I586058

(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本 **(11)證書號數：TW I586058 B**

(45)公告日： 中華民國 106 (2017) 年 06 月 01 日

(21)申請案號：104124957 (22)申請日： 中華民國 100 (2011) 年 02 月 24 日

(51)Int. Cl.： ***H01S3/10*** ***(2006.01)*** ***H01S3/02*** ***(2006.01)***

A61F9/008 (2006.01)

(30)優先權：2010/02/24 美國 12/712,067

(71)申請人：愛爾康眼科手術激光股份有限公司 (美國) ALCON LENSX, INC. (US)
美國

(72)發明人：卡拉維提斯 麥可 KARAVITIS, MICHAEL (US)

(74)代理人：惲軼群；陳文郎

(56)參考文獻：

US 2004/0243111A1 US 2005/0111500A1

US 2009/0137993A1 WO 2009/137182A2

Nathan W. Rimimgton et al,"Femtosecond Ti:sapphire oscilator electro-optically cavity dumped at 50 kHz",APPLIED OPTICS, Optical Society of America, 20 September 2001, Vol. 40, No. 27, p.p 4831~4835

審查人員：姚真華

申請專利範圍項數：15 項 圖式數：8 共 89 頁

(54)名稱

具有可變重複率之高功率飛秒雷射

HIGH POWER FEMTOSECOND LASER WITH VARIABLE REPETITION RATE

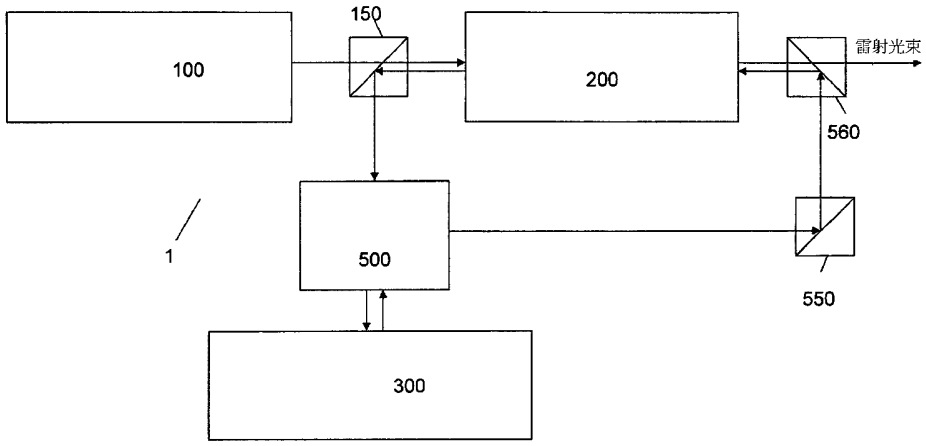
(57)摘要

本發明提供用於建構與操作飛秒脈衝雷射的設計與技術。一種雷射引擎的示例包括振盪器，其可產生並輸出飛秒種子脈衝的光束；擴展壓縮器，其擴展該等種子脈衝的持續時間；及放大器，其接收該等擴展的種子脈衝，放大被選出的擴展種子脈衝之振幅以產生放大的擴展脈衝，並將經放大的擴展脈衝之雷射光束輸出回到該擴展壓縮器，以壓縮它們的持續時間，並輸出飛秒脈衝的雷射光束。該放大器包括色散控制器，其補償該等放大的擴展脈衝之色散，使得該雷射之重複率可在程序之間或根據掃描速率進行調整。該雷射引擎可被小型化為整體光學路徑少於 500 公尺，並具有較少量的光學元件，例如少於 50 個。

Designs and techniques for constructing and operating femtosecond pulse lasers are provided. One example of a laser engine includes an oscillator that generates and outputs a beam of femtosecond seed pulses, a stretcher-compressor that stretches a duration of the seed pulses, and an amplifier that receives the stretched seed pulses, amplifies an amplitude of selected stretched seed pulses to create amplified stretched pulses, and outputs a laser beam of amplified stretched pulses back to the stretcher-compressor that compresses their duration and outputs a laser beam of femtosecond pulses. The amplifier includes a dispersion controller that compensates a dispersion of the amplified stretched pulses, making the repetition rate of the laser adjustable between procedures or according to the speed of scanning. The laser engine can

be compact with a total optical path of less than 500 meters, and have a low number of optical elements, e.g. less than 50.

指定代表圖：



符號簡單說明：

100・・・振盪器

150・・・分光器

200・・・擴展壓縮器

300・・・光學放大器

500・・・法拉第隔離器

550、560・・・偏振器

圖2

發明專利說明書

（本說明書格式、順序，請勿任意更動）

【發明名稱】（中文/英文）

具有可變重複率之高功率飛秒雷射 / High Power Femtosecond Laser with Variable Repetition Rate

【技術領域】

[0001]本專利文件關於一種具有可調整重複率高功率飛秒雷射的飛秒雷射。

【先前技術】

[0002]在許多現今挑戰亦增的雷射應用當中，於每次脈衝中能夠承載高能量的較短脈衝之需求持續存在。這些特徵可保證在雷射應用當中有較佳的控制與較高的操作速率。在此領域的演進中值得注意的一個步驟，爲可輸出飛秒雷射脈衝的雷射系統之出現與成熟化。這些飛秒雷射可用於多種應用，包括數種不同型式的眼部外科手術，其中這些超短脈衝能夠提供受到良好控制的組織改造。

【發明內容】

[0003]在此文件中提供用於建構與操作飛秒脈衝雷射的設計與技術，包括具有連續變頻脈衝放大之雷射系統的示例與實施，其中一些具有少量的光學元件，一些具有較低的故障頻率，其它的則具有適度少許的實體範圍，而其它可在不實質調整系統的情況下允許重複率的改變，而一些可降低熱透鏡效應的靈敏度。

[0004]例如，一些雷射引擎的示例包括可產生與輸出飛

秒種子脈衝光束的振盪器；擴展壓縮器，其可擴展該等種子脈衝的持續時間；及放大器，其自該擴展壓縮器接收被擴展的種子脈衝，放大被選出的擴展種子脈衝之振幅以產生放大的擴展脈衝，並輸出所放大的擴展脈衝之雷射光束，其中該擴展壓縮器接收所放大的擴展脈衝的雷射光束，壓縮該等放大擴展脈衝的持續時間，並輸出其脈衝持續時間少於1,000飛秒之飛秒脈衝的雷射光束，且該放大器包括色散補償器，以降低該等放大擴展脈衝的色散。

[0005]在一些示例中，該振盪器爲二極體泵浦光纖振盪器，並輸出轉換受限的種子脈衝。

[0006]在一些示例中，該振盪器產生具有種子脈衝持續時間少於1,000飛秒之光束。

[0007]在一些實施例中，該振盪器輸出種子脈衝重複率在10-100 MHz與20-50 MHz中之一種的範圍的光束。

[0008]在一些實施例中，該擴展壓縮器包括連續變頻體積布拉格(Bragg)光柵。

[0009]在一些實施例中，該擴展壓縮器包括光熱式折射玻璃。

[0010]在一些實施例中，該擴展壓縮器可擴展該等飛秒種子脈衝之持續時間高於10倍。

[0011]在一些實施例中，該擴展壓縮器可擴展該等飛秒種子脈衝之持續時間至1,000-200,000飛秒的擴展持續時間。

[0012]在一些實施例中，該雷射引擎並未包含可調式擴

展壓縮器。

[0013]在一些實施例中，該雷射引擎包括偏振鏡，及位在該振盪器與該擴展壓縮器之間的λ/4板，其重新導向擴展的種子脈衝之光束朝向該放大器。

[0014]在一些實施例中，該雷射引擎包括法拉第(Faraday)隔離器，其自該擴展壓縮器接收該擴展種子脈衝的光束，朝向該放大器輸出該擴展種子脈衝的光束，自該放大器接收放大的擴展脈衝之雷射光束，朝向該擴展壓縮器之壓縮器埠輸出該放大的擴展脈衝之雷射光束，並將該振盪器隔離於該放大的擴展脈衝之雷射光束。

[0015]在一些實施例中，該放大器包括光學元件，且該色散補償器引進在符號上相反於由該放大器之光學元件所引進之色散的色散。

[0016]在一些實施例中，由該色散補償器所引進的色散與該色散補償器之外該放大器之光學元件在一次往返內所引進的色散基本上其大小相同，而符號相反。

[0017]在一些實施例中，該色散補償器包括連續變頻鏡、連續變頻光纖、連續變頻光柵、稜鏡、或連續變頻穿透式光學元件中至少一個。

[0018]在一些實施例中，該放大器包括增益材料，其可放大該等選出之擴展種子脈衝的振幅，兩個末端鏡可定義共振腔，及兩個折疊反射鏡，其可折疊該放大器內的共振光學路徑，其中該等兩個末端鏡與該等兩個折疊反射鏡中至少一個爲連續變頻鏡。

[0019]在一些實施例中，該連續變頻鏡對該等放大的擴展脈衝引進負色散。

[0020]在一些實施例中，該雷射引擎組態成利用與該雷射引擎之所有光學元件基本上相同的設置來輸出具有第一重複率，而在後續具有不同的第二重複率之雷射光束。

[0021]在一些實施例中，該第一重複率與該第二重複率落在下列範圍中之一個：10 kHz-2 MHz、50 kHz-1 MHz或100 kHz-500 kHz。

[0022]在一些實施例中，該雷射引擎可被修正成當該未修正的雷射引擎對於該等第一與第二重複率利用不同的光學元件設置時，即可利用與該第一重複率基本上相同的所有光學元件之設置來輸出具有該第二重複率之雷射光束。

[0023]在一些實施例中，該放大器組態成當重複率改變時可改變在該放大器中該等放大的擴展脈衝之往返次數，而可保持該放大器之光學設置不改變。

[0024]在一些實施例中，該放大器之末端鏡至末端鏡的折疊反射光學路徑小於1公尺。

[0025]在一些實施例中，該放大器爲傾腔再生式放大器(cavity dumped regenerative amplifier)、連續變頻脈衝放大器或Q切換式放大器。

[0026]在一些實施例中，該放大器包括切換式偏振器，位在末端鏡之間的光學路徑上，其可藉由在該切換式偏振器調整該放大擴展脈衝之偏振的偏振調整狀態，與該切換式偏振器基本上並不調整該放大擴展脈衝之偏振的偏振未

調整狀態之間切換，而來選擇擴展的脈衝。

[0027]在一些實施例中，該雷射引擎可包括高電壓功率切換器，其可控制該切換式偏振器由該偏振未調整狀態切換至該偏振調整狀態，而其上升時間小於5奈秒、4奈秒或3奈秒。

[0028]在一些實施例中，該雷射引擎在1-120秒、10-60秒與20-50秒中的一種範圍內改變該飛秒脈衝雷射光束的第一重複率成爲第二重複率。

[0029]在一些實施例中，該雷射引擎於範圍在1微秒到1秒的變化時間內改變該飛秒脈衝雷射光束的第一重複率成爲第二重複率。

[0030]在一些實施例中，該放大器包括至少一聚焦鏡與雷射晶體，其設置在非常靠近該聚焦鏡的焦點處。

[0031]在一些實施例中，該雷射引擎組態成使得當該雷射引擎的重複率由第一數值改變成第二數值時，其中兩數值係在10 kHz到2 MHz的範圍內，則該輸出的雷射光束的直徑改變少於10%及20%中的一個，或是該輸出的雷射光束中心移到少於該光束直徑的20%及40%中的一個。

[0032]在一些實施例中，該雷射光束的飛秒脈衝之能量的範圍在1-100 μJ/脈衝、10-50 μJ/脈衝或20-30 μJ/脈衝中的一個之內。

[0033]在一些實施例中，該雷射引擎輸出的雷射光束之功率大於0.1 W、1 W或10 W中的一種。

[0034]在一些實施例中，該雷射引擎爲眼部外科手術系

統的一部份。

[0035]在一些實施例中，利用雷射引擎產生雷射光束的方法包括以下步驟：利用振盪器產生其持續時間少於1000飛秒的種子脈衝光束；利用脈衝擴展器擴產該等種子脈衝的持續時間；利用放大器放大選出的擴展種子脈衝之振幅，以產生放大的擴展脈衝；利用脈衝壓縮器壓縮該放大的擴展脈衝之持續時間至低於1,000飛秒；輸出飛秒脈衝的雷射光束，其第一重複率之範圍在10 kHz-2 MHz，且其脈衝持續時間低於1,000飛秒；將該重複率由該第一重複率改變成範圍在10 kHz-2 MHz中的第二重複率，且基本上不需要改變該雷射引擎的光學設置；及輸出具有該第二重複率的飛秒脈衝雷射光束，且其脈衝持續時間低於1,000飛秒。

[0036]在一些實施例中，該放大步驟包括利用該放大器中的色散補償器，來降低由於該放大器的光學組件所造成該等放大的擴展脈衝之色散。

[0037]在一些實施例中，該降低色散步驟包括由該放大器中至少一連續變頻鏡引進一補償色散，其中該補償色散對於除了該色散補償器之外該放大器之所有光學元件在每次往返時所引進的色散，基本上大小相同而符號相反。

[0038]在一些實施例中，該改變重複率的步驟包括：於實質上保持該放大器之光學設置不改變的情況下，改變在該放大器中的往返次數。

[0039]在一些實施例中，該擴展步驟與該壓縮步驟由相同的擴展壓縮器所執行。

[0040]在一些實施例中，在已經完成輸出具有該第一重複率的雷射光束之後，輸出具有1-120秒、10-60秒或20-50秒當中一種之內的第二重複率之雷射光束。

[0041]在一些實施例中，在範圍1微秒到1秒的改變時間內將該重複率由該第一重複率改變到該第二重複率。

[0042]在一些實施例中，雷射引擎包括振盪器，其可產生具有脈衝持續時間少於1000飛秒的脈衝光束；擴展壓縮器，其擴展該光束之該等脈衝的持續時間；及放大器，其放大該等擴展的光線脈衝之振幅以產生放大的擴展脈衝，其中該擴展壓縮器壓縮該等放大的擴展脈衝之持續時間，並輸出雷射脈衝的光束；其中該雷射引擎可用於輸出具有範圍在10 kHz-2 MHz之第一重複率的雷射脈衝光束，且基本上利用該雷射引擎之所有光學元件的相同設置下，接著輸出具有範圍在10 kHz-2 MHz之第二重複率的雷射脈衝光束，對於該等第一與第二重複率該等雷射脈衝之持續時間小於1000飛秒。

[0043]在一些實施例中，該放大器包括色散補償器，其至少部份補償由該放大器之光學元件所引進的色散。

[0044]在一些實施例中，該放大器包括切換式偏振器，其位在該放大器之末端鏡之間，可在該切換式偏振器調整該等放大的擴展脈衝之偏振的狀態，及該切換式偏振器並不調整該等放大的擴展脈衝之偏振的狀態之間切換，其上升時間小於5奈秒、4奈秒與3奈秒中之一個。

[0045]在一些實施例中，該放大器包括至少一聚焦鏡；

及增益晶體，其位在靠近該聚焦鏡的焦點處。

[0046]在一些實施例中，該雷射引擎在時間少於60秒、1秒及10微秒中之一個當中於該第一重複率與該第二重複率之間切換。

[0047]在一些實施例中，雷射引擎包括振盪器，其輸出飛秒種子脈衝；擴展器，其擴展該等種子脈衝的持續時間；放大器，其放大該等擴展的種子脈衝成爲放大擴展脈衝；並包括色散補償器，以補償由該放大器之光學元件所引進的該等放大擴展脈衝的色散；及壓縮器，其接收該等放大擴展脈衝，壓縮該等放大擴展脈衝的持續時間，並輸出飛秒脈衝雷射光束。

[0048]在一些實施例中，可變重複率雷射引擎包括Q切換傾腔再生式放大器；該放大器包括兩個末端鏡，其中該雷射引擎輸出飛秒雷射脈衝；且該等末端鏡之間之光學路徑的長度小於2公尺。

[0049]在一些實施例中，該等末端鏡之間的該光學路徑的長度小於1公尺。

[0050]在一些實施例中，該雷射引擎包括振盪器，其產生被傳送至該放大器之種子脈衝，其中由該等種子脈衝之光子在該振盪器中產生的點，至該雷射引擎輸出該等雷射脈衝的點之整個自由空間光學路徑長度的長度，少於500公尺、300公尺及150公尺中之一個。

[0051]在一些實施例中，該放大器之腔穴的所有邊緣尺寸小於1公尺或0.5公尺中之一，其中該放大器之腔穴覆蓋

該放大器之所有光學元件。

[0052]在一些實施例中，該放大器之底面積少於1 m^2或0.5 m^2中之一。

[0053]在一些實施例中，該雷射引擎包括擴展壓縮器，其包括連續變頻體積布拉格光柵(chirped volume Bragg grating)。

[0054]在一些實施例中，該放大器包括色散補償器，其補償由該放大器之光學元件所引進的色散。

[0055]在一些實施例中，該放大器包括雷射晶體，其放大雷射脈衝之振幅；及兩個折疊反射鏡，其折疊反射該放大器之內的共振光學路徑，其中該等兩個末端鏡與該等兩個折疊反射鏡中至少一個爲連續變頻鏡。

[0056]在一些實施例中，該雷射引擎組態成輸出具有在一重複率範圍中第一重複率的雷射光束；及後續利用基本上該雷射引擎之所有光學元件的相同設置，輸出具有在該重複率範圍中的第二重複率。

[0057]在一些實施例中，該第一重複率與該第二重複率落在下列範圍中之一個：10 kHz-2 MHz、50 kHz-1 MHz或100 kHz-500 kHz。

[0058]在一些實施例中，該雷射引擎組態成該第一重複率可在時間少於60秒、1秒及1微秒中之一個當中改變爲該第二重複率。

[0059]在一些實施例中，該放大器包括切換式偏振器，其位在該等末端鏡之間，在少於5 ns、4 ns或3 ns中之一個

內，於該切換式偏振器調整放大的脈衝之偏振的狀態，與該切換式偏振器基本上並不調整該等放大脈衝之偏振的狀態之間切換。

[0060]在一些實施例中，該放大器包括至少一聚焦末端鏡；及雷射晶體，其設置在非常靠近該聚焦末端鏡的焦點處。

[0061]在一些實施例中，該雷射引擎包括振盪器，其產生及輸出飛秒種子脈衝的光束；擴展壓縮器，其擴展該等種子脈衝的持續時間；及放大器，其自該擴展壓縮器接收被擴展的種子脈衝，放大被選出的擴展種子脈衝之振幅以產生放大的擴展脈衝，並輸出放大擴展脈衝的雷射光束；其中該擴展壓縮器接收放大擴展脈衝的雷射光束，壓縮該等放大擴展脈衝的持續時間，並輸出其脈衝持續時間少於1,000飛秒之飛秒脈衝的雷射光束；其中由該等種子脈衝的光子在該振盪器中產生的點，至該雷射引擎輸出該等雷射脈衝的點之光學路徑長度的長度少於500公尺。

[0062]在一些實施例中，該光學路徑的長度少於300公尺。

[0063]在一些實施例中，可變重複率雷射引擎包括振盪器，其產生並輸出飛秒種子脈衝的光束；擴展壓縮器，其擴展該等種子脈衝的持續時間；及連續變頻脈衝放大器，其放大被選出之擴展種子脈衝的振幅，以產生放大的擴展脈衝；其中該放大器包括切換式偏振器，其切換時間少於5 ns；該擴展壓縮器壓縮該等放大擴展脈衝的持續時間至飛

秒數值；及該雷射引擎佔用的面積少於1 m^2。

[0064]在一些實施例中，該雷射引擎爲外科手術雷射系統的一部份，該外科手術雷射系統具有該雷射引擎，及在該外科手術雷射系統之上平台上的成像系統。

[0065]在一些實施例中，可變重複率雷射引擎包括振盪器，其產生並輸出飛秒種子脈衝的光束；整合式擴展壓縮器，其擴展該等種子脈衝的持續時間；及Q切換傾腔再生式放大器，其放大被選出的擴展種子脈衝之振幅以產生放大的擴展脈衝；其中該擴展壓縮器壓縮該等放大的擴展脈衝之持續時間以輸出飛秒雷射脈衝，且該雷射引擎的光學元件數目少於75。

[0066]在一些實施例中，該雷射引擎的光學元件數目少於50。

[0067]在一些實施例中，該雷射引擎除了振盪器之外的部份之光學元件數目少於50。

[0068]在一些實施例中，該雷射引擎除了振盪器之外的部份之光學元件數目少於35。

[0069]在一些實施例中，光學元件爲下列中之一個：鏡面、鏡片、平行板、偏振器、隔離器、任何切換式光學元件、折射式元件、穿透式元件，或反射式元件。

[0070]在一些實施例中，光學元件將光線由空氣輸入，並離開到空氣中。

[0071]在一些實施例中，該整合式擴展壓縮器包括連續變頻體積布拉格光柵。

[0072]在一些實施例中，該放大器包括色散補償器，其補償由該放大器之光學元件所引進的色散。

[0073]在一些實施例中，該放大器包括兩個末端鏡，其定義共振腔；及兩個折疊反射鏡，其可折疊反射在該放大器之內的共振光學路徑，其中該等兩個末端鏡與該等兩個折疊反射鏡中至少一個爲連續變頻鏡。

[0074]在一些實施例中，該雷射引擎組態成輸出具有在一重複率範圍中第一重複率的雷射光束；及後續利用基本上該雷射引擎之所有光學元件的相同設置，輸出具有在該重複率範圍中的第二重複率的雷射光束，其中該等第一與第二重複率之範圍在10 kHz-2 MHz、50 kHz-1 MHz，或100 kHz-500 kHz中之一個。

[0075]在一些實施例中，該雷射引擎組態成該第一重複率可在改變時間少於1秒內被改變爲該第二重複率。

[0076]在一些實施例中，該放大器包括切換式偏振器，其位在該等末端鏡之間，可在少於5 ns、4 ns或3 ns中之一個之內，於該切換式偏振器調整該等放大的擴展脈衝之偏振的狀態，與該切換式偏振器基本上並不調整該等放大的擴展脈衝之偏振的狀態之間切換。

[0077]在一些實施例中，該放大器包括至少一聚焦鏡；及雷射晶體，其位在非常靠近該聚焦鏡的焦點處。

[0078]在一些實施例中，雷射引擎包括振盪器，其產生及輸出飛秒種子脈衝的光束；擴展壓縮器，其擴展該等種子脈衝的持續時間；及放大器，其自該擴展壓縮器接收該

等擴展的種子脈衝，放大被選出的擴展種子脈衝之振幅以產生放大的擴展脈衝，並輸出該等放大擴展脈衝；其中該擴展壓縮器接收該等放大擴展脈衝，壓縮該等放大擴展脈衝的持續時間，並輸出其脈衝持續時間少於1,000飛秒之飛秒脈衝的雷射光束；其中由該雷射引擎在除了該振盪器之外的部份之光學元件數目少於50。

[0079]在一些實施例中，該雷射引擎的光學元件數目少於75。

[0080]在一些實施例中，一種利用雷射系統掃描的方法，其包括以下步驟：利用雷射引擎產生具有可變重複率的雷射脈衝；利用掃描雷射傳遞系統聚焦該等雷射脈衝至目標區域中的聚焦地點；利用該掃描雷射傳遞系統以一掃描速率掃描在該目標區域中的該聚焦地點；改變該掃描速率；及利用重複率控制器根據該改變的掃描速率調整該重複率。

[0081]在一些實施例中，該產生步驟包括由振盪器產生飛秒種子脈衝；由擴展壓縮器擴展該等種子脈衝；由放大器放大被選出的擴展種子脈衝成爲放大的擴展脈衝；及由該擴展壓縮器壓縮該等放大的擴展脈衝成爲飛秒雷射脈衝。

[0082]在一些實施例中，該方法包括調整該重複率以大致維持在該目標區域中雷射產生的氣泡之密度在一選擇數值附近。

[0083]在一些實施例中，該等氣泡的密度爲線性密度、

表面密度或體積密度中之一個。

[0084]在一些實施例中，該調整重複率步驟包括以正比於該掃描速率調整該重複率。

[0085]在一些實施例中，該調整重複率步驟包括在1微秒至1秒的時間範圍內調整該重複率由第一數值至第二數值。

[0086]在一些實施例中，該掃描聚焦地點步驟包括沿著最小加速路徑掃描該聚焦地點。

[0087]在一些實施例中，該方法包括沿著轉向場路徑XY掃描該聚焦地點；且當接近該路徑之轉向場部份時減慢該重複率。

[0088]在一些實施例中，該方法包括沿著螺旋掃描該雷射光束；及當該掃描接近該螺旋的中心時減慢該重複率。

[0089]在一些實施例中，該調整重複率包括，由該重複率控制器接收關於感測到該改變中掃描速率中之一個的該改變的掃描速率的資訊，並由處理器或記憶體取得關於該改變中掃描速率的電子資訊，並根據所接收到關於該改變的掃描速率之資訊調整該重複率。

[0090]在一些實施例中，可變重複率雷射掃描系統包括振盪器，其產生並輸出飛秒種子脈衝的光束；擴展壓縮器，其擴展該等種子脈衝的持續時間，自放大器接收放大的擴展脈衝，壓縮該等放大擴展脈衝的持續時間，並輸出具有一重複率的飛秒脈衝之雷射光束；該放大器自該擴展壓縮器接收該等擴展的種子脈衝，放大被選出的擴展種子脈衝

之振幅以產生放大的擴展脈衝，並朝向該擴展壓縮器輸出該等放大的擴展脈衝；及掃描光學元件，其利用一可變掃描速率掃描在目標區域中該雷射光束的聚焦地點以產生光分裂的地點；其中該雷射掃描系統改變該重複率以產生具有預定密度輪廓的光分裂之地點。

[0091]在一些實施例中，該放大器包括色散補償器，其降低該等放大的擴展脈衝之色散。

[0092]在一些實施例中，該放大器包括切換式偏振器，其在該放大器中旋轉該等擴展脈衝的偏振平面，其中該切換式偏振器的上升時間低於5 ns、4 ns或3 ns中之一個。

[0093]在一些實施例中，該雷射掃描系統包括控制電子元件，其施加控制信號至該切換式偏振器，以使得該切換式偏振器在上升時間小於5 ns、4 ns及3 ns中之一個來切換。

[0094]在一些實施例中，一種利用雷射引擎掃描的方法包括以下步驟： 產生具有一重複率的飛秒雷射脈衝；將該等雷射脈衝聚焦至目標區域中的聚焦地點以產生光分裂的地點；以一掃描速率掃描在該目標區域中的該聚焦地點；及於該掃描期間調整該重複率以產生具有密度輪廓的光分裂地點。

[0095]在一些實施例中，該調整步驟包括產生具有線性地點密度、表面地點密度與體積地點密度中之一個的光分裂地點，其在目標區域中基本上被保持爲均勻。

[0096]在一些實施例中，該調整步驟包括根據該掃描速率的變化調整該重複率。

[0097]在一些實施例中，該調整步驟包括正比於該掃描速率調整該重複率。

[0098]在一些實施例中，該調整重複率步驟包括在1微秒至1秒的時間範圍內調整該重複率由第一數值至第二數值。

[0099]在一些實施例中，該產生步驟包括由振盪器產生飛秒種子脈衝；由擴展壓縮器擴展該等種子脈衝；由放大器放大被選出的擴展種子脈衝成爲放大的擴展脈衝；及由該擴展壓縮器壓縮該等放大的擴展脈衝成爲飛秒雷射脈衝。

[0100]在一些實施例中，該掃描聚焦地點步驟包括沿著最小加速路徑掃描該聚焦地點。

[0101]在一些實施例中，該方法包括沿著轉向場路徑掃描該聚焦地點；且當接近該路徑之轉向場部份時減慢該重複率。

[0102]在一些實施例中，該方法包括沿著螺旋掃描該雷射光束；及當該掃描接近該螺旋的中心時減慢該重複率。

[0103]在一些實施例中，該方法包括沿著直線的末端與直線的轉角中之一個掃描該雷射光束；及根據該掃描接近該直線的末端及該直線的轉角中之一個來減慢該重複率。

[0104]在一些實施例中，該方法包括接收關於該掃描速率所儲存或感測的資訊，並根據所接收之關於該掃描速率的資訊調整該重複率。

[0105]在一些實施例中，該方法包括接收關於該目標區

域所感測或成像的資訊，並根據所接收之關於該目標區域的資訊調整該重複率。

[0106]在一些實施例中，雷射引擎可包括振盪器，其輸出飛秒種子光學脈衝，及放大器，其放大種子光學脈衝以產生放大的光學脈衝。此放大器包括光腔，其被耦合來接收與環行該等種子光學脈衝，及光學開關裝置，其耦合至該光腔以控制該等接收的種子光學脈衝之光線耦合到該光腔中，並控制在該光腔內光線之耦合離開成爲該放大器之輸出光線。該光學開關裝置組態成控制與調整耦合在該光腔之內的光線往返次數，以控制與調整由該放大器所產生之該等放大的光學脈衝之脈衝重複率。該放大器亦包括在該光腔內的光學增益媒體，用以放大該等種子光學脈衝成爲放大的光學脈衝，及該光腔內的色散補償器，用以補償由該放大器所引致的該等放大光學脈衝的色散。該雷射引擎在該放大器之外包括一或多個光學元件，用以在每個種子光學脈衝被耦合至該放大器中之前擴展該等種子光學脈衝的持續時間，並壓縮由該放大器輸出的該等放大光學脈衝的持續時間以產生該等放大光學脈衝。該雷射引擎可組態成在該放大器之外不具有色散補償裝置，其係提供用於補償由該放大器所引致之該等放大光學脈衝的色散。

[0107]在其它實施例中，一種用於操作雷射引擎以產生飛秒光學脈衝的方法可包括擴展飛秒種子光學脈衝，以產生在每個脈衝中具有降低光學功率之擴展種子光學脈衝；及耦合該等擴展種子光學脈衝到光學放大器之光腔當中，

以放大每個擴展的種子光學脈衝之光學功率，用以產生放大的擴展光學脈衝。在該光學放大器內，使用光學補償器來提供色散補償給每個光學脈衝，其中該光學補償器建構成引進一色散，其與在該放大器之光腔之內光線一次往返當中，由該放大器所引致的一色散的符號相反，而大小實質上相等，其中排除由該色散補償器所造成的色散。此方法包括操作耦合於該光腔的光學開關裝置，以控制該等擴展的種子光學脈衝之光線耦合到該光腔當中，以及該等放大擴展光學脈衝之光線耦合離開該光腔；壓縮離開該光腔的該等放大擴展光學脈衝的脈衝持續時間，以產生壓縮的放大光學脈衝做爲該雷射引擎之輸出；及操作該光學開關裝置以控制與調整光線在該光腔內的往返次數，以控制及調整該等壓縮的放大光學脈衝之脈衝重複率，而不需要使用位在該放大器之外的色散補償裝置來補償由該放大器所引致的色散。

【圖式簡單說明】

[0108]圖1A至圖1B爲高功率飛秒雷射引擎1的兩個具體實施例。

[0109]圖2爲更爲詳細顯示該高功率飛秒雷射引擎1的具體實施例。

[0110]圖3A顯示連續變頻雷射脈衝的觀念。

[0111]圖3B爲擴展器200'與壓縮器400之示例。

[0112]圖3C顯示整合式擴展壓縮器200之示現例。

[0113]圖4爲放大器300之具體實施例。

[0114]圖5A至圖5B顯示雷射腔穴的泵浦-增益-傾倒循環。

[0115]圖6A至圖6D顯示掃描具有固定與可變重複率之外科手術圖案。

[0116]圖7A至圖7B顯示關於在放大器300中雷射晶體310之兩種不同溫度下之熱透鏡效應的設計挑戰。

[0117]圖7C至圖7D顯示具有降低的熱透鏡效應之放大器300的兩種示現例。

[0118]圖8顯示該光束光學功率做爲該操作溫度之函數的相關性。

【實施方式】

[0119]在早期的飛秒雷射中，該脈衝長度之極端短造成在這些脈衝中的極端高功率。但是此高功率威脅到會破壞該等雷射之增益媒體。該解決方案以連續變頻脈衝放大(CPA，Chirped Pulse Amplification)的型式達到。在此技術中，產生飛秒種子脈衝，然後該等種子脈衝的長度以10-1000倍擴展到該微微秒的範圍，因此徹底地降低脈衝內的功率。這些擴展的脈衝可以安全地利用該增益媒體來放大，而不會造成損害。放大動作後接著爲壓縮動作，其壓縮該等放大的脈衝之長度回到飛秒。此CPA方法目前已經被引進到許多種應用當中。

[0120]但是，CPA雷射亦有缺點。基本上，這些雷射具有大量的光學元件，且相對地相當複雜。這些因素，使得故障頻率相當高，並且降低該等雷射能夠可靠地開啓與關

閉的次數。同時，該等CPA雷射之異常大的尺寸使得將它們整合到醫療裝置中會非常有挑戰性，因爲那些基本上係使用在外科手術室或開刀房之有限的空間中。再者，如果不同的手續需要改變該等脈衝之重複率，此改變需要執行大量光學元件之耗費時間的重新調整。此外，熱透鏡效應實質地影響大多數CPA雷射的光學效能，使得它們對於該雷射之操作功率相當敏感。此敏感度爲重複率改變之另一種障礙。

[0121]用於建構與操作在此文件中所述之飛秒脈衝雷射的雷射設計與技術可實施成亦可處理在其它飛秒脈衝雷射中的多種技術問題。

[0122]圖1A所示爲連續變頻脈衝放大(CPA)或傾腔再生式放大器(CDRA，Cavity Dumped Regenerative Amplifier)雷射引擎1，其中包括振盪器100、擴展壓縮器200與光學放大器300。

[0123]振盪器100能夠產生與輸出飛秒種子脈衝的光束。擴展壓縮器200能夠擴展這些種子脈衝的持續時間。放大器300能夠自擴展壓縮器200接收該等擴展的種子脈衝，放大該等擴展的脈衝之振幅，並輸出放大的擴展脈衝之雷射光束。這些放大的擴展脈衝能夠光學地耦合回到擴展壓縮器200當中，其能夠壓縮該等放大的擴展脈衝之持續時間，並輸出飛秒脈衝的雷射光束。

[0124]圖1B所示爲另一種CPA雷射引擎1'之示例，其中於光學振盪器100'與光學脈衝擴展器200'下游的光學放大

器300'能夠光學地耦合該等放大的擴展脈衝到獨立壓縮器400當中，其能夠壓縮該等放大的擴展脈衝，並輸出飛秒脈衝的雷射光束。

[0125]雷射引擎1與1'之說明包含許多控制功能與方法步驟。這些功能與步驟可由一或多個控制器、處理器與其它電腦控制器來控制。這些控制器、處理器與電腦控制器能夠利用先進的軟體，其可彼此互動。爲了清楚說明，這些處理器、控制器與它們的相對應軟體被隱藏在此專利文件之圖式當中，但其代表在一些實施中爲雷射引擎1與1'之說明的一部份。

[0126]在此申請案中的數種示例將以眼部手術應用來做說明，例如白內障手術、囊切除術或角膜手術，雷射引擎1之實施可用於相當寬廣範圍的應用，其包括許多種的眼部手術，例如視網膜與角膜手術，以及皮膚病學與牙科應用，不同的外科手術應用，及多種材料加工應用，其形成一塊具有雷射光分裂材料，或是某種其它雷射輔助製程。

[0127]如上所述，一些連續變頻的脈衝放大CPA/CDRA雷射引擎有許多種缺點。雷射引擎1之具體實施例可組態成藉由利用以下設計原理之一些或全部，以及其它設計考量而對這些問題提供解決方案：

[0128](1)許多雷射具有大量的光學元件，例如一百個或更多，使得它們的設計很複雜且昂貴。在本文中，雷射引擎1之具體實施例總共具有少至50個光學元件，且在振盪器100之外不超過35個光學元件。

[0129](2)具有大量光學元件並具有相對應複雜性的雷射之故障頻率很高。在一些CPA/CDRA雷射中，在該雷射經過「循環」(cycled)之後，即開啓與關閉30-40次之後，故障的機率即相當高。這些系統通常在30-40個切換循環或更多循環之後需要防範性維護，以在該雷射的日常作業期間預先防止發生實際的故障。

[0130]在本文中，因爲大爲降低的光學元件數目以及創新的色散控制解決方案，雷射引擎1的具體實施例可預期在日常作業之下循環100、120或更多次數，藉此大爲降低所需要的服務頻率，並增加整體可靠度。

[0131](3)在一些CPA/CDRA雷射之大幅實體範圍與往返的相對長的持續期間轉譯成如下所述之長充電時間，因此限制它們的重複率、以及它們被用於空間受到限制的外科手術裝置中之利用性。

[0132]在本文中，雷射引擎1之具體實施例具有小型的共振腔，其在一些具體實施例中具有短於1公尺，而在其它具體實施例中短於2公尺的末端鏡到末端鏡之光學路徑。小型化亦爲有助於雷射引擎1之高重複率的因素，其最高可到300、500或甚至1,000 kHz。

[0133]以上的小型化可解譯成由產生光子的點到離開的點所測量之整體光學路徑，並包括該腔穴中所有的往返，其可低到150公尺儘管這些雷射有高重複率。

[0134](4)一些CPA/CDRA雷射可微細地調整用於在特定重複率下操作。此調整包含由擴展壓縮器/壓縮器200/400

補償在該特定重複率下擴展器壓縮器200與放大器300之色散。但是，如果一應用需要改變該重複率，該擴展器與該放大器在此新的重複率下造成不同的色散，打亂該CPA/CDRA雷射之微細調整的色散補償。爲了補償此改變的色散，基本上擴展器200與壓縮器200/400之該等光學元件需要在一耗時的程序中進行重新調整。此重新調整使其技術上以眼部外科手術程序的時間比例而言，會相當繁複地來改變這些CPA/CDRA雷射之重複率。因此，大多數商用眼部CPA雷射並未提供可變重複率的功能，且無一可在外科手術程序期間提供可改變的重複率。

[0135]在本文中，雷射引擎1的具體實施例可包括色散控制器或色散補償器，其可降低及甚至最小化由放大器300所造成的雷射光束之色散。此色散的最小化允許該重複率的改變，而不需要對於雷射引擎1之該等光學元件進行耗時的重新調整。因此，包括該色散控制器使其有可能在時間相當重要的外科手術程序期間改變該重複率。一示例爲使用第一重複率於白內障手術，而使用第二重複率於囊切除術或角膜手術。如所熟知，在這些外科手術中，時間因素非常關鍵。

[0136](5)在一些案例當中，於外科手術程序期間，當該雷射光束具有固定重複率時，切割圖案可用於放置具有不均勻密度的雷射光點。示例包括在環繞光柵或掃描圖案的轉向點，或在窄化或變寬的螺旋中減慢掃描速率。

[0137]在本文中，雷射引擎1的具體實施例可組態成具

有基本上連續可調整的重複率，並可近乎同步地隨著該改變的掃描速率調整該重複率，以補償該掃描速率的變化，允許雷射光點形成具有近乎固定的密度或具有預定的密度輪廓。

[0138](6)此外，熱透鏡效應負面地影響到一些CPA/CDRA雷射的光學效能，並使得它們對於雷射光束之功率與重複率的變化非必要地敏感。在本文中，雷射引擎1的具體實施例可利用熱透鏡效應補償技術，使得這些具體實施例對於所施加雷射光束之功率與重複率的變化可以相當不敏感。

[0139]圖2所示爲詳細說明雷射引擎1的一種特定實施。振盪器100可爲許多種的光源，其能夠產生與輸出種子脈衝給雷射引擎1。示例包括二極體泵浦光纖振盪器。該振盪器可以包括單一二極體，例如在808 nm波長下操作的GaAs二極體，或是許多種其它二極體。

[0140]光纖振盪器遠小於基於自由空間光束傳遞的振盪器。在外科手術應用中，當手術室的擁擠度爲強制性的限制時，降低該雷射引擎的空間範圍爲非常有價值的設計特徵。

[0141]在一些示例中，該振盪器100輸出高品質種子脈衝。一些因素會歸因於高脈衝品質，詳述如下。

[0142](i)在一些具體實施例中，該二極體可包括頻率穩定棒，例如在該二極體內的體積布拉格光柵。這些光柵能夠提供具有低雜訊與高脈衝到脈衝穩定性的脈衝。該光纖

可由摻雜有Nd或Yb的玻璃所形成。

[0143](ii)振盪器100可包括半導體飽和吸收鏡(SEmiconductor Saturable Absorber Mirror，SESAM)。利用一或多個SESAM可改善該等產生的脈衝當中該等模式的同調性，造成基本上爲模式鎖定的作業。

[0144]具有上述設計原理的振盪器能夠輸出基本上爲轉換受限的種子脈衝，例如具有高斯(Gaussian)形狀。在一些示例中，亦可產生平頂脈衝。該脈衝持續時間可少於1,000飛秒(fs，femtosecond)。在一些實施中，該脈衝持續時間可在50-1,000飛秒範圍內，在一些其它具體實施例中在100-500飛秒範圍內。該種子脈衝頻率或重複率在10-100 MHz的範圍內，在其它具體實施例則在20-50 MHz範圍內。降低該種子脈衝頻率低於10或20 MHz仍會增加一系列的設計挑戰。爲此原因，大多數振盪器的操作頻率高於20 MHz。

[0145]該種子脈衝光束的功率在10-1000 mW的範圍內，在其它具體實施例則在100-200 mW範圍內。

[0146]對於許多時間性的考量，振盪器100可做爲主控時脈。

[0147]擴展壓縮器200藉由對於該脈衝之不同頻率成分引進不同的延遲時間而能夠擴展該等種子脈衝。簡言之，該擴展壓縮器可引進色散或連續變頻。

[0148]圖3A詳細例示此連續變頻。擴展壓縮器200可以接收短脈衝，其頻率範圍或頻譜係橫跨大多數該脈衝持續時間，並大致均勻，或呈「白光」。換言之，該等不同頻率

成分的振幅在該脈衝的開始處係大致均勻，並在該脈衝的持續時間期間皆可維持如此。擴展壓縮器200藉由對於這種「白光」脈衝的紅光、綠光與藍光成分引進不同延遲時間而可擴展該脈衝長度。因此，由擴展壓縮器200輸出的該脈衝之頻率範圍或頻譜可變爲與時間相關。根據一種典型的習慣，脈衝當中當該前導部份主要是紅光頻率而尾隨部份主要是藍光頻率時，即稱之爲具有正色散或連續變頻。

[0149]本說明所指在時間領域中的連續變頻，例如是該等高頻與低頻成分之相對延遲。空間連續變頻，例如是在該光束內空間地隔離高頻與低頻成分會增加許多額外的設計挑戰，且不在擴展器200'或擴展壓縮器200所需要的該等功能當中。

[0150]擴展壓縮器200或擴展器200'藉由增進該脈衝之前導部份中的紅光內容並增進該脈衝之尾隨部份中的藍光內容而引進正連續變頻進入到初始爲白光的種子脈衝。同樣地，非白光脈衝亦可由擴展壓縮器200或擴展器200'進行連續變頻。

[0151]擴展壓縮器200可擴展該等飛秒種子脈衝的持續時間由50-1,000飛秒的範圍到1,000-200,000飛秒的擴展持續時間，或1-200微微秒，或甚至高到500 ps。擴展壓縮器200可擴展該等飛秒種子脈衝的持續時間大於10倍。在一些案例中，該擴展倍數可大於102、103、104或105。這些擴展倍數的每一者造成放大器300之不同的設計條件。

[0152]圖3B所示爲圖1B所示之該種雷射引擎1'能夠利

用擴展器200'與獨立的壓縮器400。擴展器200'可包括第一光柵201、鏡片202、第二光柵203與鏡面204。當短脈衝211進入擴展器200'時，第一光柵201可折射該等不同的頻率成分到不同的方向上。在離開第一光柵201時，該等分散的光束可以傳遞至鏡片202，並被重新導向至第二光柵203。一些具體實施例可以使用兩個鏡片來取代鏡片202。因爲第二光柵203與第一光柵201成一角度，且該等不同頻率的光束在分散的方向上傳遞，該等不同頻率成分會行進不同的距離，需要不同時間來達到。

[0153]例如，在圖3B中的擴展器200'中，具有在該頻譜之藍光區域中之頻率的該等成分會比在該紅光區域中的該等成分要行進更長的距離，因此得到相對於該入射短脈衝之紅光成分的延遲。在此處與整份文件中，術語「藍光」與「紅光」係用於例示性與相對的方式。它們分別代表具有較短與較長波長之脈衝頻譜的成分。在特定實施中，該雷射平均波長可在1000-1100 nm，而該脈衝之頻寬可在2-50 nm的範圍內，在一些案例中可在5-20 nm的範圍內。在此例中，該脈衝之整個頻譜係在紅外線區域。在此示例中，該術語「藍光」與「紅光」分別代表在該脈衝的頻寬內具有較短與較長波長之紅外線頻譜的部份。

[0154]第二光柵203的該等功能包括該連續變頻的部份控制，即該藍光成分相對於該紅光成分之延遲，以及該光束恢復爲基本上平行的光束以使其適合由鏡面204反射。鏡面204反射該等頻率隔開的平行光束，然後重新沿著它們的

光學路徑通過第二光柵203、鏡片202與第一光柵201。此時，該脈衝離開第一光柵201，該脈衝之藍光成分行進明顯較長的距離，因此落後於該紅光成分。

[0155]此延遲對於輸出的脈衝具有至少三個影響：(i)該脈衝長度明顯較長，(ii)該等不同頻率成分的振幅在時間上相對於彼此有偏移，偏移該等紅光成分至該脈衝的前導邊緣，該等藍光成分至該尾隨邊緣或反之亦然，(iii)該脈衝之整體能量被分佈於一較長的脈衝長度之上，而降低了該輸出脈衝的光學功率。在一些案例中，該脈衝持續時間可被擴展100、1000或更高倍數。相對應的功率可降低100、1000或更高倍數。總而言之，擴展壓縮器200或擴展器200'可擴展該脈衝，引進正連續變頻，並藉此實質上降低該脈衝之功率。

[0156]如上所述，降低該脈衝之尖峰功率爲CPA/CDRA雷射之優勢層面，因爲後續放大器300的腔穴光學元件不會暴露在過高功率的脈衝下，且因此避免受到該光束的損害。

[0157]圖3B亦例示壓縮器400的示例，其可包括第三光柵205、第四光柵207與鏡面208。一些示例在這些光柵之間不具有鏡片，而其它則具有一個或兩個鏡片。第三光柵205再次地導向該脈衝頻譜之不同成分在不同的方向上，其類似於擴展器200'之第一光柵201。第四光柵207再次地經由其方向部份地控制該等藍光與紅光成分之相對延遲，其類似於第二光柵203。但是，因爲現在第四光柵207的方向相反於第二光柵203，該等藍光成分之光學路徑現在較短，造

成一負連續變頻。此負色散允許該等擴展的脈衝之藍光成分追上該等紅光成分，縮短該等放大的擴展脈衝之整體持續時間由數百微微秒至數百飛秒。利用分開的擴展器200'與壓縮器400之設計爲圖1B之雷射引擎1'的具體實施例。

[0158]圖3B亦例示圖1B之設計的兩個敏感的層面，其中具有分開的擴展器200'與壓縮器400。

[0159](i)首先，擴展器200'、放大器300與壓縮器400需要彼此微細地調整，使得壓縮器400可恢復由擴展器200'所造成的擴展，以及由放大器300所造成具有高精度的後續色散。因此，設定鏡片202之位置與第一到第四光柵201-207之方向會需要特別高的精度來補償該等放大的擴展脈衝之色散，並將它們壓縮回到飛秒脈衝。當然同時高精度調整對於擾動相當敏感：溫度、往返次數與機械應力的微小變化會破壞到該精密調整，於圖1B之架構中對於雷射引擎1'需要維護與重新校準。

[0160](ii)在一些複雜或多重步驟的手續中，會需要改變該重複率。但是，這種重複率的改變基本上伴隨著往返次數的改變來最適化該等輸出的脈衝。然後，該等往返次數的改變通常造成該熱透鏡效應的改變，以及由放大器300造成的複合色散。因此，該重複率與往返次數的改變會破壞該擴展、色散與壓縮的仔細校準的平衡。

[0161]爲了抵消這些改變，如圖3B之箭頭所示，雷射引擎1'的一些實施可由改變鏡片202之位置、部份光柵201、203、205與207之位置或方向、鏡面204與208的位置、

或是該光束藉由移動一或多個鏡面撞擊鏡片202的位置來重新校準。無庸置疑地，這些改變基本上需要注意，且通常需要遞迴式的機械調整與精度校準，這些皆爲耗時的介入動作。

[0162]該重新校準的緩慢會造成應用上的問題，其中需要對於該脈衝-重複率之時間上的變化。此對於時間爲關鍵因素的應用中要特別避免，例如在眼部外科手術應用期間，其中病人控制眼睛移動的能力會慢到90秒。對於所有這些理由，大多數的雷射引擎並未提供一可改變重複率之功能。

[0163]此外，因爲在雷射引擎1'中，擴展器200'與壓縮器400隔開，且兩者包括多個光柵與鏡片，圖1B中該種雷射引擎1'的擴展器與壓縮器之空間範圍基本上係相當大的。

[0164]爲了降低擴展器200'與壓縮器400的空間底面積，以及降低校準時間，在雷射引擎1'與擴展器200'及壓縮器400之一些實施中能夠共用一或多個光學元件。在一些案例，它們能夠共用一個光柵，例如第一光柵201與第三光柵205可以相同。

[0165]在一些多重折疊反射的示例中，擴展器200'之該等兩個光柵可爲相同的物理光柵，該等鏡片與鏡面於不同通過期間在相同的光柵上導向來自不同方向的光束。在一些多重折疊反射的示例中，擴展器200之兩個光柵與壓縮器400之兩個光柵的所有功能可由單一共用的光柵來執行。

[0166]圖3C所示爲圖1A之具體實施例的擴展壓縮器

200之示例，其可提供對於這些挑戰之良好的解決方案。圖3C之擴展壓縮器200整合該等擴展與壓縮功能，因此其可利用於圖1A之雷射引擎1之具體實施例中。圖3C之示例中所實施的擴展壓縮器200例如是連續變頻的體積布拉格光柵(CVBG，Chirped Volume Bragg Grating)。此CVBG可爲疊層的堆疊，例如在光熱折射式(PTR，PhotoThermal Refractive)玻璃中，該等疊層具有適當的折射係數與隨著該等疊層位置改變的光柵周期。在這種設計中，該布拉格共振條件對於一脈衝之不同頻譜成分發生在不同的位置處。因此，不同的頻譜成分在不同的位置處反射，而達到在該脈衝內不同的時間延遲。

[0167]如圖3C之示例所示，當短「白光」脈衝211進入擴展壓縮器200時，因爲它們的波長較長，且在這些附近的區域中滿足該等布拉格反射條件，該等紅光頻率成分由具有較寬疊層間隔或光柵周期的附近區域折射。相反地，具有較短波長的藍光頻率成分由該光柵之較遠的區域返回。因爲該等藍光成分行進一較長的光學路徑，它們取得相對於該等紅光成分之延遲。因此輸入的短白光脈衝211由此CVBG擴展壓縮器200被擴展成較長的擴展脈衝212。在該特定示例中，因爲該等藍光成分相對於該等紅光成分被延遲，擴展脈衝212發展出正連續變頻。其它的實施可具有CVBG，其產生負連續變頻，相對於該等藍光頻譜成分延遲該等紅光頻譜成分。

[0168]此CVBG擴展壓縮器200亦可以高精度壓縮放大

的擴展脈衝213，而不需要任何繁複的微細調整，因爲在由放大器300放大之後，該等擴展的脈衝由該相對末端或壓縮器埠射入到相同的CVBG擴展壓縮器200。當擴展的脈衝由該相對末端進入CVBG擴展壓縮器200時，於該擴展步驟期間其紅光成分被延遲爲與其藍光成分被延遲的相同程度，恢復該脈衝之原始短長度。因此，此擴展壓縮器200非常有效率地補償在該擴展期間所引進的色散，並輸出適當壓縮的放大脈衝214。

[0169]相較於具有分開的擴展器200'與壓縮器400之雷射引擎1'之特殊態樣，(i)雷射引擎1對於移動光學元件之精密對準並未具高度敏感性，因爲其並無此元件，因此顯示出對於機械擾動或該操作溫度之變化具有顯著的穩固性，及(ii)因爲放大器300之創新設計並不引致關於往返次數之額外色散，如對於公式(1)-(2)與圖5A至圖5B之進一步解釋，當該重複率改變時，雷射引擎1並不需要其光學元件與設置之敏感性重新校準與重新對準。這些屬性使得使用者可將雷射引擎1使用於該重複率的快速或時間性的改變係相當重要的應用中。

[0170]在其它不同於上述的設計中，放大器300可引進額外的色散。在這些設計中，擴展壓縮器200之整合式架構可利用重新調整功能來補充，因爲該壓縮器不僅是必需壓縮該擴展器之色散，亦壓縮放大器300之額外的色散。此加入的工作可能需要實施關於該壓縮器功能的可調整區塊。

[0171]請回到圖2，雷射引擎1另可包括有效偏振分光器

150。分光器150可包括偏振器及位在振盪器100與擴展壓縮器200之間的λ/4板。在其它具體實施例中，分光器150可爲薄膜偏振器。此組合分光器150可讓該等種子脈衝由振盪器100通過至擴展壓縮器200，但重新引導由擴展壓縮器200返回的該等擴展脈衝朝向放大器300，因爲λ/4板在雙重通過時旋轉該等脈衝光束的偏振平面90度。該偏振器當對於該等種子脈衝的偏振方向爲穿透性時，即在它們第二次橫跨該λ/4板之後對於該等擴展的脈衝之90度旋轉的偏振平面爲反射性。

[0172]在一些具體實施例中，雷射引擎1在分光器150與放大器300之間的光學路徑中可包括法拉第隔離器500。法拉第隔離器500之該等功能可包括將振盪器100與該等放大的光束隔離，藉以防止由於該雷射光束之高功率對於振盪器100之損害。這種法拉第隔離器500可自分光器150接收該等擴展的種子脈衝，傳送該等擴展的種子脈衝至放大器300，自放大器300接收放大的擴展脈衝之雷射光束，並朝向擴展壓縮器200輸出該等放大的擴展脈衝之雷射光束通過偏振器550與560。

[0173]法拉第隔離器500可用於放大器300經由接收該等放大脈衝之相同光學路徑輸出他們的具體實施例中，因爲簡單的重新導向光學可能相當不適合用於該隔離功能，因爲該等放大的脈衝通常具有比該等種子脈衝要大數百或甚至數千倍的功率或強度。即使該簡單重新導向光學元件僅讓這些放大的脈衝的一部份通過，該等傳送的脈衝仍足

夠強烈到損害振盪器100。

[0174]在一些具體實施例中，法拉第隔離器500可組態成讓來自放大器300之雷射光束中少於1/10,000的部份通過朝向振盪器100。相同的隔離功能可用衰減的方式補捉：該法拉第隔離器可衰減該放大的雷射光束例如40 dB，或在一些實施中衰減50 dB。

[0175]該法拉第隔離器或偏振相關隔離器可包括三個部份：輸入偏振器，其可垂直偏振、法拉第旋轉器、與輸出偏振器或分析器，其在45度時偏振。

[0176]行進在該前向方向上的光線如果其在該方向上尚未被偏振化，即成爲例如由該輸入偏振器垂直地偏振化。(在此處，該偏振平面代表該電場向量所位在的平面。另外，「垂直」僅建立常規或基準平面。在多種具體實施例中，該實際偏振平面可被導向到其它特定方向上)。該法拉第旋轉器旋轉該光束的偏振平面大約45度，將其對準該分析器的偏振平面，然後傳送光線，而不需要額外地旋轉該偏振平面。

[0177]在向後方向上行進的光線，例如自放大器300返回的該等放大脈衝，其在離開該分析器之後成爲相對於該基準垂直平面偏振45度。該法拉第旋轉器再次旋轉該偏振大約45度。因此，由該法拉第旋轉器輸出朝向該輸入偏振器的光線被水平地偏振。因爲該輸入偏振器爲垂直偏振，該水平偏振的光線將近乎完美地由該輸入偏振器所反射，而不會將其傳送至振盪器100。因此，法拉第隔離器500可

以高效率地保護振盪器100防止該等高能量放大的雷射脈衝。

[0178]該法拉第旋轉器基本上藉由產生指向到該光學軸方向上的磁場來達到其功能。一些法拉第旋轉器包括永久磁鐵來達到此功能。

[0179]在法拉第旋轉器中使用的光學材料基本上具有高費爾德(Verdet)常數、低吸收係數、低非線性折射係數與高損害臨界值。同時，爲了防止自聚焦與其它加熱相關的效應，該光學路徑基本上較短。兩種最長用於700-1100奈米範圍的材料爲鋱摻雜硼矽酸鹽玻璃與鋱鎵石榴石晶體(TGG，Terbium Gallium Garnet crystal)。

[0180]雷射引擎1或1'之具體實施例中放大器300並未經由該等放大脈衝輸入時相同的光學路徑來將它們輸出，即不需要利用法拉第隔離器500。

[0181]圖2及圖4所示爲由法拉第隔離器500傳送的光線能夠進入放大器300。放大器300可包括雷射晶體或增益媒體310來放大該等擴展的種子脈衝，而構成末端鏡321與322之間的往返。一些放大器300可包括折疊反射的光學路徑(或「z腔穴」)，利用折疊反射鏡重新導向該雷射光束，以降低該共振腔的空間範圍。圖4中的放大器300具有四個鏡面：兩個末端鏡321與322，其定義該共振腔，及兩個折疊反射鏡323與324。在一些示例中，該光學路徑甚至能夠折疊反射其本身之上，而呈現爲交叉圖案。當利用更多折疊反射鏡藉由折疊反射該光學路徑到更小的空間當中，而能

夠甚至進一步降低放大器300的尺寸時，該等額外的鏡面增加了未對準的可能性及價格。

[0182]除了雷射晶體310與鏡面321-324之外，放大器300可包括切換式偏振器330，其控制該品質因子Q，因此控制放大器300之放大功能，以及薄膜偏振器340，其做爲在該腔穴中該等脈衝之輸入/輸出埠。薄膜偏振器340爲偏振選擇式裝置的特定示例，其利用第一預定偏振來反射光線，而利用垂直於該第一預定偏振的第二偏振來傳送光線。切換式偏振器330可爲一種偏振裝置，其在當其不會旋轉穿過其中的光線之偏振的第一操作狀態，與當其回應於施加於其上的控制信號而旋轉該光線之偏振的第二操作狀態之間切換。薄膜偏振器340與切換式偏振器330之組合可用於控制來自法拉第旋轉器500之該等脈衝何時耦合進入到放大器300，以及在放大器300之內放大的該等脈衝何時耦合到該放大器之外，如下所述。

[0183]圖4中此種薄膜偏振器340與切換式偏振器330之組合爲用於放大器300之共振腔的光學開關之示例。

[0184]放大器300之操作與結構在以下進一步詳細說明。特別的是，將顯示出改變該重複率通常伴隨著改變此放大的脈衝在末端鏡321與322之間進行的往返次數。而所述之光學開關的功能係藉由控制脈衝何時耦合進入或離開該共振腔來控制這些往返的次數。

[0185]在放大器300中的該等光學元件可在這些往返中引進某些量的色散。因此，關於改變該等重複率在放大器

300中改變該等往返次數，改變了由放大器300輸出的該等放大之脈衝的累積色散。即使壓縮器400被調整來對於特定次數的往返補償該色散，來自該等往返次數改變之色散的變化破壞了圖1B之雷射引擎1'的擴展器200'、放大器300與壓縮器400之擴展、色散放大與壓縮的敏感性平衡，而需要耗時的重新校準。即使在圖1A中雷射引擎1具有整合式擴展壓縮器200的更創新的架構在當該等往返次數改變時，可能需要使用補償元件進行調整。此層面限制了這些雷射引擎的利用性。

[0186]爲了擴大它們的利用性，一些雷射引擎可包括色散控制器或補償器做爲放大器300的一部份。該色散控制器的一種功能爲在往返期間引進與由放大器300之該等光學元件所引進的色散相反而基本上相等的色散。由於此色散補償或控制，該等脈衝於放大器300之共振腔中的該等往返期間取得少許或毫無色散。因此，改變該等往返的次數僅會少許或完全不會改變該等放大脈衝的色散。

[0187]因此，該等雷射脈衝之重複率基本上對於壓縮器400或擴展壓縮器200的光學設置並無調整、重新對準或校準，因爲在該等往返期間並無累積色散要補償。因此，色散控制的放大器300可實施在圖1B的雷射引擎1'中，藉以在重複率改變時排除壓縮器400進行耗時之重新對準的工作。再者，此色散控制的放大器300能夠使用圖1A之雷射引擎1中的整合式擴展壓縮器200，而不需要可調整的補償功能。

[0188]例如，如果雷射晶體310於該共振腔之內的雷射脈衝的往返期間引進正色散，該色散控制器能夠對該等放大的擴展脈衝引進相同大小的負色散來抑制、最小化或消除該雷射脈衝的色散。

[0189]要量化該色散的一種有用的度量爲「群組延遲色散」(*GDD*，Group Delay Dispersion)，其通常定義成：

$$GDD = \frac{\lambda^3}{c^2}\frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} L \qquad (1)$$

其中λ爲該光線的波長，c爲光速，$n(\lambda)$爲折射的波長相關係數，而L爲在該腔穴中該光學路徑的長度。光學元件310、330與340、鏡面321-324與任何其它可能出現在放大器300中的光學元件之*GDD*可藉由例如測量或由設計推算而決定。藉由對*GDD*的瞭解，色散控制器可利用與放大器300之該等光學元件的決定之*GDD*大致相等及相反數值的*GDD*來實施在該腔穴中。這樣設計的腔穴於該等脈衝的往返期間產生少許或毫無色散，消除該等前述的問題，並擴大雷射引擎1或1'之利用性。

[0190]在一例示性示例中，在一種典型的CPA雷射引擎1'中，500飛秒種子脈衝由擴展器200'被擴展200微微秒至一擴展脈衝長度200.5 ps。相對應的壓縮器400可被調整及校準來壓縮該擴展的脈衝回200 ps，造成理想上大約500 fs之壓縮脈衝長度。由於不完美性，在實際案例中，該壓縮脈衝長度可能落在範圍500-800 fs中。

[0191]但是，在放大器300之共振腔中該等擴展的脈衝

之往返期間，該等擴展脈衝的長度可由放大器300之多種光學元件的色散而得到加長，其由該腔穴的GDD所表示。GDD之典型數值可由數百fs^2到數十萬fs^2當中變化。在一些案例中，該GDD可在範圍5,000 fs^2-20,000 fs^2當中。因爲基本上擴展器200與補償器400在該脈衝長度上抵消彼此的影響，由雷射引擎1輸出的脈衝$\Delta t(out)$之長度係相關於由振盪器100產生的種子脈衝$\Delta t(seed)$之長度與該GDD，其係經由下式：

$$\Delta t(out) = \frac{\sqrt{\Delta t(seed)^4 + (4\ln 2\, N \times GDD)^2}}{\Delta t(seed)} = \Delta t(seed)\sqrt{1 + 7.69N^2 \times \left(\frac{GDD}{\Delta t(seed)^2}\right)^2} \quad (2)$$

其中N爲在該腔穴中的往返次數。

[0192]因此，舉例來說，在具有GDD爲7,000 fs^2的放大器之該等光學元件中$\Delta t(seed)$的長度=200 fs的種子脈衝於單一往返期間以最少增加22 fs之方式增加到$\Delta t(out)$=222 fs。但是，此似乎少許的色散在該等重複的往返期間會變得複雜。在N=10的往返之後，該輸出脈衝的長度增加大約790 fs到$\Delta t(out)$=990 fs，在N=30的往返之後增加大約2,700 fs=2.7 ps到$\Delta t(out)$=2,920 fs=2.9 ps，而在N=100的往返之後增加大約9.5 ps到$\Delta t(out)$=9.7 ps。可看出，沒有色散控制放大器300的情況下，此脈衝長度實質上的劣化將高到大約50倍，而會將該雷射由飛秒雷射轉換爲微微秒雷射。

[0193]另外，即使藉由校準壓縮器200或400來補償由特定往返次數所造成的額外色散，例如對應於N=100往返之9.5 ps色散，然而當一應用需要將往返次數由N=100改變

到，例如是N=110時，放大器300將引致另一個1 ps色散，再次地造成壓縮脈衝長度爲微微秒而非飛秒。

[0194]相反地，雷射引擎1或1'之具體實施例在放大器300內具有色散控制器，以補償由該共振腔之該等光學元件所造成的*GDD*。此色散控制器可補償由該放大器中該等光學元件所引致的每個往返色散補償數fs。因此，放大器300能夠接收具有200 ps脈衝長度的擴展脈衝，並以基本上相同的200 ps脈衝長度放射放大的脈衝，其大致無關於該放大器操作中的往返次數，其次數爲50、100、200或500。因此，雷射引擎1之擴展壓縮器200或雷射引擎1'之壓縮器400能夠對於廣大範圍之往返次數N壓縮該脈衝長度回到飛秒範圍，因此對於廣大範圍的重複率，不需要其它缺乏在放大器300內本色散控制或補償的雷射系統必須要的相當耗時的重新調整與校準。在放大器300內的色散控制器係在放大器300之內部光學路徑上，因此自動地補償GDD/色散，而不需要在光學放大器300之外該等光學元件的重新調整。利用在放大器300之內該色散控制器的適當設計，即可不需要對於該光學放大器之外的可調整色散元件(例如圖3B中的色散補償光柵)爲了改變該脈衝重複率而要重新調整。

[0195]由於上述之設計考量，雷射引擎1或1'可利用除了振盪器100之那些元件之外，該雷射引擎之所有該等光學元件的基本上相同設置來產生脈衝持續時間少於1000飛秒，重複率在10 kHz -2 MHz範圍內的雷射光束。其它具體實施例可在範圍50 kHz -1 MHz的重複率來操作，而另外的

則在範圍100 kHz -500 kHz中操作。

[0196]因此，在這些雷射引擎中，該重複率可由第一數值改變至第二數值，而不需要改變該雷射引擎之該等光學元件的設置，除了振盪器100之外。

[0197]有些雷射引擎中，該等重複率由其第一數值改變到第二數值會伴隨該等光學元件之設置的改變。但是，部份這些雷射引擎可基於它們放大器之內的色散補償或控制來進行修正，使得該等修正的雷射引擎可被操作來亦利用未修改的設置來輸出具有該第二重複率之雷射光束。

[0198]在雷射引擎1的多種實施中，該重複率可由第一數值改變到第二數值，其中該第二重複率不同於該第一重複率至少10%、50%、100%或200%。

[0199]在某些設計中，該共振腔利用光纖，該重複率的調整亦有可能不需要重新調諧與調整後續壓縮器400。但是，這些光纖雷射(i)對於該等脈衝的能量有嚴重的限制，及(ii)通常不具有色散控制器。它們基本上僅利用每個脈衝低於10微焦耳(μJ)的能力來產生脈衝，以避免破壞該光纖腔穴的危險。如下所述，對於許多眼部及外科手術應用，此每個脈衝的能量並不充份，因爲那些應用會需要投射20或更多的μJ/脈衝於目標上，或是考量各種損耗的情況下由該雷射輸出30或更多的μJ/脈衝。

[0200]另一個不同點爲在光纖雷射中，該光束的發散性在當該雷射之重複率由於該熱負載之變化而改變時，即會無法避免地改變。

[0201]相反地，放大器300基本上包含色散控制器或補償器，且該光線在自由空間中傳遞，使得雷射引擎1或1'之一些示例可被操作來輸出具有能量範圍在1-100 μJ/脈衝的雷射光束，其它則具有能量範圍在10-50 μJ/脈衝，而又另外的具有能量範圍在20-30 μJ/脈衝。

[0202]一些雷射引擎1或1'可組態成使得該重複率之改變伴隨著雷射引擎1之光學元件的調整。但是，由於存在有該色散控制器，甚至在這些具體實施例中，雷射引擎1或1'可被修改來在當該重複率改變時利用基本上該等光學元件的相同設置。

[0203]上述的示例可用許多不同的方式實施。在一些具體實施例中，在該光學放大器之內的色散控制器或補償器可包括一或多個連續變頻鏡、連續變頻光纖、多種連續變頻光柵、連續變頻穿透式光學元件、稜鏡、及其它光學元件，其能夠改變入射光線的色散。

[0204]一般而言，連續變頻的光學元件可具有調變的光學性質之一些疊層。在示例中，該等疊層之厚度與它們折射係數的變化可被設計成利用不同的波長來不同地控制光線。例如是該連續變頻體積布拉格光柵(CVBG)，其已經以相關於擴展壓縮器200的方式做說明。在其它示例中，例如是連續變頻鏡可包括介電材料層，其中每個單一介電層或短堆疊層能夠反射特定波長之狹窄鄰近處。該連續變頻鏡可藉由形成5-10個介電層之第一堆疊所建構，其厚度適合於反射在第一波長鄰近處中之波長的光線。然後，5-10個

介電層之第二堆疊可形成在該第一堆疊上方，其具有不同厚度及/或折射係數來反射在一第二波長鄰近處中之波長的光線等等。當在適當數目之堆疊中形成有充份數目的疊層時，該連續變頻鏡可反射在選擇的波長波段中的波長成分的光線，而傳送具有其它波長的光線。

[0205]在該放大器中的色散控制功能可藉由將一或多個鏡面321-324製成連續變頻來執行。在圖4中，所有四個鏡面皆爲連續變頻。其它設計可僅將一或兩個鏡面製成連續變頻。而其它者可利用一或多個連續變頻的光學元件。做爲該色散控制器之可能實施，這些一或多個連續變頻鏡能夠控制、補償、最小化或甚至消除在放大器300之共振腔內的放大擴展雷射脈衝的往返期間中由光學元件310、330與340及鏡面321-324所引致的色散。

[0206]雷射晶體310可爲銣(Nd)或鐿(Yb)爲主。示例包括Nd:YAG與Yb:YAG晶體。其它實施可以使用Nd或Yb摻雜的玻璃。而其它則爲型式Yb:$X(WO_4)_2$的Yb:鎢酸或型式Yb:X_2O_3的Yb:倍半氧化物。在這些案例中，X可爲Y、Lu、Gd或其它適當元素。Nd或Yb摻雜位準之範圍可在0.1-100%。

[0207]雷射晶體之空間摻雜輪廓可被選擇來確保放射高品質單一模式雷射脈衝。一些摻雜輪廓可相容於具有有限聚焦能力之泵浦光源，其由大於由該泵浦光線之一般M^2因子所表示。該泵浦源可爲側泵浦或在末端泵浦配置中。該泵浦光源可包含多個光纖耦合的二極體，例如2-10個二

極體，其每一者放射1-10 W的功率。該等泵浦二極體可在基本上連續波(CW，Continuous Wave)操作模式中或在類似高頻脈衝模式中操作。它們可用不同的空間陣列、棒或其它型式來設置。來自該等二極體之光線可經由共用的光柵導引，其可返回非常小百分比的該光線至該等二極體，藉此相位鎖定它們的光線。

[0208]圖5A至圖5B配合圖4，例示該傾腔再生式放大器CDRA 300之操作。該操作的原理通常稱之爲「Q切換」，代表該共振腔之品質因子Q的切換。

[0209]在「充電」或「泵浦」階段中，薄膜偏振器340反射進入的光線通過切換式偏振器330。切換式偏振器330可爲光閘、截波器輪(chopper wheel)、旋轉稜鏡或鏡面、聲光裝置、光電裝置，例如波克斯(Pockels)胞或克爾(Kerr)胞，或切換式μ/4波板。在未偏壓或低電壓狀態中，切換式偏振器330在當該等脈衝通過兩次來往末端鏡322時可旋轉該偏振平面90度。

[0210]在該充電或泵浦周期期間，法拉第隔離器500傳送脈衝到薄膜偏振器340之上，其將它們重新導向通過切換式偏振器330。由末端鏡322返回的該等脈衝第二次橫跨切換式偏振器330。然後它們在該腔穴中執行一次往返，在它們來往末端鏡322的路線上通過切換式偏振器330兩次以上。在一次往返之後，這四次通過切換式偏振器330即旋轉該等脈衝的偏振平面180度。因此，它們由薄膜偏振器340反射出該腔穴，而基本上並無放大。

[0211]在此相同的充電或泵浦周期中，放大器300亦抑制在該腔穴內該等泵浦二極體所產生的該光線之雷射動作，因爲由切換式偏振器330該偏振平面的90度雙重通過旋轉會使該共振腔的品質因子Q降低，使得該腔穴不適用於雷射動作。

[0212]圖5A所示爲在此充電/泵浦階段中，雷射晶體310吸收在側邊或末端泵浦配置中來自上述泵浦二極體或泵浦雷射二極體之光線。該泵浦增加該等雷射原子之受激能階的居量，或複雜化而產生居量逆轉，其基本上吸收並儲存該泵浦能量或「增益」。

[0213]圖5B所示爲在此充電/泵浦階段中，放大器300並未產生與放射此放大的雷射脈衝。如此一來，放大器300所放射的當然是該等被排拒的未放大之脈衝。

[0214]圖5A至圖5B所示爲該泵浦/充電階段可根據預定的時序作業或由追蹤雷射晶體310中能量儲存的感測電子之提示而結束。在任一例中，於時間t(充電)之後，控制及驅動器電子可以施加高電壓至切換式偏振器330來停止旋轉偏振平面90度。其它種類的可切換偏振器330可由不同手段來切換。此切換該腔穴的品質因子Q到足夠高的數值之動作使得該腔穴適用於雷射動作。

[0215]放大器300之單一脈衝具體實施例中，當單一脈衝在該腔穴內執行往返之動作時，其可切換此切換式偏振器300。當其往返結束時，該單一脈衝在其已經被切換之後返回到切換式偏振器300，該脈衝之偏振平面即不再旋轉，

因此該脈衝不再被薄膜偏振器340自該腔穴反射出來。除了在該泵浦階段期間被排拒之外，該脈衝在長度t(增益)的增益周期內可被困於該腔穴中長達數個更多往返。在圖5B中，t(增益)的時間比例爲了清楚起見已經被放大。

[0216]圖5A至圖5B所示爲在該增益周期中，在該腔穴中被泵浦與儲存的能量(或增益)由雷射晶體310轉移到該脈衝而構成該等往返，其係經由稱爲引致放射的程序來開始該雷射動作。因此，在該腔穴中的能量會降低，如圖5A所示，然而在該雷射脈衝中的能量在增益程序中會增加，如圖5B所示。在圖5B中，在t(增益)間隔中的該等峰值代表該雷射脈衝在當其通過該腔穴中的特定點時的能量，其中該實線上升曲線爲包覆線，代表該能量增益在滑動往返周期當中的平均值。

[0217]值得注意的是，收集單一進入脈衝於該腔穴中之實施例，可於其往返期間僅將儲存於雷射晶體310中之大約所有能量轉換爲該單一雷射脈衝。相反地，一些實施可允許多個脈衝進入到該腔穴中。但是在這些示例中，所得到的雷射光束之每個脈衝可具有較低的能量，藉此降低每個脈衝之能量，使其低於對於相關的光分裂種類爲慣例且有利的位準。

[0218]在被泵浦到該腔穴當中的能量於充份次數的往返期間以高效率被轉移到該雷射脈衝之後，該控制器-驅動器電子可以停止施加該高電壓至切換式偏振器330，使其恢復旋轉該雷射脈衝的偏振平面。由於重新開始該偏振的旋

轉，該放大的雷射脈衝即在下一次往返結束時於標示爲t(傾倒)的時間處由薄膜偏振器340自該腔穴反射出來。

[0219]該等放大的雷射脈衝之傾倒可用不同方式控制。在一些案例中，可依賴設計計算與電腦方法來在執行該傾倒之後設定該往返次數。另外，可使用先前的校準來設定往返次數。在又其它案例中，可耦合許多種感測器到該共振腔的光學路徑當中。此感測器或多個感測器可感測該等放大的雷射脈衝之能量何時到達預定值，並傳送控制信號至控制器來依此傾倒該腔穴。

[0220]將該放大的雷射脈衝自該腔穴反射出來，並將其朝向壓縮器400傳送即可完成該泵浦-增益-傾倒循環。一旦完成該脈衝-傾倒，該腔穴即返回到其低Q狀態，再次重新開始該泵浦-增益-傾倒循環。在一些設計中，該脈衝-射出埠與該脈衝-傾倒埠可以不相同。在圖4中，這兩個埠係實施在薄膜偏振器340中。

[0221]在一些實施中，該等雷射脈衝執行50-500次往返，在其它示例中於該腔穴中100-200次往返即可將來自雷射晶體310的泵浦狀態之能量轉移到該雷射脈衝。如前所述，振盪器100可產生頻率範圍在10-200 MHz的一種子脈衝串，在一些案例中範圍在20-50 MHz。在一些實施中，雷射引擎1或1'輸出雷射脈衝串，其重複率的範圍在10 kHz-2 MHz或50 kHz-1 MHz或100 kHz-500 kHz。因此，切換式偏振器330藉由僅補捉每一個第5-第20,000的種子脈衝來放大的方式大量減少該進入的種子脈衝串。這些補捉序列的時

序可由使用振盪器100做爲主控時脈來控制。

[0222]該重複率爲雷射引擎的主要特性。如果(1)該重複率可在一頻率範圍內變化時，及(2)該範圍的上限較高時，即可達到較多種類的功能。例如，白內障手術在第一重複率下可最適地進行，而第二重複率可能較適合於角膜手術。單一雷射引擎可同時用於這些功能，只要該雷射引擎能夠做調整而可同時在該第一與第二重複率下操作。因此，接下來將檢視多種設計考量，來使得雷射引擎1及1'中該重複率可變化，且該範圍的上限變高。

[0223]如參照圖3B至圖3C與圖4所述，在放大器300中使用色散控制器，例如用於鏡面321-324的任何一種之連續變頻鏡，可補償由該放大器之光學元件在該腔穴中一次往返期間所造成的該雷射脈衝之色散。此設計特徵允許改變雷射引擎1或1'之重複率，而不需要改變擴展器200與壓縮器200/400之該等光學元件的校準、對準或設置，例如光柵201、203、205與207，鏡片202與鏡面204及208。

[0224]除了修改該光學設置，該重複率改變可藉由施加電子控制信號來修改雷射引擎1之時序與操作而達到。例如，該重複率可藉由施加控制信號來降低該重複時間t(rep)=t(充電/泵浦)+t(增益)而增加。

[0225]基本上，t(rep)的降低藉由同時降低t(泵浦)及t(增益)而達成。該泵浦時間t(泵浦)可被縮短，例如藉由增加該等泵浦二極體/雷射的泵浦強度。該增益時間t(增益)可被縮短，例如藉由降低該雷射脈衝的往返次數。

[0226]該雷射脈衝的能量雖然在較少次的往返之下仍被保留，例如藉由增加每次往返次數的能量增益。圖5B所示爲在該增益周期期間於其在該腔穴中每次往返中通過選擇的基準點來增加該雷射脈衝的能量。在後續通過中，能量的比例通常係以(「小信號」)增益因子g表之。該增益因子g對於儲存在雷射晶體310之激發或泵浦位準中的整體能量很敏感。當儲存愈多能量時，g因子愈高。因此，施加控制信號來增加儲存在增益媒體310之泵浦位準中的能量可使得該雷射脈衝在較少往返次數中達到相同能量，藉此增加該重複率。

[0227]該重複率範圍之上限亦可用多種方式增加。在具有較大增益因子g的具體實施例中，僅需要較少的往返來達到相同的放大率。因此，一些實施可藉由利用具有較高增益因子g的雷射晶體310而提高該重複率之上限。

[0228]同時，因爲該增益因子g對於儲存在雷射晶體310之激發或泵浦位準中的整體能量敏感，泵浦該激發位準具有更多能量即爲另一種達到較短t(增益)之方法，因此達到較高重複率。

[0229]另一種控制該重複率之因子爲一次往返需要的時間。該雷射脈衝於時間間隔2L/c處通過基準點，其中L爲在該腔穴中該光學路徑的長度，c爲光速。因此，在一些具體實施例中，可降低該光學路徑的長度L以降低一次往返的時間。在這些實施中，相同的往返次數且轉移相同的能量，將會耗用較短的時間t(增益)，而又在另一種方式中增加該

重複率。

[0230]實施上述一或多項設計原理時，雷射引擎1或1'的具體實施例可利用最高到500 kHz、1 MHz，或在一些案例中最高到2 MHz的重複率來操作。

[0231]此外，在這些實施中，t(增益)的降低可允許使用整體重複率t(rep)的較大部份，以用於支援該泵浦與傾倒循環爲有利的能率。

[0232]該能率之常用的定義爲該低Q周期的長度除以整體周期的長度。使用此定義，在一種具有例如400 kHz重複率的實施中，將t(增益)由1微秒降低到0.5微秒可使得該能率由0.6增加到0.75，大小相當的增加爲25%。

[0233]回到縮短該光學路徑之長度L的設計原理，可注意到除此之外，藉由切換式偏振器330多快可切換來補捉脈衝於該腔穴中來控制L。在1公尺的光學路徑腔穴中，一次往返時間爲2L/c = 6.6 ns。考量該脈衝之有限空間範圍，因此單一脈衝實施具有切換時間低於5 ns的切換式偏振器330，其它的則低於4 ns，或甚至低於3 ns。

[0234]在一些放大器中，切換式偏振器330可爲Pockels胞。Pockels胞通常施加一強電場來旋轉入射光束的偏振。該偏振的旋轉正比於該電場的第一功率，因此會相當強。該Pockels效應發生在缺乏反稱的晶體中，例如鈮酸鋰，或砷化鎵，及其它非中心對稱的材料。

[0235]藉由有時候施加數千伏特的電壓，Pockels胞可利用非常短的上升時間由偏振-旋轉狀態切換到偏振-不旋

轉狀態。該上升時間的一種度量爲「5-95時間」，該時間爲該偏振平面旋轉來由5%的最大/飽和值上升到其95%所需要的時間。在一些實施中，該上升時間可小於5 ns，在其它例中小於4 ns，又在其它例中小於3 ns。事實上，在一些實施中，該上升時間不受限於該Pockels胞本身的動力，而是受限於其切換電子的動力。一些實施可以使用創新的控制與驅動器電路來達到此快速功率切換程序。

[0236]如上所述，該Pockels胞之切換時間的縮短爲一種有效的方法來縮短t(增益)，而達到較快的重複率。另外，這些較快的Pockels胞亦允許該光學路徑長度的降低，因此降低該腔穴的大小。

[0237]另外，雷射引擎1的實施可構成具有比一些既有的雷射要少的光學元件。此係部份由於應用該色散控制器或補償器，降低在該壓縮器中可調整的光學元件之需要，以及因爲整合式擴散壓縮器架構200。

[0238]一些雷射可能包含數百或更多的光學元件，在雷射引擎1的一些實施中，該等光學元件的數目可少於75。在其它實施中少於50。

[0239]在一些實施中，在除了該振盪器之外的部份中光學元件的數目可少於50。在其它實施中少於35。

[0240]此處的術語「光學元件」代表影響光束之光學特性的任何元件。範例包括：鏡面、鏡片、平行板、偏振器、隔離器、任何切換式光學元件、折射式元件、穿透式元件、及反射式元件。

[0241]光學元件由該光線由空氣進入並離開到空氣中的表面所定義。因此，功能方塊，例如物鏡，在當其包含數個鏡片時並非一「光學元件」，即使該等鏡片在當該物鏡在移動中時會牢固地一起移動。此係因爲在該物鏡之該等鏡片之間，不論相隔多短，該光線在空氣中傳遞。即使兩個鏡片彼此接觸且在它們中心處沒有氣隙，偏離中心的光束離開一個鏡片而在進入另一鏡片之前進入到空氣中，因此即如同兩個光學元件。可注意到雷射之架構性描述通常顯示出比該雷射之實際運作所需要的要較少的光學元件。基本上，當顯示單一鏡片時，其功能無法由實際上單一鏡片所執行，而是由仔細設計的鏡片組合件所執行。因此，這種架構性描述基本上僅爲例示性，且如果依所述實施時將無法操作。

[0242]具有快速Pockels胞、快速切換電子與少量光學元件之雷射引擎1的實施在該腔穴內可具有短於2公尺的光學路徑，其它的則短於1公尺。相對應地，該雷射引擎由在振盪器100中光子的產生並包括放大器300之腔穴內所有往返之整體光學路徑可少於500公尺、或300公尺或甚至150公尺。

[0243]既有的飛秒雷射具有500公尺或更長的整體光學路徑，及3-4公尺或更長的腔穴末端鏡到末端鏡之距離，因爲在不具有前述之創新方案之下縮短該光學路徑低於這些數值有其困難。

[0244]有助於降低雷射引擎1之尺寸的創新性子系統與

特徵的清單包括：(i)光纖式振盪器100，而非自由空間振盪器；(ii)整合式擴展壓縮器200，其可基於單一連續變頻體積布拉格光柵，在當該重複率改變時並不對光學元件進行調整；(iii)色散補償放大器300，於改變重複率時不需要調整擴展壓縮器200中的光學元件；(iv)不尋常快速切換Pockels胞；(v)不尋常快速控制電子元件，其在該Pockels胞的高電壓之下(包括到千伏特的範圍)可用快速上升時間來操作；及(vi)少量的光學元件，其需要較少的容納空間。

[0245]實施這些特徵之組合或全部使用的雷射引擎能夠支援整體自由空間光學路徑長度少於500公尺，在一些實施中少於300公尺，其它一些實施中少於150公尺。

[0246]同時，具有一些或全部上述相關特徵的放大器300可具有少於2公尺，在一些案例中少於1公尺的末端鏡到末端鏡光學路徑長度。

[0247]在許多實施中，該光學路徑爲多重折疊反射，因此該共振腔的實體範圍可明顯地短於該路徑的長度。短且折疊反射的光學路徑可轉化成放大器300之整體較小範圍。在一些案例中，放大器300之邊緣尺寸中皆未超過1公尺，在其它案例中不超過0.5公尺。

[0248]相對應地，整個雷射引擎1的底面積，即其覆蓋在雷射系統之平台上的面積可能少於1 m^2，在其它案例中少於0.5 m^2，又在其它案例中少於0.25 m^2，且可能少於0.1 m^2。這些面積或底面積之每一者無疑地可帶來新的優點。

[0249]放大器300與雷射引擎1由於使用上述一或多種

設計原理與組件而可具有這種不尋常的小空間範圍。因此，該空間範圍能夠合理地區分放大器300與雷射引擎1以及其它並未利用這些設計原理與組件的雷射。

[0250]另一種考量亦值得一提：非常關鍵地是檢修(service)位在雷射系統之上方平台上的子系統係較簡單的，因此藉由簡單地移除外蓋即可使用，而不需要將系統區塊移進移出該雷射系統的底架。如此會危害到在顧客環境(例如醫院)當中該等系統區塊的敏感性對準，其中精密設備基本上無法恢復該對準。因此，當堆疊外科手術雷射系統的多個組件時，在彼此的上方可視爲另一種方法來降低其底面積，如此做將會對於該雷射系統之檢修帶來過高的挑戰。

[0251]因此，降低雷射引擎1的尺寸可允許放置其它子系統在該雷射系統的上方平台上，其亦需要接近來進行維護。這些額外的子系統可能帶來性質上新的功能，藉此能夠重大改善該整體雷射系統的利用性。這些額外的子系統可包括成像系統來導引眼部外科手術。

[0252]總而言之，上述的特徵，不論是單獨或組合，皆可實施來建構實體上小型化的雷射系統。這種小型空間範圍對於至少下列理由是很有價值的資產：(i)眼部外科手術雷射系統通常部署在非常擁擠的手術室中，其中空間與通道的代價皆很高，有利於具有較小底面積的雷射系統；(ii)該雷射引擎的檢修性在當大多數或所有的光學組件安裝在該雷射系統之底架的上方平台上時其性質上較佳；及(iii)

小型雷射引擎可允許部署額外的系統在該上方平台上，加入重要的新功能到整體雷射系統，例如加入成像系統來導引該眼部外科手術。

[0253]回到追蹤該等放大的擴展雷射脈衝之路徑，圖2所示爲一旦由放大器300放射之後，該等放大的脈衝可被轉送回到法拉第隔離器500。法拉第隔離器500之該等功能中之一個可爲利用將近100%的效率重新導引該等放大的脈衝離開該振盪器，因此可防止振盪器100受到該放大脈衝的損害。

[0254]在一些案例中，該等放大的脈衝經由偏振器550、560被導向至擴展壓縮器200的壓縮器埠。如上所述，擴展壓縮器200能夠重新壓縮該等放大的脈衝，並放射出具有飛秒脈衝的脈衝式雷射光束。

[0255]利用上述多種解決方案之雷射引擎1的實施能夠輸出具有脈衝持續時間的範圍在1-1000飛秒(fs)的雷射光束，在一些案例中爲50-500 fs，在其它案例中爲100-300 fs。這些飛秒脈衝可達到不尋常的高能量，例如能量範圍在1-100 μJoule/脈衝，在其它者爲10-50 μJoule/脈衝，在另外其它者爲20-30 μJoule/脈衝。

[0256]這些脈衝能量能夠實現難以使用的有用的實施，其雷射脈衝能量係低於1、10或20 μJoule/脈衝，因爲在眼睛中有數種不同的雷射-組織交互作用而造成臨限行爲。有些外科手術程序中低於1 μJoule/脈衝能量的雷射脈衝不會造成該外科手術所需要的組織改造。在其它外科手術

程序中，此臨界值可爲10或20 μJoule/脈衝。

[0257]例如，白內障手術需要將該雷射導入在深入該目標組織中，例如深度爲10 mm。此需要限制數值光圈，因此需要每個脈衝有較高的能量值來產生光分裂。在一些案例中，10-15 μJoule/脈衝的能量已經足夠。爲了避免在最大能量值處操作，會需要具有20 μJoule/脈衝的裝置。因爲這些數字爲射至目標上的能量，爲了考慮沿著該光學路徑上的損耗，該雷射系統可包括能輸出25-30 μJoule/脈衝的雷射。

[0258]例如，在白內障外科手術應用中，切割硬度1、2、3或4的白內障會需要高於相對應臨界值的雷射脈衝能量。例如，在某些環境之下，具有高於10-15 μJoule/脈衝之脈衝能量的雷射能夠切割硬度1的白內障，高於10-20 μJoule/脈衝之脈衝能量的雷射能夠切割硬度2的白內障，高於20 μJoule/脈衝之脈衝能量的雷射能夠切割硬度3的白內障，及高於30-50 μJoule/脈衝之脈衝能量的雷射能夠切割硬度4的白內障。這些臨界能量會受到數種因素的影響，包括脈衝長度、重複率、在整個目標區域內該雷射光點的位置，以及病人的年齡等。

[0259]該等雷射脈衝的效果在許多類別的目標組織中爲其參數的高度非線性函數。因此，具有相同能量/脈衝但不同脈衝持續時間的雷射可能在該等外科手術目標中達到不同的結果。例如，具有特定能量/脈衝值的微微秒脈衝可能在眼部組織中產生氣泡，而增加了不可控制性，然而具

有類似能量/脈衝的飛秒脈衝可以產生仍在控制之下的氣泡。因此，上述的能量/脈衝值可由雷射引擎放射飛秒脈衝來產生，即其長度少於一微微秒的脈衝。

[0260]該雷射光束的強度亦可用其功率來量化。例如具有50 kHz重複率的20 μJoule/脈衝雷射承載1 W的功率。以功率來做表示，該等上述的臨界值可轉化爲在相對應重複率之下的臨界功率0.1 W、1 W及10 W。因此，能夠放射出具有超過這些臨界值功率的雷射光束之雷射引擎即提供不同的功能。

[0261]例如，食品藥物管制局(FDA，Food and Drug Administration)由它們的功率來分類醫療用雷射。雷射等級3B通常用於眼部手術程序，因爲其效果已經被廣泛研究過。輸出其功率少於0.5 W功率的光束之雷射屬於等級3B。因此，具有低於0.5 W功率的雷射提供比具有較高功率之雷射實質上不同的應用。

[0262]圖6A至圖6D所示爲雷射引擎1的功能性，利用其能力以高速來改變該重複率。在多種應用中，該外科手術雷射光束造成在焦點處的光分裂，其中該分裂的區域最終會膨脹成氣泡。因爲該聚焦地點由該雷射系統的掃描光學元件以一掃描速率進行掃描，即會產生一串的氣泡。這些氣泡串可用可控制的方式形成線或面。大量的氣泡會沿著這些線或面來降低該目標組織的機械整合性，使其有可能沿著這些線或面來輕易地分開該目標組織。實際上，該等掃描的雷射光束沿著這些線或面「切割」該目標組織。

[0263]在一些代表性的案例中，該等氣泡之直徑可爲數微米(μ)，其相隔距離在10-50微米或更高的數量級。該外科手術雷射系統基本上在每一次重複時間時產生一次氣泡，即重複率的倒數。因此，該等氣泡基本上爲相等間隔，只要該雷射系統之掃描速率爲固定。

[0264]氣泡在當它們由該雷射脈衝所產生之後即會膨脹。在許多種狀況當中，此膨脹會成爲無法控制。這種無法控制的氣泡膨脹會強裂地散射掉在該目標區域中後續的雷射脈衝，而嚴重地影響到該眼部外科手術的精度與控制。形成彼此太靠近的氣泡爲這種無法控制膨脹的觸發點中之一個，因爲其使得該等氣泡聚結。其它牽涉到氣泡膨脹的可能的程序會干擾到後續形成之氣泡的形成，造成它們之間交互影響，再一次地造成該等氣泡之無法控制的膨脹。因此，在掃描期間維持預定的氣泡區隔對於眼部外科手術雷射系統而言，要對氣泡膨脹保持控制具有相當高的優先性。

[0265]但是，該聚焦地點的掃描基本上牽涉到移動零件，例如鏡面與鍍鋅鐵。如果重複時間相當地短，即使這些移動零件只有最小的慣性與機械性延遲皆會影響到該等氣泡的密度。例如，當沿著一些外科手術圖案進行掃描時，該掃描速率在轉向點與角落處會減慢，其可能造成雷射光點與該等氣泡的密度增加。在其它案例中，僅因爲該外科手術圖案的幾何就會造成增加該等氣泡之表面密度，即使該線性氣泡密度維持固定。

[0266]圖6A所示爲當一固定重複率的雷射掃描通過蜿蜒的外科手術掃描圖案藉以在該目標組織上產生隔離片的示例。但是，接近到該轉向或蜿蜒點時，該掃描器移動速率即減慢，而該重複率維持固定，因此產生增加的線性氣泡密度以及表面氣泡密度，如所示。這種增加的氣泡密度會造成嚴重的控制問題，如上所述。

[0267]此技術問題在某些既有的雷射系統中藉由包括額外的元件來處理，例如光束阻隔器，其會在接近這些轉向點時中斷該雷射光束來防止形成高氣泡密度的區域。但是，包括這些光束阻隔器代表在該雷射系統中加入額外的元件，其操作上要與該掃描本身一起受到控制與同步化。所有這些額外的增加代表進一步的挑戰與增加複雜性。

[0268]即使當該掃描僅是進入到在一掃描圖案中一條線的末端時亦會產生類似的問題，其再一次地減慢該掃描速率，並造成增加的線性氣泡密度。

[0269]圖6B所示爲這些尖銳轉向點可藉由依循「加速度最小化」掃描圖案來避免。加速度最小化圖案的示例爲螺旋，其不會具有尖銳的蜿蜒。但是，即使螺旋圖案也僅會降低該加速度，但不會排除。因此，該掃描速率在這些系統中仍有變化，因此仍必須選擇該固定重複率，使得即使在該圖案之最低速率區段處，該氣泡密度不會增加超過臨界值。但是此設計原理代表對於大多數的圖案來說，爲了必需達到該切割或分離功能所需要之氣泡密度，所需的掃描速率係低於該系統所能夠支援的速率。同樣地，如果

利用較高掃描速率，則該等氣泡的區隔可以變小，造成該等形成的氣泡之間的干擾或交互作用。所有這些效應增加了無法控制或非確定性的氣泡膨脹之危險。

[0270]雷射引擎1的實施可設計成提供本文中一種有用的功能。放大器300之一般的獨特設計與色散控制器，係特別地使其有可能基本上與該變化中的掃描速率同步地改變該重複率。在一些雷射引擎中，該重複率可在範圍10微秒-1秒內的改變時間中做改變，在一些特殊案例中其範圍爲1微秒-1秒內。因此，一些實施能夠包括控制電子元件來根據沿著該外科手術圖案中該掃描速率所設計或測量的減慢來減慢雷射引擎1的重複率，以在該目標區域中維持近乎固定的氣泡密度。這種大致固定的氣泡密度可藉由例如將該重複率正比於該變化的掃描速率來改變的方式達到。利用此功能，雷射引擎1或1'能夠形成具有近乎均勻的線性或表面氣泡密度或區隔的氣泡，並藉此防止或抵消無法控制的氣泡膨脹。

[0271]圖6C所示爲具有與圖6A相同蜿蜒的掃描外科手術圖案，其中該重複率在當該掃描環繞該蜿蜒移動時即被降低，在該等氣泡之間產生具有基本上均勻的線性區隔的切割。

[0272]圖6D所示爲當該螺旋收斂到中心時具有一降低重複率之螺旋外科手術圖案，其中氣泡若無此降低時彼此會太過於靠近。因此，此具體實施例再一次地能夠產生基本上均勻的表面氣泡密度。

[0273]當然，該重複率之快速可變性亦允許不僅產生具有固定密度的氣泡，亦可產生具有預定密度輪廓的氣泡。例如，眼睛的核心朝向其中心處愈硬。因此在一些實施中，該氣泡密度可在當該掃描橫跨該核心的中心處時增加，接著在通過該中心時降低。大量不同的密度輪廓可具有不同的醫療優點與好處。該密度輪廓亦可不僅以預定基礎來調整，亦可回應於該目標區域的成像或感測來調整。

[0274]圖7A至圖7D所示爲協助雷射引擎可基本上同步於該掃描來改變重複率，或至少在該眼部外科手術的時間等級內做改變(例如60-120秒內)之又另一種設計特徵。

[0275]圖7A至圖7B所示爲被稱爲熱透鏡效應的現象與其對於雷射設計的影響。當雷射晶體310由該等泵浦二極體泵浦時，並藉由放大該雷射脈衝轉移其能量，其溫度T即上升。該溫度T時常不均勻地上升：基本上在該泵浦的中心區域中溫度最高，可能是在該光學軸處或附近具有峰值，而隨著增加徑向距離而降低。

[0276]這種不均勻溫度上升至少有兩種效應：(i)因爲折射係數n隨著溫度增加：$n = n(T)$，其在雷射晶體310之中心區域中呈現出最大值；及(ii)溫度的增加使得雷射晶體310之中心區域比其周遭區域熱性膨脹地更多，因此相較於較冷的外部區域會凸起。這兩種效應將傾向聚焦該等入射平行光束。此現象被稱爲熱透鏡效應。此熱透鏡效應被稱爲利用鏡片310'象徵化該雷射晶體。該熱透鏡呈現出數個屈光度的折射，因此其會實質上改變該雷射引擎的效能。

[0277]圖7A所示爲一種雷射引擎的設計，其基本上包含藉由該雷射晶體在操作溫度T=Top下決定熱透鏡效應的折射效應，其由該操作中重複率與光束功率所決定，並經由該雷射引擎的其它光學元件對於該熱透鏡效應引進折射補償。一種示例爲引進額外鏡片312，其可將該收斂光束在其由鏡片310'聚焦之後恢復成平行光束。

[0278]圖7B所示爲這種折射補償係適用於特定操作溫度T=Top，因此僅用於特定重複率與光束功率。實際上，如果一應用需要改變該重複率或功率，所改變的重複率及/或所改變的功率會將雷射晶體310的溫度T由T=Top改變爲T=Top'。此溫度改變藉由其該等熱鏡片而改變該聚焦(虛線所表示的是該收斂光束，改變爲實線者)，將在T=Top處平行的該光束轉換成在T=Top'處發散，因此具有較不良的收斂特性。

[0279]圖7B亦例示出該等收斂特性可藉由調整該折射補償來恢復。改變該折射補償基本上需要調整該雷射引擎的一或多個光學元件，例如移動鏡片、旋轉光柵、或相對於該光學軸移動該光束。圖7B所示爲沿著該光學軸調整補償鏡片312，如箭頭所示。類似於先前的色散補償，經由機械性調整此折射補償的動作係緩慢且需要微細調整與校準。因此，大多數雷射微底地避免此動作，且不允許改變重複率。甚至在那些提供可改變重複率的雷射中，由於該等補償光學元件的調整緩慢，該重複率無法與該等雷射引擎之掃描近乎同步地做改變，甚至無法在眼部外科手術時

間內完成改變。

[0280]圖7C至圖7D所示爲雷射引擎1利用多種設計原理來最小化熱透鏡效應的效應之實施。由鏡片310'造成的折射可在當大多數或所有該等光束傳遞通過或非常靠近鏡片310'的中心處時可顯著程度地降低，因爲橫跨鏡片中心處的光束在該幾何光學近似的層次上不會被折射。在波動光學的層次上，且當包括該等鏡片之有限範圍時，這些中心光束即會被折射，但僅以最小程度折射。

[0281]圖7C所示該等光束可被壓縮而撞擊該等鏡片的中心，例如藉由(i)使用具有聚焦效果之末端鏡322的具體實施例；(ii)將熱透鏡效應雷射晶體310/310'以非常靠近此聚焦末端鏡322之焦點處的方式放置，使得大多數來自聚焦末端鏡322的光束撞擊熱透鏡效應雷射晶體310/310'之中心；及(iii)將其它末端鏡321亦以非常靠近聚焦末端鏡322的焦點之方式放置，藉此非常靠近透鏡化晶體310，以確保該光束被反射回到其本身，而非成爲發散。在這些設計中，當該重複率或該光束的功率改變，而雷射晶體310的溫度由T=Top改變至T=Top'時，因爲已經最小化雷射晶體310之折射影響，所以不會有緊迫的需要來重新調整雷射引擎1的任何機械或光學元件。因此，該重複率或該光束的功率可在不具有任何相對應之折射補償器的調整之下被改變。

[0282]請參照圖4，在多種具體實施例中，任何一或多個該等末端鏡與折疊反射鏡321-324可具有前述的聚焦效果。

[0283]此具體實施例的該等設計參數，包括d1，即末端鏡321與透鏡化晶體310的距離；d2爲透鏡化晶體310與聚焦末端鏡322的距離，以及其它參數，例如光圈、透鏡化晶體310的厚度、及聚焦末端鏡322的半徑等，皆可被最適化來進一步最小化該已經降低的熱透鏡效應。

[0284]圖7D例示一相關設計。在此具體實施例中，末端鏡321與322皆爲該聚焦型式。此示例進一步降低該熱透鏡效應，因爲雷射晶體310可用更高的精度被放置到該等兩個末端鏡之共用的焦點當中。再次地，該等其它參數可建構成受到一額外的設計最適化。

[0285]圖8所示爲雷射引擎1中抑制熱透鏡效應的量化特徵。該水平軸顯示該晶體中心的操作溫度$T_{operating}$= T_{op}對於該周遭溫度$T_{ambient}$的比例。該垂直軸顯示由雷射引擎1所放射之雷射光束的光學功率。該圖形顯示出即使該雷射作業加熱該雷射引擎10-50%高於周遭溫度，該光學功率僅改變數個百分比，到達大約10%即爲$T_{operating}/T_{ambient}$ = 150%。雷射晶體310的光學功率在這樣廣大範圍的操作溫度當中僅有少許改變，係因爲雷射晶體310的熱透鏡效應之折射影像被圖7C與圖7D之設計所有效地最小化。

[0286]以上的詳細說明提供了可用於達到改變該重複率的功能而不需要對於振盪器100之外的光學元件進行調整的設計原理與示例，其中包括(i)在放大器300之內使用色散補償；(ii)使用整合式擴展壓縮器200；及(iii)使用可最小化熱透鏡效應的腔穴架構，以及上述之其它設計考量。使

用以上一或多項該等設計特徵或類似者之雷射引擎能夠在改變時間內重複率範圍當中改變該重複率，而造成僅有有限雷射光束修正。

[0287]此處該重複率範圍可爲10 kHz-2 MHz、或50 kHz-1 MHz、或100 kHz-500 kHz，這些範圍之每一者可提供特定的功能。

[0288]該改變時間可爲多重步驟眼部外科手術的時間等級，例如根據手術的種類其範圍在1-120秒、或10-60秒或20-50秒之內。具有在這些範圍內改變時間的雷射引擎能夠支援該重複率的改變而由一第一外科手術程序所需要的重複率切換到第二外科手術程序所需要的重複率。

[0289]在其它案例中，例如關於圖6A至圖6D所述之具體實施例中，該改變時間可爲由該雷射系統之掃描速率所設定的時間等級，例如該等重複時間的倍數，其中該倍數的範圍爲1-10,000或100-1,000。因爲該重複時間在10 kHz下大約爲100微秒(100 μs)，在1 MHz下爲1微秒，這些「掃描改變時間」或「掃描同步改變時間」的範圍可在1微秒-1秒。

[0290]該等氣泡之線性密度在一些實施中藉由回應於一掃描速率之改變而改變該重複率的方式被保持，使得該掃描速率與該重複率的比例基本上可維持固定。

[0291]該雷射光束藉由該重複率的改變可在有限程度下得到修正。此修正可用多種方式達到，其中包括：(i)該光束直徑改變少於10%或20%，或(ii)該光束的中心移動量

少於該光束直徑的20%或40%。此處該光束直徑可用不同方式來定義，例如該光束之強度下降到在該光束中心處強度的50%的直徑。亦可使用其它定義。

[0292]一種示例爲一種雷射引擎1，其可放射重複率100 kHz的雷射光束，且光束直徑在3微米的聚焦光點，其中該雷射光束的重複率僅藉由在15秒的改變時間中調整振盪器100來改變爲150 kHz，且雖然有此顯著的改變，該光束僅在有限程度下修正：該聚焦光點直徑僅改變15%到3.45微米，且其中心相對於該光學軸僅移動該光束直徑的30%，即移動0.9微米。這種雷射引擎可用於利用100 kHz重複率執行白內障手術，將其重複率在15秒內改變至150 kHz，即可再次用於在後續利用150 kHz重複率執行角膜手術，整個程序耗用不超過100或120秒，而可維持非常良好的光束品質。

[0293]在另一示例中，雷射引擎1能夠放射重複率100 kHz而光束直徑4微米的雷射光束。當該掃描接近到外科手術圖案的尖銳蜿蜒時，在該處的掃描速率即減慢到正常掃描速率的一半，該重複率因此逐漸地降低到其數值的一半，即由100 kHz到50 kHz，以維持該等產生的氣泡或光點之近乎固定的線性密度。如果此減慢在例如100 kHz重複率下重複10次來進行，則改變該重複率的總體時間大約爲100微秒。

[0294]該重複率可在數個步驟中或逐漸地改變，淨結果爲該重複率近乎同步於該雷射光束的掃描時間等級之變化而改變，即在大約100微秒中由100 kHz到50 kHz。雷射引

擎1的設計使其有可能在此相當快的時間中改變該重複率，而仍可維持高雷射光束品質。在一示例中，該雷射光束直徑在100 kHz下爲4微米，其在當該重複率降低到50 kHz時僅改變10%到3.6微米，且該雷射光束的中心移出該光學軸僅該光束直徑的20%，即移出0.8微米。

[0295]又另一種方式來表達雷射引擎1如何能夠在當改變重複率時維持高光束品質爲利用熟知的g1-g2穩定平面。雷射引擎1的實施可保持該光束參數g1與g2在廣大範圍的重複率中的該雙曲線穩定區域之內，例如在10 kHz-2 MHz、或10 kHz-500 kHz、或50 kHz-200 kHz的範圍內。

[0296]少數的光學元件由又另一個有利觀點來看爲雷射引擎1之實施的關鍵性與傑出的特性。飛秒雷射大致而言爲最先進的裝置，在不同於說明手冊的使用環境下，其對於環境影響非常敏感且容易因環境影響而未對準，甚至直接受損，例如自加熱效應。因此，飛秒雷射的該等光學元件需要在定期的短時間間隔當中進行微細調整、重新調整及維護。典型的飛秒雷射可以包含數百或更多個光學元件，那些光學元件中之任一者的故障即能造成整個雷射的故障。

[0297]一些典型的雷射經常在30-60個「循環」之後即故障，該循環即爲切換該雷射引擎的電源開與關。爲了預先防止故障在作業中發生，一些雷射系統的操作者必須計畫定期且昂貴的維護行程，而造成所有伴隨的成本與停機時間，且仍然在現場故障的高風險下進行分裂過程。

[0298]相反地，雷射引擎1之該等具體實施例可循環切換電源開與關超過120次而不需要重新調整雷射引擎1的任何光學元件。對於一些具體實施例，該循環次數可超過180次或甚至240次。

[0299]在外科手術作業中，爲了最小化關於雷射晶體310之加熱與冷卻的問題，該雷射通常在早上開啓，僅在晚上關閉一次，即外科手術雷射時常爲一天一次的循環。依簡單的估計，如果雷射一周使用五次，因此大約一個月20次，則30個循環可轉化成1.5個月之後即會有高故障機會，60個循環則爲3個月。

[0300]相反地，雷射引擎1的一些實施可循環超過120次，相當於6個月的低故障機率。其它實施可循環180或240次，相當於9個月或一整年的低故障機率。因此，雷射引擎1的具體實施例可由防護性維護時間表來操作，而對於使用者及服務提供商同樣地顯著降低其負擔。同時，這種低頻率的維護時間表構成多種可能型式的維護，例如替換該雷射系統的整個區段。在一些案例中，整個雷射引擎1可由較資淺的維護員在現場簡易地替換，而雷射引擎1之維護即在服務提供商的基地中之高科技環境下來進行，而並非在外科手術操作者的較低科技的環境中進行。

[0301]本文件包含許多特定細節，這些並不應視爲所主張之發明範圍的限制，而是做爲本發明之特殊具體實施例所特定之特徵的描述。於個別具體實施例之內容中在本文件中所述之某些特徵亦可實施成單一具體實施例中的組

合。相反地，在單一具體實施例之內容中所描述的不同特徵亦可個別或以任何適當次組合的方式實施在多個具體實施例中。再者，雖然特徵在以上可被描述成在某些組合中運作，且甚至初始時主張爲如此，來自主張的組合之一或多個特徵在某些案例中可由該組合移除，且所主張的組合可關於次組合或次組合的變化。

[0302]本發明揭示一些成像導引式雷射外科手術技術、設備與系統的實施。但是基於該等說明可對所述之該等實施與其它實施進行變化與改進。

【符號說明】

1、1'...雷射引擎

100...(光纖式)振盪器

100'...光學振盪器

150...分光器

200...(擴展)壓縮器/擴展器/整合式擴展壓縮器架構

200'...(光學脈衝)擴展器

201...(第一)光柵

202...鏡片

203...(第二)光柵

204、208...鏡面

205...(第三)光柵

207...(第四)光柵

211...短(白光)脈衝

212、213...擴展脈衝

214...放大脈衝

300...(光學)放大器/色散補償放大器

300'...光學放大器

310...增益媒體/雷射晶體/光學元件/透鏡化晶體

310'...鏡片/雷射晶體

312...(光學軸調整補償)鏡片

321、322...末端鏡/鏡面

323、324...摺疊反射鏡/鏡面

330...切換式偏振器/光學元件

340...薄膜偏振器/光學元件

400...壓縮器

500...法拉第隔離器/法拉第旋轉器

550、560...偏振器

d1...末端鏡與透鏡化晶體的距離

d2...透鏡化晶體與聚焦末端鏡的距離

Toperating... 晶體中心的操作溫度

Tambient...晶體中心的周遭溫度

I586058

公告本 双面影印

發明摘要

※ 申請案號：104124957(由100106174分割)

※ 申請日：100.2.24 ※IPC 分類：H01S 3/110 (2006.01)
H01S 3/102 (2006.01)
A61F 9/008 (2006.01)

【發明名稱】(中文/英文)

具有可變重複率之高功率飛秒雷射 / High Power Femtosecond Laser with Variable Repetition Rate

【中文】

本發明提供用於建構與操作飛秒脈衝雷射的設計與技術。一種雷射引擎的示例包括振盪器，其可產生並輸出飛秒種子脈衝的光束；擴展壓縮器，其擴展該等種子脈衝的持續時間；及放大器，其接收該等擴展的種子脈衝，放大被選出的擴展種子脈衝之振幅以產生放大的擴展脈衝，並將經放大的擴展脈衝之雷射光束輸出回到該擴展壓縮器，以壓縮它們的持續時間，並輸出飛秒脈衝的雷射光束。該放大器包括色散控制器，其補償該等放大的擴展脈衝之色散，使得該雷射之重複率可在程序之間或根據掃描速率進行調整。該雷射引擎可被小型化爲整體光學路徑少於500公尺，並具有較少量的光學元件，例如少於50個。

【英文】

Designs and techniques for constructing and operating femtosecond pulse lasers are provided. One example of a laser engine includes an oscillator that generates and outputs a beam of femtosecond seed pulses, a stretcher-compressor that stretches a duration of the seed pulses, and an amplifier that receives the stretched seed pulses, amplifies an amplitude of selected stretched seed pulses to create amplified stretched pulses, and outputs a laser beam of amplified stretched pulses back to the stretcher-compressor that compresses their duration and outputs a laser beam of femtosecond pulses. The amplifier includes a dispersion controller that compensates a dispersion of the amplified stretched pulses, making the repetition rate of the laser adjustable between procedures or according to the speed of scanning. The laser engine can be compact with a total optical path of less than 500 meters, and have a low number of optical elements, e.g. less than 50.

双面影印

圖式

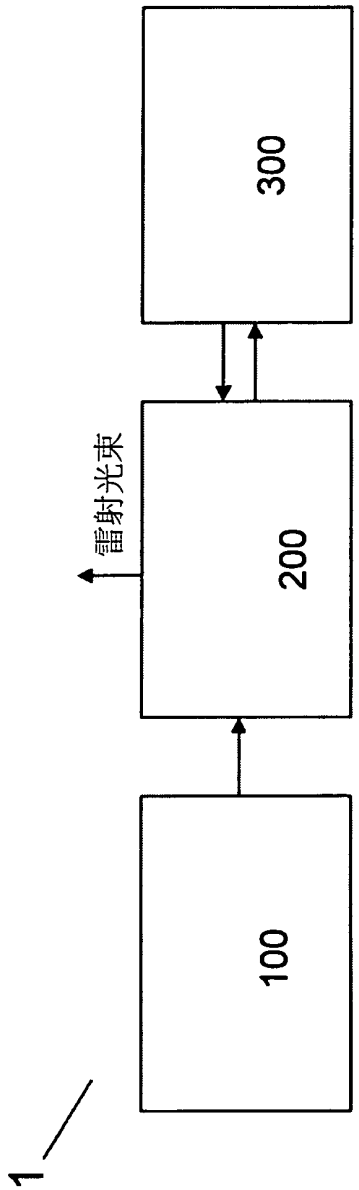


圖1A

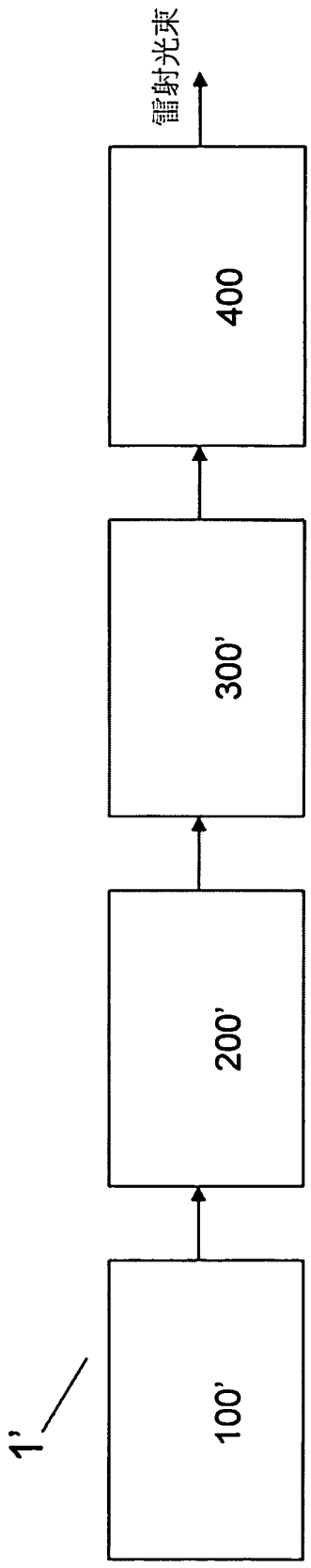


圖1B

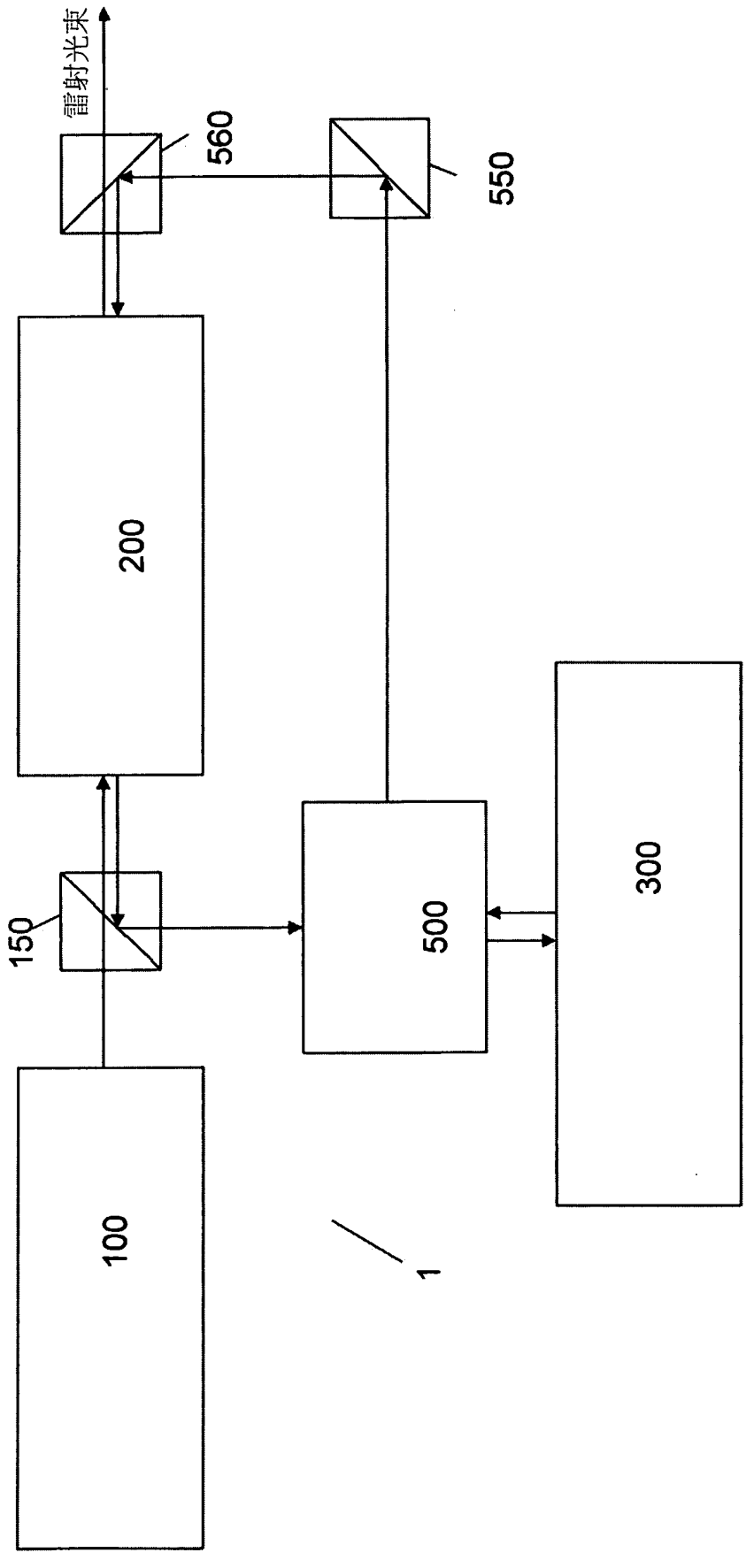


圖2

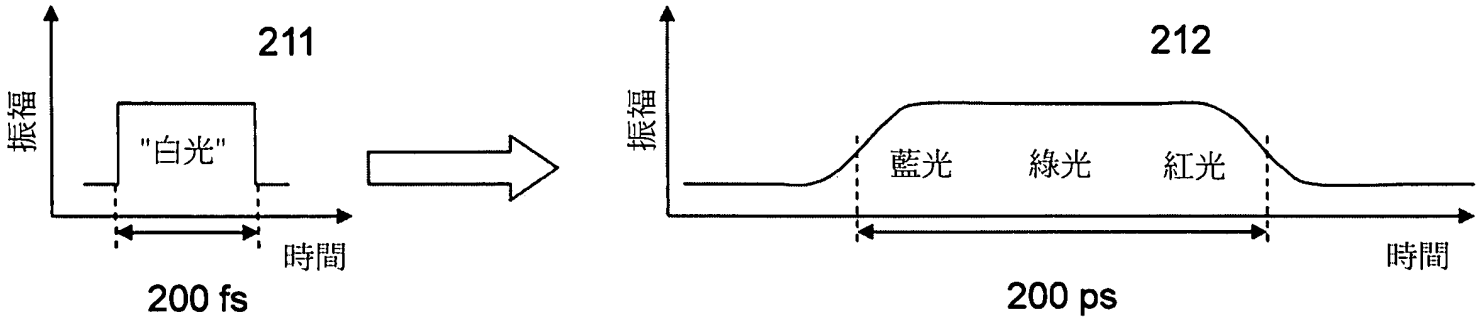


圖3A

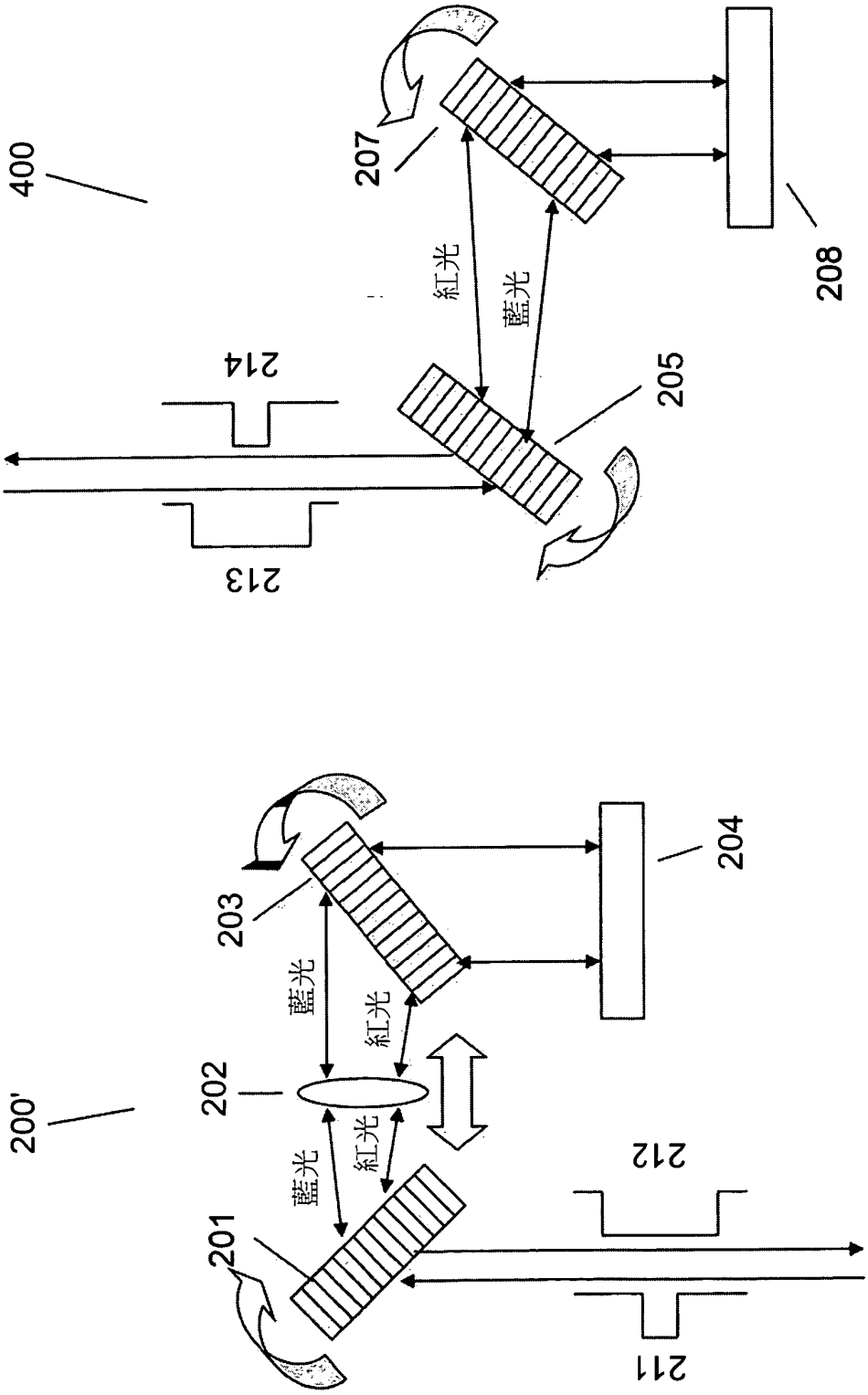

400
207
208
紅光
藍光
214
205
213
200'
203
204
藍光
紅光
202
藍光
紅光
212
201
211

圖3B

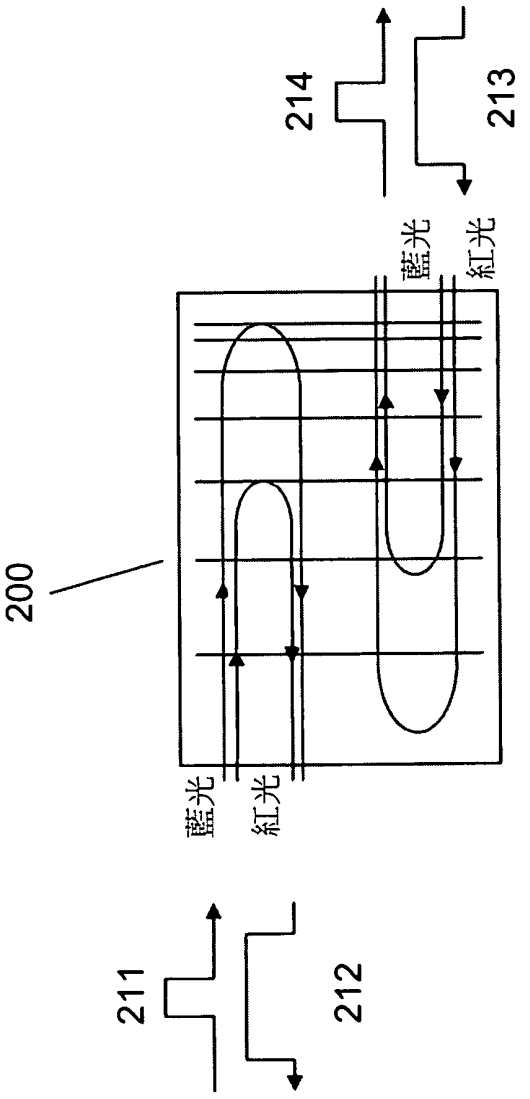


圖3C

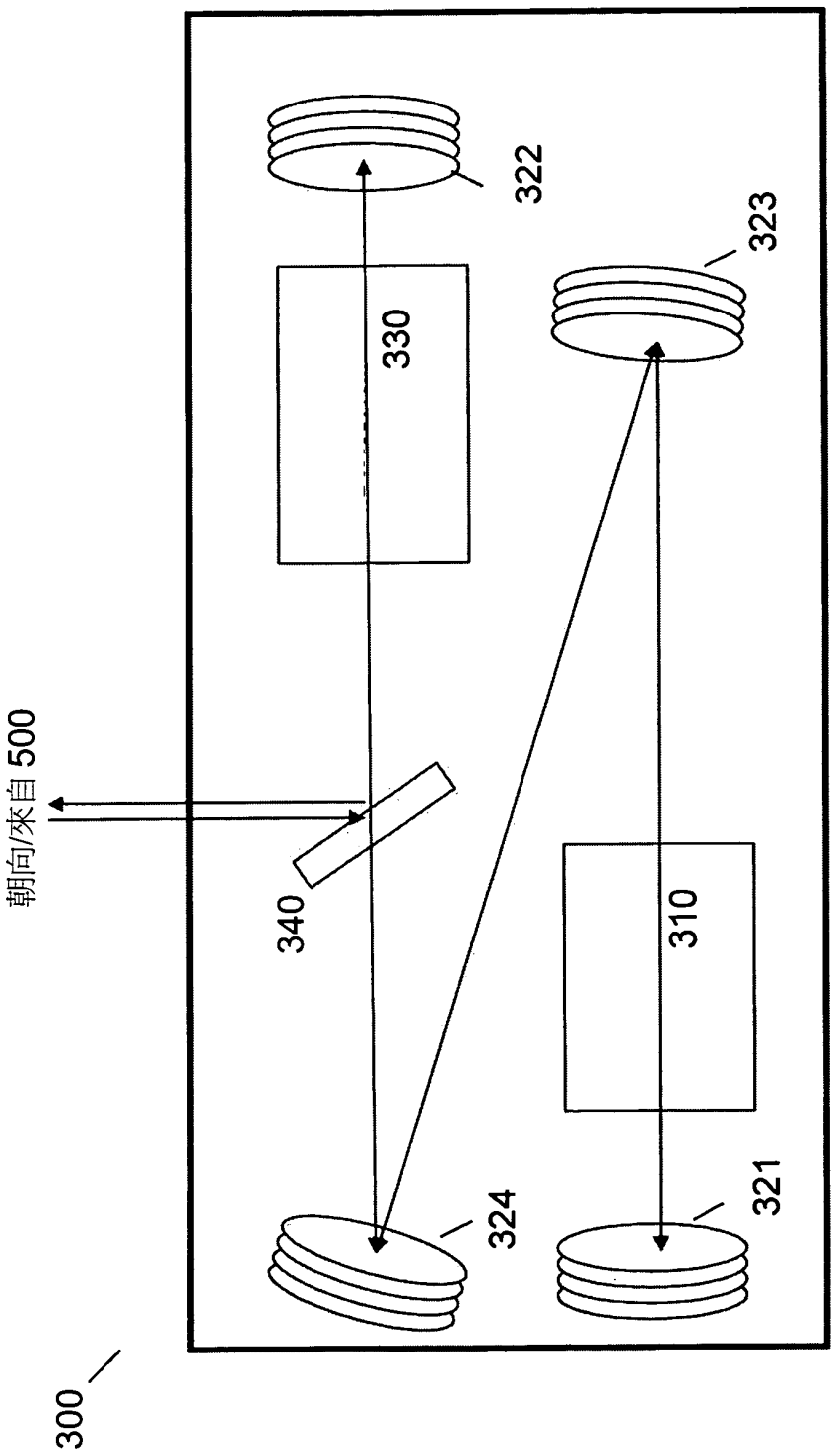


圖4

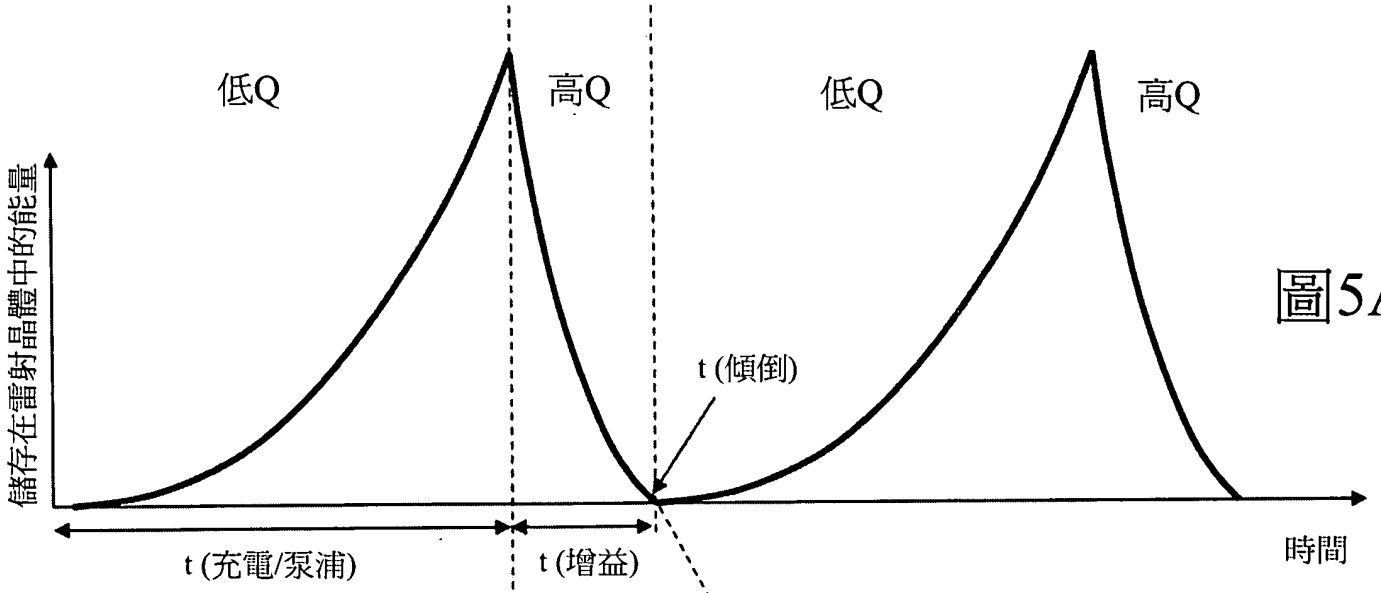

低Q
高Q
低Q
高Q
儲存在雷射晶體中的能量
t (傾倒)
t (充電/泵浦)
t (增益)
時間

圖5A

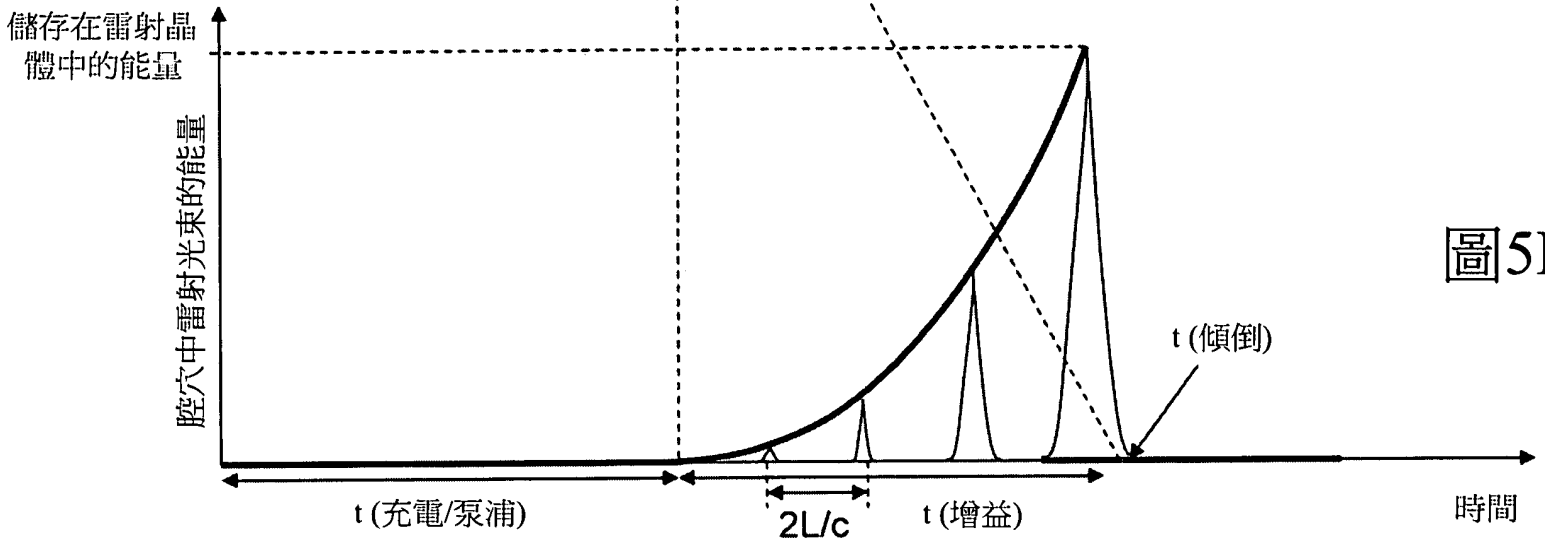

儲存在雷射晶體中的能量
腔穴中雷射光束的能量
t (傾倒)
t (充電/泵浦)
2L/c
t (增益)
時間

圖5B

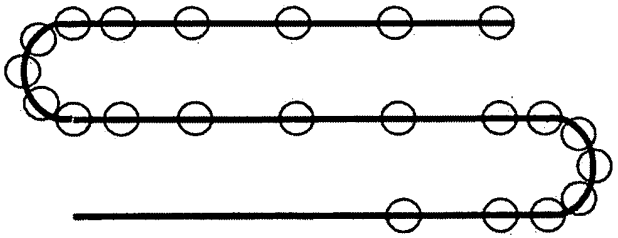


圖6A

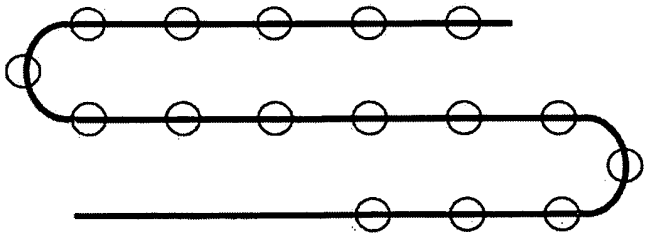


圖6C

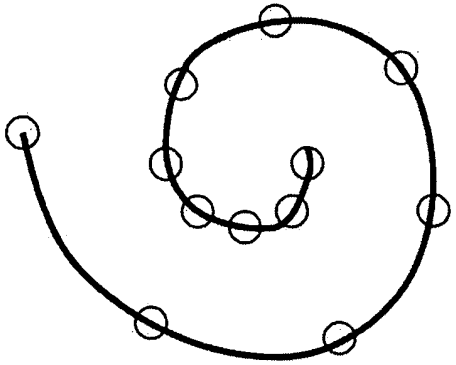


圖6B

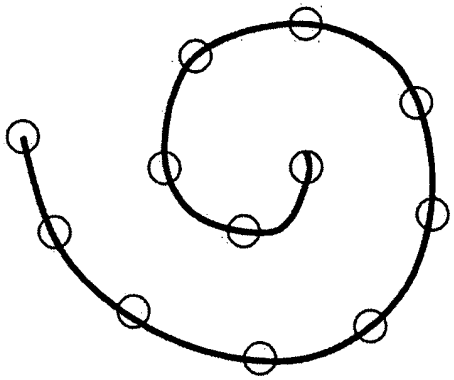


圖6D

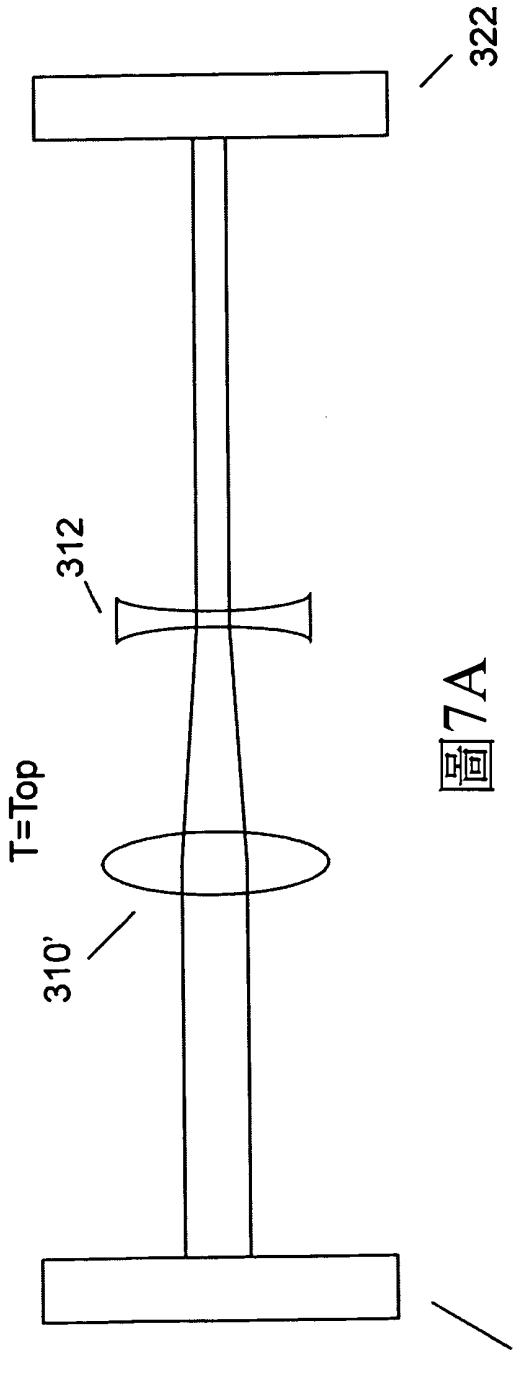


圖7A

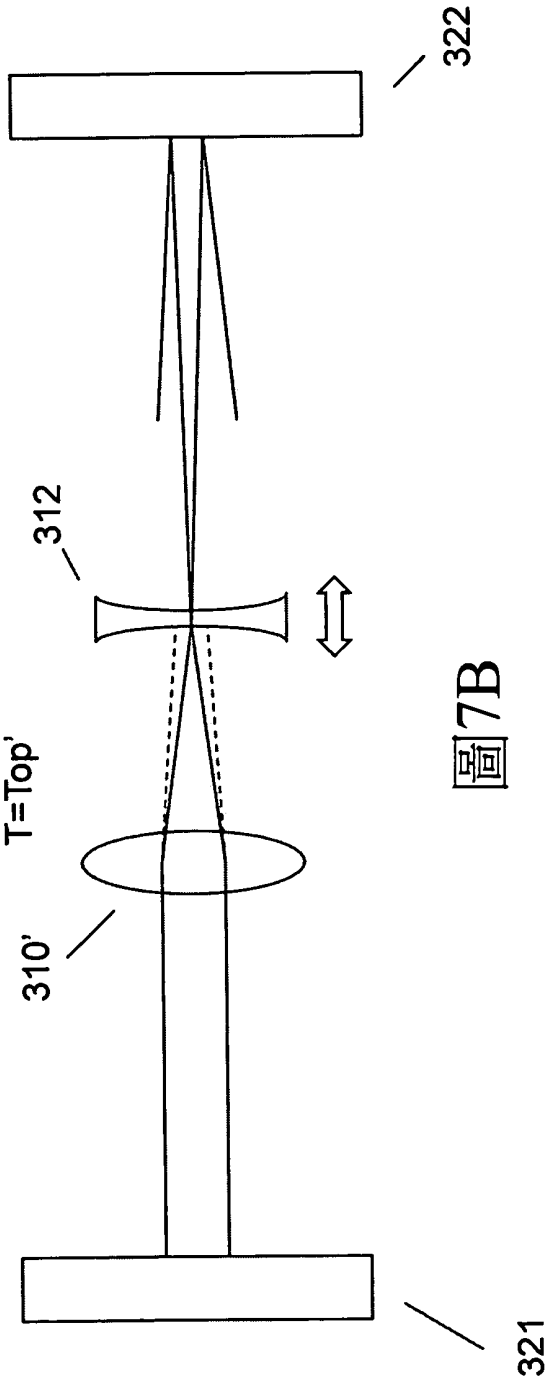


圖7B

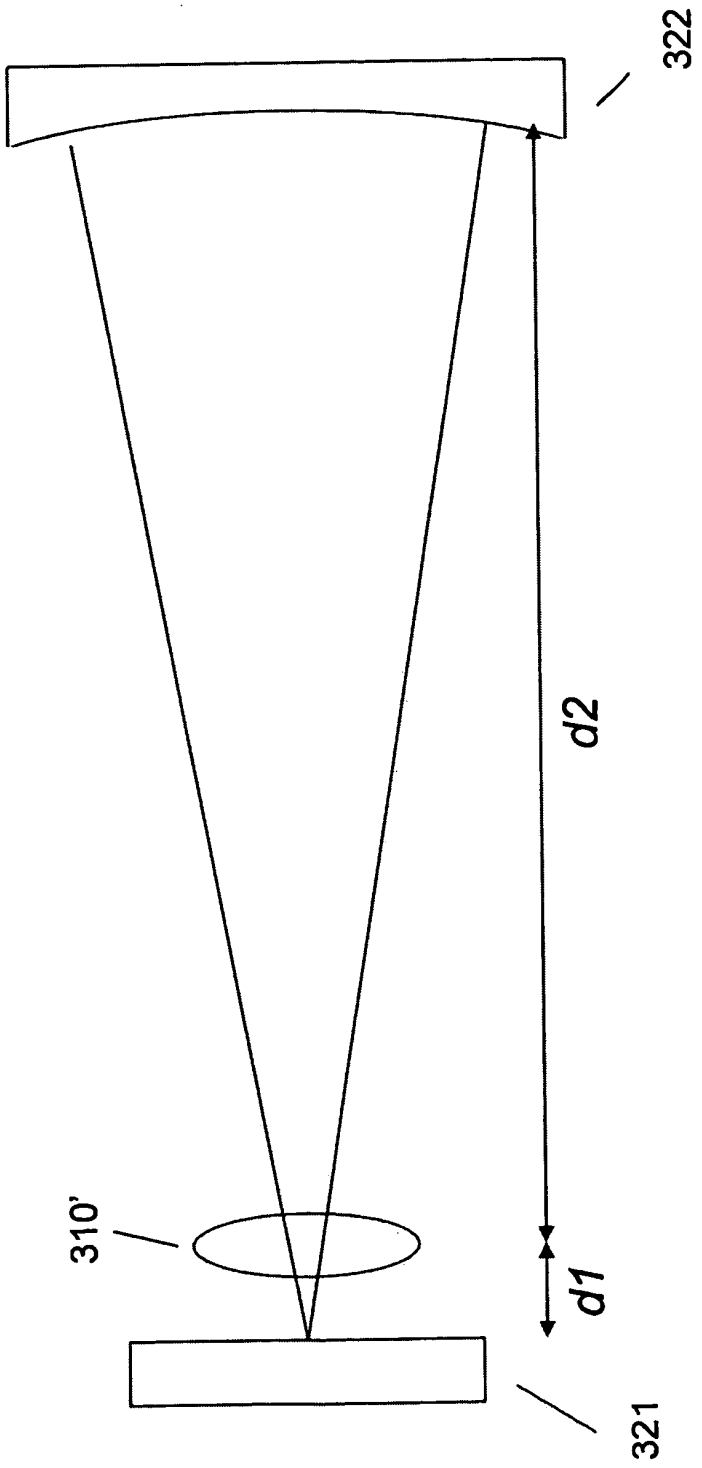


圖7C

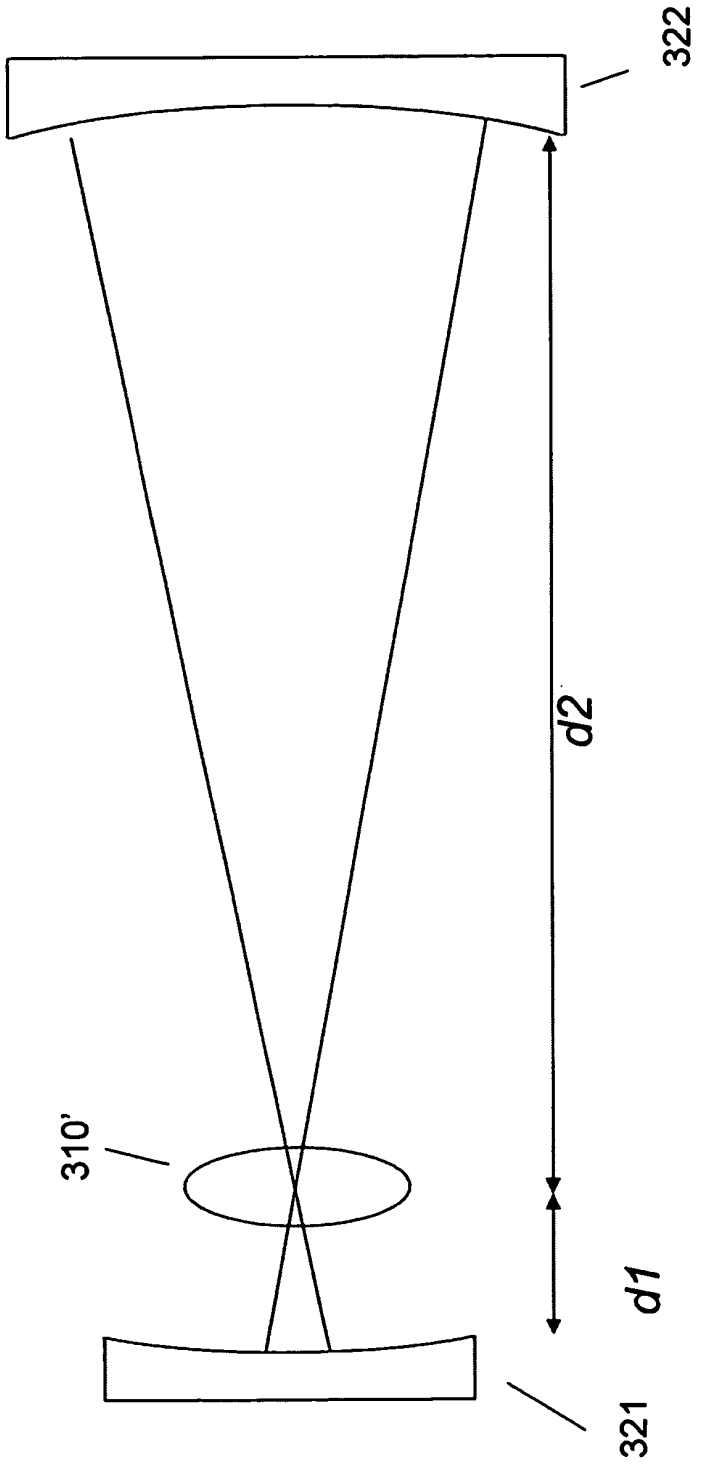


圖7D

光學功率(T operating)/光學功率(T ambient)
1.1
1.0
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
T operating/T ambient

圖8

【代表圖】

【本案指定代表圖】：第（　2　）圖。

【本代表圖之符號簡單說明】：

100...振盪器
150...分光器
200...擴展壓縮器
300...光學放大器
500...法拉第隔離器
550、560...偏振器

【本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式】：

(無)

雙面影印

申請專利範圍

1. 一種利用雷射系統掃描的方法，該方法包含：

利用一振盪器產生飛秒種子脈衝；

利用一擴展器擴展該等種子脈衝之一持續時間；

利用一放大器將經擴展之種子脈衝放大爲雷射脈衝；

利用在該放大器之末端鏡間的一色散補償器，補償在5,000~20,000 fs^2範圍中之該等雷射脈衝的一群組延遲色散；

藉由一光電調變器，以一第一重複率從該放大器輸出該等雷射脈衝；

利用一壓縮器壓縮該等雷射脈衝之一持續時間至1~1,000 fs的範圍；

利用一掃描雷射傳遞系統將該等雷射脈衝聚焦至一第一目標區域中的一聚焦點；

利用該掃描雷射傳遞系統，以該第一重複率在該第一目標區域中掃描該聚焦點；

利用一重複率控制器，將該第一重複率改變成一第二重複率；以及

利用該掃描雷射傳遞系統，在一第二目標區域中以該第二重複率掃描該聚焦點；

其中：

該第一重複率及該第二重複率係在50 kHz到1

MHz之間；

在該第一重複率及該第二重複率下之經掃描雷射脈衝係以大於0.1 W的一輸出功率輸出；及

利用該雷射系統掃描之方法包括在不調整一機械式或光學元件的情況，補償在該第一重複率及該第二重複率下的熱透鏡效應。

2. 如請求項1之方法，其包含：

以一第一掃描速率在該第一目標區域中掃描該聚焦點；

利用該掃描雷射傳遞系統之一處理器將該第一掃描速率改變成一第二掃描速率；以及

以第二掃描速率在該第二目標區域中掃描該聚焦點。

3. 如請求項1之方法，其中：

該第一重複率係小於或等於100 kHz；以及

該第二重複率係大於100 kHz。

4. 如請求項3之方法，其中：

該第二重複率係爲150 kHz。

5. 如請求項1之方法，其中：

該壓縮器及該擴展器係整合至一擴展壓縮器。

6. 如請求項1之方法，其中：

該光電調變器包括一切換式偏振器，其係組配來在該放大器中旋轉經擴展脈衝的一偏振平面，該切換式偏振器具有小於5 ns的一上升時間。

7. 如請求項6之方法，該掃描雷射傳遞系統包含：

一控制電子元件，其係組配來在該切換式偏振器上施加控制信號，使該切換式偏振器以小於5 ns的一上升時間切換。

8. 如請求項1之方法，將該第一重複率改變成第二重複率之步驟包含：

在從該放大器輸出該等雷射脈衝前，利用該光電調變器改變雷射脈衝的往返次數。

9. 如請求項1之方法，將該第一重複率改變成第二重複率之步驟包含：

在1 μs~1s的時間範圍內將該第一重複率改變成該第二重複率。

10. 一種雷射掃描系統，其包含：

產生及輸出飛秒種子脈衝之光束的一振盪器；

一擴展壓縮器，其係組配來進行下列動作：

擴展該等種子脈衝的一持續時間；

從一再生式放大器接收經放大擴展的脈衝；

將該經放大擴展的脈衝之一持續時間壓縮到1~1000 fs的範圍；及

輸出飛秒脈衝的一雷射光束；

該再生式放大器係組配來進行下列動作：

接收來自該擴展壓縮器之經擴展種子脈衝；

以末端鏡間的一增益媒體放大經選出擴展種子脈衝的一振幅，以產生經放大擴展脈衝；

以該放大器之該等末端鏡間的一色散補償器補償在5000~2000 fs^2範圍內之該等經放大擴展脈衝的一色散；及

利用一光電調變器以一重複率朝向該擴展壓縮器輸出該等經放大擴展脈衝；以及

一掃描光學元件，其係組配來以該重複率掃描該雷射光束在一目標區域中的一聚焦點；以及

一重複率控制器，其係組配來將該重複率從一第一重複率改變成一第二重複率；

其中該雷射掃描系統係組配來進行下列動作：

在不調整一機械式或光學元件的情況，補償在該第一重複率及該第二重複率下的熱透鏡效應；

在該第一重複率及該第二重複率下以大於0.1 W的一輸出功率輸出經掃描之雷射光束；及

該第一重複率及該第二重複率係在10 kHz到1 MHz之間。

11. 如請求項10之雷射掃描系統，其更包含：

一掃描速度控制器，其係組配來將一第一掃描速度改變成一第二掃描速度；及

其中該掃描光學元件係組配來以該第一掃描速度或該第二掃描速度對該第一掃描區域中的該聚焦點進行掃描。

12. 如請求項10之雷射掃描系統，其中：

該光電調變器包括一切換式偏振器，其係組配來在

該放大器中旋轉經擴展脈衝的一偏振平面，該切換式偏振器具有小於5 ns的一上升時間。

13. 如請求項12之雷射掃描系統，該掃描雷射傳遞系統包含：

一控制電子元件，其係組配來對該切換式偏振器施加控制信號，使該切換式偏振器以小於5 ns的一上升時間切換。

14. 如請求項10之雷射掃描系統，其中將該第一重複率改變成第二重複率之步驟包含在從該放大器輸出該等雷射脈衝前，利用該光電調變器改變雷射脈衝的往返次數。

15. 如請求項10之雷射掃描系統，其中將該第一重複率改變成第二重複率之步驟包含在1 μs~1s的時間範圍內將該第一重複率改變成該第二重複率。