

發明專利說明書

(本申請書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※申請案號：97133357

※申請日期：97年08月29日

※IPC分類：H01L 31/042 (2006.01)

一、發明名稱：

(中) 光電元件

(英)

二、申請人：(共 1 人)

1. 姓名：(中) 豐田自動車股份有限公司

(英) TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA

代表人：(中) 1. 瀧本正民

(英) 1. TAKIMOTO, MASATAMI

地址：(中) 日本國愛知縣豐田市豐田町一番地

(英) 1, Toyota-cho, Toyota-shi, Aichi 471-8571 Japan

國籍：(中英) 日本 JAPAN

三、發明人：(共 4 人)

1. 姓名：(中) 竹田康彥

(英) TAKEDA, YASUHIKO

國籍：(中) 日本

(英) JAPAN

2. 姓名：(中) 伊藤忠

(英) ITO, TADASHI

國籍：(中) 日本

(英) JAPAN

3. 姓名：(中) 元廣友美

(英) MOTOHIRO, TOMOYOSHI

國籍：(中) 日本

(英) JAPAN

4. 姓名：(中) 長島知理

(英) NAGASHIMA, TOMONORI

國籍：(中) 日本

四、聲明事項：

◎本案申請前已向下列國家（地區）申請專利 主張國際優先權：

【格式請依：受理國家（地區）；申請日；申請案號數 順序註記】

1. 日本 ; 2007/08/31 ; 2007-226277 有主張優先權

四、聲明事項：

◎本案申請前已向下列國家（地區）申請專利 主張國際優先權：

【格式請依：受理國家（地區）；申請日；申請案號數 順序註記】

1. 日本 ; 2007/08/31 ; 2007-226277 有主張優先權

九、發明說明

【發明所屬之技術領域】

本發明乃關於光電元件者。

【先前技術】

近年以來，做為不排出二氧化碳之乾淨能源，太陽能電池等之光電元件則倍受矚目。現今實用化之光電元件雖具有使用矽晶圓之稱之為「第 1 世代」的構造，但光電變換效率為低，相較於一般發電系統，每單位電力之成本會有較高之問題。

對於此第 1 世代之光電元件而言，另有稱之為「第 2 世代」之構造。即，有薄膜矽型（經由使矽層厚度變薄，減少使用原料、生產所需之能量、成本等）、CIGS 型（使用非 Si 系之半導體材料之銅、銦、鎵及硒者）、色素增感型等。此等第 2 世代之光電元件雖對於第 1 世代之光電元件而言，變換效率為相同或略為下降，但可較第 1 世代者成本低而製造之故，可大幅減低每單位電力之成本。

對於此第 2 世代而言，更有提案數個抑制成本之增加，大幅提升變換效率為目標之稱之為「第 3 世代」之構造者。此第 3 世代中最為期望之一者，即為熱載子型之光電元件。此乃將在半導體所成光吸收層內，經由光激發所生成之載子（電子或電洞），在經由聲子散亂該能量被散逸之前，藉由從光吸收層取出，以實現高變換效率之方式。對於如此熱載子型之光電元件之原理，例如記載於非專利

文獻 1~4 之中。

非專利文獻 1：Robert T. Ross et al. "Efficiency of hot-carrier solar energy converters", American Institute of Physics, Journal of Applied Physics, May 1982, Vol. 53, No. 5, pp. 3813-3818

非專利文獻 2：Peter Würfel, "Solar energy conversion with hot electrons from impact ionization", Elsevier, Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, Vol. 46, pp. 43-52

非專利文獻 3：G. J. Conibeer et al., "On achievable efficiencies of manufactured Hot Carrier solar cell absorbers", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, pp. 234-237

非專利文獻 4：Peter Würfel, "Particle Conservation in the Hot-carrier Solar Cell", Wiley InterScience, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 18 February 2005, Vol. 13, pp. 277-285

【發明內容】

〔發明欲解決之課題〕

上述非專利文獻等之中，熱載子型光電元件之理論上之變換效率乃記載有 80% 以上。但是，根據本發明人之檢討結果，實際之變換效率不過是 50% 程度。如此，經由考量的結果則如后所述。一般而言，光吸收層之載子密度愈

大，變換效率有變高的傾向。而上述 80%之變換效率乃以載子密度充分為大之時為前提。而為使載子密度變大，需令在於光吸收層中，從經由光激發而產生之載子，至該載子向光吸收層之外部被取出之時間（滯留時間）變長。

在此，圖 10 乃顯示無視以往之光電元件之載子之能量之損失時之光吸收層內之載子密度與變換效率之關係的計算結果之圖。圖 10 中，圖表 G11~G16 乃顯示各別載子溫度為 300 [K]、600 [K]、1200 [K]、2400 [K]、3600 [K] 及 4800 [K] 時之載子密度與變換效率之關係。然而，圖 10 中，令電子及電洞之有效質量各為 0.4，聚光倍率為 1000 倍。參照圖 10 時，可知各載子溫度中，載子密度愈大，變換效率亦跟著變高。

但是，實際上，使光吸收層內之載子之滯留時間變長時，載子晶格相互作用之起因於聲子散亂之能量損失則愈發明顯，結果無法連結到變換效率的提升。因此，即使是熱載子型之光電元件，實際之變換效率亦會被抑制於 50% 之程度。

本發明乃有鑑於上述問題點而進行者，以提供光吸收層之載子之滯留時間即使為短，亦可有效率提升變換效率之熱載子型之光電元件為目的者。

〔為解決課題之手段〕

為解決上述課題，本發明所成之光電元件乃具備：吸收光線，生成電子及電洞之光吸收層，和鄰接於光吸收層

之一方之面的電子移動層、和鄰接於光吸收層之另一方之面的電洞移動層、和設於電子移動層上之負電極、和設於電洞移動層上之正電極；電子移動層乃具有較光吸收層之傳導帶之能量寬度為窄之能量寬度，具有選擇性通過特定之第 1 之能量位準之電子的傳導帶；電洞移動層乃具有較光吸收層之價電子帶之能量寬度為窄之能量寬度，具有選擇性通過特定之第 2 之能量之電洞的價電子帶；光吸收層乃含有 p 型不純物或 n 型不純物為特徵者。

本發明人等對於熱載子型之光電元件，則矚目於以下之處所。即，於熱載子型之光電元件中，將在於光吸收層所產生之高溫之電子及電洞，維持該能量（溫度）下，從光吸收層取出。

但是，電子及電洞之移動目的地之電極之溫度幾近為室溫之故，當電子及電洞從光吸收層移動至電極之時，熵會上昇。即，會損失此熵增大的能量部分，而使得變換效率被抑制。

於上述光電元件中，光吸收層含有 p 型不純物（受體）或 n 型不純物（供體）者。例如光吸收層包含 p 型不純物時，從預先摻雜之 p 型不純物所放出之電洞之溫度為低（室溫附近）之故，即使光激發所產生之電洞之能量為高，平均電洞溫度亦會接近室溫。因此，可使此電洞從光吸收層取出之時之電洞與電極之溫度差變小，抑制關於電洞之熵之增大。又，亦與光吸收層包含 n 型不純物時相同，從預先摻雜之 n 型不純物所放出之電子之溫度為低（室溫

附近)之故，即使光激發所產生之電子之能量為高，平均電洞子度亦會接近室溫。因此，可使此電子從光吸收層取出之時之電子與電極之溫度差變小，抑制關於電子之熵之增大。

如此，根據上述光電元件時，可抑制電子或電洞從光吸收層向電極移動時之熵的增大之故，即使光吸收層之載子之滯留時間為短時，亦可有效提高變換效率。

又，光電元件乃光吸收層含有 p 型不純物，電洞移動層之價電子帶乃包含前述光吸收層之價電子帶之上端之能量準位者為特徵亦可。光吸收層含有 p 型不純物之時，經由從預先摻雜之 p 型不純物放出之電洞，光吸收層整體之電洞之能量分布則向價電子帶之上端附近偏移。因此，經由電洞移動層之價電子帶包含光吸收層之價電子帶之上端之能量準位，使偏移在光吸收層之價電子帶之上端附近的電洞，可藉由電洞移動層之價電子帶，有效率向正電極移動之故，可提高光電元件之變換效率。又，此時之電洞移動層之價電子帶之上端之能量準位乃較光吸收層之價電子帶之上端之能量位準為高，較光吸收層之電洞之准費米能準位為低則更佳。

又，光電元件乃光吸收層含有 n 型不純物，電子移動層之傳導帶乃包含前述光吸收層之傳導帶之下端之能量準位為特徵亦可。光吸收層含有 n 型不純物之時，亦與上述相同，經由從預先摻雜之 n 型不純物放出之電子，光吸收層整體之電子之能量分布則向傳導帶之下端附近偏移。因

此，經由電子移動層之傳導帶包含光吸收層之傳導帶之下端之能量準位，使偏移在光吸收層之傳導帶之下端附近的電子，可藉由電子移動層之傳導帶，有效率向負電極移動之故，可提高光電元件之變換效率。又，此時，電洞移動層之傳導帶之下端之能量準位乃較光吸收層之傳導帶之下端之能量位準為低，較光吸收層之電子之准費米能準位為高則更佳。

又，光電元件乃光吸收層含有 p 型不純物，第 2 之能量準位乃實質上與光吸收層之價電子帶之上端之能量準位一致為特徵亦可。如上所述，光吸收層含有 p 型不純物之時，光吸收層整體之電洞之能量分布則向價電子帶之上端附近偏移。因此，選擇性通過電洞移動層之價電子帶之第 2 之能量準位，經由實質上與光吸收層之價電子帶之上端之能量準位呈一致時，電洞可有效率電洞移動層，而可提高光電元件之變換效率。

又，光電元件乃光吸收層含有 n 型不純物，第 1 之能量準位乃實質上與光吸收層之價電子帶之下端之能量準位一致為特徵亦可。光吸收層含有 n 型不純物之時，亦與上述相同，光吸收層整體之電子之能量分布則向傳導帶之下端附近偏移。因此，選擇性通過電子移動層之傳導帶之第 1 之能量準位，經由實質上與光吸收層之傳導帶之下端之能量準位呈一致時，電子可有效率電子移動層，而可提高光電元件之變換效率。

光電元件乃光吸收層之 p 型不純物或 n 型不純物之濃

度，為令入射光強度做為 A [kW/m²] 時，是為 $A \times 10^{13}$ [cm⁻³] 以上為特徵者亦可。由此，光吸收層中，由於可使從預先摻雜之 p 型不純物或 n 型不純物所放出之電洞（電子）之密度較光激發所產生之電洞（電子）之密度充分為大之故，可使光吸收層整體之電洞（電子）溫度有效率地接近室溫。然而，做為入射光強度 A [kW/m²] 之數值，例如為基準太陽光之強度（1 [kW/m²]、亦表現為 1 [Sun]）乘上聚光倍率之數值為佳。例如非聚光型之光電元件中，入射光強度 A 為 1 [kW/m²]，1000 倍聚光型之光電元件中，入射光強度 A 為 1000 [kW/m²]。

〔發明之效果〕

根據本發明之光電元件時，光吸收層之載子的滯留時間即使為短，亦可有效提升變換效率。

【實施方式】

以下，參照附加圖面，詳細說明本發明所成光電元件之實施形態。然而，於圖面說明中，同一要素則附上同一符號，省略重覆說明。

〔實施形態〕

對於本發明所成光電元件之一實施形態加以說明。在此之前，首先對於熱載子型之光電元件之發電機構加以詳細說明。

圖 1 乃模式性顯示利用半導體之 pn 接合之以往之光電元件之能量帶圖。於光電元件中，吸收較半導體之能帶隙為高之能量之光線 L 時，首先，電子則激發至較傳導帶下端為高之能量準位。又，此時電洞 12 乃位於較價電子帶上端為低之能量準位。接著，電子 11、電洞 12 乃與半導體之結晶晶格相互作用，生成聲子之狀況下，各別向傳導帶下端、價電子帶上端移動，緩和該能量（圖中之箭頭 P1）。於此過程中，經由聲子之生成而消耗的能量，無法做為電力向外部取之故，而成為抑制光電元件之發電效率之原因。然而，光電元件內中，於此過程之外， pn 接合之電壓下降（圖中之箭頭 P2）、與取出電極接合迎分的電壓下降（圖中之箭頭 P3）、電子 11 及電洞 12 之再結合（圖中之箭頭 P4）之各過程，雖亦成為抑制發電效率之原因，但與此等比較，箭頭 P1 所示能量緩和過程乃對於發電效率有最大的影響。

圖 2 (a) ~ (h) 模式顯示在半導體，光被吸收時之電子及正孔之能量分布之變化圖。圖 2 中，(a) 乃吸收光線之前之電子及電洞之能量分布圖。對此，吸收較能帶隙為高之能量之光時，如 (b) 所示，生成電子-電洞對。此階段中，電子及正孔之各別能量分布，乃從費米分布遠離，為非熱平衡之狀態之故，無法定義此等之溫度。然後，如 (c) 及 d) 所示，於不足 1 微微 (pico) 秒之期間，電子乃與其他電子相互作用，電洞則與其他電洞相互作用，電子及電洞則各於傳導帶及價電子帶，達成熱平衡狀態

。然而，(b) ~ (d) 所示過程中，只有電子之彼此，電洞彼此收受能量之故，系統整體之能量是不會有損失的。之後，如(e)及(f)所示，於大約數微微秒間，與結晶晶格相互作用，一邊生成光學聲子下，一邊使電子到達傳達帶下端，使電洞到達價電子帶上端。然而，生成之光學聲子乃於數十微微秒間，轉成音響聲子。此(e)及(f)所示過程中，起因於光學聲子及音響聲子之散亂，產生能量損失。之後，如(g)及(h)所示，藉由輻射或非輻射過程，再結合電子及電洞。熱載子型之光電元件乃電子及電洞之能量緩和時，即經由晶格相互作用，生成光學聲子之前之“熱”狀態之期間，可使電子及電洞向光吸收層外部取出。

熱載子型之光電元件乃如圖 3 所示，將具有能量帶寬度極小之傳導帶 16a 之電子移動層（能量選擇性連接層）16，鄰接於光吸收層 17 加以設置，僅特定之能量準位之電子 18a，可藉由電子移動層 16，到達電極者。較電子 18a 高能量準位之電子 18b、較電子 18a 低能量準位之電子 18c 乃相互進行能量之收受與再放出，到達可通過電子移動層 16 之能量準位之狀態下，藉由電子移動層 16 到達電極，賦予輸出。結果，高能量準位之電子可防止生成光聲子之過程（能量緩和過程），減低能量損失。然而，關於圖 3 之前述說明雖為關於電子之移動者，但對於電洞之移動，亦經由同樣之原理，可減低能量損失。

然而，做為抑制圖 2 之(e)及(f)所示之過程（能

量緩和過程) 所造成之能量損失，提升光電元件之發電效率之模式，除了熱載子型之外，串列型者亦有被實用化。串列型乃指能帶隙不同之複數種類之 pn 接合層呈光學性直列連接者。於光之入射側，配置能帶隙大之材料所成 pn 接合層時，高能量之光線雖在此吸收，低能量之光線則透過此，於配設於其後之能帶隙小之材料所成 pn 接合層加以吸收。為此，與具備一個 pn 接合之光電元件比較，可使吸收之光之能量與能帶隙之差變小之故，可減低電子及電洞之能量緩和所造成之損失。但是，串列型之時，能帶隙不同之 pn 接合之組合有其限制之故，更難以減低能量損失。

熱載子型之時，假使將激發之所有電子及正孔，在生成光學聲子之前，可取出至光吸收層之外部時，較串列型者可實現更高之變換效率。又，與組合多數之 pn 接合之串列型比較，元件構造為單純，結果可以較低成本加以製造。

圖 4 (a) 顯示一般熱載子型光電元件之能量帶構造圖。圖 4 (a) 所示光電元件乃具備具有較窄之能帶隙的半導體所成光吸收層 20、和做為鄰接於光吸收層 20 之兩側之能量選擇性連接層的電洞移動層 21 及電子移動層 22、和為各別取出電子及電洞之金屬電極 (正電極 23 及負電極 24) 。

光吸收層 20 乃具有傳導帶 20a、價電子帶 20b 及禁止帶 20c。電子移動層 22 乃鄰接於光吸收層 20 之一方之面

而加以配置，具有傳導帶 22a。傳導帶 22a 乃與光吸收層 20 之傳導帶 20a 比較，能量帶寬度極小，僅特定之能量準位（能量 E_e ）之電子，可通過此傳導帶 22a，到達負電極 24。電洞移動層 21 乃鄰接於光吸收層 20 之另一方之面而加以配置，具有價電子帶 21a。價電子帶 21a 乃與光吸收層 20 之價電子帶 20b 比較，能量帶寬度極小，僅特定之能量準位（能量 E_h ）之電洞，可通過此價電子帶 21a，到達正電極 23。然而，電子移動層 22 之傳導帶 22a 之能量準位 E_e 乃設定較光吸收層 20 之傳導帶 20a 之下端之能量準位為高。同樣地，電洞移動層 21 之價電子帶 21a 之能量準位 E_h 乃設定較光吸收層 20 之價電子帶 20b 之上端之能量準位為低。然而，圖 4 (a) 所示虛線 Q1 及 Q2 各別為光吸收層 2 之電子及電洞各別之准費米準位。

於此光電元件，當光線入射時，在於光吸收層 20 產生如圖 4 (b) 所示載子之能量分布。圖 4 (b) 中，分布 D_e 乃顯示傳導帶 20a 之電子之能量分布，分布 D_h 乃顯示價電子帶 20b 之電洞之能量分布。如此，於光吸收層 20 入射光線時，於光吸收層 20，對稱性分布電子及電洞之能量準位。此等之電子及電洞乃在生成光學聲子（即產生能量緩和）之前，透過各別之傳導帶 22a 及價電子帶 21a，由負電極 24 及正電極 23 取出。

以如上所述一般之熱載子型光電元件之發電機構為前提，對於本發明所成之光電元件之實施形態，說明如下。圖 5 乃顯示關於實施形態之光電元件 1 之構成之斜視圖。

參照圖 5 時，光電元件 1 乃具備光吸收層 2、電子移動層 3、電洞移動層 4、負電極 5 及正電極 6。

光吸收層 2 乃吸收太陽光等之光 L ，生成具有相當於該波長之能量之載子（電子 11 及電洞 12）之層。光吸收層 2 乃例如由 Si、Ge 或 III-V 族化合物等之半導體材料所成，實質上摻雜 n 型不純物或 p 型不純物。光吸收層之此等不純物之濃度，為令入射光強度做為 A [kW/m²] 時，是為 $A \times 10^{13}$ [cm⁻³] 以上為適切者。做為一實施例，光吸收層 2 以能帶隙為 0.5~1.0[eV]之材料為主成分而構成。

電子移動層 3 乃鄰接於光吸收層 2 之一方之面 2a 而加以設置。電子移動層 3 乃使具有較光吸收層之傳導帶之能量寬度為窄之能量寬度之傳導帶而構成，由此，選擇性通過特定之能量位準（第 1 之能量位準）之電子。做為如此電子移動層 3 之構成，例如於障壁範圍 31 中，含有量子井層、量子細線、量子點之載子封閉效果（量子效果）之半導體量子構造 32 即可。此時，電子移動層 3 中，經由半導體量子構造 32 之載子封閉效果，電子可存在之傳導帶之能量帶寬度則會變窄。一實施例中，障壁範圍 31 以能帶隙為 4.5~5.0[eV]之半導體材料所構成，厚度為 2~10[nm]。又，令半導體量子構造 32 以量子點構成之時，量子點乃以能帶隙為 1.8~2.2[eV]之半導體材料所構成，該點徑（ ϕ ）為 2~5[nm]。

負電極 5 乃設於電子移動層 3 上。光吸收層 2 中生成之電子乃通過電子移動層 3，到達負電極 5，在此加以收

集。負電極 5 乃為使向光吸收層 2 入射之光線被透過，例如經由透明導電膜加以構成。更且，負電極 5 乃以組合高折射膜與低折射膜之反射防止膜加以塗佈亦可。又，負電極 5 乃代替透明電極膜，經由金屬製梳型電極加以構成亦可。

電洞移動層 4 乃鄰接於光吸收層 2 之另一方之面 2b 而加以設置。電洞移動層 4 乃使具有較光吸收層之價電子帶之能量寬度為窄之能量寬度之價電子帶而構成，由此，選擇性通過特定之能量位準（第 2 之能量位準）之電洞。做為如此電洞移動層 4 之構成，可適用與前述電子移動層 3 同樣之構成，例如於障壁範圍 41 中，含有量子井層、量子細線、量子點之載子封閉效果（量子效果）之半導體量子構造 42 即可。此時，經由半導體量子構造 42 之載子封閉效果，電洞可存在之價電子帶之能量帶寬度則會變窄。一實施例中，障壁範圍 41 以能帶隙為 4.0~5.0[eV]之半導體材料所構成，厚度為 2~10[nm]。又，令半導體量子構造 42 以量子點構成之時，量子點乃以能帶隙為 1.2~1.8[eV]之半導體材料所構成，該點徑（ ϕ ）為 4~7[nm]。

正電極 6 乃設於電洞移動層 4 上。光吸收層 2 中生成之電洞乃通過電洞移動層 4，到達正電極 6，在此加以收集。正電極 6 乃例如將鋁等之金屬做為材料加以構成。然而，本實施形態中，雖於光吸收層 2 之光入射面（一方之面 2a）上，設置負電極 5，於背面對（另一方之面 2b），

設置正電極 6，於光入面上設置正電極，於背面上設置負電極之構成亦可。此時，電洞移動層乃鄰接於光吸收層之光入射面而設置，電子移動層乃鄰接於光吸收層之背面而設置。又，正電極乃使光線透過，藉由透明導電膜等而構成，負電極乃經由金屬膜所構成。

圖 6 (a) 及圖 7 (a) 乃顯示本實施形態之光電元件 1 之能量帶構造圖。圖 6 (a) 乃顯示在光吸收層 2，摻雜 p 型不純物之之情形，圖 7 (a) 乃顯示在光吸收層 2，摻雜 n 型不純物之之情形。如圖 6 (a) 及圖 7 (a) 所示，光電元件 1 之光吸收層 2 乃具有傳導帶 2c、價電子帶 2d 及禁止帶 2e，禁止帶 2e 之能量間隙 ε_g 乃比較上變得較小。又，於光吸收層 2 摻雜 p 型不純物之時，如圖 6 (a) 所示，對於能量準位 E_c 、 E_h 而言之傳導帶 2c 下端之能量準位 E_c 及價電子帶 2d 上端之能量準位 E_v 之高度乃相較於非摻雜之時 (圖 4 (a))，各別變得較低。然而，圖中所示虛線 Q1 及 Q2 各別為光吸收層 2 之電子及電洞各別之准費米準位。

鄰接於光吸收層 2 之一方之面的電子移動層 3 乃具有選擇性通過特定能量準位 (第 1 之能量準位) E_c 之電子的傳導帶。傳導帶 3a 乃與光吸收層 2 之傳導帶 2c 比較，能量帶寬度極小，僅特定之能量準位 E_c 之電子，可通過此傳導帶 3a，到達負電極 5。

又，鄰接於光吸收層 2 之另一方之面的電洞移動層 4 乃具有選擇性通過特定能量準位 (第 2 之能量準位) E_h 之

電洞的價電子帶 4a。價電子帶 4a 乃與光吸收層 2 之價電子帶 2d 比較，能量帶寬度極小，僅特定之能量準位 E_h 之電洞，可通過此價電子帶 4a，到達正電極 6。

於光吸收層 2 摻雜 p 型不純物之時，如圖 6 (a) 所示，電洞移動層 4 之價電子帶 4a 乃包含光吸收層 2 之價電子帶 2d 上端之能量準位 E_v 而加以設定。更佳而言，電洞移動層 4 之價電子帶 4a 之上端之能量準位乃較光吸收層 2 之價電子帶 2d 之上端之能量位準 E_v 為高，較光吸收層 2 之電洞之准費米能準位 Q_2 為低地加以設置。又，電洞移動層 4 之價電子帶 4a 下端之能量準位乃設定成較光吸收層 2 之價電子帶 2d 之上端之能量準位 E_v 為低。更且，電洞移動層 4 之價電子帶 4a 之特定能量準位 E_h 乃設定成與光吸收層 2 之價電子帶 2d 上端之能量準位 E_v 實質上為一致者。相較之下，電子移動層 3 之傳導帶 3a 之特定之能量準位 E_e 乃 $E_e - E_h$ 成為大約等於吸收於光吸收層 2 之光的平均能量，或成為較此平均能量小 $0.1[eV]$ 以內之值地加以設定。

圖 6 (a) 所示能量帶構造中，於光吸收層 2 入射光線時，光吸收層 2 中則產生如圖 6 (b) 所示載子之能量分布。圖 6 (b) 中，分布 De_1 乃顯示傳導帶 2c 之電子之能量分布，分布 Dh_1 乃顯示價電子帶 2d 之電洞之能量分布。經由光之吸收在光吸收層 2 內生成之電子乃激發至對應於入射光波長之能量準位。即，短波長光為高，長波長光為低之能量準位之電子，被生成於傳導帶 2c。同時，短波長

光為低，長波長光為高之能量準位之電洞，被生成於價電子帶 2d。傳導帶 2c 中，經由高能量電子及低能量電子之相互作用，產生能量之收受，電子之能量分布 De_1 則成為熱平衡狀態。同樣地，價電子帶 2d 之電洞之能量分布 Dh_1 亦成為熱平衡狀態。

如圖 6 (b) 所示，於光吸收層 2 中，電子能量分布 De_1 乃在傳導帶 2c 之寬廣範圍加以分布。相較之下，電洞能量分布 Dh_1 乃在從 p 型不純物所放出之電洞之密度較光激發所產生之電洞之密度充分為大之時，向價電子帶 2d 之上端（能量準位 E_v ）附近偏移。此乃即使經由光激發所產生之電洞能量為高，但從 p 型不純物放出之電洞之溫度接近室溫之故，熱平衡狀態下之電洞溫度幾近維持於室溫。如此生成之電子及電洞乃在生成光學聲子（即產生能量緩和）之前，透過各別電子移動層 3 之傳導帶 3a 及電洞移動層 4 之價電子帶 4a，由負電極 5 及正電極 6 取出。

又，於光吸收層 2 摻雜 n 型不純物之時，如圖 7 (a) 所示，電子移動層 3 之傳導帶 3a 乃包含光吸收層 2 之傳導帶 2c 下端之能量準位 E_c 。而加以設定。更佳而言，電子移動層 3 之傳導帶 3a 之下端之能量準位乃較光吸收層 2 之傳導帶 2c 之下端之能量位準 E_c 為低，較光吸收層 2 之電子之准費米能準位 Q_1 為高地加以設置。又，電子移動層 3 之傳導帶 3a 上端之能量準位乃設定成較光吸收層 2 之傳導帶 2c 之下端之能量準位 E_c 為高。更且，電子移動層 3 之傳導帶 3a 之特定能量準位 E_c 乃設定成與光吸收層

2 之傳導帶 2c 下端之能量準位 E_c 實質上為一致者。相較之下，電洞移動層 4 之價電子帶 4a 之特定之能量準位 E_h 乃 $E_c - E_h$ 成爲大約等於吸收於光吸收層 2 之光之平均能量，或成爲較此平均能量小 $0.1[eV]$ 以內之值地加以設定。

圖 7 (a) 所示能量帶構造中，於光吸收層 2 入射光線時，光吸收層 2 中則產生如圖 7 (b) 所示載子之能量分布。圖 7 (b) 中，分布 De_2 乃顯示傳導帶 2c 之電子之能量分布，分布 Dh_2 乃顯示價電子帶 2d 之電洞之能量分布。

如圖 7 (b) 所示，於光吸收層 2 中，電洞能量分布 Dh_2 乃在價電子帶 2d 之寬廣範圍加以分布。相較之下，電子能量分布 De_2 乃在從 n 型不純物所放出之電子之密度較光激發所產生之電洞之密度充分爲大之時，向傳導帶 2c 之下端（能量準位 E_c ）附近偏移。此乃即使經由光激發所產生之電子能量爲高，但從 n 型不純物放出之電子之溫度接近室溫之故，熱平衡狀態下之電子溫度幾近維持於室溫。如此生成之電子及電洞乃在生成光學聲子（即產生能量緩和）之前，透過各別電子移動層 3 之傳導帶 3a 及電洞移動層 4 之價電子帶 4a，由負電極 5 及正電極 6 取出。

以下，對於經由本實施形態之光電元件 1 所得之效果加以說明。首先，對於具有圖 4 (a) 所示能量帶構造之一般之熱載子型光電元件之問題點加以檢討，接著，說明本實施形態之光電元件 1 可解決該問題之部分。

關於圖 4 (a) 所示形態之熱載子型光電元件，對於該輸出電力之大小，理論性地加以探討。然而，在輸出電力

之導出時，假定如下。

(A) 僅矚目於光吸收層 20 之特性，對於電洞移動層 21 及電子移動層 22 而言，該帶寬為無限小，電導為無限大。

(B) 激發至高能量之載子乃在產生能量緩和之前，取出至光吸收層 20 之外部。即，無視載子晶格相互作用。

(C) 不產生碰撞離子化及非輻射再結合。

(D) 於光吸收層 20 中，具有較該能帶隙為高之能量之光凸所有被吸收。即，光吸收層 20 乃較該光吸收係數之倒數有充分之厚度。

(E) 經由光激發所產生之載子乃經由載子間之彈性散亂，馬上呈熱平衡狀態（惟，與晶格則非熱平衡），可使該能量分布使用費米分布函數加以表示。即，載子後此之衝擊時間可視為無限小。

(F) 在光吸收層 20 內，保持電性之中性。

(G) 光吸收層 20 內之載小密度、溫度、准費米準位乃在厚度方向為一定。即，令載子擴散係數視為無限大。

於此等之假定下，輸出電力 P 則如下式 (1) 式被導出。

[式 1]

$$P = J(V_e - V_h) \quad \dots (1)$$

於此數式 (1) 中， J 為電流密度， V_e 、 V_h 乃各別取出之電子、電洞之能量， $(V_e - V_h)$ 乃輸出電壓。

電流密度 J 乃太陽光光譜 $I_S(\varepsilon)$ 及從光吸收層 20 之輻射再結合所成輻射之光譜 $I_R(\varepsilon, \mu_e, \mu_h, T_e, T_h)$ 乃有以下之關係。

[式 2]

$$J = \int_{\varepsilon_g}^{\infty} d\varepsilon [I_S(\varepsilon) - I_R(\varepsilon, \mu_e, \mu_h, T_e, T_h)] \quad \dots (2)$$

[式 3]

$$I_S(\varepsilon) = \frac{2\Omega_S}{h^3 c^2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_S}\right) - 1} \quad \dots (3)$$

[式 4]

$$I_R(\varepsilon, \mu_e, \mu_h, T_e, T_h) = \frac{2\Omega_R}{h^3 c^2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon_e - \mu_e}{k_B T_e} - \frac{\varepsilon_h - \mu_h}{k_B T_h}\right) - 1} \quad \dots (4)$$

上述數式 (2) ~ (4) 中， ε_g 乃光吸收層 20 之能量間隙， μ_e ， μ_h 乃各為電子、電洞之准費米準位， T_e ， T_h 乃各電子、電洞之溫度。 h 乃蒲朗克常數， c 乃光速度， k_B 乃波茲曼常數， T_S 乃太陽表面溫度 (5760 [K])。又， Ω_S 乃太陽光入射之立體角， Ω_R 乃輻射再結合所成輻射之立體角，各別為 $\Omega_S = 6.8 \times 10^{-5}$ [rad] (1 [Sun] 照射)、 $\Omega_R = \pi$ [rad]。

電子能量 V_e 及電洞能量 V_h 乃滿足以下之關係。

[式 5]

$$\begin{aligned} V_e - V_h &= [E_e - T_{RT} \Delta S_e] - [E_h - T_{RT} \Delta S_h] \\ &= [E_e - (E_e - \mu_e) T_{RT} / T_e] - [E_h - (E_h - \mu_h) T_{RT} / T_h] \end{aligned} \quad \dots (5)$$

[式 6]

$$J(E_e - E_h) = \int_{\varepsilon_g}^{\infty} d\varepsilon \cdot \varepsilon [I_S(\varepsilon) - I_R(\varepsilon, \mu_e, \mu_h, T_e, T_h)] \quad \dots (6)$$

上述數式 (5) 及 (6) 中， E_e 乃電子移動層選擇性通過電子之能量準位， E_h 乃電活移動層選擇性通過電洞之能量準位。又， ΔS_e 、 ΔS_h 乃在光吸收層 20 中，溫度 T_e 之電子、溫度 T_h 之電洞，取出於溫度 T_{RT} (室溫) 之負電極 24、正電極 23 時之熵之增大部分。

於前述之非專利文獻 1~4 中，理論性檢討爲了得到較熱載子型光電元件爲高之變換效率之條件結果，顯示可得 80% 以上之變換效率。如此高的變換效率雖以上述 3 項之假定 (A) ~ (C) 爲前提，但本發明人則在此等假定上特別矚目於 (B)。即，爲使 (B) 假定成立，需使從經由光激發而產生之載子，至該載子向光吸收層 2 之外部被取出之時間，即滯留時間 (τ_r) 較充分爲短。一般之半導體中，能量緩和時間 τ_t 爲數微微秒。半導體超晶格構造或如 InN 之特殊物質之時，能量緩和時間 τ_t 爲數百微微秒。

因此，光吸收層 20 之載子之滯留時間 τ_t 較此等時間被縮短限制之故，於光吸收層 20 無法蓄積載子，而限制光吸收層 20 之載子密度 (n_c)。

一般而言，光吸收層 20 之載子密度 n_c 愈大，變換效率則變高。爲使載子密度 n_c 變大，例如有聚光光線，入射至光吸收層 20 之方法。惟，實用化之聚光倍率約爲 500 倍，在實驗室層級所實現之聚光倍率約爲 1000 倍。在此，考量聚光倍率 1000 倍時之光電元件之變換效率。

決定載子密度 n_c 及電子溫度 T_e 、電洞溫度 T_h 時，則決定電子之准費米準位 μ_e 及電洞之准費米準位 μ_h ，根據

准費米準位 μ_e 及 μ_h ，求得變換效率。已示於圖 10 中，顯示如此求得之變換效率與載子密度 n_c 之關係。惟，圖 10 中，令電子及電洞之有效質量 m_e 、 m_h 各為 0.4，電子溫度 T_e 及電洞溫度 T_h 呈相同溫度 (T_H)。然而，光吸收層 20 之能量間隙 ε_g 乃對於載子密度 n_c 及溫度 T_H 加以最佳化。參照圖 10 時，為我接近 80% 之變換效率，可知載子密度 n_c 需為 $1 \times 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$ 以上。即如所述，載子之能量緩和時間 τ_t ，最大不過是數百微微秒。惟，為了將了，正在研究可使能量緩和時間 τ_t 更長之材料之故，在此，假定令載子之能量緩和時間 τ_t 為 1 奈秒 (nano second)，令光吸收層 20 內之滯留時間 τ_r 為 100 微微秒。如此，令滯留時間 T 假定為長之時，載子密度 n_c 乃 $1 \times 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ 程度，變換效率為 50~60%。即，假定 (B) 之假想條件下，可得接近 80% 之變換效率，但現實上，變換效率不過是 50~60%。以上之計算為令聚光倍率為 1000 倍之時者，在聚光倍率下降之時，變換效率則更為下降。又，實際上，還加上載子之能量緩和所造成之損失，或載子透過電子移動層 (電洞移動層)，向各電極移動所產生能量損失等之故，變換效率則較上述值會變得更小。

除了熱載子型之外，亦有人研究高效率之光電元件。例如經由使用 III-V 族化合物半導體之 3 接合型之光電元件，實現 39% 之變換效率，更且有進行更高效率指標的 4~6 接合型之研究。因此，如熱載子型之變換效率為 60% 以下時，其優異性亦可能為之喪失。在此，本發明人對於

光吸收層 20 內之滯留時間 τ_r 為短時，仍可提升變換效率之構造，進行了檢討。

於上述理論性之檢討中，如圖 4 (b) 所示，關於電子及電洞之能量分布 D_{e1} 、 D_{h1} 則對於禁止帶 20c 之中心為對稱者為前提。即，僅考量 $T_e = T_h$ 、 $E_e = -E_h$ ，光吸收層 20 為真性半導體（未摻雜）之情形。

根據本發明人等的數值計算結果，於數式 (2) 及 (6) 中，電子溫度 T_e 及電洞溫度 T_h 較 $1500[K^\circ]$ 為高，且能量間隙 ε_g 較 $0.5[eV]$ 為大之故，起因於輻射再結合之項 I_R 幾乎可以忽視。此時，決定能量間隙 ε_g 時，經由數式 (2) 電流密度 J 大體上可決定之故，為了提升變換效率，可增大電子能量 V_e 與電洞能量 V_h 之差 ($V_e - V_h$) 即可。差 ($V_e - V_h$) 雖經由通過電子移動層及電洞移動層之電子、電洞之能量準位 E_e 及 E_h 之差 ($E_e - E_h$) 與數式 (5) 所結合，另一方面，差 ($E_e - E_h$) 乃經由數式 (6) 決定其值。在此，對於 ($E_e - E_h$) 之值，加上使 ($V_e - V_h$) 變大的處置為佳。

為實現高變換效率，當使電子溫度 T_e 變高，電子之准費米準位 μ_e 則變低。此時，($E_e - \mu_e$) 成為更大之值之故，由於取出電子時之熵的增大，電子能量 V_e 相反地會變小（參照數式 (5)）。在此，使通過電子移動層之電子之能量準位 E_e 變低，且使電子溫度 T_e 變低時，伴隨電子之准費米準位 μ_e 之變大效果，熵的增大量 ΔS_e 則變小。尤其，使通過電子移動層之電子之能量準位 E_e ，設定在傳

導帶之下端附近，使電子溫度 T_e 成爲接近室溫的溫度（例如 $300[K^\circ]$ ）時，可有效使熵的增大量 ΔS_e 變小。然而，經由使能量準位 E_e 變小，電子能量 V_e 雖亦可能變小，但 $(E_e - E_h)$ 之值已決定之故，隨能量準位 E_e 變小的部分，能量準位 E_h 會跟著變小。因此，輸出電壓 $(V_e - V_h)$ 會爲之變大。

然而，上述檢視中，雖對於減低電子之熵增大量 ΔS_e 構成做爲檢討，但是對於減低電洞之熵增大量 ΔS_h 構成亦適用同樣之考量方式。即，使通過電洞移動層之電洞之能量準位 E_h 變高，且使電洞溫度 T_h 變低時，伴隨電洞之准費米準位 μ_h 之變小效果，熵的增大量 ΔS_h 則變小。尤其，使電洞移動層之能量準位 E_h ，設定在傳導帶之下端附近，使電洞溫度 T_h 成爲接近室溫的溫度（例如 $300[K^\circ]$ ）時，可有效使熵的增大量 ΔS_h 變小。

爲了使電洞溫度 T_h 接近室溫（例如 $300[K^\circ]$ ），如本實施形態之光吸收層 2，於光吸收層摻雜 p 型不純物（受體）即可。從預先摻雜之 p 型不純物所放出之電洞之溫度爲低（室溫附近）之故，即使光激發所產生之電洞之能量爲高，熱平衡狀態之電洞溫度則會接近室溫。因此，可使電洞從光吸收層 2 取出之時之電洞與正電極 6 之溫度差變小，抑制關於電洞之熵之增大。

又，爲了使電子溫度 T_e 接近室溫（例如 $300[K^\circ]$ ），可適用與電洞溫度 T_h 相同之思考方式。即，於光吸收層 2 乃摻雜 n 型不純物（施體）；從預先摻雜之 n 型不純物所

放出之電子之溫度為低（室溫附近）之故，即使光激發所產生之電子之能量為高，熱平衡狀態之電子溫度 T_e 則會接近室溫。因此，可使電子從光吸收層 2 取出之時之電子與負電極 5 之溫度差變小，抑制關於電子之熵之增大。

圖 8 乃顯示在於光吸收層摻雜 p 型不純物時之光吸收層 2 內之光激發載子密度與變換效率之關係圖表。圖 8 中，圖表 G1~G6 乃顯示各別載子溫度為 300 [K]、600 [K]、1200 [K]、2400 [K]、3600 [K] 及 4800 [K] 時之載子密度與變換效率之關係。然而，圖 8 中，令 p 型不純物濃度為 $1 \times 10^{17} [\text{cm}^{-3}]$ ，令電子及電洞之有效質量各為 0.4，聚光倍率為 1000 倍。惟，由於是假定較光激發載子密度，p 型不純物濃度為充分大之前提上的計算結果，光激發載子密度為 $1 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ 以上的結果在物理上是無意義的。比較圖 8 與圖 10 時，於熱載子型光電元件實現所得之載子密度（ $1 \times 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ 以下）中，載子密度及載子（電子）溫度為相同之時，經由在於光吸收層 2 摻雜 p 型不純物，可使變換效率更為提升。

接著，對於以上結果補充說明。光吸收層 2 內之電子之密度 n_e 乃與電子之准費米準位 μ_e 及電子溫度 T_e 有以下之關係。

[式 7]

$$n_e = \frac{8\sqrt{2}\pi m_e^{3/2}}{h^3} \int_{\epsilon_g/2}^{\infty} d\epsilon \sqrt{\epsilon - \epsilon_g/2} \frac{1}{\exp[(\epsilon - \mu_e)/k_B T_e] + 1} \quad \dots (7)$$

惟，數式 (7) 中，令能帶隙 ϵ_g 之中心為能量軸之原點。

然而，電洞之密度 n_h 亦使用電洞之准費米準位 μ_h 及電洞溫度 T_h ，與數式 (7) 同樣地表示。

另一方面，電子密度 n_e 及正孔密度 n_h 中，經由光照射所產生成分之載子密度 n_c 乃在光吸收層 2 之吸收光子數密度 N_s 、平均滯留時間 τ_r 、及光吸收層 2 之厚度 d 中有以下之關係。

[式 8]

$$n_c = \frac{N_s \tau_r}{d} \quad \dots (8)$$

[式 9]

$$N_s = \int_{\varepsilon_g}^{\infty} d\varepsilon I_s(\varepsilon) \quad \dots (9)$$

吸收光子數密度 N_s 乃經由供予入射光強度及能量間隙 ε_g 而決定。例如，入射光強度為 $1 \text{ [kW/m}^2 \text{]}$ 、能量間隙 ε_g 為 0 之時，吸收光子數密度 N_s 乃成爲 $6.3 \times 10^{17} \text{ [cm}^{-2}/\text{s} \text{]}$ ，此乃與 AMO 光譜之入射光子密度 ($6.46 \times 10^{17} \text{ [cm}^{-2}/\text{s} \text{]}$) 幾近等值。將此吸收光子數密度 N_s 與光吸收層 2 之厚度 d 適用於數式 (7)、(8) 時，可有載子密度 n_c 、平均滯留時間 τ_r 、電子之准費米準位 μ_e 、電洞之准費米準位 μ_h 及電子溫度 T_e 之關係。由此關係，決定了平均滯留時間 τ_r 、載子密度 n_c 可被決定，而導出電子之准費米準位 μ_e 與電子溫度 T_e 之關係，以及電洞之准費米準位 μ_h 與電洞溫度 T_h 之關係。

在此，變形前述數式 (5)，則成爲

[式 10]

$$V_e - V_h = \mu_e(T_{RT}/T_e) - \mu_h(T_{RT}/T_h) + \Delta E(1 - T_{RT}/T_h) - E_e(T_{RT}/T_e - T_{RT}/T_h) \quad \dots(10)$$

惟

$$\Delta E = E_e - E_h$$

。因此，為得大的（ $V_e - V_h$ ），在 $T_e > T_h$ ，即於光吸收層，摻雜 p 型不純物之時，電子移動層 3 之傳導帶 3a 之能量準位 E_e 儘可能使之變大即可，更佳而言，令電洞移動層 4 之價電子帶 4a 之能量準位 E_h ，設定於光吸收層 2 之價電子帶 2d 上端即可。又， $T_e < T_h$ ，即於光吸收層 2，摻雜 n 型不純物之時，電子移動層 3 之傳導帶 3a 之能量準位 E_e 儘可能使之變小即可，更佳而言，令此能量準位 E_e ，設定於光吸收層 2 之傳導帶 2c 下端即可。

如上所述，根據本實施形態之光電元件 1 時，可抑制電子或電洞從光吸收層 2 向負電極 5 或正電極 6 移動時之熵的增大之故，即使光吸收層 2 之載子之滯留時間 τ_r 為短時，亦可有效提高變換效率。

本實施形態之光電元件 1 中，更佳為令光吸收層之 p 型不純物或 n 型不純物之濃度，成為令入射光強度做為 A [kW/m²] 時，是為 $A \times 10^{13}$ [cm⁻³] 以上者即可。此時，光吸收前述電洞溫度 T_h （或電子溫度 T_e ）幾近為 300[K]，電洞（電子）之准費米準位 μ_h （ μ_e ）乃位於價電子帶 2d 上端之正上方（傳導帶 2c 下端之正下方）。雖經由光之吸收產生新的電洞（電子），該密度較經由摻雜所產生之電洞（電子）之密度遠遠較小之故，電洞溫度 T_h （電子

溫度 T_e) 及准費米準位 μ_h (μ_e) 則幾近沒有變化。因此，可令光吸收層 2 整體之電洞溫度 T_h (電子溫度 T_e)，更有效地接近室溫。然而，做為入射光強度 A [kW/m^2] 之數值，例如為基準太陽光之強度 (1 [kW/m^2]、亦表現為 1 [Sun]) 乘上聚光倍率之數值為佳。例如非聚光型之光電元件中，入射光強度 A 為 1 [kW/m^2]，1000 倍聚光型之光電元件中，入射光強度 A 為 1000 [kW/m^2]。

又，已於述及，光吸收層 2 包含 p 型不純物之時 (參照圖 6 (a))，電洞移動層 4 之價電子帶 4a 乃包含光吸收層 2 之價電子帶 2d 上端之能量準位 E_v 者為佳。光吸收層 2 含有 p 型不純物之時，經由從預先摻雜之 p 型不純物放出之電洞，光吸收層 2 整體之電洞之能量分布則如圖 6 (b) 所示，向價電子帶 2d 之上端附近偏移。因此，經由電洞移動層 4 之價電子帶 4a 包含光吸收層 2 之價電子帶 2d 之上端之能量準位 E_v ，使偏移在光吸收層 2 之價電子帶 2d 之上端附近的電洞，可藉由電洞移動層 4 之價電子帶 4a，有效率向正電極 6 移動之故，可更提高光電元件 1 之變換效率。又，此時，電洞移動層 4 之價電子帶 4a 之上端之能量準位乃較光吸收層 2 之價電子帶 2d 之上端之能量位準 E_v 為高，較光吸收層 2 之電洞之准費米能準位 μ_h 為低則更佳。

另一方面，光吸收層包含 n 型不純物之時 (參照圖 7 (a))，電子移動層 3 之傳導帶 3a 乃包含光吸收層 2 之傳導帶 2c 下端之能量準位 E_c 者為佳。光吸收層 2 含有 n

型不純物之時，亦與上述相同，經由從預先摻雜之 n 型不純物放出之電子，光吸收層 2 整體之電子之能量分布則如圖 7 (b) 所示，向傳導帶 2c 之下端附近偏移。因此，經由電洞移動層 3 之傳導帶 3a 包含光吸收層 2 之傳導帶 2c 之下端之能量準位 E_c ，使偏移在光吸收層 2 之傳導帶 2c 之下端附近的電子，可藉由電子移動層 3 之傳導帶 3a，有效率向負電極 5 移動之故，可更提高光電元件 1 之變換效率。又，此時，電洞移動層 3 之傳導帶 3a 之下端之能量準位乃較光吸收層 2 之傳導帶 2c 之下端之能量位準 E_c 為低，較光吸收層 2 之電子之准費米能準位 μ_e 為高則更佳。

[實施例]

圖 9 顯示上述實施形態所成光電元件 1 之實施例及比較例之表。此表所示實施例 1~4 中，調查在於光吸收層 2 摻雜 p 型不純物，將該摻雜濃度、電子及電洞之有效質量 m_e 及 m_h ，以及聚光倍率設定成各種數值時之最佳能量間隙 ε_g 、電子移動層 3 之傳導帶 3a 之能量準位 E_e 與電洞移動層 4 之價電子帶 4a 之能量準位 E_h 之差 ($E_e - E_h$)、電子之准費米能準位 μ_e 與電洞之准費米能準位 μ_h 之差 ($\mu_e - \mu_h$)、電子能量 V_e 與電洞能量 V_h 之差 ($V_e - V_h$) 以及變換效率。

又，做為相對於實施例 1~4 之比較例 1~4，調查於光吸收層不摻雜 p 型不純物或 n 型不純物，將電子及電洞

之有效質量 m_e 及 m_h ，以及聚光倍率設定成各種數值時之最佳 ε_g 、 $(E_e - E_h)$ 、 $(\mu_e - \mu_h)$ 、 $(V_e - V_h)$ 以及變換效率。

參照圖 9 時，例如呈 $m_e = m_h = 0.4$ ，令聚光倍率為 1000 倍之時，於光吸收層不摻雜不純物之比較例 1 之變換效率為 54%。相較之下，於光吸收層摻雜 p 型不純物之實施例 1 之變換效率為 64%，較不摻雜不純物之時，變換效率提升了 10%。對於其他之實施例 2~4，相較於比較例 2~4，變換效率亦提升了 7%~10%。

又，令圖 9 之實施例 1~4 所示能量間隙 ε_g 以及有效質量 m_e 及 m_h 做為可實現之材料，有 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 等之 IV 族二元化合物， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}$ 、As、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ 、 $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ 、或 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 等之 III-V 族三元化合物、或此等元件 (In、Ga、As、Sb、及 Al) 中組合 4 個之 III-V 族四元化合物。又，可為 $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}$ 、 $\text{AgIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}$ 等之 I-III-VI 族化合物。

本發明所成光電元件乃非限定於前述實施形態，可做種種變形。例如，上述各實施形態中，做為選擇通過具有特定能量準位之電子 (電洞) 之電子移動層 (電洞移動層) 之構成，雖例示了在於障壁範圍中，包含量子井層、量子細線、量子點之半導體量子構造之構成，但只要可實現窄能量寬度之傳導帶 (價電子帶) 之構成，做為電子移動層 (電洞移動層) 之構成可適用其他之各種構成。

〔產業上之可利用性〕

根據本發明之光電元件時，光吸收層之載子的滯留時間即使為短，亦可有效提升變換效率。

【圖式簡單說明】

〔圖 1〕模式性顯示利用半導體之 pn 接合之以往之光電元件之能量帶圖。

〔圖 2〕(a) ~ (h) 模式顯示在半導體，光被吸收時之電子及正孔之能量分布之變化圖。

〔圖 3〕模式性表示熱載子型光電元件之動作圖。

〔圖 4〕(a) 顯示以往熱載子型光電元件之能量帶構造圖。(b) 在示於(a)之光電元件，當光線入射時產生之光吸收層之載子之能量分布。

〔圖 5〕顯示關於實施形態之光電元件之構成之斜視圖。

〔圖 6〕(a) 顯示於光吸收層摻雜 p 型不純物時之能量帶構造圖。(b) 在示於(a)之光電元件，當光線入射時產生之光吸收層之載子之能量分布。

〔圖 7〕(a) 顯示於光吸收層摻雜 n 型不純物時之能量帶構造圖。(b) 在示於(a)之光電元件，當光線入射時產生之光吸收層之載子之能量分布。

〔圖 8〕顯示於光吸收層摻雜 p 型不純物時之光吸收層內之光激發載子密度與變換效率之關係圖表。

〔圖 9〕顯示關於實施形態之光電元件之實施例及比

較例之表。

〔圖 10〕乃顯示以往構造之光電元件之光吸收層內之載子密度與變換效率之關係圖表。

【主要元件之符號說明】

1：光電元件

2、17、20：光吸收層

2c、3a、16a、20a、22a：傳導帶

2d：價電子帶

3、16、22：電子移動層

4、21：電洞移動層

4a、20b、21a：價電子帶

5、24：負電極

6、23：正電極

31、41：障壁範圍

32、42：半導體量子構造

Q1：電子之准費米準位

Q2：電洞之准費米準位

五、中文發明摘要

發明之名稱：光電元件

本發明乃一種光電元件，提供光吸收層之載子的滯留時間即使為短，亦可有效提升變換效率之熱載子型之光電元件。光電元件乃具備吸收光線，生成電子及電洞之光吸收層（2），和鄰接於光吸收層（2）之一方之面的電子移動層（3）、和鄰接於光吸收層（2）之另一方之面的電洞移動層（4）、和設於電子移動層（3）上之負電極（5）、和設於電洞移動層（4）上之正電極（6）。電子移動層（3）乃具有較光吸收層（2）之傳導帶（2c）之能量寬度為窄之能量寬度，擁有選擇性通過特定之能量位準（ E_e ）之電子的傳導帶（3a）。電洞移動層（4）乃具有較光吸收層（2）之價電子帶（2d）之能量寬度為窄之能量寬度，擁有選擇性通過特定之能量位準（ E_h ）之電洞的價電子帶（4a）。光吸收層（2）乃包含 p 型不純物或 n 型不純物者。

六、英文發明摘要

發明之名稱：

十、申請專利範圍

1. 一種光電元件，其特徵乃具備：吸收光線，生成電子及電洞之光吸收層，

和鄰接於前述光吸收層之一方之面的電子移動層、

和鄰接於前述光吸收層之另一方之面的電洞移動層、

和設於前述電子移動層上之負電極、

和設於前述電洞移動層上之正電極；

前述電子移動層乃具有較前述光吸收層之傳導帶之能量寬度為窄之能量寬度，具有選擇性通過特定之第 1 之能量準位之電子的傳導帶；

前述電洞移動層乃具有較前述光吸收層之價電子帶之能量寬度為窄之能量寬度，具有選擇性通過特定之第 2 之能量準位之電洞的價電子帶；

前述光吸收層乃含有 p 型不純物或 n 型不純物者。

2. 如申請專利範圍第 1 項之光電元件，其中，前述光吸收層乃含有 p 型不純物；

前述電洞移動層之價電子帶乃包含前述光吸收層之價電子帶之上端之能量準位者。

3. 如申請專利範圍第 2 項之光電元件，其中，前述電洞移動層之價電子帶之上端之能量準位乃較前述光吸收層之價電子帶之上端之能量位準為高，較前述光吸收層之電洞之准費米能準位為低。

4. 如申請專利範圍第 1 項之光電元件，其中，前述光吸收層乃含有 n 型不純物；

前述電子移動層之傳導帶乃包含前述光吸收層之傳導帶之下端之能量準位者。

5. 如申請專利範圍第 4 項之光電元件，其中，前述電子移動層之傳導帶之下端之能量準位乃較前述光吸收層之傳導帶之下端之能量準位為低，較前述光吸收層之電子之准費米能準位為高。

6. 如申請專利範圍第 1 項之光電元件，其中，前述光吸收層乃含有 p 型不純物；

前述第 2 之能量準位乃實質上與前述光吸收層之價電子帶之上端之能量準位一致。

7. 如申請專利範圍第 1 項之光電元件，其中，前述光吸收層乃含有 n 型不純物；

前述第 1 之能量準位乃實質上與前述光吸收層之傳導帶之下端之能量準位一致。

8. 如申請專利範圍第 1 項至第 7 項之任一項之光電元件，其中，前述光吸收層之前述 p 型不純物或前述 n 型不純物之濃度，乃令入射光強度做為 A [kW/m²] ，是為 $A \times 10^{13}$ [cm⁻³] 以上者。

圖1

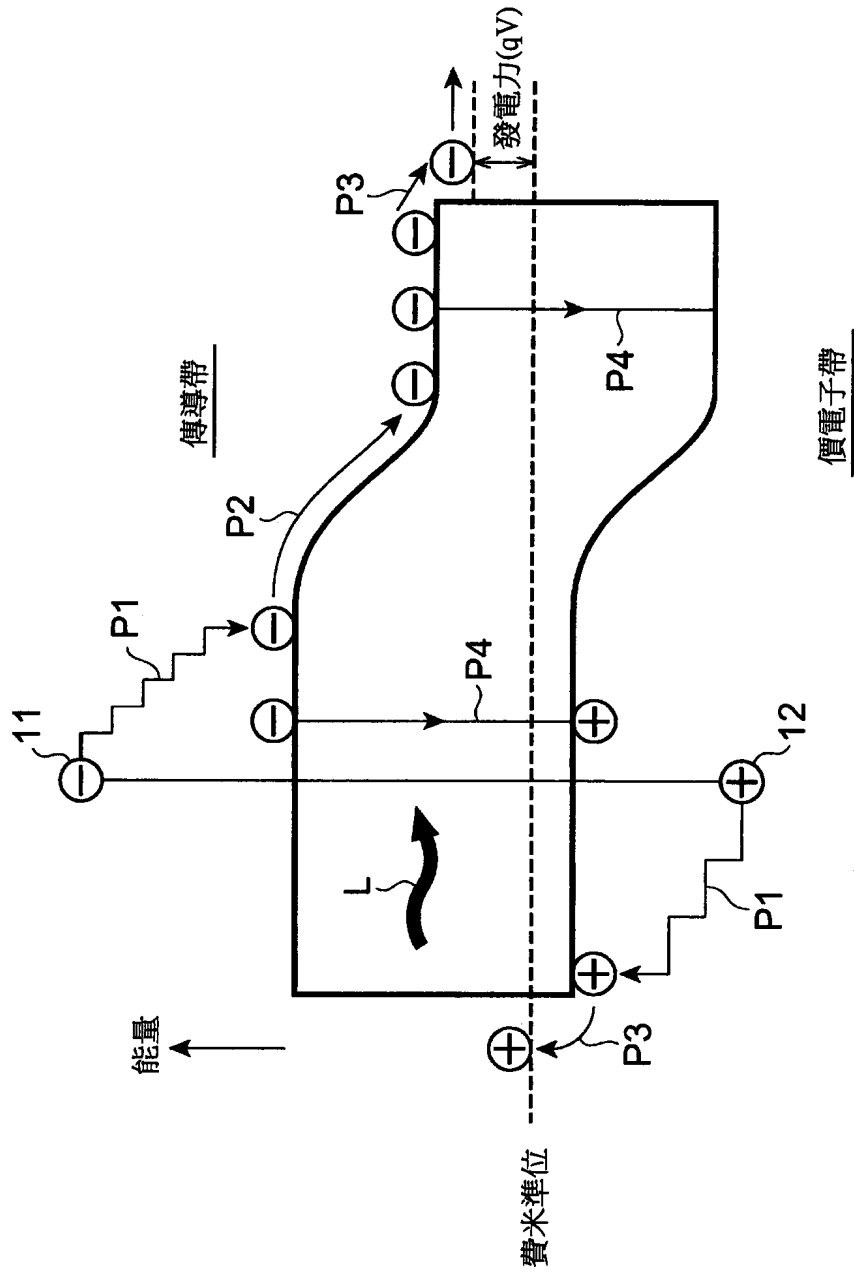


圖2

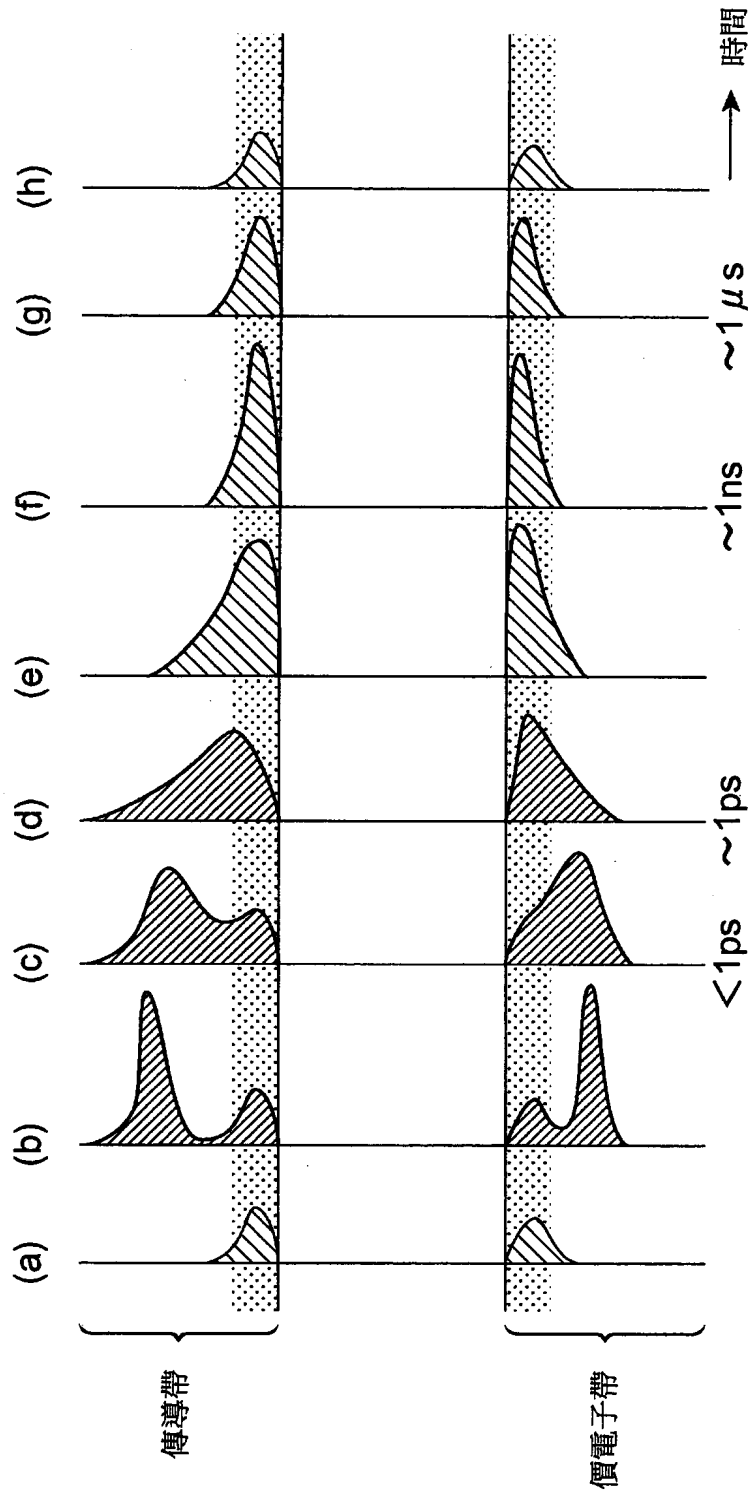


圖 3

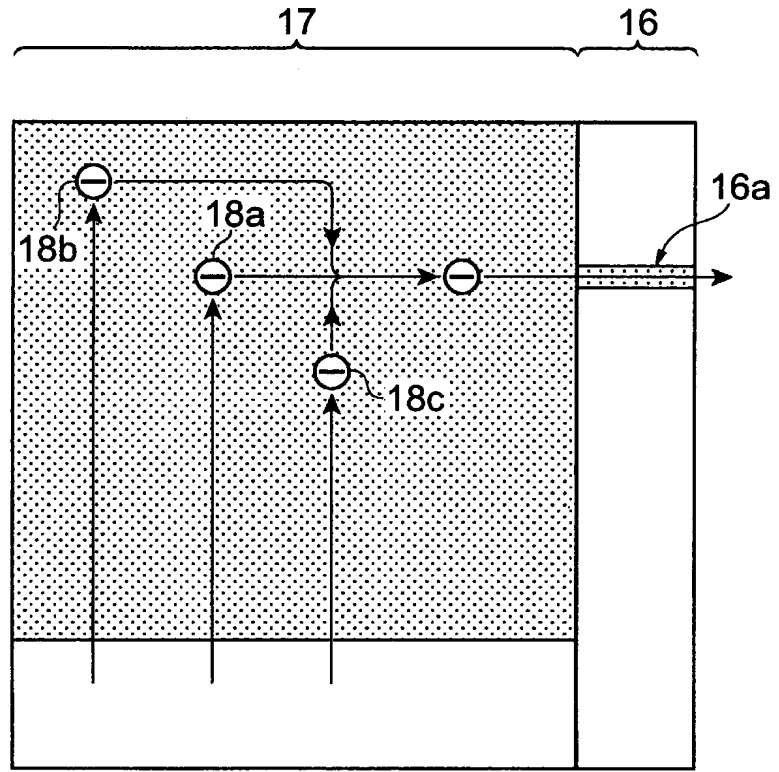


圖4

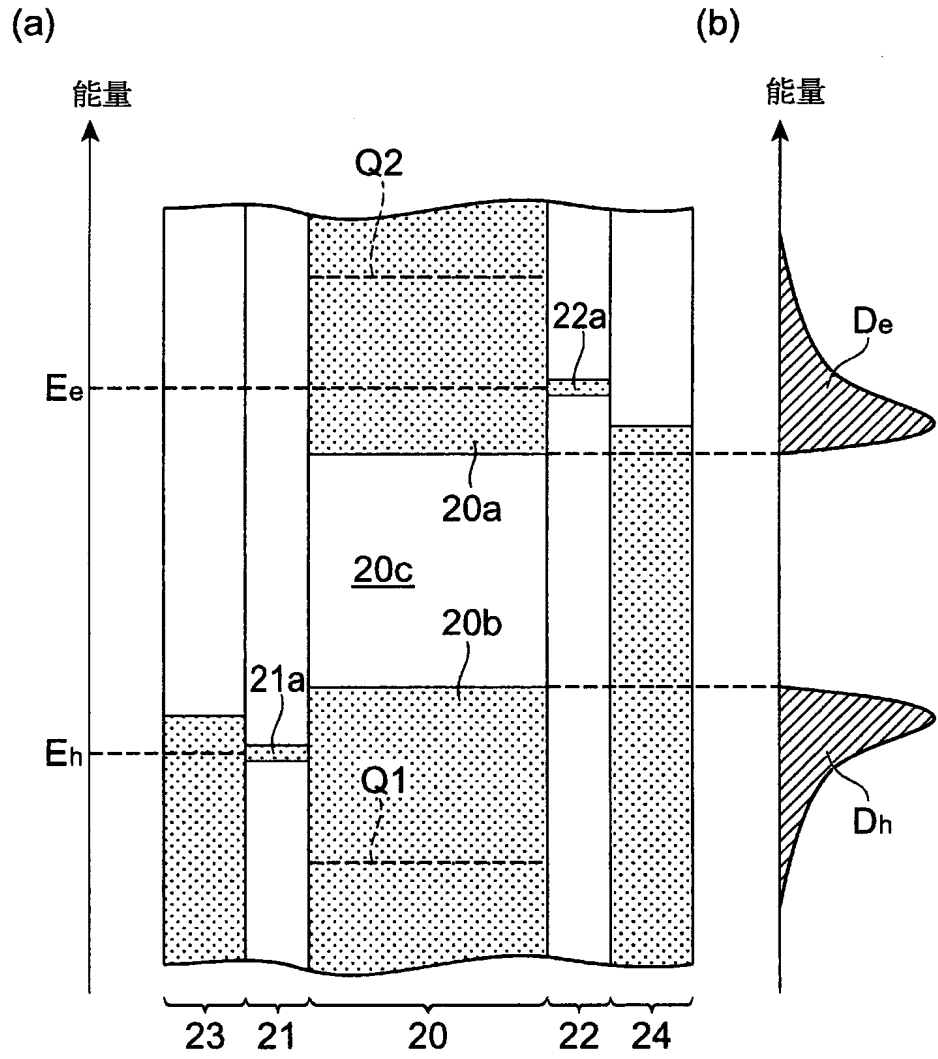


圖5

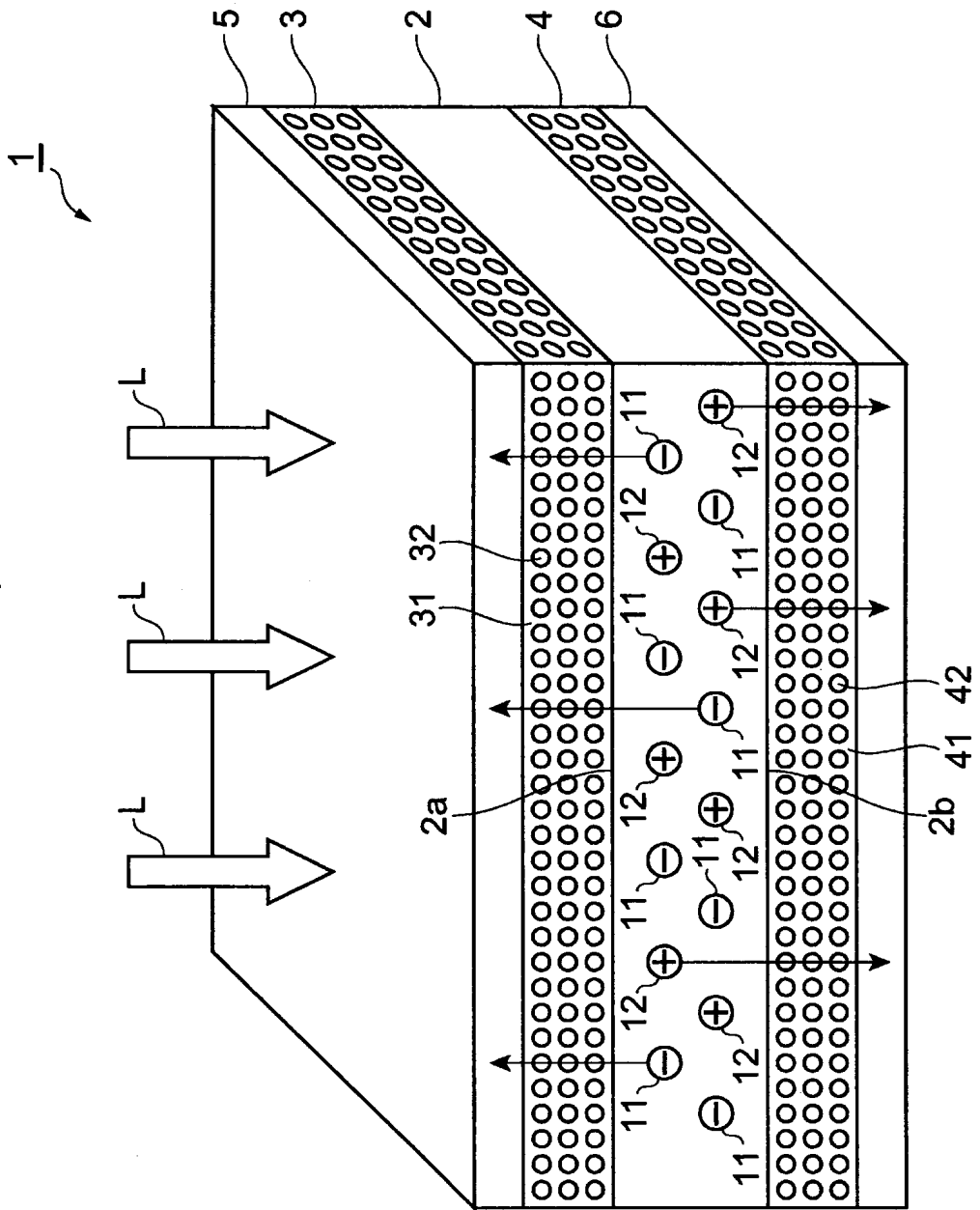


圖6

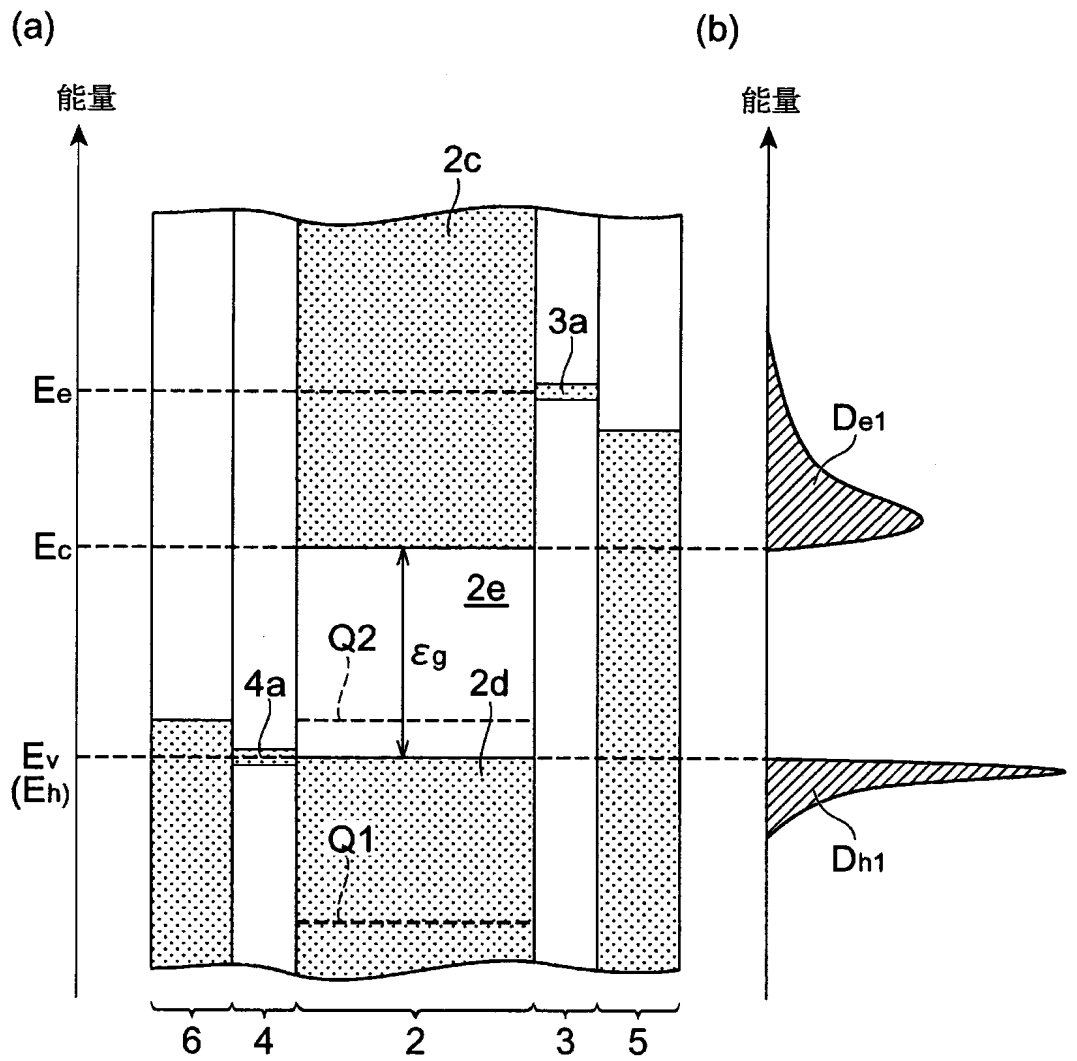


圖7

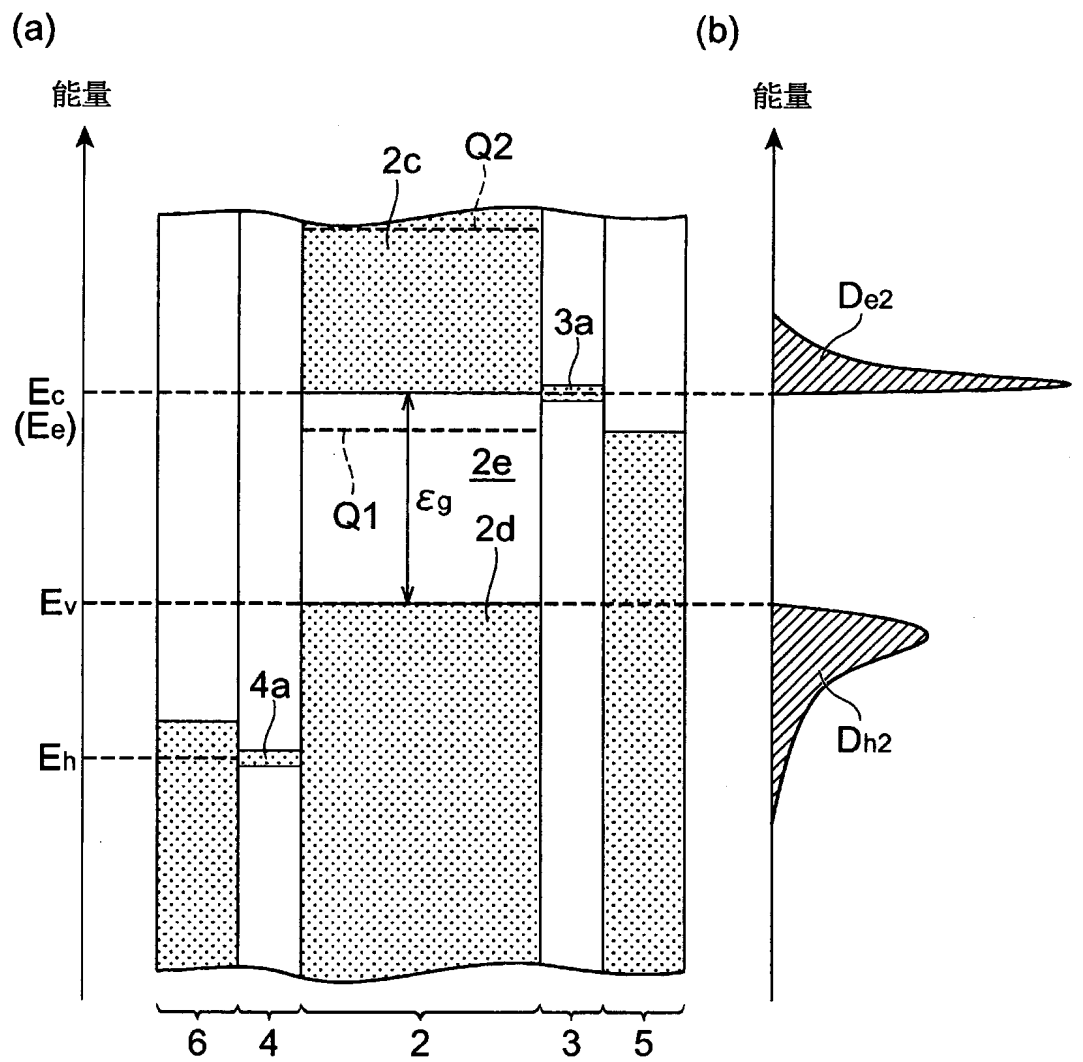


圖 8

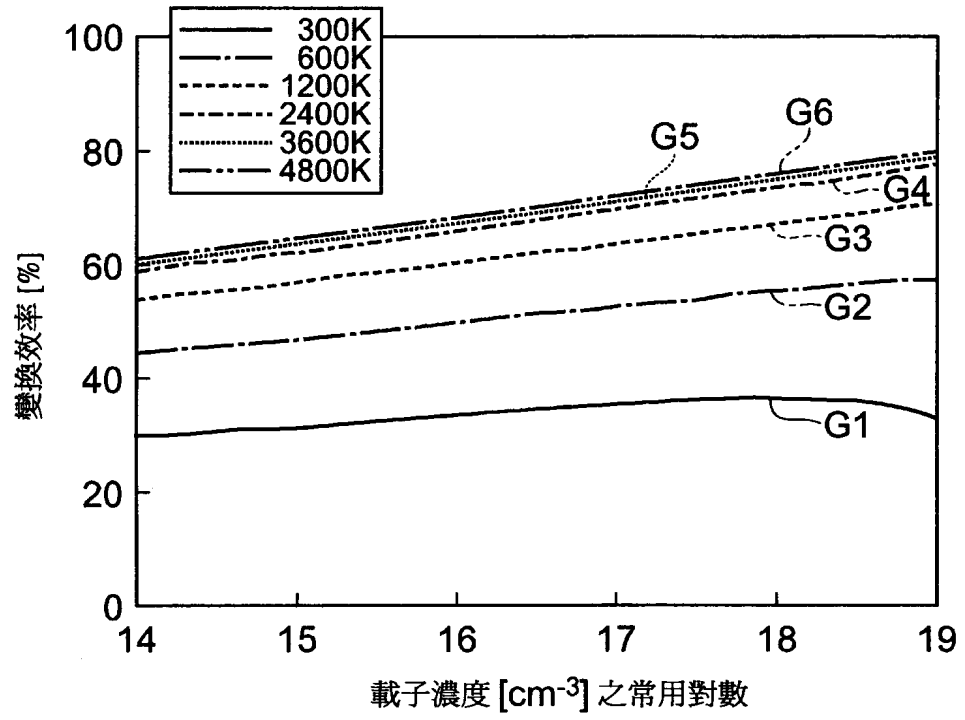
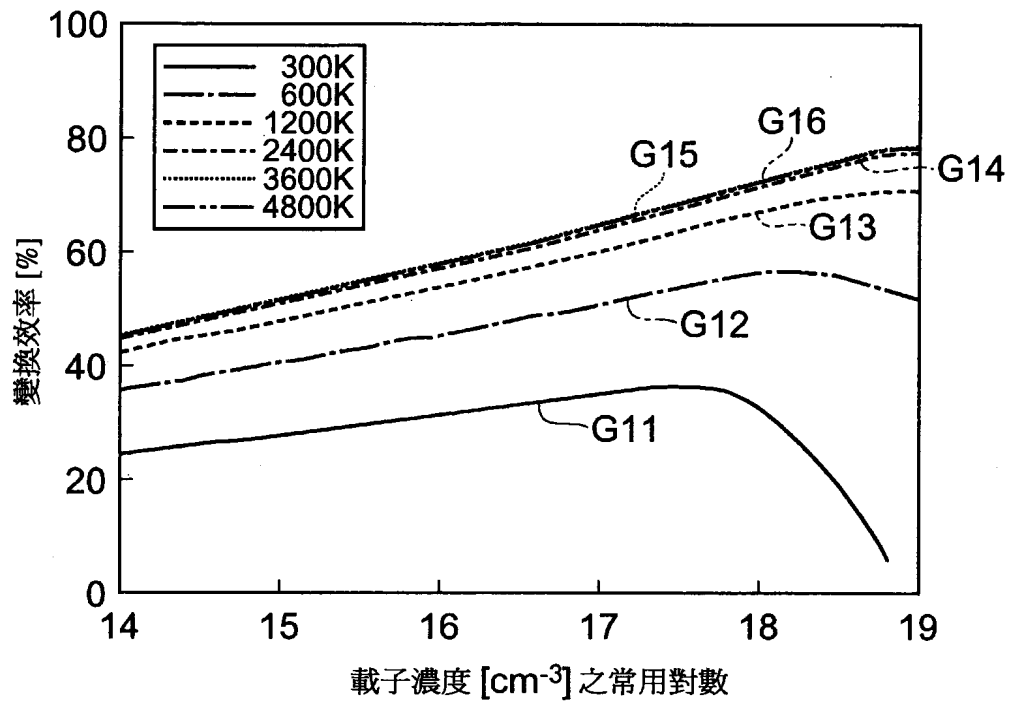


圖9

	變換效率[%]	ϵ_g [eV]	$E_e - E_h$ [eV]	$\mu_e - \mu_h$ [eV]	$V_e - V_h$ [eV]
比較例1 : $m_e = m_h = 0.4$, 1,000 倍聚光動作	54	0.68	1.64	-3.51	0.96
比較例2 : $m_e = 0.04, m_h = 0.4$, 1,000 倍聚光動作	60	0.60	1.78	-2.88	1.00
比較例3 : $m_e = m_h = 0.4$, 非聚光動作	37	1.01	1.88	-5.69	0.85
比較例4 : $m_e = 0.04, m_h = 0.4$, 非聚光動作	41	0.92	1.81	-5.39	0.87
實施例1 : p型摻雜濃度 $10^{17}/\text{cm}^3, m_e = m_h = 0.4$, 1,000 倍聚光動作	64	0.56	1.56	-1.62	1.05
實施例2 : p型摻雜濃度 $10^{17}/\text{cm}^3, m_e = 0.04, m_h = 0.4$, 1,000 倍聚光動作	70	0.49	1.52	-1.00	1.09
實施例3 : p型摻雜濃度 $10^{14}/\text{cm}^3, m_e = m_h = 0.4$, 非聚光動作	44	0.87	1.77	-2.90	0.91
實施例4 : p型摻雜濃度 $10^{14}/\text{cm}^3, m_e = 0.04, m_h = 0.4$, 非聚光動作	49	0.79	1.71	-2.29	0.94

圖 10



七、指定代表圖：

(一)、本案指定代表圖為：第(6)圖

(二)、本代表圖之元件代表符號簡單說明：

2：光吸收層

2c, 3a：傳導帶

2d：價電子帶

2e：禁止帶

3：電子移動層

4：電洞移動層

4a：價電子帶

5：負電極

6：正電極

Q1：電子之准費米準位

Q2：電洞之准費米準位

E_c 、 E_e 、 E_h 、 E_v ：能量準位

De_1 ：電子之能量分布

Dh ：電洞之能量分布

八、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：無