

多波長光學讀寫頭技術

Technologies of Optical Pickup Heads with Multiple Wavelengths

施錫富

Hsi-Fu Shih

以光儲存的記錄方式，近年來有著急速的進步與成長，其中光學讀寫頭之發展成為重要的關鍵技術之一。本文從碟片容量密度之提昇與多種波長之需求介紹各型光學讀寫頭之演進，進而說明次世代藍光儲存系統之發展現況。

In recent years, the art of optical storage had great progresses and the development of optical pickup heads has been one of the most important key technologies. We reviewed the evolution of various optical pickup heads corresponding to the increasing of disk capacity density and the requirement of multiple wavelengths. Furthermore, the status of next generation blue-laser storage system was also described in this paper.

一、光儲存技術之發展現況

光碟機的急速發展，已成為電腦週邊的基本配備和高品質影音家電產品的新寵，而容量密度之提昇則是光資訊存取重要的發展方向之一；為達此目的，光學讀寫頭扮演著非常重要的角色，必須具備有更小之聚焦光點以讀寫更高容量密度之碟片。依據繞射理論，光學頭聚焦光點之大小是與雷射光波長 (λ) 成正比，並與聚焦物鏡之數值孔徑 (numerical aperture, NA) 成反比，如式 (1)，其中 D 為聚焦光點之半高寬值 (full-width half maximum, FWHM)。因此，欲提昇儲存之容量密度，主要的兩個方向便是朝提高聚焦物鏡之 NA 值或縮短雷射光之波長。

$$D = 0.52 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

光學讀寫頭以半導體雷射二極體 (laser diode, LD) 為主要的光源，其波長與功率決定光碟片的容量密度與讀寫種類，並主宰光碟機演進的重大關鍵。1980 年代 Philips，首度提出的 CD 讀寫頭採用的是 830 nm 的雷射二極體，後來 780 nm 雷射二極體成熟後便普遍地存在於現今的所有 CD 唯讀型光碟系統中，並搭配 NA 為 0.45 的物鏡，對應的碟片儲存容量是 650 MB。由於唯讀型光碟機僅作訊號之讀取，聚焦光點的功率約為 0.2 mW 即可，因此對雷射光輸出功率之要求並不高；隨後的 WORM、MO、CD-R、CD-RW 等光碟系統，因其具有對碟片寫入之功能，必須以較高的雷射功率來改變碟片的物理現象，使之具有資料寫入的特性，故採用的是高功率的雷射光源，並且因為燒錄時需要以更小之光點達到較好之紀錄品質，故 CD-R 或

CD-RW 光碟機之讀寫頭採用的 NA 值則為 0.5。一般而言，寫入資料所需的聚焦光點之功率約需 5–10 mW 以上 (指的是一倍速寫入之情形下，並視寫入碟片之種類不同而有所差別)，對應的雷射二極體之輸出功率約為 30 mW，如圖 1；並且功率之需求會隨著寫入碟片時之轉速增加而提高，故高倍速寫入則需要更高功率之雷射二極體。1996 年起推出的新世代數位影音光碟機 (digital versatile disk, DVD) 規格中，光學頭採用的雷射二極體波長是 650 nm，配以 NA 為 0.6 的物鏡以達到縮小聚焦光點之目的 (若為 DVD+/-R 或 DVD+/-RW 之光學頭，亦因為要以更小之光點達到較好之紀錄品質，故採用之 NA 值則為 0.65)，將容量提昇了 7 倍左右，到達 4.7 GB。近年來由於數位電視之即將開播，現有的 DVD 之容量已不再足以應付至少 15 GB 以上高畫質電視節目資料儲存之需求了，因此以藍光為主之儲存媒體規格先後被制定；配合日亞化學公司之成功開發藍光雷射二極體，於是光碟產品正式迎向「藍色時代」了。例如以 Sony 及 Philips 為主之 Blu-ray Disc (BD) 陣營，即以波長 405 nm 搭配 NA 0.85 的物鏡，再將光點直徑大幅縮小，達成單面單層可有 25 GB 之容量；或者是以 Toshiba 為主之 high-density DVD (HD-DVD) 陣營，提出以波長 405 nm 搭配 NA 0.65 物鏡達成單

面單層 20 GB 之容量；其目的皆是為了達到滿足數位資料與影音視訊等更高之容量需求。表 1 列出目前較普遍之各種光碟的基本規格。

二、雙波長 DVD 光學頭

DVD 光碟機結合影音、資訊與多媒體於一體，具有多功能的特質，但也必須背負反向相容舊有 CD 系列各型光碟片的責任。初期 DVD 光碟機之光學頭採用 650 nm 的雷射光源，並利用各種不同的設計來改變物鏡的 NA 大小，分別是對應於 DVD 碟片時之 NA 0.6 與對應於 CD 碟片時之 NA 0.38 (因波長為 650 nm 時採用 NA 0.38 即可達到與波長 780 nm 及 NA 0.45 同樣之聚焦效果)。例如直接以旋轉機構作切換之雙物鏡方式，或者採用 Matsushita 公司發明如圖 2(a) 的全像雙焦點物鏡⁽¹⁾，以及如圖 2(b) Sanyo 公司提出以液晶快門控制孔徑大小的方式⁽²⁾。目的皆是希望對於不同基板厚度的碟片 (DVD 碟片基板厚度為 0.6 mm，CD 碟片基板厚度為 1.2 mm) 時，會有不同大小的聚焦光點，以達到反向相容的目的。但此種光學頭設計因為只具備單一波長，故僅限於反向相容於唯讀型 CD 光碟片 (如 CD-Audio、Video-CD、CD-ROM 等)，卻無法讀取 CD-R 或 CD-RW 等光碟片。因為

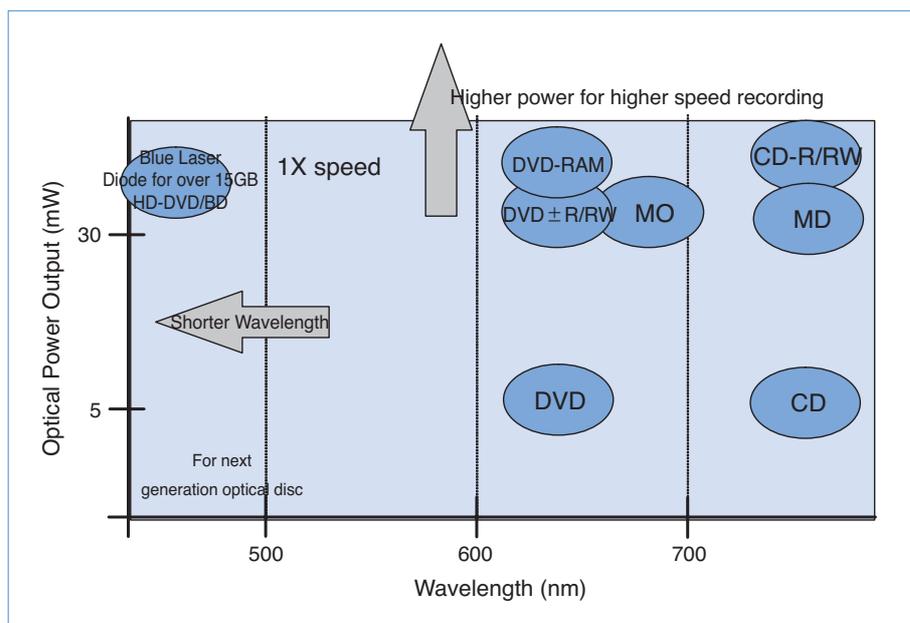


圖 1. 雷射二極體與碟片種類之關係。

表 1. 各式碟片之基本規格表。

碟片種類	CD-ROM (唯讀型)	CD-R (一次寫入型)	CD-RW (可覆寫型)	DVD-ROM (唯讀型)	DVD-R (一次寫入型)	DVD-RW (可覆寫型)	DVD+RW (可覆寫型)	DVD-RAM (可覆寫型)	HD-DVD (可覆寫型)	BD (可覆寫型)
容量 (GB)	0.65	0.65	0.65	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	20	25
雷射波長 (nm)	780	780	780	650	650	650	650	650	405	405
物鏡 NA 值	0.45	0.5	0.5	0.6	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.85
碟片覆蓋層厚度 (mm)	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.1
軌距 (μm)	1.6	1.6	1.6	0.74	0.74	0.74	0.74	0.615	0.34	0.32
紀錄方式	預鑄型之 data pit	groove recording	groove recording	預鑄型之 data pit	groove recording	groove recording	groove recording	land-groove recording	land-groove recording	groove recording

一般 CD-R 或 CD-RW 碟片記錄層的材料特性對波長 650 nm 雷射光的反射率相當低，因此限制了必須是具有 780 nm 光源的光學頭才能讀取這類光碟片上的資料，所以僅具有 650 nm 單一波長的 DVD 光學頭雖能讀取唯讀型 CD 光碟片卻無法反向相容於 CD-R 或 CD-RW 光碟片。

由於 CD-R、CD-RW 光碟片與燒錄器 (recorder) 的逐漸普及，迫使 DVD 光碟機必須考慮 CD-R 與 CD-RW 光碟片之反向相容問題，所以目前的 DVD 光碟機皆採用具有兩顆不同波長 (650 nm 與 780 nm) 雷射二極體之光學頭。然而增加一顆 780 nm 雷射

二極體時，相對地必須同時增加一套光路與對應的光學元件，除增加光學頭的體積與複雜度外，更提高了光學頭的製作成本。如圖 3 所示，其為最早具有兩個波長之 DVD 光學頭；由於必須採用兩個不同波長的雷射光源，故光學頭之設計採用兩道光學路徑，分別用以讀取 CD 與 DVD 系列之碟片；780 nm 與 650 nm 之雷射光束各別經由不同之光學路徑與光學元件，最後為 CD 與 DVD 之物鏡聚焦於碟片上，分別讀取兩種碟片上的資料。後來，因為適用於雙波長並具有不同 NA 值之單一物鏡的發明⁽³⁾，取代了原先兩顆不同 NA 的物鏡，簡化了雙波長光

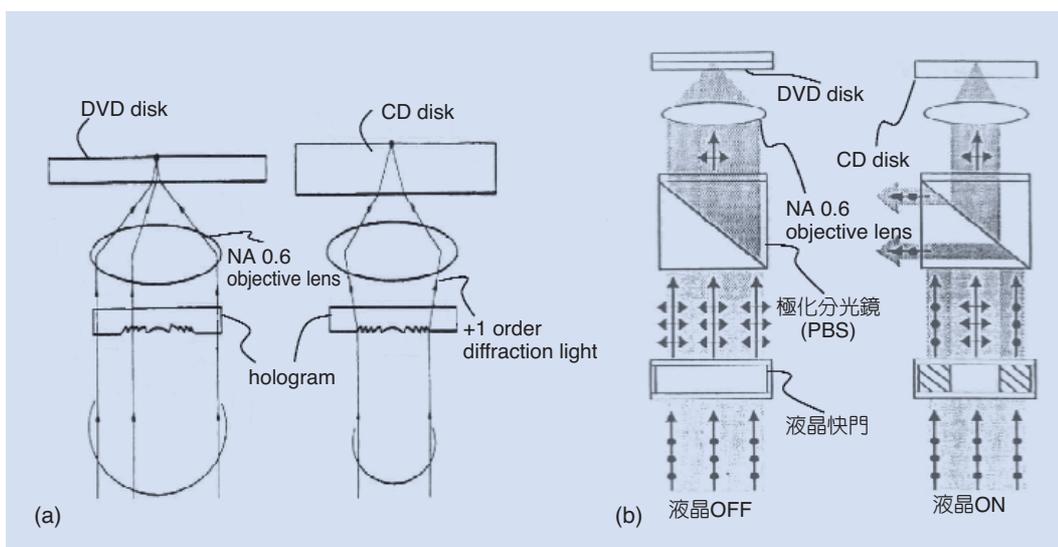


圖 2. (a) 以全像元件產生雙焦點之 DVD 物鏡，(b) 採用液晶快門控制物鏡之孔徑大小。

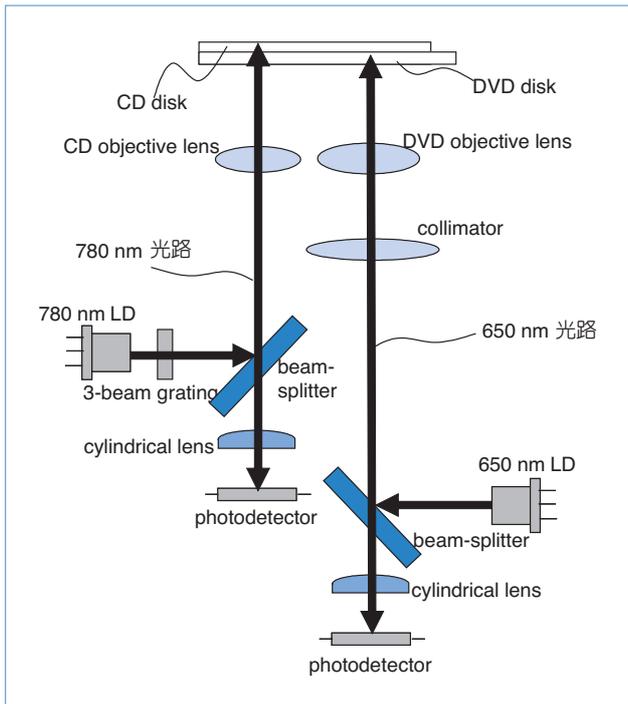


圖 3. 最早之雙波長 DVD 光學頭設計。

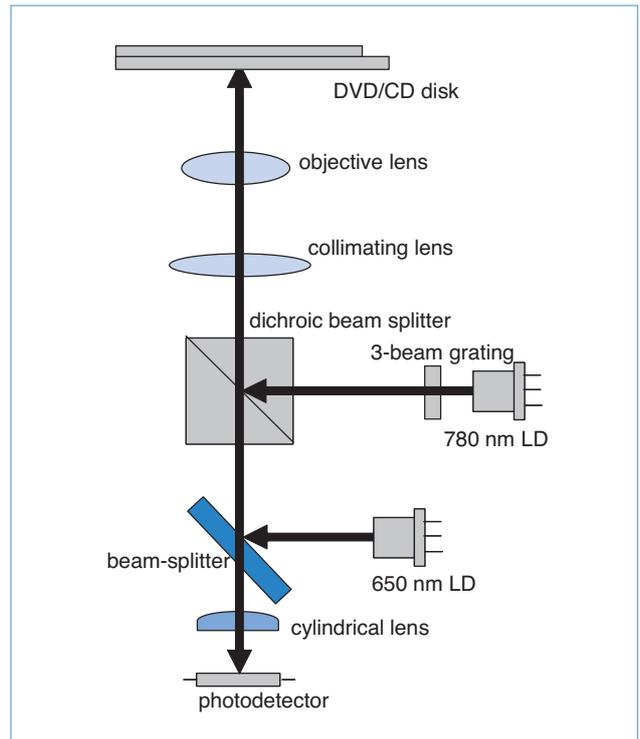


圖 4. 使用單物鏡之雙波長 DVD 光學頭設計。

學頭之設計；原先雙光路之設計也因為部份光學元件之共用而被簡化，如圖 4；但基本架構仍為雙光路，故組裝與調整之步驟亦甚為複雜⁽⁴⁾。

由於光碟機市場的快速成長與價錢下滑，帶動光學頭朝簡單、質輕、體積小、成本低與易於生產的方向發展，於是全像型光學頭漸漸取代傳統型光學頭⁽⁵⁾。圖 5 說明全像型光學頭與傳統型光學頭之差異，其最大的不同處是全像型光學頭以一片包含有三光束光柵之全像光學元件 (holographic optical element, HOE) 取代傳統之分光鏡片及圓柱透鏡等光學元件，並拉近雷射二極體與光偵測器間 (photo-detector, PD) 之距離，使其可以全部被封裝在一個小小的包裝中，稱為積體式光學模組 (integrated optical unit, IOU)；此模組再搭配以致動器及物鏡，經由簡單的組裝調整即構成一個全像型光學頭。若欲使 DVD 光學頭具有兩種波長以達到反向相容之目的時，必須採用兩顆針對不同波長而設計的 IOU。初期的設計為使用一顆較低價的 780 nm IOU，並搭配 650 nm 之傳統型光路，如圖 6(a)。後來亦有完全採用兩顆 IOU (分別為 650 nm 與 780 nm 波長) 之雙波長 DVD 光學頭架構，以徹

底簡化光學頭之設計，如圖 6(b)。近年來由於半導體雷射技術之進步，具有雙波長之單體雷射二極體 (two-wavelength integrated laser diode, TWIN-LD) 已被發明⁽⁶⁻⁸⁾；利用特殊之雷射結構與製程設計將兩不同波長之雷射共振腔製作於同一晶片上，可降低原本兩雷射二極體需個別封裝之成本，並可精確控制兩雷射出光束之間距 (一般是在 $110 \pm 1 \mu\text{m}$)，如圖 7。應用此 TWIN-LD 於光學頭之設計，可得到類似於舊有單一波長之單光路光學頭架構，如圖 8(a)，卻可達成雙波長 DVD 光學頭之效果，大幅簡化元件之數量與組裝調整之複雜度。由於 TWIN-LD 之製作較為困難，所以初期僅有低功率之 TWIN-LD 問世，應用於唯讀型之雙波長 DVD 光學頭；對於燒錄型之 DVD-RW 光學頭仍然是採用兩顆高功率雷射之雙光路架構；但逐漸已有廠家開發出高功率之 TWIN-LD 了⁽⁹⁾，因此複雜的 DVD-RW 光學頭亦將在不久之將來被徹底的簡化。此外，亦隨著非球面塑膠透鏡之製造技術的進步，NA 0.7 的有限共軛雙波長雙 NA 物鏡也被開發出來了，取代原先需搭配準直透鏡的 NA 0.6 無

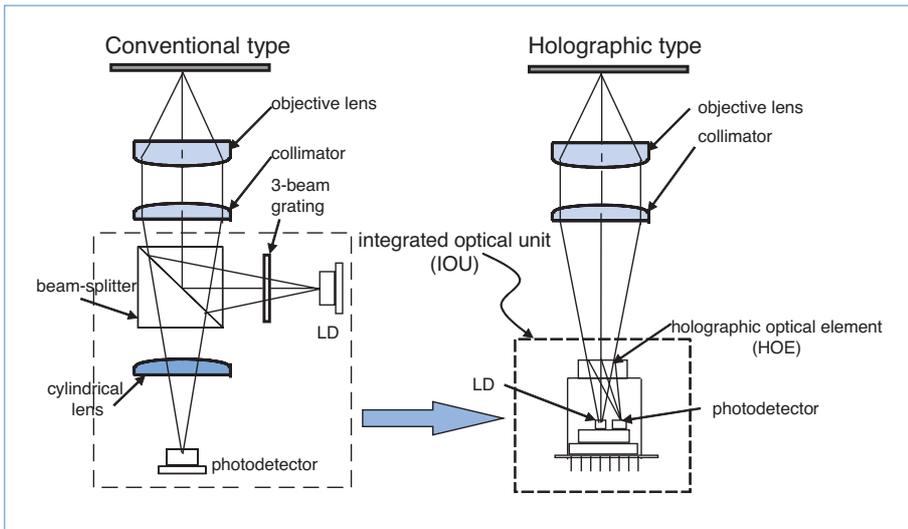


圖 5. 傳統型光學頭與全像型光學頭之比較。

限共軛物鏡系統。於是採用此物鏡及 TWIN-LD 後之雙波長 DVD 光學頭就如圖 8(b) 之架構，其簡化之程度比起早期之雙波長 DVD 光學頭來說 (圖 3) 足以令人讚嘆。

筆者亦曾於此雙波長 DVD 光學頭之發展歷程中提出數種設計架構，其中之一為設計內含有雙波長雷射二極體 (可採用分離之兩顆雷射晶片黏貼一起，或者是一顆單體之 TWIN-LD) 之單體雙波長

IOU^(10,11)，利用此 IOU 可得到更為簡化之單光路雙波長 DVD 光學頭，特別是體積可大幅縮小，應用於可攜式之光碟機上 (portable drive)，如圖 9。另外亦可結合傳統型與全像型之光學頭設計，利用一單波長之 780 nm IOU，除扮演 CD 光路之光源與接受器外，亦可同時當作另一 650 nm 傳統光路之偵測器，整體架構亦如同單波長之單一光路⁽¹²⁾，如圖 10。此架構除了成本與組裝複雜度低外，更重要

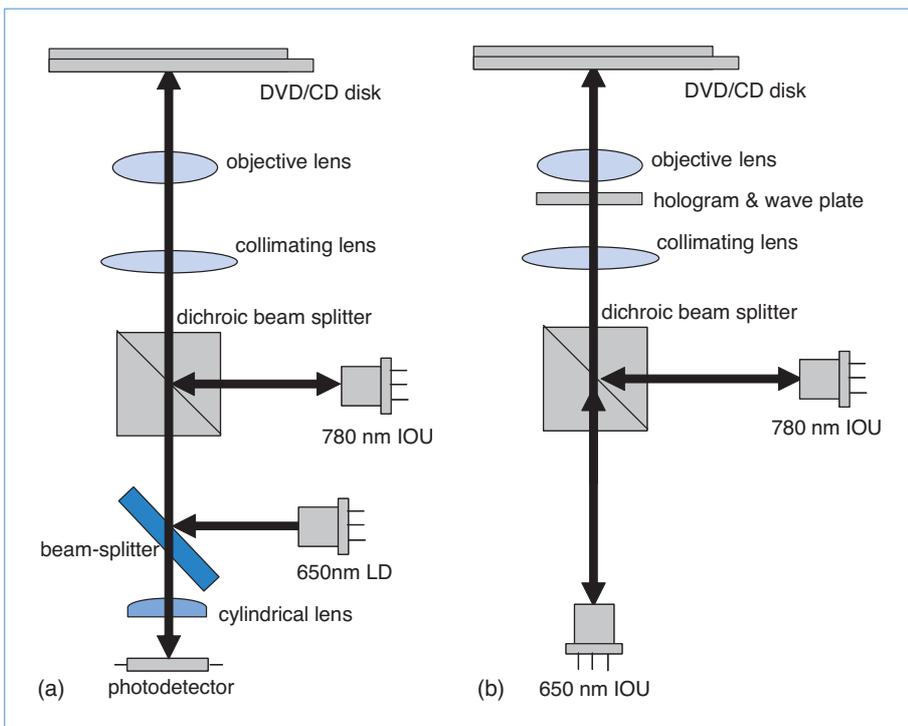


圖 6. (a) 採用一 IOU 及 (b) 採用兩個 IOU 之雙波長 DVD 光學頭設計。

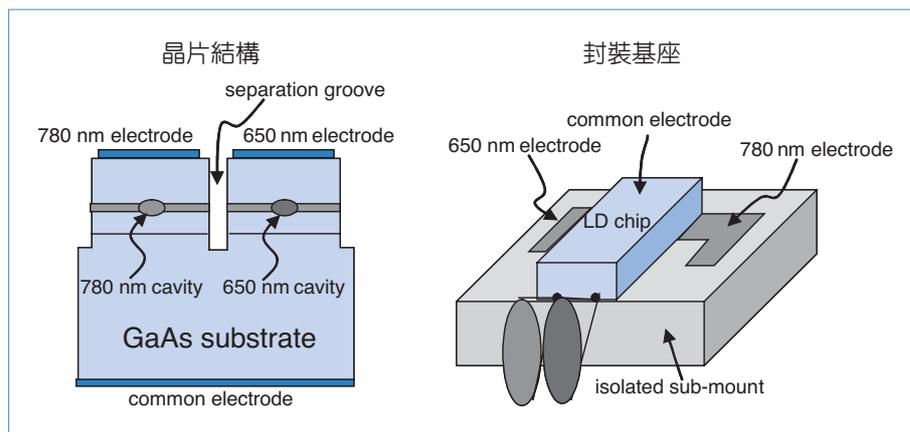


圖 7. 具有雙波長之單體雷射二極體。

的是可以排除 TWIN-LD 為少數日系公司掌控之困難，並且可適用於燒錄型之 DVD-RW 光學頭設計上，以克服高功率 TWIN-LD 仍在開發中之窘境。

三、三波長藍光光學頭

由上述的討論可知，雙波長 DVD 光學頭是為了滿足反向相容各種碟片，以迎合市場之需求所必需的；而朝簡單光路、體積小、成本低與易組裝的光學頭設計方向為其設計之重點。此現象對目前發

展中之藍光儲存系統而言更是嚴苛。由於 CD 與 DVD 系列碟片在未來數年內仍是普遍存在於世，因此藍光系統更需反向相容更多類型之碟片規格，而實現具有三波長之藍光光學頭必定是勢在必行的。

Sony 公司挾其在光儲存方面的雄厚實力，以領航者之姿態率先於 2003 年四月推出藍光之 BD 光碟機。初期之藍光光學頭設計是以如圖 11 之架構來實現，以達成單面單層 25 GB 之容量規格^(13,14)；由圖中可見元件之眾多與光學系統之複雜。為達成 NA 0.85 之要求，物鏡是採用雙片式組合而

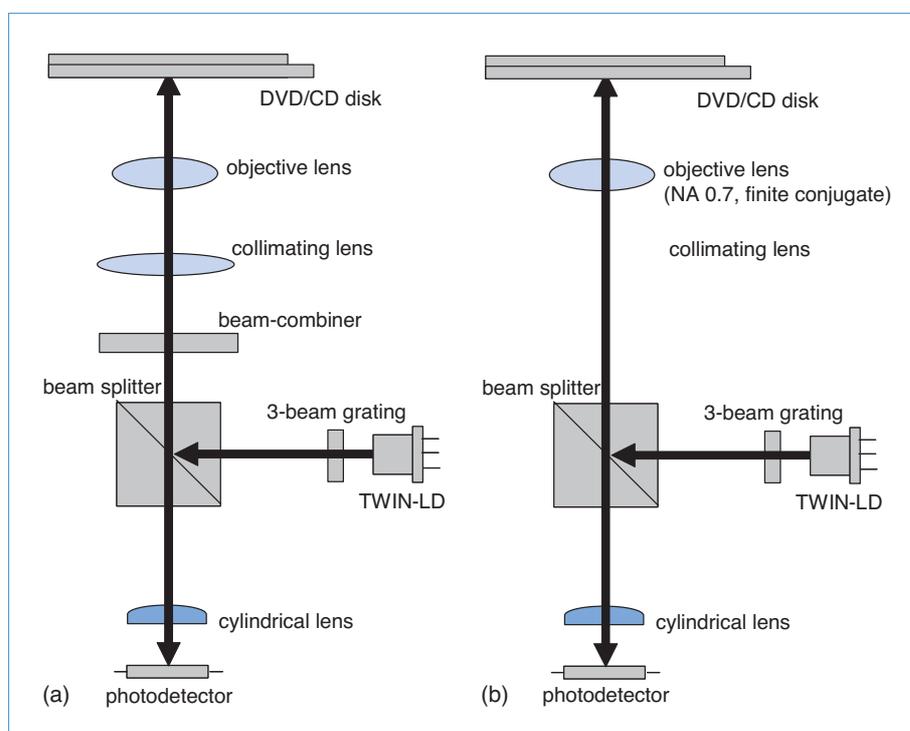


圖 8. (a) 採用雙波長單體雷射二極體及 (b) 採用 NA 0.7 有限共軛物鏡之雙波長 DVD 光學頭設計。

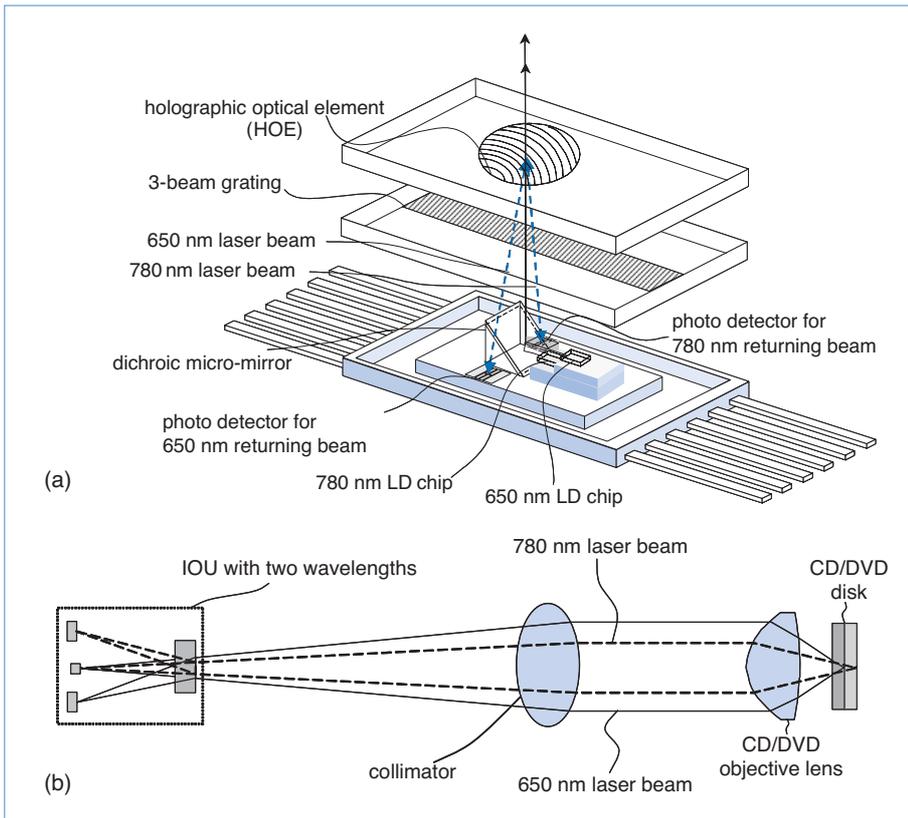


圖 9.
(a) 單體之雙波長 IOU 及 (b) 利用此雙波長 IOU 設計之單光路雙波長 DVD 光學頭架構。

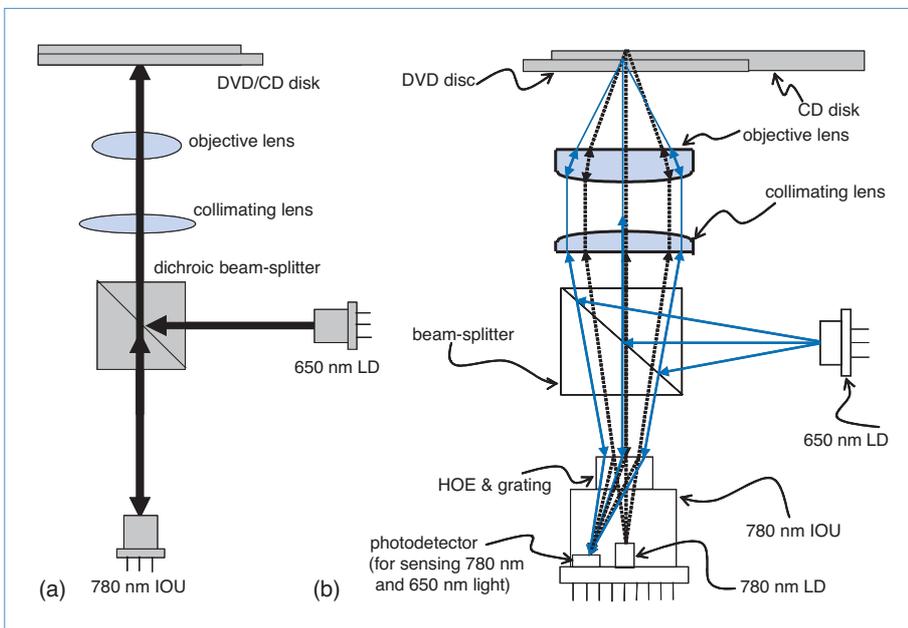


圖 10.
(a) 結合傳統型與全像型之單光路雙波長 DVD 光學頭設計，(b) 細部光路圖。

成的。並且為了修正因碟片微量之厚度變異而引入之聚焦光點的光學球面像差，在物鏡之前另需加入一可動式之擴散透鏡 (expander)，並以微步進馬達驅動之，以作動態之像差修正，因此光學頭體積龐

大，成本昂貴。為能反向讀取 CD 及 DVD 系列之碟片，此碟機採用雙光學頭，一為 BD 專用之藍光光學頭，另一則為雙波長之 DVD 光學頭。此藍光光碟機雖然達成了實現反向相容各型碟片之目的，

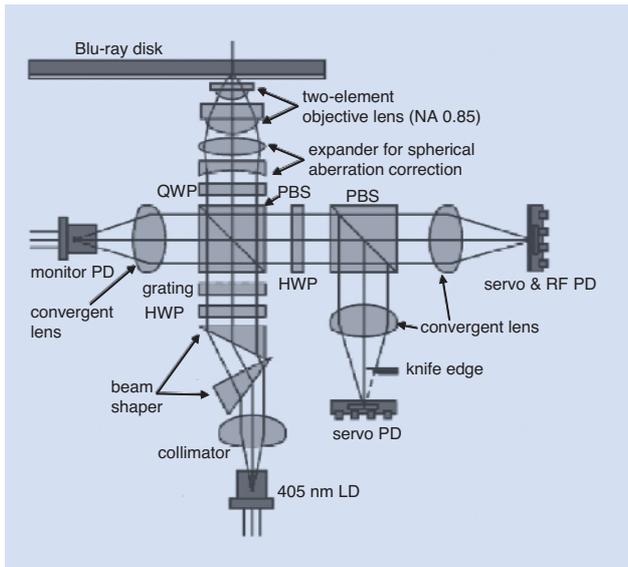


圖 11. Sony 初期提出之藍光光學頭設計。

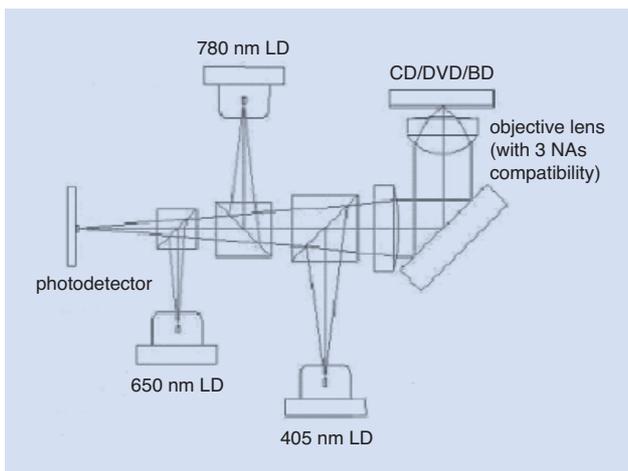


圖 12. 集三種波長與三種 NA 值於一體之三波長藍光光學頭架構。

並提供 780 nm、650 nm 及 405 nm 三種波長與 0.45、0.6 及 0.85 三種 NA 值之功能，但從量產之角度而言，其採用兩個光學頭、兩套承載及傳送機構與複雜之光學系統都不是一個很好的量產設計。

就如同 DVD 之發展一樣，初期之產品雖然複雜，但終將為更新之發明與改良所簡化。雖然目前藍光儲存離真正的普及仍有一段距離，但各廠家陸續推出新產品與提出各型之新設計，藍光光學頭之架構亦逐步被簡化，並邁向集三種波長與三種 NA

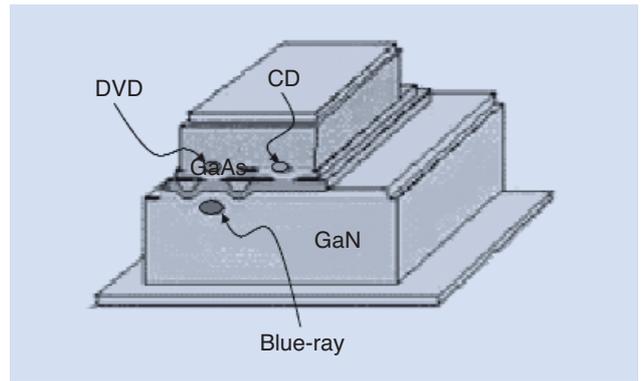


圖 13. 單體化之三波長雷射二極體示意圖。

值於一體之三波長藍光光學頭⁽¹⁵⁾，如圖 12 所示，且逐漸朝向單一光路之簡單架構前進；其中最主要的關鍵不外乎就是具有三種 NA 值之物鏡與三種波長之單體雷射的發明。在物鏡方面，由於 NA 值高達 0.85 時，欲實現單一非球面塑膠透鏡，必須尋找更高折射率之塑膠材料，並且需借助其他光學元件之搭配，以達成三種 NA 值之需求，許多研究已發表亦仍陸續進行中⁽¹⁶⁻¹⁹⁾。至於三種波長之單體雷射方面，由於 780 nm 與 650 nm 雷射二極體主要是製作於以砷化鎵 (GaAs) 為主之基材上，故兩者可形成單體之結構；但 405 nm 之藍光雷射二極體則是製作於以氮化鎵 (GaN) 為主之基材上，所以想要在同一基材上設計單體之三波長雷射二極體有實際上之困難。因此，Sony 率先推出結合單體之雙波長雷射 (780 nm 及 650 nm) 與 405 nm 之藍光雷射兩者以背靠背貼合一起而成之三波長單體雷射，如圖 13；根據此雷射進而簡化三波長之光學頭如圖 14 之單光路架構，其提供給未來藍光儲存系統之簡化與量產開發很大之助益。

四、結論

科技之進步便是在造福人類以更低之代價可以得到更高之物質享受，我們可以从光碟機讀寫頭之演進見證到這樣的過程。猶記 DVD 剛推出之際，一台 DVD 播放機約需一千美元，但目前僅需不到十分之一的價格了，這都是仰賴不斷以更新的發明與製造技術來達成的；同樣的情形亦將發生於未來

之藍光儲存技術上。據了解，由於數位電視之開播，2006年起將是藍光儲存系統漸漸嶄露頭角的時候了。屆時，可反向存取 CD 與 DVD 各系列碟片之藍光光碟機將逐漸取代現有的光碟系統，成為光儲存之主流產品。

綜觀國內在光儲存領域，多年來一直佔有全世界生產製造舉足輕重之重要角色，然而在以光學讀寫頭為主之關鍵零組件上卻一直是處於遠遠落後的地位；重要的專利智權、產品規格與元件來源等皆掌控於日系廠家。近年來以 Samsung 與 LG 為主之韓國大廠亦快速追趕，形成一股不可忽視的力量，這對未來台灣跨足藍光技術而言將是一大挑戰，也是國內關心光儲存技術之產官學研等相關單位所應深切思考而共謀因應之道的。

參考文獻

1. Y. Komma, S. Mizuno, and S. Nishino, *US Patent 5446565* (1995).
2. S. Kajiyama, Y. Kano, Y. Matsumura, Y. Tsuchiya, and S. Ichiura, *Tech. Dig. of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage*, **1996**, 320 (1996).
3. J. H. Yoo, C. W. Lee, K. H. Cho, H. S. Choi, and J. W. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 2184 (1998).
4. R. Katayama, Y. Komatsu, and Y. Ono, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 460 (1997).
5. 施錫富, *工業材料月刊*, **159**, 133 (2000).
6. M. Uchiyama, T. Ebihara, K. Omi, H. Kitano, I. Hoshino, and K. Mori, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 1549 (2000).
7. K. Nemoto, T. Kamei, H. Abe, D. Imanishi, H. Narui, and S. Hirata, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2270 (2001).
8. E. Mori, Y. Komma, K. Yasuda, N. Hotta, O. Imafuji, A. Kikuchi, and T. Itoh, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 4845 (2002).
9. S. Uchida, N. Hoshi, S. Agatsuma, K. Tanno, H. Iki, S. Yoshida, F. Kumasawa, H. Nagasaki, and T. Yamamoto, *Tech. Dig. of Optical Data Storage 2004 (ODS2004)*, 314 (2004).
10. H. F. Shih, T. P. Yang, M. O. Freeman, J. K. Wang, H. F. Yau, and D. R. Huang, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 1750 (1999).
11. H. F. Shih, T. P. Yang, J. K. Wang, and M. O. Freeman, *US Patent, 6211511* (2001).
12. H. F. Shih, *Tech. Dig. of Optical Data Storage 2004 (ODS2004)*, 192 (2004).

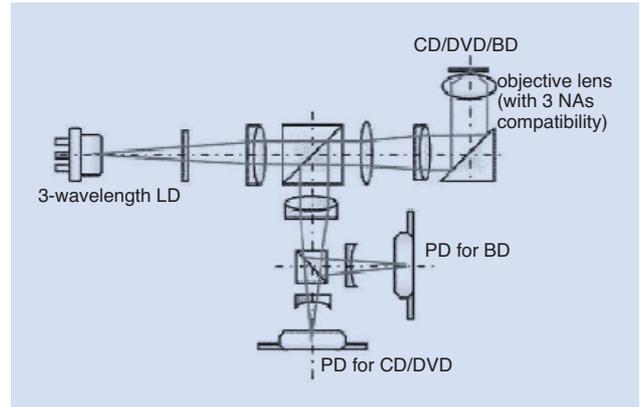


圖 14. 採用單體三波長雷射之單光路三波長藍光光學頭架構。

13. I. Ichimura, F. Maeda, K. Osato, K. Yamamoto, and Y. Kasami, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 937 (2000).
14. T. Maeda, M. Terao, and T. Shimato, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 1044 (2003).
15. R. Katayama and Y. Komatsu, *Tech. Dig. of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage 2002*, 168 (2002).
16. M. Itonaga, F. Ito, K. Matsuzaki, S. Chaen, K. Oishi, T. Ueno, and A. Nishizawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 1798 (2002).
17. B. Hendriks, J. Schleipen, and M. van As, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 1791 (2002).
18. K. C. Park, S. Y. Jeong, T. S. Lee, J. J. Lee, J. D. Kim, M. H. Lee, and J. Y. Kim, *Tech. Dig. of Optical Data Storage 2003 (ODS2003)*, **WC7**, 21 (2003).
19. K. Koike, M. Ogasawara, I. Kikuchi, T. Matsuda, T. Ezuka, and S. Ohtaki, *Tech. Dig. of Optical Data Storage 2003 (ODS2003)*, **WA6**, 271 (2003).

- 施錫富先生為國立中央大學光電科學博士，現任國立中興大學機械工程學系助理教授。
- Hsi-Fu Shih received his Ph.D. in optical sciences from National Central University. He is currently an assistant professor in the Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.