在美國舉行之 IQEC 與 CLEO 合併舉辦極為相似，但在俄國舉行則又具有特殊意義。俄國在非線性光學及固態雷射領域不論是基礎物理光學研究或雷射物理及雷射應用均有良好基礎。其各項研究均早已居世界頂尖之地位，在俄國開會更是吸引了俄國，白俄及烏克蘭等附近最優秀之人才與會，深感獲益良多，特別是直接與這些原蘇聯之最優秀研究人員直接面談討論研究領域相關之議題，深覺是獲得第一手之重要資料，不但對自己研究羣有極大之幫助，相信亦可對國內其他相關研究介紹引入合作夥伴。這些前蘇聯體制下之頂尖研究人才目前均不易至美國開會，故僅能在俄國之會議較有可能直接碰面，更突顯出此次會議之價值。

ICONO 及 LAT 會之 Plenary Lectures 分別是加拿大 NRC 的 Corkum 報告目前最熱門的” Attosecond Science and Technology” ‘，及俄國 General Physics Institute 的 E. M. Dianov 報告最新 Raman Fiber Lasers. 前者是非線性光學及超快原子分子光學領域中最熱門之題目，最近使用超強超快之 Laser pulses 可使原子分子中之電子產生穿墜游離，形成電子之波包來回振盪，並於回撞原子核，形成 attosecond 之電子及光的超快脈衝，此種技術已可達到將電子於分子結構中之軌道拍出極為清晰之影像，並可將其動態行為做解析。最近最熱門之話題即是

N_2 分子之電子軌道影像被拍攝成功，並在 Science 及 Nature 發表，成為近年來最受到重視之成果。本系與日本東京大學物理系之小林合作，並擬聘請小林加入本系研究團隊，相信未來在此領域應可立刻投入，應可獲得良好之成果。

另外一篇 Raman fiber lasers 則是應用之領域，特別是介紹 Raman fiber laser 之進展，俄國在此領域一向是最先進之研究國，Dianov 提出的是以 GeO_2 為主的 fiber Raman laser，將波長由近紅外延伸至 $1.1-2.2 \mu m$ 之範圍，Raman laser 可將雷射波長拓展至各種不同之波長是已知之事實，但俄國人目前已可將 fiber Raman laser 延伸至 $2.2 \mu m$ 頗為難能可貴，本系亦有相關之研究，未來也可與他們合作。

在固態雷射方面，有幾篇重要論文值得一提 Belarus, 之 U. E. Kisel 等報告了 $Yb^{3+}:YVO_4$ 晶體中利用飽和吸收體達到 120fs 之被動鎖模雷射，其功率可達 300mw。白俄在 $Yb^{3+}:YVO_4$ 等相關晶體之成長極為先進，此晶體即是由 Belarus 之 Solix Ltd 公司所提供，此論文中之飽和吸收體則是由瑞士 Federal Inst. of Tech 之 U. Keller 所提供。我們在 SASAM 方面最近有不少之成果發表，而 Kisel 說他們僅有一片 SASAM 故有意願與我們合作，但我們亦希望能拿到品質有保證之 $Yb^{3+}:YVO_4$ 晶體，做相同之研究。Belarus 另外亦有 Er:Yb:YAG 晶體產生 $1.65 \mu m$ Q-switch Laser 之，這也是我們擬發展之雷射，他們目前是使用 FITR Type 之 Q-switch Laser，而非用 SASAM，我們亦談到 $1.65 \mu m$ 之 SASAM 合作可能，另外則有一片論文是將 PbS 量子點之作為飽和吸收體，該論文指出 PbS 材料之飽和吸收體可 Cover 1, 1.3, 1.5, 2.11. μm 之波長，但其非飽和吸收似乎較大，白俄另一篇在週四之論文即為利用 $HO^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ 晶體並使用 PbS 量子點飽和吸收體做成 Q-switch laser，波長 $2 \mu m$ ，脈衝能量達 5.6mJ。我們目前利用 InGaAsP 及 InGaAlAs 量子井已成功做成 $1.06 \mu m$, $1.3 \mu m$ 之飽和吸收體，未來將朝向更長之波長推進，這似乎也是這次會議看到之一重點方向。

在固態雷射中，不使用單晶做 gain medium 而改用 ceramics 材料做成高功率雷射，則是另一重點。此題材邀請到日本之 K. Ueda 作一報告，他們的目標是應用於 Laser Fusion，顯示雷射 Power 已達一可用之程度。2004 年，2005 年 Ueda 在 APL 連續發表數篇論文使用 Yb:YAG Ceramics 及 Yb:VO₄ Ceramics 達到 10W 以上之高功率輸出，因 Ceramics 材料較單

晶更容易生產，且散熱及強度均更好，未來應可超越單品材料，(目前似乎已超過)。先前已注意到 Ueda 之工作，我們未來想向 Ueda 提出合作，但目前他建議先向與他合作之日本公司採購 Ceramics，先做一些結果，再談合作。

在光學 Pattern 及 Vortex 或 Soliton 等較基礎物理方面，重要之論文均在週五及週六，D. Christodoulides 給了一個 invited talk，主題是最近頗為熱門的 Discrete Solitons in Wave guide arrays 及 optical lattices，他們在最近兩年大約有 10 篇以上之 PRL paper 在相關題目發表，包括 gap soliton，Bragg soliton 等，大都是在週期性光場之作用產生 soliton，這些非線性光電現象應是未來數年之重點，法國之 Tredecce 原受邀給一個有關 Cavity Soliton 之 invited talk，但到演講時間，竟然講者沒出現，讓聽眾留下一不好之印象，Cavity Soliton 使用與大面積 VCSEL 相同之結構，本來是參加此項會議最想聽的論文之一，但講者居然不來，頗為失望。另外烏克蘭物理所之 M. Soskin 給了一個有關 Polarization Pattern of Complex Singular light fields: Topology, morphology, and Transformation under small perturbation，這種偏振態引發之 pattern 與前一陣子我們發現之 Polarization Pattern in 大面積 VCSEL 極為相似，該論文已在 2003 年 PRL 發表，頗受重視，和 Soskin 作了不錯之討論，他認為未來極有可能在其他 Laser 系統內看到 Polarization Patterns，最後一篇重要論文是俄國雷射物理研究所之 N. Rosanov 給了一個有關 multi-vortex laser soliton Complexs 之論文，該結果與陳永富教授在固態雷射系統中利用飽和吸收體打出之 Q-switch pattern 相關性極高，Rosanov 特別強調必須有飽和吸收體才可能出現此種 Complexs，與他討論後，他建議我們應在 VCSEL 嘗試去找他所推算出的 Multi-vortex soliton。

本次會議參加完後，感覺收獲良多與多位可能合作之研究人員均直接溝通，回來後已與他們聯絡，故應可加速與俄國或白俄之合作關係，同時亦多認識了許多新的研究領域，可在未來之研究中，積極投入。