



(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 I572103 B

(45)公告日：中華民國 106 (2017) 年 02 月 21 日

(21)申請案號：102109824

(22)申請日：中華民國 102 (2013) 年 03 月 20 日

(51)Int. Cl. : H01S5/183 (2006.01)

H01S5/125 (2006.01)

(30)優先權：2012/03/22 美國

13/427,105

(71)申請人：帕洛阿爾托研究中心公司 (美國) PALO ALTO RESEARCH CENTER
INCORPORATED (US)

美國

(72)發明人：諾斯爾普 約翰 E NORTHROP, JOHN E. (US)；溫德勒 湯瑪斯 WUNDERER,
THOMAS (DE)；強森 諾柏 M JOHNSON, NOBLE M. (US)

(74)代理人：王彥評；賴碧宏

(56)參考文獻：

CN 101447644A

CN 102187534A

US 2011/0317540A1

審查人員：許勝宗

申請專利範圍項數：19 項 圖式數：13 共 42 頁

(54)名稱

結合第三反射器之表面發射雷射

SURFACE EMITTING LASER INCORPORATING THIRD REFLECTOR

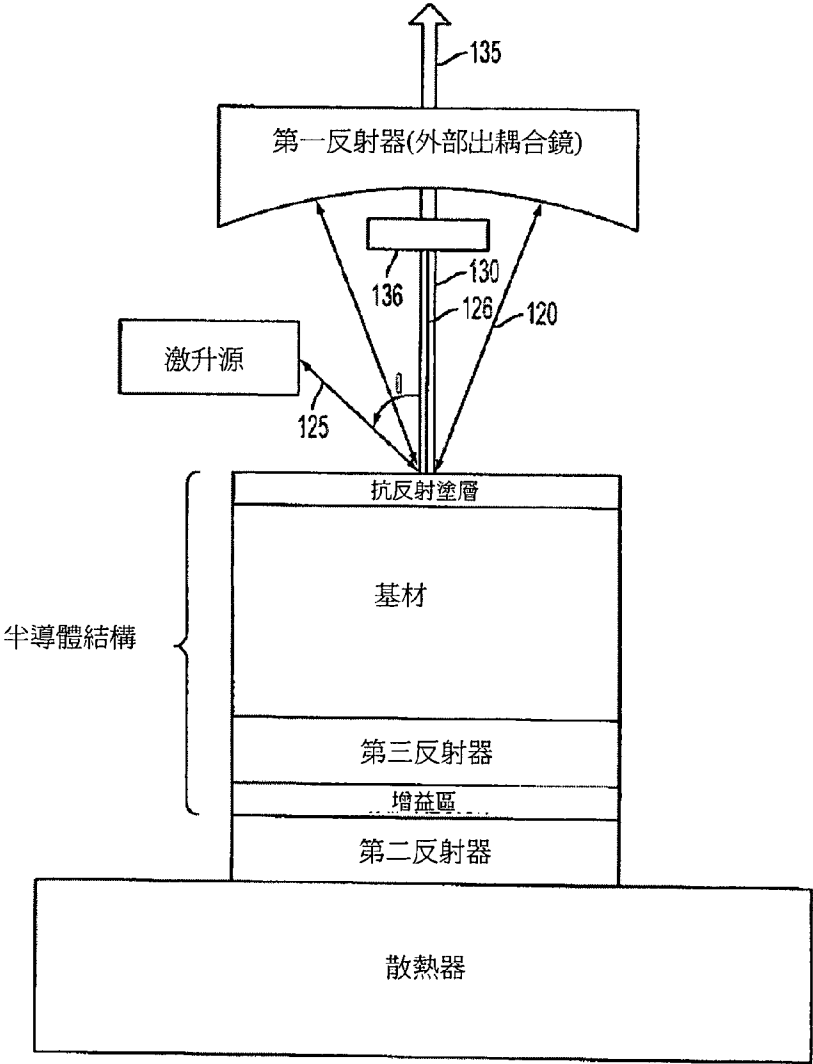
(57)摘要

本發明揭示包含有設置在雷射光學腔中部分反射元件之表面發射雷射結構。一種垂直外腔表面發射雷射(VECSEL)結構包含一配置以在一激升波長 λ_{pump} 發射輻射之激升源、一外部出耦合反射器、一分散式布瑞格反射器(DBR)和一排列在該 DBR 和該出耦合反射器間之活性區，該活性區係配置以在一雷射波長 λ_{lase} 發射輻射。該 VECSEL 結構也包含一排列在該增益元件和該外部出耦合反射器間之部分反射元件(PRE)。該部分反射元件對於在雷射波長之輻射係具有大約 30%至 70%之反射率，且對於在激升波長之輻射具有大約 30%至 70%之反射率。

Surface emitting laser structures that include a partially reflecting element disposed in the laser optical cavity are disclosed. A vertical external cavity surface emitting laser (VECSEL) structure includes a pump source configured to emit radiation at a pump wavelength, λ_{pump} , an external out-coupling reflector, a distributed Bragg reflector (DBR,) and an active region arranged between the DBR and the out-coupling reflector. The active region is configured to emit radiation at a lasing wavelength, λ_{lase} . The VECSEL structure also includes partially reflecting element (PRE) arranged between the gain element and the external out-coupling reflector. The PRE has reflectivity of between about 30% and about 70% for the radiation at the lasing wavelength and reflectivity of between about 30% and about 70% for the radiation at the pump wavelength.

指定代表圖：

- 符號簡單說明：
- 120 . . . 雷射輻射
 - 125 . . . 激升輻射
 - 126 . . . 虛線
 - 130 . . . 輻射
 - 135 . . . 箭號
 - 136 . . . 頻率轉換器



第 1 圖

發明摘要

※ 申請案號：102109824

※ 申請日：102 3 20

※IPC 分類：H01S 5/183 (2006.1)
H01S 5/125 (2006.1)

【發明名稱】(中文/英文)

結合第三反射器之表面發射雷射

SURFACE EMITTING LASER INCORPORATING
THIRD REFLECTOR

【中文】

本發明揭示包含有設置在雷射光學腔中部分反射元件之表面發射雷射結構。一種垂直外腔表面發射雷射 (VECSEL) 結構包含一配置以在一激升波長 λ_{pump} 發射輻射之激升源、一外部出耦合反射器、一分散式布瑞格反射器 (DBR) 和一排列在該 DBR 和該出耦合反射器間之活性區，該活性區係配置以在一雷射波長 λ_{lase} 發射輻射。該 VECSEL 結構也包含一排列在該增益元件和該外部出耦合反射器間之部分反射元件 (PRE)。該部分反射元件對於在雷射波長之輻射係具有大約 30% 至 70% 之反射率，且對於在激升波長之輻射具有大約 30% 至 70% 之反射率。

【英文】

Surface emitting laser structures that include a partially reflecting element disposed in the laser optical cavity are disclosed. A vertical external cavity surface emitting laser (VECSEL) structure includes a pump source configured to emit radiation at a pump wavelength, λ_{pump} , an external out-coupling reflector, a distributed Bragg reflector (DBR,) and an active

region arranged between the DBR and the out-coupling reflector. The active region is configured to emit radiation at a lasing wavelength, λ_{lase} . The VECSEL structure also includes partially reflecting element (PRE) arranged between the gain element and the external out-coupling reflector. The PRE has reflectivity of between about 30% and about 70% for the radiation at the lasing wavelength and reflectivity of between about 30% and about 70% for the radiation at the pump wavelength.

【代表圖】

【本案指定代表圖】：第（ 1 ）圖。

【本代表圖之符號簡單說明】：

120	雷射輻射
125	激升輻射
126	虛線
130	輻射
135	箭號
136	頻率轉換器

【本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式】：

無。

發明專利說明書

【發明名稱】(中文/英文)

結合第三反射器之表面發射雷射

SURFACE EMITTING LASER INCORPORATING
THIRD REFLECTOR

【技術領域】

無。

【先前技術】

無。

【發明內容】

【0001】 本發明揭示包含有設置在雷射光學腔中部分反射元件之表面發射雷射結構。一些實施例包含垂直外腔表面發射雷射(VECSEL)結構，該結構係包含一配置以在一激升波長 λ_{pump} 發射輻射之激升源、一外部出耦合反射器、一分散式布瑞格反射器(DBR)和一排列在該 DBR 和該出耦合反射器間之活性區，該活性區係配置以在一雷射波長 λ_{lase} 發射輻射。該結構也包含一排列在該增益元件和該外部出耦合反射器間之部分反射元件(PRE)。該部分反射元件(PRE)對於在雷射波長之輻射係具有約 30% 至 70% 之反射率，且對於在激升波長之輻射係具有約 30% 至 70% 之反射率。

【0002】 在某些實施中，該 PRE 對於在雷射波長之輻射具有約 40% 至 60% 之反射率，且對於在激升波長之輻射具有約 40% 至 60% 之反射率。於某些結構中，該 PRE

包含 III-V 族材料層之晶格。

【0003】 在 VECSEL 結構操作過程中，其部分反射元件係配置在活性區內提供一峰值 E^2 場，該峰值 E^2 場係大於該基材中之平均 E^2 場之 2 倍、3 倍、4 倍或更多。

【0004】 在某些配置中，該激升源被排列成使得由該激升源所發射之輻射係以角度 θ 入射在該基材之表面上，使得 $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$ ，其中 n_{sub} 為該基材的折射率。外部出耦合反射器、DBR、增益區和 PRE 可被排列成使得超過 50% 或甚至超過 75% 的激升輻射係在該活性區內被吸收。

【0005】 根據某些態樣，該 PRE 包含有分散式布瑞格反射器，其包含有數個層對 (layer pair)，每層對係由 AlGaIn 第一層和 GaN 第二層所組成。該第一層和第二層能夠被磊晶成長在 GaN 基材上。例如，該 PRE 可包含 2 至 20 層對或可包含約 10 至 12 層對。第一層之厚度約為 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{AlGaIn}}(\lambda_{\text{lase}})$ ，且第二層之厚度約為 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{GaN}}(\lambda_{\text{lase}})$ 。例如在一實施中，第一層厚度約為 50 nm，且第二層厚度約為 46 nm。在某些案例中，抗反射塗層 (antireflective coating) 係設置於該基材和該出耦合反射器之間，且該抗反射塗層具有折射率 n_{AR} 和厚度 t_{AR} ，使得 $t_{\text{AR}} = (\lambda_{\text{pump}}/4n_{\text{AR}}) \cos [\sin^{-1}((1/n_{\text{AR}}) \sin \theta)]$ 。

【0006】 某些實施例係導向表面發射雷射結構 (surface emitting laser structure)，該表面發射雷射結構係包含第一反射器、第二反射器及排列在該第一反射器和該第二反射器間之活性區，該活性區係配置以在一雷

射波長 λ_{lase} 發射輻射。基材之至少一部分係排列在該增益元件和該第一反射器之間。該基材具有鄰近該增益元件之第一表面和鄰近該第一反射器之第二表面。部分反射元件 (PRE) 係磊晶成長在該基材之該第一表面上。部分反射元件於在該雷射波長之輻射係具有約 40% 至 60% 之反射率，且於在激升波長之輻射係具有約 40% 至 60% 之反射率。在某些實施中，基材部分具有約 100 μm 之厚度。

【圖式簡單說明】

● 【0007】

第 1 圖係被光激升之結合三反射元件之激升垂直外腔表面發射雷射 (VECSEL) 裝置之示意圖；

第 2 圖係為詳細揭示第 1 圖中之半導體結構和第二反射器部分；

第 3 圖係為針對具有 445 nm 波長及 38 度入射角之激升輻射在活性區內之駐波；

第 4 圖係為針對發射垂直於活性區表面且具有 460 nm 波長之雷射輻射在活性區內之駐波；

第 5 圖係顯示針對範例 VECSEL 結構之一部分之折射率，該結構包含鄰近最後 PRE 層之 GaN 端間隔層、由薄 GaN 間隔層所分隔的三 InGaN 量子井以及位於每三量子井為週期之間的厚 GaN 間隔層；

第 6 圖係為針對圖式於第 1 圖和第 2 圖中之 VECSEL 裝置所計算之折射率輪廓和 E^2 場強度；

第 7 圖係為反射率 (reflectance)(R)、穿透率 (transmission)(T) 及吸收率 (absorption)(A) 作為波長函數

之圖。激升束(pump beam)之吸收率(A)係發生在 VECSEL 的活性區內；

第 8 圖係為估算激升功率對所需雷射函數激升 Γ_{rel} 之函數關係圖；

第 9 圖係使用部分反射元件(PRE)之 VECSEL 結構之更詳細視圖；

第 10 圖係為一結合具有 20 對 AlGaIn/GaN 之 PRE 的 VECSEL 中 $A(\lambda)$ 之圖；

第 11 圖係為在活性區中激升輻射吸收率作對 PRE 層對數目之函數圖；

第 12 圖係為使用於模擬 AlGaIn/GaN PRE 之反射係數(reflectivity)之結果；及

第 13 圖係反射係數對 PRE 層數之函數圖。

【實施方式】

【0008】 表面發射雷射(SELs)，例如垂直腔表面發射雷射(VCSELs)和垂直外腔表面發射雷射(VECSELs)，因為高品質的光譜和空間光學雷射特性而受到關注。因為產生足夠的能量輸出供許多應用使用所需的激升功率之故，在 III 族氮化物材料系統內之 SEL 的實現係面臨著挑戰。本文所討論的實施例係涉及包含三反射元件之 SELs。除了形成用於雷射之光學腔之反射元件外，部分反射之第三反射器係設置在雷射光學腔內。第三反射器係透過雷射之活性區增加雷射輻射之循環使用(recycling)，以降低在 SEL 中雷射發光所需要的門檻功率並獲得較大的雷射發光效率。以下所提供的一些實施

例係說明設置在光學激升雷射之雷射光學腔內之第三反射器之操作。這些實施例所例示的方法可延伸至使用二極體電流注入作為激磁機構之雷射。

【0009】 本文討論之某些實施例係使用被配置成在兩不同波長共振之活性區，即雷射輻射之波長和激升輻射之波長。活性區內的量子井結構係定位成使得它們與激升駐波場之反節點和雷射駐波場之反節點二者相重疊。

【0010】 第 1 圖係結合三反射元件之光學激升 VECSEL 裝置之示意圖。VECSEL 包含一光學激升源、一為該裝置之外部出耦合反射鏡的第一反射器、一像是含有分散式布瑞格反射器之第二反射器以及含有增益結構和第三反射器之半導體結構，其為部分反射元件。雷射光學腔係由外部出耦合反射鏡和第二反射器所限制。第三反射器係設置在光學腔內。

【0011】 激升源發射聚焦在基材上之激升輻射 125。例如，VECSEL 裝置可包含聚焦光學元件，係配置將激升輻射利用聚焦光學元件聚焦在基材上之一點(或抗反射塗層，若有的話)。激升輻射可以一相對於以虛線 126 所示之裝置光軸之角度 θ 入射在半導體結構上。在某些案例中，基材可被磨薄至有助於處理該裝置之厚度，例如約在 100 μm 的等級。在半導體結構之活性區內所產生的某輻射 130(於本文係被表示為雷射輻射)係經由基材射出半導體結構而至被指定為第一反射器之外部出耦合鏡。部分產生於活性區之輻射係通過凹形出耦合反射鏡而自 VECSEL 裝置輸出，由箭號 135 表示輸出雷射輻射。

大部分的雷射輻射係反射回到半導體結構，如箭號 120 所示。基材可選擇性地塗上抗反射塗層以減少循環雷射輻射 120 和/或激升輻射 125 之反射。抗反射塗層可具有折射率 n_{AR} 和厚度 t_{AR} ，使得 $t_{AR} = (\lambda_{pump}/4n_{AR}) \cos [\sin^{-1}((1/n_{AR}) \sin \theta)]$ ，其中 λ_{pump} 是激升輻射的波長。

【0012】 某些實施包含設置在外腔內之選擇性的頻率轉換器 136，例如在雷射輻射之諧波頻率處或頻率和或差之處產生輻射之非線性光學晶體。使用頻率轉換器，位在深紫外光頻譜之雷射輸出 135，例如小於 300 nm，或甚至小於約 250 nm，係能夠由小於 600 nm 之雷射波長而獲得。

【0013】 於一實施例中，激升源係一氮化鎵基 (GaN-based) 之雷射二極體 (或者複數個雷射二極體)，其發射波長係介於 370 nm 至 460 nm，且在某些實施例中，係 405 nm 或 445 nm。激升源之輸出功率可在 1W 至 10W 之範圍。激升源可包含提供一聚焦系統之光學元件以將激升輻射聚焦至大小為 50 μ m 至 200 μ m 之激升束點，為要達到超過 50kW/cm² 之功率密度，該聚焦系統係由一個或多個透鏡所構成。激升源之輸出形成驅動活性區之光學激升。活性區在想要的波長輸出雷射輻射束，例如在 440 nm 至 550 nm 之範圍。外部出耦合反射鏡可塗佈一介電質層以在 99.5% 或更高之半導體增益區之輸出波長提供鏡面反射率 (mirror reflectivity)。

【0014】 在操作過程中，半導體結構會生熱發燙。為降低因過多熱量產生而導致裝置損壞的可能性，該裝

置可將第二反射器緊接在散熱器而安裝在散熱器上。散熱器可以包括，例如銅、鑽石或其他導熱材料。在某些案例中，可利用雷射剝離技術(laser lift-off techniques)將一第二散熱器選擇性地加上。在此作法中，雷射剝離係執行以移除基材，或者基材被薄化至薄殘餘基材。接著第二散熱器被安裝在第三反射器或薄殘餘基材之曝露背側。完成後之結構包含兩個散熱器，其一緊鄰之第二反射器、另一則緊鄰之第三反射器，且移除基材。在後面的範例中，第二散熱器係包含有孔隙，裝置係透過該孔隙被抽真空且發射出雷射。

【0015】 第 2 圖係詳細地顯示半導體結構 201 和第二反射器 230 之部分。於此範例，半導體結構 201 包含具有足夠厚度之基材，以允許 VECSEL 裝置被處理，例如大約在 $100\mu\text{m}$ 的等級。基材之合適材料包括 GaN、AlN、AlGaIn、InGaIn、InAlN、AlInGaIn 或其他在激升波長和雷射波長均具有低吸收率之材料。

【0016】 第三反射器 210 於本文被稱為部分反射元件(PRE)，對於激升輻射和雷射輻射係呈現部分反射。第三反射器 210 係在基材上方成長且可包含 III-V 族超晶格材料，例如 5 至 20 對 211 之 AlGaIn/GaN 或 InAlN/GaN 之 III 族氮化物超晶格。例如，在第 2 圖之範例中，每對 211 之第一層 212 可包含 GaN 且每對 211 之第二層 213 可包含 AlGaIn 或 InAlN。第三反射器可包含 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}/\text{In}_u\text{Al}_v\text{Ga}_{1-u-v}\text{N}$ 之層對。具有設置在雷射光學腔內之 PRE 之裝置，由於活性區中激升輻射較高之吸收率以

及活性區中雷射束所增強的電場強度，可降低達到雷射發光所需的激升功率，其中增強的電場強度係相對於在可能發生損耗之基材中之強度。

【0017】 在某些實施例中，第二反射器 230 可包含介電質 DBR，而介電質 DBR 係包含許多介電質材料對以達成特定之反射率數量。例如，介電質 DBR 可包含在大約 460 nm 之雷射和激升波長上產生 99.9% 反射率之 52 nm TiO_2 /79 nm SiO_2 1/4 波長之 8 個層對。第二反射器 230 可利用電子束蒸發 (electron beam evaporation, EBE) 和/或濺鍍 (sputter) 之方法形成於增益結構上方。

【0018】 半導體結構 201 包括成長在部分反射元件 210 上方之磊晶增益區 220。於某些實施例中，增益區 220 包含複數個 (例如 5-20) 由間隔層 225、227 所分隔的量子井 224。量子井結構 221 可包含一個量子井或者數個緊密間隔的量子井。第 2 圖顯示一實施例，其中每個量子井結構 221 包括被一薄間隔層 225 所分隔之雙重 (dual) 量子井層 224。設置在量子井結構 221 之量子井 224 間之薄間隔層 225 係小於位於量子井結構 221 間之間隔層 227。因此，設置在量子井間之間隔層 225 於本文被稱為薄間隔層且位於量子井結構間之間隔層 227 被稱為厚間隔層，以表示在兩種型態間之相對厚度差異。在量子井結構和反射鏡之間也可以有端間隔層 (end spacer layer)。這些端間隔層之厚度通常不同於厚間隔層或薄間隔層。

【0019】 在某些實施中，每個量子井結構 221 包含一

對由薄 GaN 間隔層所分隔的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子井層 224，其中 $0.10 \leq x \leq 0.5$ 。通常，量子井結構可具有一個或多個量子井。每個量子井層 224 具有大約 3 nm 的厚度且設置在量子井層 224 之間的薄 GaN 間隔層 225 係具有大約 5 nm 的厚度。量子井結構 221 係彼此被具有大約 80 nm 厚度之厚 GaN 間隔層 227 所隔開。增益區 220 之第一個量子井結構可藉由具有大約 87 nm 厚度之厚 GaN 間隔層 222 與第三反射器 210 隔開且增益區 220 之最後一個量子井結構可藉由具有約 87 nm 厚度之 GaN 間隔層 223 與第二反射器 230 隔開。

【0020】 激升輻射束係在增益區 220 內形成一駐波且具有複數個靜止第一反節點。雷射輻射也在增益區 220 內形成一駐波且具有複數個靜止第二反節點。量子井結構 221 被彼此相隔開，使得每個量子井結構 221 係位於雷射輻射 260 和激升輻射 250 之駐波模式之反節點位置。

【0021】 總共含有 N 層之增益區 220 具有光學厚度 OT，係定義成：

$$OT = \sum_0^N [(thickness_n) \times (refractive\ index_n)]$$

【0022】 其中，層 n 係包括量子井層 224、薄間隔層 225、厚間隔層 227 及兩個將第一和最後一個量子井層自反射器 230、210 分開之端間隔層 221、222。意即，增益區 220 具有一光學厚度，該光學厚度係各層之厚度乘以其本身之折射率後相加而得。活性區係設計成使得其光學厚度接近 $1/2 \lambda_{\text{lase}}$ 的整數倍，其中 λ_{lase} 係雷射輻射波長。因為光學波長取決於折射率，折射率係隨著波長而

變化，因此光學波長也會隨著波長而改變。因此活性區之一種可能的設計是 $OT(\lambda_{lase}) = (N_{pairs} + 1)^{1/2} \lambda_{lase}$ ，其中 N_{pairs} 係量子井對之整數數目。於此設計中，雷射輻射之駐波模式之反節點係與量子井大量重疊。藉由適當地選擇激升雷射之入射角和波長，駐波模式具有與量子井相重疊之反節點係有可能達成的。

【0023】 PRE 230 可包含 III-V 族材料之超晶格。在一範例中，PRE 230 包括十層具有目標折射率 2.30 之 AlGaIn。每一層 AlGaIn 之厚度約為 50 nm。AlGaIn 層係由具有厚度 46.4 nm 之 GaN 層所隔開。AlGaIn 之折射率與 AlGaIn/GaNDBR 之反射率係數測量一致。其他 III-V 族或 III 氮化物組合也有可能使用於部分反射元件。例如，如上文所述，InAlN 可取代 AlGaIn 被使用來形成 PRE。使用 InAlN 可加速在 InAlN 和 GaN 之間形成良好的晶格匹配，導致減少的應變及強化的晶格品質和效能。通常 PRE 係設計成使得激升輻射和雷射輻射二者之穿透量 (amount of transmissivity) 可在量子井中提供最佳化的吸收。例如，在某些實施例中，PRE 可設計成針對激升波長具有約 50% 的穿透係數 (transmissivity) 且針對具有波長之雷射輻射具有約 50% 的穿透係數，於下詳細敘述之。

【0024】 如先前所述，若活性區 (量子井和間隔層) 在激升波長展現出基頻共振 (fundamental resonance)，吸收效率會被大大地改善。活性區厚度可包括雷射模式駐波和 / 或激升駐波之數個週期 (period)。

【0025】 第 3 圖和第 4 圖係為 E^2 電場和折射率對 PRE 距離之函數關係圖。第 3 圖係顯示針對在具有 445 nm 波長及 38 度入射角之激升輻射在活性區內之駐波模式 350 和靜止反節點 351。第 4 圖係顯示針對具有在與第 3 圖相同增益區內之 460 nm 波長雷射輻射之駐波模式 460 和靜止反節點 461。此範例中之活性區具有 $N_{\text{pairs}}=4$ 、厚度為 5 nm 之薄 GaN 間隔層(薄間隔層之厚度在第 3 圖和第 4 圖中係以 "T" 表示)、寬度為 3 nm 之 InGaN 量子井(量子井厚度係以 "W" 表示)、厚度為 80.6 nm 之厚 GaN 間隔層(厚間隔層之厚度係以 "L" 表示)以及厚度為 86.3 nm 之 GaN 端間隔層(端間隔層之厚度係以 "IS" 表示)。如第 3 圖和第 4 圖所示，激升雷射輻射駐波 350 和發射雷射輻射駐波 460 二者之反節點 351、461 係與在此增益區內之量子井(W)互相重疊。

【0026】 第 5 圖係顯示一範例 VECSEL 結構之一部分之折射率，該結構包含鄰近最後 PRE 層之 GaN 端間隔層、由薄 GaN 間隔層所分隔的三 InGaN 量子井以及位於每三量子井區間之間的厚 GaN 間隔層。第 5 圖表示活性區內之一週期作為在量子井結構間之中心至中心之距離。於此範例中，

$$OT(\text{端間隔層}) + 1/2 N_{\text{wells}} OT(\text{井}) + 1/2 (N_{\text{wells}} - 1) OT(\text{薄間隔層}) = 1/2 \lambda_{\text{lase}} * m'$$

且

$$OT(\text{厚間隔層}) + N_{\text{wells}} OT(\text{井}) + (N_{\text{wells}} - 1) OT(\text{薄間隔層}) = 1/2 \lambda_{\text{lase}} * m$$

【0027】 其中 $OT(\text{端間隔層})$ 、 $OT(\text{厚間隔層})$ 、 $OT(\text{薄間隔層})$ 及 $OT(\text{井})$ 表示端間隔層、厚間隔層、薄間隔層及光學井之光學厚度，此處的 N_{wells} 係每週期內之量子井數目， m' 和 m 係大於或等於 1 之整數。通常， $m'=m=1$ 。在某些例子中，將 m 或 m' 增加至 2 或更多係可能有益的。

【0028】 $OT(\text{端間隔層})=ISn_{\text{GaN}}$ ，其中 n_{GaN} 係 GaN 之折射率，

【0029】 $OT(\text{井})=Wn_{\text{InGaN}}$ ，其中 n_{InGaN} 係 InGaN 之折射率，

【0030】 $OT(\text{薄間隔層})=Tn_{\text{GaN}}$ 且 $OT(\text{厚間隔層})=Ln_{\text{GaN}}$

【0031】 將以上各 OT 代入上述方程式且令 $m=m'=1$ ，

【0032】 $ISn_{\text{GaN}}+1/2 N_{\text{wells}}Wn_{\text{InGaN}}+1/2(N_{\text{wells}}-1) Tn_{\text{GaN}}=1/2 \lambda_{\text{lase}}$ ，
且

【0033】 $Ln_{\text{GaN}}+N_{\text{wells}} Wn_{\text{InGaN}}+(N_{\text{wells}}-1) Tn_{\text{GaN}}=1/2 \lambda_{\text{lase}}$ ，

【0034】 最小的端間隔層厚度 $IS=1/2\lambda_{\text{lase}}-1/2N_{\text{wells}}Wn_{\text{InGaN}}-1/2(N_{\text{wells}}-1) Tn_{\text{GaN}}$ 。在某些案例中，可使用較厚的端間隔層。端間隔層的厚度可藉由加入 $1/2 \lambda_{\text{lase}}/n_{\text{GaN}}$ 之整數倍 K 至端間隔層之厚度來增加。

【0035】 第 6 圖係顯示針對圖式第 1 圖和第 2 圖中之 VECSEL 裝置所計算之折射率輪廓和 E^2 場強度。此 VECSEL 於實質上平行於增益結構之光軸而發射 460 nm 波長之雷射輻射。活性區係由以 $\theta=38$ 度之入射角入射至半導體結構表面(在此表面上係可設置抗反射塗層)之 445 nm 激升輻射所激發(pumped)。在激升波長 λ_{pump} 、雷射波長 λ_{lase} 、基材折射率 n_{sub} 和激升最佳入射角 θ 間係存在著一種關係。此條件發生在當激升束和雷射束二者之

反節點與活性區內之量子井具有最佳重疊時。此關係如下列所述： $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$ 。因此，如果 $\{\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{lase}}, n_{\text{sub}}\}$ 為 $\{445 \text{ nm}, 460 \text{ nm}, 2.45\}$ ，則 $\theta = 38$ 度。如果 $\{\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{lase}}, n_{\text{sub}}\}$ 為 $\{400 \text{ nm}, 460 \text{ nm}, 2.45\}$ ，則沒有 θ 可滿足此條件。如果 $\{\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{lase}}, n_{\text{sub}}\}$ 為 $\{400 \text{ nm}, 420 \text{ nm}, 2.45\}$ ，則 $\theta = 48$ 度。某些配置係包含了一種 VECSEL 裝置，其中激升源被排列成使得由激升源所發射之輻射係以角度 θ 入射在基材的表面上，使得 $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$ ，其中激升波長為 λ_{pump} ，雷射波長為 λ_{lase} ，且基材折射率為 n_{sub} 。當此條件為最佳時，可產生雷射發光，即使沒有達到最佳的 θ 。對於 GaN 基材， $n = 2.45$ ，則 $\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}}$ 之比值應該大於大約 0.91，係為要在某入射角達到最佳的重疊。

【0036】 在一設計範例中，增益係發生於包含如先前敘述關於第 2 圖之 10×2 InGaN 量子井序列之活性區中。第三反射器 PRE 係包含具有目標折射率 2.30 之十層對 AlGaIn/GaN 之超晶格。每一 AlGaIn 層之厚度大約為 50 nm 且每一 GaN 層之厚度大約為 46.4 nm。在活性區中，GaN 端間隔層具有大約 87 nm 之厚度，厚間隔層具有大約 80 nm 之厚度，薄間隔層具有大約 5 nm 之厚度且 InGaIn 量子井具有 3 nm 之厚度。

【0037】 第 6 圖係顯示裝置之折射率， $n(z)$ 510 對距離基材表面遠近之函數關係圖。於此範例中，基材係塗佈一層抗反射塗層。也顯示於第 5 圖的是電場作為距離基材表面遠近之函數， $E^2(z)$ 520 之圖形。 E^2 場係相對應

於在真空中波長 460 nm 之雷射輻射。對此特別設計之獨立計算指出入射角為 38 度，波長為 445 nm 之激升輻射之吸收率係 94.5%。

【0038】 注意第 6 圖，在 InGaN 增益區內之峰值 E^2 場，相較於損耗是可預期的 GaN 基材內之平均場，係提高了係數 $\Gamma_{rel} \approx 7$ 倍。雖然吸收係數(absorption coefficient)在 GaN 基材中相當地小，例如大約為 1 cm^{-1} 的等級，如果基材係足夠厚到實現機械的穩定性，例如 400 μm ，則會有大量的損耗。因為在基材中任意特定區域之增益或損耗將正比於該區域之 E^2 ，在活性區相較於損耗區能產生場強度之強化作用之設計係有助益的。係數 Γ_{rel} 係參與所需達到雷射發光之激升功率之計算。對於克服損耗和允許雷射發光之增益， E^2 在活性區之大小應該大於在 GaN 基材中之大小。為了減少損耗，將 GaN 基材的厚度盡量減少而仍然維持對於機械穩定性足夠的結構支撐也是有助益的。

【0039】 如第 6 圖中可理解的， E^2 場大量的減少發生在 PRE 區，且在光學腔中使用 PRE 可以在基材中之整個 E^2 場上增加係數 Γ_{rel} 成 2 倍、3 倍、4 倍或更多，例如大約 7 倍。

【0040】 在 GaN 基材中之損耗可能起因於次帶間隙輻射(sub-band-gap radiation)之微弱吸收或散射。在某些 GaN 基材中之消光係數(extinction coefficient) k 可估計為 $k=5 \times 10^{-6}$ 。以此消光係數為基礎，在 GaN 基材中之吸收常數(absorption constant) α 可估計為 1.4 cm^{-1} ，(α

$=2\omega k/c = 4\pi k/\lambda$ ，其中 ω 為輻射頻率， λ 為輻射波長， c 為真空中輻射速率)。採用 $\alpha=1.4\text{ cm}^{-1}$ 且 $T_{\text{loss}}=\exp(-2\alpha L_{\text{GaN}})$ ，起因於此吸收之損耗可針對不同的 GaN 基材厚度 L_{GaN} ，加以計算，顯示於第 1 表。

第 1 表

GaN 厚度 (μm)	T_{loss}
100	0.97
250	0.93
400	0.89

所需達到在裝置中之雷射發光之估計激升功率係由以下方程式 [1] 所給定：

$$P_{\text{th}} = N_{\text{th}} E_{\text{ph}} N_{\text{w}} L_{\text{w}} A_{\text{p}} / f_{\text{abs}} \tau(N_{\text{th}}) \quad [1]$$

【0041】 其中 P_{th} 係在門檻值之載子密度， E_{ph} 係光子能量， N_{w} 係 InGa_xN_{1-x} 量子井數目， L_{w} 係井之厚度， A_{p} 係對焦激升束之面積， f_{abs} 係功率吸收之比率， $\tau(N_{\text{th}})$ 係在載子密度門檻值之載子壽命。增益對於載子密度之關係可由以下方程式 [2] 所決定：

$$g = g_0 \ln (N/N_0) \quad [2]$$

【0042】 其中 g_0 係材料增益， N 係載子密度， N_0 係透光載子密度。對於 InGa_xN_{1-x}， g_0 可估計為 2400 cm^{-1} 。所需達到雷射發光之功率係取決於多少輻射在共振週期增益區被吸收。在活性區被吸收輻射之比例作為激升輻射波長之函數係由模擬所評估，結果顯示於第 7 圖。包含如討論於第 2 圖和第 3 圖中之第三反射器 (38 度入射角 445 nm 波長之激升輻射) 之設計係允許在活性區之共振吸收且

係超過 90%。

【0043】 第 7 圖係顯示反射率(R)、穿透率(T)及吸收率(A)對在例如圖式第 1 圖之裝置之活性區中之波長之函數圖形。於此範例，裝置係包含具有 38 度入射角激升輻射之第三反射器 PRE。PRE 包含 10 個 AlGa_N/Ga_N 層對且活性區具有 10×2 個於上文討論的 Ga_N 間隔層所分隔之 InGa_N 量子井。如第 7 圖所示，對於此裝置在激升波長靠近 445 nm 時，超過 90%的輻射係被吸收在 InGa_N 量子井中。

【0044】 載子壽命 τ ，作為載子密度 N 之函數，係由以下方程式[3]所給定：

$$1/\tau(N) = A + BN + CN^2 \quad [3]$$

【0045】 其中 A 、 B 及 C 三個係數可被測量。例如， A 、 B 及 C 對於 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \approx 15\%$)之測量已由 Y.C.Shen 等人在 Applied Phys. Lett. 91, 141101(2007)所發表。

【0046】 門檻值之載子密度為：

$$N_{th} = N_0 [1/(R_1 R_2 T_{loss})]^{1/G} \quad [4]$$

【0047】 其中 N_0 係透光載子密度， R_1 係外部出耦合反射鏡(第一反射器)之反射係數且 R_2 係介電質 DBR(第二反射器)之反射係數， T_{loss} 係 Ga_N 基材中損耗所造成之因子。

【0048】 指數中之增益因子 G 取決於量子井之材料增益 g_0 、量子井數目 N_w 、每一量子井之厚度 L_w 。 Γ_{rel} 係等於在量子井之峰值 E^2 和在損耗區中 E^2 的平均值之比值，如第 6 圖所示，可表示成：

$$G = 2 \Gamma_{rel} g_0 N_w L_w \quad [5]$$

【0049】 設置在雷射光學腔內之第三反射器使得有可能得到大的 Γ_{rel} 值。第 8 圖為使用方程式[1]計算而得到之門檻激升功率 P_{th} 。當 Γ_{rel} 增加時，所需達到雷射發光之激升功率係快速地下降。如第 8 圖所示，在 $\Gamma_{rel} \approx 4$ 時，所需之激升功率係小於 1 W。第 2 表提供計算中之各參數。

第 2 表

E 光子能量	2.7 eV
D 對焦激升束直徑 ($A_p = \pi D^2/4$)	80 μm
材料增益參數 (g_0)	2400 cm^{-1}
N_0 (透光載子密度)	$0.8 \times 10^{19} cm^{-3}$
Γ_{rel}	4
N_w (InGaN 量子井數目)	20
L_w (InGaN 量子井厚度)	3 nm
f_{abs} (在活性區內之激升功率吸收比率)	95%
GaN 基材厚度	100 μm
GaN 內之吸收係數	1.4 cm^{-1}
T_{loss} (分配損耗因子)	97%
鏡面反射率 $R_1 = R_2$	99.5%
P_{th}	0.8 watts
g_{th}	840 cm^{-1}
N_{th}	$1.0 \times 10^{19} cm^{-3}$
τ	$2 \times 10^{-9} sec$

該注意的是當以上作為範例之光學激升 VECSEL 裝置係已經以特定的材料、活性區之配置，例如量子井區之型態、數目和厚度加以敘述時，可知其他的材料系統和裝置配置亦可配合本文所討論的第三反射器一起使用。因此，本發明揭示係不受限於敘述於本文的材料系統和裝置配置。可以預期的是使用不同材料系統之裝置，例如其他 III-V 族或 III 族氮化物之材料系統，可從第三反射器得到益處。此外，活性區特定的配置可以有所變化，例如三個量子井叢聚(cluster)可以替代所述之量子井對。另外，雖然僅敘述一個光學激升源，其亦可以使用多重激升源。

【0050】 第 9 圖係使用 PRE 之 VECSEL 結構之更詳細之視圖。裝置層係自左而右由 GaN 基材開始而形成。第三反射器，即 PRE，係包含 DBR 部分反射於雷射和激升波長，係成長在 GaN 基材上。PRE 可包含 10 個 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 週期，其中 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 之厚度約為 48.8 nm，GaN 之厚度約為 46.8 nm。例如，AlGaIn 層之厚度約為 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{AlGaIn}}(\lambda_{\text{lase}})$ 且 GaN 層之厚度約為 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{GaN}}(\lambda_{\text{lase}})$ 。

【0051】 活性區包含多重活性區元件，例如大約 10 週期的活性區元件，係成長在 PRE 上。每個活性區元件包含以 GaN 為基礎之雙重量子井結構。每個活性區元件可依序包含以下各層：InGaIn 預應變層(pre-strain layer)($\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ ，厚度 35.3 nm)、第一薄間隔層(GaN，厚度 5 nm)、第一量子井($\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ ，厚度 3 nm)、第二薄間隔層(GaN，厚度 5 nm)、第二量子井($\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ ，厚度 3

nm)、厚間隔層(GaN, 厚度 21.7 nm)和 AlGa_{0.8}N 載子限制及應變管理層(carrier confinement and strain management layer)(Al_{0.2}Ga_{0.8}N, 厚度 20 nm)。

【0052】 第二反射器可包含一層或多層的磊晶半導體層和非磊晶介電質層，排列作為 DBR。例如，在某些配置中，第二反射器可包含含有 GaN/AlGa_{0.8}N 之磊晶 DBR，例如 10.5 週期的 GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N，其中 GaN 層大約為 46.8 nm 厚且 AlGa_{0.8}N 層大約為 48.8 nm 厚。包含非磊晶介電質 DBR 之第二反射器部分可沉積在磊晶 DBR 上。例如，介電質 DBR 可包含 4 週期之 SiO₂/TiO₂，其中 SiO₂ 層約為 78.8 nm 厚且 TiO₂ 層約為 52.3 nm 厚。如果兩個 DBR 鏡合併在一起形成單一混合 DBR，當第一 DBR 之高折射率材料與第二 DBR 之低折射率材料相接觸時，可在目標波長處獲得最高的反射率。因此混合 DBR 介於 GaN 和 SiO₂ 間且與其接觸，因為 GaN 比 AlGa_{0.8}N 具有較高的折射率且 SiO₂ 比 TiO₂ 具有較低的折射率。包含磊晶半導體部分和非磊晶介電質之雙重 DBR 可使用於達到特定之熱傳導率和反射率。磊晶半導體部分可具有比非磊晶介電質部分較高的熱傳導率，然而非磊晶介電質部分可提供比磊晶半導體部分較高的反射率。在某些案例中，磊晶 DBR 和非磊晶 DBR 二者係 1/4 波長 DBRs。

【0053】 內嵌於 GaN 之隔絕 PRE 之反射率分析(描繪於第 12 圖)顯示對於達到活性區內之高吸收率之 PRE 最佳反射率係接近 50%(此分析於下文敘述)。此設計準則係預期可移轉到其他使用任何材料種類之光學激升雷

射。其他可使 PRE 可改良 VECSEL 效能之材料係包含 III-V 族砷化物和磷化物。

【0054】 PRE 可被設計成達到預定反射率數量以產生在活性區中激升和/或雷射輻射之特定吸收率。二步驟程序被使用於此分析。在第一步驟中，PRE 層對數目係基於以下計算而決定：活性區之吸收率作為波長之函數 $A(\lambda)$ 以及作為 PRE 層數目之函數。在第二步驟中，內嵌於 GaN 之隔絕 PRE 之反射率(例如被描繪於第 12 圖)被計算。

● 【0055】 關於第一步驟，第 7 圖為在一裝置之 10×2 InGaN 增益區中之 $A(\lambda)$ 的計算，該裝置係包含在結構上有 10 對 AlGaIn/GaN 且成份上係類似於第 9 圖中所討論之裝置。第 10 圖係為當具相同結構且 PRE 層被增加至 20 對 AlGaIn/GaN 時之 $A(\lambda)$ 。於此狀況下，裝置效能將會惡化，因為僅有大約 55% 之激升輻射在活性區激升波長 $\lambda_{\text{pump}} = 445 \text{ nm}$ 之情形下被吸收。將這些計算延伸到包含不同 PRE 層數之結果係描繪於第 11 圖。第 11 圖係為在活性區中激升輻射吸收率，其係 PRE 層對數目之函數。從第 13 圖可理解的是激升輻射之吸收率對於約 2 至約 20 層係大於約 50%，對於約 4 至約 18 層係大於約 60%，對於約 10 至約 12 層係大於約 90%。

● 【0056】 關於第二步驟，PRE 之反射率測量可藉由將 PRE 內嵌於 GaN 中且針對入射輻射對反射率 R 建模而獲得。反射率作為波長之函數係於下文計算以作為在 PRE 內 AlGaIn 層數之函數。模擬之結構為圖式第 12 圖，其顯示 AlGaIn/GaN PRE 且在其每一側具有約 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 厚之

GaN。含有約 70 nm 厚之 SiO_2 抗反射塗層係設置於頂部 GaN 層上。反射率 $R(\lambda)$ 作為 λ 之函數係被計算作為 AlGaIn PRE 層數之函數。第 13 圖係為 PRE 之反射率對 AlGaIn 層數之函數關係圖，其針對 445 nm 波長，入射角 38 度之輻射和 460 nm 波長，垂直入射(0 度)輻射兩種狀況。這些計算係針對顯示於第 12 圖之結構而執行。第 11 圖指出 AlGaIn 層數之最佳數目係介於 10 至 12 之範圍。第 13 圖顯示通常對於垂直入射輻射，PRE 應該具有介於約 40% 至約 60% 之反射率。雖然我們已透過特定系統分析而得到此結果，我們期望此結果也適用於使用 PRE 和增益區之其他系統。從討論關於第 10 至 13 圖之分析中，明顯的是具有約 2 到約 20 對的 AlGaIn/GaN 之 PRE 係可增加在活性區中之吸收率。對於最佳吸收率，介於約 2 到約 20 對之間，或者介於約 10 到約 12 對之間可被使用。

【0057】 許多數值和範圍係提供於所述實施之不同態樣。這些數值和範圍僅被視為範例且並非意圖限制專利請求之範圍。例如，敘述於本發明之實施例可在所揭示之數值範圍內被實行。此外，多種材料被確認係適合實施例之各個層面。這些材料係被視為範例性質，且並非意圖限制專利請求之範圍

【0058】 前文各種不同實施例之敘述係僅作為示例和敘述而非作為限制之目的。揭示之實施例係非欲詳盡的或限制實施該實施例。許多修正及變化態樣係有可由上述教示而得。

【符號說明】

【0059】

120	雷射輻射
125	激升輻射
126	虛線
130	某輻射
135	箭號
136	頻率轉換器
201	半導體結構
210	第三反射器
211	組
212	第一層
213	第二層
220	增益區
221	量子井結構
224	量子井
225、227	間隔層
230	第二反射器
350、460	駐波模式
351、461	靜止反節點
510	折射率
520	電場

申請專利範圍

1. 一種垂直外腔表面發射雷射 (VECSEL) 結構，包含：
 - 一外部出耦合反射器；
 - 一分散式布瑞格反射器 (DBR)；及
 - 一 III 族氮化物異質結構，其磊晶成長在一 GaN 基材上，且含有：
 - 一配置在該 DBR 和該出耦合反射器間之活性區，該活性區係構造成響應從一激升源發射且具有激升波長 λ_{pump} 的激升輻射在一雷射波長 λ_{lase} 發射輻射；及
 - 一部分反射元件 (PRE)，其具有交替的磊晶層對，該交替的磊晶層對包含一 AlGaIn、InAlN 或 InAlGaIn 的第一層、以及一 GaN 或 InAlGaIn 的第二層，該部分反射元件配置在該活性區和該外部出耦合反射器之間，該部分反射元件對於在該雷射波長之輻射係具有介於約 30% 至約 70% 之間的反射率，且對於在該激升波長之輻射係具有介於約 30% 至約 70% 之間的反射率。
2. 如申請專利範圍第 1 項之結構，其中該 PRE 對於在該雷射波長之輻射具有約 40% 至 60% 之反射率，且對於在該激升波長之輻射具有約 40% 至 60% 之反射率。
3. 如申請專利範圍第 1 項之結構，其中在該 VECSEL 結構的操作過程中，該 PRE 係構造為在該活性區內提供一峰值 E^2 場，該峰值 E^2 場係大於該基材中之平均 E^2 場之 2 倍。
4. 如申請專利範圍第 1 項之結構，其中在該 VECSEL 結

構操作的過程中，該 PRE 係構造為在該活性區內提供一峰值 E^2 場，該峰值 E^2 場係大於該基材中之平均 E^2 場之 3 倍。

- 5.如申請專利範圍第 1 項之結構，其中由該激升源所發射之輻射係以角度 θ 入射在該基材之表面上，使得 $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$ ，其中 n_{sub} 為該基材的折射率。
- 6.如申請專利範圍第 5 項之結構，其中該外部出耦合反射鏡、DBR、活性區及 PRE 係被配置成使得超過 50% 的該激升輻射係在該活性區內被吸收。
- 7.如申請專利範圍第 5 項之結構，其中該外部出耦合反射鏡、DBR、活性區及 PRE 係被配置成使得超過 75% 的該激升輻射係在該活性區內被吸收。
- 8.如申請專利範圍第 1 項之結構，其中該等層對之數目係介於約 2 至 20 之間。
- 9.如申請專利範圍第 1 項之結構，其中該等層對之數目係介於約 10 至 12 之間。
- 10.如申請專利範圍第 1 項之結構，其中該第一層的厚度約為 50 nm，該第二層厚度約為 46 nm。
- 11.如申請專利範圍第 1 項之結構，其中該第一層為 AlGa_N 且該第二層為 Ga_N，該第一層的厚度約為 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{AlGa}_N}(\lambda_{\text{lase}})$ ，且該第二層的厚度約為 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{Ga}_N}(\lambda_{\text{lase}})$ 。
- 12.如申請專利範圍第 1 項之結構，其中一抗反射塗層係設置於該基材和該出耦合反射器之間。

13.如申請專利範圍第 12 項之結構，其中該抗反射塗層具有折射率 n_{AR} 和厚度 t_{AR} ，使得 $t_{AR}=(\lambda_{pump}/4n_{AR})\cos[\sin^{-1}((1/n_{AR})\sin\theta)]$ 。

14.如申請專利範圍第 1 項之結構，其中該活性區係包含：

一個以上的量子井結構，每個量子結構係包含：

一個以上的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子井，其中 $0.10\leq x\leq 0.5$ ，每個量子井具有厚度 W ，且構造為發射具有波長 λ_{lase} 之雷射輻射。

15.如申請專利範圍第 14 項之結構，其中：

每個量子井結構係包括二個以上的量子井，且在每對量子井之間設置有一具有厚度 T 之薄 GaN 間隔層；且

每個活性區元件係包括二個以上的量子井結構，且在每對量子井結構之間設置有一具有厚度 L 之厚 GaN 間隔層，其中 L 係大於 T 。

16.如申請專利範圍第 15 項之結構，進一步包含一具有厚度 IS 之 GaN 端間隔層，該 GaN 端間隔層係設置在該 PRE 和該等量子井結構之一者之間，其中該等厚度 W 、 T 、 L 及 IS 係構成使得該雷射輻射之駐波中的諸反節點係與該等量子井結構中之量子井相重疊。

17.一種表面發射雷射結構，包含：

一第一反射器；

一第二反射器；

一活性區，其包含配置在該第一反射器和該第二

反射器間的多個活性區元件，各活性區元件包括：

一個以上的量子井結構，其含有配置在障壁層之間的一個以上的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子井，其中 $0.10 \leq x \leq 0.5$ ，該等量子井係構成發射具有波長 λ_{lase} 之輻射；及

一含有 InGaN 的預應變層；以及

一 GaN 端間隔層，其配置在該第二反射器和該等量子井結構之一者之間，其中該活性區和該端間隔層係構成使得該輻射的諸反節點係與該活性區的量子井結構相重疊。

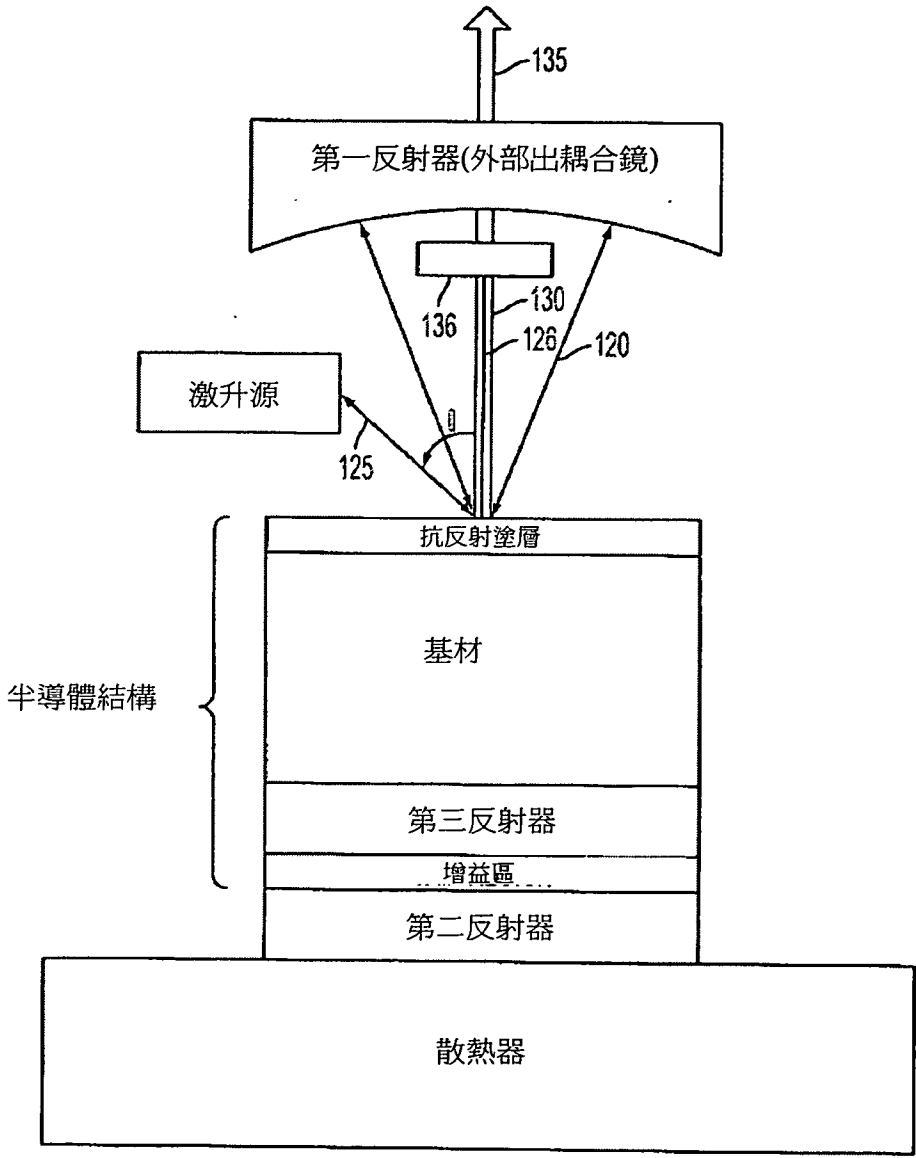
18.如申請專利範圍第 17 項之結構，其中每個活性區元件包含一 AlGaN 限制及應變管理層。

19.如申請專利範圍第 18 項之結構，其中

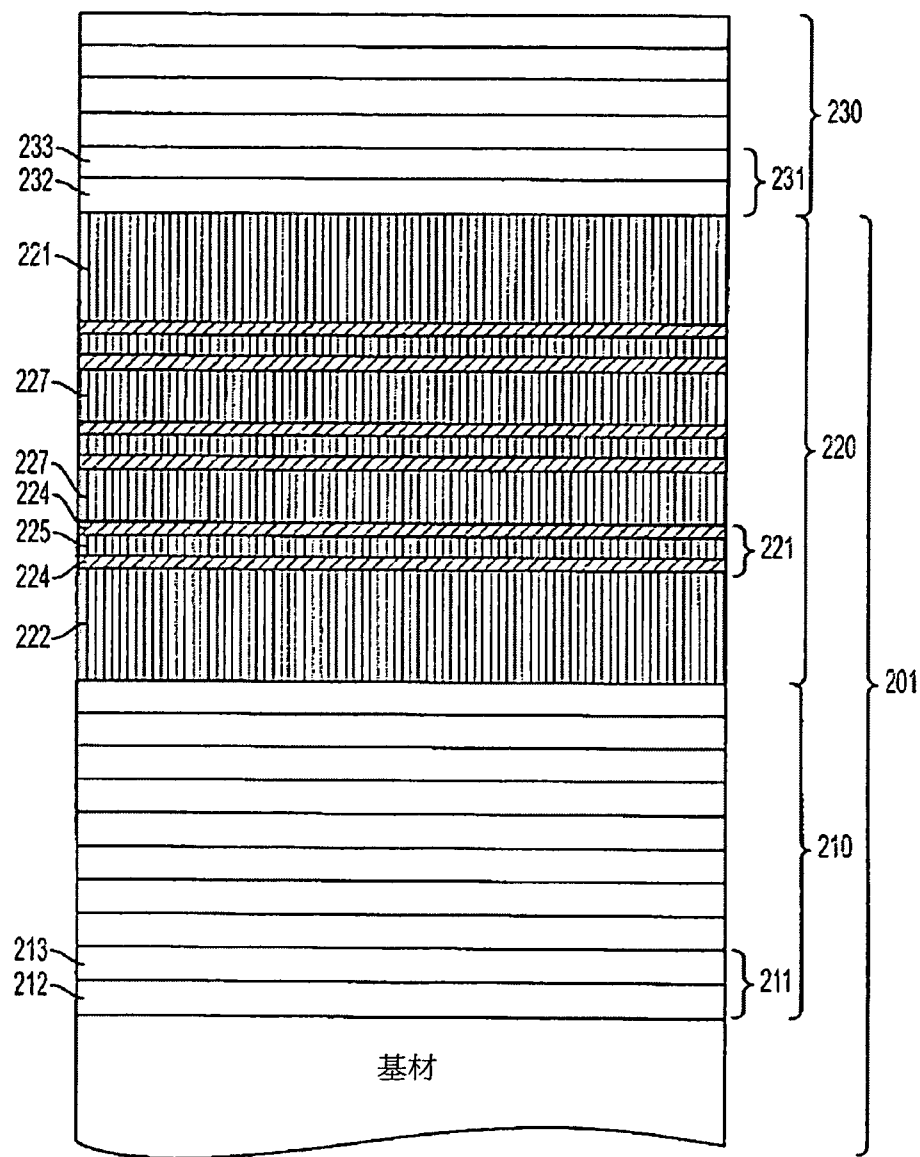
該一個以上的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子井包含至少兩個 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子井，且在每個量子井結構中的每對量子井之間設置有一具有厚度 T 之薄 GaN 間隔層；且

每個活性區元件係包括至少兩個量子井結構及一個以上之具有厚度 L 的厚 GaN 間隔層，其中在每對量子井結構之間設置有一個厚 GaN 間隔層，其中 $T < L$ 。

圖式

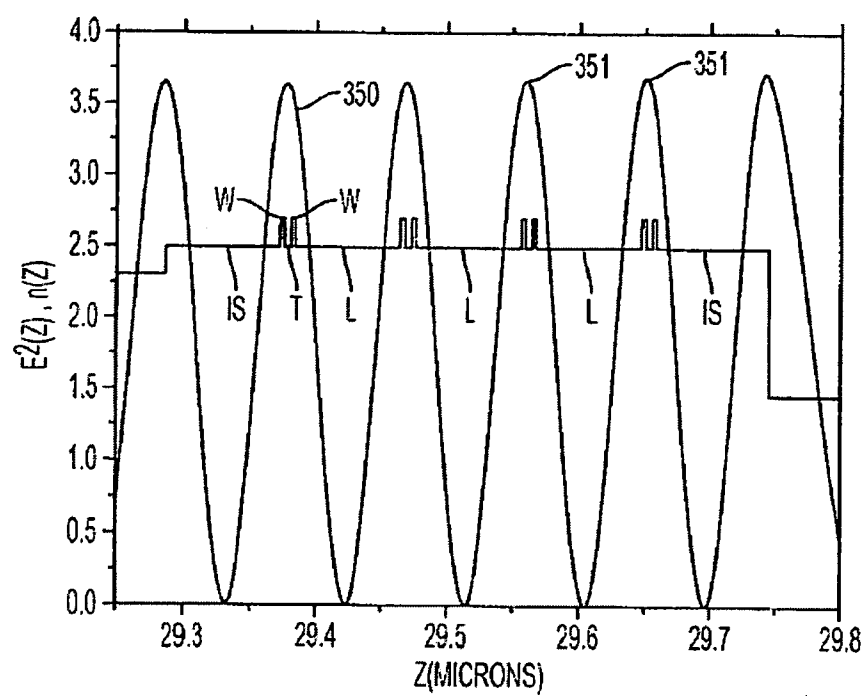


第 1 圖



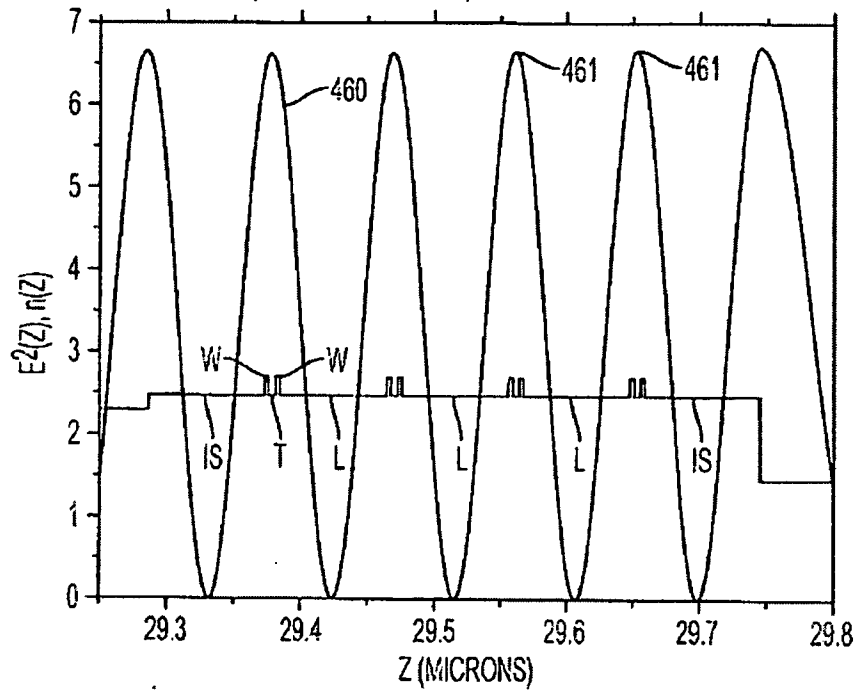
第 2 圖

在增益區中之激升雷射之駐波
(38 度, 445 nm)

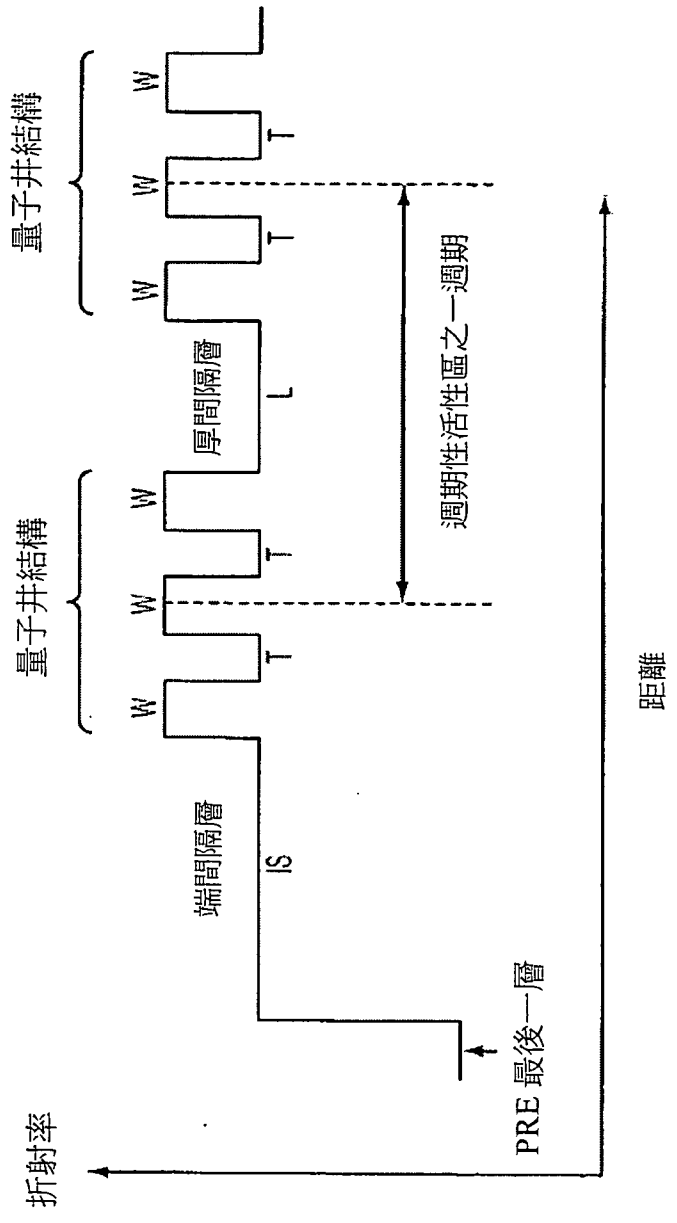


第 3 圖

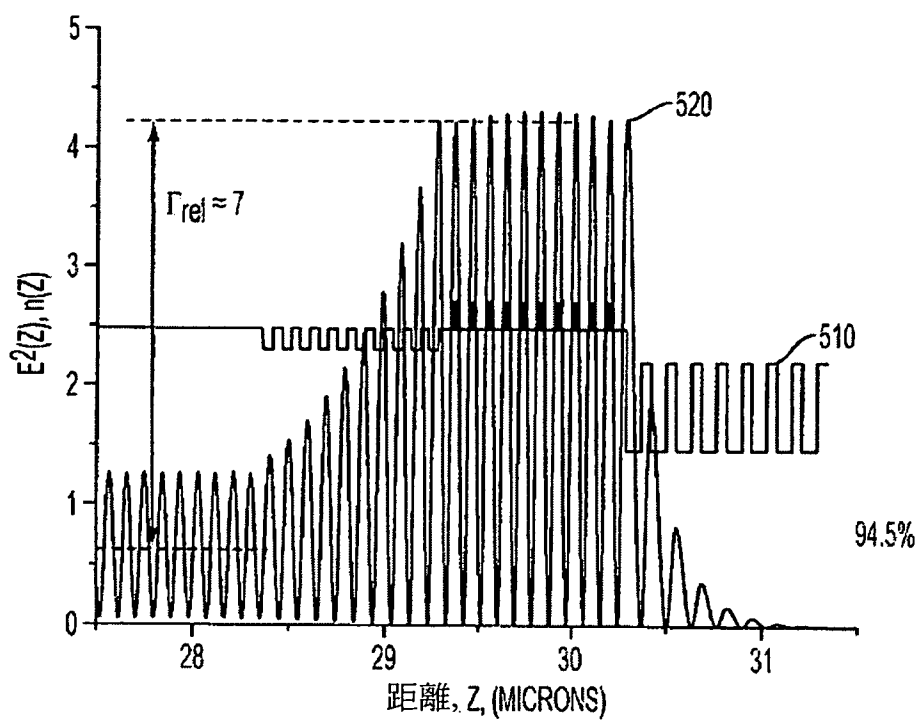
在增益區中之發射雷射輻射之駐波
(0 度, 460 nm)



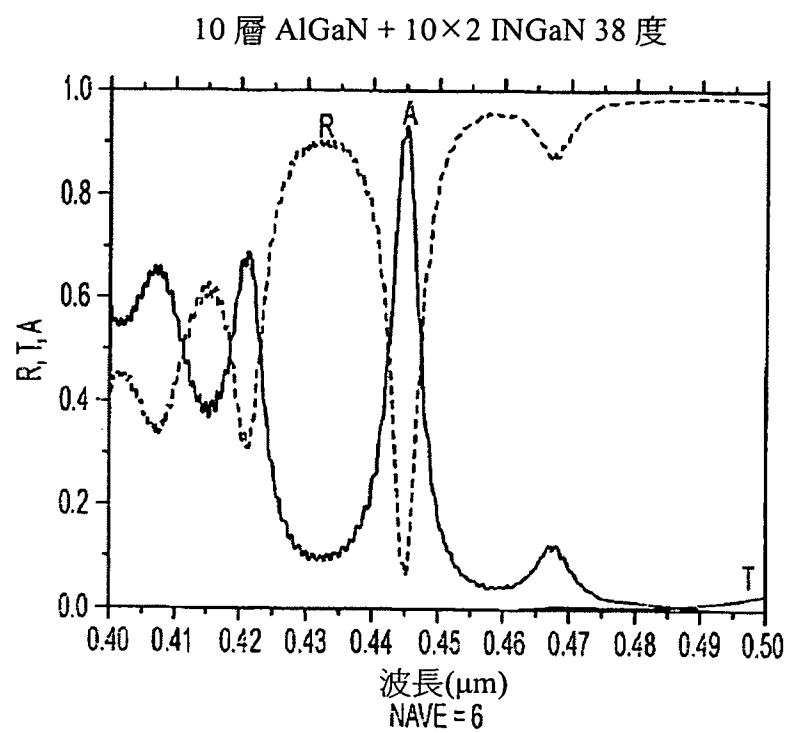
第 4 圖



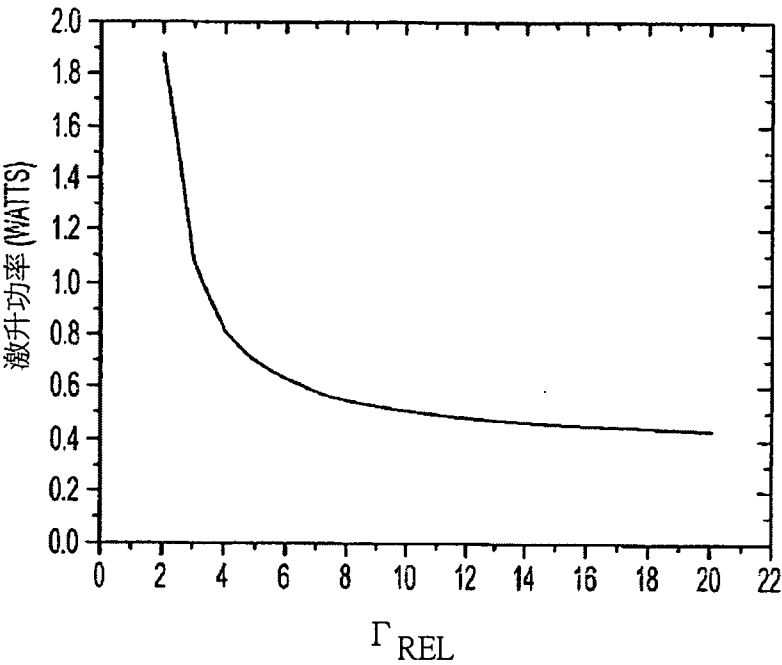
第 5 圖



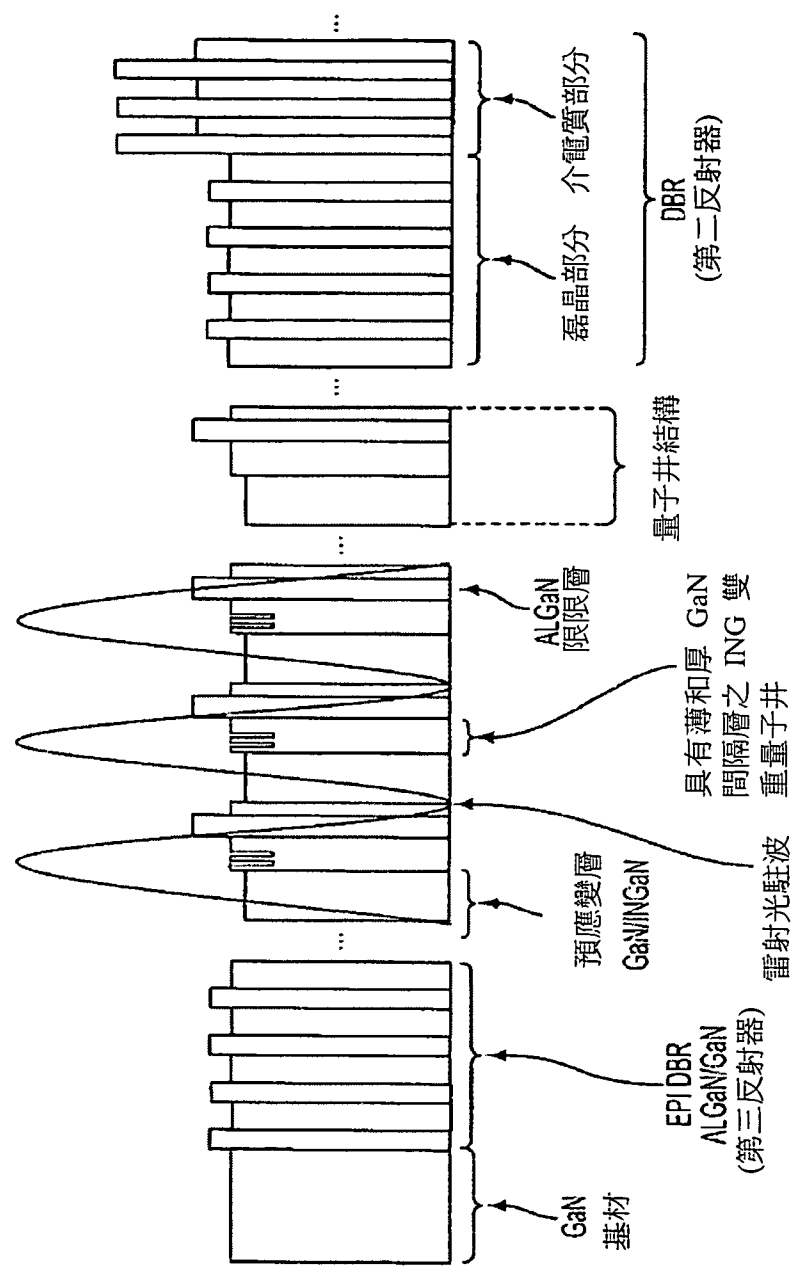
第 6 圖



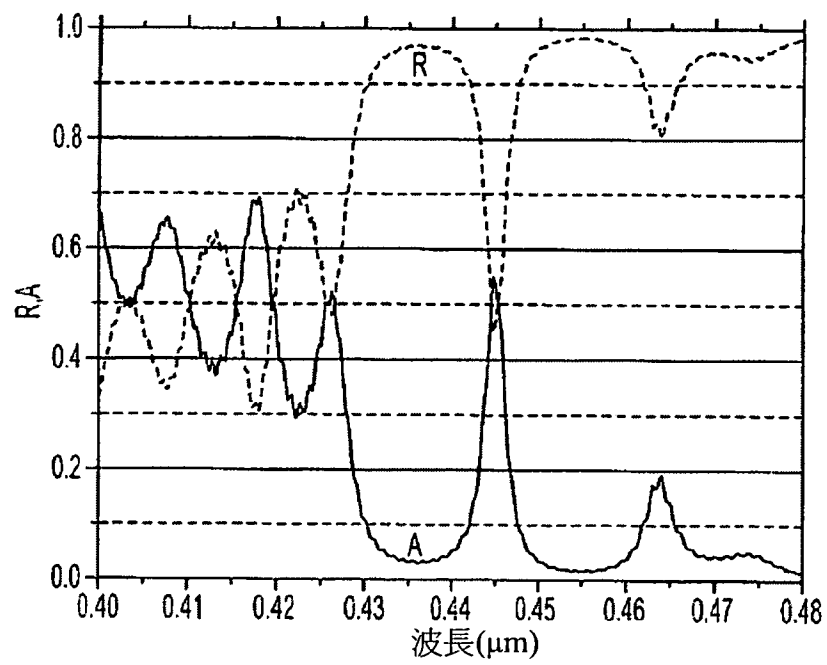
第 7 圖



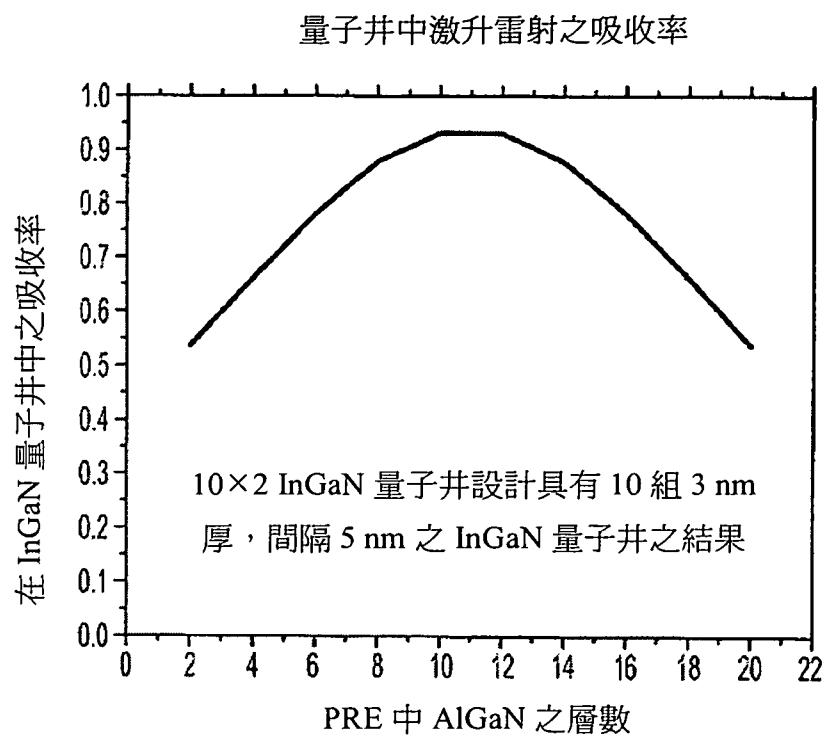
第 8 圖



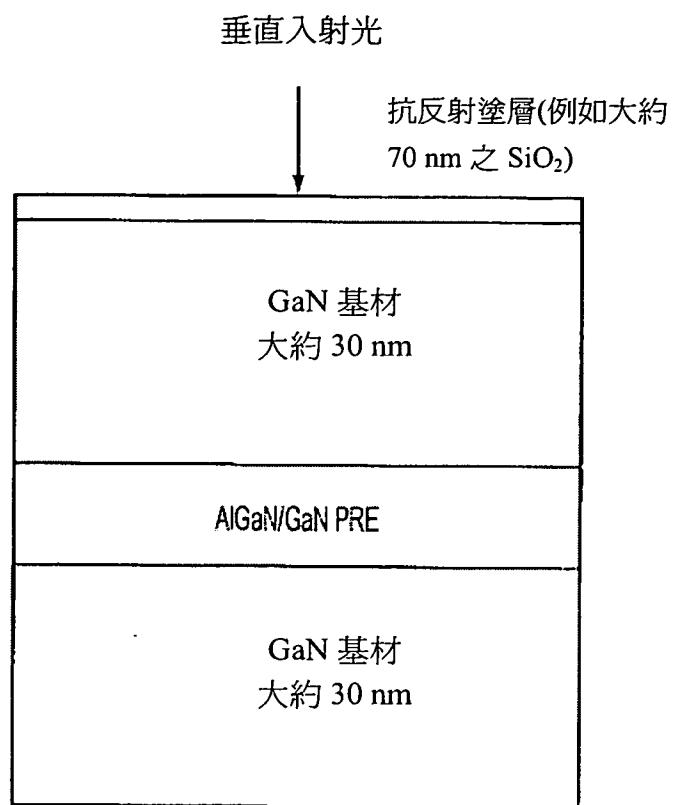
第 9 圖



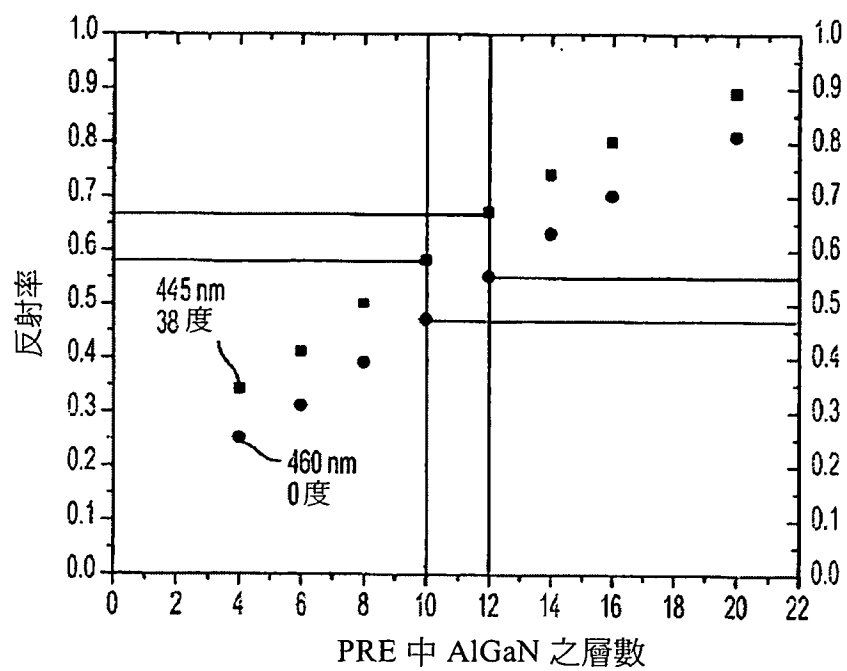
第 10 圖



第 11 圖



第 12 圖



第 13 圖