



(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 I804567 B

(45)公告日：中華民國 112 (2023) 年 06 月 11 日

(21)申請案號：108102895

(22)申請日：中華民國 108 (2019) 年 01 月 25 日

(51)Int. Cl. : H01L33/40 (2010.01)

H01L33/04 (2010.01)

(30)優先權：2018/01/26 日本

2018-012073

(71)申請人：日商丸文股份有限公司 (日本) MARUBUN CORPORATION (JP)

日本

日商芝浦機械股份有限公司 (日本) SHIBAURA MACHINE CO., LTD. (JP)

日本

國立研究開發法人理化學研究所 (日本) RIKEN (JP)

日本

日商愛發科股份有限公司 (日本) ULVAC, INC. (JP)

日本

日商東京應化工業股份有限公司 (日本) TOKYO OHKA KOGYO CO., LTD. (JP)

日本

日商日本鎢合金股份有限公司 (日本) NIPPON TUNGSTEN CO., LTD. (JP)

日本

日商大日本印刷股份有限公司 (日本) DAI NIPPON PRINTING CO., LTD. (JP)

日本

日商同和控股 (集團) 有限公司 (日本) DOWA HOLDINGS CO., LTD. (JP)

日本

(72)發明人：鹿嶋行雄 KASHIMA, YUKIO (JP)；松浦惠里子 MATSUURA, ERIKO (JP)；小久保光典 KOKUBO, MITSUNORI (JP)；田代貴晴 TASHIRO, TAKAHARU (JP)；平山秀樹 HIRAYAMA, HIDEKI (JP)；前田哲利 MAEDA, NORITOSHI (JP)；定昌史 JO, MASAFUMI (JP)；上村隆一郎 KAMIMURA, RYUICHIRO (JP)；長田大和 OSADA, YAMATO (JP)；古田寬治 FURUTA, KANJI (JP)；岩井武 IWAI, TAKESHI (JP)；青山洋平 AOYAMA, YOHEI (JP)；祝迫恭 IWASAKO, YASUSHI (JP)；長野丞益 NAGANO, TSUGUMI (JP)；渡邊康弘 WATANABE, YASUHIRO (JP)

(74)代理人：陳長文

(56)參考文獻：

TW 201308523A

TW 201735393A

EP 2544232A1

審查人員：文治中

申請專利範圍項數：6 項 圖式數：27 共 76 頁

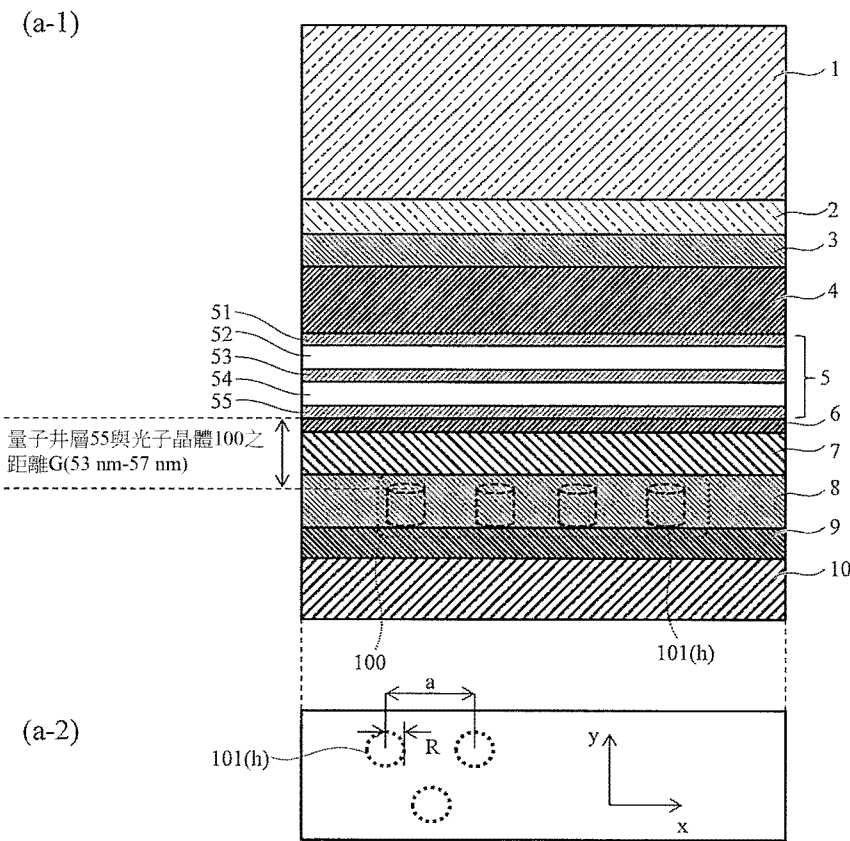
(54)名稱

深紫外 LED 及其製造方法

(57)摘要

本發明係一種深紫外 LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Au)、金屬層(Ni)、p 型 GaN 接觸層、由 p 型 AlGaIn 層形成之 P-Block 層、由 AlN 層形成之 i-guide 層、多重量子井層、n 型 AlGaIn 接觸層、u 型 AlGaIn 層、AlN 模板、及上述藍寶石基板，上述 P-Block 層之膜厚為 52nm~56nm，具有設置於自上述金屬層與上述 p 型 GaN 接觸層之界面起於上述 p 型 GaN 接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述 p 型 GaN 接觸層與上述 P-Block 層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，上述空孔係自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述 i-guide 層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{1D_{eff}}$ ，該距離之範圍為 53nm~57nm，上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於 TE 偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期 a 相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2D_{eff}}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， $n_{2D_{eff}}$ ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶體之週期)之次數 m 滿足 $2\leq m\leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為 R 時，R/a 比滿足 $0.30\leq R/a\leq 0.40$ 。

指定代表圖：



符號簡單說明：

- 1:藍寶石基板
- 2:AlN 模板
- 3:u 型 AlGaIn 層
- 4:n 型 AlGaIn 接觸層
- 5:多重量子井層
- 6:i-guide 層
- 7:P-Block 層
- 8:p 型 GaN 接觸層
- 9:金屬層(Ni)
- 10:反射電極層(Au)
- 51、53、55:量子井層
- 52、54:障壁層
- 100:反射型二維光子晶體週期構造
- 101(h):空孔(柱狀構造體、孔)

a:週期
R:空孔之半徑

- 1. 藍寶石基板(厚度：1.3 μm ， $n=1.83$)
- 2. AlN模板(膜厚：200 nm， $n=2.3$)
- 3. u型AlGaIn層(膜厚：100 nm， $n=2.415$)
- 4. n型AlGaIn接觸層(膜厚：200 nm， $n=2.623$)
- 5. 多重量子井層
- 51. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$)
- 52. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$)
- 53. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$)
- 54. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$)
- 55. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$)
- 6. i-guide層(膜厚：1 nm， $n=2.3$)
- 7. P-Block層(膜厚：52 nm~56 nm， $n=2.594$)
- 8. p型GaN接觸層(膜厚：138 nm， $n=2.631$ ， $k=0.432$)
- 9. 金屬層(Ni)(膜厚：30 nm， $n=1.667$ ， $k=2.072$)
- 10. 反射電極層(Au)(膜厚：200 nm， $n=1.644$ ， $k=1.850$)
- 100. 反射型二維光子晶體週期構造
- 101(h). 空孔(柱狀構造體、孔)

折射率：n，消光係數：k

【圖1A】



I804567

【發明摘要】

【中文發明名稱】

深紫外LED及其製造方法

【中文】

本發明係一種深紫外LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Au)、金屬層(Ni)、p型GaN接觸層、由p型AlGaN層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaN接觸層、u型AlGaN層、AlN模板、及上述藍寶石基板，上述P-Block層之膜厚為52 nm~56 nm，具有設置於自上述金屬層與上述p型GaN接觸層之界面起於上述p型GaN接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型GaN接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，上述空孔係自上述空孔之上上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{1D_{\text{neff}}}$ ，該距離之範圍為53 nm~57 nm，上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於TE偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期a相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2D_{\text{eff}}}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， $n_{2D_{\text{eff}}}$ ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶體之週期)之次數m滿足 $2 \leq m \leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為R時， R/a 比滿足 $0.30 \leq R/a \leq 0.40$ 。

【指定代表圖】

圖1A

【代表圖之符號簡單說明】

1	藍寶石基板
2	AlN模板
3	u型AlGaIn層
4	n型AlGaIn接觸層
5	多重量子井層
6	i-guide層
7	P-Block層
8	p型GaIn接觸層
9	金屬層(Ni)
10	反射電極層(Au)
51、53、55	量子井層
52、54	障壁層
100	反射型二維光子晶體週期構造
101(h)	空孔(柱狀構造體、孔)
a	週期
R	空孔之半徑

【發明說明書】

【中文發明名稱】

深紫外LED及其製造方法

【技術領域】

【0001】 本發明係關於一種AlGa_N系深紫外LED(light-emitting diode，發光二極體)技術。

【先前技術】

【0002】 發光波長為200 nm～355 nm之深紫外LED於殺菌、淨水/空氣淨化、醫療等廣泛之應用領域，作為水銀燈殺菌燈之代替技術受到注目。然而，LED之電力光轉換效率(WPE)為2～3%，與水銀燈之20%相比明顯低。其主要理由起因於，由於發光之光由p型Ga_N接觸層大致100%吸收，故而光取出效率(LEE)低為8%以下。

【0003】 專利文獻1中揭示有，於使p型AlGa_N層之膜厚薄為100 nm以下之深紫外LED中，藉由使反射型光子晶體構造之位置接近量子井層，可使LEE增加2倍～3倍左右，於p型AlGa_N接觸層之情形時獲得約23%之LEE，於pGa_N接觸層獲得約18%之LEE。然而，若使內部量子效率為50%、使電壓效率(電子注入效率×理論電壓/驅動電壓)為80%之WPE則依然估計為7～9%。

[先前技術文獻]

[專利文獻]

【0004】 專利文獻1：日本專利第6156898號公報

【發明內容】

[發明所欲解決之問題]

【0005】 電力光轉換效率(WPE)如由「(內部量子效率(IQE)×電子注入效率(EIE)×光取出效率(LEE))×((理論電壓(V_t)/驅動電壓(V_f)))」之式求出般，為了超過水銀燈之WPE20%，要求儘可能抑制驅動電壓(V_f)，且同時較專利文獻1所示之值進而提高LEE。

【0006】 本發明係於深紫外LED中，提供進而提高光取出效率之新的技術。

[解決問題之技術手段]

【0007】 根據本發明之第一觀點，提供一種深紫外LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Au)、金屬層(Ni)、p型GaN接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、AlN模板、及上述藍寶石基板，上述P-Block層之膜厚為52 nm～56 nm，具有設置於自上述金屬層與上述p型GaN接觸層之界面起於上述p型GaN接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型GaN接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，上述空孔係自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{1Dneff}$ (其中， λ ：設計波長， n_{1Dneff} ：自上述空孔之端面至上述i-guide層為止之積層構造之各膜厚之實效平均折射率)，該距離之範圍為53 nm～57 nm，上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於TE偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期a相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2Deff}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， n_{2Deff} ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶

體之週期)之次數 m 滿足 $2 \leq m \leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為 R 時， R/a 比滿足 $0.30 \leq R/a \leq 0.40$ 。

【0008】關於上述深紫外LED之參數之測定方法，藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS(Transmission Electron Microscopy-energy dispersed X-ray spectroscopy，穿透式電子顯微鏡-能量分散型X射線分析)來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(Scanning Transmission Electron Microscopy，掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(High-Angle Annular Dark Field，高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0009】根據本發明之第二觀點，提供一種深紫外LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Au)、金屬層(Ni)、相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、AlN模板、及上述藍寶石基板，上述P-Block層之膜厚為44 nm~48 nm，具有設置於自上述金屬層與上述p型AlGaIn接觸層之界面起於上述p型AlGaIn接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGaIn接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，上述空孔係自上述空孔之上述藍寶石

基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{1Dneff}$ (其中， λ ：設計波長， n_{1Dneff} ：自上述空孔之端面至上述i-guide層為止之積層構造之各膜厚之實效平均折射率)，該距離之範圍為53 nm~61 nm距離，上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於TE偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期a相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2Deff}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， n_{2Deff} ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶體之週期)之次數m滿足 $1 \leq m \leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為R時，R/a比滿足 $0.20 \leq R/a \leq 0.40$ 。

【0010】 關於上述深紫外LED之參數之測定方法，藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0011】 根據本發明之第三觀點，提供一種深紫外LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Rh)、相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、AlN模板、及上述藍寶石基板，上述P-Block層之膜厚

為44 nm~48 nm，具有設置於自上述反射電極層與上述p型AlGaIn接觸層之界面起於上述p型AlGaIn接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGaIn接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，上述空孔係自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{1D_{\text{neff}}}$ (其中， λ ：設計波長， $n_{1D_{\text{neff}}}$ ：自上述空孔之端面至上述i-guide層為止之積層構造之各膜厚之實效平均折射率)，該距離之範圍為53 nm~61 nm，上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於TE偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期a相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2D_{\text{eff}}}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， $n_{2D_{\text{eff}}}$ ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶體之週期)之次數m滿足 $1 \leq m \leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為R時，R/a比滿足 $0.20 \leq R/a \leq 0.40$ 。關於上述深紫外LED之參數之測定方法，藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0012】 根據本發明之第四觀點，提供一種深紫外LED之製造方法，其係將設計波長設為 λ 之深紫外LED之製造方法，且具有如下步驟：

形成將藍寶石基板設為生長基板之積層構造體之步驟，其中，於形成自與上述藍寶石基板相反側起依次含有反射電極層、金屬層、p型Ga_N接觸層、由相對於波長 λ 透明之p型AlGa_N層形成之P-Block層、由Al_N層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGa_N接觸層、u型AlGa_N層、及Al_N模板之積層構造體之步驟中，使上述P-Block層之膜厚為52 nm～56 nm進行結晶生長；形成設置於自上述金屬層與上述p型Ga_N接觸層之界面起於上述p型Ga_N接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型Ga_N接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造之步驟；將上述空孔形成於自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離為53 nm～57 nm之位置的步驟；準備用以形成上述反射型二維光子晶體週期構造之模具之步驟；於上述p型Ga_N接觸層之上形成抗蝕劑層且利用奈米壓印法轉印上述模具之構造之步驟；將上述抗蝕劑層作為遮罩對上述p型Ga_N接觸層進行蝕刻而形成二維光子晶體週期構造之步驟；形成上述反射型二維光子晶體構造，而且按照該順序藉由傾斜蒸鍍法而形成上述金屬層與反射電極層之步驟；及於上述金屬層之上形成反射電極層之步驟。

【0013】 上述深紫外LED之製造方法中之參數之測定方法中，藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之

STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0014】 根據本發明之第五觀點，提供一種深紫外LED之製造方法，其係將設計波長設為 λ 之深紫外LED之製造方法，且具有如下步驟：準備將藍寶石基板設為生長基板之積層構造體之步驟，上述積層構造體係於形成自與上述藍寶石基板相反側起依次含有反射電極層、金屬層、相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、及AlN模板之積層構造體之步驟中，使上述P-Block層之膜厚為44 nm～48 nm進行結晶生長；形成設置於自上述金屬層與上述p型AlGaIn接觸層之界面起於上述p型AlGaIn接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGaIn接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造之步驟，上述空孔係形成於自上述空孔之生長基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離為53 nm～61 nm之位置的步驟；準備用以形成上述反射型二維光子晶體週期構造之模具之步驟；於上述p型AlGaIn接觸層之上形成抗蝕劑層且利用奈米壓印法轉印上述模具之構造之步驟；將上述抗蝕劑層作為遮罩對上述p型AlGaIn接觸層進行蝕刻而形成二維光子晶體週期構造之步驟；形成上述反射型二維光子晶體構造，而且藉由傾斜蒸鍍法而形成上述金屬層之步驟；及於上述金屬層之上由Au形成反射電極層之步驟。

【0015】 上述深紫外LED之製造方法中之參數之測定方法中，藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al

組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0016】 根據本發明之第六觀點，提供一種深紫外LED之製造方法，其係將設計波長設為 λ 之深紫外LED之製造方法，且具有如下步驟：形成將藍寶石基板設為生長基板之積層構造體之步驟，上述積層構造體係於形成自與上述藍寶石基板相反側起依次含有反射電極層、相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、及AlN模板之積層構造體之步驟中，使上述P-Block層之膜厚為44 nm~48 nm進行結晶生長；形成設置於自上述金屬層與上述p型AlGaIn接觸層之界面起於上述p型AlGaIn接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGaIn接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造之步驟；將上述空孔形成於自上述空孔之生長基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離為53 nm~61 nm之位置的步驟；準備用以形成上述反射型二維光子晶體週期構造之模具之步驟；於上述p型AlGaIn接觸層之上形成抗蝕劑層且利用奈米壓印法轉印上述模具之構造之步驟；將上述抗蝕劑層作為遮罩對上述p型AlGaIn接觸層進行蝕刻而形成二維光子晶體週期構造之步驟；及形成上述反射型二維光子晶體構造，而且將上述反射電極層利用Rh藉由傾斜蒸鍍法而形成之

步驟。

【0017】 上述深紫外LED之製造方法中之參數之測定方法中，藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0018】 本說明書包含成為本申請案之優先權之基礎之日本專利申請案編號2018-012073號之揭示內容。

[發明之效果]

【0019】 根據本發明，可藉由垂直方向之布拉格反射與反射型二維光子晶體之協同效應而飛躍地提高深紫外LED之LEE甚至WPE。

【圖式簡單說明】

【0020】 圖1A(a-1)係表示本發明之第1實施形態之深紫外LED之構造之一例的剖視圖，圖1A(a-2)係表示反射型二維光子晶體週期構造之俯視圖。

圖1B(b-1)係表示本發明之第2實施形態之深紫外LED之構造之一例的剖視圖，圖1B(b-2)係表示反射型二維光子晶體週期構造之俯視圖。

圖1C(c-1)係表示本發明之第3實施形態之深紫外LED之構造之一例的剖視圖，圖1C(c-2)係表示反射型二維光子晶體週期構造之俯視圖。

圖2係表示與垂直方向之布拉格反射相關之來自多重量子井層之累積膜厚與折射率差之關係。

圖3A(a-1)係二維光子晶體之平面波展開法之 $R/a=0.40$ 中之TM光之光子帶構造圖，圖3A(a-2)同樣係TE光之光子帶構造圖。

圖3B(b-1)係二維光子晶體之平面波展開法之 $R/a=0.30$ 中之TM光之光子帶構造圖，圖3B(b-2)同樣係TE光之光子帶構造圖。

圖3C(c-1)係二維光子晶體之平面波展開法之 $R/a=0.20$ 中之TM光之光子帶構造圖，圖3C(c-2)同樣係TE光之光子帶構造圖。

圖4係FDTD法之計算模型之p-Block層膜厚40 nm中之光子晶體附近之剖視圖。

圖5係表示與二維光子晶體有與無之輸出值之比較相關之FDTD法之解析結果的圖。

圖6係表示與二維光子晶體有與無之LEE增加倍率之比較相關之FDTD法之解析結果的圖。

圖7係表示二維光子晶體之光子之狀態密度之圖。

圖8係表示滿足垂直方向之布拉格反射條件之反射型二維光子晶體構造之高反射原理的圖。

圖9(a)~(d)係表示自量子井層至p型GaN接觸層附近之電場強度之經時變化之圖。

圖10係表示p型GaN接觸層中之P-Block層膜厚及與使量子井層與二維光子晶體間之距離可變之輸出值之比較相關的FDTD法之解析結果之圖。

圖11係表示p型GaN接觸層中之P-Block層膜厚及與使量子井層與二

維光子晶體間之距離可變之LEE增加倍率之比較相關的FDTD法之解析結果之圖。

圖12(a)係表示P-Block層膜厚為52 nm與56 nm時之各LEE增加倍率之R/a依存性，圖12(b)係同樣表示各輸出值之R/a依存性之圖。

圖13(a)係表示P-Block層膜厚為52 nm與56 nm時之各LEE增加倍率之次數依存性，圖13(b)係同樣表示各輸出值之次數依存性之圖。

圖14(a)係表示p型GaN接觸層/P-Block層膜厚53 nm、及p型AlGaIn接觸層/P-Block層膜厚44 nm、次數 $m=4$ 時之LEE增加倍率之R/a依存性，圖14(b)係同樣表示輸出值之R/a依存性之圖。

圖15(a)係表示p型GaN接觸層/P-Block層膜厚53 nm、及p型AlGaIn接觸層/P-Block層膜厚44 nm、 $R/a=0.40$ 時之LEE增加倍率之次數依存性，圖15(b)係同樣表示輸出值之次數依存性之圖。

圖16係表示p型GaN接觸層之構造中之光線追蹤法之LEE解析模型的圖。

圖17係表示與垂直方向之布拉格反射相關之來自多重量子井層之累積膜厚與折射率差之關係的圖。

圖18(a)係二維光子晶體之平面波展開法之 $R/a=0.40$ 中之TM光之光子帶構造圖，圖18(b)同樣係TE光之光子帶構造圖。

圖19係FDTD法之計算模型之p-Block層膜厚44 nm中之光子晶體附近之剖視圖。

圖20係表示與二維光子晶體有與無之輸出值之比較相關之FDTD法之解析結果的圖。

圖21係表示與二維光子晶體有與無之LEE增加倍率之比較相關之

FDTD法之解析結果的圖。

圖22係表示p型AlGa_N接觸層中之與使量子井層與二維光子晶體間之距離可變之輸出值之比較相關的FDTD法之解析結果之圖。

圖23係表示p型AlGa_N接觸層中之與使量子井層與二維光子晶體間之距離可變之LEE增加倍率之比較相關的FDTD法之解析結果之圖。

圖24係表示於p型AlGa_N接觸層之構造中使電極為NiAu電極之情形時之光線追蹤法之LEE解析模型的圖。

圖25係表示於p型AlGa_N接觸層之構造中使電極為Rh電極之情形時之光線追蹤法之LEE解析模型的圖。

圖26(a)~(d)係表示使用p型Ga_N接觸層之深紫外LED構造中之表示反射型二維光子晶體週期構造之加工製程之一例的圖。

圖27(a)~(d)係表示使用p型AlGa_N接觸層之深紫外LED構造中之表示反射型二維光子晶體週期構造之加工製程之一例的圖。

【實施方式】

【0021】 以下，一面參照圖式一面對本發明之實施形態之深紫外LED詳細地進行說明。

【0022】

(第1實施形態)

作為本發明之第1實施形態之深紫外LED，將使設計波長 λ 為275 nm之AlGa_N系深紫外LED之構造(剖視圖與俯視圖)示於圖1A(a-1)、(a-2)。

具體而言，自圖1A(a-1)之剖視圖之上起依次具有藍寶石基板1、AlN模板2、u型AlGa_N層3、n型AlGa_N接觸層4、多重量子井層5(其中，多重量子井層5係量子井層由3層(51、53、55)構成，且各量子井層之間隔著障

壁層(52、54)之構造)、i-guide層6(其中，i-guide層6由AlN層形成)、P-Block層7(其中，P-Block層7由AlGaIn層形成)、p型GaIn接觸層8、金屬層9(其中，金屬層9由Ni層形成)、反射電極層10(其中，反射電極層由Au形成)。而且，P-Block層7之膜厚為52 nm～56 nm。又，於p型GaIn接觸層8之厚度方向之範圍內且於不超過p型GaIn接觸層8與P-Block層7之界面之位置設置有反射型二維光子晶體週期構造100，光子晶體週期構造100具有空孔(柱狀構造，孔)101(h)，空孔101設置於自藍寶石基板1方向之端面至多重量子井層5與i-guide層6之界面為止之距離G為53 nm～57 nm之位置，該距離G滿足垂直方向之布拉格反射條件。藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，於各層之厚度之各者係相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0023】圖2係表示與垂直方向之布拉格反射相關之自多重量子井層5至p型GaIn接觸層8之積層構造中之累積膜厚與折射率差的關係。

【0024】根據布拉格散射條件之式($m\lambda/n_{1D\text{eff}}=2a$ ， m ：次數， $n_{1D\text{eff}}$ ：自空孔101(h)之端面至i-guide層6為止之積層構造之各膜厚之實效折射率， λ ：設計波長， a ：週期)，算出可獲得垂直方向之布拉格反射之效果之距離G(週期)及P-Block層7之膜厚。

【0025】設計波長275 nm時之i-guide層6與P-Block層7之各自之折

射率(n)為i-guide層6($n_1=2.300$)，P-Block層7($n_2=2.594$)。實效折射率 n_{1Deff} 係利用 $n_{1Deff}=[n_2^2+(n_1^2-n_2^2)(d/a)^2]^{0.5}$ 之式求出。由於若使i-guide層6之膜厚為 d 例如為1 nm則 d/a 之值為0.019，故而 n_{1Deff} 成為2.589。若設為 $m=1$ ，將該等代入至上述布拉格散射條件之式，則可導出週期 a 為53 nm。此處，由於i-guide層6之膜厚為1 nm，故而P-Block層7之膜厚成為52 nm。即，此處，可獲得垂直方向之反射效果之P-Block層7之膜厚成為52 nm。

【0026】 表1表示與垂直方向之布拉格反射效果相關之FDTD法模擬解析結果。

【0027】 [表1]

表1
表示垂直方向之布拉格反射之FDTD模擬解析
[p-GaN Contact]

中心波長(275 nm)	-G53 nm		+G53 nm	
	輸出(w)	輸出比	輸出(w)	輸出比
P-Block膜厚40 nm	4.8E-24	-	3.1E-24	-
P-Block膜厚52 nm	8.5E-24	1.8	8.2E-24	2.6

[註釋]
-G53 nm：將監視器設置於距量子井層55與i-guide層6之界面向藍寶石基板方向53 nm之位置
+G53 nm：將監視器設置於距量子井層55與i-guide層6之界面向p型GaN接觸層方向53 nm之位置
輸出比：P-Block膜厚52 nm/40 nm

【0028】 表1表示關於P-Block層膜厚40 nm與52 nm之各者，將監視器設置於距量子井層55與i-guide層6之界面向藍寶石基板1方向53 nm之距離之位置之情形時(表1「-G53 nm」)、與設置於距量子井層55與i-guide層6之界面向p型GaN接觸層8方向53 nm之距離之位置之情形時(表1「+G53 nm」)之各輸出值與P-Block層膜厚52 nm與膜厚40 nm的輸出比。

【0029】 根據表1，於隔著量子井層之上側之監視器(「-G53 nm」)中，P-Block層膜厚52 nm之輸出相對於膜厚40 nm成為1.8倍，但於下側

之監視器(「+G53 nm」)中獲得與其不同之2.6倍之輸出比。其原因在於，於下側(「+G53 nm」)中，P-Block層40 nm之情形時之距離53 nm為進入至p型GaN接觸層之吸收區域之位置，故而P-Block膜40 nm之輸出大幅度減少。

【0030】 根據該等結果，可確認若獲得垂直方向之布拉格反射效果之距離G為53 nm，且設為P-Block層52 nm，則不進入至p型GaN接觸層之吸收區域，獲得反射效果。

【0031】 其次，反射型二維光子晶體週期構造100如圖1A(a-2)中xy俯視圖所示般，具有以半徑為R之圓為剖面之空孔101(h)由折射率較p型GaN接觸層8小之空氣等形成，沿著x方向及y方向以週期a形成為三角格子狀之柱狀構造體(孔構造)。又，空孔101(h)為了防止由乾式蝕刻所致之P-Block層7之損傷，係不到達至p型GaN接觸層8與P-Block層7之界面之構造，且設置於空孔101(h)之藍寶石基板1之方向之端面與量子井層55為止之距離(G)為53 nm～57 nm之範圍的位置。

【0032】 於反射型二維光子晶體週期構造100中，由多重量子井層5發光之波長 λ 之深紫外光係TE光與TM光一面向所有方向放射並橢圓偏光一面於介質中傳播。

【0033】 距量子井層55之距離G53 nm～57 nm之位置之設置於p型GaN接觸層8內的反射型二維光子晶體週期構造100形成為具有不同之折射率之p型GaN接觸層8與空氣之兩個構造體。於將空孔101(h)之半徑R與週期a之比R/a比設為例如0.40時，上述光子晶體100之填充率f利用 $f = 2\pi/3^{0.5} \times (R/a)^2$ 之式來計算，成為 $f = 0.58$ 。而且，根據空氣之折射率 $n_3 = 1.0$ 、p型GaN接觸層8之折射率 $n_4 = 2.631$ 、 $f = 0.58$ 而實效折射率 n_{2Deff} 利

用下式來計算獲得 $n_{2\text{Deff}} = (n_4^2 + (n_3^2 - n_4^2) \times f)^{0.5} = 1.867$ 。

【0034】再者，深紫外(DUV)光之波長區域為200 nm～355 nm，根據波長而折射率 n 及消光係數 k 不同。因此，若所選擇之波長 λ 變化，則上述光子晶體之計算參數亦變化，故而P-Block層之膜厚及量子井層與二維光子晶體之距離亦會變化。再者，此次計算中所使用之折射率及消光係數係文獻值，但該等值根據其膜厚而稍微變動，故而上述P-Block層之膜厚及量子井層與二維光子晶體之距離亦會變化。

【0035】而且，發光波長 $\lambda = 275$ nm之情形時之該反射型二維光子晶體週期構造100滿足布拉格散射條件($m\lambda/n_{2\text{Deff}} = 2a$ ，其中 $n_{2\text{Deff}}$ ：二維光子晶體之實效折射率， a ：2D-PhC之週期， m ：次數)之情形時之TM光及TE光之光子帶構造利用平面波展開法來求出。圖3A(a-1)及(a-2)表示 $R/a = 0.40$ 之情形時之TM光與TE光之各自之光子帶構造圖。

【0036】同樣地，將 $R/a = 0.30$ 之情形時之TM光與TE光之各自之光子帶構造圖示於圖3B(b-1)及(b-2)，將 $R/a = 0.20$ 之情形時之TM光與TE光之光子帶構造圖示於圖3C(c-1)及(c-2)。

【0037】於二維反射型光子晶體中，如圖3A(a-1)、圖3B(b-1)及圖3C(c-1)所示，TM光未觀測到光子帶隙(PBG)，但於TE光中如圖3A(a-2)、圖3B(b-2)及圖3C(c-2)所示於第1光子帶($\omega_{1\text{TE}}$)與第2光子帶($\omega_{2\text{TE}}$)間觀測到PBG。而且，如圖3A(a-2)、圖3B(b-2)及圖3C(c-2)所示，TE光中之PBG之大小係 $R/a = 0.40$ 最大，隨著 R/a 變大，PBG亦變大。

【0038】且說若P-Block層7之膜厚變厚則驅動電壓(V_f)變高。例如，於波長275 nm，P-Block層膜厚為40 nm之情形時， V_f 為6 V左右，但若P-Block層膜厚增加10 nm，則 V_f 上升1 V。因此，為了抑制 V_f 必須使P-

Block層之膜厚儘可能薄。然而，由於藉由垂直方向之布拉格反射與反射型二維光子晶體之協同效應而光取出效率大幅度提高，故而重要的是P-Block層膜厚之最佳化。因此，於本實施形態中，藉由利用FDTD法以及光線追蹤法之模擬解析而求出獲得上述垂直方向之布拉格反射與反射型二維光子晶體之協同效應且LEE明顯提高、且亦考慮Vf與P-Block層膜厚之取捨之適當之條件，即，量子井層55與反射型二維光子晶體構造間之距離、P-Block層膜厚、二維光子晶體週期構造之各參數(滿足布拉格散射條件 $m\lambda/n_{2D_{eff}}=2a$ 之次數m與週期a及R/a)。

【0039】 表2表示FDTD法之深紫外LED構造之計算模型，表3表示反射型二維光子晶體構造之計算模型之各參數。

【0040】 [表2]

表2				
pGaN Contact層LED之FDTD法計算模型、參數				
	膜厚(nm)	Al組成(%)	折射率	消光係數
反射電極(Au)	200 nm	-	1.644	1.85
金屬層(Ni)	30 nm	-	1.667	2.072
p-GaN接觸層	138 nm	-	2.631	0.432
P-Block層 (以4 nm為單位可變)	40 nm-60 nm	68%	2.594	-
i-guide層	1mn	100%	2.300	-
多重量子井層：3pair	-	-	-	-
Well	2 nm	45%	2.773	-
Barrier	7 nm	65%	2.623	-
n-AlGaIn接觸層	200 nm	65%	2.623	-
u-AlGaIn層	100 nm	85%	2.415	-
AlN模板	200 nm	100%	2.300	-
藍寶石基板	1,300 nm	-	1.830	-

【0041】 [表3]

表3
反射型二維光子晶體構造之計算模型、形狀參數
[p-GaN Contact]

R/a	次數	直徑(nm)	週期(nm)
R/a=0.20	m=4	89 nm	223 nm
R/a=0.30	m=4	148 nm	246 nm
R/a=0.40	m=1	59 nm	74 nm
R/a=0.40	m=2	118 nm	147 nm
R/a=0.40	m=3	177 nm	221 nm
R/a=0.40	m=4	236 nm	295 nm

【0042】 圖4係成為FDTD法之計算模型之一例之P-Block層之膜厚為40 nm之深紫外LED構造中之光子晶體週期構造附近的剖視圖。計算模型之構造係使P-Block層之膜厚於40 nm至60 nm之範圍以4 nm為單位可變，利用無反射型二維光子晶體週期構造(2D-PhC)之情形時與有反射型二維光子晶體週期構造(2D-PhC)之情形時之比較進行解析。2D-PhC之形成位置如圖4所示設為自P-Block層與p型GaN接觸層之界面至金屬層(Ni)與p型GaN接觸層之界面為止。

【0043】 將上述計算模型之模擬解析結果示於圖5及圖6。圖5係表示使P-Block層於膜厚40 nm～60 nm之範圍以4 nm為單位可變，2D-PhC於有次數m=4、R/a=0.40之情形時之2D-PhC之情形時與無2D-PhC之情形時，各自之輸出(w)之變化。如圖5所示，有2D-PhC與無2D-PhC之情形時之任一者均係P-Block層之膜厚為52 nm～56 nm且輸出大幅度增加。

【0044】 又，同樣根據圖5，於無2D-PhC之構造中，P-Block層膜厚為52 nm～56 nm之時、與P-Block層膜厚40 nm之時相比之情形時之輸出均約為2倍。該現象表示本構造中之i-guide層與P-Block層之積層構造於P-Block層膜厚52 nm～56 nm之時獲得垂直方向之布拉格反射效果。

【0045】 又，圖6係表示有2D-PhC之構造之情形時之與無2D-PhC

之構造之比較之LEE增加倍率的圖。如圖6所示，表示了於膜厚52 nm時LEE增加約2.6倍，於膜厚56 nm時LEE增加約2.3倍，可謂之於P-Block層膜厚52 nm～56 nm時，獲得垂直方向之布拉格反射與反射型二維光子晶體之協同效應。

【0046】 反射型二維光子晶體(2D-PhC)之設計係於2D-PhC面內，根據布拉格散射條件之式 $m\lambda/n_{2D\text{eff}}=2a\sin\theta$ (其中， m ：次數， $n_{2D\text{eff}}$ ：2D-PhC週期構造體之實效折射率， λ ：設計波長， a ：2D-PhC之週期)來算出。圖7係表示2D-PhC中之 $R/a=0.20$ 與 $R/a=0.40$ 之各自之光子之狀態密度的圖。光子晶體之反射強度與光子之狀態密度具有相關性。如圖7所示， R/a 越大，則光子之狀態密度變化越大。而且，入射至接近量子井層(發光層)形成之2D-PhC之DUV光於2D-PhC面內產生駐波。而且，於量子井層與2D-PhC之距離滿足 $\lambda/2n_{1D\text{eff}}$ 時，入射至2D-PhC面內之DUV光於垂直方向產生布拉格反射而向藍寶石基板方向反射。(參照圖8)。

【0047】 認為於本實施形態中之深紫外LED構造中，於量子井層與2D-PhC之距離為53 nm時，於垂直方向最滿足布拉格反射件，因此獲得較大之反射效果。

【0048】 圖9表示作為驗證該等之FDTD法解析結果，量子井層與2D-PhC間之距離設為53 nm時之自量子井層至p型Ga_N接觸層附近之電場強度之經時變化。圖9分別表示無2D-PhC與有2D-PhC之情形時之剖面及2D-PhC面內之電場強度。可知圖9(a)為無2D-PhC之構造之剖面，電場向所有方向均勻地傳播，相對於此，圖9(b)之有2D-PhC之情形時，電場不侵入至2D-PhC而被反射。又，若觀察2D-PhC面內之電場分佈，則可確認與無2D-PhC構造之圖9(c)比較，於有2D-PhC之構造之圖9(d)中出現駐

波。

【0049】 根據該等之前提，藉由模擬解析而求出獲得1D-PhC與2D-PhC之協同效應之量子井層與2D-PhC間之距離(G)之最佳值。

【0050】 首先，確認P-Block層之膜厚40 nm、48 nm、52 nm之各自之由量子井層與2D-PhC間之距離G之差異所致之輸出。量子井層與2D-PhC間之距離G於1 nm~57 nm之間設為以4 nm為單位可變，2D-PhC為 $R/a=0.30$ 及 $R/a=0.40$ ，次數m均設為 $m=4$ 。將FDTD法之解析結果示於圖10。

【0051】 如圖10所示，於P-Block層膜厚之比較中，膜厚40 nm與膜厚48 nm之差異分別為輸出最大之距離G49 nm，P-Block膜厚48 nm與膜厚40 nm相比大約1.2倍。另一方面，可確認P-Block膜厚52 nm於距離G53 nm時輸出成為最大，此時，相對於膜厚48 nm成為2倍以上之輸出。

【0052】 又，圖11係表示於與圖10相同之模擬條件下，相對於無2D-PhC之構造之有2D-PhC之構造之情形時之LEE增加倍率。根據圖11，於膜厚52 nm中，距離G53時於有2D-PhC之構造中LEE增加2.6倍。該結果，量子井層與2D-PhC間之距離G與作為滿足上述垂直方向之布拉格條件之距離之53 nm一致。即，表示滿足垂直方向之布拉格反射效果最大之週期53 nm之P-Block層膜厚52 nm於輸出及LEE增加率之兩方面均滿足可獲得垂直方向之布拉格反射與反射型二維光子晶體之協同效應之最佳條件。

【0053】 再者，於圖10中，即便為P-Block膜厚52 nm時之距離G49輸出亦與距離G53為同程度，於距離G49中反射型二維光子晶體構造之空孔超過p型GaN接觸層侵入至P-Block層為止而被蝕刻，存在對P-Block層

帶來蝕刻損傷之可能性，故而無法選擇。又，於距離G57之情形時，表示較距離G53下降但是相對較大之輸出，故而量子井層與反射型二維PhC間距離G選擇53 nm～57 nm。

【0054】 又，關於謀求量子井層與反射型二維光子晶體之協同效應之距離G，亦選擇最大57 nm，故而若i-guide層膜厚為1 nm，則P-Block層之膜厚適當為52 nm～56 nm。因此，於P-Block層膜厚52 nm與56 nm之情形時，自2D-PhC之R/a依存性及次數依存性之觀點而言進行FDTD法解析。再者，該解析由於確認與標準的LED構造之比較，故而於標準的P-Block層膜厚40 nm時，利用與無2D-PhC之構造之比較進行。關於R/a依存性，將次數設為 $m=4$ ，以 $R/a=0.20\sim0.40$ 可變。又，關於次數依存性，將R/a設為 $R/a=0.40$ ，以 $m=1\sim4$ 可變。作為該等之結果，將LEE增加倍率與輸出值之比較示於圖12及圖13。

【0055】 關於R/a依存性，圖12(a)表示LEE增加倍率，圖12(b)表示輸出值。又，關於次數依存性，圖13(a)表示LEE增加倍率，圖13(b)表示輸出值。如圖12(a)、(b)、圖13(a)、(b)所示，可確認於任一之結果中，均係於P-Block膜厚52 nm與56 nm時，獲得大致同程度之輸出值與LEE增加率。再者，根據該解析結果，可確認作為2D-PhC之最佳參數， $R/a=0.30$ 或 $R/a=0.40$ 較佳，次數係 $m=3$ 或 $m=4$ 較佳。

【0056】 進而，關於2D-PhC之適當之R/a、次數之條件，同樣藉由FDTD法模擬解析而表示。根據圖11及圖12，表示於 $R/a=0.30$ 與 $R/a=0.40$ 之比較中，光子之狀態密度變化較大之 $R/a=0.40$ (參照圖7)於P-Block層膜厚40 nm、48 nm、52 nm之任一者中反射效果較高。因此，使量子井層與2D-PhC間之距離G固定為作為滿足上述垂直方向之布拉格條件之距

離之 $G53\text{ nm}$ ，確認 $R/a=0.40$ 之次數依存性(圖15)。又，同時，亦確認次數 $m=4$ 之 R/a 依存性(圖14)。再者，該解析亦由於確認與標準的LED構造之比較，故而於標準的P-Block層膜厚 40 nm 時，利用與無2D-PhC之構造之比較進行。

【0057】圖14(a)係表示於 $G53\text{ nm}$ 時設為次數 $m=4$ ，將 R/a 設為 $R/a=0.20$ 、 $R/a=0.30$ 、 $R/a=0.40$ 之各 R/a 中之LEE增加倍率之 R/a 依存性，圖14(b)係表示其輸出值之 R/a 依存性。如圖14(a)所示，可確認「pGaN__Pblock52 nm__m4」於 $R/a=0.20$ 時LEE成為約2.5倍，但若 $R/a=0.40$ 則成為5倍以上。又，於圖14(b)中亦可知，隨著 R/a 變大，輸出變大。

【0058】圖15(a)係表示於 $G53\text{ nm}$ 時設為 $R/a=0.40$ ，將次數設為 $m=1\sim4$ 之各次數中之LEE增加倍率之次數依存性，圖15(b)係同樣表示輸出值之次數依存性。根據圖15(a)，「pGaN__Pblock52 nm__R/a0.40」於次數 $m=1\sim2$ 中LEE增加倍率成為約3~4倍，但如次數 $m=3\sim4$ 則成為約5~6倍。又，於圖15(b)中亦可確認，次數 $m=3\sim4$ 與次數 $m=1\sim2$ 比較，獲得較大之輸出。

【0059】作為該等之驗證，藉由與光線追蹤法之交叉模擬而求出、確認LEE值。圖16表示光線追蹤法之計算模型與解析結果。於法線追蹤法中，由於無法進行奈米尺度之計算，故而，首先藉由將利用光線追蹤法計算出之LEE值乘以藉由FDTD法導出之LEE增加倍率之交叉模擬，算出本實施形態中之LED構造之LEE值。表4表示其結果。

【0060】 [表4]

表4

利用FDTD法與光線追蹤法之交叉模擬之LEE解析結果

[p-GaN Contact]

R/a依存性	Flat	R/a=0.2			R/a=0.3			R/a=0.4		
		LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率
pGaN_Pblock52 nm_m4_G53 nm	4.8%	3.5E-17	2.5	12.2%	6.1E-17	4.5	21.5%	7.3E-17	5.3	25.5%
pGaN_Pblock56 nm_m4_G57 nm	4.8%	4.0E-17	2.9	13.9%	6.5E-17	4.7	22.8%	6.7E-17	4.9	23.5%

次數依存性	Flat	m=1			m=2			m=3			m=4		
		LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率
pGaN_Pblock52 nm_R/a0.40_G53 nm	4.8%	4.5E-17	3.3	15.7%	5.2E-17	3.8	18.4%	7.8E-17	5.7	27.5%	7.3E-17	5.3	25.5%
pGaN_Pblock56 nm_R/a0.40_G57 nm	4.8%	4.5E-17	3.3	15.6%	6.0E-17	4.4	21.1%	7.9E-17	5.3	27.7%	6.7E-17	4.9	23.5%

【0061】如表4所示，P-Block層膜厚52 nm、量子井層與2D-PhC間之距離G53 nm、 $R/a=0.40$ 、次數 $m=3$ 時LEE表示27.5%，同樣於次數 $m=4$ 時表示25.5%之LEE值，根據本實施形態，可更加提高LEE。

【0062】

(第2實施形態)

作為本發明之第2實施形態之深紫外LED，將使設計波長 λ 為275 nm之AlGaIn系深紫外LED之構造(剖視圖與俯視圖)示於圖1B(b-1)、(b-2)。

具體而言，自圖1B(b-1)之剖視圖之上起依次具有藍寶石基板1、AlN模板2、u型AlGaIn層3、n型AlGaIn接觸層4、多重量子井層5(其中，多重量子井層5係量子井層由3層(51、53、55)構成且於各量子井層之間隔著障壁層(52、54)之構造)、i-guide層6(其中，i-guide層6由AlN層形成)、P-Block層7(其中，P-Block層7由AlGaIn層形成)、p型AlGaIn接觸層8a、金屬層9(其中，金屬層9由Ni層形成)、及反射電極層10(其中，反射電極層由Au形成)。而且，P-Block層7之膜厚為44 nm~48 nm。又，於p型AlGaIn接觸層8a之厚度方向之範圍內且不超過p型AlGaIn接觸層8a與P-Block層7之界面之位置設置有反射型二維光子晶體週期構造100，光子晶體週期構造100具有空孔(柱狀構造，孔)101(h)，空孔101設置於自藍寶石基板1方向之端面至多重量子井層5與i-guide層6之界面為止之距離G為53 nm~61 nm之位置，該距離G於垂直方向滿足布拉格反射。

【0063】藉由磊晶生長形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構

造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0064】 圖17表示與垂直方向之布拉格反射相關之自多重量子井層5至p型AlGa_N接觸層8a之積層構造中之累積膜厚與折射率差的關係。

【0065】 根據布拉格散射條件之式($m\lambda/n_{1Deff}=2a$ ， m ：次數， $n_{1Deffav}$ ：自空孔101(h)之端面至i-guide層6為止之積層構造之各膜厚之實效折射率， λ ：設計波長， a ：週期)來算出獲得垂直方向之布拉格反射之效果之距離 G (週期)及P-Block層7之膜厚。

【0066】 設計波長275 nm時之i-guide層6與P-Block層7之各自之折射率(n)係i-guide層6($n_1=2.300$)，P-Block層7($n_2=2.594$)。實效折射率 n_{1Deff} 利用 $n_{av}=[n_2^2+(n_1^2-n_2^2)(d/a)^2]^{0.5}$ 之式求出。若將i-guide層6之膜厚設為 d 例如設為1 nm則 d/a 之值為0.019，故而 n_{1Deff} 成為2.589。若設為 $m=1$ ，將該等代入至上述布拉格散射條件之式，則導出週期 a 為53 nm。即，此處，獲得垂直方向之反射效果之距離成為53 nm。

【0067】 表5表示與垂直方向之布拉格反射效果相關之FDTD法模擬解析結果。

【0068】 [表5]

表5
表示垂直方向之布拉格反射之FDTD模擬解析
[p-AlGaN Contact]

中心波長(275 nm)	p-AlGaN接觸層			
	-G53 nm		+G53 nm	
	輸出(w)	輸出比	輸出(w)	輸出比
P-Block膜厚40 nm	4.7E-24	-	4.2E-24	-
P-Block膜厚44 nm	9.2E-24	2.0	7.5E-24	1.8

[註釋]
-G53 nm：將監視器設置於距量子井層55與i-guide層6之界面於藍寶石基板方向53 nm之位置
+G53 nm：將監視器設置於距量子井層55與i-guide層6之界面於p型AlGaN接觸層方向53 nm之位置
輸出比：P-Block膜厚44 nm/40 nm

【0069】 表5表示關於P-Block層膜厚40 nm與44 nm之各者，於設置於距量子井層55與i-guide層6之界面於藍寶石基板1方向53 nm之距離之位置之情形時(表5「-G53 nm」)與設置於距量子井層55與i-guide層6之界面於p型AlGaN接觸層8a方向53 nm之距離之位置之情形時(表5「+G53 nm」)的各輸出值與P-Block層膜厚44 nm與膜厚40 nm之輸出比。

【0070】 根據表5，可確認利用隔著量子井層之上下之監視器各者，P-Block層44 nm之輸出比獲得2倍左右。又，設置於P-Block層膜厚40 nm之p型AlGaN接觸層側之監視器(+G53 nm)之輸出值與p型GaN接觸層之情形時相比幾乎未減少。其原因在於，p型AlGaN接觸層無如p型GaN接觸層般之吸收。

【0071】 根據該等之結果，可確認於p型AlGaN接觸層之LED構造中，獲得垂直方向之布拉格反射效果之距離G亦為53 nm。

【0072】 其次，反射型二維光子晶體週期構造100如圖1B(b-2)中xy俯視圖所示般，具有以半徑為R之圓為剖面之空孔101(h)由折射率較p型AlGaN接觸層8a小之空氣等形成，沿著x方向及y方向以週期a形成為三角

格子狀之柱狀構造體(孔構造)。又，空孔101(h)為了防止由乾式蝕刻所致之P-Block層7之損傷，係不到達至p型AlGaIn接觸層8a與P-Block層7之界面之構造，且設置於空孔101(h)之藍寶石基板1之方向之端面與量子井層55為止之距離(G)為53 nm～61 nm之範圍的位置。

【0073】 於反射型二維光子晶體週期構造100中，由多重量子井層5發光之波長 λ 之深紫外光係TE光與TM光一面向所有方向放射並橢圓偏光一面於介質中傳播。

【0074】 距量子井層55之距離G53 nm～61 nm之位置之設置於p型AlGaIn接觸層8a內的反射型二維光子晶體週期構造100形成為具有不同之折射率之p型AlGaIn接觸層8a與空氣之兩個構造體。於將空孔101(h)之半徑R與週期a之比R/a比設為例如0.40時，上述光子晶體100之填充率f利用 $f = 2\pi/3^{0.5} \times (R/a)^2$ 之式來計算，成為 $f = 0.58$ 。而且，根據空氣之折射率 $n_3 = 1.0$ 、p型AlGaIn接觸層8之折射率 $n_4 = 2.723$ 、 $f = 0.58$ 而實效折射率 n_{2Deff} 利用下式來計算獲得 $n_{2Deff} = (n_4^2 + (n_3^2 - n_4^2) \times f)^{0.5} = 1.921$ 。

【0075】 再者，深紫外(DUV)光之波長區域為200 nm～355 nm，根據波長而折射率n及消光係數k不同。因此，若所選擇之波長 λ 變化，則上述光子晶體之計算參數亦變化，故而P-Block層之膜厚及量子井層與二維光子晶體之距離亦會變化。再者，此次計算中所使用之折射率及消光係數係文獻值，但該等值根據其膜厚而稍微變動，故而上述P-Block層之膜厚及量子井層與二維光子晶體之距離亦會變化。

【0076】 而且，發光波長 $\lambda = 275$ nm之情形時之該反射型二維光子晶體週期構造100滿足布拉格散射條件($m\lambda/n_{2Deff} = 2a$ ，其中 n_{2Deff} ：二維光子晶體之實效折射率，a：2D-PhC之週期，m：次數)之情形時之TM光

及TE光之光子帶構造利用平面波展開法來求出。圖18(a)及(b)表示 $R/a=0.40$ 之情形時之TM光與TE光之各自之光子帶構造圖。

【0077】 於二維反射型光子晶體中，如圖18(a)所示TM光未觀測到光子帶隙(PBG)，但於TE光中如圖18(b)所示於第1光子帶(ω_{1TE})與第2光子帶(ω_{2TE})間觀測到較大之PBG。而且，TE光中之PBG之大小係 $R/a=0.40$ 最大，隨著 R/a 變大，PBG變大。

【0078】 然而，如本發明之第1實施形態所示，若P-Block層7之膜厚變厚則驅動電壓(V_f)變高。因此，抑制 V_f ，且使P-Block層之膜厚儘可能薄，重要的是如藉由垂直方向之布拉格反射與反射型二維光子晶體之協同效應而光取出效率(LEE)大幅度提高般之P-Block層膜厚之最佳化。於本實施形態中，將p型接觸層代替第1實施形態中之p型GaN接觸層，藉由利用FDTD法以及光線追蹤法之模擬解析而求出使用相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層之深紫外LED構造中之獲得垂直方向之布拉格反射與反射型二維光子晶體之協同效應且LEE明顯提高，且亦考慮 V_f 與P-Block層膜厚之取捨之適當之條件，即，量子井層55與反射型二維光子晶體構造間之距離、P-Block層膜厚、二維光子晶體週期構造之各參數(滿足布拉格散射條件 $m\lambda/n_{2Deff}=2a$ 之次數 m 與週期 a 及 R/a)。

【0079】 表6表示FDTD法之深紫外LED構造之計算模型，表7表示反射型二維光子晶體構造之計算模型之各參數。

【0080】 [表6]

表6				
pAlGaN Contact層LED之FDTD法計算模型[NiAu Electrode]				
	膜厚(nm)	Al組成(%)	折射率	消光係數
反射電極(Au)	200 nm	-	1.644	1.85
金屬層(Ni)	30 nm	-	1.667	2.072
p-AlGaN接觸層	70 nm	56%	2.723	-
P-Block層 (以4 nm為單位可變)	40 nm-60 nm	68%	2.594	-
i-guide層	1 nm	100%	2.300	-
多重量子井層：3pair	-	-	-	-
Well	2 nm	45%	2.773	-
Barrier	7nm	65%	2.623	-
n-AlGaN接觸層	200 nm	65%	2.623	-
u-AlGaN層	100 nm	85%	2.415	-
AlN模板	200 nm	100%	2.300	-
藍寶石基板	1,300 nm	-	1.830	-

【0081】 [表7]

表7			
pAlGaN反射型二維光子晶體構造之計算模型、形狀參數			
R/a	次數	直徑(nm)	週期(nm)
R/a=0.20	m=4	86 nm	216 nm
R/a=0.30	m=4	143 nm	228 nm
R/a=0.40	m=1	57 nm	72 nm
R/a=0.40	m=2	115 nm	143 nm
R/a=0.40	m=3	172 nm	215 nm
R/a=0.40	m=4	229 nm	286 nm

【0082】 圖19係成為FDTD法之計算模型之一例之、P-Block層之膜厚為44 nm之深紫外LED構造中之光子晶體週期構造附近的剖視圖。計算模型之構造中，使P-Block層之膜厚於40 nm至60 nm之範圍以4 nm為單位可變，利用無反射型二維光子晶體週期構造(2D-PhC)之情形時與有反射型二維光子晶體週期構造(2D-PhC)之情形時之比較進行解析。2D-PhC之形成位置如圖19所示設為自P-Block層與p型AlGaN接觸層之界面至金屬層(Ni)與p型AlGaN接觸層之界面為止。

【0083】 將上述計算模型之模擬解析結果示於圖20及圖21。圖20係

表示使P-Block層於膜厚40 nm~60 nm之範圍以4 nm為單位可變，2D-PhC於次數 $m=4$ 、 $R/a=0.40$ 之時之無2D-PhC之情形時與有2D-PhC之情形時之各自之輸出(w)之變化。如圖20所示，無2D-PhC與有2D-PhC之任一情形時，P-Block層之膜厚均為44 nm~52 nm且輸出均大幅度增加。

【0084】 又，同樣根據圖20，於無2D-PhC之構造中，P-Block層膜厚為44 nm~52 nm之情形時與膜厚40 nm之情形時相比，輸出約為2倍。該現象表示本構造中之i-guide層與P-Block層之積層構造於P-Block層膜厚44 nm~52 nm之時，可獲得垂直方向之布拉格反射效果。

【0085】 又，圖21係表示於相同之條件下，對有2D-PhC之構造之情形時之與無2D-PhC之構造進行比較時LEE增加倍率的圖。如圖21所示，表示了隨著P-Block層之膜厚之增加，LEE增加率亦提高，P-Block膜厚與LEE增加率具有相關性。然而，如上所述，由於若P-Block層膜厚增加則Vf亦增加，故而P-Block膜厚係44 nm，較佳，繼而選擇至48 nm為止。

【0086】 反射型二維光子晶體(2D-PhC)之設計係於2D-PhC面內，根據布拉格散射條件之式 $m\lambda/n_{2D\text{eff}}=2a\sin\theta$ (其中， m ：次數， $n_{2D\text{eff}}$ ：2D-PhC週期構造體之實效折射率， λ ：設計波長， a ：2D-PhC之週期)來算出。於第1實施形態中，如圖7所示， R/a 越大，則光子之狀態密度變化越大。而且，如圖8所示，入射至接近量子井層(發光層)形成之2D-PhC之DUV光係於2D-PhC面內產生駐波。而且，於量子井層與光子晶體之距離滿足 $\lambda/2n_{1D\text{eff}}$ 時，入射至2D-PhC面內之DUV光產生垂直方向之布拉格反射而向藍寶石基板方向反射。

【0087】 認為，於本實施形態中之深紫外LED構造中，於量子井層

與2D-PhC之距離為53 nm時，於垂直方向最滿足布拉格反射件，因此可獲得較大之反射效果。

【0088】 根據該等前提，藉由模擬解析而求出可獲得垂直方向之布拉格反射與2D-PhC之協同效應之量子井層與2D-PhC間之距離(G)之最佳值。

【0089】 將P-Block層膜厚設為44 nm，確認取決於量子井層與2D-PhC間之距離G之差異的輸出。此處，量子井層與2D-PhC間之距離G於1 nm～61 nm之間設為以4 nm為單位可變，2D-PhC設為 $R/a=0.4$ ，次數 $m=4$ 。將FDTD法之解析結果示於圖22。

【0090】 如圖22所示，可確認量子井層與2D-PhC間之距離G為53 nm且輸出成為最大。

【0091】 又，圖23係表示於與圖22相同之模擬條件下，相對於無2D-PhC之構造而言，有2D-PhC之構造之情形時之LEE增加倍率。量子井層與2D-PhC間之距離G53 nm於LEE增加倍率上亦表現為最大，此與作為滿足上述垂直方向之布拉格條件之距離之53 nm一致。即，表示垂直方向之布拉格反射效果最大之週期53 nm於輸出及LEE增加倍率之兩方面均滿足可獲得一維光子晶體與反射型二維光子晶體之協同效應之最佳化條件。

【0092】 量子井層與2D-PhC間之距離係選擇53 nm至表現出相對較大之輸出之61 nm。

【0093】 其次，藉由FDTD法解析而確認使2D-PhC之 R/a 及次數 m 之選擇為何處。作為P-Block層膜厚44 nm，進行無2D-PhC之構造與有2D-PhC之構造之比較。首先，關於 R/a 依存性，將次數設為 $m=4$ ，以 $R/a=0.20\sim0.40$ 可變。又，關於次數依存性，將 R/a 設為 $R/a=0.40$ ，以 $m=1$

~4可變。作為該等之結果，將LEE增加倍率與輸出值之比較示於圖14及圖15。

【0094】圖14(a)係表示於G53 nm時設為次數 $m=4$ ，使 R/a 為 $R/a=0.20$ 、 $R/a=0.30$ 、 $R/a=0.40$ 之各 R/a 中之LEE增加倍率之 R/a 依存性，圖14(b)係表示其輸出值之 R/a 依存性。如圖14(a)所示，可確認「pAlGaIn__NiAu__Pblock44 nm__m4」係 $R/a=0.20$ 且LEE成為約2倍，但若 $R/a=0.40$ 則成為約4倍。又，於圖14(b)中亦可知，隨著 R/a 變大，輸出變大。

【0095】圖15(a)係表示於G53 nm時設為 $R/a=0.40$ ，使次數為 $m=1$ ~4之各次數中之LEE增加倍率之次數依存性，圖15(b)係同樣表示輸出值之次數依存性。根據圖15(a)，「pAlGaIn__NiAu__Pblock44 nm__R/a0.40」係於次數 $m=1$ ~2時LEE增加倍率成為約2~2.5倍，但若次數 $m=3$ ~4則成為約4倍。又，於圖15(b)中亦可確認，次數 $m=3$ ~4與次數 $m=1$ ~2比較，獲得較大之輸出。

【0096】作為該等之驗證，藉由與光線追蹤法之交叉模擬而求出、確認LEE值。圖24表示光線追蹤法之計算模型與解析結果。於法線追蹤法中，由於無法進行奈米尺度之計算，故而，首先藉由將利用光線追蹤法計算出之LEE值乘以藉由FDTD法導出之LEE增加倍率之交叉模擬，算出本實施形態中之LED構造之LEE值。表8表示其結果。

【0097】 [表8]

表8

FDTD法與光線追蹤法之交叉模擬之LEE解析結果

[p-AlGaN Contact/NiAu Electrode]

R/a依存性	Flat	R/a=0.2			R/a=0.3			R/a=0.4		
		LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率
pAlGaN_NiAu_Pblock44 nm_m4	15.6%	4.9E-17	2.0	31.8%	8.0E-17	3.3	51.4%	9.6E-17	4.0	62.2%

次數依存性	Flat	m=1			m=2			m=3			m=4		
		LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE增加 倍率
pAlGaN_NiAu_Pblock44 nm_R/a0.40	15.6%	5.2E-17	2.1	33.5%	6.7E-17	2.8	43.1%	9.8E-17	4.1	63.5%	9.6E-17	4.0	62.2%

【0098】如表8所示，於P-Block層膜厚44 nm、量子井層與2D-PhC間之距離G53 nm、 $R/a=0.40$ 、次數 $m=3$ 之時LEE為63.5%，同樣地於次數 $m=4$ 時表示62.2%之LEE值，根據本實施形態，可進而提高LEE。

【0099】

(第3實施形態)

作為本發明之第3實施形態之深紫外LED，將使設計波長 λ 為275 nm之AlGaIn系深紫外LED之構造(剖視圖與俯視圖)示於圖1C(c-1)、(c-2)。

【0100】如圖1C所示，本實施形態之LED構造係將作為本發明之第2實施形態中之p型接觸層使用相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層之深紫外LED構造之電極部分之金屬層(Ni)與反射射電極(Au)代替為Rh電極之情形時的變化例。

【0101】Rh電極(反射率70%)與Ni/Au電極(反射率20%)比較反射率較高，如圖20所示，根據模擬結果表示獲得Rh電極較Ni/Au電極高之輸出。 $R/a=0.40$ 之2D-PhC之反射效果於TE光時大致為100%，相對於此TM光則較差。波長275 nm之DUV光偏光，於本發明中所示之FDTD法模擬解析中以偏光度0.35來計算，強度比為TE：TM=7：3。因此，認為於透過2D-PhC到達至電極之TM光之反射於Rh電極中，與Ni/Au電極比較作為較高之輸出影響。

【0102】本實施形態中之LED構造之積層構造體部係與第2實施形態之構造相同且僅電極不同之變化例，因此，獲得垂直方向之布拉格反射與2D-PhC之協同效應之最佳條件係於與第2實施形態相同之條件下，僅將電極改變為Rh，進行FDTD法模擬解析。表9表示FDTD法之深紫外LED構造之計算模型之各參數。反射型二維光子晶體構造之計算模型之參數如

表7所示。將FDTD法模擬解析結果示於圖22。

【0103】 [表9]

表9
pAlGa_N Contact層LED之FDTD法計算模型[Rh Electrode]

	膜厚(nm)	Al組成	折射率	消光係數
反射電極(Rh)	230 nm	-	0.791	2.679
p-AlGa _N 接觸層	70 nm	56%	2.723	-
P-Block層(以4 nm為單位可變)	40 nm-60 nm	68%	2.594	-
i-guide層	1 nm	100%	2.300	-
多重量子井層：3pair	-	-	-	-
Well	2 nm	45%	2.773	-
Barrier	7 nm	65%	2.623	-
n-AlGa _N 接觸層	200 nm	65%	2.623	-
u-AlGa _N 層	100 nm	85%	2.415	-
AlN模板	200 nm	100%	2.300	-
藍寶石基板	1,300 nm	-	1.830	-

【0104】 於圖22中，將P-Block層膜厚設為44 nm，確認取決於量子井層與2D-PhC間之距離(G)之差異的輸出。此處，量子井層與2D-PhC間之距離G係於1 nm～61 nm之間設為以4 nm為單位可變，2D-PhC設為R/a = 0.40，次數m = 4。

【0105】 如圖22所示，於Rh電極中亦可確認，量子井層與2D-PhC間之距離G為53 nm且輸出成為最大。

【0106】 又，圖23係表示於與圖22相同之模擬條件下，相對於無2D-PhC之構造之有2D-PhC之構造之情形時之LEE增加倍率。量子井層與2D-PhC間之距離G53 nm於LEE增加倍率上亦表現最大，此與作為滿足上述垂直方向之布拉格條件之距離之53 nm一致。即，表示垂直方向之反射效果最大之週期53 nm係於輸出及LEE增加率之兩方面均滿足可獲得一維光子晶體與反射型二維光子晶體之協同效應之最佳化條件。

【0107】 量子井層與2D-PhC間之距離係選擇53 nm至表現出相對較大之輸出之61 nm。

【0108】 其次，藉由FDTD法解析而確認使2D-PhC之 R/a 及次數 m 之選擇為何處。作為P-Block層膜厚44 nm，進行無2D-PhC之構造與有2D-PhC之構造之比較。首先，關於 R/a 依存性，將次數設為 $m=4$ ，以 $R/a=0.20\sim 0.40$ 可變。又，關於次數依存性，將 R/a 設為 $R/a=0.40$ ，以 $m=1\sim 4$ 可變。作為該等之結果，將LEE增加倍率與輸出值之比較示於圖14及圖15。

【0109】 圖14(a)係表示於G53 nm時設為次數 $m=4$ ，使 R/a 為 $R/a=0.20$ 、 $R/a=0.30$ 、 $R/a=0.40$ 之各 R/a 中之LEE增加倍率之 R/a 依存性，圖14(b)係表示其輸出值之 R/a 依存性。如圖14(a)所示，可確認「pAlGaIn_Rh_Pblock44 nm_m4」係 $R/a=0.20$ 且LEE成為約2倍，但若 $R/a=0.40$ 則成為強3倍。又，於圖14(b)中亦可知，隨著 R/a 變大，輸出變大。

【0110】 圖15(a)係表示於G53 nm時設為 $R/a=0.40$ ，使次數為 $m=1\sim 4$ 之各次數中之LEE增加倍率之次數依存性，圖15(b)係同樣表示輸出值之次數依存性。根據圖15(a)，「pAlGaIn_Rh_Pblock44 nm_R/a0.40」係於次數 $m=1\sim 2$ 時LEE增加倍率成為約2倍，但若次數 $m=3\sim 4$ 則成為約3倍。又，於圖15(b)中亦可確認，次數 $m=3\sim 4$ 與次數 $m=1\sim 2$ 比較，獲得較大之輸出。

【0111】 作為該等之驗證，藉由與光線追蹤法之交叉模擬而求出、確認LEE值。圖25表示光線追蹤法之計算模型與解析結果。於法線追蹤法中，由於無法進行奈米尺度之計算，故而，首先藉由將利用光線追蹤法計算出之LEE值乘以藉由FDTD法導出之LEE增加倍率之交叉模擬，算出本實施形態中之LED構造之LEE值。表10表示其結果。

【0112】 [表10]

FDTD法與光線追蹤法之交叉模擬之LEE解析結果

[p-AlGaIn Contact/Rh Electrode]

表10

R/a依存性	Flat		R/a=0.2		R/a=0.3		R/a=0.4			
	LEE(%)	Power(w)	LEE増加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE増加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE増加 倍率	LEE(%)
pAlGaIn_Rh_Pblock44 nm_m4	17.2%	6.2E-17	1.9	33.5%	8.8E-17	2.8	47.6%	1.0E-16	3.2	55.2%

次數依存性	Flat		m=1		m=2		m=3		m=4				
	LEE(%)	Power(w)	LEE増加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE増加 倍率	LEE(%)	Power(w)	LEE増加 倍率	LEE(%)			
pAlGaIn_Rh_Pblock44 nm_R/a0.40	17.2%	5.5E-17	1.7	29.7%	7.8E-17	2.5	42.2%	1.1E-16	3.4	58.7%	1.0E-16	3.2	55.2%

【0113】如表10所示，P-Block層膜厚44 nm、量子井層與2D-PhC間之距離G53 nm、 $R/a=0.40$ 、次數 $m=3$ 時LEE為58.7%，同樣次數 $m=4$ 時表示55.2%之LEE值，根據本實施形態，可更提高LEE。

【0114】

(第4實施形態)

作為本發明之第4實施形態，對p型接觸層使用p型GaN接觸層之深紫外LED之製造方法進行說明。

【0115】首先，將藍寶石基板作為生長基板，將AlN模板、u型AlGaIn層、n型AlGaIn接觸層、多重量子井層依次藉由結晶生長而積層。多重量子井層係以井層2 nm為3層且於井層之間隔著2層障壁層7 nm之形式進行成膜。於其上將由AlN形成之i-guide層與由p型AlGaIn層形成之B-Block層積層52 nm~56 nm。於其上使p型GaIn接觸層積層。藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。

【0116】而且，於結晶生長至p型GaIn接觸層為止之深紫外LED積層構造體形成反射型二維光子晶體週期構造。

【0117】圖26係表示反射型二維光子晶體週期構造加工製程之一例之圖。

【0118】反射型二維光子晶體之加工利用奈米壓印微影之技術。p型GaIn接觸層208之表面係於凸方向具有100 μm 以上之翹曲，故而模具利

用樹脂塑模200對應。又，為了於乾式蝕刻時接近垂直且正確地保持孔之直徑，使用雙層抗蝕劑。

【0119】 具體而言，於具有積層至p型GaN接觸層208為止之深紫外LED積層構造體之晶圓中，於p型GaN接觸層208之表面旋轉塗佈下層抗蝕劑210。其次，旋轉塗佈含有Si之上層抗蝕劑209而形成雙層抗蝕劑(參照圖26(a))。

【0120】 對上層抗蝕劑，利用具有特定之光子晶體週期構造之反轉圖案之樹脂塑模200按壓使之UV硬化而將光子晶體圖案211轉印至上層抗蝕劑209(參照圖26(b))。其次，利用氧電漿對上層抗蝕劑209進行蝕刻而形成遮罩212。參照圖26(c)。而且，將該遮罩212利用ICP(inductively coupled plasma，感應耦合電漿)電漿蝕刻至不超過P-Block層207之自光子晶體圖案(孔)211之端面至量子井層205為止之距離為53 nm~57 nm為止之位置為止。參照圖26(d)。將最後殘存之下層抗蝕劑210洗淨進行清潔之修面。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0121】 進而，考慮由蝕刻所致之對p型GaN接觸層之損傷，為了其修復，亦可進行硫化銨處理或退火處理。

【0122】 然後，於反射型二維光子週期構造之上，形成金屬層(Ni)及反射電極層(Au)。該等金屬層(Ni)與反射電極層(Au)亦可利用傾斜蒸鍍法形成。

【0123】 根據傾斜蒸鍍法，不將金屬層(Ni)及反射電極層(Au)埋入至反射型二維光子晶體週期構造之空孔內，即能夠於p型GaN接觸層之表

面形成金屬層(Ni)及反射電極層(Au)。

【0124】

(第5實施形態)

作為本發明之第5實施形態，對p型接觸層使用p型AlGaIn接觸層之深紫外LED之製造方法進行說明。

【0125】 將藍寶石基板作為生長基板，將AlN模板、u型AlGaIn層、n型AlGaIn接觸層、多重量子井層依次藉由結晶生長而積層。多重量子井層係以井層2 nm為3層且於井層之間隔著2層障壁層7 nm之形式進行成膜。於其上將由AlN形成之i-guide層與由p型AlGaIn層形成之B-Block層積層44 nm～48 nm。於其上積層p型AlGaIn接觸層。

【0126】 藉由磊晶生長而形成之各層之厚度整體可使用光干涉式膜厚測定器來測定。進而，各層之厚度之各者於相鄰之各層之組成充分不同之情形時(例如於Al組成比有0.01以上之不同之情形時)，可根據利用穿透式電子顯微鏡之生長層之剖面觀察來算出。又，於如多重量子井或超晶格構造般各層之厚度較薄之情形時可使用TEM-EDS來測定厚度。

【0127】 於結晶生長至p型AlGaIn接觸層為止之深紫外LED積層構造體形成反射型二維光子晶體週期構造。反射型二維光子晶體之加工藉由與第4實施形態中所述之方法相同之方法而形成。(參照圖27)。

【0128】 即，於具有積層至p型AlGaIn接觸層208a為止之深紫外LED積層構造體之晶圓中，於p型AlGaIn接觸層208a之表面旋轉塗佈下層抗蝕劑210。其次，旋轉塗佈含有Si之上層抗蝕劑209而形成雙層抗蝕劑。對上層抗蝕劑209，利用具有特定之光子晶體週期構造之反轉圖案之樹脂塑模200按壓而使之UV硬化(參照圖27(a))，將光子晶體圖案211轉印至上

層抗蝕劑209(參照圖27(b))。其次，利用氧電漿對上層抗蝕劑209進行蝕刻而形成遮罩212。(參照圖27(c))。然後，將該遮罩212利用ICP電漿蝕刻至不超過P-Block層207之自光子晶體圖案(孔)211之端面至量子井層205為止之距離為53 nm~61 nm為止之位置為止。(參照圖27(d))。最後，將殘存之下層抗蝕劑210洗淨而進行清潔之修面。光子晶體之週期構造或形狀及量子井層與光子晶體之距離之測定可藉由觀察以利用穿透電子顯微鏡之STEM(掃描穿透電子顯微鏡)模式之HAADF(高角散射環狀暗視野)像來算出。

【0129】 進而，考慮由蝕刻所致之對p型GaN接觸層之損傷，為了其修復，亦可進行硫化銨處理或退火處理。

【0130】 然後，於反射型二維光子週期構造之上，形成金屬層(Ni)及反射電極層(Au)。該等金屬層(Ni)與反射電極層(Au)亦可利用傾斜蒸鍍法形成。

【0131】 根據傾斜蒸鍍法，不將金屬層(Ni)及反射電極層(Au)埋入至反射型二維光子晶體週期構造之空孔內，即能夠於p型GaN接觸層之表面形成金屬層(Ni)及反射電極層(Au)。

【0132】 又，於電極形成中，亦可於反射型二維光子晶體週期構造形成後，代替金屬層(Ni)及反射電極層(Au)，使用Rh電極。而且，於Rh電極中亦可藉由傾斜蒸鍍法而形成。

[產業上之可利用性]

【0133】 本發明能夠利用於深紫外LED。

【0134】 本說明書中所引用之所有刊物、專利及專利申請案直接藉由引用而併入本說明書中。

【符號說明】

【0135】

1	藍寶石基板
2	AlN模板
3	u型AlGaIn層
4	n型AlGaIn接觸層
5	多重量子井層
6	i-guide層
7	P-Block層
8	p型GaIn接觸層
8a	p型AlGaIn接觸層
9	金屬層(Ni)
10	反射電極層(Au)
11	反射電極層(Rh)
51、53、55	量子井層
52、54	障壁層
100	反射型二維光子晶體週期構造
101(h)	空孔(柱狀構造體、孔)
200	樹脂塑模
205	量子井層
206	i-guide層
207	P-Block層
208	p型GaIn接觸層

208a	p型AlGaIn接觸層
209	上層抗蝕劑
210	下層抗蝕劑
211	光子晶體圖案
212	遮罩
a	週期
R	空孔之半徑

【發明申請專利範圍】

【第1項】

一種深紫外LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Au)、金屬層(Ni)、p型GaN接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、AlN模板、及上述藍寶石基板，

上述P-Block層之膜厚為52 nm～56 nm，

具有設置於自上述金屬層與上述p型GaIn接觸層之界面起於上述p型GaIn接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型GaIn接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，

上述空孔係自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{IDeff}$ ，該距離之範圍為53 nm～57 nm，

上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於TE偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期a相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2Deff}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， n_{2Deff} ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶體之週期)之次數m滿足 $2 \leq m \leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為R時，R/a比滿足 $0.30 \leq R/a \leq 0.40$ 。

【第2項】

一種深紫外LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍

寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Au)、金屬層(Ni)、相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、AlN模板、及上述藍寶石基板，

上述P-Block層之膜厚為44 nm～48 nm，

具有設置於自上述金屬層與上述p型AlGaIn接觸層之界面起於上述p型AlGaIn接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGaIn接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，

上述空孔係自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{1D_{\text{neff}}}$ ，該距離之範圍為53 nm～61 nm，

上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於TE偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期a相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2D_{\text{eff}}}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， $n_{2D_{\text{eff}}}$ ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶體之週期)之次數m滿足 $1 \leq m \leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為R時，R/a比滿足 $0.20 \leq R/a \leq 0.40$ 。

【第3項】

一種深紫外LED，其特徵在於：其係將設計波長設為 λ 者，且自與藍寶石基板相反側起依次具有反射電極層(Rh)、相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、AlN模板、及上述

藍寶石基板，

上述P-Block層之膜厚為44 nm～48 nm，

具有設置於自上述反射電極層與上述p型AlGaIn接觸層之界面起於上述p型AlGaIn接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGaIn接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造，

上述空孔係自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離於垂直方向滿足 $\lambda/2n_{\text{IDneff}}$ ，該距離之範圍為53 nm～61 nm距離，

上述反射型二維光子晶體週期構造具有相對於TE偏光成分打開之光子帶隙，上述反射型二維光子晶體週期構造之週期a相對於上述設計波長 λ 之光滿足布拉格之條件，且處於布拉格之條件式 $m\lambda/n_{2\text{Deff}}=2a$ (其中，m：次數， λ ：設計波長， $n_{2\text{Deff}}$ ：二維光子晶體之實效折射率，a：二維光子晶體之週期)之次數m滿足 $1 \leq m \leq 4$ ，於將上述空孔之半徑設為R時，R/a比滿足 $0.20 \leq R/a \leq 0.40$ 。

【第4項】

一種深紫外LED之製造方法，其係將設計波長設為 λ 之深紫外LED之製造方法，且具有如下步驟：

準備將藍寶石基板設為生長基板之積層構造體之步驟，其中，於形成自與上述藍寶石基板相反側起依次含有反射電極層、金屬層、p型GaIn接觸層、由相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、及AlN模板之積層構造體之步驟中，使上述P-Block層之膜厚為52 nm～56

nm進行結晶生長；

形成設置於自上述金屬層與上述p型GaN接觸層之界面起於上述p型GaN接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型GaN接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造之步驟，上述空孔係形成於自上述空孔之上述藍寶石基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離為53 nm～57 nm之位置的步驟；

準備用以形成上述反射型二維光子晶體週期構造之模具之步驟、及於上述p型GaN接觸層之上形成抗蝕劑層且利用奈米壓印法轉印上述模具之構造之步驟；

將上述抗蝕劑層作為遮罩對上述p型GaN接觸層進行蝕刻而形成二維光子晶體週期構造之步驟；

形成上述反射型二維光子晶體構造，而且按照該順序藉由傾斜蒸鍍法而形成上述金屬層之步驟；及

於上述金屬層之上形成反射電極層之步驟。

【第5項】

一種深紫外LED之製造方法，其係將設計波長設為 λ 之深紫外LED之製造方法，且具有如下步驟：

形成將藍寶石基板設為生長基板之積層構造體之步驟，其中，於形成自與上述藍寶石基板相反側起依次含有反射電極層、金屬層、相對於波長 λ 透明之p型AlGaIn接觸層、由p型AlGaIn層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGaIn接觸層、u型AlGaIn層、及AlN模板之積層構造體之步驟中，使上述P-Block層之膜厚為44 nm～48

nm進行結晶生長；

形成設置於自上述金屬層與上述p型AlGa_N接觸層之界面起於上述p型AlGa_N接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGa_N接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造之步驟，上述空孔係形成於自上述空孔之生長基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離為53 nm～61 nm之位置的步驟；

準備用以形成上述反射型二維光子晶體週期構造之模具之步驟、及於上述p型AlGa_N接觸層之上形成抗蝕劑層且利用奈米壓印法轉印上述模具之構造之步驟；

將上述抗蝕劑層作為遮罩對上述p型AlGa_N接觸層進行蝕刻而形成二維光子晶體週期構造之步驟；

形成上述反射型二維光子晶體構造，而且藉由傾斜蒸鍍法而形成上述金屬層之步驟；及

於上述金屬層之上形成反射電極層之步驟。

【第6項】

一種深紫外LED之製造方法，其係將設計波長設為 λ 之深紫外LED之製造方法，且具有如下步驟：

形成將藍寶石基板設為生長基板之積層構造體之步驟，其中，於形成自與上述藍寶石基板相反側起依次含有反射電極層、相對於波長 λ 透明之p型AlGa_N接觸層、由p型AlGa_N層形成之P-Block層、由AlN層形成之i-guide層、多重量子井層、n型AlGa_N接觸層、u型AlGa_N層、及AlN模板之積層構造體之步驟中，使上述P-Block層之膜厚為44 nm～48 nm進行結

晶生長；

形成設置於自上述金屬層與上述p型AlGa_N接觸層之界面起於上述p型AlGa_N接觸層之厚度方向之範圍內且不超過上述p型AlGa_N接觸層與上述P-Block層之界面之位置的具有複數個空孔之反射型二維光子晶體週期構造之步驟；

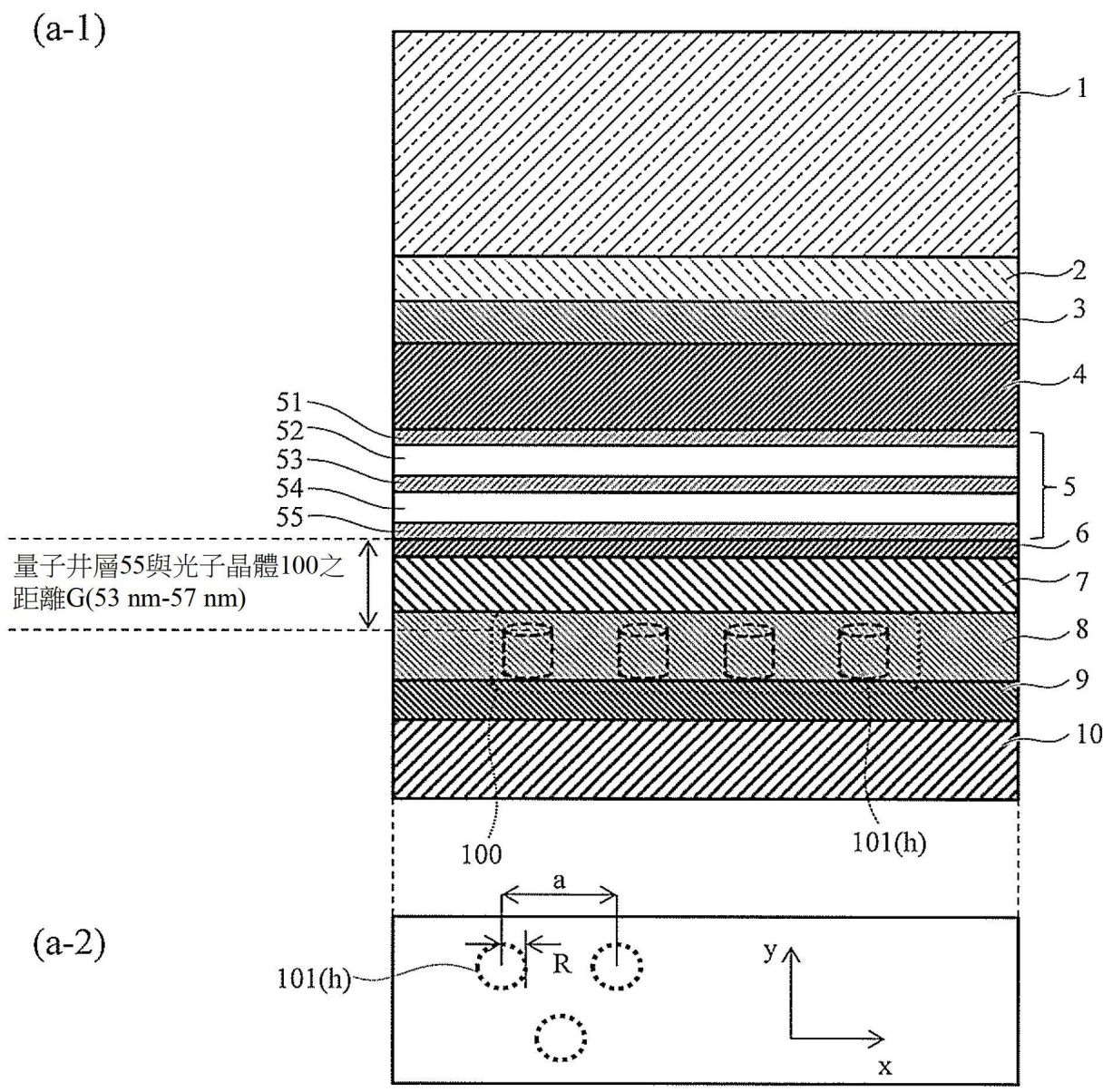
將上述空孔形成於自上述空孔之生長基板方向之端面至上述多重量子井層與上述i-guide層之界面為止之距離為53 nm~61 nm之位置的步驟；

準備用以形成上述反射型二維光子晶體週期構造之模具之步驟、及於上述p型AlGa_N接觸層之上形成抗蝕劑層且利用奈米壓印法轉印上述模具之構造之步驟；

將上述抗蝕劑層作為遮罩對上述p型AlGa_N接觸層進行蝕刻而形成二維光子晶體週期構造之步驟；及

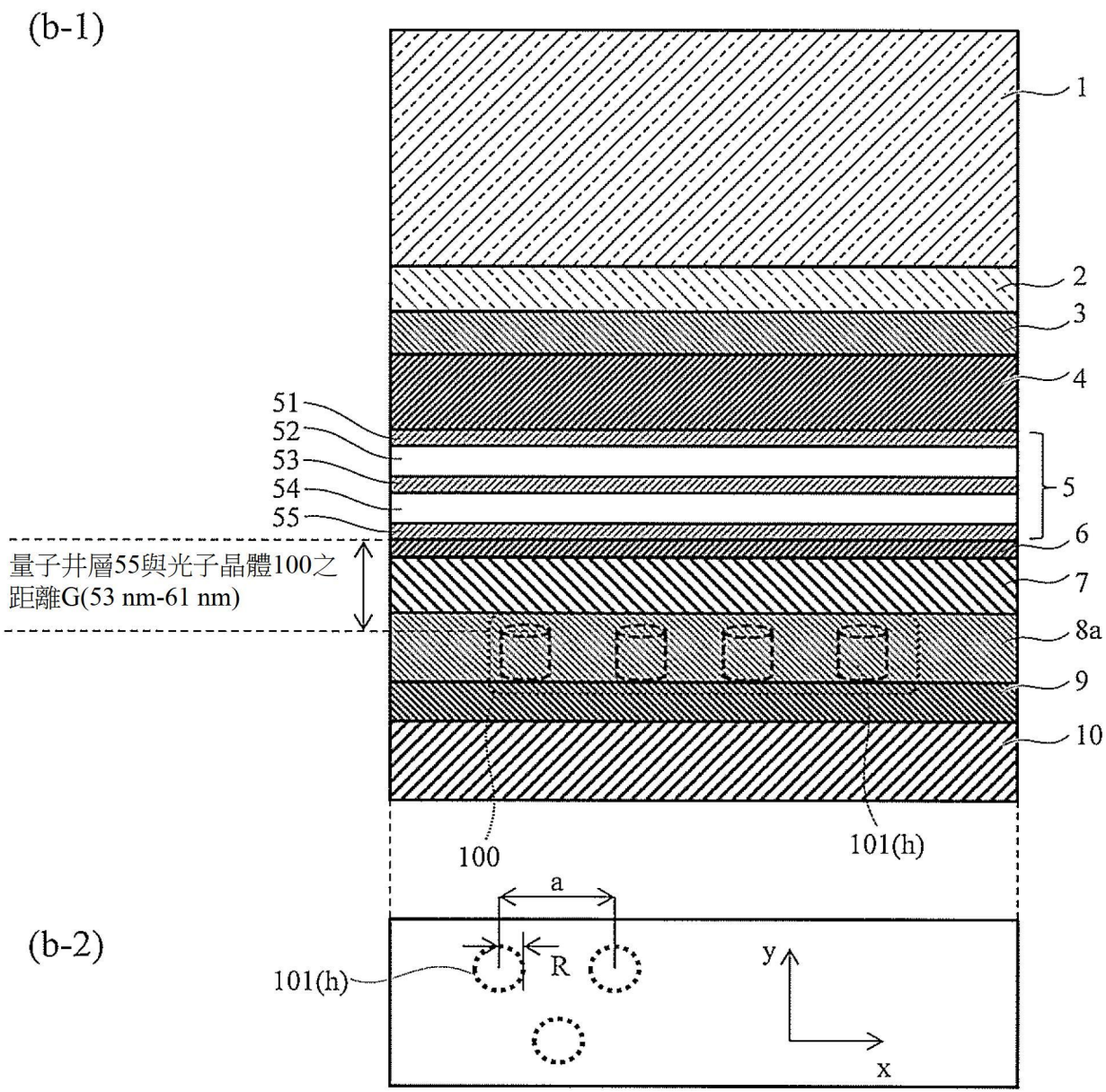
形成上述反射型二維光子晶體構造，而且藉由傾斜蒸鍍法而形成上述反射電極層之步驟。

【發明圖式】



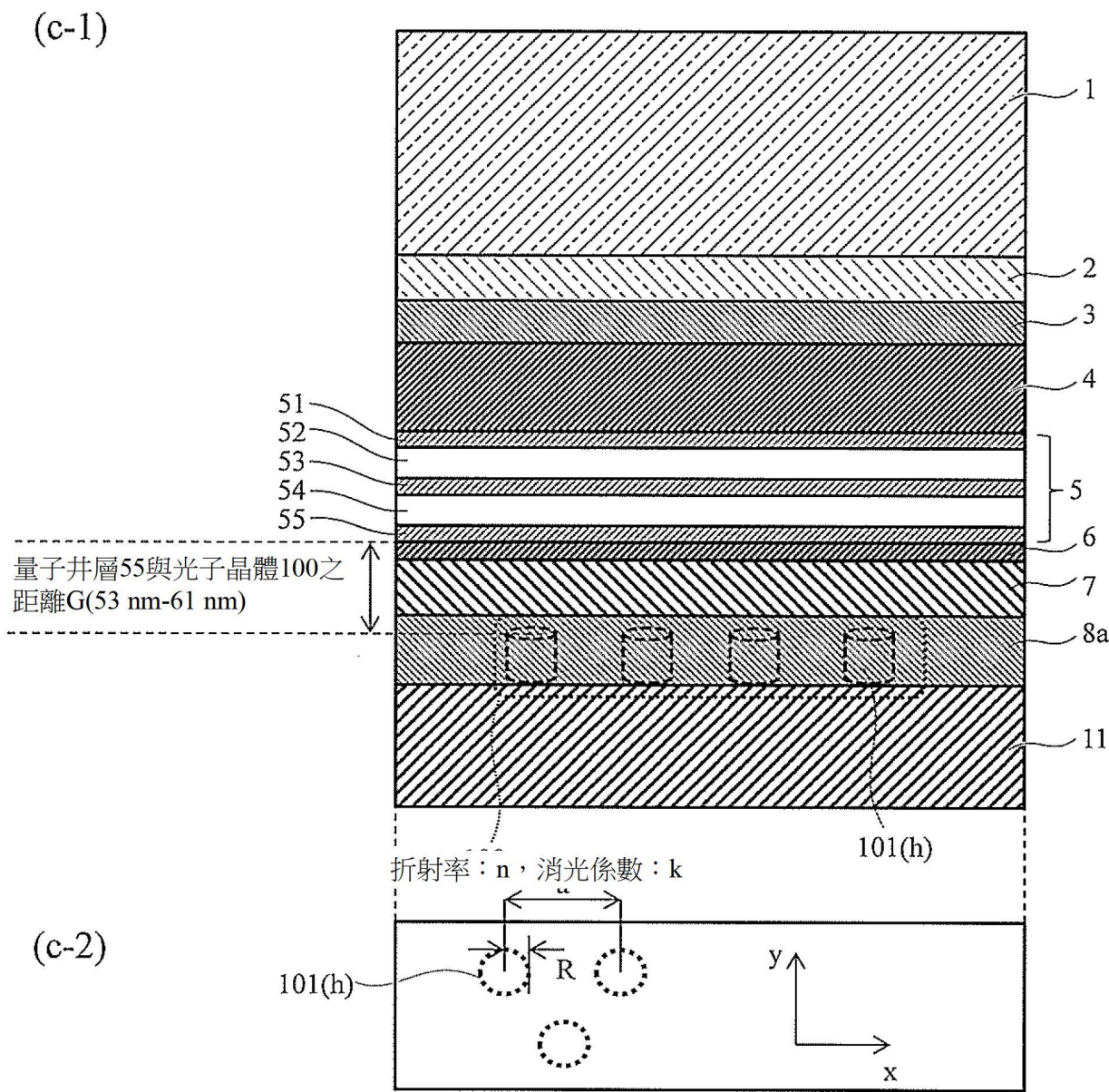
- | | |
|--|--|
| 1. 藍寶石基板(厚度：1.3 μm ， $n=1.83$) | 6. i-guide層(膜厚：1 nm， $n=2.3$) |
| 2. AlN模板(膜厚：200 nm， $n=2.3$) | 7. P-Block層(膜厚：52 nm～56 nm， $n=2.594$) |
| 3. u型AlGaIn層(膜厚：100 nm， $n=2.415$) | 8. p型GaIn接觸層(膜厚：138 nm， $n=2.631$ ， $k=0.432$) |
| 4. n型AlGaIn接觸層(膜厚：200 nm， $n=2.623$) | 9. 金屬層(Ni)(膜厚：30 nm， $n=1.667$ ， $k=2.072$) |
| 5. 多重量子井層 | 10. 反射電極層(Au)(膜厚：200 nm， $n=1.644$ ， $k=1.850$) |
| 51. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | 100. 反射型二維光子晶體週期構造 |
| 52. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$) | 101(h). 空孔(柱狀構造體、孔) |
| 53. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | 折射率： n ，消光係數： k |
| 54. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$) | |
| 55. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | |

【圖1A】



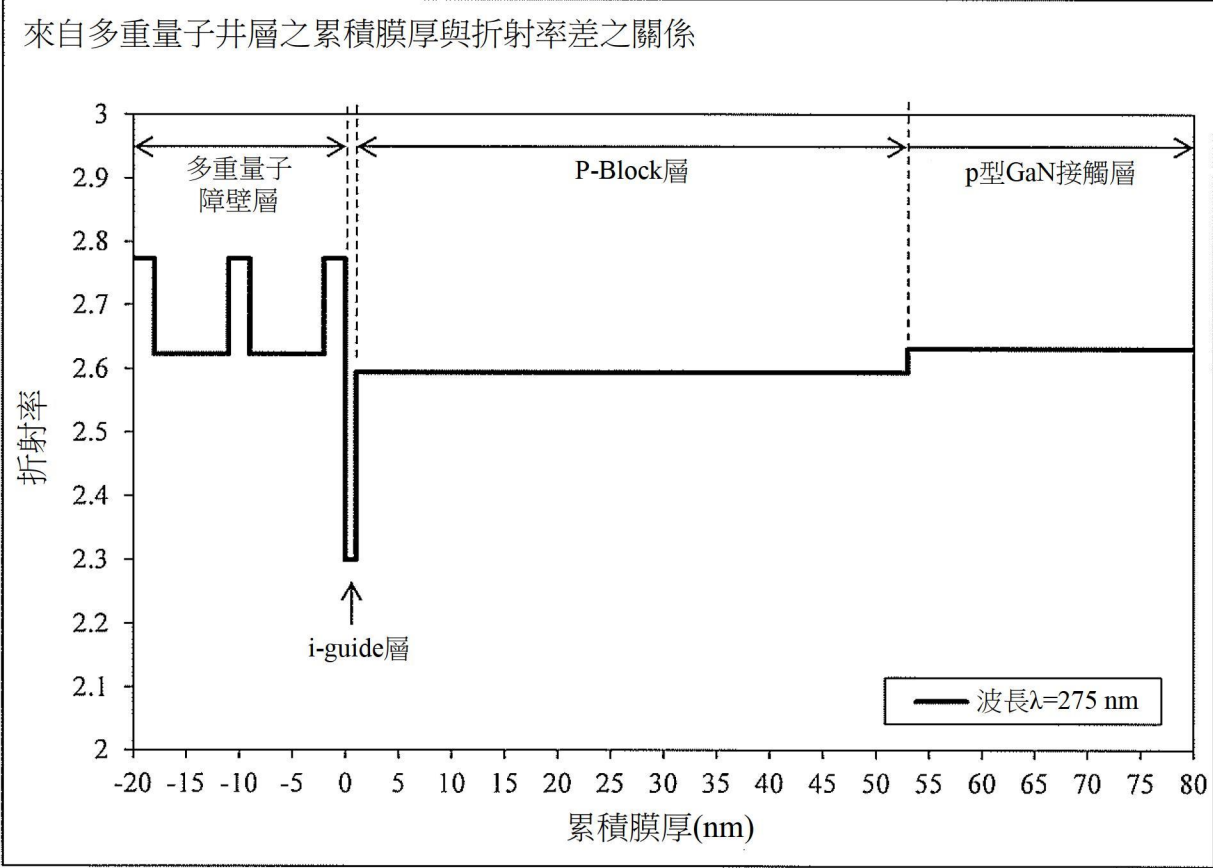
- | | |
|--|--|
| 1. 藍寶石基板(厚度：1.3 μm ， $n=1.83$) | 6. i-guide層(膜厚：1 nm， $n=2.3$) |
| 2. AlN模板(膜厚：200 nm， $n=2.3$) | 7. P-Block層(膜厚：44 nm~48 nm， $n=2.594$) |
| 3. u型AlGaIn層(膜厚：100 nm， $n=2.415$) | 8a. p型AlGaIn接觸層(膜厚：70 nm， $n=2.723$) |
| 4. n型AlGaIn接觸層(膜厚：200 nm， $n=2.623$) | 9. 金屬層(Ni)(膜厚：30 nm， $n=1.667$ ， $k=2.072$) |
| 5. 多重量子井層 | 10. 反射電極層(Au)(膜厚：200 nm， $n=1.644$ ， $k=1.850$) |
| 51. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | 100. 反射型二維光子晶體週期構造 |
| 52. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$) | 101(h). 空孔(柱狀構造體、孔) |
| 53. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | 折光率： n ，消光係數： k |
| 54. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$) | |
| 55. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | |

【圖1B】



- | | |
|--|--|
| 1. 藍寶石基板(厚度：1.3 μm ， $n=1.83$) | 7. P-Block層(膜厚：44 nm～48 nm， $n=2.594$) |
| 2. AlN模板(膜厚：200 nm， $n=2.3$) | 8a. p型AlGaIn接觸層(膜厚：70 nm， $n=2.723$) |
| 3. u型AlGaIn層(膜厚：100 nm， $n=2.415$) | 11. 反射電極層(Rh)(膜厚：230 nm， $n=0.791$ ， $k=2.679$) |
| 4. n型AlGaIn接觸層(膜厚：200 nm， $n=2.623$) | 100. 反射型二維光子晶體週期構造 |
| 5. 多重量子井層 | 101(h). 空孔(柱狀構造體、孔) |
| 51. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | 折射率：n，消光係數：k |
| 52. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$) | |
| 53. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | |
| 54. 障壁層(膜厚：7 nm， $n=2.623$) | |
| 55. 井層(膜厚：2 nm， $n=2.773$) | |
| 6. i-guide層(膜厚：1 nm， $n=2.3$) | |

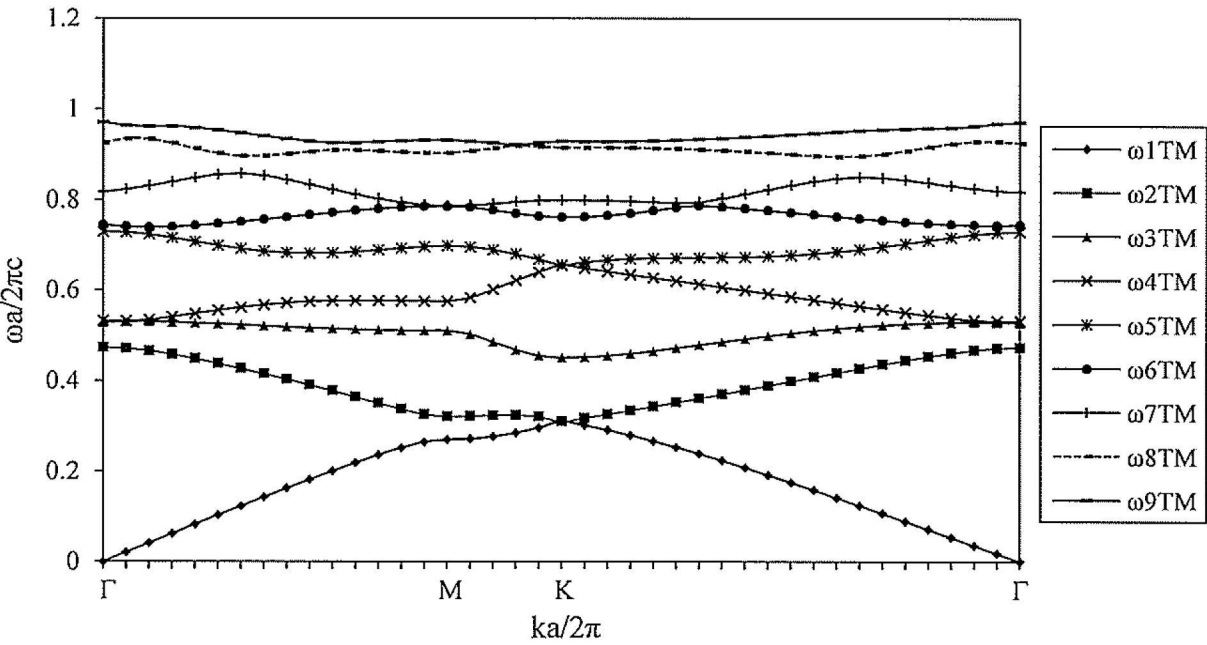
【圖1C】



【圖2】

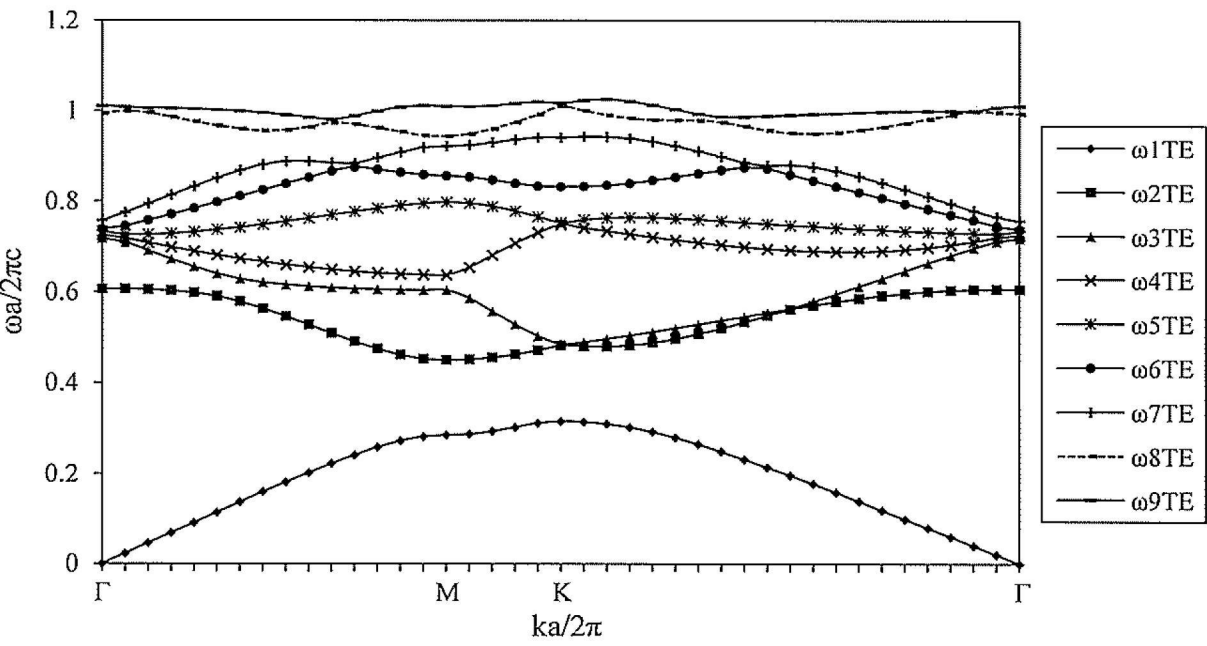
(a-1)

275 nm_TM光_p-GaN_空孔_R/a : 0.40



(a-2)

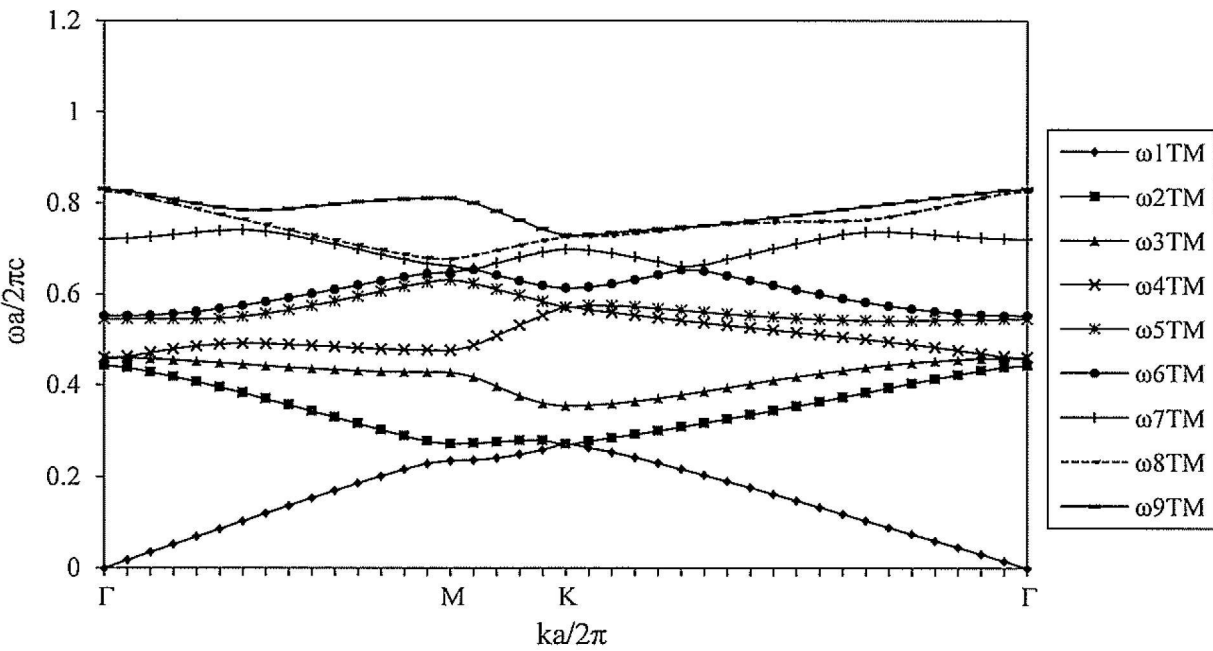
275 nm_TE光_p-GaN_空孔_R/a : 0.40



【圖3A】

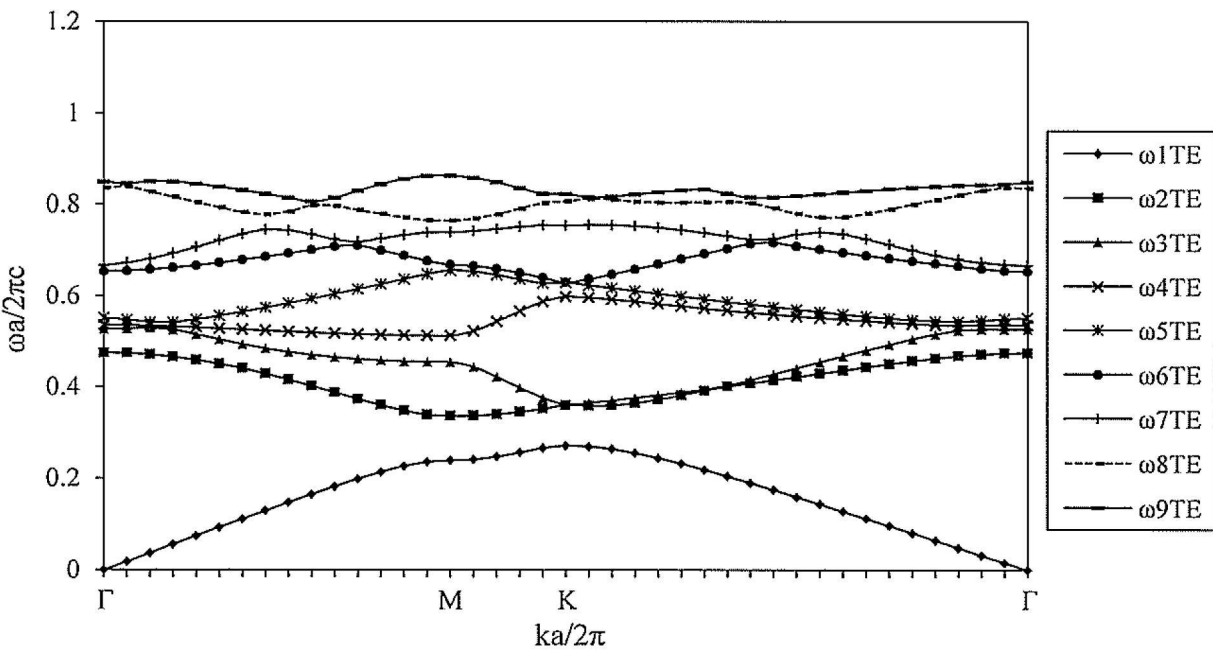
(b-1)

275 nm_TM光_p-GaN_空孔_R/a : 0.30



(b-2)

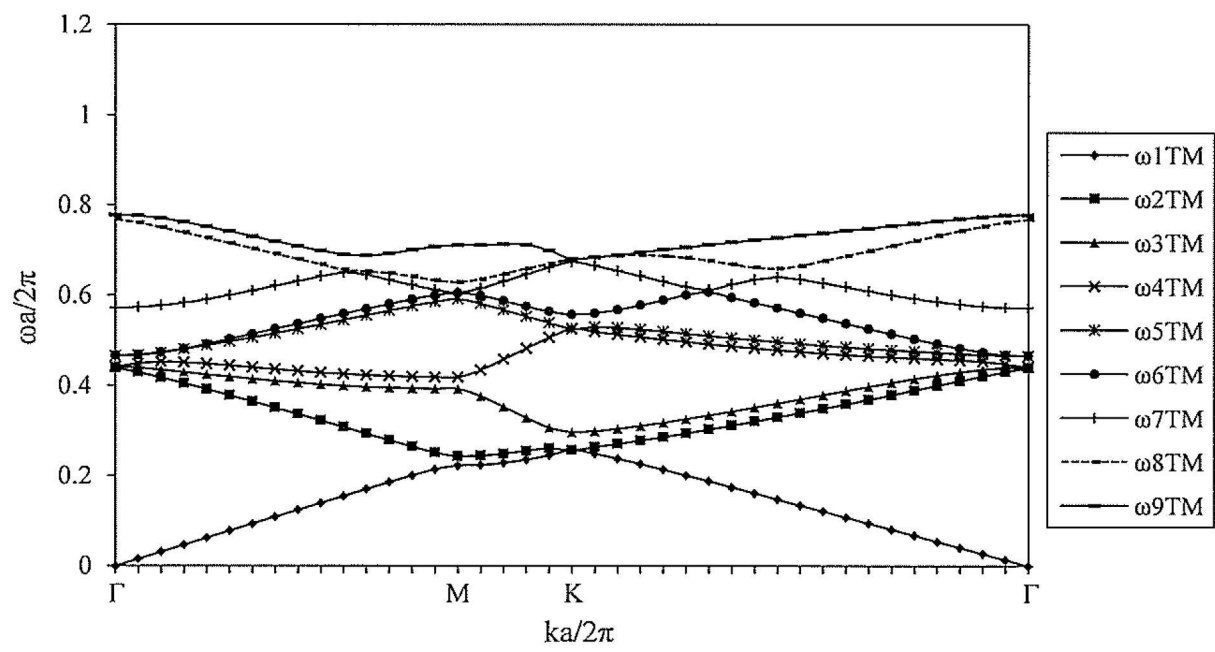
275 nm_TE光_p-GaN_空孔_R/a : 0.30



【圖3B】

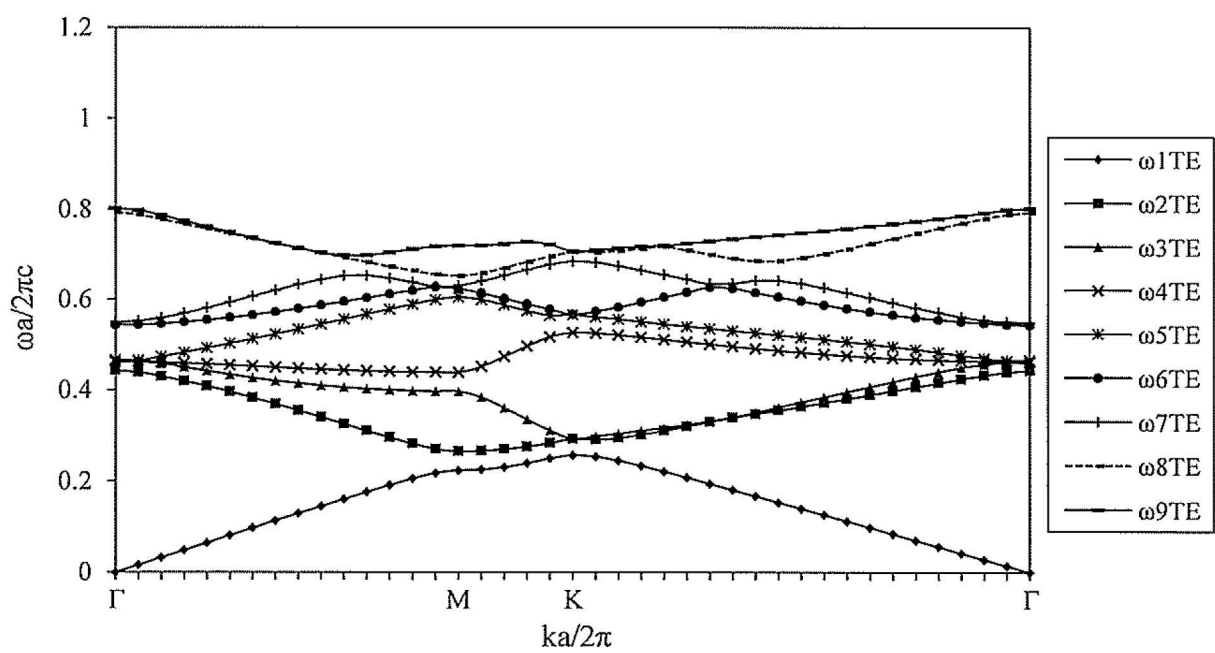
(c-1)

275 nm_TM光_p-GaN_空孔_R/a : 0.20

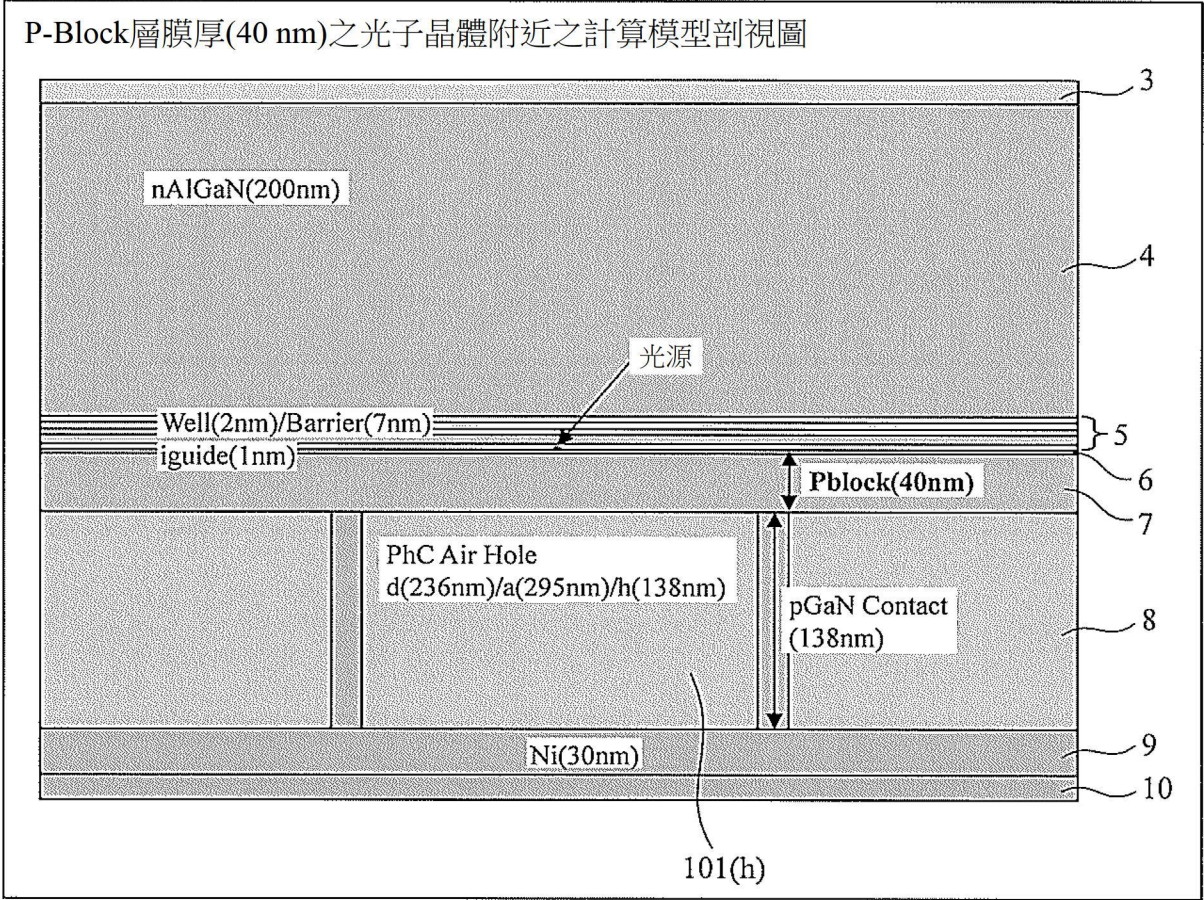


(c-2)

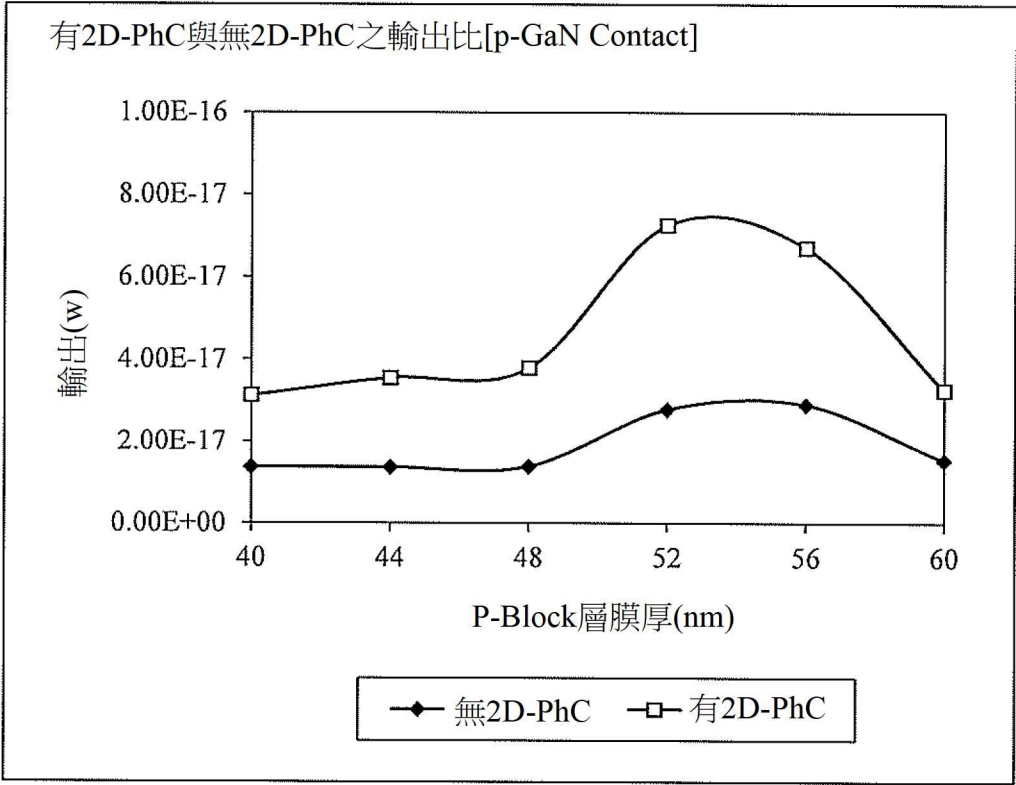
275 nm_TE光_p-GaN_空孔_R/a : 0.20



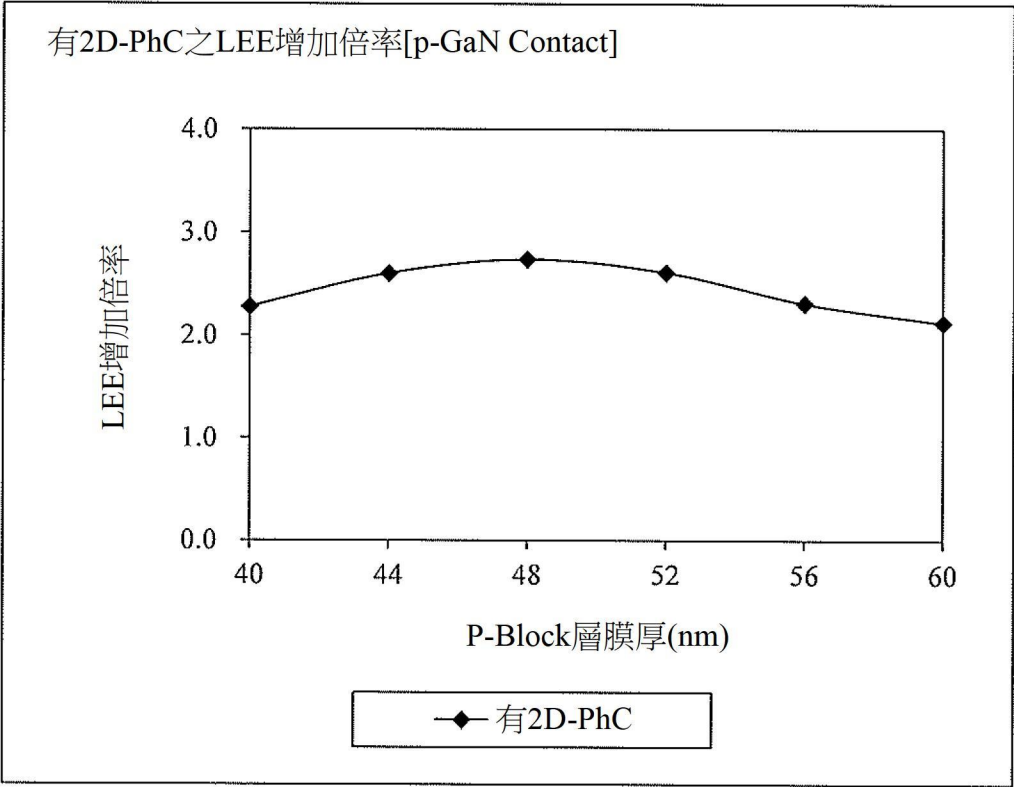
【圖3C】



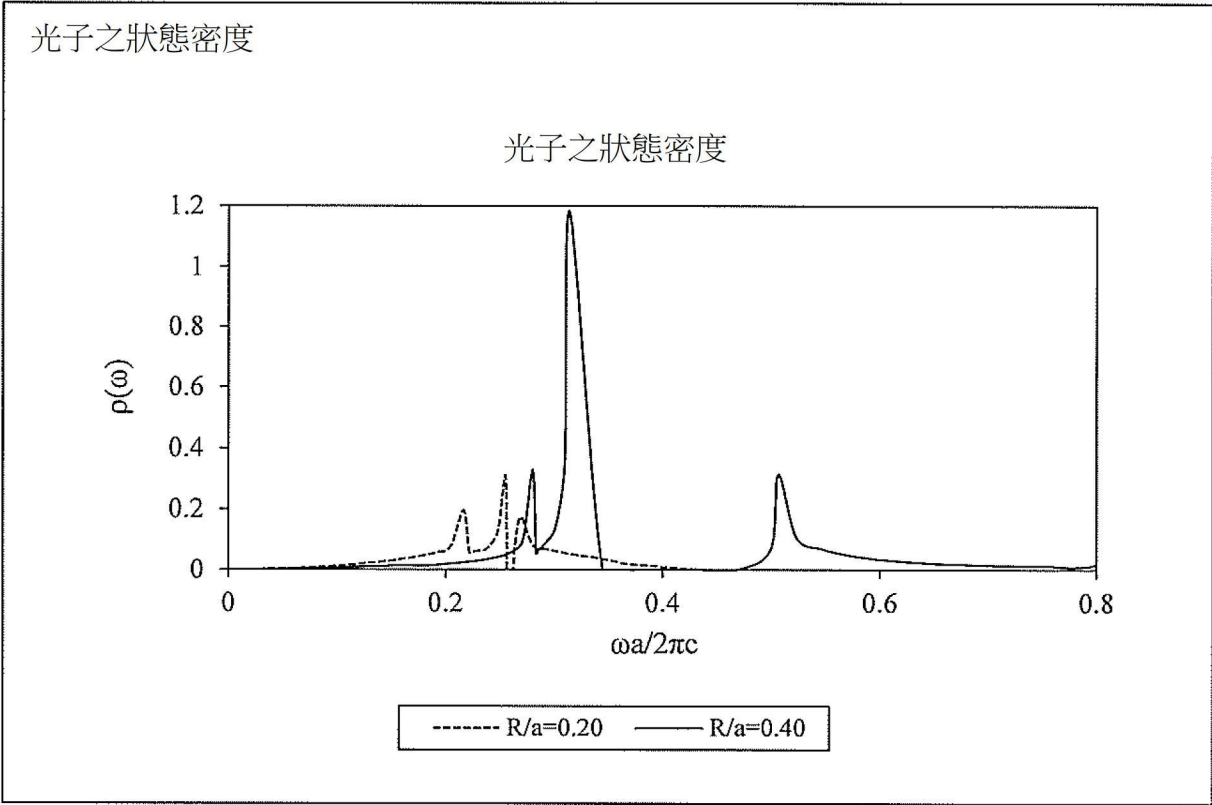
【圖4】



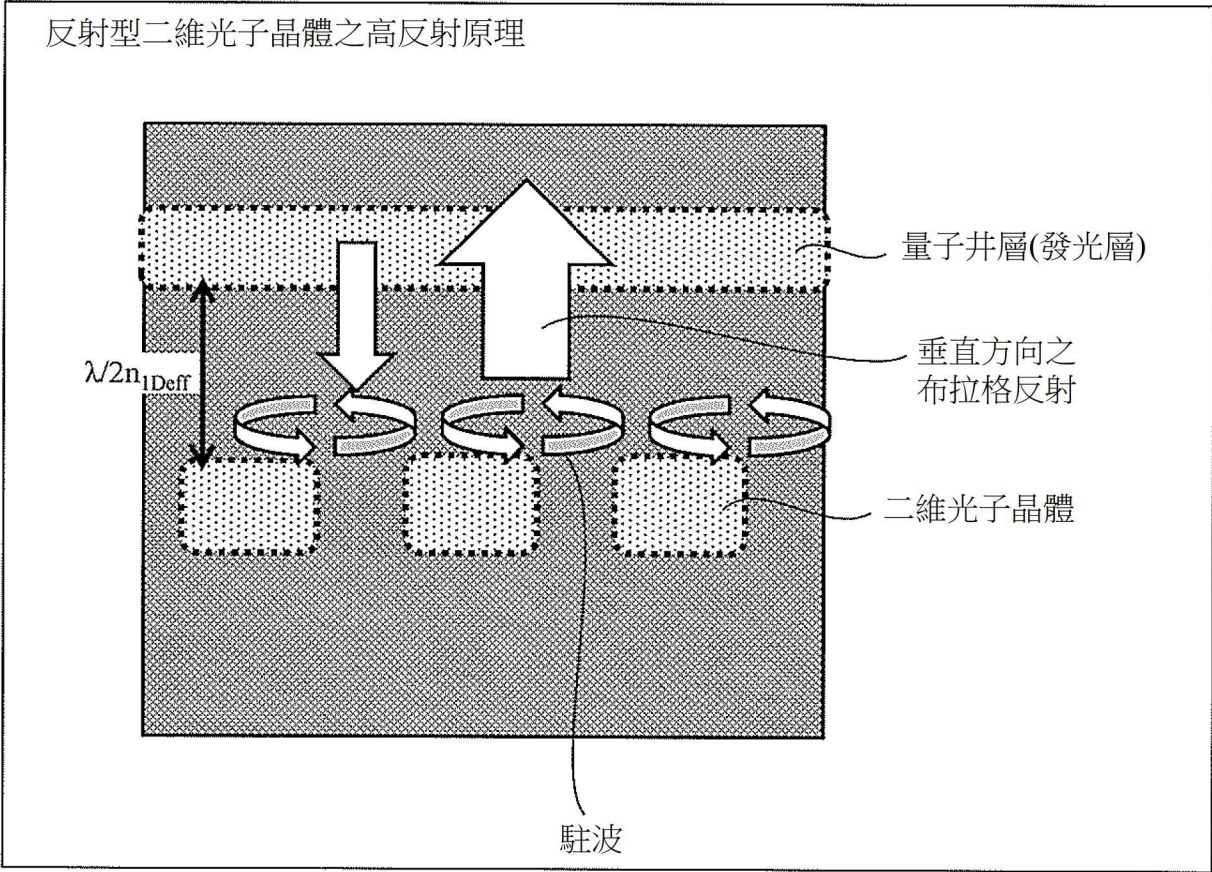
【圖5】



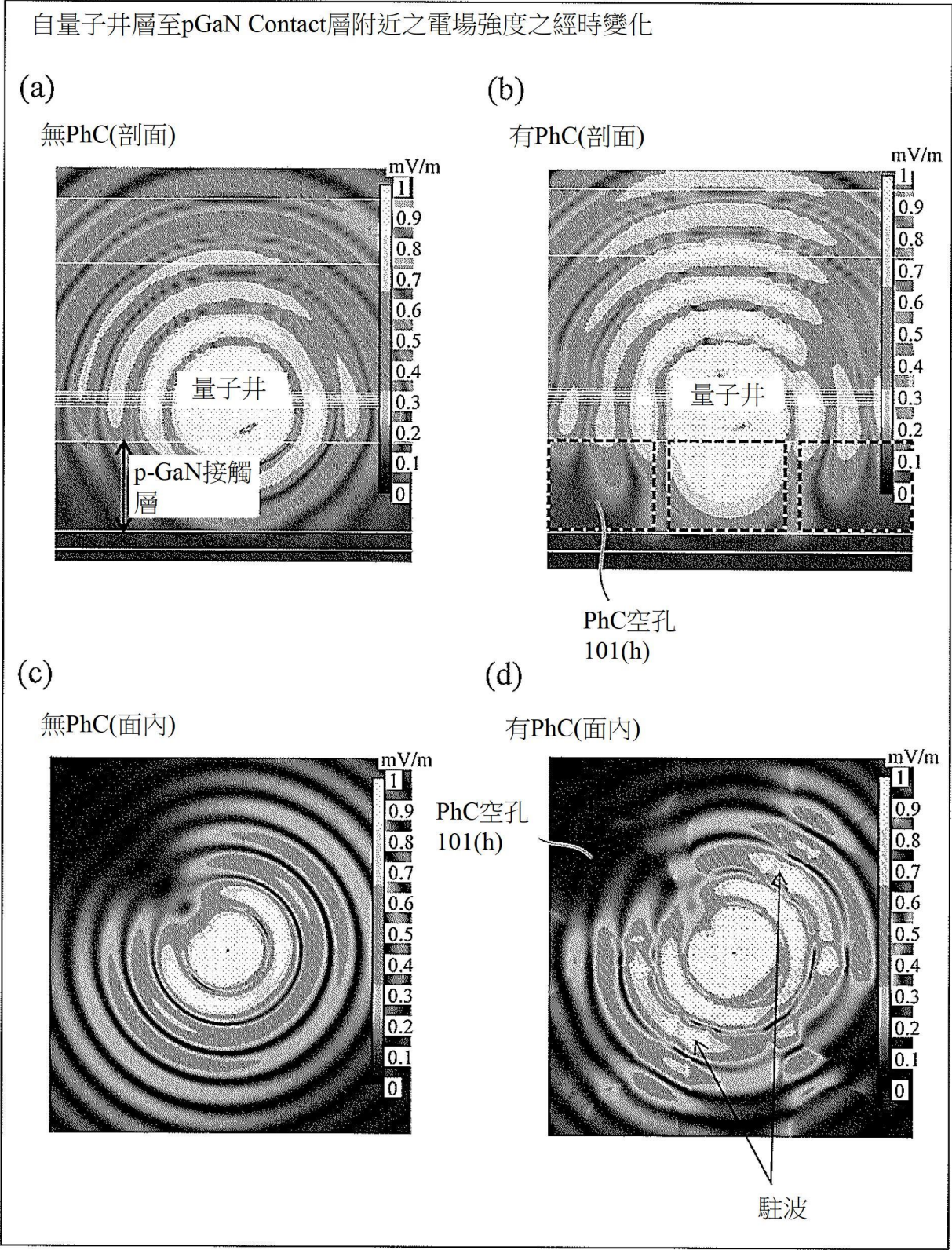
【圖6】



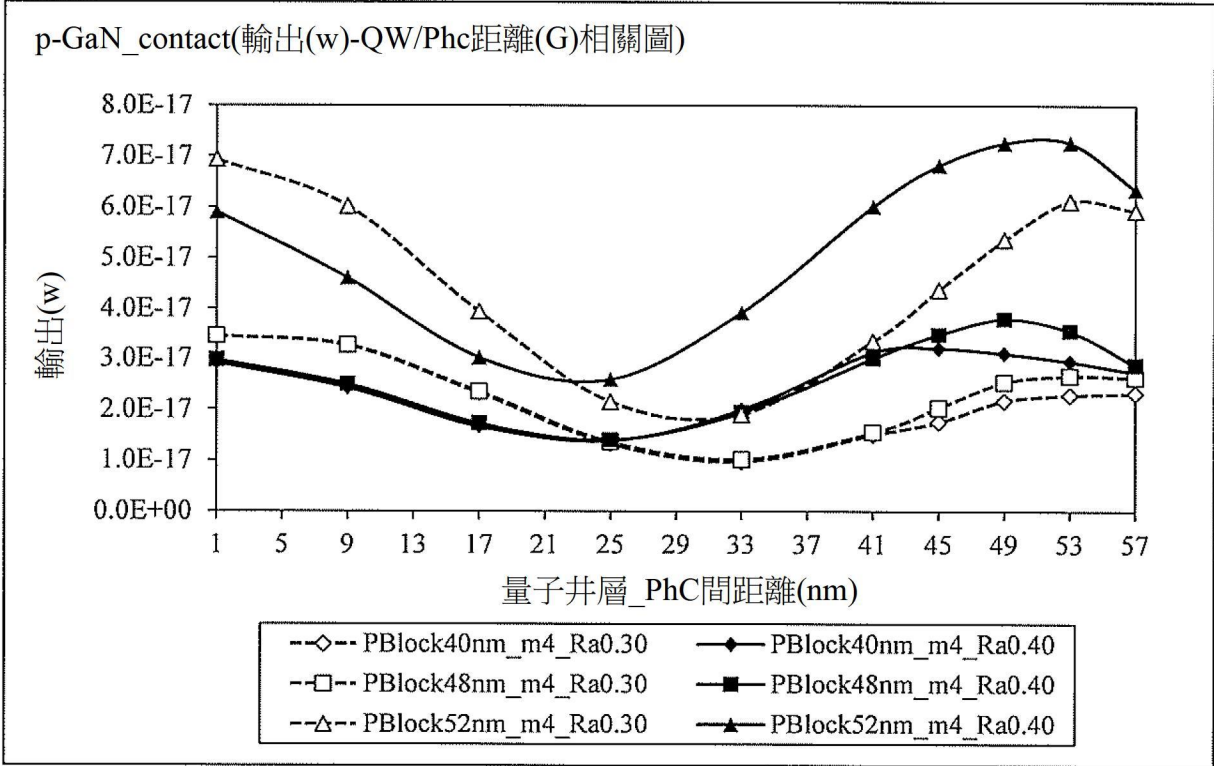
【圖7】



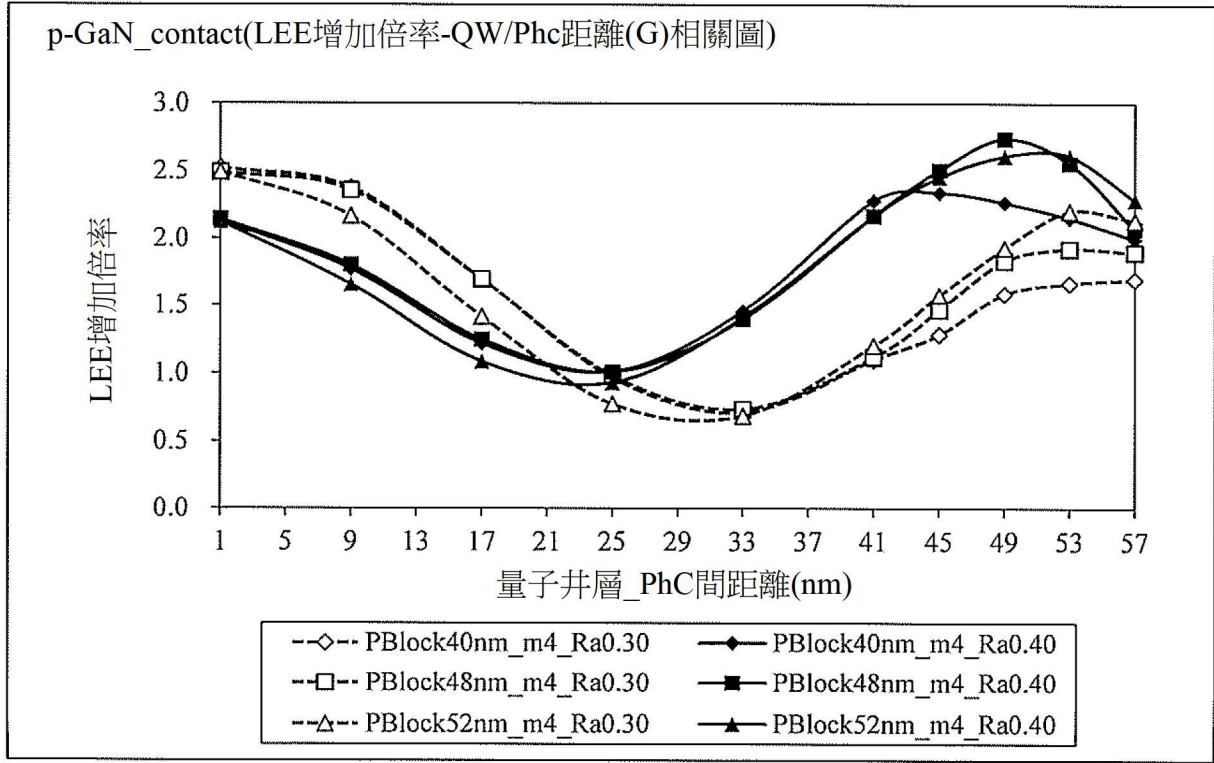
【圖8】



【圖9】

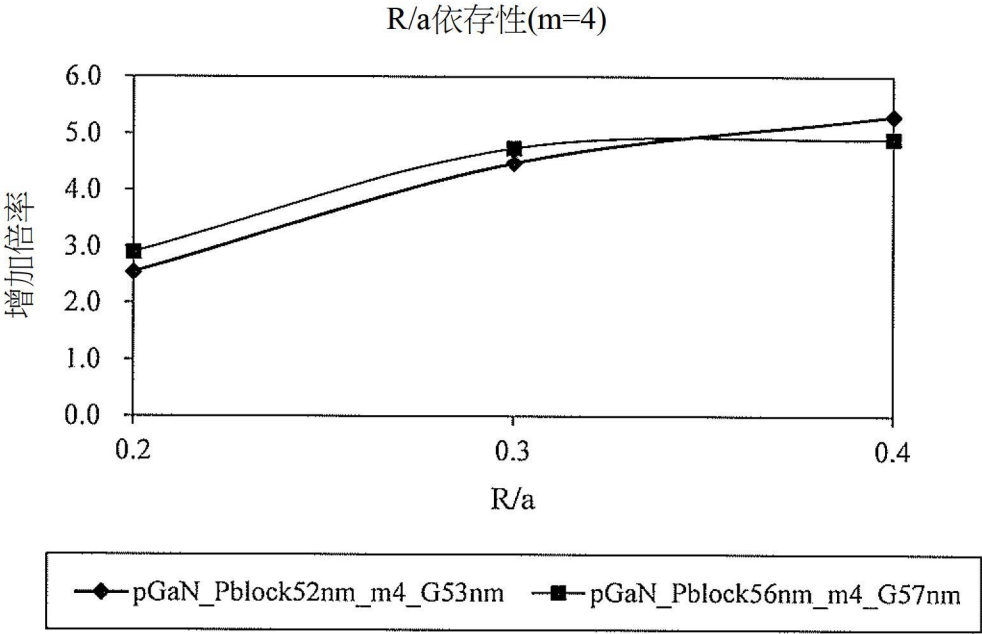


【圖10】

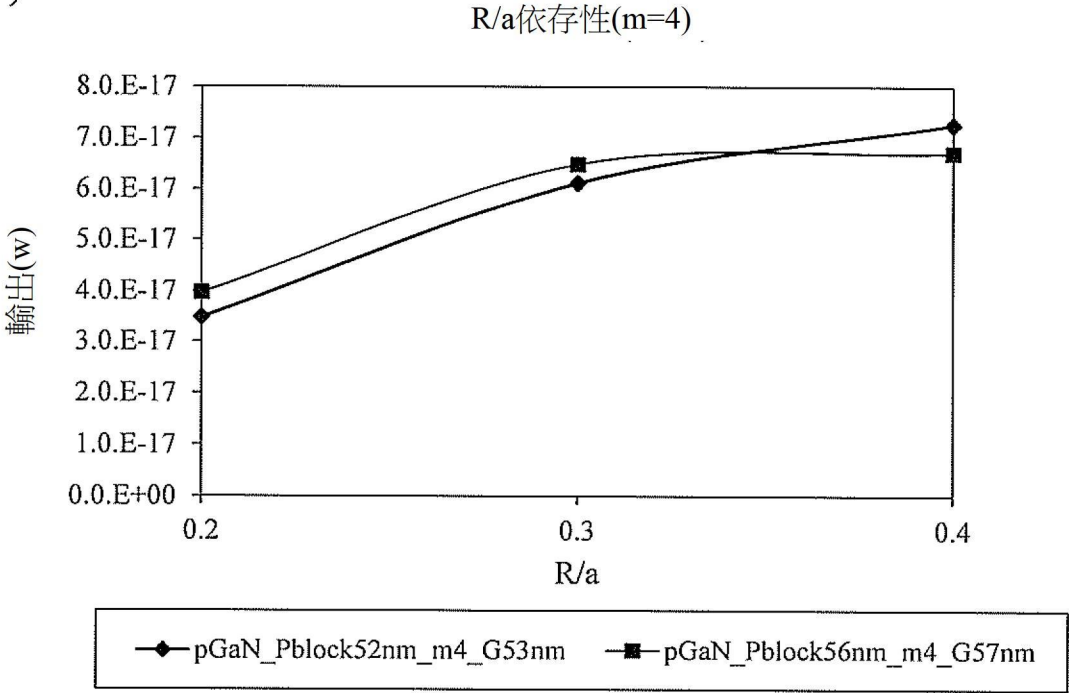


【圖11】

(a)

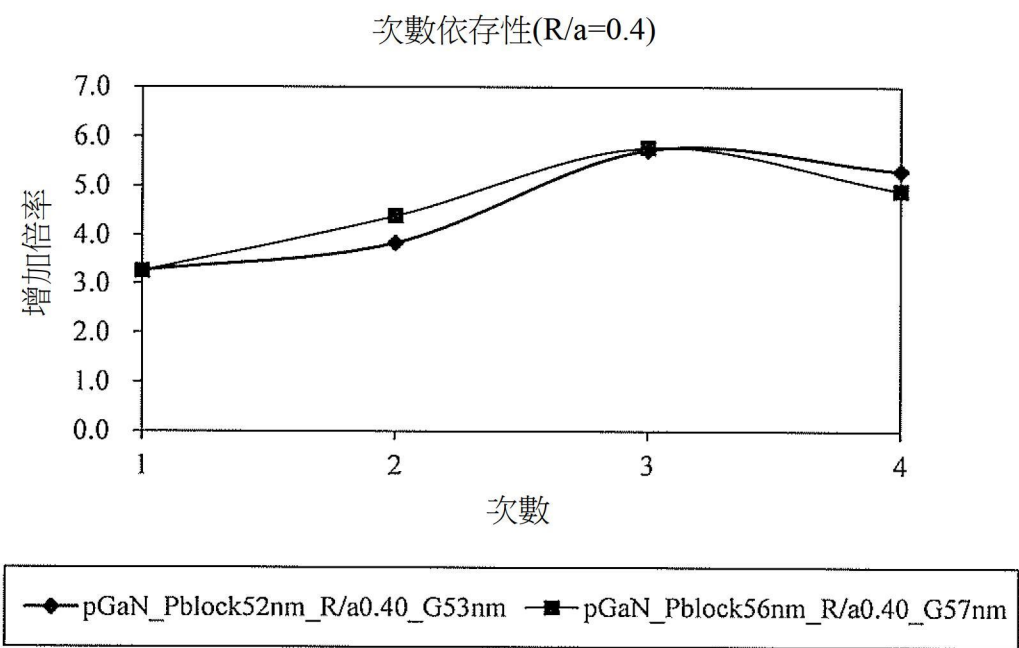


(b)

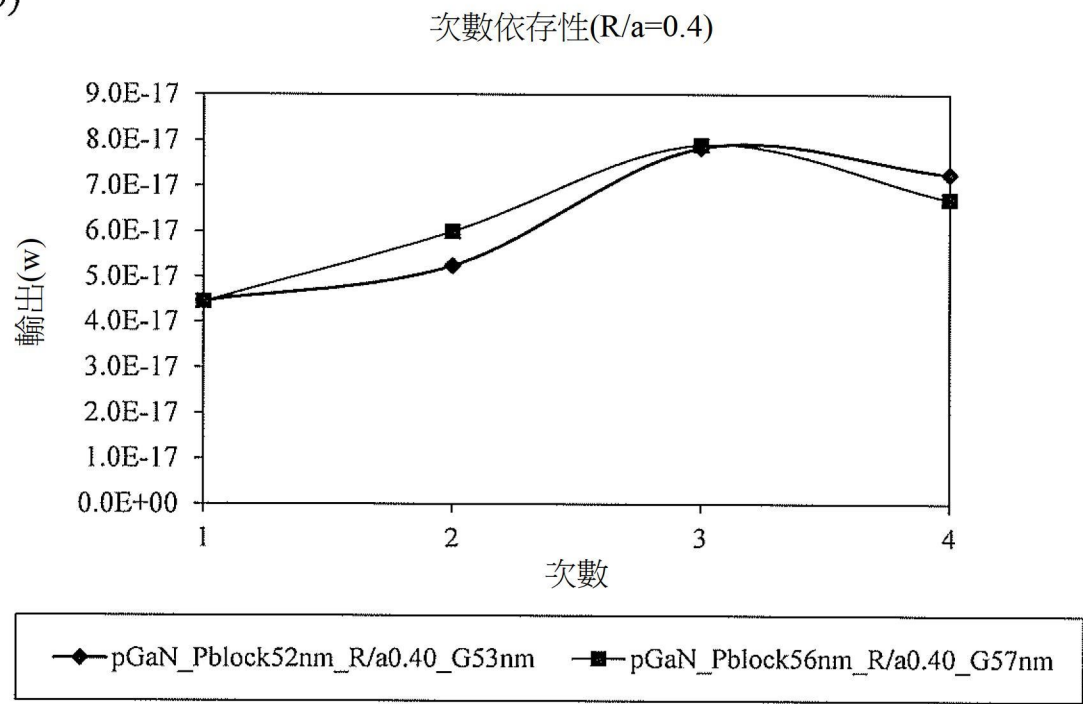


【圖12】

(a)

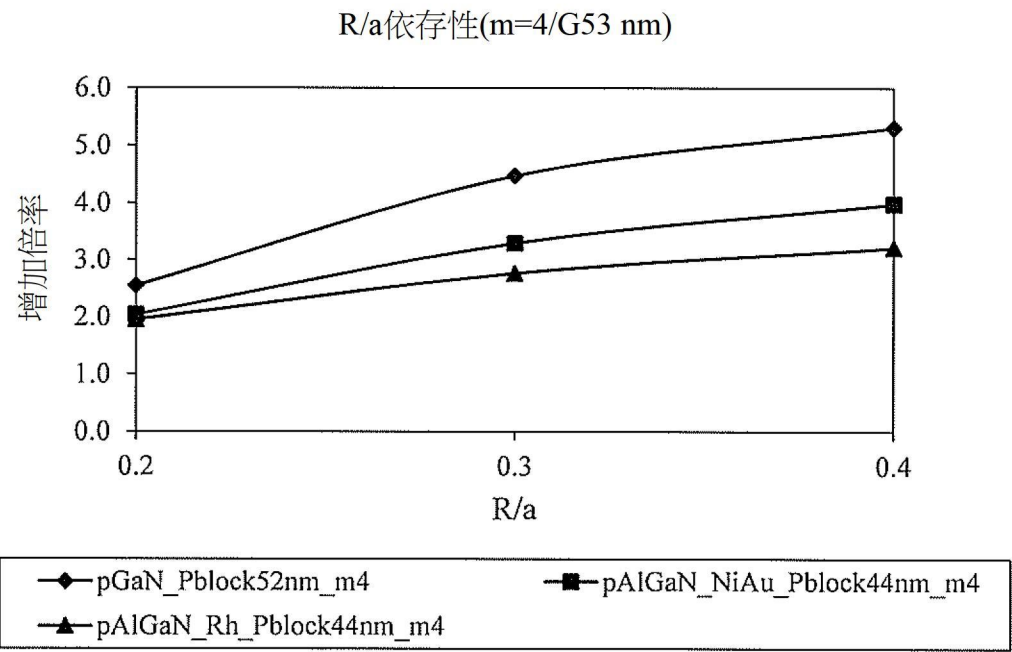


(b)

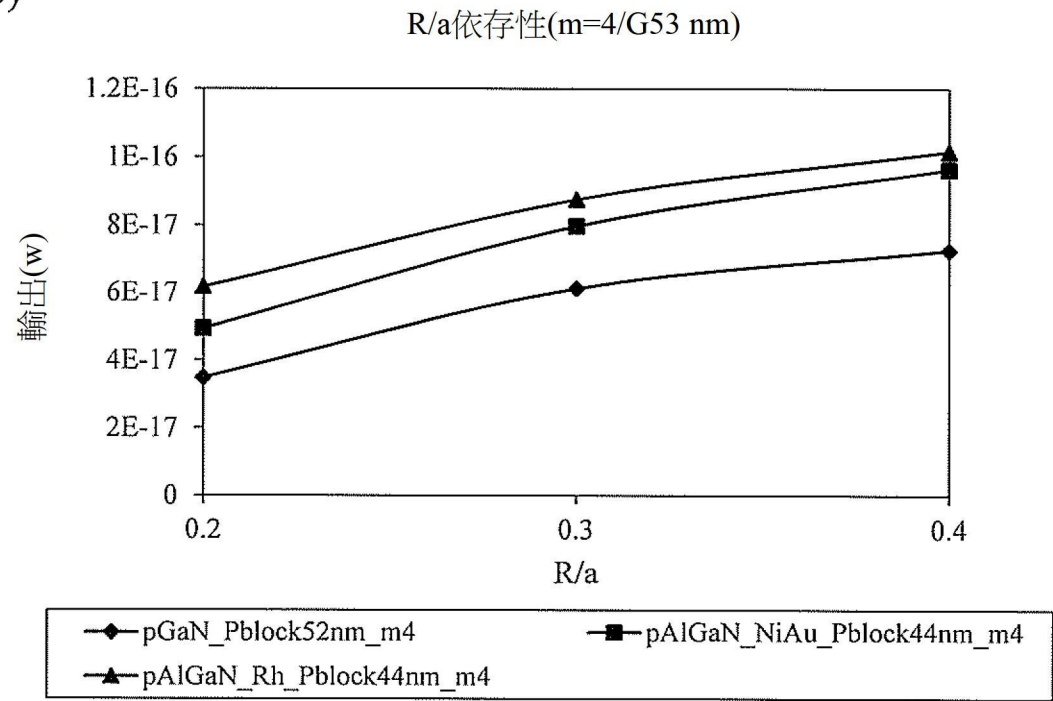


【圖13】

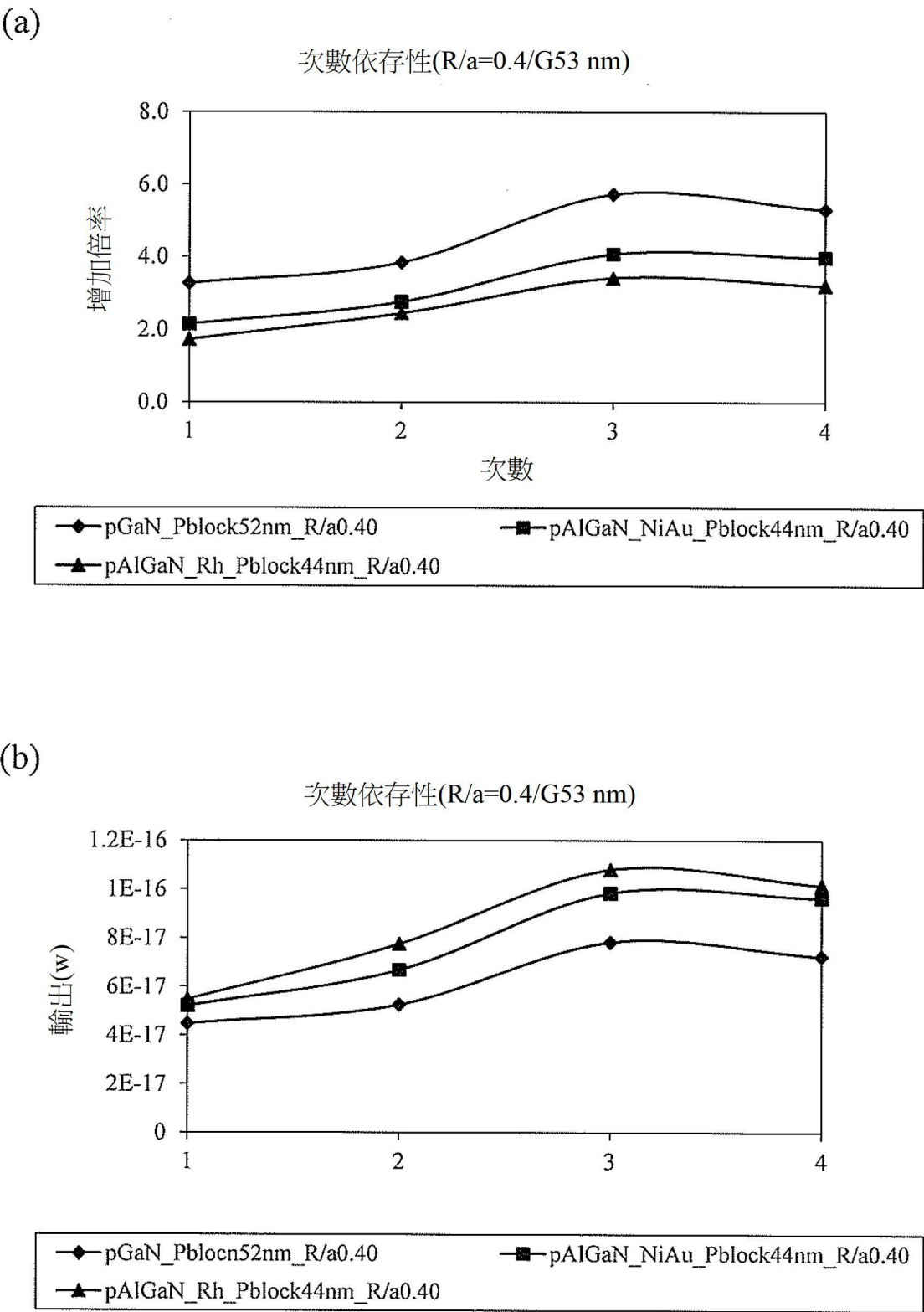
(a)



(b)

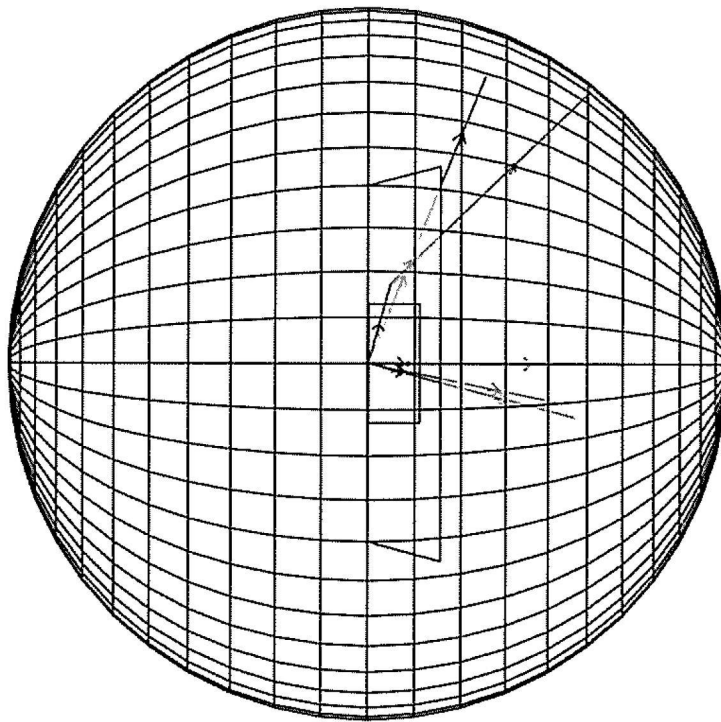


【圖14】



【圖15】

光線追蹤法之LEE解析模型[p-GaN Contact]



[解析條件]

藍寶石基板厚度：430 μm

AlN緩衝層厚度：500 nm

AlGaN層厚度：2 μm

pGaN Contact層厚度：200 nm

波長：275 nm

Ni/Au電極反射率：30%

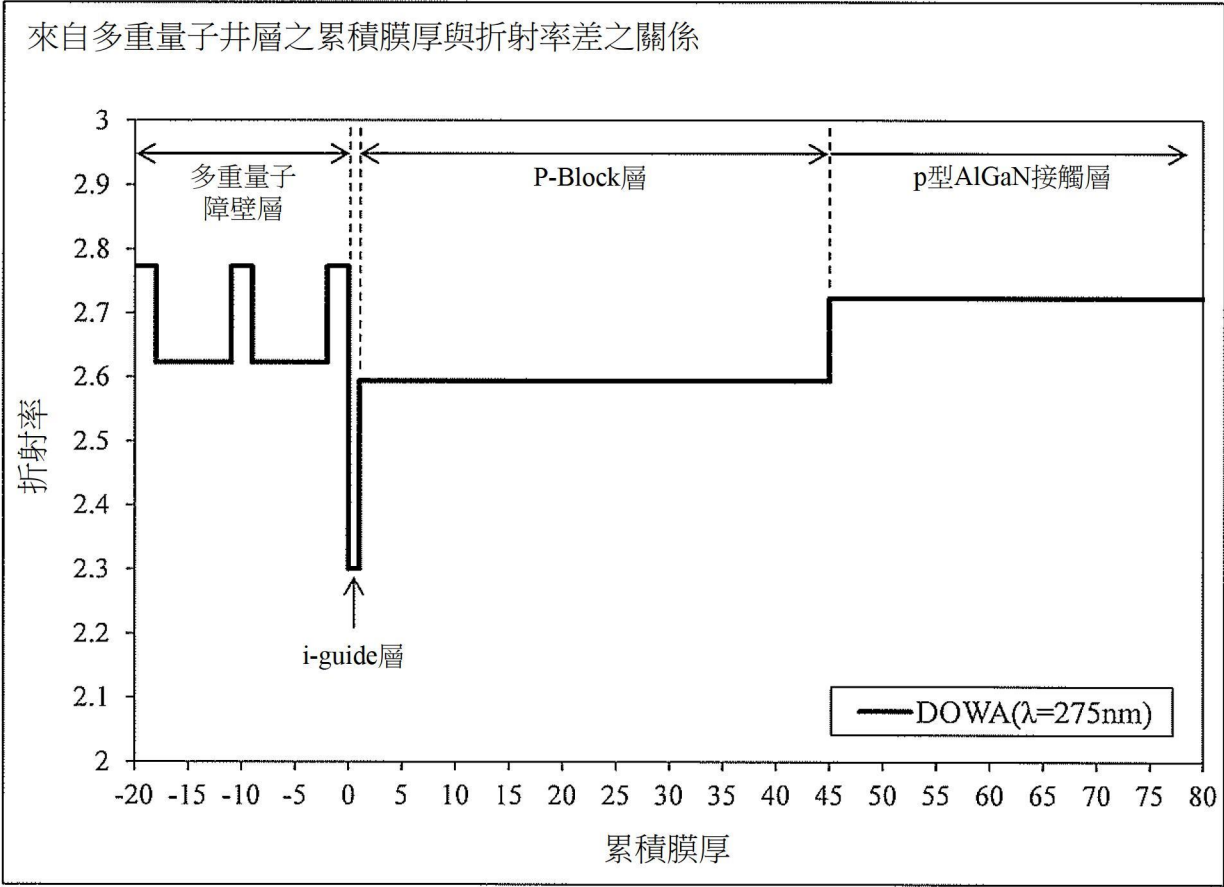
元件尺寸：1 mm $\square$

封裝側壁角度：75度

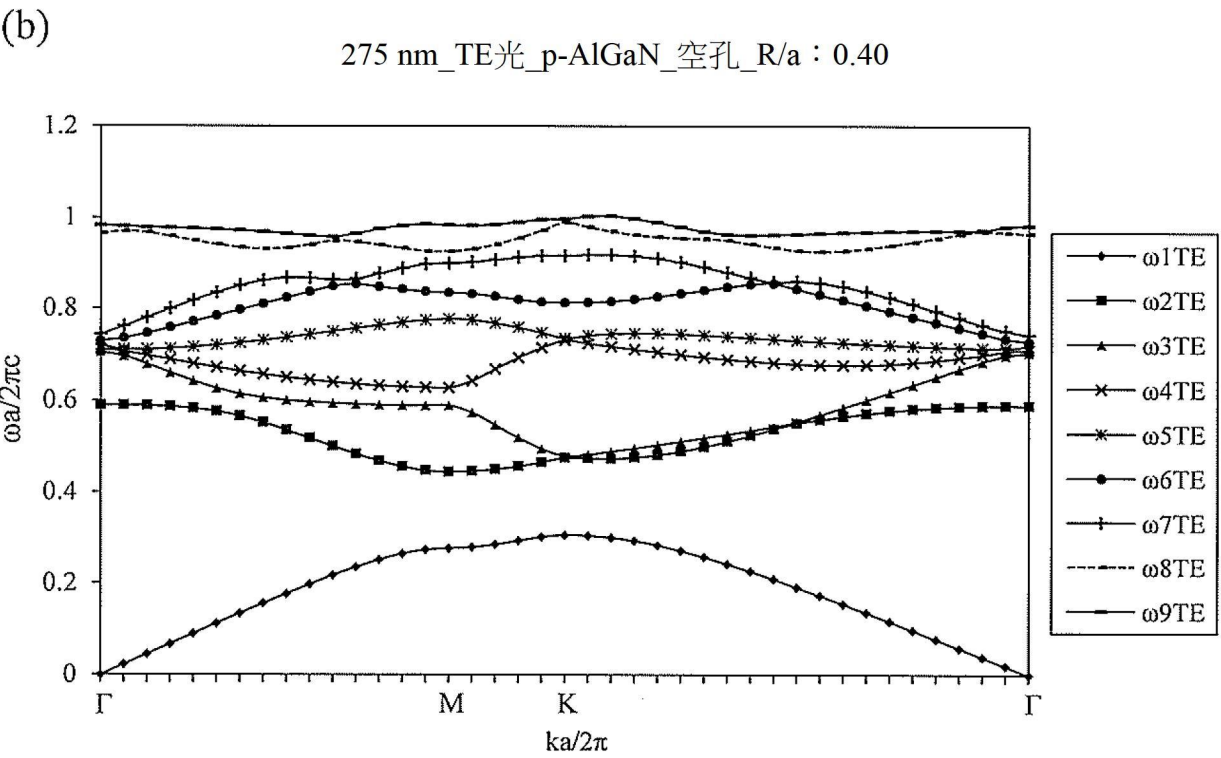
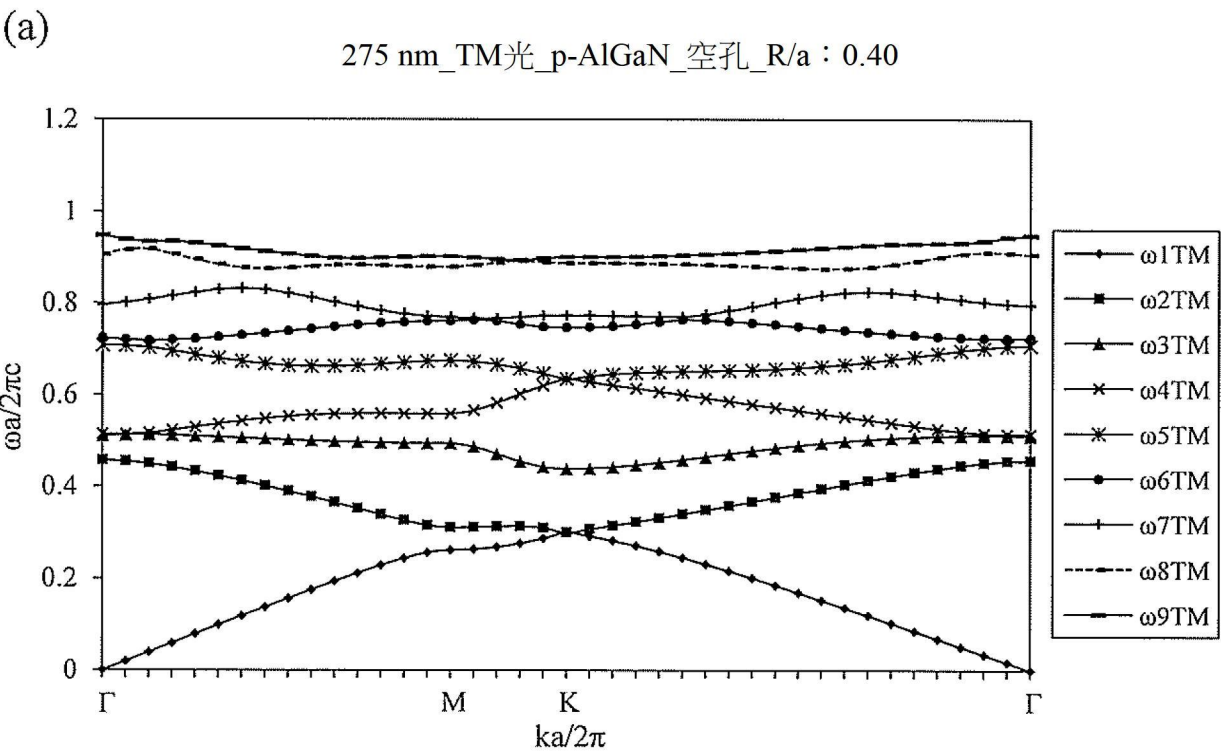
Al反射板反射率：92%

[結果]LEE：4.8%

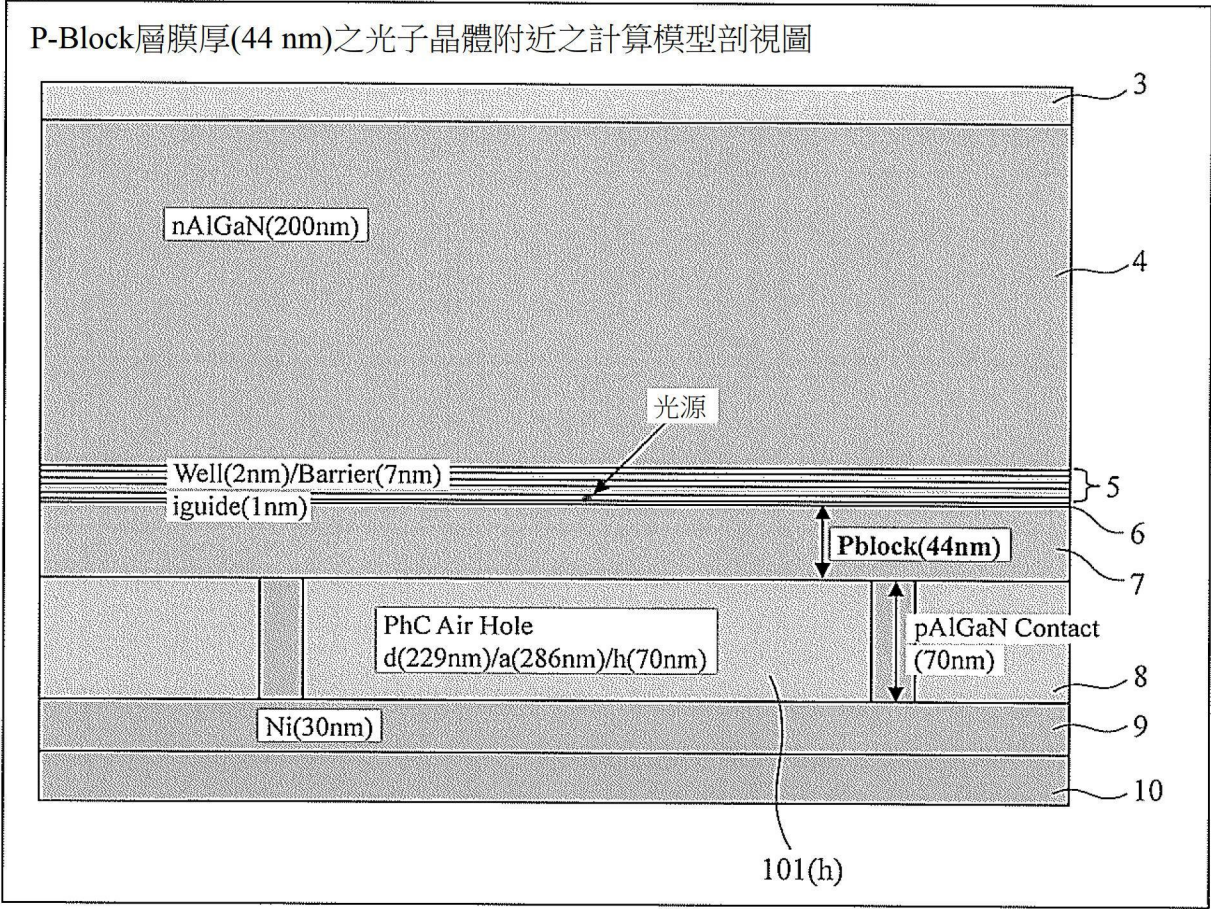
【圖16】



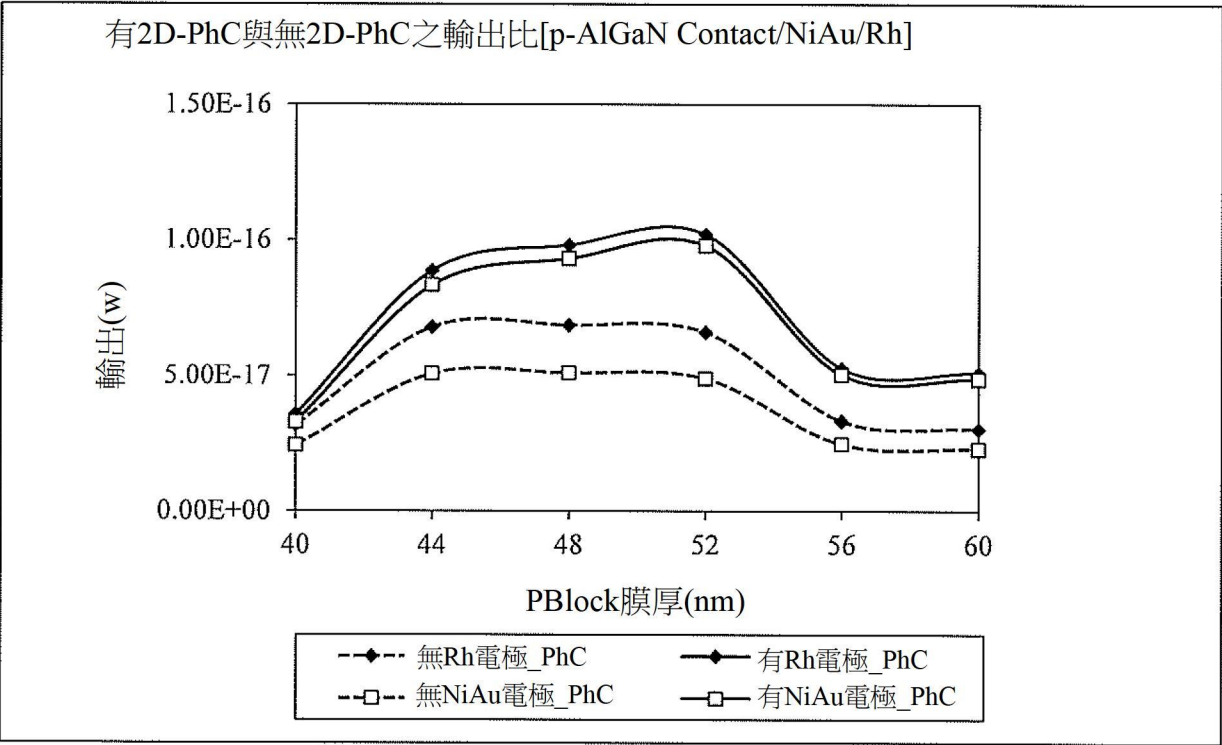
【圖17】



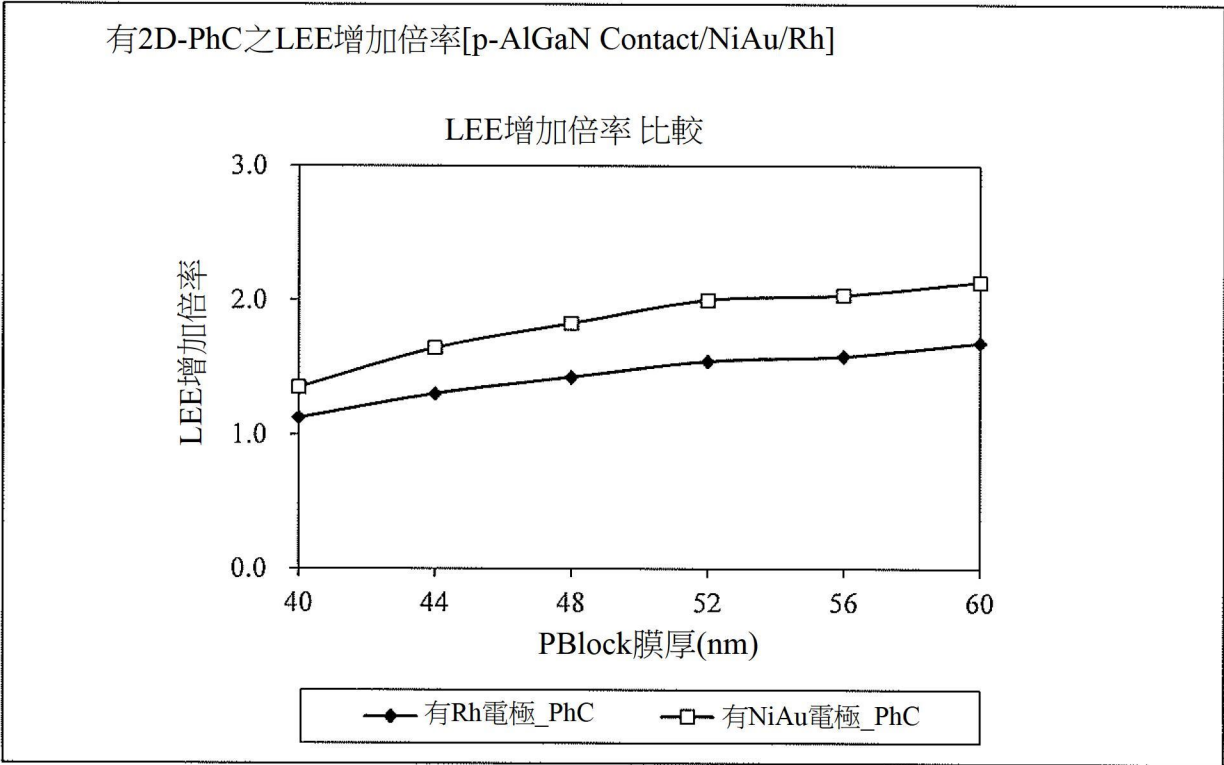
【圖18】



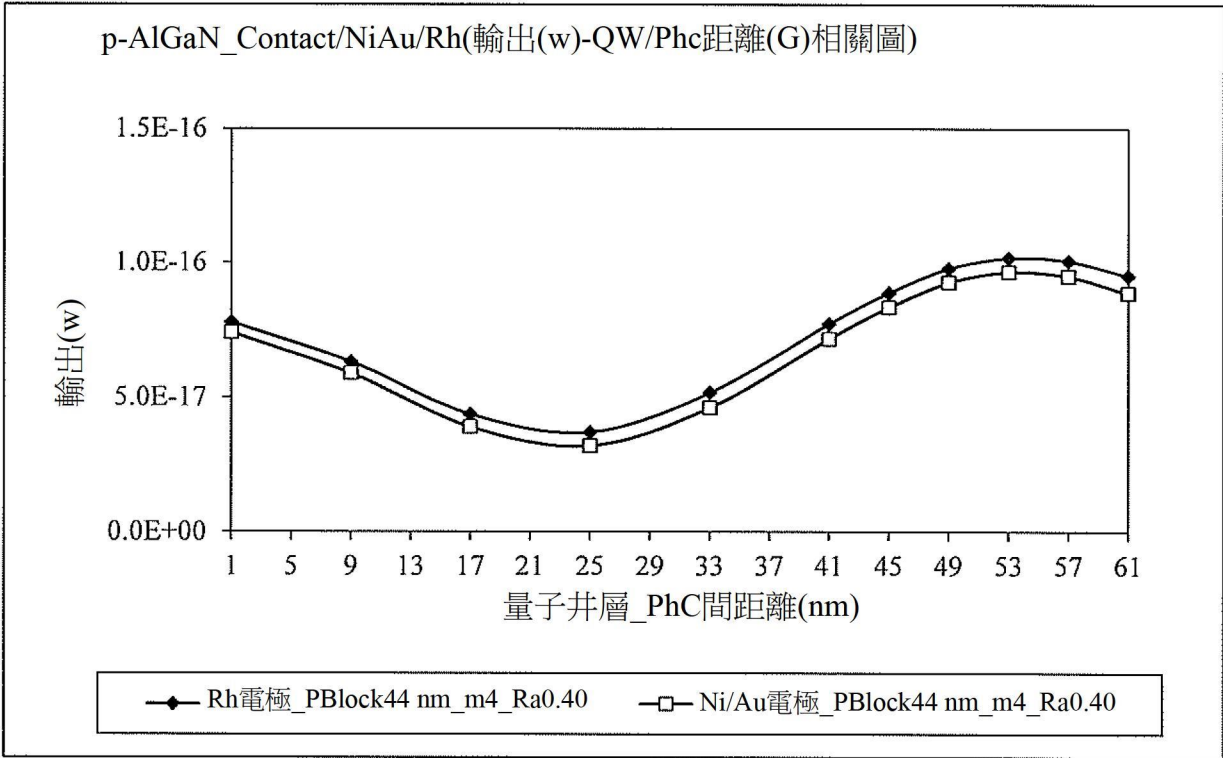
【圖19】



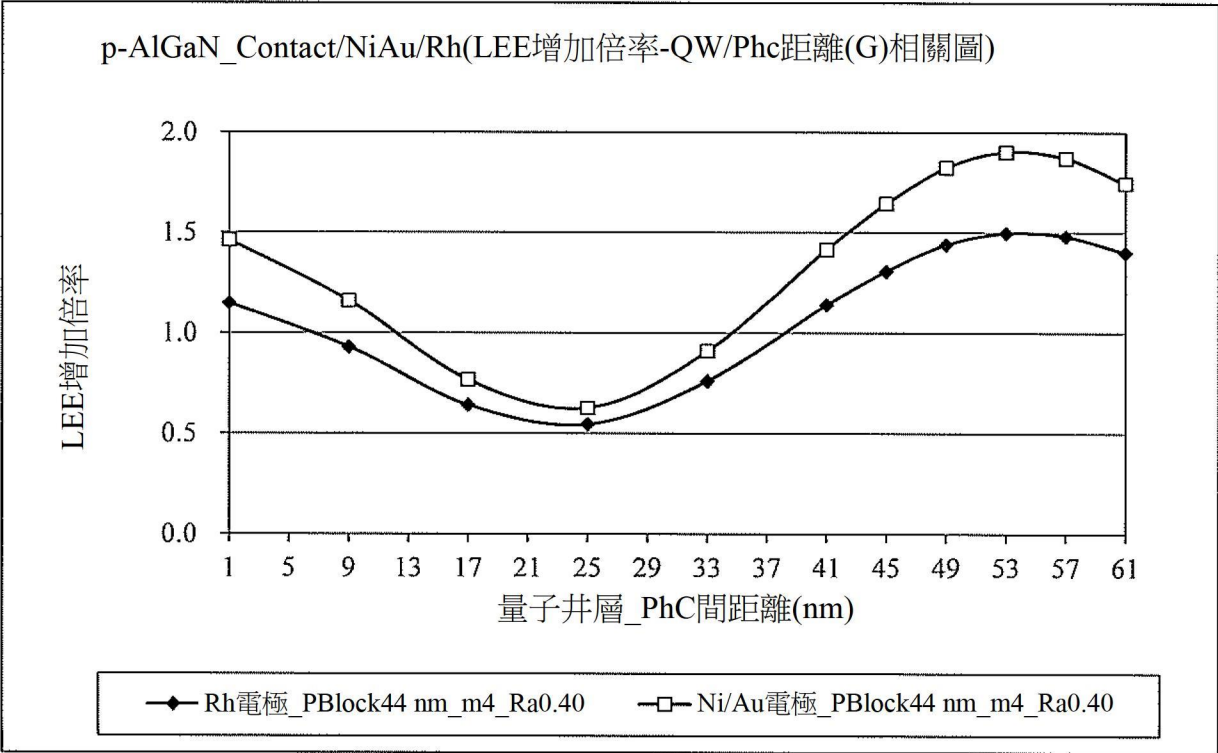
【圖20】



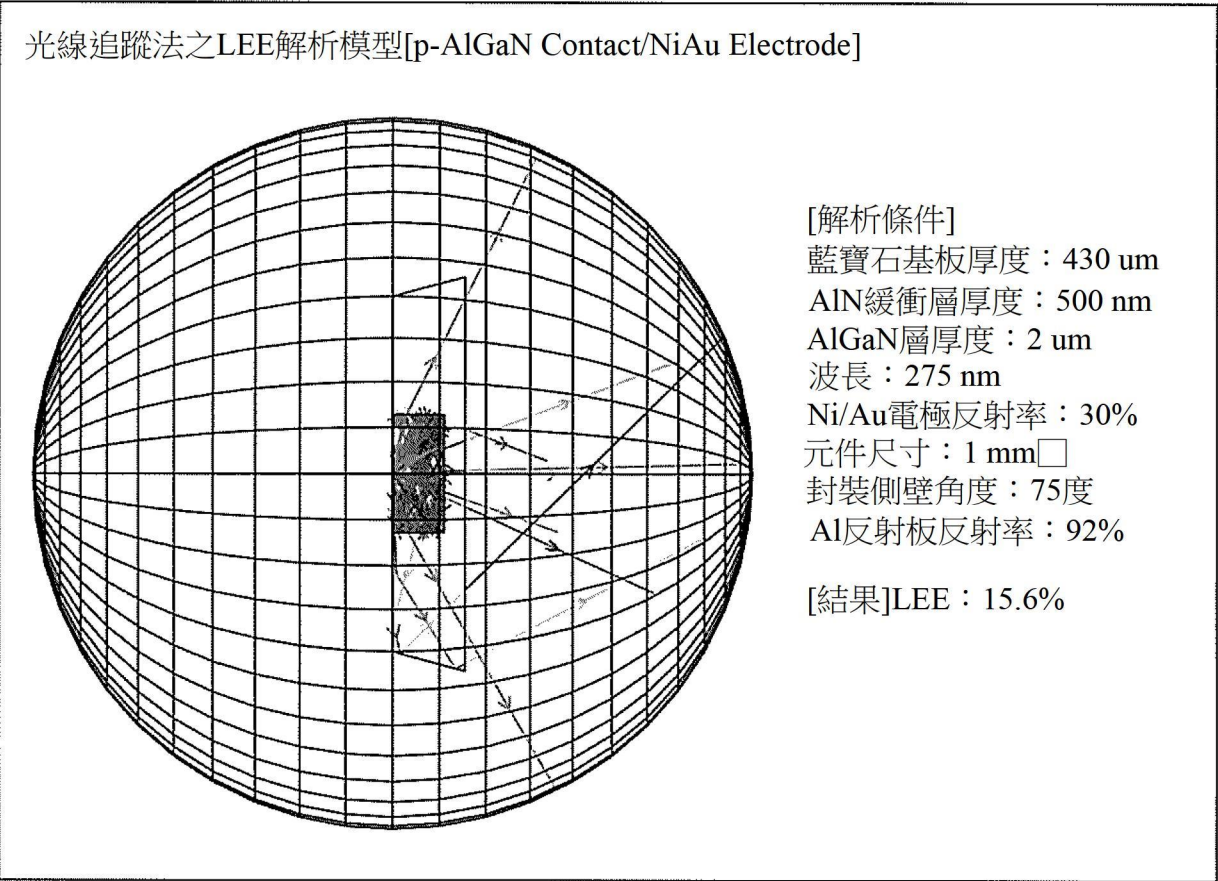
【圖21】



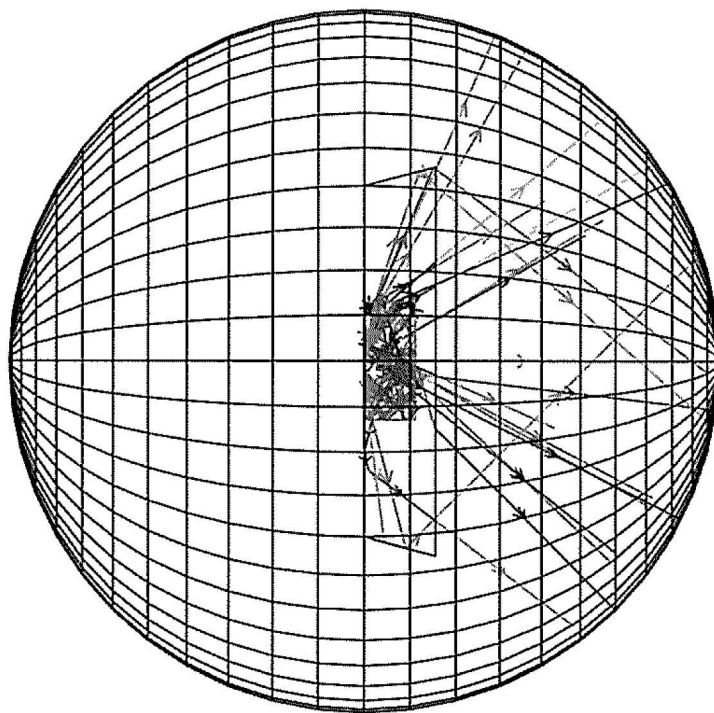
【圖22】



【圖23】



【圖24】

光線追蹤法之LEE解析模型[p-AlGa_N Contact/Rh Electrode]

[解析條件]

藍寶石基板厚度：430 μm

AlN緩衝層厚度：500 nm

AlGa_N層厚度：2 μm

波長：275 nm

Rh電極反射率：70%

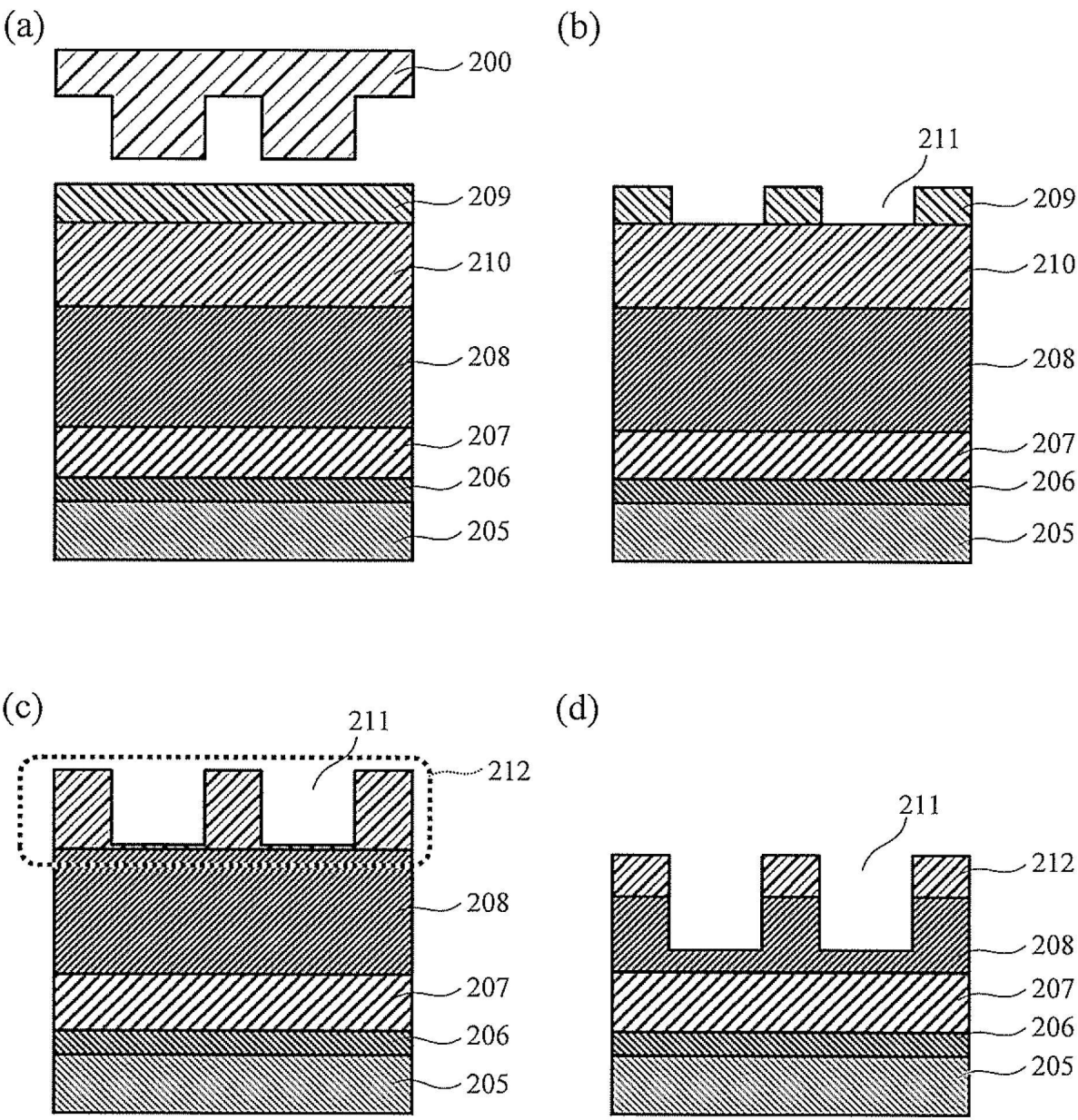
元件尺寸：1 mm $\square$

封裝側壁角度：75度

Al反射板反射率：92%

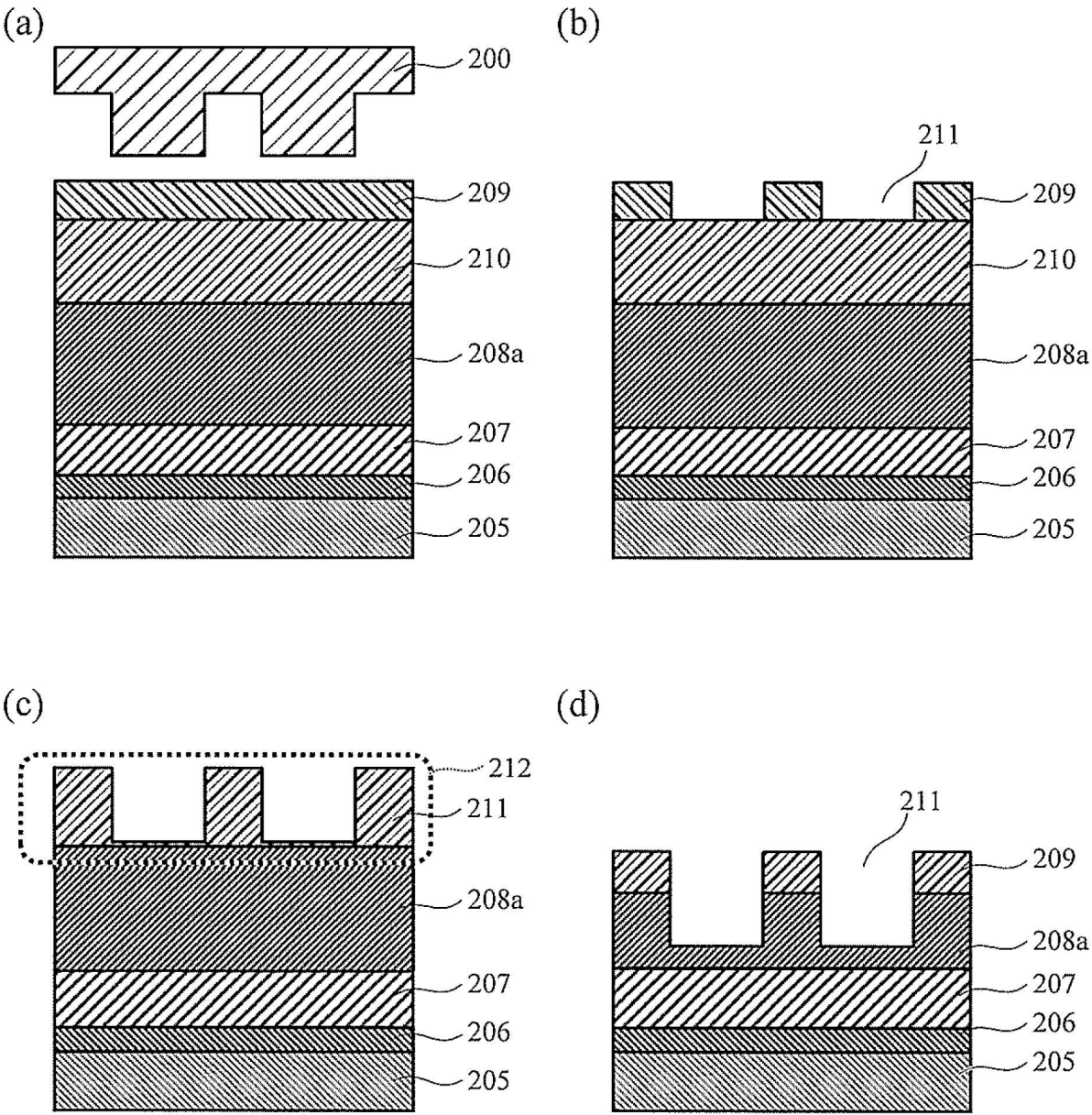
[結果]LEE：17.2%

【圖25】



- 200. 樹脂塑模
- 205. 多重量子井層
- 206. i-guide層
- 207. P-Block層
- 208. p型Ga_N接觸層
- 209. 上層抗蝕劑
- 210. 下層抗蝕劑
- 211. 光子晶體圖案(孔)
- 212. 遮罩

【圖26】



- 200. 樹脂塑模
- 205. 多重量子井層
- 206. i-guide層
- 207. P-Block層
- 208a. p型AlGa_N接觸層
- 209. 上層抗蝕劑
- 210. 下層抗蝕劑
- 211. 光子晶體圖案(孔)
- 212. 遮罩

【圖27】