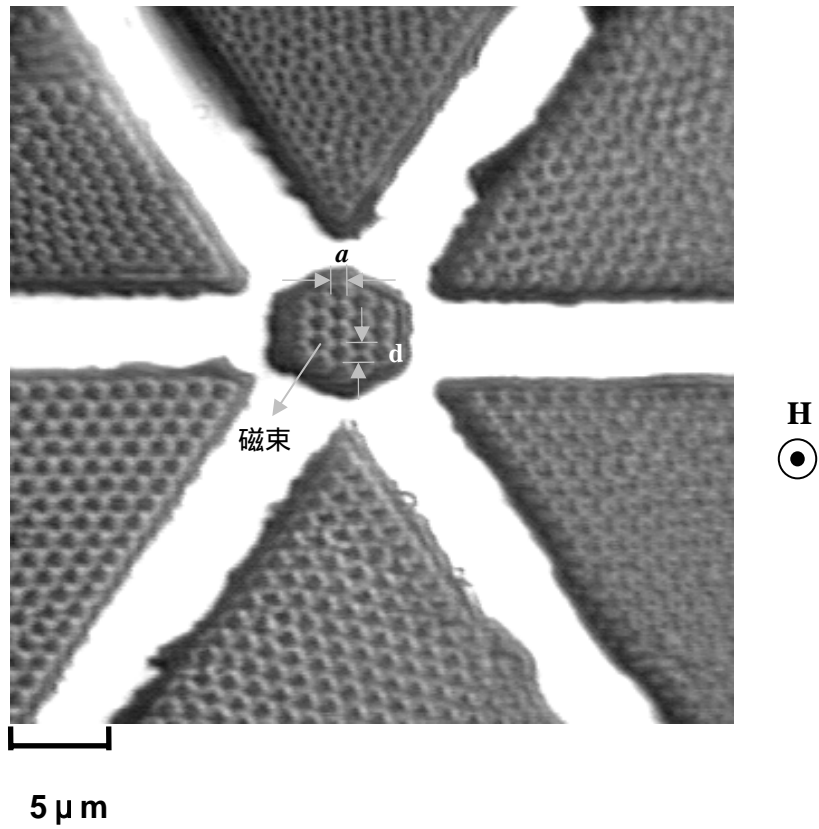


第三章 磁性流體薄膜有序結構之光子晶體特性 探討

3.1 磁性流體薄膜在外加垂直磁場下之有序結構

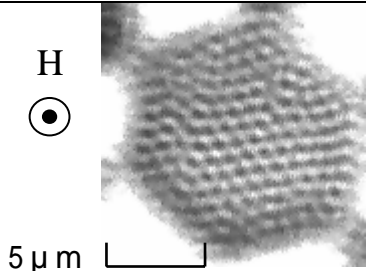
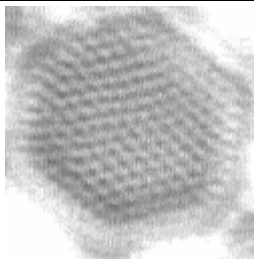
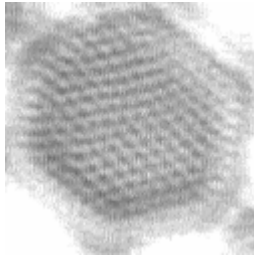
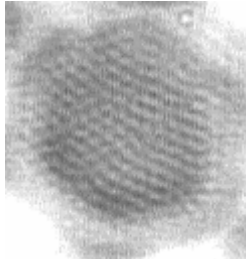
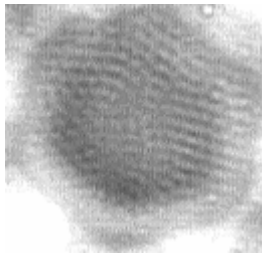
在外加垂直磁場下，磁性流體薄膜中的磁性粒子會沿著磁場方向聚集成圓柱狀磁束，排列成有序結構，如圖 3-1 所示。在增加磁場強度 H 時，所生成的磁束會愈多。由圖 3-2 表現出在不同磁場強度 H 下，六角形凹槽中磁束所排成的結構圖像。我們並同時分析各圖像中的磁束直徑 a 及磁束間距 d 。將 d 值及 a 值對磁場作圖，我們可以得到 d - H 及 a - H 曲線，如圖 3-3 (a)及 (b)。由圖 3-3(a)，我們可以對一固定的薄膜厚度而言， d 值隨著 H 增大而變小。在磁場大於 400 Oe 時，光學顯微鏡所得的影像已無法清楚判斷出 d 值的大小，所以，我們目前利用 d 與 H 的理論關係來畫出磁場強度大於 400 Oe 時的 d - H 曲線，如圖 3-3(a) 中的虛線所示。而在 a - H 曲線部分，圖 3-3(b)表示 a 值隨著磁場強度增強時，並沒有什麼改變，我們預測在磁場強度較大時， a 值一樣不改變。另外，由圖 3-3(a)及(b)的結果可知，當薄膜厚度減小時， d - H 及 a - H 曲線會偏移到較小 d 值或 a 值的區域。

至此，我們觀察到在微型六角形磁性流體薄膜中可形成有序結構，此有序結構之週期可用外加磁場強度來調變。根據圖 3-3(a)的結果顯示，磁性流體薄膜在外加垂直磁場下之週期可調控在次微米的大小範圍。而在能穩定調控微型六角形磁性流體薄膜中的可調性有序結構後，我們將進一步藉由量測穿透光譜來探討此有序結構的光子晶體特性。



凹槽深度(薄膜深度) $L = 2.0 \mu\text{m}$
 磁性流體濃度 $M_s = 13.03 \text{ emu / g}$
 磁場強度 $H = 100 \text{ Oe}$
 磁增率 $dH/dt = 10 \text{ Oe / s}$
 磁束間距 $d = 1.12 \mu\text{m}$
 磁束直徑 $a = 0.56 \mu\text{m}$

圖 3-1.磁性流體薄膜在外加垂直均勻磁場下產生的有序結構圖。

影像及其 d 與 a 值 磁場大 小(Oe)	影像	d 與 a 值
150		$d = 0.66 \mu\text{m}$ $a = 0.33 \mu\text{m}$
200		$d = 0.62 \mu\text{m}$ $a = 0.33 \mu\text{m}$
250		$d = 0.60 \mu\text{m}$ $a = 0.33 \mu\text{m}$
300		$d = 0.58 \mu\text{m}$ $a = 0.33 \mu\text{m}$
350		$d = 0.57 \mu\text{m}$ $a = 0.32 \mu\text{m}$

其中 $dH/dt = 500 \text{ Oe}$ 、 $M_s = 13.03 \text{ emu/g}$ 、 $L = 0.94 \mu\text{m}$

圖3-2. 不同磁場下，磁性流體薄膜生成磁束的影像，以及相對應的d值及a值。

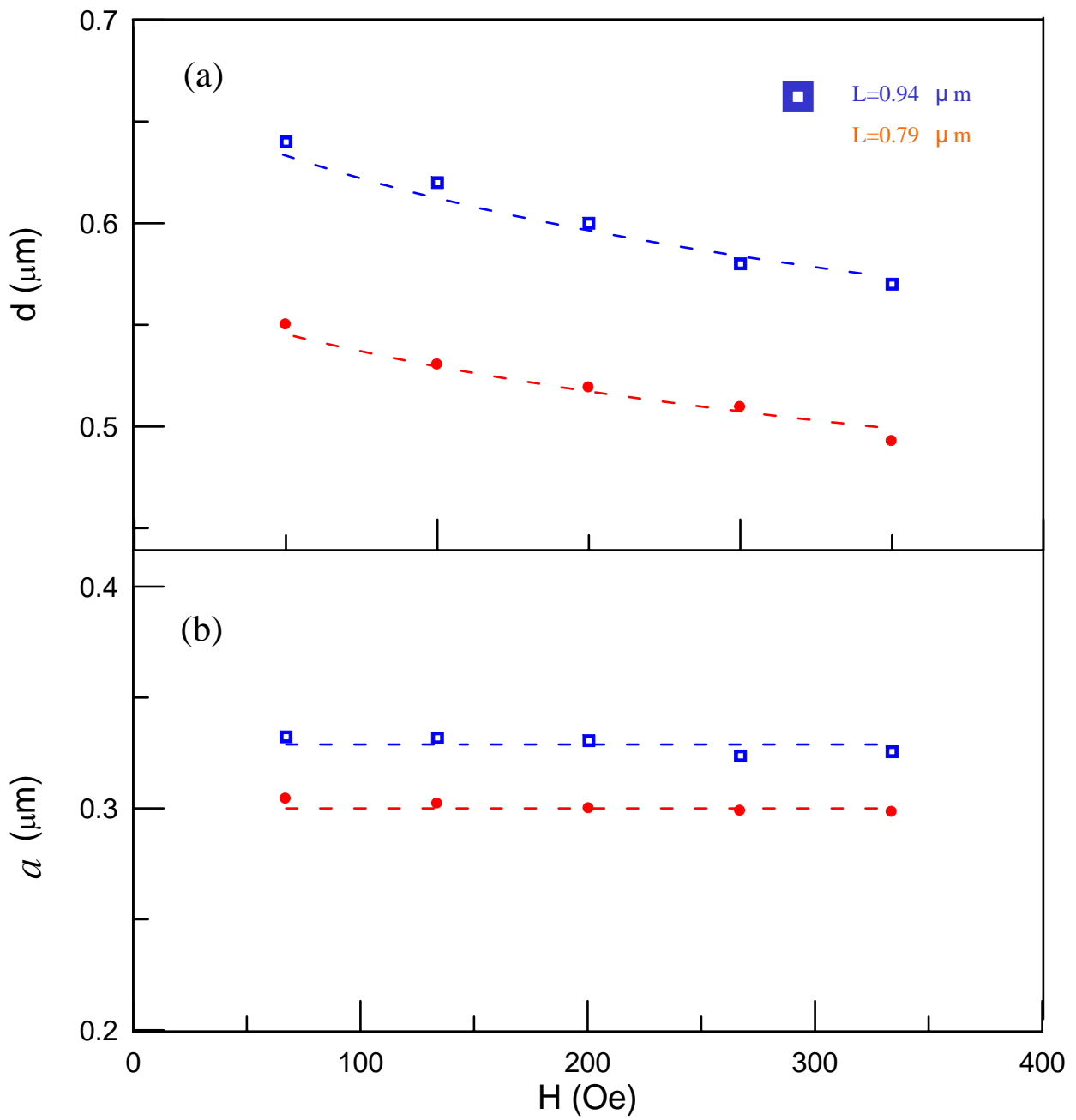


圖3-3. 不同磁場強度 H 下，磁性流體薄膜生成之磁束間距 d 及磁束直徑 a 隨磁場變化的趨勢圖，虛線部分代表預測值。

3.2 磁性流體薄膜中有序結構之穿透光譜特性

3.2.1 磁性流體薄膜在外加不同磁場下之可調性光譜帶隙

本實驗室備製的磁性流體薄膜在外加磁場下，磁性粒子會聚集成磁束，產生有序的六角形結構。因此可以預期的若我們打入某一波段的光，會有光子晶體效應的產生，即光譜帶隙的出現。以下便是我們實驗的探討。

我們利用 2.4 節中所描述之穿透光譜量測系統來研究磁性流體薄膜有序結構之光譜帶隙。圖 3-4 表示磁性流體薄膜外加不同垂直磁場強度，我們所量測到穿透光譜。我們發現隨著磁場強度愈大，光強度愈小，而且光譜形狀會有改變。利用圖 3-4 之光譜圖，選取某固定波長為 1548 nm、1560 nm 及 1569 nm，分析光強度對不同磁場強度的趨勢圖，如圖 3-5，我們可以看得出來，在磁場強度 $H = 350$ Oe 到 450 Oe 之間，強度變化不大，但是在 $H = 500$ Oe 之後光譜強度的變化明顯較大。

若將在各磁場下的穿透光譜強度除以零磁場下的穿透光譜強度，可得到相對於零磁場之歸一化穿透光譜 (Normalized transmission spectrum)。圖 3-6(a)到(d)繪出在不同磁場下的歸一化穿透光譜。由圖 3-6(a)($H = 400$ Oe) 可看出，在波長為 1540 及 1560 nm 附近穿透率明顯下降。而由 3.1 節中可知，磁性流體薄膜在 $H = 400$ Oe 下已形成有序結構。因此圖 3-6(a)中在波長為 1540 及 1560 nm 附近穿透率下降的現象可能即是磁性流體薄膜中有序結構的光子晶體效應，也就是所謂的光譜帶隙。

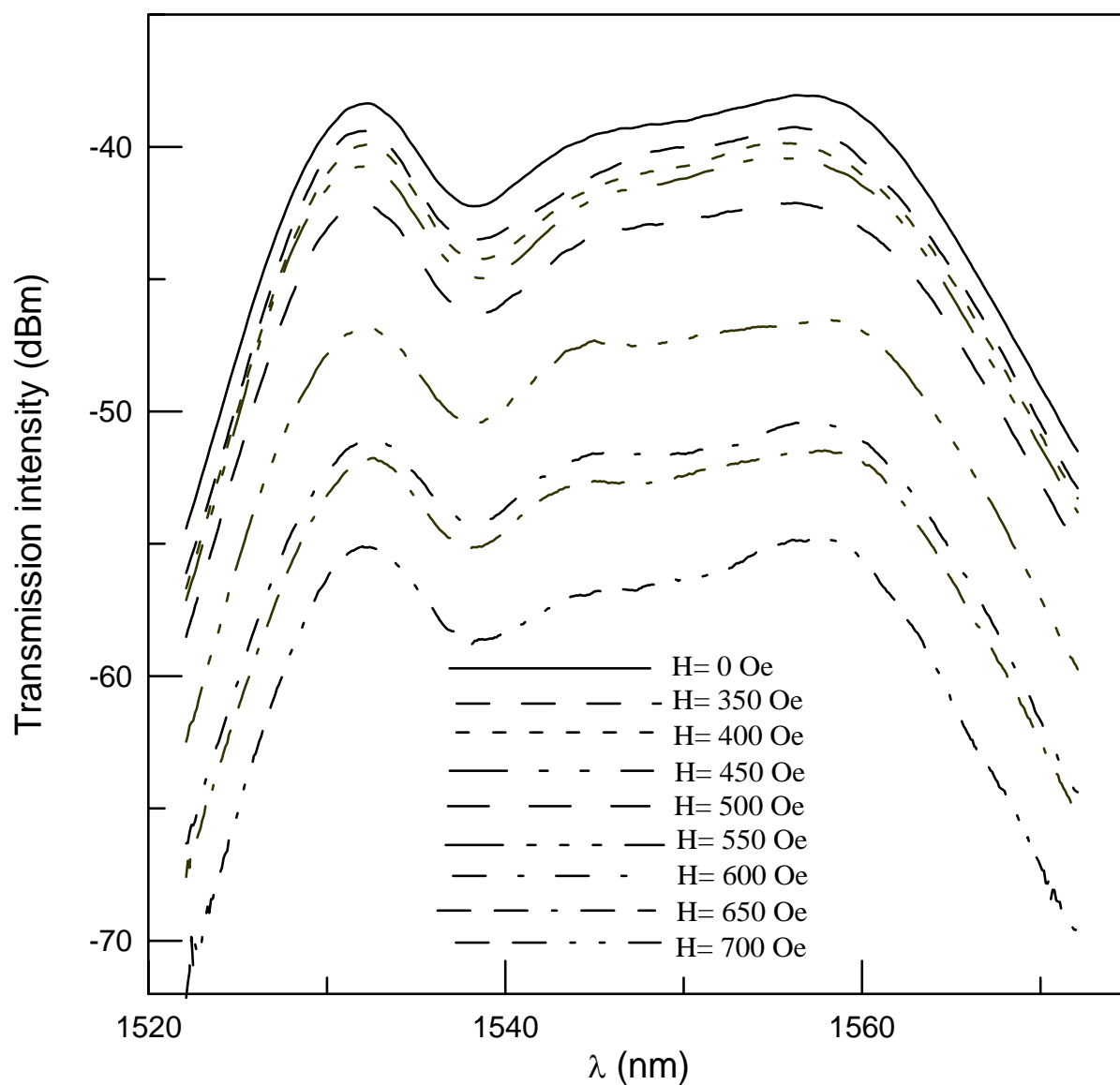


圖 3-4. 磁性流體薄膜在外加不同的磁場強度下，測量到的穿透光譜，量測裝置如圖 2.5 及 2.6 所示。所使用之磁性流體濃度 $M_s = 13.03 \text{ emu/g}$ ，薄膜厚度 $L = 0.94 \text{ }\mu\text{m}$ 。

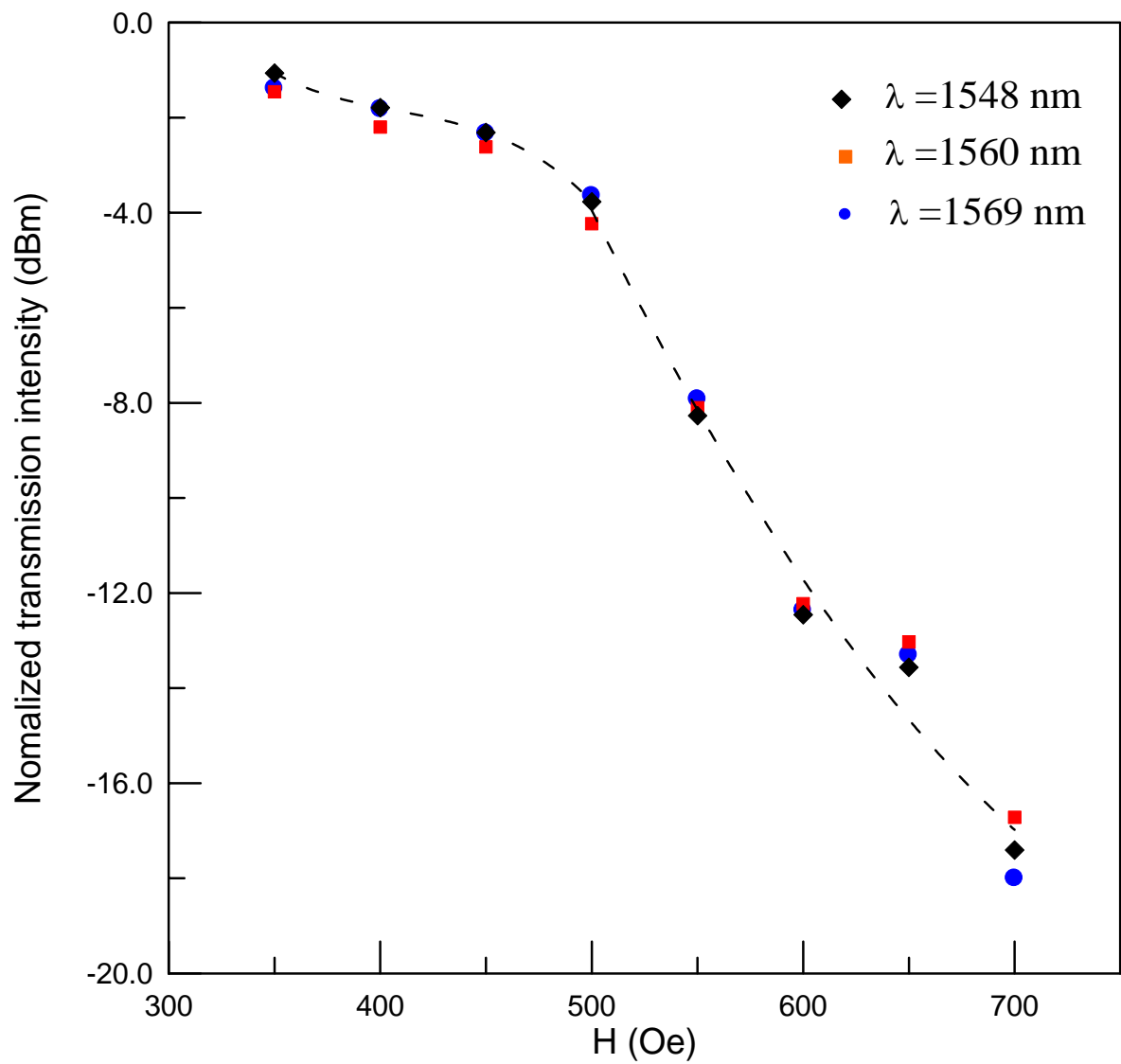


圖 3-5. 由圖 3-4 之穿透光譜，選取某固定波長為 1548 nm、1560 nm 及 1569 nm，分析光強度在不同磁場強度之下的趨勢圖。

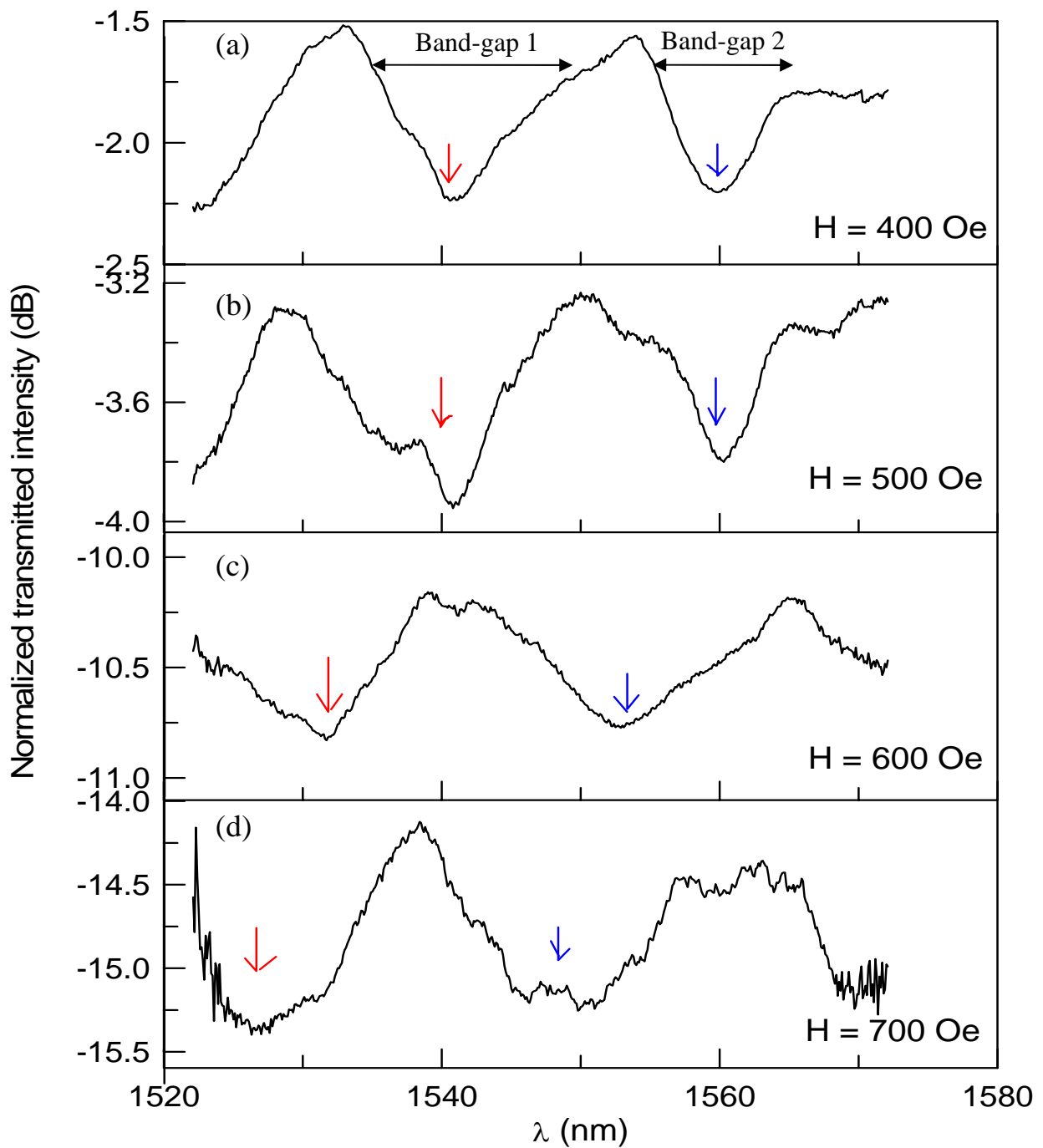


圖 3-6. 磁性流體薄膜在磁場強度為(a)400 (b)500 (c)600 (d)700 Oe 下的歸一化穿透光譜。箭頭所指處表示 band-gap 1 及 band-gap 2 光譜帶隙中間之參考波長。磁場強度愈大，光譜帶隙會往短波長移動。所用的磁性流體濃度 $M_s = 13.03 \text{ emu/g}$ ，薄膜厚度 $L = 0.94 \text{ }\mu\text{m}$ 。

根據光子晶體的特性，光譜帶隙會隨著晶體之週期減小而移向短波長波段。由圖 3-3(a)之 d - H 曲線，我們了解到磁性流體薄膜有序結構中的距離 d ，會隨磁場強度 H 增大而變小。這表示圖 3-6(a)中之光譜帶隙，在更高磁場強度下，應該會因為有序結構的週期減小而落在更短波長處。圖 3-6(b)-(d)顯示出磁性流體薄膜有序結構在更高磁場強度下，其光譜帶隙變化的行為。很明顯地，磁場強度愈大，光譜帶隙會往相對較短波長波段移動。此結果能與上述之推論相符合。若我們定義如 $H=400$ Oe 中在波段約 1540 nm 附近的光譜帶隙部分為 band-gap 1, 另一波段在 1560 nm 附近的光譜帶隙為 band-gap 2, 利用光譜帶隙的趨勢，取光譜帶隙中間之參考波長，並且對不同磁場強度作圖，可得如圖 3-7 之結果，在 $H=350$ Oe、 $H=400$ Oe 及 $H=450$ Oe 時，光譜帶隙的偏移不大，而在 $H=500$ Oe 開始，波段偏移量明顯較多，將此結果對照圖 3-5 之結果，我們發現有相同的趨勢變化。因此磁性流體薄膜有序結構非但有光子晶體的效應，而且其光譜帶隙可用外加磁場強度來調制。

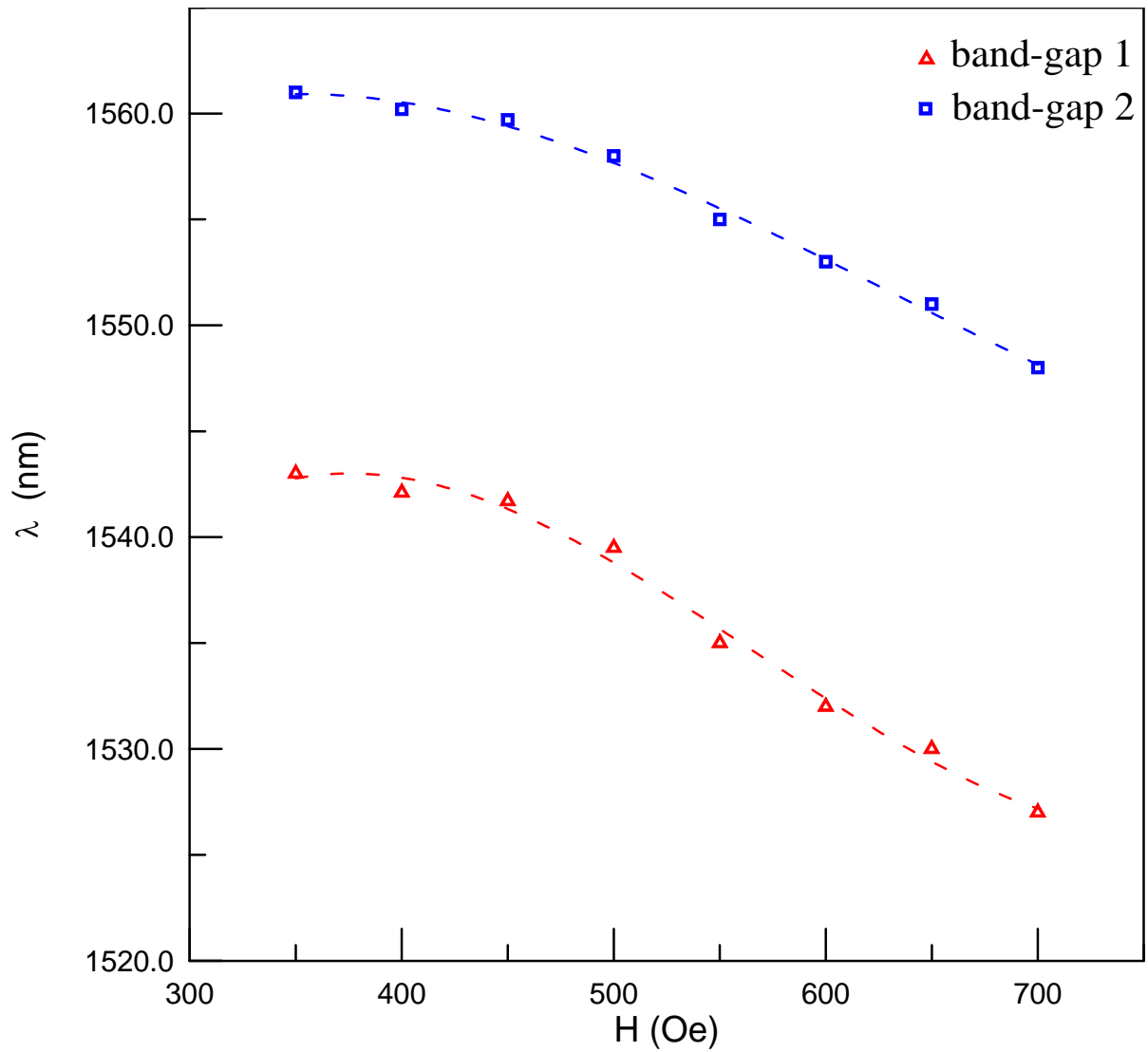


圖 3-7. 由圖 3-7 之歸一化穿透光譜中的光譜帶隙波段 band-gap 1 及 band-gap 2 所選取之中間參考波長值相對於不同磁場強度所作之趨勢圖。

3.2.2 含點缺陷磁性流體薄膜有序結構之共振模態研究

根據光子晶體的理論，若光子晶體有序結構中，含有點缺陷(Point-defect)，則在光譜帶隙中，會有共振波長 (Resonant wavelength)的產生。換句話說，在光譜帶隙中，會有特定波長的光，可以穿透此光子晶體結構，為了在磁性流體薄膜有序結構中製作出點缺陷，我們在磁性流體膜凹槽中光作出直徑約 $1\ \mu\text{m}$ 的圓柱，如圖 2-2 所示。之後我們觀察此磁性流體薄膜在外加磁場下的結構 圖 3-8(a)表示在同樣的薄膜條件及外加磁強度下，有點缺陷如沒有點缺陷的六角形薄膜凹槽所生成磁束的情形，可以看得出來，兩者都可以形成有序的磁束排列。

我們繼而量測圖 3-6 中完整有序結構及具點缺陷有序結構之穿透光譜，如圖 3-9(a)及(b)所示。由此兩圖可發現，在原完整有序結構所產生的光譜帶隙中，因為點缺陷的存在會產生新的穿透光，如圖 3-9(b)中陰影區域。這些新的穿透光就是具點缺陷磁性流體薄膜有序結構之共振波長。

此外，由圖 3-6 的實驗結果可知，磁性流體有序結構之光譜帶隙會隨著磁場強度之增強而移向較短波長。這意味著具點缺陷之磁性流體有序結構的共振波長在較高磁場時會變小。為檢驗此一特性，我們亦量測具點缺陷的磁性流體有序結構，在不同磁場強度下的歸一化穿透光譜，如圖 3-10 所示。圖 3-10 的結果顯示出，出現在光譜帶隙中的共振波長會隨著外加磁場強度的增加而降低。此結果表示具點缺陷磁性流體薄膜有序結構可當作可調式光子晶體共振腔。

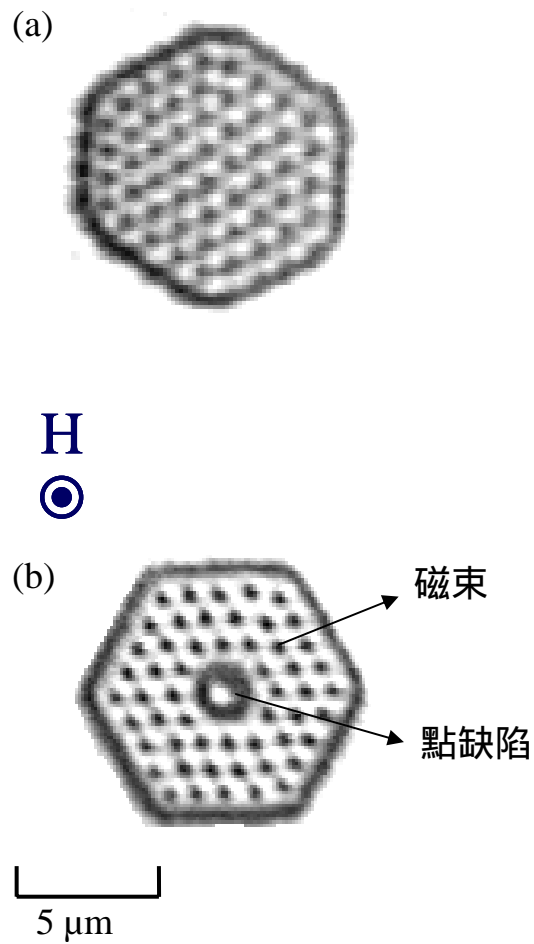


圖 3-8. 在同樣的薄膜條件($M_s = 13.03 \text{ emu/g}$, $L = 0.94 \text{ }\mu\text{m}$)及外加相同磁場強度($H = 100 \text{ Oe}$)下, (a)沒有點缺陷和(b)有點缺陷的六角形薄膜凹槽所生成的磁束排列情形。

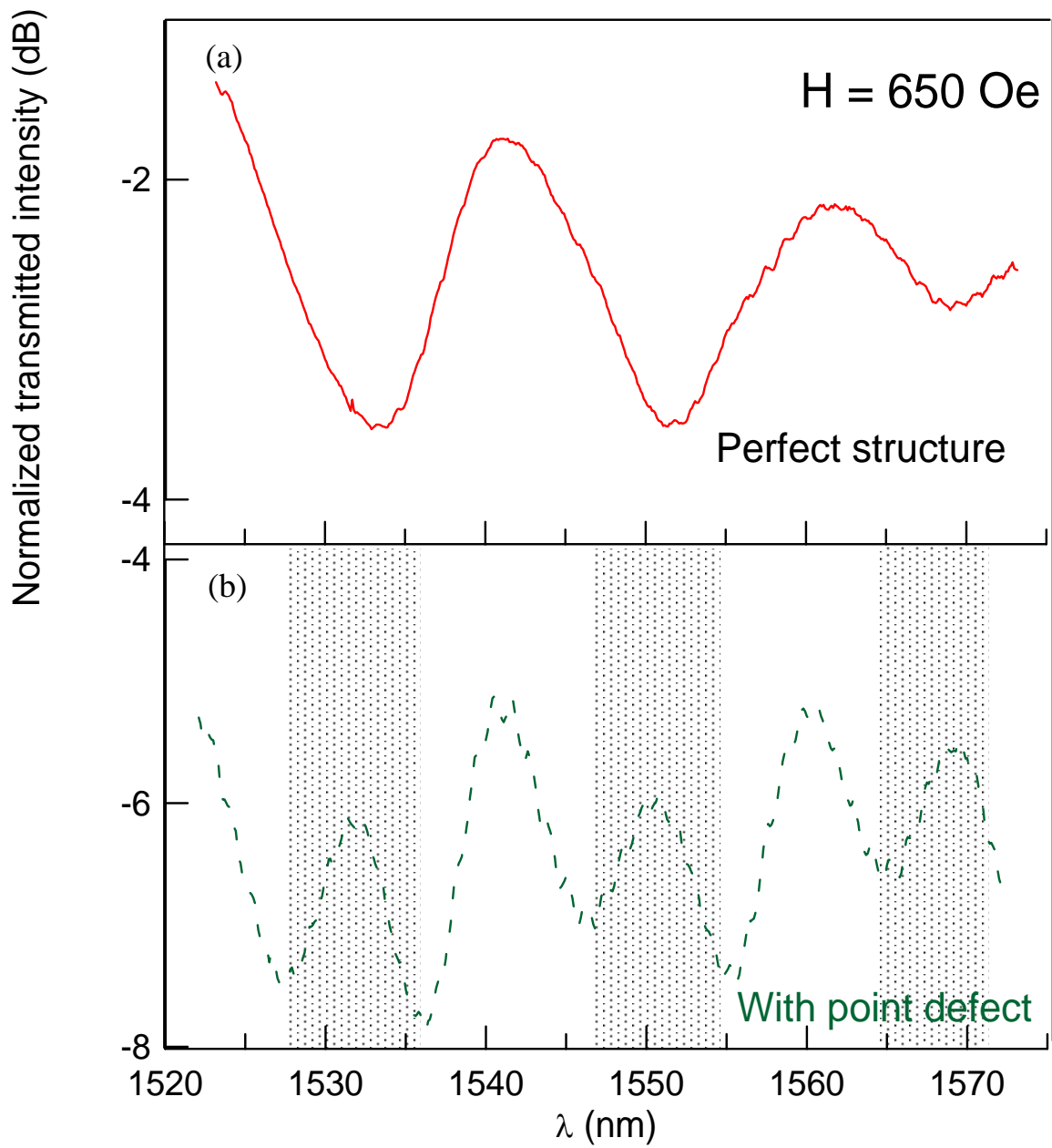


圖 3-9. 在同樣的薄膜條件($M_s = 13.03$ emu/g, $L = 0.94$ μm)及外加相同磁場($H = 650$ Oe)下, (a)沒有點缺陷及(b)含點缺陷六角形凹槽中, 磁性流體光子晶體的穿透頻譜。(b)中陰影區域代表具點缺陷磁性流體有序結構之共振波長。

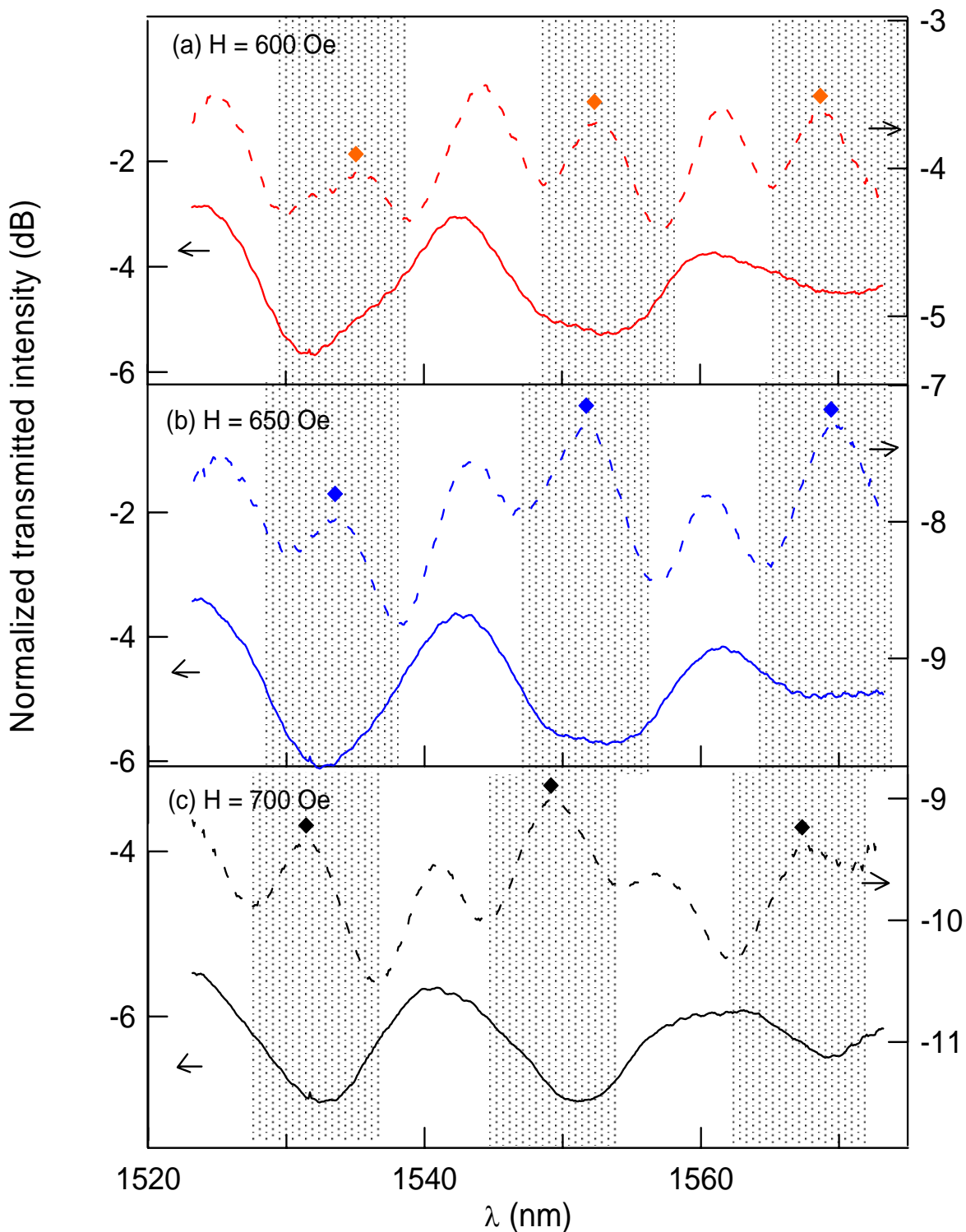


圖 3-10. 磁性流體薄膜($M_s = 13.03 \text{ emu/g}$, $L = 0.94 \mu\text{m}$)光子晶體共振腔在不同磁場下的共振波長。各圖中的實線代表完整有序結構的穿透光譜，光譜帶隙如陰影區域所示。虛線代表含點缺陷有序結構之穿透光譜。◆處表示共振波長。