



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本

(11)公開編號：TW 201123530 A1

(43)公開日：中華民國 100 (2011) 年 07 月 01 日

(21)申請案號：099118454

(22)申請日：中華民國 99 (2010) 年 06 月 07 日

(51)Int. Cl.:

H01L33/02 (2010.01)

H01S5/343 (2006.01)

(30)優先權：2009/06/05

美國

61/184,729

(71)申請人：美國加利福尼亞大學董事會(美國) THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA (US)

美國

(72)發明人：洽克洛伯提 亞本 CHAKRABORTY, ARPAN (IN)；林佑達 LIN, YOU DA (TW)；中村 修二 NAKAMURA, SHUJI (US)；丹巴爾斯 史蒂芬 P DENBAARS, STEVEN P. (US)

(74)代理人：陳長文

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：28 項 圖式數：8 共 65 頁

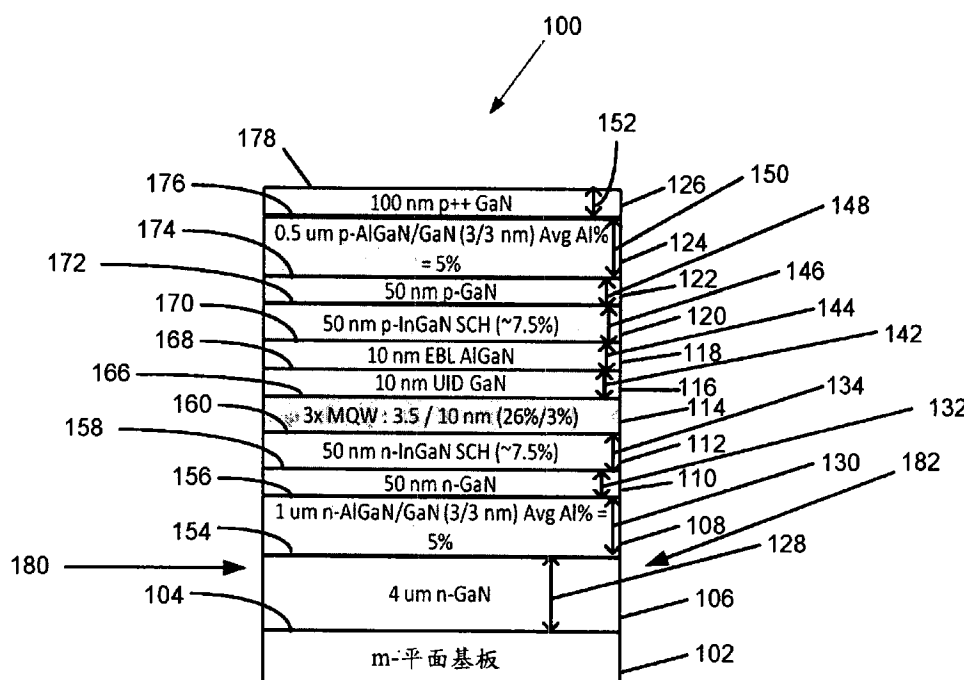
(54)名稱

長波長非極性及半極性基於 (Al, Ga, In) N 之雷射二極體

LONG WAVELENGTH NONPOLAR AND SEMIPOLAR (AL,Ga,IN) N BASED LASER DIODES

(57)摘要

本發明係關於一種生長於斜切(miscut)非極性或半極性基板上之雷射二極體，與習知的雷射二極體結構相比，其具有較低的臨限電流密度及較長的刺激發射波長，其中該雷射二極體的(1)n-型層體係在氮載氣中生長，(2)與其他裝置層體相比(p-型層體能夠在較高溫度下生長)，量子阱層及障壁層係以較慢的生長速率生長，(3)高 Al 含量的電子阻擋層能夠在活性區之上於較高溫度下生長，及(4)不對稱的 AlGaIn SPSLS 允許生長含有高 Al 之 p-AlGaIn 層體。使用各種其他技術以改良 p-型層體之傳導性及減小接觸層之接觸電阻。



100：III-氮化物雷射二極體結構

102：基板

104：離軸表面

106：n-型 GaN 層體

108：n-型 III-氮化物包覆層

110：n-型 aN 間隙層

112：n-型 InGaIn SCH 層

114：活性區域

116：非故意摻雜 GaN 層

118：電子阻擋層

120：p-型 InGaN SCH
層
122：P-GaN 間隙層
124：p-型 III-氮化物
包覆層
126：p-型 GaN 接觸
層
128：厚度
130：厚度
132：厚度
134：厚度
142：厚度
144：厚度
146：厚度
148：厚度
150：厚度
152：厚度
154：第一界面
156：第二界面
158：第三界面
160：第四界面
166：第七界面
168：第八界面
170：第九界面
172：第十界面
174：第十一界面
176：第十二界面
178：頂面
180：切面
182：切面



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本

(11)公開編號：TW 201123530 A1

(43)公開日：中華民國 100 (2011) 年 07 月 01 日

(21)申請案號：099118454

(22)申請日：中華民國 99 (2010) 年 06 月 07 日

(51)Int. Cl.：

H01L33/02 (2010.01)

H01S5/343 (2006.01)

(30)優先權：2009/06/05

美國

61/184,729

(71)申請人：美國加利福尼亞大學董事會(美國) THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA (US)

美國

(72)發明人：洽克洛伯提 亞本 CHAKRABORTY, ARPAN (IN)；林佑達 LIN, YOU DA (TW)；中村 修二 NAKAMURA, SHUJI (US)；丹巴爾斯 史蒂芬 P DENBAARS, STEVEN P. (US)

(74)代理人：陳長文

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：28 項 圖式數：8 共 65 頁

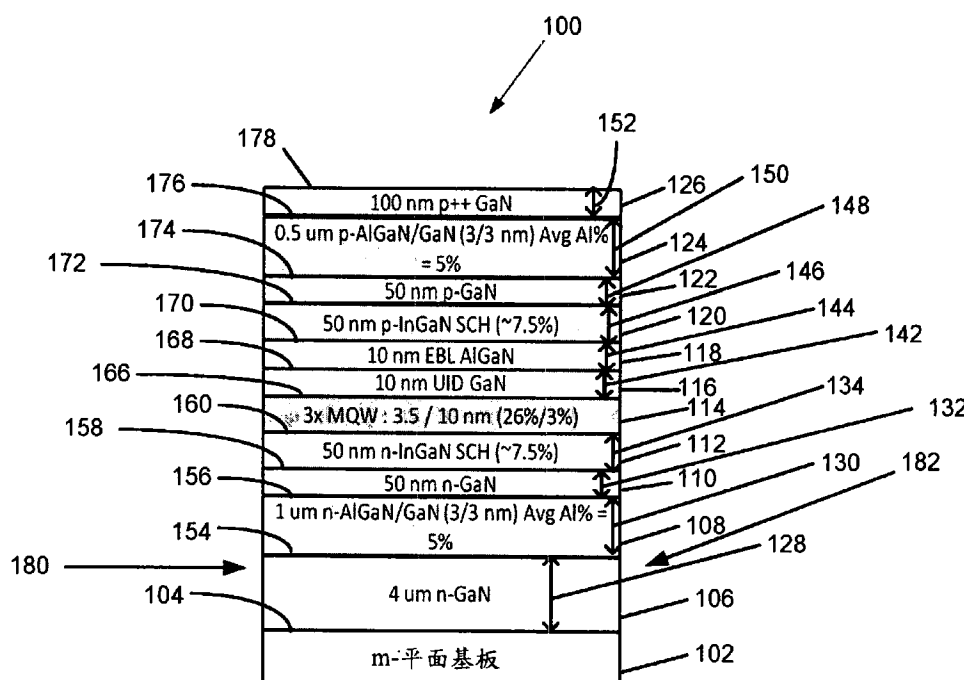
(54)名稱

長波長非極性及半極性基於 (Al, Ga, In) N 之雷射二極體

LONG WAVELENGTH NONPOLAR AND SEMIPOLAR (AL,Ga,IN) N BASED LASER DIODES

(57)摘要

本發明係關於一種生長於斜切(miscut)非極性或半極性基板上之雷射二極體，與習知的雷射二極體結構相比，其具有較低的臨限電流密度及較長的刺激發射波長，其中該雷射二極體的(1)n-型層體係在氮載氣中生長，(2)與其他裝置層體相比(p-型層體能夠在較高溫度下生長)，量子阱層及障壁層係以較慢的生長速率生長，(3)高 Al 含量的電子阻擋層能夠在活性區之上於較高溫度下生長，及(4)不對稱的 AlGaIn SPSLS 允許生長含有高 Al 之 p-AlGaIn 層體。使用各種其他技術以改良 p-型層體之傳導性及減小接觸層之接觸電阻。



100：III-氮化物雷射二極體結構

102：基板

104：離軸表面

106：n-型 GaN 層體

108：n-型 III-氮化物包覆層

110：n-型 aN 間隙層

112：n-型 InGaIn SCH 層

114：活性區域

116：非故意摻雜 GaN 層

118：電子阻擋層

六、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

本發明係關於一種雷射二極體(LD)，特定言之係關於發展在長波長下(例如，在藍-綠光譜範圍內)發射之高效非極性及半極性LD。

本申請案依據35 U.S.C. Section 119(e)，主張同在申請中及共同讓與之2009年6月5日申請之美國臨時專利申請案第61/184,729號，Arpan Chakraborty、You-Da Lin、Shuji Nakamura及Steven P. DenBaars之標題為「LONG WAVELENGTH m-PLANE (Al,Ga,In)N BASED LASER DIODES」(代理人案號30794.315-US-P1(2009-616-1))之權利；

該申請案以引用的方式併入本文中。

本申請案係關於以下同在申請中及共同讓與之美國專利申請案：

2010年3月2日申請之新型申請案第12/716,176號，Robert M. Farrell、Michael Iza、James S. Speck、Steven P. DenBaars及Shuji Nakamura之標題為「METHOD OF IMPROVING SURFACE MORPHOLOGY OF (Ga,Al,In,B)N THIN FILMS AND DEVICES GROWN ON NONPOLAR OR SEMIPOLAR (Ga,Al,In,B)N SUBSTRATES」，代理人案號30794.306-US-U1(2009-429-1)，該申請案依據35 U.S.C. Section 119(e)，主張2009年3月2日申請之美國臨時專利申請案第61/156,710號，Robert M. Farrell、Michael Iza、

James S. Speck、Steven P. DenBaars及Shuji Nakamura之標題為「METHOD OF IMPROVING SURFACE MORPHOLOGY OF (Ga,Al,In,B)N THIN FILMS AND DEVICES GROWN ON NONPOLAR OR SEMIPOLAR (Ga,Al,In,B)N SUBSTRATES」，代理人案號30794.306-US-P1(2009-429-1)；及2009年6月5日申請之美國臨時專利申請案第61/184,535號，Robert M. Farrell、Michael Iza、James S. Speck、Steven P. DenBaars及Shuji Nakamura之標題為「METHOD OF IMPROVING SURFACE MORPHOLOGY OF (Ga,Al,In,B)N THIN FILMS AND DEVICES GROWN ON NONPOLAR OR SEMIPOLAR (Ga,Al,In,B)N SUBSTRATES」代理人案號30794.306-US-P2(2009-429-2)之權利；

與本案同日申請之PCT國際專利申請案第xx/xxx,xxx號，Arpan Chakraborty、You-Da Lin、Shuji Nakamura及Steven P. DenBaars之標題為「ASYMMETRICALLY CLADDED LASER DIODE」，代理人案號30794.314-US-WO(2009-614-2)，該申請案依據35 U.S.C. Section 119(e)，主張2009年6月5日申請之美國臨時申請案第61/184,668號，Arpan Chakraborty、You-Da Lin、Shuji Nakamura及Steven P. DenBaars之標題為「ASYMMETRICALLY CLADDED LASER DIODE」，代理人案號30794.314-US-P1(2009-614-1)之權利；

該等申請案係以引用的方式併入本文中。

本發明係依據DARPA-VIGIL頒佈的Grant No. FA8718-

08-0005在政府支持下完成。

【先前技術】

自從初次展示基於纖鋅礦(Al, In, Ga)N材料之c-平面的紫光LD[1]起, 即已在商業上將c-平面技術應用於紫光、藍光及藍-綠LD。最近, 已有人發表基於非極性m-平面Ga₂N之紫光LD[2-3]且基於m-平面之LD技術進展迅速。由於非極性平面之性質, 沿著生長方向缺少與自發及壓電極化相關的電場可實現InGa₂N多量子阱(MQW)及高輻射重組速率中(尤其在高鋁組成量子阱(於藍色及綠色光譜區域中發射)中)之完美的電子及電洞波函數之重疊[4]。對於LD而言, 由於可忽略的量子局限斯達克(Stark)效應(QCSE)及各向異性帶結構, 對於非極性及半極性定向之較高增益理論上係由Park等人預測[5-6]。實際上, 在實際的LD操作中證實與c-平面LD相比較低之雷射前藍色位移及較高之斜率效率[7-10]。亦已發表基於c-平面技術之發射超出藍色光譜區域之LD, 但是由於QCSE相關的低內部效率及高鏡面反射率, 故斜率效率低[11-12]。因此, 為了獲得高功率的發射藍光、藍-綠光及綠光之LD, 據認為非極性氮化物係理想的材料[2, 3, 7-9, 13-15]。

在其他材料系統中廣泛使用斜切(或離軸)基板以改良材料品質及雷射特性。至今, 已有極少數群體發表基於斜切m-平面Ga₂N基板之裝置結果。Hirai等人[16]及Farrell等人[17]發表在摻雜Si之Ga₂N及生長於標稱同軸m-平面Ga₂N基板上之LED結構上觀察到錐形凸起。Farrell等人[17]發表

藉由使用鄰位基板可有效地減少錐形凸起之數量。Yamada 等人亦發表生長於偏離角基板上之較平滑的LED結構表面 [18]。但是，目前已發表的所有m-平面GaN LD皆係生長於標稱同軸m-平面基板上[2-3，7-9，13-15]。

因此，習知的最新型基於非極性GaN之LD係生長於標稱同軸m-平面GaN基板上[7，9，13，19]。此外：

(a)習知的最新型基於m-平面GaN之LD中之n-型GaN接觸層及n-型AlGaN包覆層係使用氫氣作為載氣生長[7，9，13，19]；

(b)習知的最新型基於m-平面GaN之LD不使用高銦(In)含量的InGaN分開局限異質結構(SCH)層；

(c)習知的最新型基於m-平面GaN之LD不使用不對稱的AlGaN/GaN短期超晶格結構(SPSLS)；及

(d)習知的最新型基於m-平面GaN之LD不使用金屬有機化學氣相沉積(MOCVD)生長之Mg-Ga-N接觸層以降低接觸電阻。

因此，該技術中需要經改良的LD結構。本發明滿足此需要。

【發明內容】

爲了克服上述先前技術中的限制及克服其他在閱讀及理解本說明書後將變得顯而易見之限制，本發明描述利用非極性及半極性基於InGaN/GaN之活性區域製造長波長雷射二極體(LD)之技術。本發明之特徵在於改良長波長LD之結構、電氣及光學性質(尤其係在藍-綠光譜範圍中)之新穎

結構及磊晶生長技術。某些關鍵特徵包括使用斜切基板及非習知生長條件以維持光滑的表面形態，減少波導散射，並使用新穎的生長技術以降低p-GaN接觸電阻。

例如，本發明揭示一種製造III-氮化物雷射二極體(LD)結構之方法，其包含在m-平面III-氮化物基板之離軸表面上生長一或多層LD之III-氮化物裝置層。該表面可係相對於基板之m-平面離軸-1或+1度，並朝向基板之c方向。該表面可係相對於基板之m-平面離軸多於-1或+1度，並朝向基板之c方向。此等表面之性質比非極性更偏向半極性。

該方法可進一步包含在大氣壓下使用100%氮載氣以在基板之離軸表面上生長該一或多層裝置層，導致該等裝置層具有光滑的表面形態，其不具有在標稱同軸m-平面GaN基板上生長的裝置層中所觀察到的錐形凸起。在大氣壓下使用氮載氣生長的裝置層可包含所有LD結構的n-型層體，包括摻雜矽之n-型AlGaIn/GaN超晶格，與未使用100%氮載氣生長之裝置層相比，其使LD結構具有光滑的界面及極佳的結構性質。

該方法可進一步包含以大於0.3埃/秒及小於0.7埃/秒，及比LD結構中其他層體所使用的生長速率慢之第一生長速率生長之一或多個量子阱。

該方法可進一步包含於第一溫度下及以一銦含量生長量子阱以使量子阱發射綠光，其中與以不同生長速率生長的量子阱相比，該第一生長速率維持界面光滑並防止切面。

各量子阱可係位在量子阱障壁之間以形成發光活性區

域，且該方法可進一步包含以比第一生長速率慢之第二生長速率生長量子阱障壁，例如，與以不同的較快生長速率生長的障壁相比，其導致在量子阱障壁上生長之裝置層(包括量子阱)之光滑表面形態及界面。

該方法可進一步包含在活性區域上生長高鋁含量AlGa_N電子阻擋層；及以高於第一溫度之第二溫度及與不含高Al含量AlGa_N電子阻擋層相比在活性區域上生長後續層。

高銦含量In_xGa_{1-x}N($x > 7\%$)分開局限異質結構(SCH)層可係位在活性區域及電子阻擋層之任一面上，且該方法可進一步包含以(1)比用於生長LD結構之其他層體高之第三溫度，(2)大於0.3埃/秒及小於0.7埃/秒之較慢生長速率，及(3)大於1.1之高三甲基銦/三乙基鎵(TEG)比率生長SCH層，產生光滑且無缺陷的導波層。

該方法可進一步包含在活性區域之任一面上形成AlGa_N/Ga_N不對稱超晶格作為包覆層，其包括交替的AlGa_N及Ga_N層，且AlGa_N層比Ga_N層厚。

該方法可進一步包含在活性區域之一面上形成p-波導及p-包覆層且將其摻雜 1×10^{18} 至 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 之範圍之鎂濃度。

該方法可進一步包含在p-包覆層上沉積具有厚度小於15 nm及摻雜 7×10^{19} 至 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 之範圍之鎂之p-Ga_N接觸層。

於沉積p-Ga_N接觸層後，該方法可進一步包含在氮氣及氮環境中冷卻LD結構，並流出少量雙(環戊二烯基)鎂

(Cp₂Mg)直至溫度降至700攝氏度以下，因此形成對LD結構具有較低接觸電阻之Mg-Ga-N層體。

因此，本發明進一步揭示一種基於III-氮化物之雷射二極體(LD)結構中之III-氮化物裝置層，其包含生長於m-平面III-氮化物基板之離軸表面上之LD之III-氮化物裝置層。該III-氮化物裝置層可具有一頂面，其在整個25 μm²之面積中具有1 nm或更小之均方根(RMS)表面粗糙度，及/或不含錐形凸起，及/或比生長於標稱同軸m-平面基板上之III-氮化物裝置層之上表面更光滑，及/或比圖4(a)顯示的表面更光滑。

複數個裝置層可係使得該頂面係一疊層生長之兩層裝置層之間之界面；及該界面係位在以下一或多者之間：量子阱及量子阱障壁，波導層及包覆層之間，或波導層及發光活性層之間。

該等裝置層可係位在經加工成LD之LD結構中，以致藉由切面塗層，該LD具有18 kA/cm²或更少之臨限電流密度。

該裝置層可係發光活性層，其包括與生長於同軸m-平面基板上之發光InGaN量子阱中之In組成及In波動相比，或與圖5(a)顯示的In組成及In波動相比，具有較高In組成與較少穿過InGaN量子阱之In波動之InGaN量子阱層。

裝置層可係具有厚度小於15 nm之Mg-Ga-N接觸層。對Mg-Ga-N接觸層之接觸電阻可係小於4E-4 Ohm-cm²。

當將LD結構加工為LD時，該LD可發射在相當於至少藍-

綠或綠光之波長處具有峰強度之光線。

【實施方式】

在以下較佳實施例的描述中，參照形成本文一部分之附圖，且其中以說明方式展示可實踐本發明之一特定實施例。應瞭解在不違背本發明之範圍的情況下，可利用其他實施例且可進行結構改變。

命名法

如本文所使用的GaN及其併入鋁及銦之三元及四元化合物(AlGaN、InGaN、AlInGaN)通常係使用術語(Al, Ga, In)N、III-氮化物、III族-氮化物、氮化物、 $Al_{(1-x-y)}In_yGa_xN$ (其中 $0 < x < 1$ 及 $0 < y < 1$)或AlInGaN指稱。所有此等術語係意欲為等效且應廣泛地解釋為包括單一物種Al、Ga、及In之各別氮化物及該等III族金屬物種之二元、三元及四元組合物。因此，此等術語涵蓋化合物AlN、GaN及InN，及三元化合物AlGaN、GaInN及AlInN，及四元化合物AlGaInN作為包括在此命名法中之物種。當存在兩種或更多種(Ga, Al, In)組分物種時，可在本發明廣闊的範圍內利用所有可能的組合物(包括化學計量比例及「不按化學計量」比例(針對存在於組合物中各(Ga, Al, In)組分物種存在的相對莫耳分率而言))。因此，當明瞭下文主要參照GaN材料之發明論述係適用於形成各種其他(Al, Ga, In)N材料物種。此外，本發明範圍內之(Al, Ga, In)N材料可進一步包括少量摻雜劑及/或其他雜質或內含材料。

此外，於此揭示內容全文中，層體材料前之前綴n-、p-

及 p^{++} -指出該層體材料分別係 n-型、p-型或重 p-型摻雜。例如，n-GaN 表示該 GaN 係 n-型摻雜。

一種消除基於 GaN 或 III-氮化物之光電裝置中之自發及壓電極化作用之方法係在非極性晶體平面上生長 III-氮化物裝置。該等平面包含相等數量的 Ga(或 III 族原子)及 N 原子且係電荷中性。此外，後成的非極性層體係互相相等，所以塊晶將不會沿著生長方向極化。GaN 中兩此種對稱相等的非極性平面家族係統稱為 a-平面之 {11-20} 家族，及統稱為 m-平面之 {1-100} 家族。因此，非極性 III-氮化物係沿著與 III-氮化物晶體之 (0001) c-軸之垂直方向生長。

另一降低 (Ga, Al, In, B)N 裝置中極化作用之方法係在晶體之半極性平面上生長裝置。術語「半極性平面」可用於指示任何無法被歸類為 c-平面、a-平面或 m-平面之平面。在晶體學術語中，半極性平面將係任何具有至少兩個非零 h、i 或 k 密勒指數 (Miller indices) 及一非零 l 密勒指數之平面。

技術描述

裝置結構

圖 1(a) 係根據本發明(經優化的長波長 m-平面 LD 設計)生長的 LD 結構之橫截面示意圖。

圖 1(a) 及圖 1(b) 說明 III-氮化物雷射二極體 (LD) 結構 100，其包含基板 102(例如，具有離軸表面 104 之 m-平面 GaN 基板)；磊晶沉積於 m-平面基板 102 之離軸表面 104 上之 n-型 GaN 層體 106；磊晶沉積於 n-型層體 106 上之 n-型 III-

氮化物包覆層 108(例如，AlGa_N/Ga_N)；磊晶沉積於n-包覆層 108上之n-GaN間隙層 110；磊晶沉積於n-型Ga_N間隙層 110上之n-型InGa_N SCH層 112；活性區域 114(包含磊晶沉積於n-型InGa_N SCH層 112上之第一InGa_N量子阱障壁層 114a、磊晶沉積於第一量子阱障壁層 114a上之InGa_N量子阱層 114b、磊晶沉積於InGa_N量子阱層 114b上之第二InGa_N量子阱障壁層 114c，其中該InGa_N量子阱層 114b包括至少20%銦(In))；磊晶沉積於活性區域 114上(例如，在第二障壁層 114c上)之非故意摻雜(UID)Ga_N層 116；磊晶沉積於UID層 116上之AlGa_N電子阻擋層(EBL) 118；磊晶沉積於EBL 118上之p-型InGa_N SCH層 120，其中n-型InGa_N SCH層 112及p-型InGa_N SCH層 120皆具有大於7%(例如，~7.5%)之In組成；磊晶沉積於p-InGa_N SCH 120上之p-GaN間隙層 122；磊晶沉積於p-型Ga_N間隙層 122上之p-型III-氮化物(例如，AlGa_N/Ga_N)包覆層 124；及磊晶沉積於p-型III-氮化物包覆層 124上之p-型Ga_N(p⁺⁺ Ga_N)接觸層 126。

圖 1(a)中，n-GaN層 106包含4 μm厚度 128，n-包覆層 108包含1 μm厚度 130(包括平均鋁(Al)含量為5%之交替的3奈米(nm)厚之AlGa_N及3 nm厚之Ga_N層體)，n-GaN間隙層 110包含50 nm厚度 132，n-InGa_N SCH層 112包含50 nm厚度 134，活性層 114包含3.5 nm厚度 136之InGa_N量子阱及分別具有26%及3% In組成之10 nm厚度 138、140 InGa_N量子阱障壁，UID層 116包含10 nm厚度 142，EBL 118包含10 nm厚度 144，p-InGa_N SCH 120包含50 nm厚度 146，p-GaN間

隙層 122 包含 50 nm 厚度 148，p-包覆層 124 包含 0.5 μm 厚度 150(包括平均 Al 組成為 5%之交替的 3 nm 厚之 AlGaIn 層及 3 nm 厚之 GaIn 層)，及 p^{++} GaIn 層 126 包含 100 nm 厚度 152(但是 p^{++} GaIn 接觸層 126 較佳具有小於 15 nm 之厚度 152)。

圖 1(a)描述的 LD 結構進一步包含(a)介於 n-型 III-氮化物包覆層 108 及 n-型 GaIn 層 106 之間之第一界面 154；(b)介於 n-型包覆層 108 及 n-型 GaIn 間隙層 110 之間之第二界面 156；(c)介於 n-GaIn 間隙層 110 及 n-型 InGaIn SCH 層 112 之間之第三界面 158；(d)介於第一量子阱障壁層 114a 及 n-型 InGaIn SCH 層 112 之間之第四界面 160；(e)介於 InGaIn 量子阱層 114b 及第一量子阱障壁層 114a 之間之第五界面 162；(f)介於第二量子阱障壁層 114c 及 InGaIn 量子阱層 114b 之間之第六界面 164；(g)介於 UID GaIn 層 116 及第二量子阱障壁 114c 之間之第七界面 166；(h)介於 UID 層 116 及 EBL 118 之間之第八界面 168；(i)介於 EBL 118 及 p-InGaIn SCH 120 之間之第九界面 170；(j)介於 p-型 InGaIn SCH 層 120 及 p-GaIn 間隙層 122 之間之第十界面 172；(k)介於 p-型 III-氮化物包覆層 124 及 p-型 GaIn 間隙層 122 之間之第十一界面 174；(l)介於 p-型 GaIn 接觸層 126 及 p-型 III-氮化物包覆層 124 之間之第十二界面 176；及(m)p-型 GaIn 接觸層 126 之頂面 178。

圖 1(a)亦說明可經塗佈及作為 LD 空穴之鏡面之切面 180、182。

圖 1(c)說明另一本發明之實施例，其係生長於(20-21)基板 102 上之 LD 磊晶晶圓裝置結構，其包含 n-GaIn 層 106、n-

GaN 包覆層 108、具有 5 至 10% In 之 n-InGaN 塊狀 SCH 層 112、活性層 114(包含 InGaN 阱及 GaN 或 InGaN 障壁)、p-AlGaN EBL 118、具有 5 至 10% In 之 p-InGaN 塊狀 SCH 層 120、p-GaN 包覆層 124 及 p^{++} GaN 接觸層 126。

圖 1(d) 說明又另一本發明之實施例，其包含半極性 (20-21) 發射綠光之 (516 nm) LD 裝置結構，其具有位在 (20-21) 基板 102(即，基板之頂面 104 係 20-21 平面) 上之 InGaN 波導及 GaN 包覆、n-GaN 包覆層 108、具有 5 至 10% In 之 n-InGaN SCH 112、包含 3 個 InGaN 阱及 AlGaIn 障壁之活性層 114、p-AlGaIn EBL 118、p-InGaN SCH 層 120(具有 5 至 10% In)、p-GaN 包覆層 124 及 p^{++} GaN 接觸層。

本發明之目的係要獲得光滑的界面(例如，154-176)及表面(例如，178)形態，及高效的活性區域 114，均勻及光滑的導向層(例如，112、120)，具低折射率之低電阻包覆層(例如，108、124)及低電阻的接觸層(例如，126)。例如：

1. 使用斜切(朝向 c-方向 -1 度)m-平面 GaN 基板及於大氣壓下使用 100% 氮載氣之模板生長導致光滑的表面形態，不含通常於金屬有機化學氣相沉積(MOCVD)再生長後於習知的標稱同軸 m-平面 GaN 模板中觀察得之錐形凸起。

2. 使用 100% 氮載氣於生長摻雜 Si 之 n-型 AlGaIn/GaN 超晶格(例如，如 n-包覆層 108 中所使用)導致光滑的界面及如圖 2(a)中顯示的極佳結構特性。圖 2(a)中之超晶格與圖 2(b)中顯示的超晶格(使用氮載氣生長)相比具有經改良的結構特性。圖 2(a)顯示包含不對稱 AlGaIn/GaN SPSLS 之 III-氮化物

包覆裝置層，其中超晶格中 AlGaIn 層係比 GaIn 層厚，且該超晶格結構與圖 2(b) 中顯示的結構品質相比，具有更光滑與提高結構品質之界面。

3. 所有層體 (除 p-InGaIn SCH (例如 120)、p-GaIn (例如，122) 或 p-AlGaIn 包覆層 (例如，124) 及 p-GaIn 接觸層 (例如，126) 外) 係使用 100% 氮載氣生長。

4. 使用於相對高之溫度 (與活性區域生長溫度相比)，及較慢生長速率 (<0.7 埃/秒 ($\text{\AA}/\text{s}$)) 及高三甲基銦/三乙基鎔 (TMI/TEG) 比率 (>1.1) 下生長之高 In 含量之 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ SCH ($x>7\%$) (例如，112、120) 導致光滑且無缺陷之波導層。但是該生長速率係維持高於 $0.3 \text{ \AA}/\text{s}$ ，由於在相同生長溫度下較低的生長速率會導致較低的 In 併入。因此，優化 InGaIn SCH 之生長速率 ($0.3 \text{ \AA}/\text{s} < \text{生長速率} < 0.7 \text{ \AA}/\text{s}$)，以使該 InGaIn 層光滑且於最高可能的溫度下生長以獲得較佳的結構及電特徵。

5. 量子阱 (例如，114b) 係於發射綠光之活性區域所需要的較低生長溫度下以相對低的生長速率 ($<0.7 \text{ \AA}/\text{s}$) 生長，以維持光滑的界面 (例如，162、164) 並預防切面。因此，優化 InGaIn 阱之生長速率 ($0.3 \text{ \AA}/\text{s} < \text{生長速率} < 0.7 \text{ \AA}/\text{s}$)，以使量子阱 (QW) 界面光滑且 QW 係於最高可能的溫度下生長，以獲得所需的發射波長及較佳的結構及光學特性。在阱生長期間調節 TMI/TEG 比率，以使其對於設定溫度未在 In 飽和情況中。

6. 與阱 114b 相比，障壁 (例如，114a、114c) 係以極慢的

生長速率($<0.3 \text{ \AA/s}$)生長，導致光滑的表面形態用於隨後的阱生長。較慢的阱及障壁生長速率導致界面光滑且平坦(例如，162、164、166)。

7.使用不對稱AlGaIn/GaN SPSLS(例如，108、124)以增加AlGaIn包覆層中之鋁(Al)含量並預防預反應，尤其係在使用氫載氣生長p-型AlGaIn期間。由於預反應，AlGaIn中之Al組成未隨TMA/TMG流量線性地放大。不對稱的超晶格含有較厚的AlGaIn層及較薄的GaN層，導致其具有與AlGaIn層中具有較高AlGaIn組成之對稱性超晶格結構相同的平均Al組成。

8.AlGaIn電子阻擋層(例如，118)係在升溫期間使用TEG作為鎔源生長。

9.在p-波導(例如，120)及p-包覆層(例如，124)中摻雜鎂(Mg)之濃度係在 $1\text{E}18$ 至 $2\text{E}19 \text{ cm}^{-3}$ 之間。

10.使用Mg摻雜在 $7\text{E}19$ 至 $3\text{E}20 \text{ cm}^{-3}$ 之間之薄的10 nm p-GaN接觸層(例如，126)代替厚的接觸層(其通常係 $>15 \text{ nm}$)。

11.在p-GaN接觸層生長後，在氮氣及氮環境中冷卻樣品，並使少量雙(環戊二烯基)鎂(Cp_2Mg)流動直至溫度達到700攝氏度($^{\circ}\text{C}$)。此導致形成Mg-Ga-N層(例如，126)，其導致較低的接觸電阻。

本發明利用AlGaIn包覆層108、124，其中典型的Al組成可在2至10%之間。對於典型的LD結構而言，活性層MQW周期之數量可在2至6之間，阱寬136可在1至8 nm之間，及

障壁寬138、140在6至15 nm之間。典型的最終障壁(例如，114c)之厚度140係5至20 nm。最終障壁之後係AlGaNEBL 118，其之典型的厚度114及Al濃度分別在6至20 nm及10至30%之間。通常AlGaNEBL 118經摻雜Mg。

尤其對於藍-綠光譜發光區域，實踐本發明之最佳方式將係使用其及非極性無AlGaNEBL包圍之結構(參見(例如)與本案同日申請之美國新型申請案第xx/xxx,xxx號，Arpan Chakraborty、You-Da Lin、Shuji Nakamura及Steven P. DenBaars之標題為「ASYMMETRICALLY CLADDED LASER DIODE」，代理人案號30794.314-US-WO(2009-614-2)，該申請案係併入本文中)。

裝置效能

圖3(a)說明一LD結構(例如，如圖1(a)中說明)，其中，當該LD結構經加工成為LD時，該LD發射在藍-綠光譜範圍(例如，440至520 nm)之波長處具有峰強度之光線。但是，亦可能在綠光光譜範圍內具有峰強度發射。

圖3(b)說明一LD結構(例如，如圖1(a)中說明)，其中，當該LD結構經加工成為具有切面180、182塗層之LD時，獲得34 kA/cm²之臨限電流密度；但是亦可能為18 kA/cm²或更小之臨限電流密度[20]。

圖3(c)、3(d)、4(a)及5(a)中測定的裝置具有顯示於圖1(a)但生長於標稱同軸m-平面基板上之結構。該等裝置係利用氮載氣生長成為n-層、高銦(In)含量InGaNSCH層、不對稱AlGaNEBL/GaN短周期超晶格結構(SPSLS)；及MOCVD

生長 Mg-Ga-N 接觸層以降低接觸電阻。但是，其等仍具有較高的臨限電流密度及較短的雷射波長，由於其等係生長於標稱同軸 m-平面基板上。生長技術及斜切基板兩者皆很重要。

因此，與圖 3(c)及圖 3(d)之 LD 結構相比，以上技術獲得具有甚低臨限電流密度(圖 3(b))及較長刺激發射波長(圖 3(a))之 LD。

圖 3(e)及圖 3(f)顯示 (20-21)LD 裝置效能，其中長空穴可減少鏡面損失並導致低的臨限電流密度(圖 3(e))，及低臨限電流密度導致較長的雷射波長(圖 3(f))。

圖 3(g)及 3(h)顯示由圖 1(d)之結構構成的 LD，及圖 3(i)及圖 3(j)係由圖 1(d)之結構構成的裝置的測定值，其中圖 3(g)顯示 LD 裝置之切割面，及圖 3(h)顯示在操作下發射綠光之 LD，圖 3(i)顯示 LD 之 516 nm 波長發射，及圖 3(j)顯示對於 2 μm 脊寬、1200 μm 空穴長度及 97/99% 之 DBR 切面塗佈， $J_{\text{th}} \sim 30.4 \text{ kA/cm}^2$ 。

圖 3(k)至 (m)說明 (30-31)GaN LD 效能 [20]。

圖 4(a)顯示生長於標稱同軸 m-平面基板上之 LD 的頂面 400，其顯示錐形凸起 402(例如，具有錐形之凸起(例如 4-面錐體，其中該等面係平面，或如(例如)2010 年 3 月 2 日申請之美國新型專利申請案序號 12/716,176，Robert M. Farrell、Michael Iza、James S. Speck、Steven P. DenBaars 及 Shuji Nakamura 之標題為「METHOD OF IMPROVING SURFACE MORPHOLOGY OF (Ga,Al,In,B)N THIN FILMS

AND DEVICES GROWN ON NONPOLAR OR SEMIPOLAR (Ga,Al,In,B)N SUBSTRATES」，代理人案號30794.306-US-U1(2009-429-1)中描述))。

與(例如)圖4(a)顯示的裝置相比，圖4(b)顯示本發明之技術獲得無錐形凸起且具有更光滑表面形態之LD裝置層。例如，圖4(b)說明基於III-氮化物之LD結構(諸如圖1(a)中之結構)中III-氮化物裝置層之頂面404，其中用於LD生長的III-氮化物裝置層120係在m-平面III-氮化物基板之(例如，標稱)離軸表面上，且頂面404不含錐形凸起402及/或比生長於同軸m-平面基板(例如，如圖4(a)中顯示)上之III-氮化物裝置層之頂面400更光滑。圖4(b)亦顯示頂面404可比利用含有氫氣之載氣或少於100%氮氣之載氣生長的III-氮化物裝置層之頂面400(如圖4(a)中顯示)更光滑。

圖5(a)顯示生長於標稱同軸m-平面基板上之LD之螢光光學顯微鏡圖像。螢光源自LD之活性層且不均勻(即，與其他位置504相比，螢光在某些穿過表面500之位置502中更亮)。

圖5(b)顯示具有(例如)如圖1(a)顯示的結構且生長於1度斜切[朝向(000-1)方向]m-平面GaN基板上之LD之螢光光學顯微鏡圖像。與(例如)圖5(a)中顯示的LD結構相比，圖5(b)顯示本發明在活性區域114中獲得更高的In組成(與較少的In波動)，由於穿過表面506之螢光508之分佈更均勻。與生長於同軸m-平面基板上之發光活性層(例如，如圖5(a)顯示)中之In組成及In波動相比，圖5(b)亦顯示發光活性量

子阱裝置層 114b 具有更高的 In 組成(與更少的 In 波動)。更高的 In 組成亦係藉由與圖 5(a)相比，圖 5(b)中更大面積上之更亮的螢光所證實。

圖 5(c)係由圖 1(c)之結構構成的 LD 之螢光顯微鏡圖像。

雖然圖 4(b)及 5(b)說明 LD 之頂面 404、506，但在複數個裝置層之情況中，本發明亦可使圖 4(b)及圖 5(b)中說明的結構及性質用於介於一疊層生長之兩層裝置層之間的一或多個界面 140-170。例如，量子阱 114b 及量子阱障壁 114a、114c 之間之界面 156、158，波導層 112 及包覆層 108 或間隙層 110 之間之界面 150、152，或波導層 112 及發光活性層 114 之間之界面 154 可具有由圖 4(b)及圖 5(b)顯示的結構及性質。

加工步驟

圖 6 係說明製造 LD 結構之方法之流程圖，其包含在 m-平面 III-氮化物基板之離軸表面上生長一或多個 LD 之 III-氮化物裝置層。該方法可包含以下步驟。

方塊 600 表示提供具有(例如，標稱)離軸表面之 m-平面 GaN 基板。該表面可係(例如)斜切。圖 7(a)顯示相對於 m-平面基板 102 之 m-平面 702，離軸角度 700 為(例如)標稱 ± 1 度且朝向基板 102 之 c 方向 704 之表面 104。可能斜切 $+1$ 度及 -1 度，且亦可能係其他不同於 ± 1 度之斜切角度(諸如 20-21 及 30-31)。(20-21)係真正意義上的斜切 m-平面。因此，表面 104 可係相對於基板之 m-平面離軸大於 $+1$ 或 -1 度且朝向基板之 c 方向。

方塊 602 表示在離軸表面 104 上磊晶沉積 III-氮化物層體 (例如, n-型 GaN 層)。

方塊 604 表示在 n-型層體上磊晶沉積 n-型 III-氮化物包覆層。

方塊 606 表示在 n-型包覆層上磊晶沉積 n-型 GaN 間隙層。

方塊 608 表示在 n-型 GaN 間隙層上磊晶沉積 n-型 InGaN SCH 層, 其中該 n-型 InGaN SCH 層具有大於 7% 之 In 組成。

方塊 610 表示在 n-型 InGaN SCH 層上磊晶沉積第一量子阱障壁層。該沉積可包含以比量子阱 (方塊 612 中) 之生長速率慢之第二生長速率生長量子阱障壁, (例如) 與以不同的更快生長速率生長的障壁相比, 其導致生長於量子阱障壁上之裝置層 (包括量子阱) 之光滑的表面形態及界面。

方塊 612 表示在第一量子阱障壁層上磊晶沉積 InGaN 量子阱層, 其中該 InGaN 量子阱層包括至少 20% 銦。沉積可係以小於 0.7 埃/秒 (亦可大於 0.3 埃/秒) 及小於 LD 結構中其他層體使用的生長速率之第一生長速率生長量子阱。可在第一溫度及具有銦含量下生長量子阱以使量子阱發射綠光, 其中 (例如) 與以不同的生長速率生長的量子阱相比, 該第一生長速率維持界面光滑並預防切面。

方塊 614 表示在 InGaN 量子阱層上磊晶沉積第二量子阱障壁層。該沉積可包含以小於量子阱之第一生長速率之第二生長速率生長量子阱障壁, (例如) 與以不同的較快生長速率生長的障壁相比, 其導致生長於量子阱障壁上之裝置層 (包括量子阱) 之光滑的表面形態及界面。

可重複方塊610至614以形成包含複數個量子阱之MQW結構，以使量子阱係位在量子阱障壁之間而形成發光之活性區域。

方塊616表示在第二障壁層上沉積UID層。

方塊618表示在UID層及活性區域/層上磊晶沉積EBL。該沉積可包含在活性區域上生長高鋁含量(例如，2至10%)AlGa_N EBL；及與無高Al含量AlGa_N EBL相比，在活性區域上以高於第一溫度(量子阱生長溫度)之第二溫度生長後續層(例如，方塊620-626)。

方塊620表示在EBL上磊晶沉積p-型InGa_N SCH層，其中該p-型InGa_N SCH層具有大於7%之In組成。以此方式，高銦含量In_xGa_{1-x}N SCH層(例如， $x > 0.07$)係位在於方塊610至614中形成的活性區域及於方塊618中形成的EBL之任一面上。方塊620及608之InGa_N SCH層之沉積可包含以(1)比在LD結構中生長其他層體所使用的溫度高之第三溫度，(2)小於0.7埃/秒(亦可大於0.3埃/秒)之較慢的生長速率，及(3)大於1.1之高的三甲基銦/三乙基鎔(TEG)比率生長，其導致光滑且無缺陷之波導層。

方塊622表示在p-型InGa_N SCH上磊晶沉積p-型Ga_N間隙層。

方塊624表示在p-型Ga_N間隙層上磊晶沉積p-型III-氮化物包覆層。方塊604及624之n-型及/或p-型包覆可包含在活性區域之任一面上之AlGa_N/Ga_N不對稱超晶格，其包括交替的AlGa_N及Ga_N層，且AlGa_N層比Ga_N層厚。

方塊620及624可進一步包含在活性區域之一面上分別形成及摻雜鎂濃度為 1×10^{18} 至 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 之間之p-波導及p-包覆層。

方塊626表示在p-型III-氮化物包覆層上磊晶沉積p-型GaN接觸層。該p-GaN接觸層可沉積於具有厚度小於15 nm且摻雜 7×10^{19} 至 3×10^{20} 之範圍之鎂之包覆層之一上(例如，p-包覆)。

方塊628表示於沉積p-GaN接觸層後，在氮氣及氮環境中冷卻LD結構，及使少量雙(環戊二烯基)鎂(Cp_2Mg)流動直至溫度降至低於700攝氏度，因此形成對LD結構具有較低接觸電阻之Mg-Ga-N層體。

方塊630表示該方法之最終結果，諸如如圖7(a)說明之包含一或多層III-氮化物裝置層704、706之III-氮化物LD結構之裝置，其中該等LD之III-氮化物裝置層704、706係生長於m-平面III-氮化物基板102(例如，(但不限於)相對於基板102之m-平面702離軸角度700為-1度及朝向基板102之c方向704之表面104)之離軸表面104上(例如，但不限於斜切)。III-氮化物裝置層704可具有在整個 $25 \text{ } \mu\text{m}^2$ 之面積中均方根(RMS)表面粗糙度為1 nm或更小之頂面708。頂面708可不含錐形凸起，例如，不含如圖7(b)中說明的存在於裝置層表面712(生長於標稱同軸m-平面基板上)上之高h及寬w之凸起710。頂面708可比生長於標稱同軸m-平面基板上之III-氮化物裝置層之頂面712更光滑。

圖7亦說明複數個裝置層704、706，其中(1)頂面係一疊

層生長之兩層裝置層704、706之間之界面714。例如，界面714可係在量子阱及量子阱障壁之間，在波導層及包覆層之間，或在波導層及發光活性層之間。層體704及706亦可包含複數個裝置層。

頂面708或界面714可比圖4(a)顯示的表面更光滑。

裝置層704、706可係發光活性層，與生長於同軸m-平面基板上之發光InGaN量子阱中之In組成及In波動相比，及/或與圖5(a)顯示的In組成及In波動相比，其包括具有較高In組成，及穿過nGaN量子阱層之較少In波動之InGaN量子阱層。

裝置層704、706可係具有厚度716小於15 nm之Mg-Ga-N接觸層。對Mg-Ga-N接觸層之接觸電阻可小於 $4\text{E-}4\text{ Ohm-cm}^2$ 。

此外，方塊630中之最終結果可係如圖1(a)顯示及具有一或多種以下性質之LD結構100：(a)當LD結構經加工為LD(包括切面180、182塗層)時，臨限電流密度為 18 kA/cm^2 ；(b)比圖4(a)顯示的表面更光滑之頂面；(c)頂面178及/或界面154-176在整個 $25\text{ }\mu\text{m}^2$ 之面積中具有不超過1 nm之RMS表面粗糙度及/或不含錐形凸起；(d)與圖5(a)顯示的In組成及In波動相比，具有較高In組成(及較少In波動)之活性區域(包含(例如)InGaN量子阱114b)；及(e)對LD結構之接觸電阻小於 $4\text{E-}4\text{ Ohm-cm}^2$ 。

該LD結構可經加工為發射具有在藍光、藍-綠光、綠光、波長大於480 nm(或例如在440至550 nm波長範圍

內)、或比自同軸m-平面基板上之結構中發射的峰值波長長之波長下之峰強度之光線之LD。

方塊602至626中一或多者之沉積可包含(例如)使用MOCVD生長。此外,方塊602至626中一或多者之生長可包含於(例如,標稱)大氣壓下使用及幾乎100%氮載氣,導致方塊602至626之裝置層具有光滑表面形態,其不含於習知的標稱同軸m-平面GaN基板中觀察得之錐形凸起。100%氮載氣可表示標稱值,由於亦可使用介於95%及100%之間之氮載氣。使用100%氮載氣於大氣壓下生長的裝置層可包含所有LD結構的n-型層體,其包括(例如)摻雜矽之n-型AlGaN/GaN超晶格,與不使用100%氮載氣生長的裝置層相比,其使LD結構具有光滑的界面及極佳的結構性質。

可能的修飾

1.本發明可應用於極性、非極性及半極性LD。本發明包括增加斜切或離軸範圍(不限於 ± 1 度範圍內,但亦在該範圍之上),其不可再視為非極性處理,且因此術語半極性將更合理。本發明涵蓋新穎的半極性平面,(例如)如(20-21)及(30-31)。

2.本發明可應用於自紫外線(UV)至綠光光譜發光範圍(及可能更長波長)之間之任何波長。

3.本發明可應用於含有InGaN、GaN或AlInGaN波導層之LD結構。

4.本發明可應用於在活性區域中含有InGaN、GaN或AlInGaN障壁之LD結構。

5. 本發明可應用於在活性區域中含有 InGaN、GaN 或 AlInGaN 障壁之 LD 結構，其中一部份的障壁係以比阱更高之溫度生長。

6. 低層包覆層可係四元合金 (AlInGaN) 代替基於三元 AlGaIn 之合金。

7. 不對稱設計亦可表明低層及上層包覆層之 AlGaIn 組成之差異。例如可使用 GaN 包覆代替 AlGaIn 包覆。

8. 不對稱設計亦可包括對於低層及上層波導層具有不同 InGaIn 組成之結構。

9. 本發明可應用於位於所有斜切角度之非極性及半極性基板上之 LD 結構。

10. 所描述的生長速率及溫度係關於 MOCVD。亦可能係其他生長方法 (諸如 MBE)。其他生長速率 (例如，對於 SCH 及量子阱) 亦係可能。例如，可能係既 $<0.3 \text{ Å/s}$ 且 $>0.7 \text{ Å/s}$ 。該生長通常係 (但不限於) 盡可能接近大氣壓。

11. 切面塗層可包括 DBR 塗層，其使用兩種具有不同折射率之材料。在本發明中，將 SiO_2 及 Ta_2O_5 用於切面塗層。其他材料亦可能。

12. 無需使用特別的隆脊波導。本發明之脊寬係在 2 至 10 μm 之間，但不限於此範圍。

13. 諸如間隙層、AlGaIn 包覆層等的層體係非必需的且可視需要省略。可添加其他層體。

優點及改良

與習知的基於 m-平面 GaN 之 LD 結構相比，本發明具有以

下優點：

1.使用斜切基板，連同在氮載氣中生長n-型層體，導致無錐形凸起及光滑的表面形態及更光滑的界面。

2.對於阱及障壁使用較低生長速率，導致光滑的量子阱界面並減少阱中之In波動，因此導致InGaN阱之改良的安定性，其允許p-型層體以比若使用較快阱及障壁生長時更高之溫度生長。例如，p-GaN層體可於 $T_g \sim 900$ 至 1000°C 之溫度下生長。

3.使用高Al含量(例如，大於15%)AlGaN EBL對於在活性區域之上之層體允許更高的生長溫度(例如，p-GaN生長溫度 $T_g \sim 900$ 至 1000°C)。

4.使用不對稱的AlGaN SPSLS允許生長具有較高的平均Al組成(例如，大於5% Al)之p-AlGaN層體。

5.新穎的接觸方案極大地降低接觸電阻。

6.與習知的LD結構相比，以上所有改變導致具有極低臨限電流密度(例如， 18 kA/cm^2)及更長刺激發射波長(例如， 492 nm)之LD。

自原子力顯微鏡(AFM)測定之整個 $25 \text{ }\mu\text{m}^2$ 之均方根(RMS)表面粗糙度係小於 1 nm ，且如圖8所示來自傳輸線測量(TLM)之接觸電阻係 $4\text{E-}4 \text{ Ohm-cm}^2$ 。

本發明之其他信息可見於[20-24]。

參考文獻

以下參考文獻係以引用的方式併入本文中：

- [1] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35, L74 (1996).
- [2] M. C. Schmidt, K-C Kim, R. M. Farrell, D. F. Feezell, D. A. Cohen, M. Saito, K. Fujito, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L190 (2007).
- [3] K. Okamoto, H. Ohta, S. F. Chichibu, J. Ichihara, and H. Takasu, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L187 (2007).
- [4] J.S. Speck and S.F. Chichibu, *MRS Bulletin* 34, 304 (2009).
- [5] S.H. Park, D. Ahn, *Appl. Phys. Lett.* 90, 013505 (2007).
- [6] S.H. Park, D. Ahn, *IEEE J. Quantum Electron.* 43, 1175 (2007).
- [7] Kubota et al., *Applied Physics Express* 1 (2008) 011102.
- [8] K. Okamoto, T. Tanaka, and M. Kubota, *Appl. Phys. Express* 1, 072201 (2008).
- [9] Tsuda et al., *Applied Physics Express* 1 (2008) 011104.
- [10] H. Ohta and K. Okamoto, *MRS Bulletin* 34, 324 (2009).
- [11] T. Miyoshi, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, Y. Narukawa, M. Sano, T. Yamada, and T. Mukai, *Proc. SPIE* 6894, 689414 (2008).
- [12] D. Queren, A. Avramescu, G. Brüderl, A. Breidenassel, M. Schillgalies, S. Lutgen, and U. Strauß, *Appl. Phys. Lett.* 94, 081119 (2009).
- [13] Feezell et al., *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 13, 2007, pp. L284–L286.
- [14] K. Okamoto, T. Tanaka, M. Kubota, and H. Ohta, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L820 (2007).
- [15] K. M. Kelchner, Y. D. Lin, M. T. Hardy, C. Y. Huang, P. S. Hsu, R. M. Farrell, D. A. Haeger, H. C. Kuo, F. Wu, K. Fujito, D. A. Cohen, A. Chakraborty, H. Ohta, J. S. Speck, S. Nakamura, and S. P. DenBaars, *Appl. Phys. Express* (2009) (in press).
- [16] A. Hirai, Z. Jia, M. C. Schmidt, R. M. Farrell, S. P. DenBaars, S. Nakamura, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.* 91, 191906 (2007)
- [17] “Effect of Substrate Misorientation on the Structural and Optical Properties of m-plane InGaN/GaN Light Emitting Diodes,” R. M. Farrell, D. A. Haeger, X. Chen, M. Iza, A. Hirai, K. M. Kelchner, K. Fujito, A. Chakraborty, S. Keller, H. Ohta, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and S. Nakamura (manuscript under review).
- [18] H. Yamada, K. Iso, M. Saito, K. Fujito, S. P. DenBaars, S. Speck, and S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L1117 (2007).
- [19] Farrell et al., *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 32, 2007, pp. L761–L763.

[20] Po Shan Hsu, Kathryn M. Kelchner, Anurag Tyagi, Robert M. Farrell, Daniel A. Haeger, Kenji Fujito, Hiroaki Ohta, Steven P. DenBaars, James S. Speck, and Shuji Nakamura, "InGaN/GaN Blue Laser Diode Grown on Semipolar (30-31) Free-Standing GaN Substrates," Applied Physics Express 3 (2010) 052702.

[21] You-Da Lin, Matthew T. Hardy, Po Shan Hsu, Kathryn M. Kelchner, Robert M. Farrell, Arpan Chakraborty, Hiroaki Ohta, James S. Speck, Steven P. DenBaars, and Shuji Nakamura, entitled "Blue-Green InGaN/GaN Laser Diodes on Mismatched-plane GaN Substrate," Applied Physics Express 2 (2009) 082102.

[22] Presentation Slides given by Shuji Nakamura at the 2009 Annual Review for Solid State Lighting and Energy Center (SSLEC), University of California, Santa Barbara (November 2009).

[23] Presentation Slides given by Youda Lin at the 2009 Annual Review for SSLEC, University of California, Santa Barbara (November 2009).

[24] Presentation Slides given by Kate Kelchner at the 2009 Annual Review for SSLEC, University of California, Santa Barbara.

結 論

此總結本發明較佳實施例之描述。已提出先前一或多個本發明實施例之描述作闡述及描述用。其並非巨細靡遺或欲將本發明限制於所揭示的確切形式。依據以上教導可能有諸多修飾及變化。本發明之範圍不欲受此詳細描述限制，而係由隨附的申請專利範圍所限制。

【圖式簡單說明】

上文參照圖式，其中在全文中類似的元件編號表示相應的部分：

圖 1(a)係 LD 結構之橫截面示意圖，圖 1(b)係量子阱結構之橫截面示意圖，圖 1(c)係 (20-21)LD 裝置結構之第一實施例之橫截面示意圖，及圖 1(d)係 (20-21)LD 裝置結構之第二實施例之橫截面示意圖。

圖 2(a)顯示使用氮載氣生長之 n-型 AlGaIn/GaN 超晶格之 X-射線繞射(XRD)掃描，及圖 2(b)顯示使用氮載氣生長之 n-型 AlGaIn/GaN 超晶格之 XRD 掃描，其測繪計數/秒(計數/s)對 2θ ，其中 k 表示 1000 計數及 M 表示一百萬計數(例如，100k 係 100000 及 1 M 係 1000000)。

圖 3(a)描繪在 -1 度(deg)斜切(朝 c 方向)之 m-平面基板上之 LD 結構(諸如圖 1(a)顯示的結構)之 L-I 特徵(光輸出-電流)，其測繪發射強度(任意單位)成光波長(奈米，nm)之函數，其中該裝置具有臨限電流 $I_{th}=652$ 毫安(mA)(電流密度 $J_{th}=43$ kA/cm²)，峰值發射波長為 478.6 nm，及不同的曲線(自上至下)係正向驅動電流 I_f 大於 $I_{th}(>I_{th})$ 、小於 $I_{th}(<I_{th})$ 、400 mA 及 100 mA。

圖 3(b)描繪自 -1 度斜切(朝 c 方向)m-平面 GaN 基板上之 LD 結構(例如，包含圖 1(a)顯示的及圖 3(a)測定的結構)發射的光之功率(以毫瓦(mW)計)及跨該結構之正向電壓 V_f (V)成正向驅動電流 I_f (mA)之函數，其中該裝置具有 $I_{th}=520$ mA($J_{th}=34$ kA/cm²)及不同的曲線 A、B、C、D 及 E 係關於來自一種樣品之不同裝置，及因此顯示效能分佈及良率。

圖 3(c)描繪標稱同軸 m-平面 GaN 基板上之 LD 結構之 L-I 特徵，其繪製發射強度(任意單位)成光波長(nm)之函數，其中該裝置具有臨限電流 $I_{th}=684$ mA(電流密度 $J_{th}=45.6$ kA/cm²)，峰值發射波長為 471.9 nm，及不同的曲線(從上至下)係關於正向驅動電流 I_f 大於 $I_{th}(>I_{th})$ 、小於 $I_{th}(<I_{th})$ 、500 mA、300 mA 及 100 mA。

圖 3(d)描繪自標稱同軸 m-平面基板上之 LD 結構(例如，如圖 3(c)顯示及測定之裝置)發射的光功率(mW)及跨該結構之 $V_f(V)$ 成正向驅動電流 I_f 之函數，其中該結構具有 2 μm 隆脊， $I_{th}=684\text{ mA}$ 及 $J_{th}=45.6\text{ kA/cm}^2$ ，及不同曲線 A、B 係關於來自一種樣品之不同裝置，因此顯示效能分佈及良率。

對於(20-21)LD及脈衝 0.01%工作循環，圖 3(e)描繪電流密度 $J_{th}(\text{kA/cm}^2)$ 成 LD 空穴長度(以微米(μm)計)之函數，及圖 3(f)描繪雷射波長(nm)成 LD 空穴長度(μm)之函數。

圖 3(g)係顯示切割平面之發射 516 nm 光之半極性(20-21)綠色 LD 之圖像，及圖 3(h)係發射綠光之半極性(20-21)綠色 LD 之圖像。

圖 3(i)描繪對於半極性(20-21)綠色 LD 之發射強度(以任意單位(a.u.)計)成波長(以 nm 計)之函數。

圖 3(j)描繪對於半極性(20-21)綠色 LD 之輸出功率(以毫瓦(mW)計)成驅動電流(以毫安(mA)計)之函數，及電壓成驅動電流之函數(IV 曲線)(L-I-V 曲線)。

圖 3(k)描繪對於不同的驅動電流(自上至下之曲線，1100 mA、1000 mA、800 mA、600 mA、400 mA、200 mA、100 mA、50 mA、20 mA、10 mA 及 5 mA)及對於半極性(30-31)GaN LD 之電致發光(EL)強度(以 a.u.(任意單位)計)成發射波長之函數。

圖 3(I)描繪對於半極性(30-31)GaN LD 之峰值發光波長(nm)成電流密度(kA/cm^2)之函數，及發光半峰全寬值

(FWHM)成電流密度之函數，其中圓圈係顯示(30-31)LD電致發光FWHM之數據，黑色正方形係顯示(30-31)LD EL波長(λ)之數據，及較淡正方形係顯示c-平面LD EL波長(λ)之數據。

圖3(m)描繪對於半極性(30-31)GaN LD之輸出功率(mW)及電壓(V)成電流密度(kA/cm^2)及電流(mA)之函數，其顯示IV曲線，其中插圖描繪亦對於半極性(30-31)GaN LD之EL強度(任意單位)成波長(nm)之函數，其顯示峰值發射波長 $\lambda=447.4\text{ nm}$ 。

圖4(a)顯示生長於標稱同軸m-平面GaN基板上(例如，如圖3(c)及圖3(d)所測定)之LD之Nomarski光學顯微鏡圖像，及圖4(b)顯示生長於1度斜切[朝向(000-1)方向]m-平面GaN基板上(例如，包含圖1(a)顯示及圖3(a)及圖3(b)測定之結構)之LD之Nomarski光學顯微鏡圖像，其中圖4(a)及圖(b)中之尺度係100微米(μm)且垂直及水平方向中皆相同。

圖5(a)顯示生長於標稱同軸m-平面GaN基板上(例如，如圖3(c)及圖3(d)測定)之LD之螢光光學顯微鏡圖像，及圖5(b)顯示生長於1度斜切[朝向(000-1)方向]之m-平面GaN基板上之LD(包含如圖1(a)顯示及圖3(a)及3(b)測定之結構)之螢光光學顯微鏡圖像，其中圖5(a)及圖5(b)中之尺度係100微米(μm)且該尺度在水平及垂直方向皆相同。

圖5(c)係生長於(20-21)GaN基板上之LD之螢光顯微鏡圖像，其中該尺度係100 μm 。

圖6係說明製造根據本發明之LD結構之方法之流程圖。

圖 7(a)係於離軸基板上之一或多個裝置層之橫截面示意圖，及圖 7(b)係生長於同軸 m-平面基板上之裝置層表面上之凸起之橫截面示意圖。

圖 8係顯示接觸電阻率(ohm-cm^2)成冷卻期間 Cp_2Mg 流量 (sccm)之函數之 p-接觸矩陣。

【主要元件符號說明】

100	III-氮化物雷射二極體結構
102	基板
104	偏軸表面
106	n-型 GaN 層體
108	n-型 III-氮化物包覆層
110	n-型 GaN 間隙層
112	n-型 InGaN SCH 層
114	活性區域
114a	第一 InGaN 量子阱障壁層
114b	InGaN 量子阱層
114c	第二 InGaN 量子阱障壁層
116	非故意摻雜 GaN 層
118	電子阻擋層
120	p-型 InGaN SCH 層
122	p-GaN 間隙層
124	p-型 III-氮化物包覆層
126	p-型 GaN 接觸層
128	厚度

130	厚度
132	厚度
134	厚度
136	厚度
138	厚度
140	厚度
142	厚度
144	厚度
146	厚度
148	厚度
150	厚度
152	厚度
154	第一界面
156	第二界面
158	第三界面
160	第四界面
162	第五界面
164	第六界面
166	第七界面
168	第八界面
170	第九界面
172	第十界面
174	第十一界面
176	第十二界面

178	頂面
180	切面
182	切面
400	頂面
402	錐形凸起
404	頂面
500	表面
502	位置
504	位置
506	表面
508	螢光
700	角度
702	m-平面
704	裝置層
706	裝置層
708	頂面
710	凸起
712	裝置層表面
714	界面
716	厚度

發明專利說明書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※申請案號： 99118454

※申請日： 99.6.7

※IPC 分類：H01L 33/02 (2010.01)
H01S 5/343 (2006.01)

一、發明名稱：(中文/英文)

長波長非極性及半極性基於(Al,Ga,In)N之雷射二極體

LONG WAVELENGTH NONPOLAR AND SEMIPOLAR (Al,Ga,In)N
BASED LASER DIODES

二、中文發明摘要：

本發明係關於一種生長於斜切(miscut)非極性或半極性基板上之雷射二極體，與習知的雷射二級體結構相比，其具有較低的臨限電流密度及較長的刺激發射波長，其中該雷射二極體的(1)n-型層體係在氮載氣中生長，(2)與其他裝置層體相比(p-型層體能夠在較高溫度下生長)，量子阱層及障壁層係以較慢的生長速率生長，(3)高Al含量的電子阻擋層能夠在活性區之上於較高溫度下生長，及(4)不對稱的AlGa_{0.5}N SPSLS允許生長含有高Al之p-AlGa_{0.5}N層體。使用各種其他技術以改良p-型層體之傳導性及減小接觸層之接觸電阻。

三、英文發明摘要：

A laser diode, grown on a miscut nonpolar or semipolar substrate, with lower threshold current density and longer stimulated emission wavelength, compared to conventional laser diode structures, wherein the laser diode's (1) n-type layers are grown in a nitrogen carrier gas, (2) quantum well layers and barrier layers are grown at a slower growth rate as compared to other device layers (enabling growth of the p-type layers at higher temperature), (3) high Al content electron blocking layer enables growth of layers above the active region at a higher temperature, and (4) asymmetric AlGaIn SPSLS allowed growth of high Al containing p-AlGaIn layers. Various other techniques were used to improve the conductivity of the p-type layers and minimize the contact resistance of the contact layer.

七、申請專利範圍：

1. 一種製造III-氮化物雷射二極體(LD)結構之方法，其包含：

在非極性或半極性III-氮化物基板之離軸表面上生長一或多個LD之III-氮化物裝置層。
2. 如請求項1之方法，其中該表面係相對於該基板之m-平面離軸-1或+1度，且朝向該基板之c方向。
3. 如請求項1之方法，其中該表面係相對於該基板之m-平面離軸多於-1或+1度，且朝向該基板之c方向。
4. 如請求項2之方法，其進一步包含在大氣壓下使用100%氮載氣以在基板之離軸表面上生長一或多個裝置層，導致該等裝置層具有光滑表面形態，其不含在生長於標稱同軸m-平面GaN基板上之裝置層中所觀察得的錐形凸起。
5. 如請求項1之方法，其中該等裝置層包含所有LD結構的n-型層體。
6. 如請求項5之方法，其中該等n-型層體進一步包含摻雜矽之n-型AlGaN/GaN超晶格，與未使用100%氮載氣生長的裝置層相比，其使LD結構具有光滑界面及極佳的結構性質。
7. 如請求項1之方法，其中生長該等裝置層進一步包含於大於0.3埃/秒及小於0.7埃/秒，及比LD結構中其他層體所使用的生長速率慢之第一生長速率下生長一或多個量子阱。

8. 如請求項7之方法，其進一步包含在第一溫度下生長具有一銦含量之該等量子阱，以使該等量子阱發射綠光，與以不同生長速率生長的量子阱相比，其中該第一生長速率維持光滑的界面且防止切面。

9. 如請求項8之方法，其中各量子阱係位在量子阱障壁之間以形成發光的活性區域，且進一步包含：

以比該第一生長速率慢之第二生長速率生長該等量子阱障壁，與以不同的較快生長速率生長之障壁相比，其導致生長於量子阱障壁上之裝置層(包括量子阱)之光滑的表面形態及界面。

10. 如請求項9之方法，其進一步包含：

在該活性區域上生長一高鋁含量AlGa_N電子阻擋層；及
在該活性區域上以比該第一溫度且與無該高Al含量AlGa_N電子阻擋層相比較高之第二溫度生長後續層。

11. 如請求項10之方法，其中高銦含量In_xGa_{1-x}N($x > 7\%$)之分離局限異質結構(SCH)層係位在該活性區域及該電子阻擋層之任一面上，且進一步包含於以下條件下生長該SCH層：

(1)比LD結構中生長其他層體所使用之溫度高的第三溫度；

(2)大於0.3埃/秒及小於0.7埃/秒之較低生長速率；及

(3)大於1.1之高三甲基銦/三乙基鎔(TEG)比率，導致光滑且無缺陷之波導層。

12. 如請求項9之方法，其進一步包含在該活性區域之任一

面上形成AlGa_{0.3}N/GaN不對稱超晶格作為包覆層，其包括交替的AlGa_{0.3}N及GaN層且AlGa_{0.3}N層比GaN層厚。

13. 如請求項9之方法，其進一步包含在該活性區域之一面上形成p-波導及p-包覆層並令其摻雜 1×10^{18} 至 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 之範圍之鎂濃度。

14. 如請求項13之方法，其進一步包含在一p-包覆層上沉積一p-GaN接觸層，其厚度小於15 nm且鎂摻雜係介於 7×10^{19} 至 3×10^{20} 之間。

15. 如請求項14之方法，其進一步包含：

在p-GaN接觸層之沉積後，在氮氣及氮環境中冷卻該LD結構，且使少量之雙(環戊二烯基)鎂(Cp_2Mg)流動直至溫度降至700攝氏度以下，因此形成對LD結構具有較低接觸電阻之Mg-Ga-N層。

16. 一種基於III-氮化物之雷射二極體(LD)結構中之III-氮化物裝置層，其包含：

(a)生長於m-平面III-氮化物基板之離軸表面上之LD之III-氮化物裝置層。

17. 如請求項16之裝置層，其中該III-氮化物裝置層具有整個 $25 \text{ } \mu\text{m}^2$ 面積之均方根(RMS)表面粗糙度為1 nm或更小之頂面。

18. 如請求項16之裝置層，其中該頂面不含錐形凸起。

19. 如請求項18之裝置層，其中該頂面係比生長於標稱同軸m-平面基板上之III-氮化物裝置層之頂面光滑。

20. 如請求項16之裝置層，其中該III-氮化物裝置層係生長

於相對於該基板之m-平面離軸-1或+1度且朝向該基板之c方向之表面上。

21. 如請求項16之裝置層，其進一步包含複數個裝置層，其中：

(1)該頂面係一疊層生長之兩層裝置層間之界面；及

(2)該界面係在以下之一或多者之間：量子阱及量子阱障壁，波導層及包覆層之間，或波導層及發光活性層之間。

22. 如請求項16之裝置層，其中該等裝置層係位在經加工成LD之LD結構中，以致藉由切面塗層，該LD具有18 kA/cm²或更小之臨限電流密度。

23. 如請求項16之裝置層，其中該頂面比圖4(a)顯示之表面光滑。

24. 如請求項16之裝置層，其中該裝置層係包括InGa_xN量子阱層之發光活性層，與生長於同軸m-平面基板上之發光InGa_xN量子阱中之In組成及In波動相比，其具有較高的In組成與較少穿過InGa_xN量子阱層之In波動。

25. 如請求項16之裝置層，其中該裝置層係包括InGa_xN量子阱層之發光活性層，與圖5(a)顯示之In組成及In波動相比，其具有較高的In組成與較少穿過InGa_xN量子阱層之In波動。

26. 如請求項16之裝置層，其中該裝置層係厚度小於15 nm之Mg-Ga-N接觸層。

27. 如請求項25之裝置層，其中對Mg-Ga-N接觸層之接觸電

阻係小於 $4\text{E-}4 \text{ Ohm-cm}^2$ 。

28. 如請求項 16 之裝置層，其中當該 LD 結構經加工為 LD 時，該 LD 發射具有相當於至少藍-綠或綠光之波長下之峰強度之光。

八、圖式：

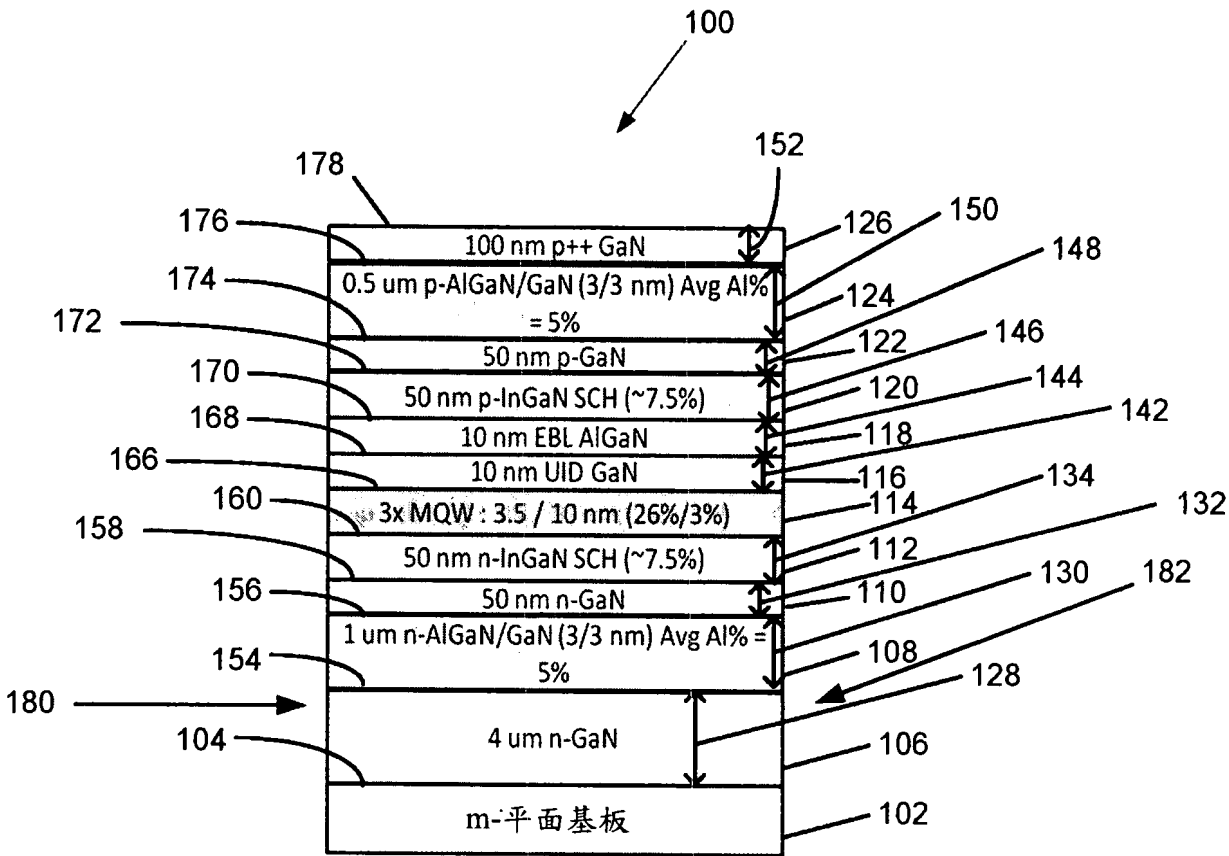


圖 1(a)

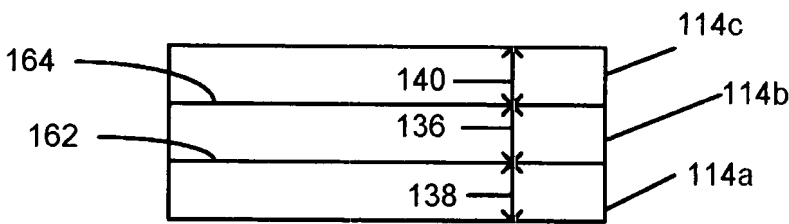


圖 1(b)

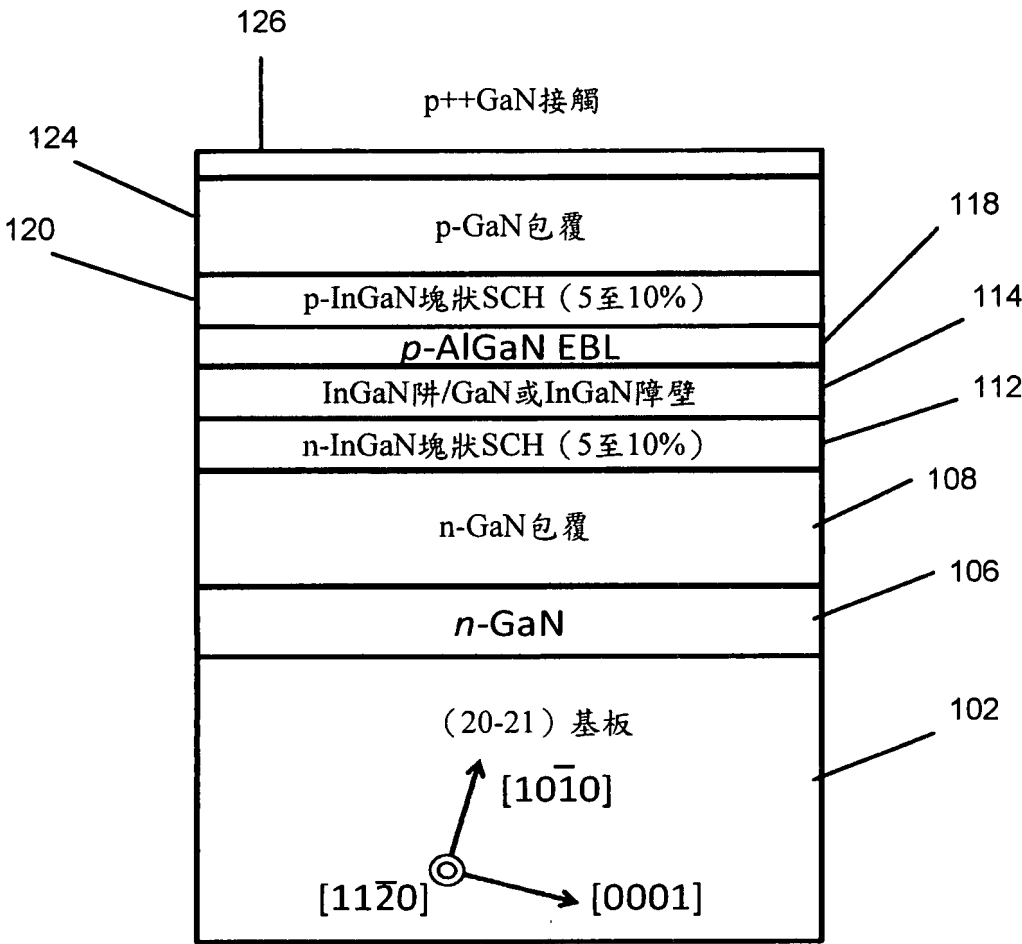


圖 1(c)

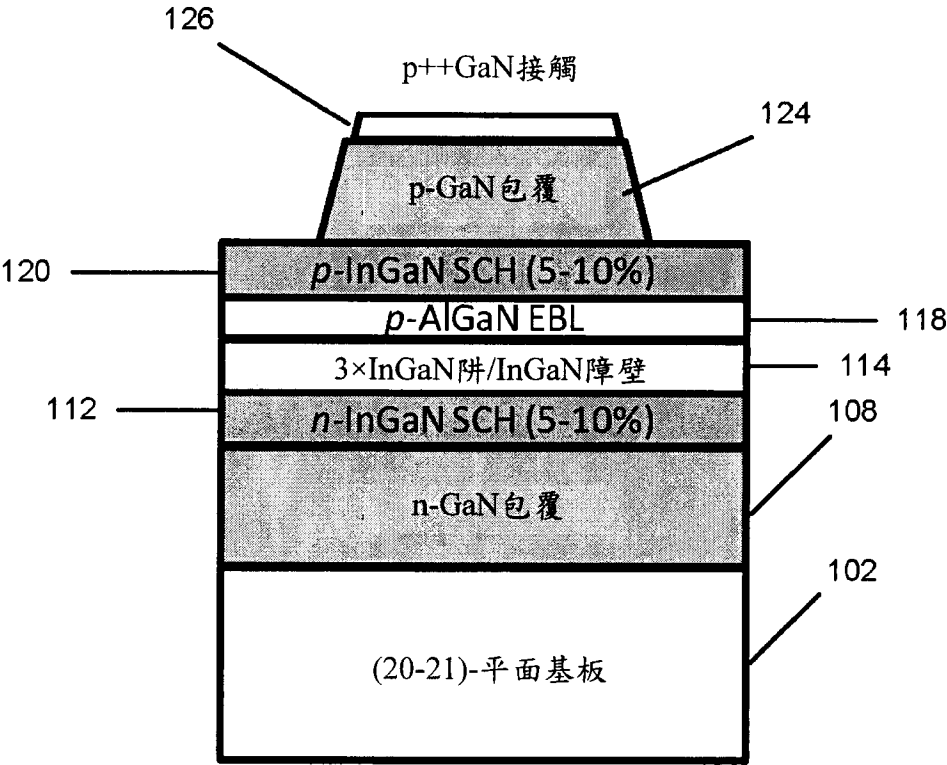


圖 1(d)

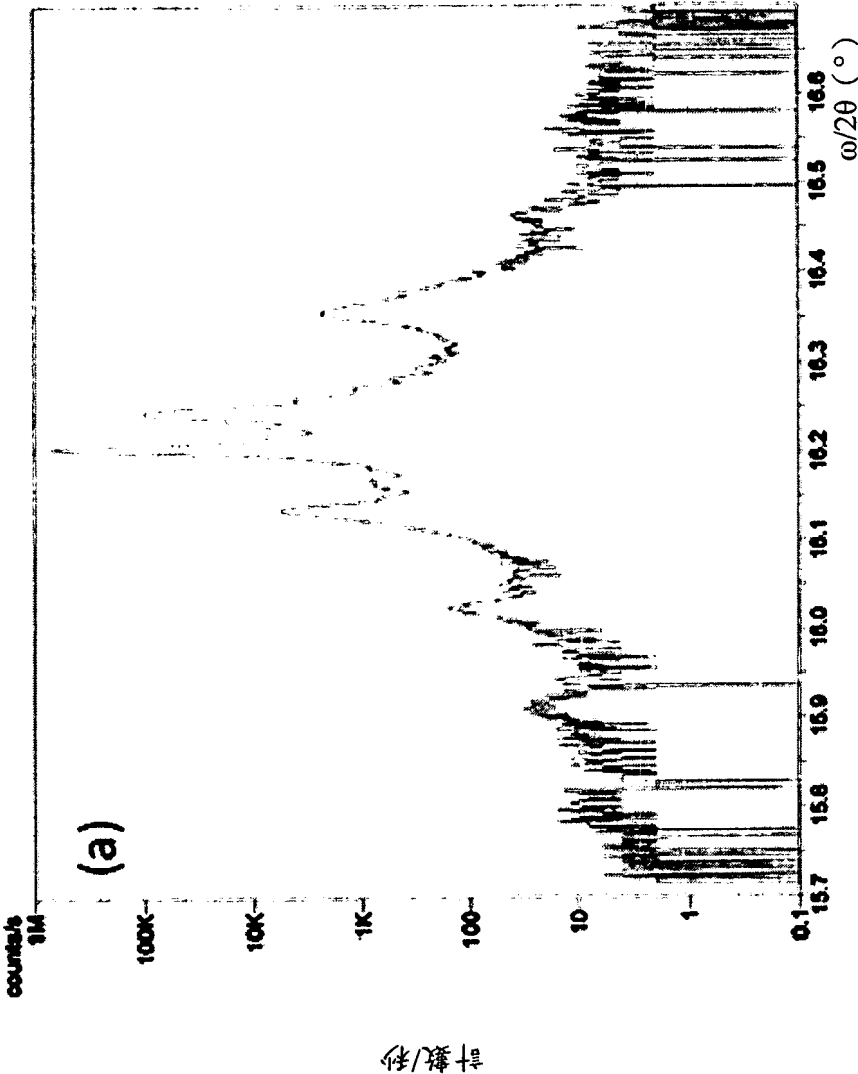


圖 2(a)

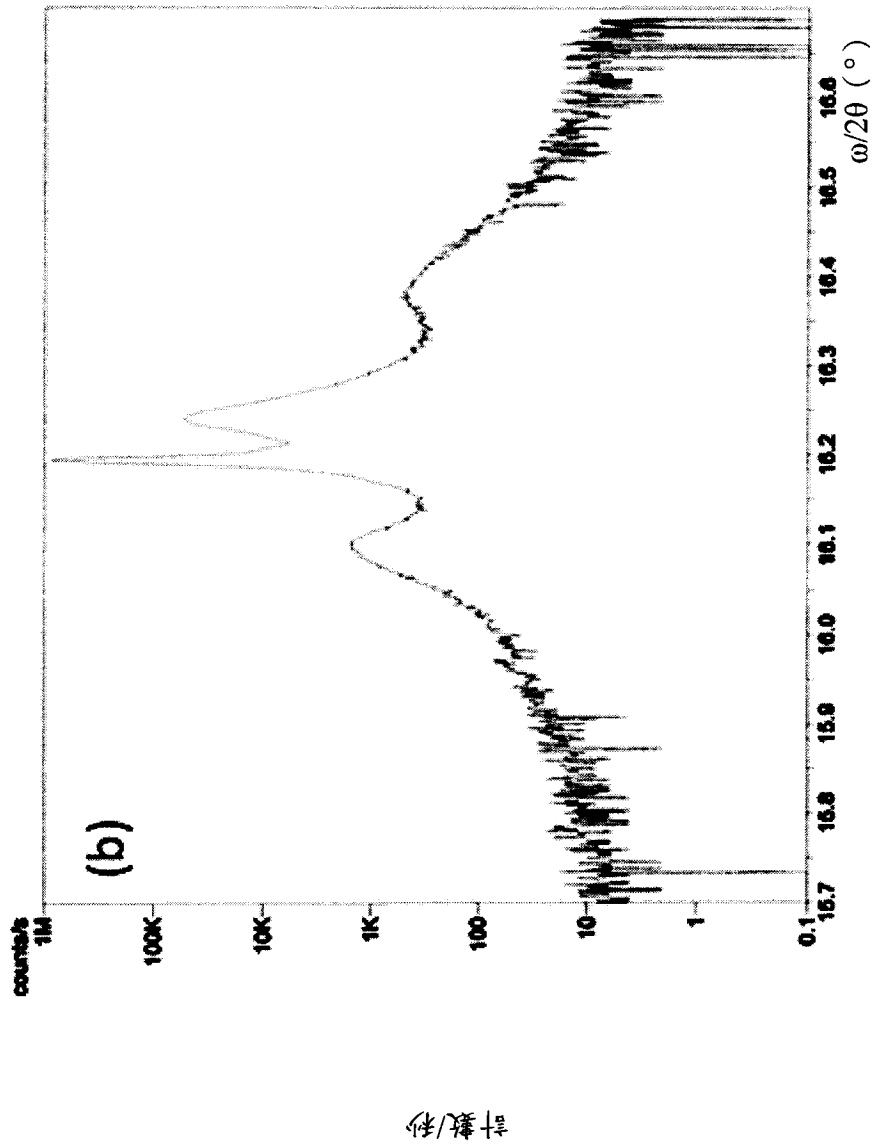


圖 2(b)

m-平面InGaN SCH/AlGaN包覆-1度
朝向c斜切隆脊+切割 (3/18/2009)

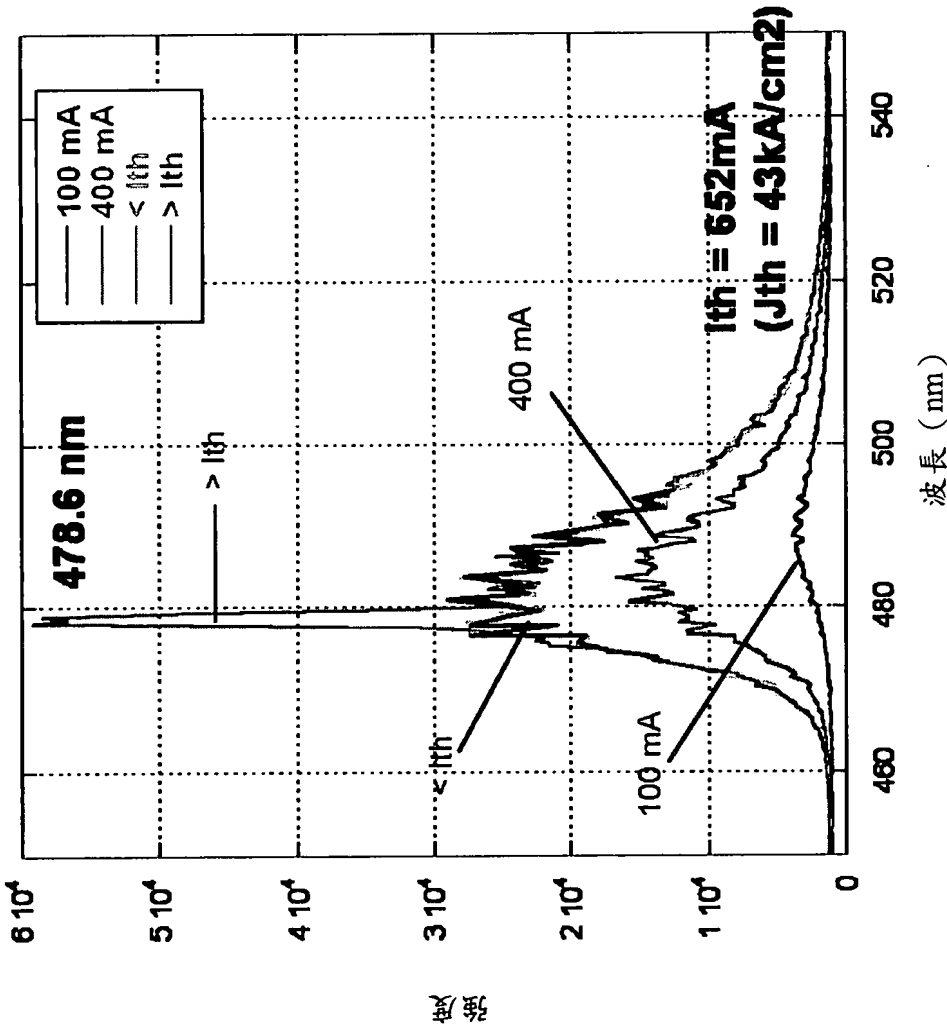


圖 3(a)

m-平面InGaN SCH/AlGaIn包覆-1度
朝向c斜切隆脊+切割 (3/18/2009)

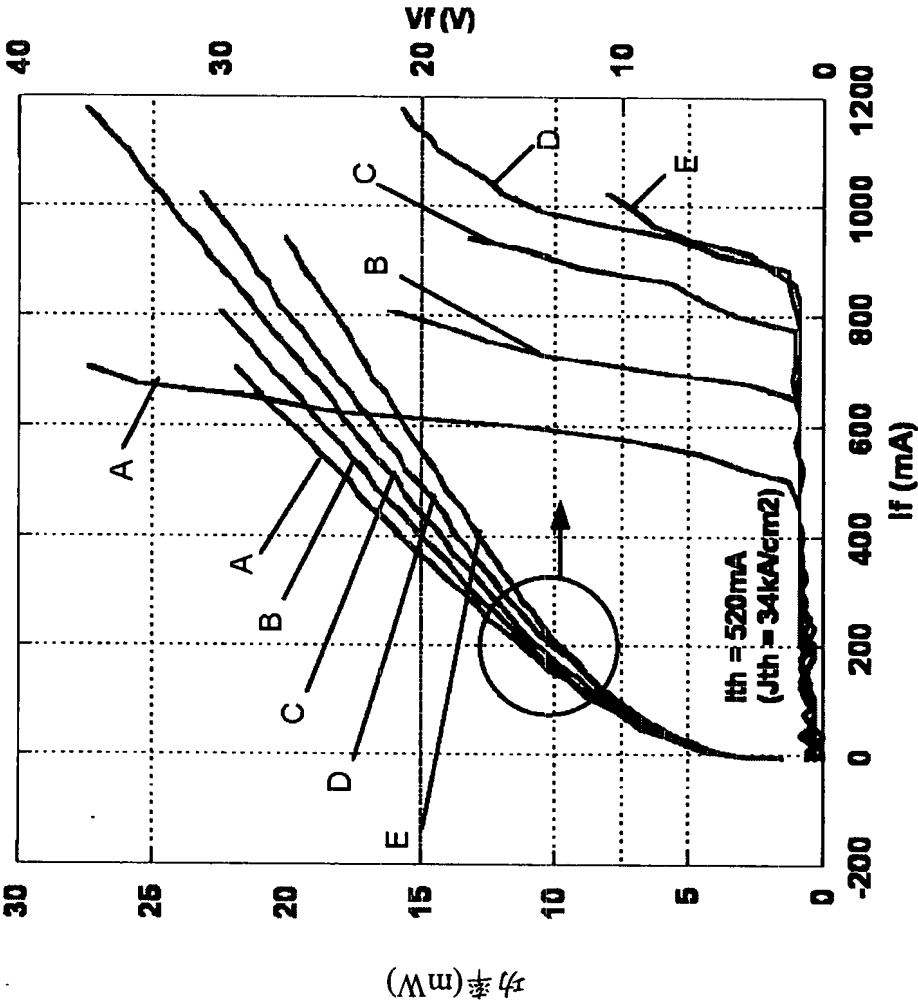


圖 3(b)

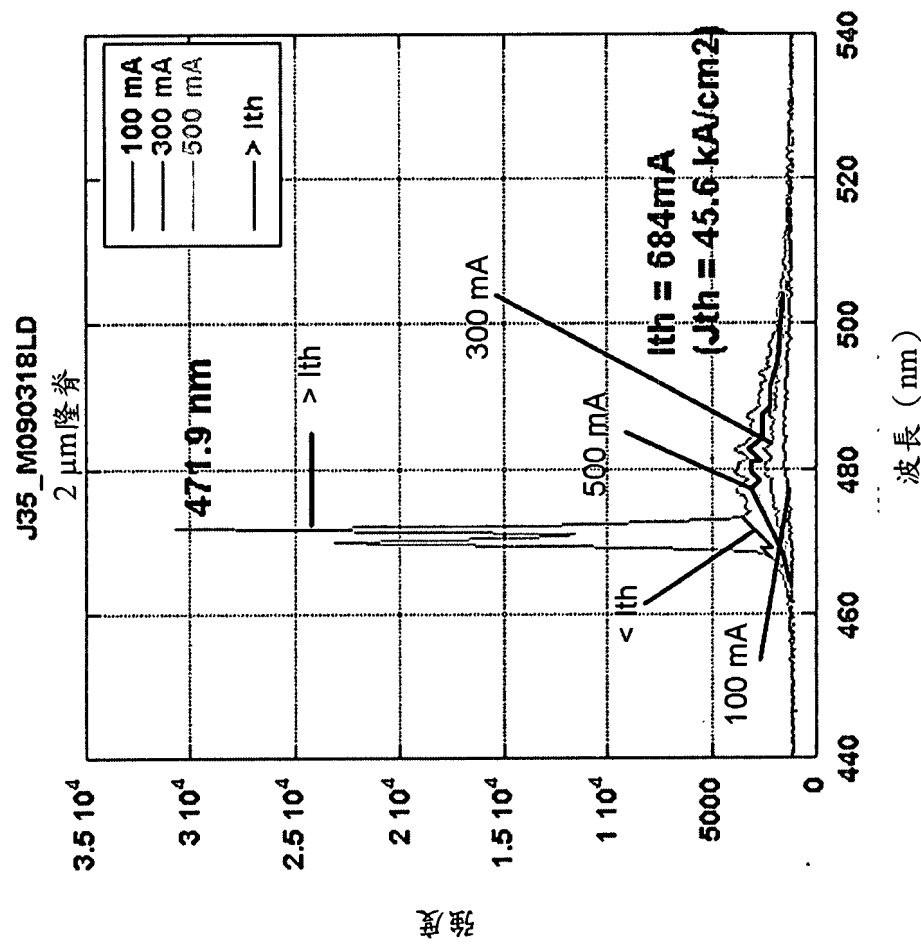


圖 3(c)

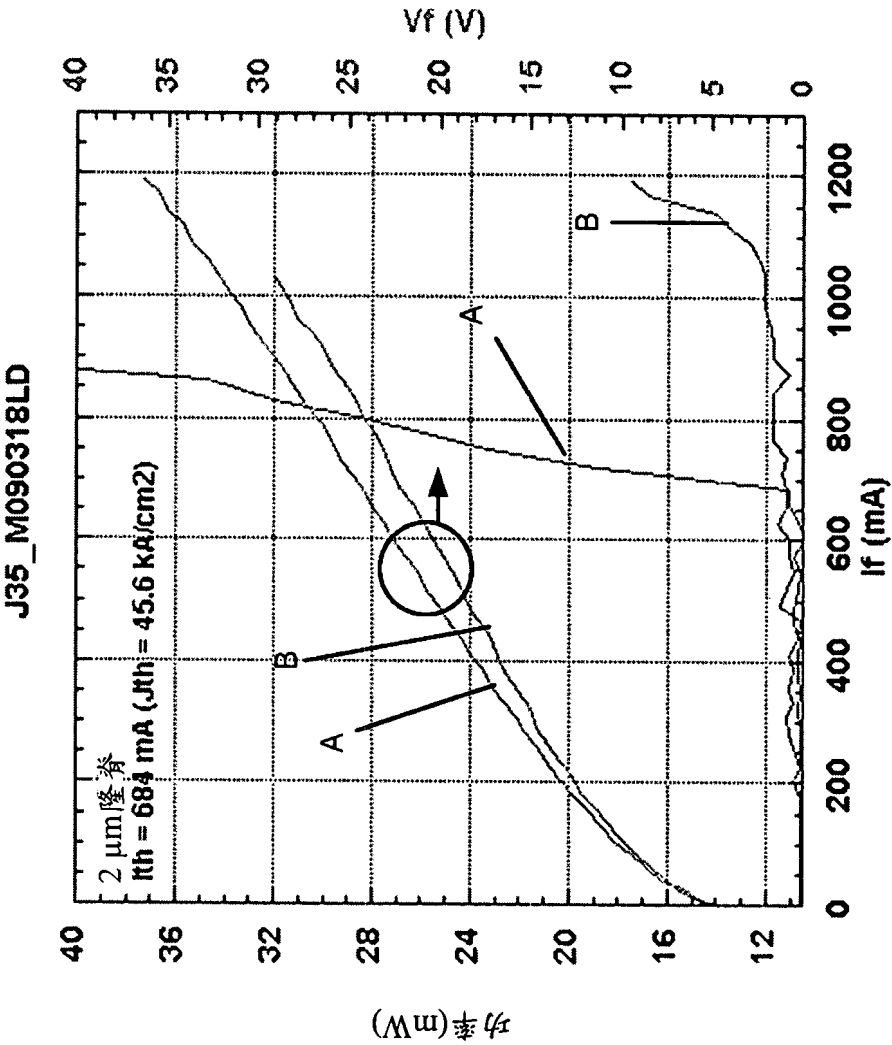


圖 3(d)

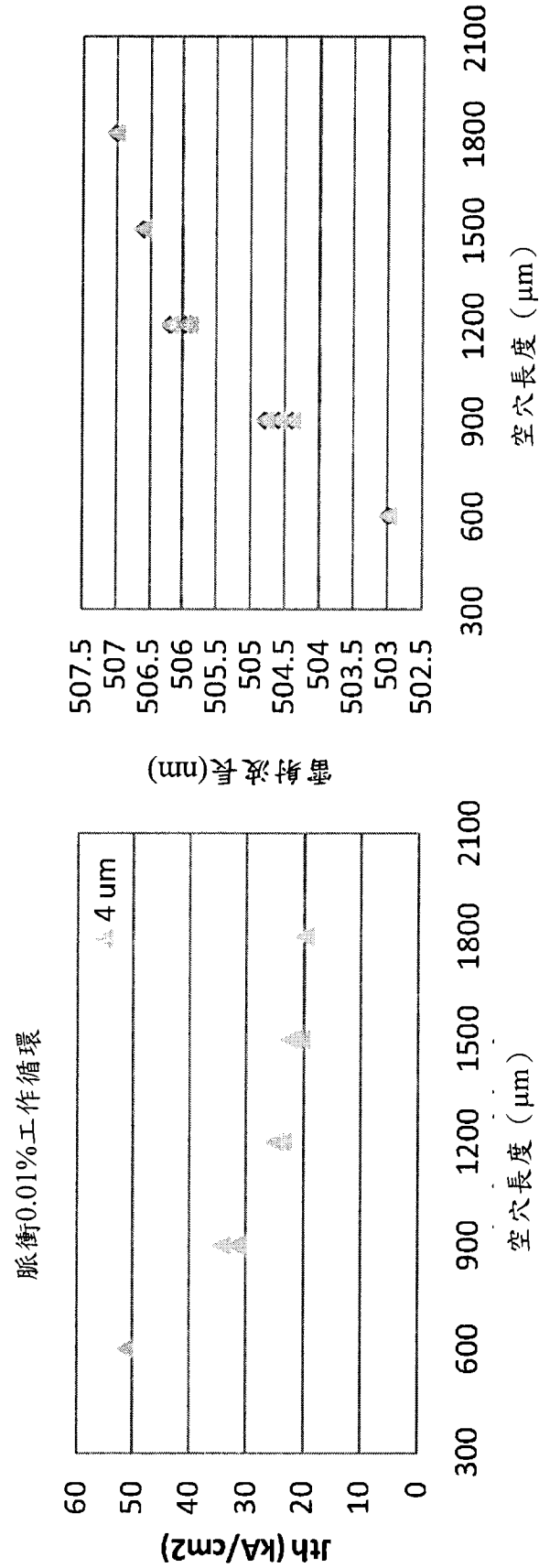


圖 3(e)

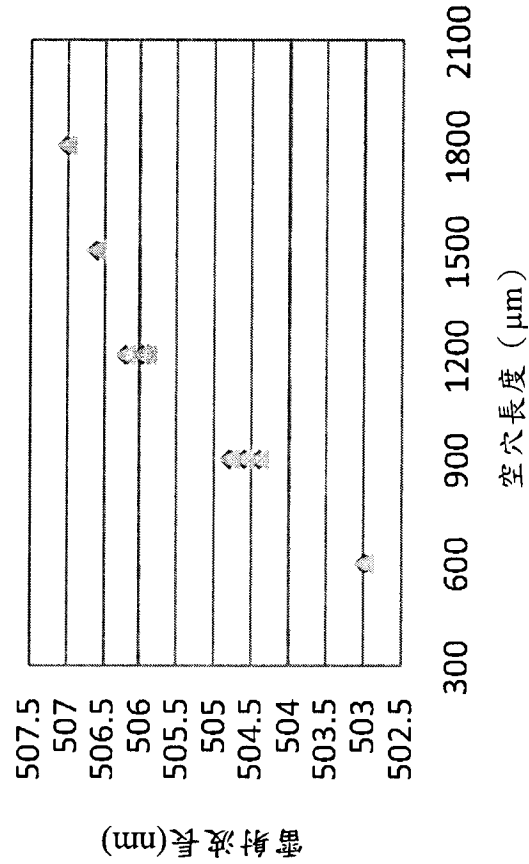


圖 3(f)

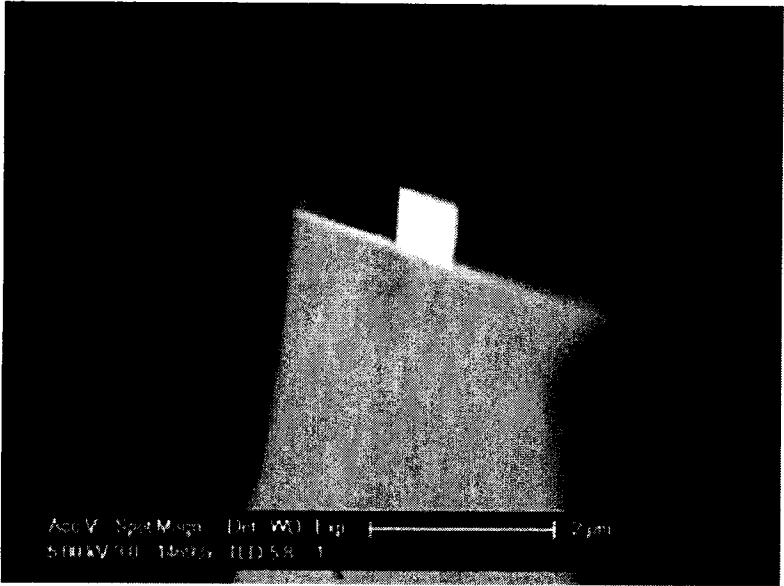


圖 3(g)



圖 3(h)

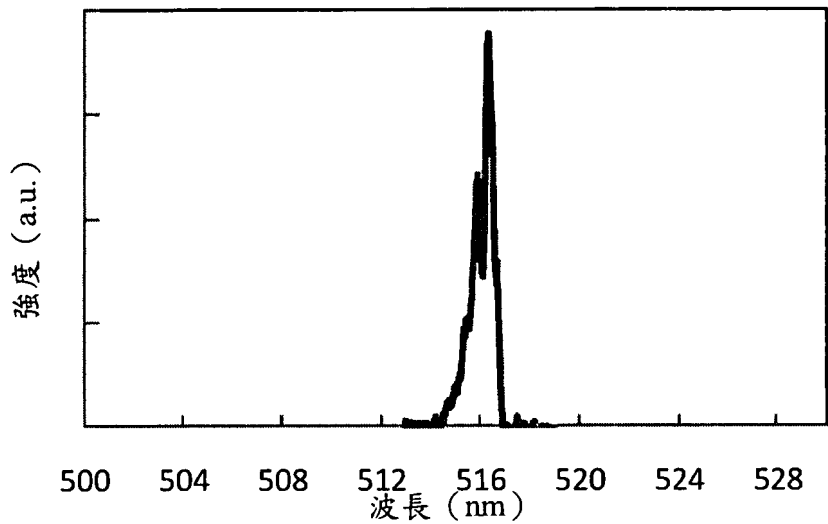


圖 3(i)
L-I-V curve

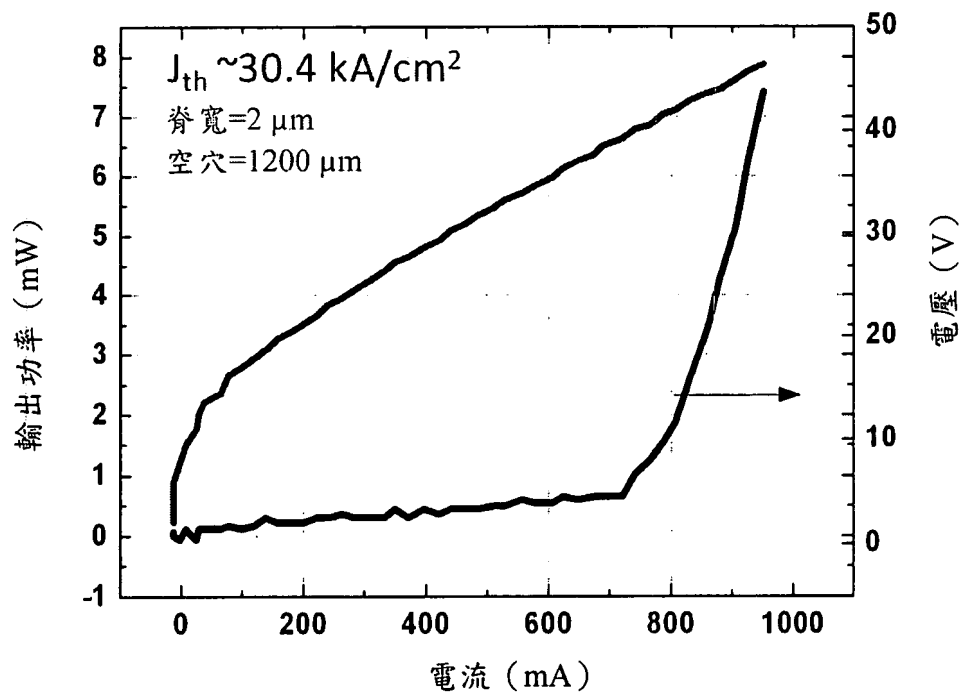


圖 3(j)

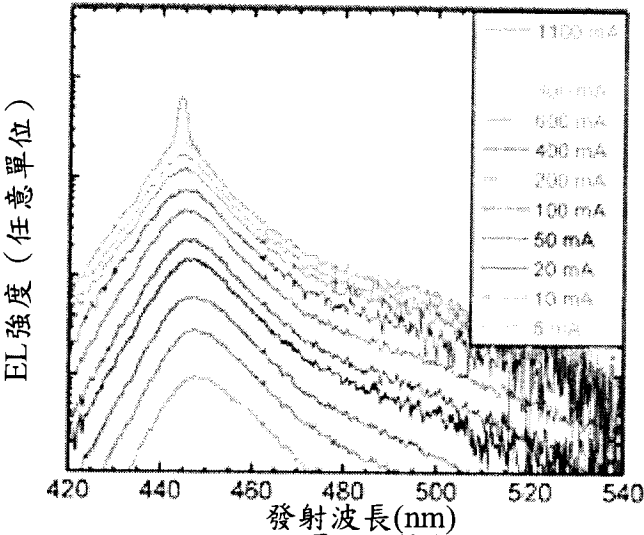


圖 3(k)

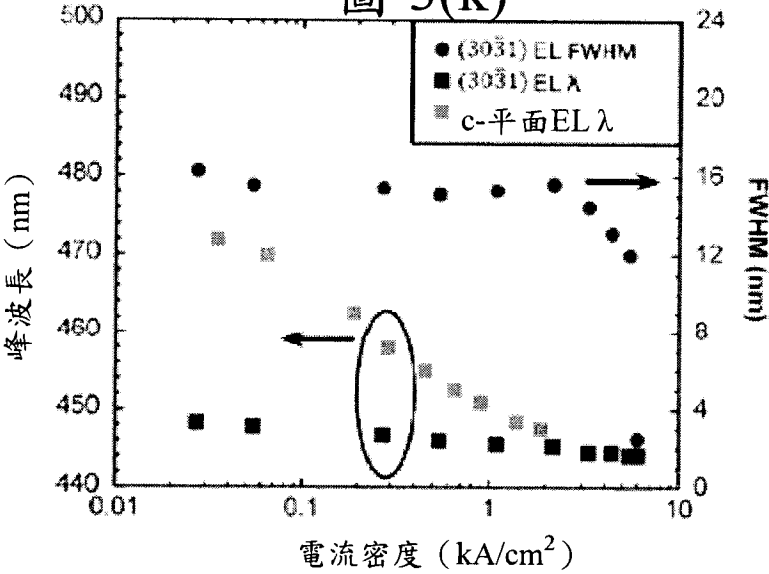


圖 3(l)

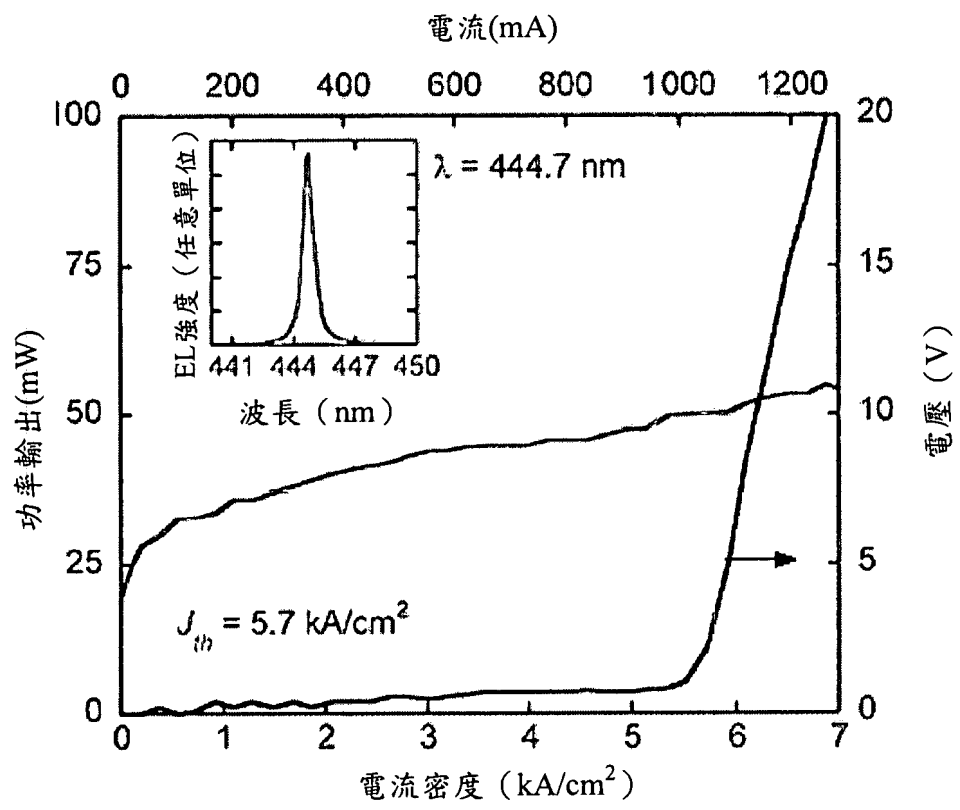


圖 3(m)

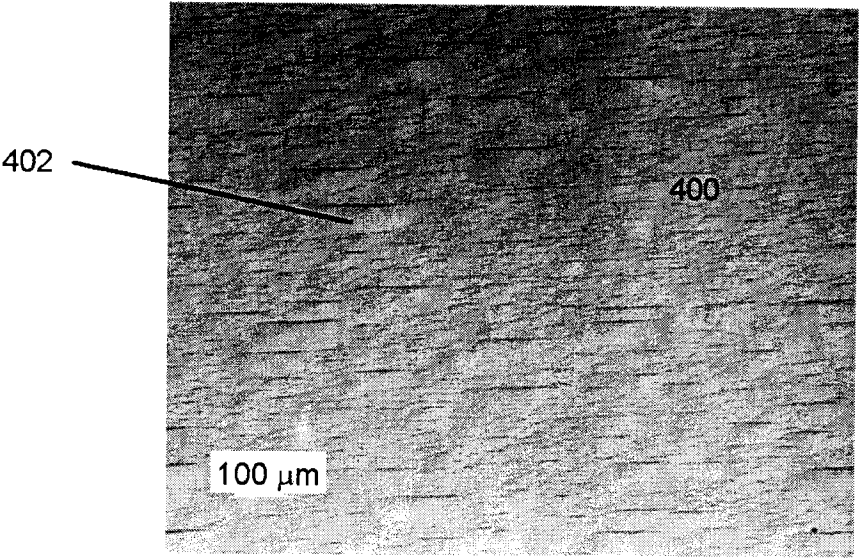


圖 4(a)

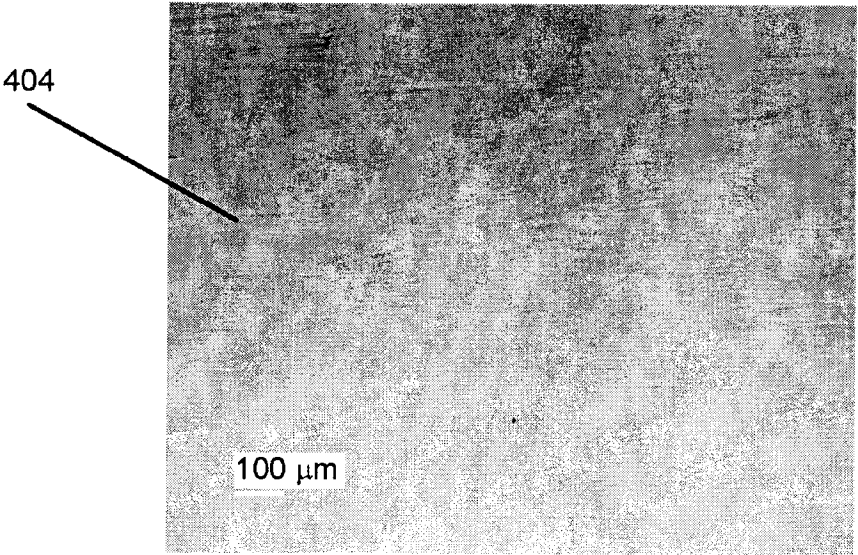


圖 4(b)

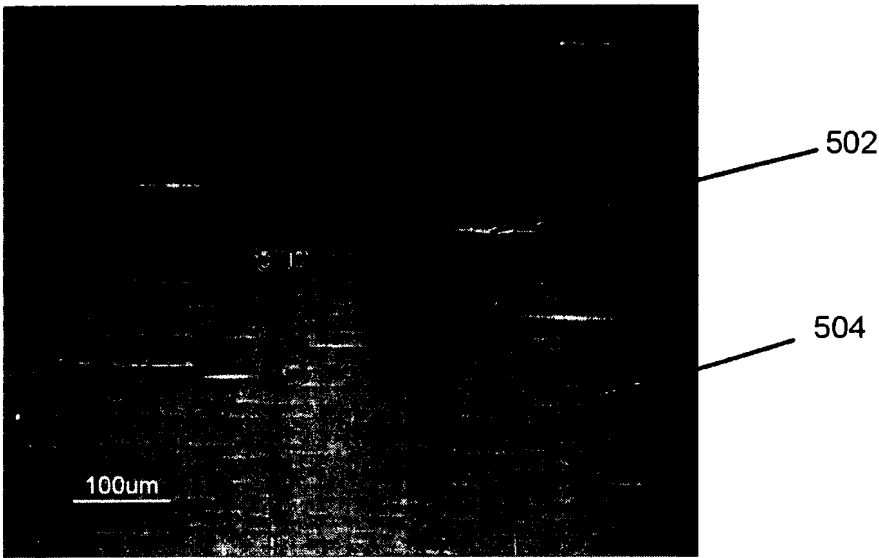


圖 5(a)

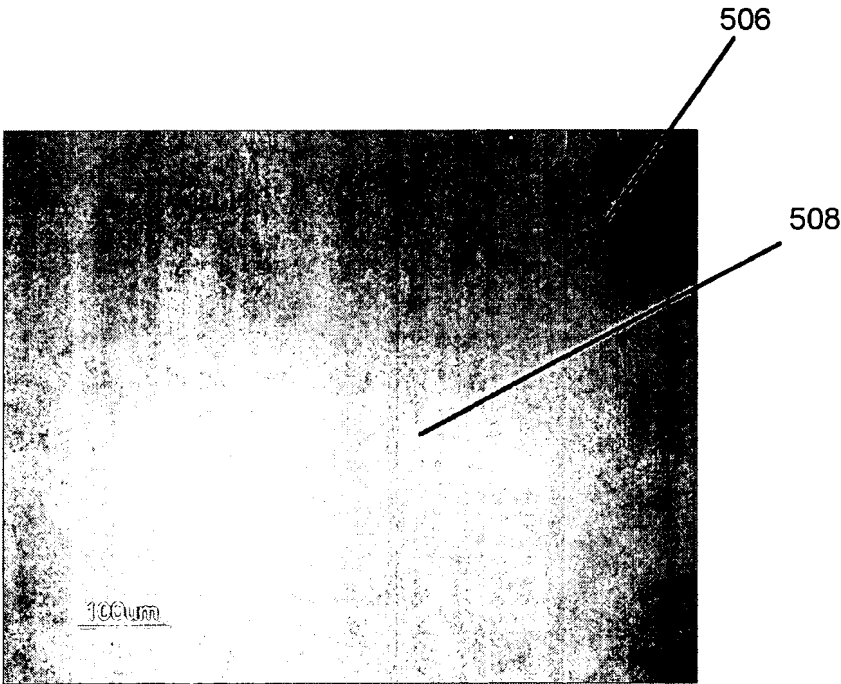


圖 5(b)

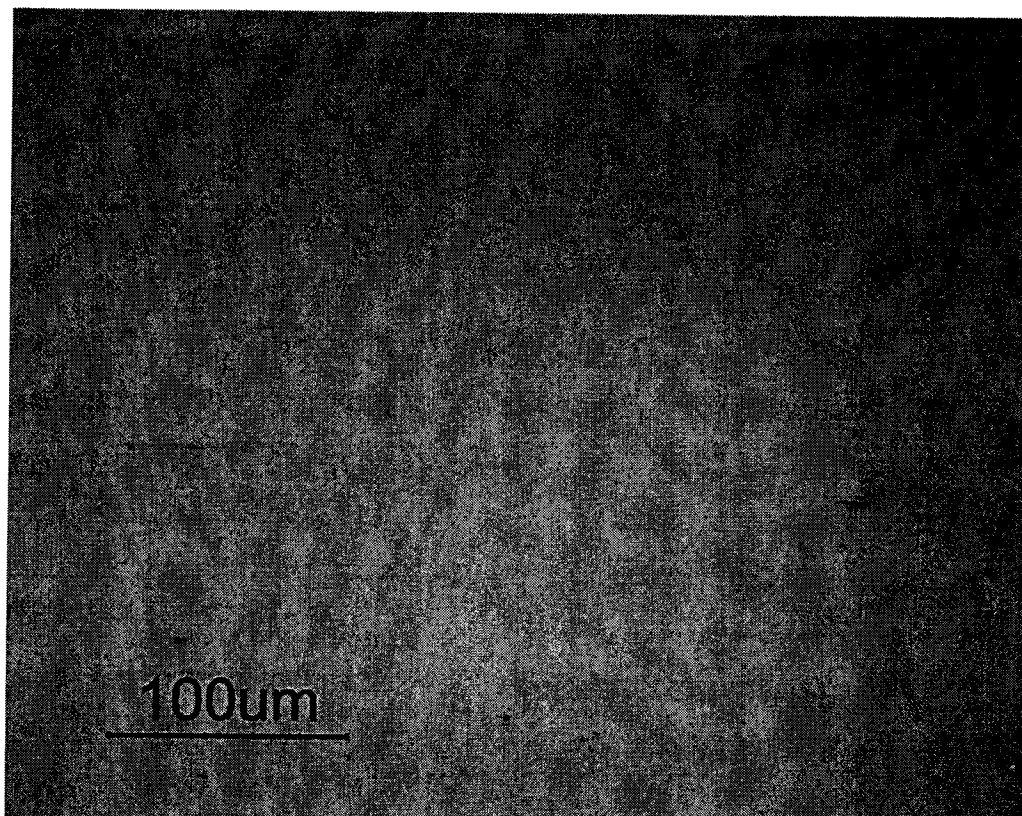


圖 5(c)

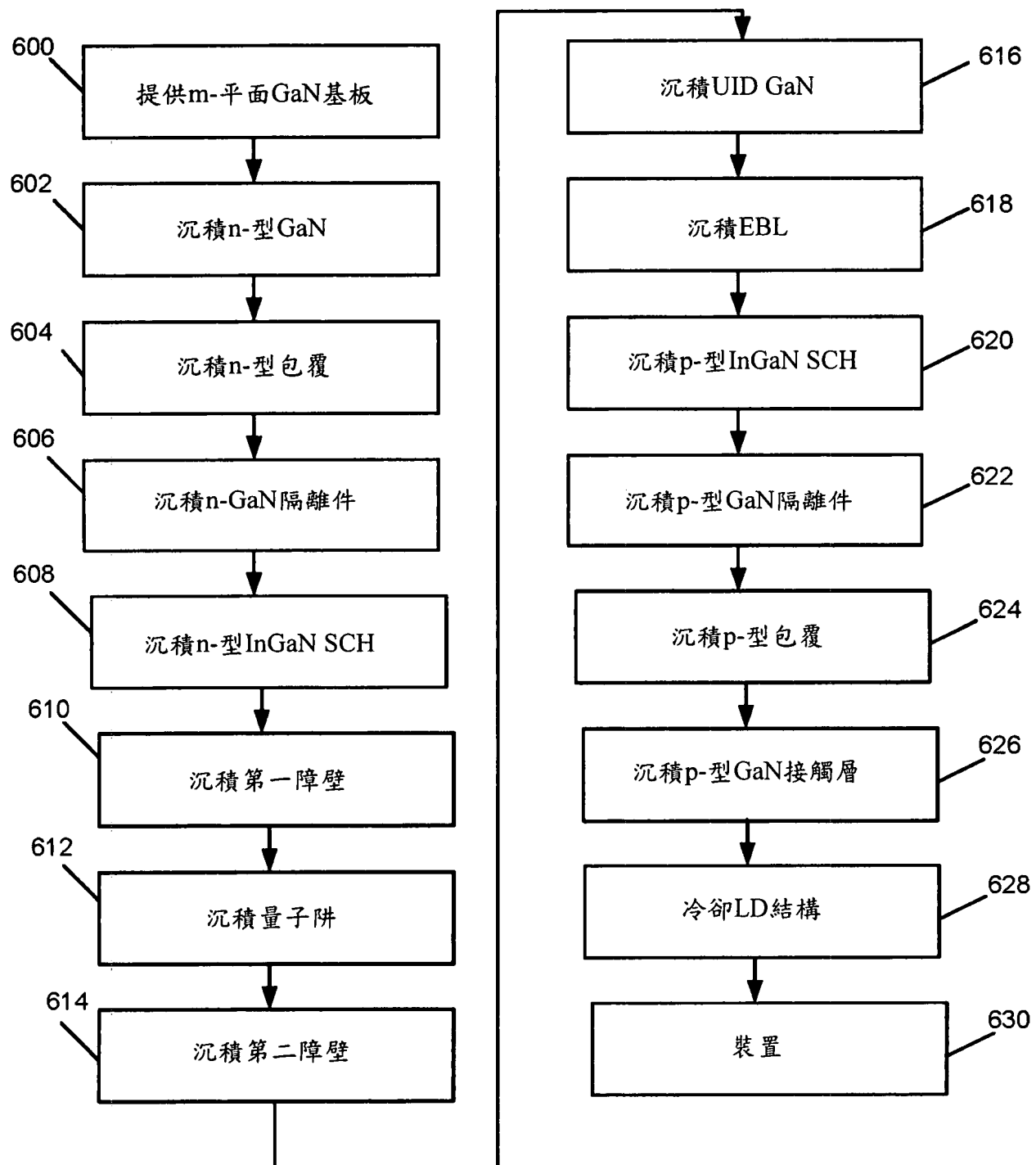


圖 6

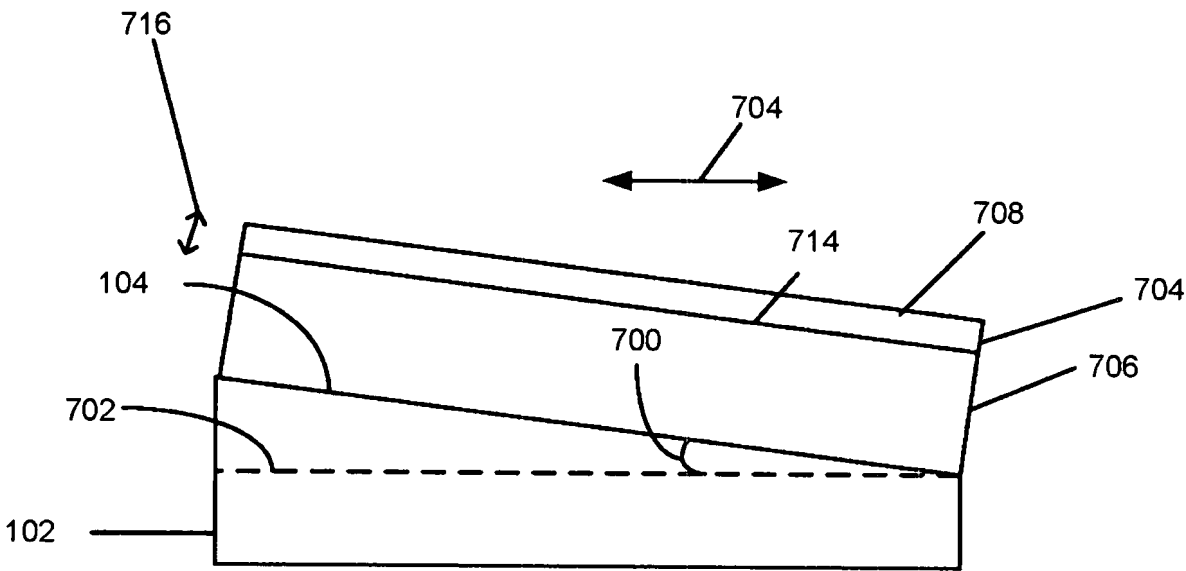


圖 7(a)

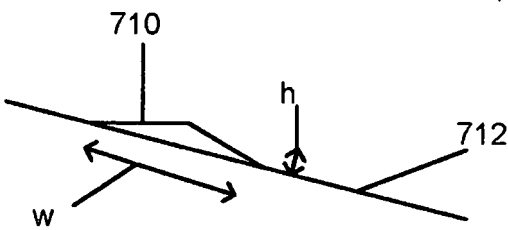


圖 7(b)

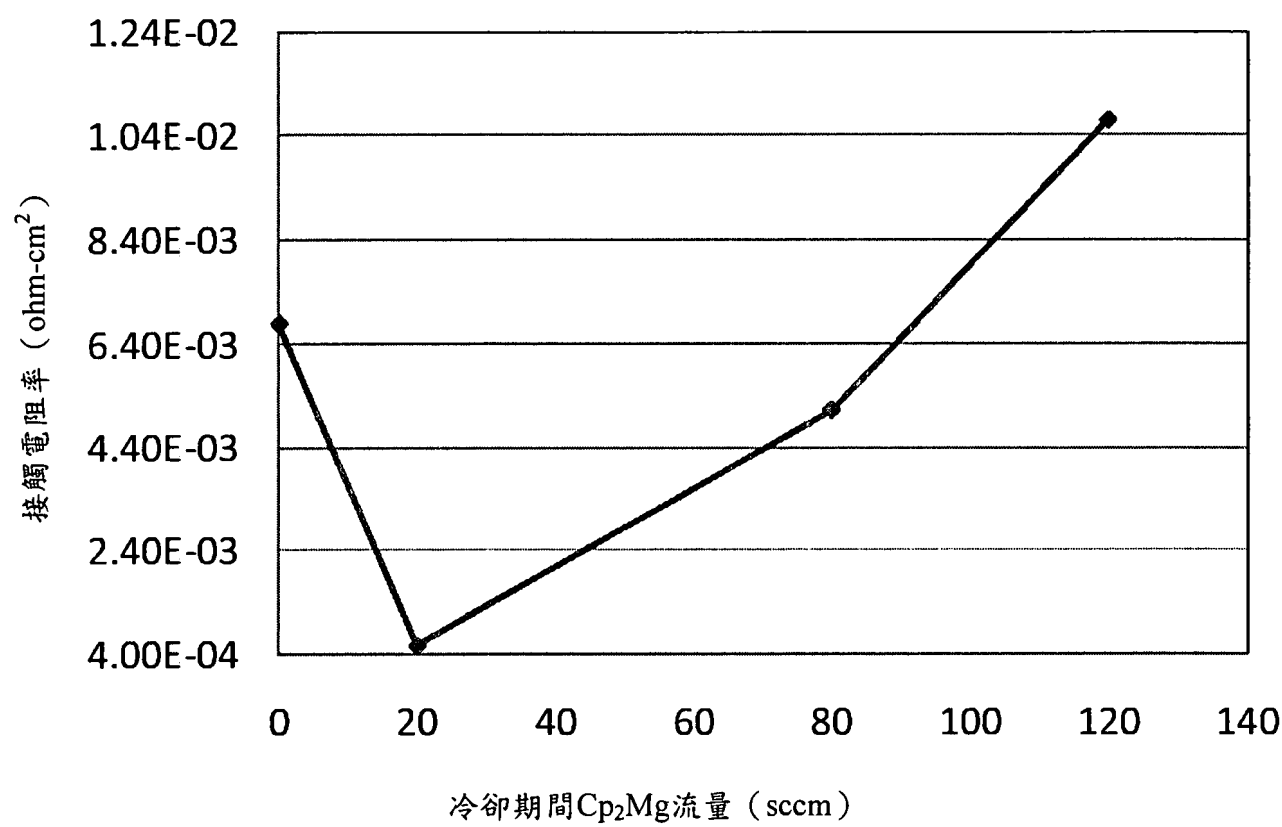


圖 8

四、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第 (1(a)) 圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

100	III-氮化物雷射二極體結構
102	基板
104	離軸表面
106	n-型 GaN層體
108	n-型 III-氮化物包覆層
110	n-型 aN間隙層
112	n-型 InGaN SCH層
114	活性區域
116	非故意摻雜 GaN層
118	電子阻擋層
120	p-型 InGaN SCH層
122	P-GaN間隙層
124	p-型 III-氮化物包覆層
126	p-型 GaN接觸層
128	厚度
130	厚度
132	厚度
134	厚度
142	厚度
144	厚度
146	厚度

148	厚度
150	厚度
152	厚度
154	第一界面
156	第二界面
158	第三界面
160	第四界面
166	第七界面
168	第八界面
170	第九界面
172	第十界面
174	第十一界面
176	第十二界面
178	頂面
180	切面
182	切面

五、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

(無)