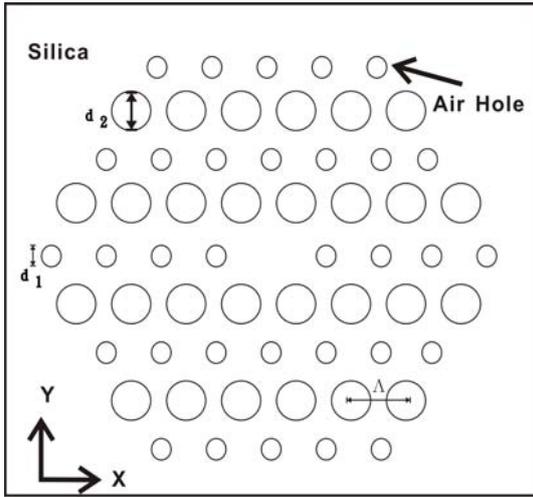


第四章 雙折射光子晶體光纖模擬結果與分析

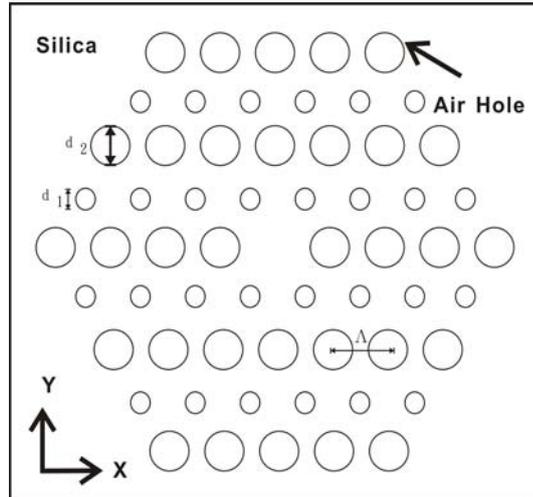
4.1 雙折射光子晶體光纖設計

有別於傳統光纖，光子晶體光纖由於纖芯(core)與纖衣區(cladding)具有較高的折射率差，並可靈活設計對稱與非對稱結構，故可設計成高雙折射率的光纖。利用光子晶體光纖中的非對稱結構可創造高雙折射差特性，其原因是由於光纖纖覆(fiber cladding)兩個正交方向不同的等效折射率差所造成，而創造這種高雙折射光子晶體光纖的目的是為了要減少基模(fundamental mode)正交態的耦合(coupling)，因而光在此光纖中傳播，場型易於維持。

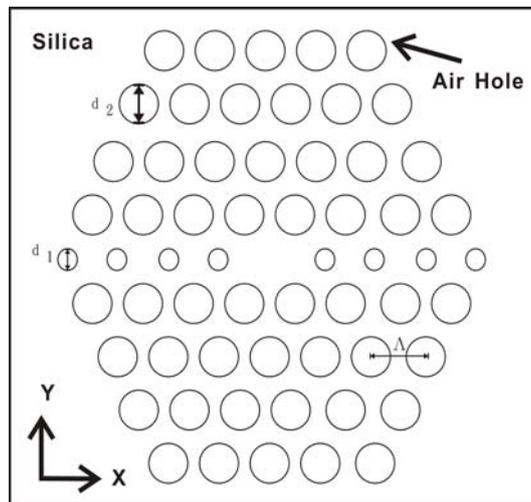
本章中，我們利用有限元素法[34-36]對複合式纖覆光子晶體光纖的雙折射及損失特性作模擬分析及討論。數值模型採用具有二重對稱性的兩種尺寸的圓形空氣孔，如此一來原先發生簡併的兩個正交模態不再簡併，因而呈現高雙折射率。本章所提出的光子晶體光纖，是二氧化矽的實心纖芯與兩種尺寸大小的三角晶格空氣孔纖衣結構。在本章中，我們提出兩種光子晶體光纖結構。第一種結構是移除光纖中央的一個小尺寸空氣孔，作為光纖的纖芯，稱為Type 1 PCF；第二種結構是移除光纖中央的一個大尺寸空氣孔，作為光纖的纖芯，稱為Type 2 PCF。如圖4-1及4-2所示，光纖的纖芯皆是由移除光纖中央的一個空氣孔所構成。圖4-3為Russell等人在Optics Letter期刊上所發表有關高雙折射的設計模型[12]，其中，小圓孔半徑為 d_1 ，大圓孔半徑為 d_2 ，空氣孔與空氣孔間的距離為 Λ ，利用改變光子晶體光纖一個方向的空氣孔大小（即在光子晶體結構中創造線缺陷，在纖衣中加入點缺陷），分析結果雙折射可達 3.7×10^{-3} ，較傳統光纖(10^{-4})多出一個數量級。但此篇文章所提出的結構，其雙折射是由單一方向的線缺陷所貢獻。因此，所產生的雙折射相對較小，我們將Russell等人在Optics Letter上所提出的結構稱為Previous PCF，方便將我們的Type 1與Type 2 PCF與其作比較。



【圖4-1 Type 1 PCF。】



【圖4-2 Type 2 PCF。】



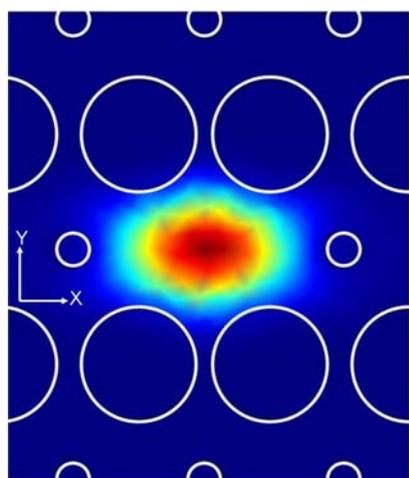
【圖 4-3 Previous PCF。】

我們所提出的光子晶體光纖結構中，每一晶格點(lattice Point)，皆是由二元複合式的單胞(binary unit cell)所構成，每一個晶格點皆包含兩種不同大小尺寸的空氣孔，其中，小圓孔半徑為 d_1 ，大圓孔半徑為 d_2 ，空氣孔與空氣孔間的距離為 $\Lambda=1.96 \mu\text{m}$ 。雙折射計算上，我們定義雙折射 $B = |n_{eff}^x - n_{eff}^y|$ 。此外，我們更進一步藉由定義 $\eta = d_1 / d_2$ 改變大小空氣孔的直徑比，以調整光纖結構的非對稱性。在模擬計算的過程中，光纖背景折射率設為 $n=1.45$ ，空氣孔的折射率 $n=1$ 。

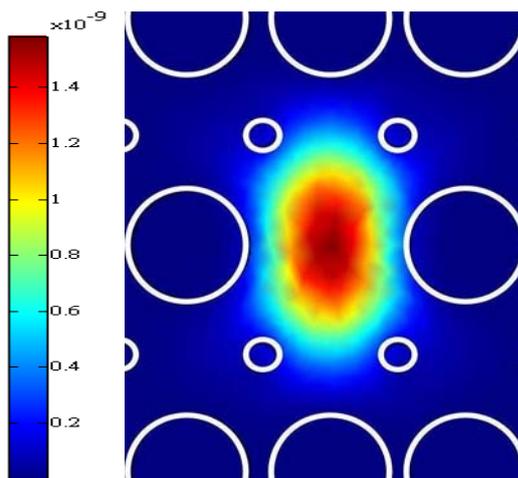
4.2 雙折射光子晶體光纖場形探討

利用光子晶體光纖中結構的非對稱性，以創造高雙折射差，目的是為了要減少基模正交態的耦合，以使在光纖中傳播的光，場型易於維持。所提出的兩種光子晶體光纖結構，其纖芯對整個光纖結構而言皆是一個點缺陷，光可藉由全反射原理在裡面傳播，且可有效的將光侷限於纖芯之中。其結構的強烈非對稱性是由整個複合式光纖纖衣所貢獻，相較於先前Russell等人在Optics Letter[12]上所提出的結構，可預期我們所提出的結構將有較佳的雙折射效果。

利用有限元素法(FEM)針對所提出的高雙折射差圓形空氣孔光子晶體光纖，如圖4-1及4-2進行模擬，模擬參數選定激發源波長為現今常用的通信波長 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ ，光纖的等效平均面積 $A=0.3\Lambda^2$ 及 $\eta=3$ 。模擬結果之光纖模場型變化如圖4-4所示，為我們所提出的Type 1 PCF。我們可以清楚看到x方向的模場寬度大於y方向的模場寬度，這是由於y方向空氣孔的空氣填充比大於x方向，因此y方向對模場有較佳的侷限性。由模擬結果可知， $n_{eff}^x=1.406442$ 與 $n_{eff}^y=1.402234$ ，產生的雙折射 $B=4.2\times 10^{-3}$ ，此結果遠高於文獻[12]與[23]所呈現的雙折射率差。另外由圖4-1之數值模型可看出，由於周圍的空氣孔導致纖衣(fiber cladding)平均折射率降低，因此光的模場集中在較高折射率分佈的纖芯(fiber core)的部份。此外，我們更進一步對Type 2 PCF的模場進行模擬，由模擬結果圖4-5可知，y方向的模場寬度大於x方向的模場寬度，這是由於纖芯周圍x方向空氣孔的空氣填充比大於y方向，因此x方向對模場有較佳的侷限性所致，產生的雙折射 $B=1.2\times 10^{-3}$ ，此結果低於文獻[12]與[23]所呈現的雙折射率差，我們將此結果留在之後作討論。



【圖 4-4 Type 1 PCF 場形】

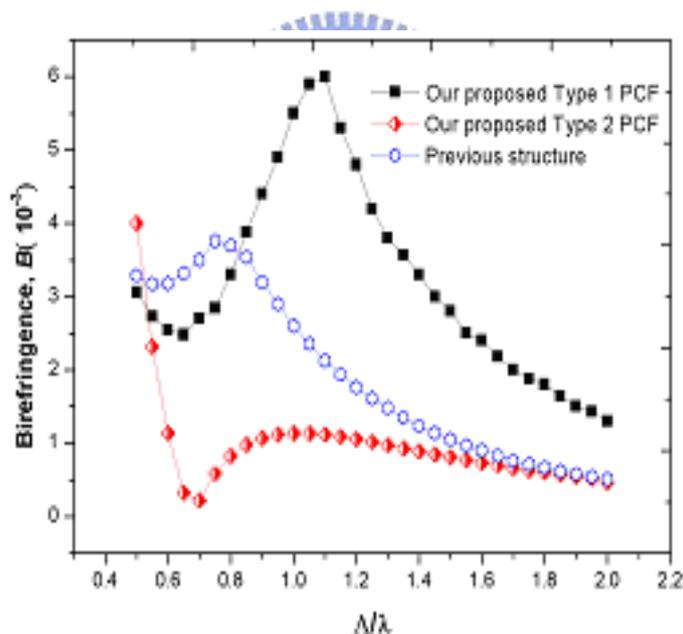


【圖 4-5 Type 2 PCF 場形】

4.3 光纖雙折射與工作波長相依關係探討

為了了解不同的正規化頻率(normalized frequency, Λ/λ)對光子晶體光纖雙折射差的影響，我們已針對所提出的Type 1 PCF和Type 2 PCF結構與先前Russell等人在Optics Letter[12]上所提出的結構作比較。模擬參數選定激發源波長為現今通信波長 $1.55\mu\text{m}$ ，Type 1 PCF和Type 2 PCF的有效平均面積 $A=0.3\Lambda^2$ 及 $\eta=4$ ，而Russell等人的結構參數為有效平均面積 $A=0.3\Lambda^2$ 及 $\eta=3$ 。由圖4-6可以很清楚看到，雙折射會隨工作波長的改變而改變，我們所提出的Type 1 PCF之曲線平均都高於先前的結構，且當其正規化頻率(Λ/λ)比值大於0.9時，Type 1 PCF的雙折射效果更明顯優於先前的結構，如當其正規化頻率(Λ/λ)比值1.25處時(對應其波長是 $1.55\mu\text{m}$)，Type 1 PCF的雙折射為 4.2×10^{-3} ，而先前結構的雙折射則為 1.61×10^{-3} 。又如Type 1 PCF之雙折射，在正規化頻率(Λ/λ)比值為1.1時，雙折射可達高 6×10^{-3} ，但先前結構的雙折射僅有 3.7×10^{-3} 。其理由可能是由於在我們所提出的結構中，雙折射效應是由整個複合式光纖纖衣的強烈非對稱性所貢獻，且光場又可有效地被由點缺陷所構成的光纖纖芯所侷限，因此光場所感受到最強烈的結構非對稱性，是發生於光纖纖芯與纖衣的交界面。因此可預期，光場

在光纖纖芯與纖衣的交界面所感受到的雙折射應是最大的。當工作波長較短時，光場可被有效的侷限於纖芯之內，這時結構的非對稱性較小，主要是由光纖纖芯所貢獻，其所產生的雙折射效應也就較小。當工作波長較長時，光場則會穿透至光纖纖衣之中，這時結構的非對稱性大多由光纖纖衣所貢獻，當工作波長逐漸增加時，穿透至光纖纖衣之中的光場面積也隨之增加，因而造成雙折射的降低。歸納以上所述，我們可以說，長波長光場的雙折射是由纖衣的非對稱性所貢獻，而短波長光場的雙折射是由纖芯的非對稱性所造成。此外，我們所提出的Type 2 PCF其雙折射低於Type 1 PCF及先前的結構，主要原因是由於其x、y方向的空氣填充比較接近，因此，x、y方向的折射率差值較小，產生的雙折射效果較不明顯。雖然Type 2 PCF其雙折射效應較小，但仍有其應用價值，我們將在後續作更深入的討論。

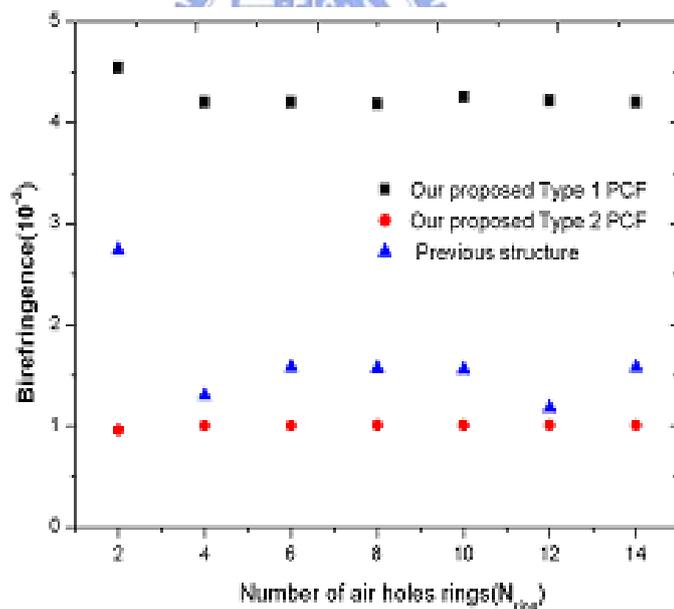


【圖 4-6 雙折射與工作波長相依關係】

4.4 光纖雙折射穩定性與纖衣空氣孔數相依關係探討

欲了解我們所提出的結構之穩定性，嘗試改變光子晶體光纖纖衣空氣孔的圈數，觀察雙折射差的變動量。模擬參數選定激發源波長為現今通信波長 $1.55 \mu\text{m}$

，Type 1 PCF 和 Type 2 PCF 的結構參數為 $\eta=4$ ，而 Russell 等人的結構參數為 $\eta=3$ 。圖 4-7 中，統計的圈數從 2 變動到 14 圈，與先前的結構做比較，由此圖可以看出我們所提出的結構之雙折射差在不同的圈數下其變動量維持在 10^{-4} 範圍內，由此可知我們所提出的結構圈數改變對雙折射差的影響較小，原因歸咎於整個纖衣兩個正交方向強烈的非對稱性，且我們所提出的兩種結構其纖芯皆由點缺陷所構成，因此可有效的將光場侷限於纖芯之中，因此非對稱結構對光場所造成的雙折射變動影響相對較穩定。相較於先前的結構其非對稱性來自於纖衣 x 方向中一排較小直徑較小的空氣孔，模場會由此方向穿透至纖衣之中，因而所產生的雙折射穩定度較差。相較於較多的空氣孔圈數可增加光纖的雙折射穩定性，較少的空氣孔圈數情況下，較高的雙折射值是由纖芯的非對稱性所貢獻。Type 2 PCF 在雙折射穩定度方面，相較於 Type 1 PCF 及先前的結構，Type 2 PCF 其 x、y 方向的空氣填充比較大，更能有效將光場侷限於纖芯之中，其穩定度相對較優。

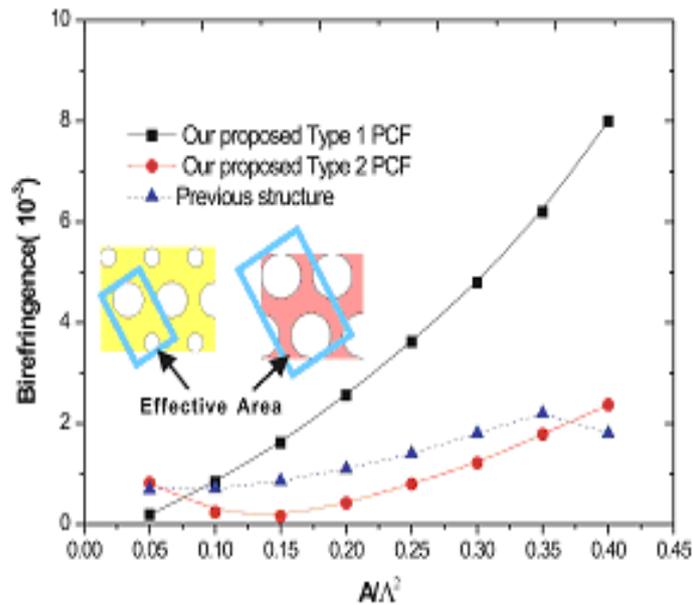


【圖 4-7 雙折射與纖覆空氣圈圈數相依關係】

4.5 光纖雙折射與纖衣空氣孔有效面積相依關係探討

我們為了進一步了解單一晶胞(unit cell)裡所占的空氣孔有效面積(effective

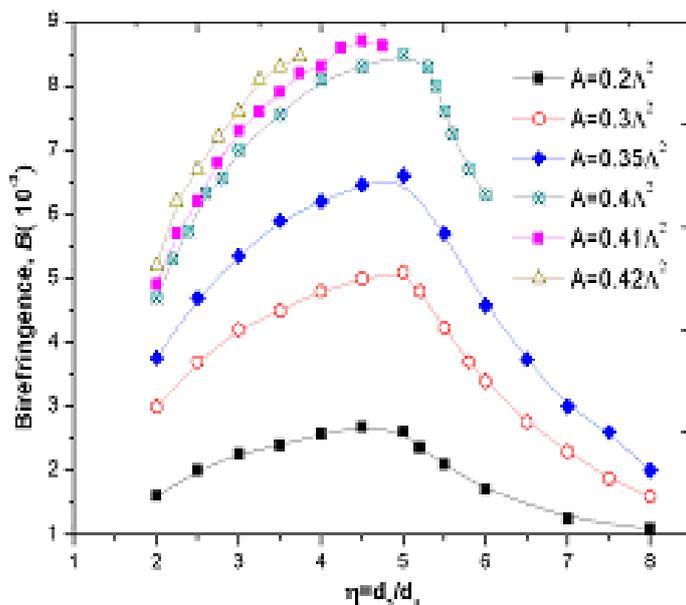
area, A)之比例關係(A/Λ^2)對雙折射的影響。圖 4-8 中模擬參數選定激發源波長為現今通信波長 $1.55\ \mu\text{m}$, Type 1 PCF 和 Type 2 PCF 的結構參數為 $\eta=4$, 而 Russell 等人的結構參數為 $\eta=3$ 。我們可以很清楚的觀察到當有效面積增加時, 我們提出 Type 1 PCF 結構雙折射增加量遠大於先前的結構, 此原因歸咎於我們所提出的結構具有強烈的非對稱性所致, 且隨著空氣孔有效面積的增加, 侷限於纖芯內的模場所感受到 x 與 y 方向空氣填充比之差隨之增加, x 與 y 方向的折射率差值也隨之提高。相較於 Type 1 PCF, 我們所提出的 Type 2 PCF 其纖芯是由移除光纖中央一個大尺寸的空氣孔所構成, x 與 y 方向空氣填充比較為接近, 因此空氣孔有效面積的改變對雙折射的影響較小。經由模擬計算結果可知, 在 $A/\Lambda^2=0.4$ 的情況下, 我們提出的結構雙折射可達 8×10^{-3} , 是先前 Russell 等人結構雙折射 2.2×10^{-3} 的 3.6 倍。



【圖 4-8 雙折射與纖覆空氣孔有效面積相依關係】

我們接著探討空氣孔有效面積(A/Λ^2)與比值 η 對雙折射的關係。在圖 4-9 中, 我們在不同的有效面積下, 改變大小空氣孔的比值 η , 對我們所提出的 Type 1 PCF 進行模擬。我們可以很清楚的看到當有效面積增加時, 雙折射數值也會明顯上升, 原因是因有效面積增加時, x 與 y 方向的折射率差值也隨之增加, 結構的非對稱性變得更強烈, 與我們在圖 4-8 中之結果一致。我們對空氣孔有效面積 $A=(0.2\sim 0.42)\Lambda^2$ 與比值 $\eta=2\sim 8$ 進行模擬。經由模擬結果可知, 在 $A=0.41\Lambda^2$ 與 $\eta=4.5$ 的結構參數條件

下，光纖雙折射可達 8.7×10^{-3} ，這也是本文所提出最高的光纖雙折射值。當有效面積與比值增加時，大尺寸空氣孔彼此間距會越來越接近，雙折射也會越來越強，在圖 4-8 與 4-9 中，在 $A=0.42 \Lambda^2$ 時，大尺寸空氣孔彼此的間距已相當接近，故只取到比值 $\eta=3.75$ 處，此時雙折射 8.5×10^{-3} ，已遠大於先前 Russell 等人所提出的結構。



【圖 4-9 雙折射與纖衣空氣孔有效面積及 η 相依關係】

4.6 光纖損失與纖衣空氣孔圈數相依關係探討

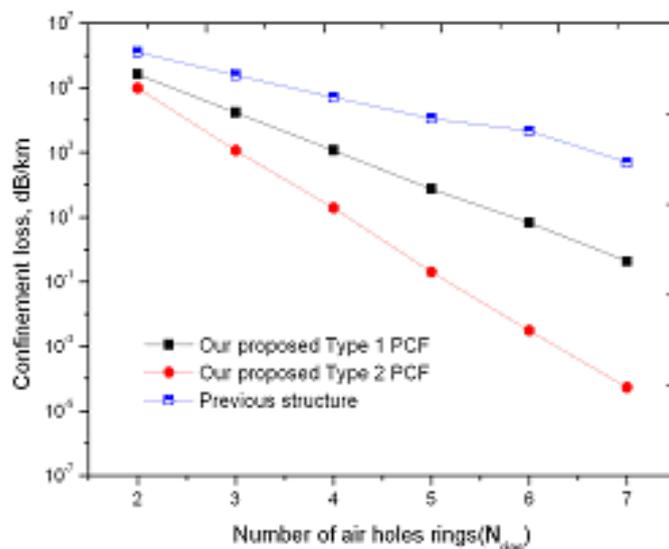
我們進一步利用有限元素法計算光纖損失，複數型的等效折射率虛部代表光纖的損失。如圖 4-10，我們將本文所提出的 Type 1 及 Type 2 PCF 結構與先前由 Russell 等人所提出的結構作比較，探討纖覆空氣孔圈數對光纖損失的影響。模擬參數選定激發源波長為現今通信波長 $1.55 \mu\text{m}$ ，有效空氣孔面積 $A=0.4 \Lambda^2$ 及比值 $\eta=4.5$ 。我們定義 confinement loss 如下式[47]：

$$Loss = \frac{10^7}{\ln(10)} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \text{Im}[n_{eff}^i] dB / m, i = (x, y) \quad (4.1)$$

由圖 4-10 可明顯觀察出，隨著空氣孔的圈數增加，光場可被更有效的侷限於光纖纖芯中，因此損失也隨之降低。將我們所提出的 Type 1 及 Type 2 PCF 結構

與先前由 Russell 等人所提出的結構作比較，可知 Russell 等人所提出的結構有最大的損失，Type 1 PCF 至少可將損失再降低一個數量級，Type 2 PCF 的損失則為最低。Type 1 及 Type 2 PCF 結構的最低損失分別為 0.42 與 5.27×10^{-5} dB/km，而 Russell 等人結構的最低損失為 488.97 dB/km，其計算條件皆在空氣孔圈數 $N=7$ 的條件下所得到。我們的結構與 Russell 等人由在纖芯的 x 方向製造一排直徑較小的空氣孔之非對稱結構相比較，Type 1 及 Type 2 PCF 光場是由點缺陷所構成的纖芯所侷限，因此可有效的將光限制於點缺陷中，隨著空氣孔圈數的增加，光場於纖芯之中的侷限是由整個纖衣的強烈非對稱性所貢獻，而 Russell 等人的結構非對稱性是由纖芯 x 方向的線缺陷所貢獻，因此會造成光場在 x 方向的穿透，因此無法有效將光侷限於纖芯之中，所產生的損失較大。我們所提出的 Type 2 PCF 與 Type 1 PCF 相比較，由於 Type 2 PCF 在 x 及 y 方向的空氣填充比較大，因此更能有效的將光場侷限於纖芯之中，其損失相對較小。綜歸以上對圖 4-10 的分析，我們由 Type 2 PCF 損失明顯低於 Type 1 PCF，即可推論除了增加空氣圈數可有效地降低光纖損失之外，空氣孔的尺寸大小也是降低光纖損失另一項關鍵因素。

高雙折射與低損失的光子晶體光纖近年已受到更廣泛的重視，也已經得到廣泛的應用[24-33]。本文所提出的二元複合式纖衣光子晶體光纖具有高雙折射、低損失與高參數可調性等多項優勢。



【圖 4-10 光纖損失與纖覆空氣孔圈數相依關係】

4.7 ComsolMultiphysics 3.2b 計算光子晶體光纖說明

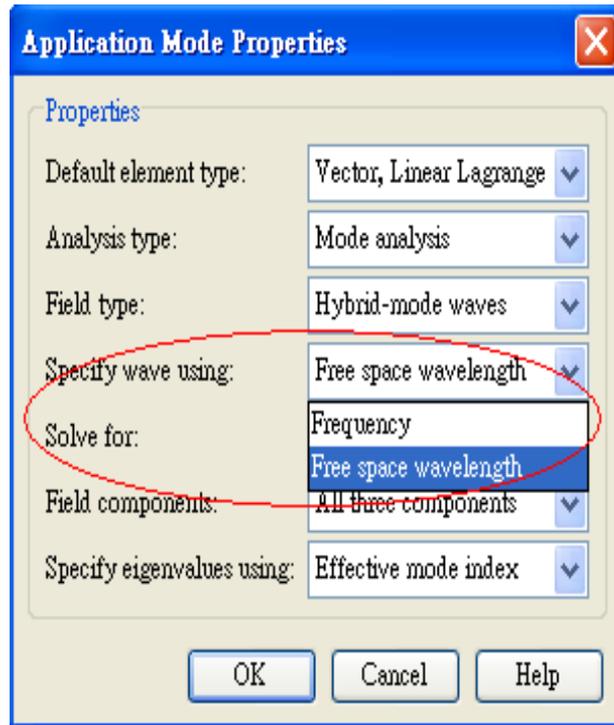
本論文係以ComsolMultiphysics 3.2b版作計算，與台灣大學物理系的蔡定平教授及清雲科技大學電子系的趙遠鳳教授共同合作，並經由他們同意使用。此軟體可建構並模擬任何單一物理現象，或是模擬任何單一物理現象的耦合，其軟體內建各類典型的物理應用模式介面，並可作無限制的多物理量耦合。軟體的優點在於容易使用、高度彈性及擴充性，強調專注於問題的解決，而非程式的撰寫。本節將舉文中所提到的光子晶光纖雙折射計算，作為軟體操作的說明，結構參數為：三角晶格常數 $\Lambda = 1.96 \mu\text{m}$ ，大小空氣孔直徑比 $\eta = 4$ ，工作波長 $\lambda = 1550 \mu\text{m}$ 。以下將對軟體操作方法作說明：

I. 建模

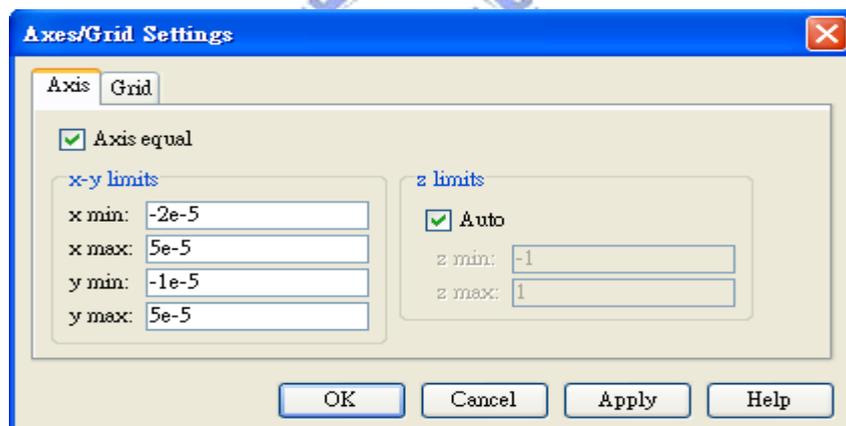
1. 開啟ComsolMultiphysics 3.2b則會出現模型瀏覽視窗，選取Electromagnetics Module→Perpendicular Waves→Hybrid- Mode Waves：



2. 點選上排標籤Physics，選擇Properties，開啟下圖對話框，照下圖選取：



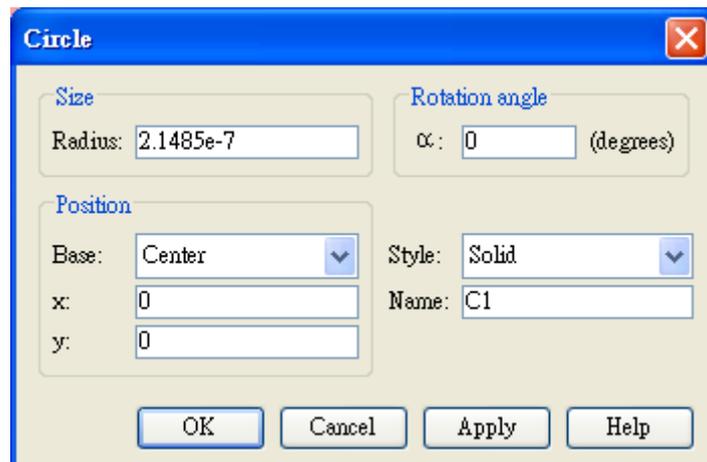
3. 開啟下拉功能表Option→Axis/Grid Settings，在Axes下作以下繪圖區域設定：



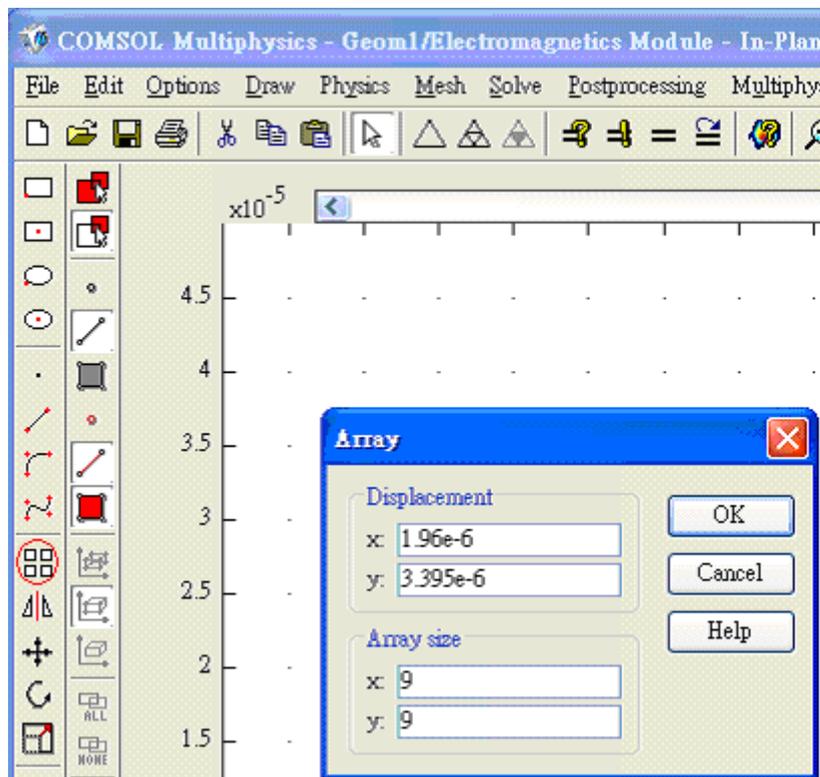
4. 點選Grid標籤，作以下格點設定：



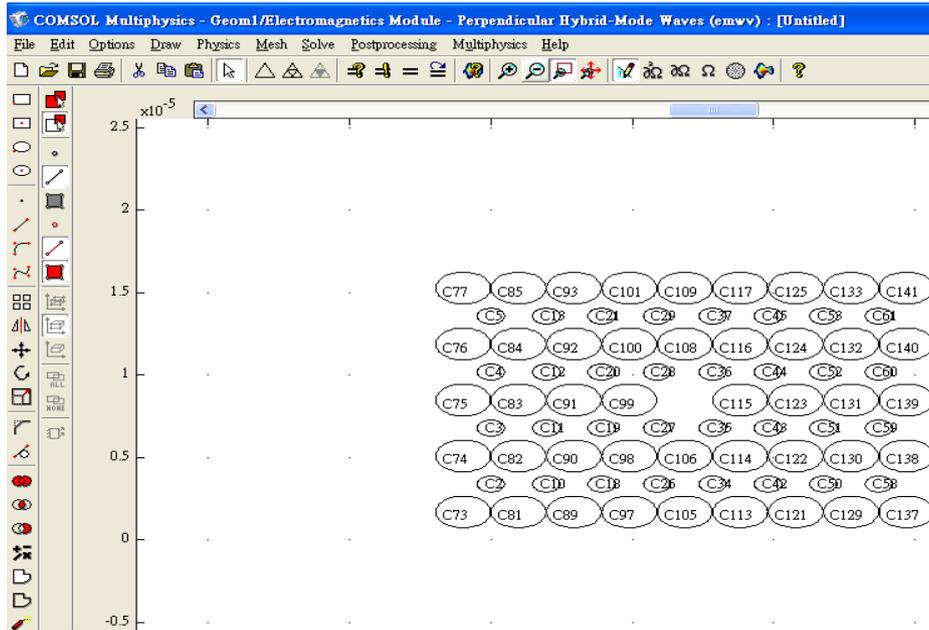
5. 開啟下拉功能表Draw→Specify Objects→Circles，先作小空氣孔的繪製：



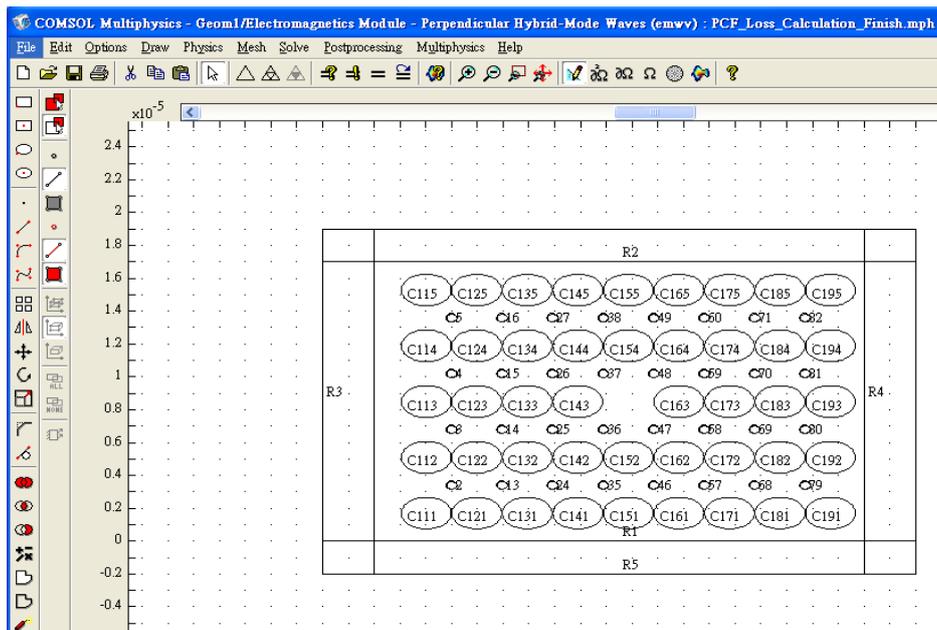
6. 點選已繪製的小空氣孔，並作以下設定，以產生多排的小型空氣孔：



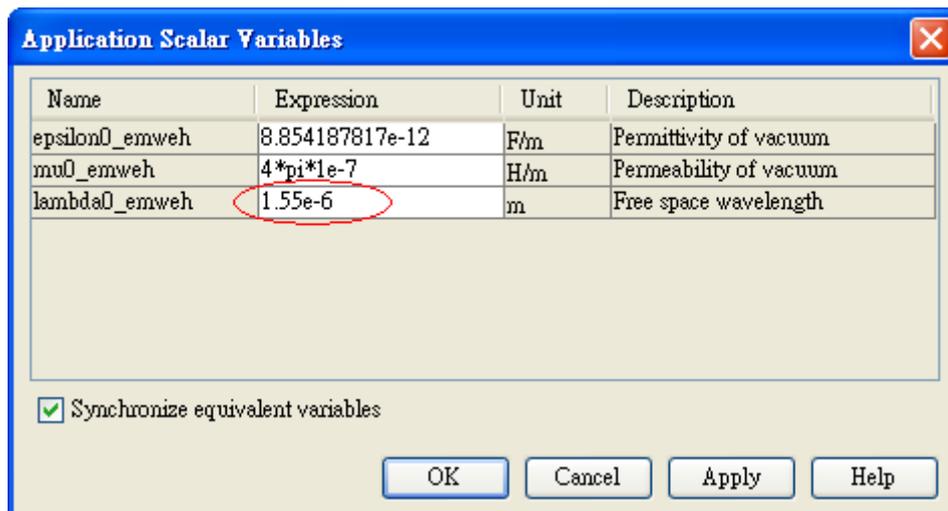
7. 重覆上述步驟，大空氣孔的直徑 $1.9338 \mu\text{m}$ ，完成大空氣孔的繪製，並移除光纖中心點的大空氣孔，完成光子晶體光纖的建模如下圖：



8. 點選左方 ，作邊界繪製，完成圖如下：

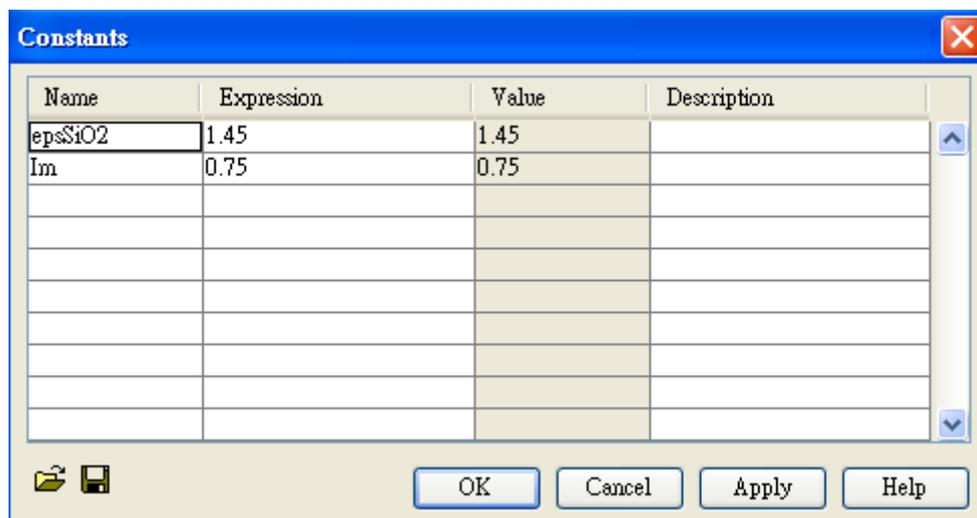


9. 開啟下拉功能表Physics→Scalar Variables，如下圖設定工作波長：

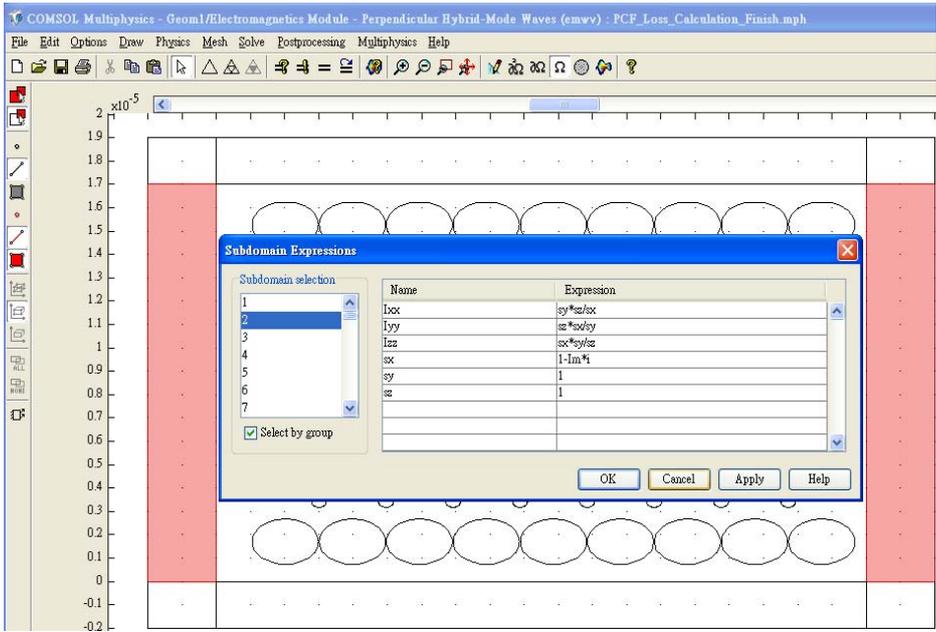
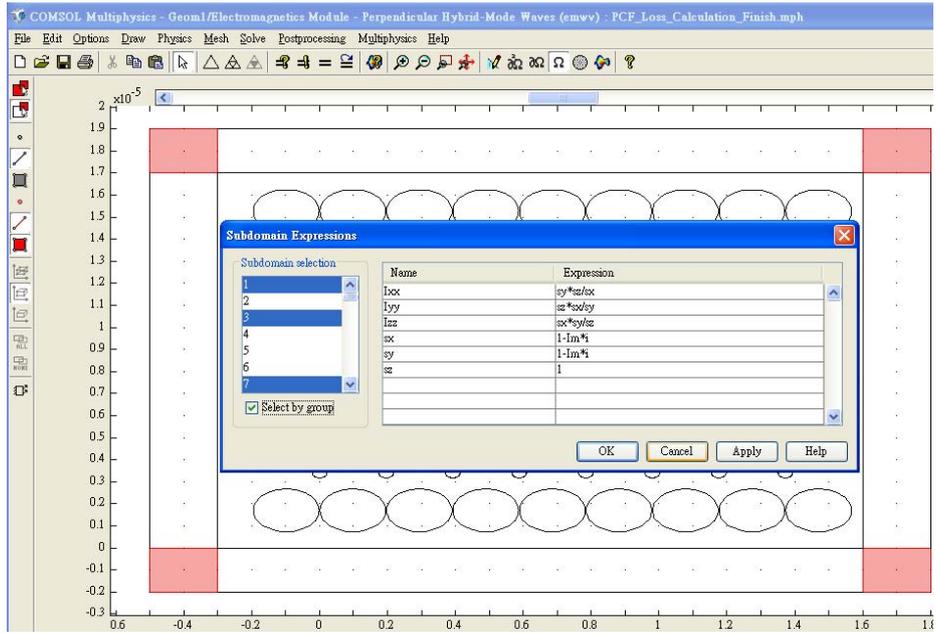


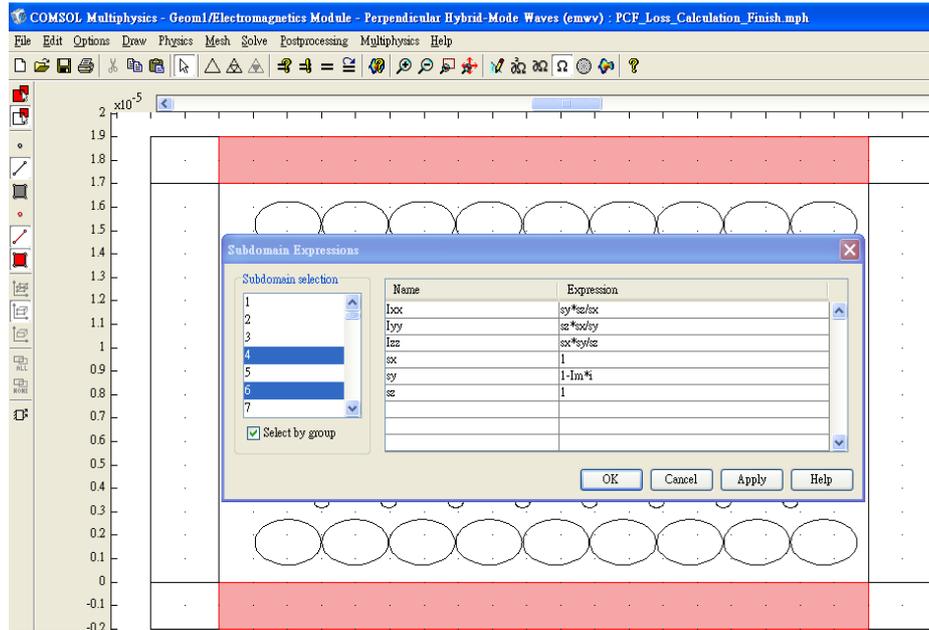
II. 設定邊界條件與背景參數：

10. 開啟下拉功能表Option→Constant，作以下設定：

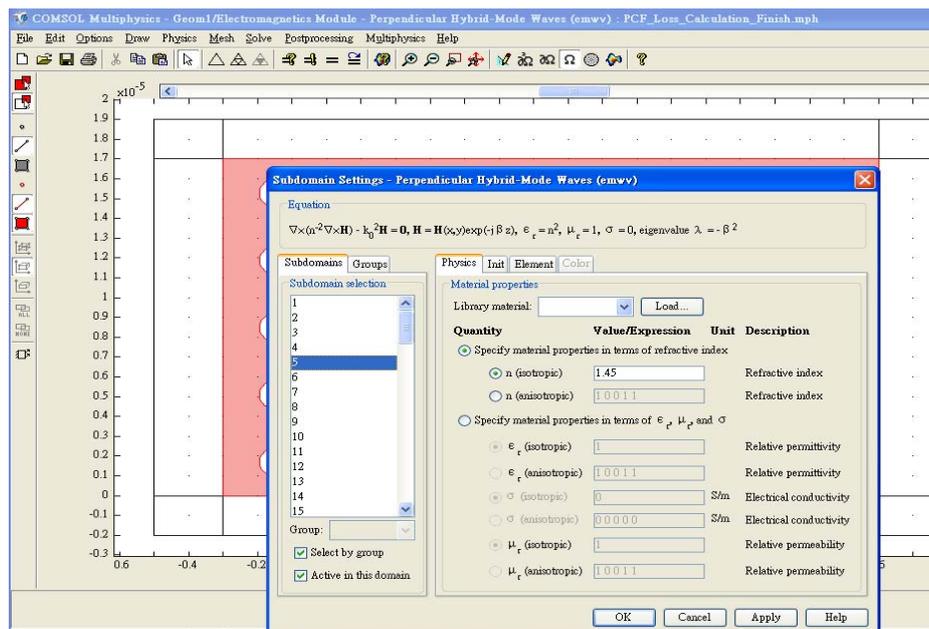


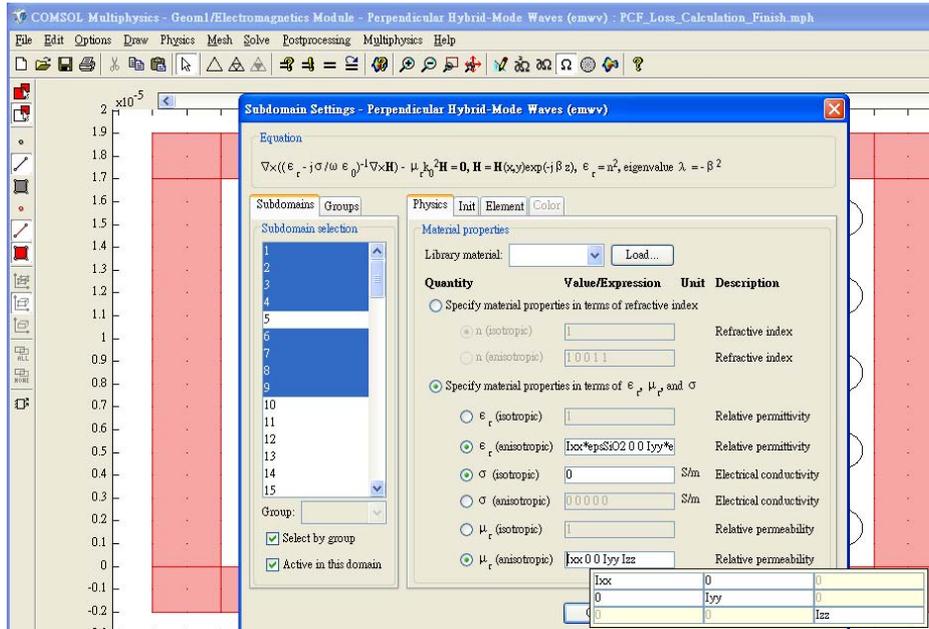
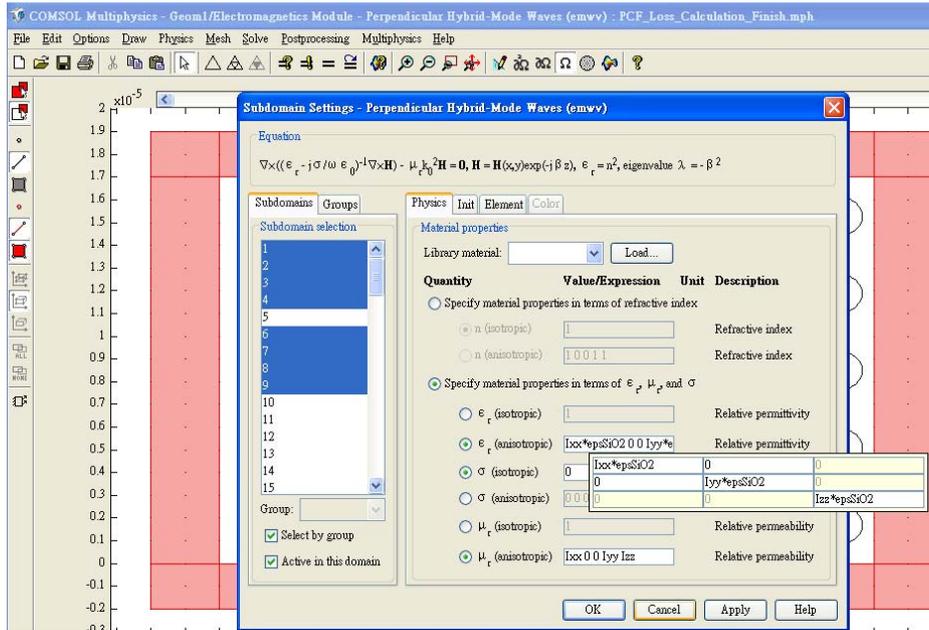
11. 開啟功能表Option→Expressions→Subdomain Expressions，作以下設定：



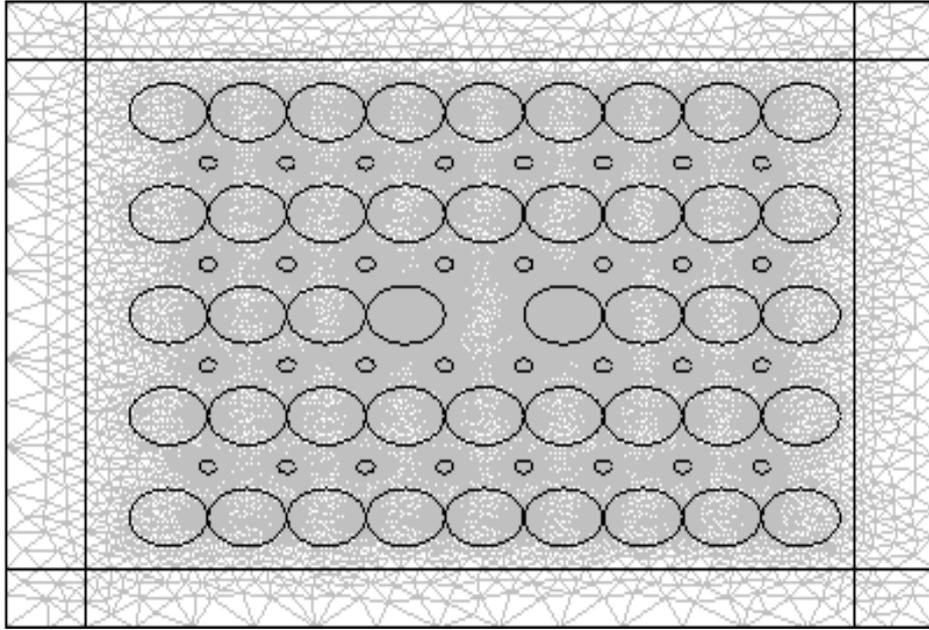


12. 開啟功能表Physics→Subdomain Setting，作以下設定：

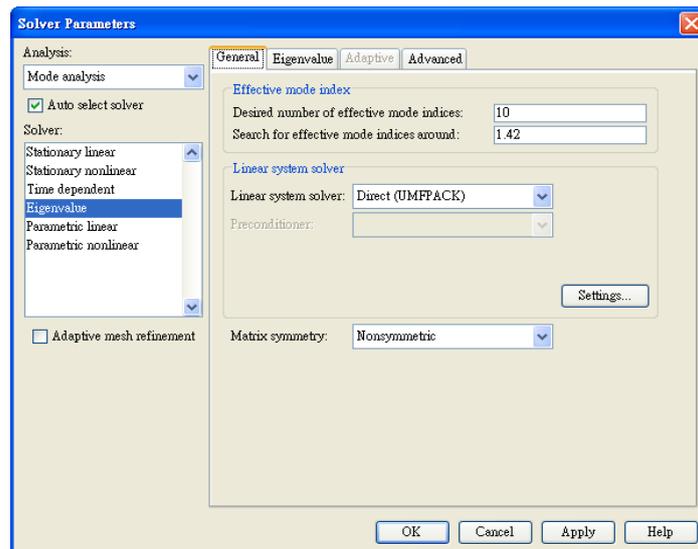




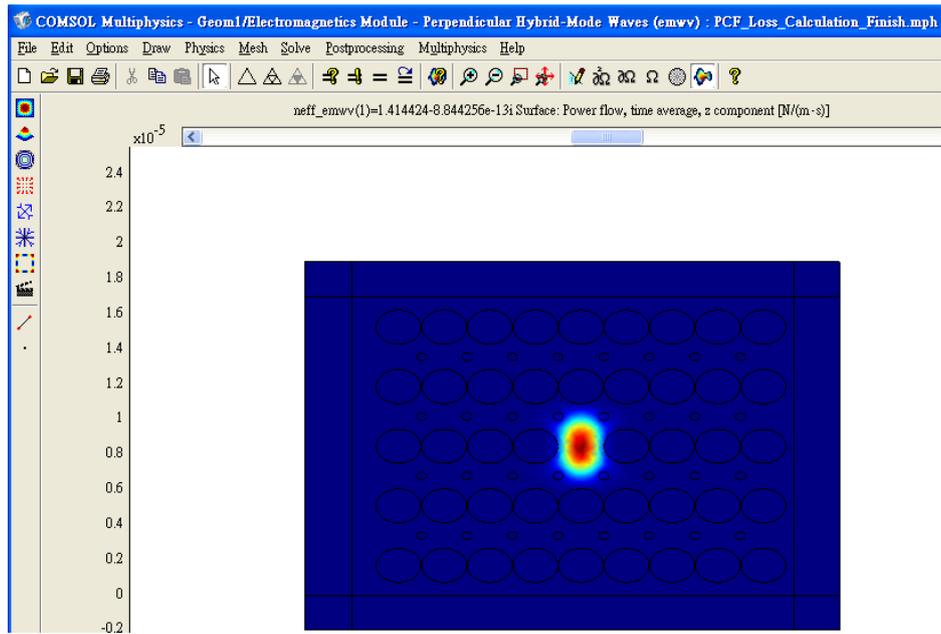
13. 選擇 ，繪出 Mesh Mode，纖芯部份已再次細分：



14. 開啟下拉功能表Solve→Solver Parameters，作以下參數設定：



15. 選取上方  標籤，執行結果如下圖：



16. 開啟下拉功能表Postprocessing→Plot Parameters，選擇你要的折射率計算，可得雙折射值與損失：

