

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫四：矽鍺/高介電質/金屬閘極光電元件與模組技術
(I)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-002-017-

執行期間：93年08月01日至94年10月31日

執行單位：國立臺灣大學電子工程學研究所

計畫主持人：劉致為

計畫參與人員：梁啟源、廖洺漢、詹孫戎、林楚軒、彭成毅、楊英哲

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 9 月 28 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

計畫名稱：前瞻矽鍺/高介電質/金屬閘極元件及模組技術－子計畫四：矽鍺/高介電質/金屬閘極光電元件與模組技術(I)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93－2215－E－002－017－

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

計畫主持人：劉致為

共同主持人：

計畫參與人員：梁啟源、廖洺漢、詹孫戎、林楚軒、彭成毅、楊英哲

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學電子工程學研究所

中華民國 94 年 7 月 31 日

中文摘要：

光電產業被認為是下一個具有發展潛力的明星產業。目前全球光電元件的產值約佔整個半導體產業的6% (10 B 美金)，並且其比重會隨著時間繼續增加。以2002年為例，台灣光電產業產值即高達3000億新台幣，其中光電顯示器及光儲存產品佔大多數，而光通訊用元件及發光、光偵測元件則相對較少。而在這些光電產品中，矽基元件多用在CMOS image sensor (數位照相用)，liquid crystal on Si (顯示器用)，及array waveguide grating (光通訊用)上。因此若是能利用CMOS產業所發展的技術來製造光電元件，增加矽的功能 (有人稱為“silicon+”)，即是研究CMOS optoelectronics的目的。本研究即希望能利用先進的矽鍺、high k 及 metal gate 技術並結合其他子計畫來製成新型量子光電元件及高頻光通訊用零組件。

英文摘要：

The optoelectronics industry is a star industry with potential. The value of output in optoelectronics devices is about 6 percentage (10 B US dollar) of total semiconductor industry, and it will be increased with time. For example, the value of output in optoelectronics industry in Taiwan is 3000 hundred million, which is almost contributed by display and storage. The optical communication, emitting, optical detection device have few contribution to the value of output in optoelectronics industry. In the past, the COMS image sensor (for digital camera), liquid crystal on Si (for display), and the array waveguide grating (for optical communication) are all Si base device. So that it is the purpose for researching COMS optoelectronics to enhance the function of Si (called “silicon+”) if the optoelectronics device can be made of COMS technology. The combination of advance SiGe, high k, and metal gate for novel quantum optoelectronics device and high frequency optical communication is

purpose in this research.

計畫成果及討論

A. 矽鍺光電元件

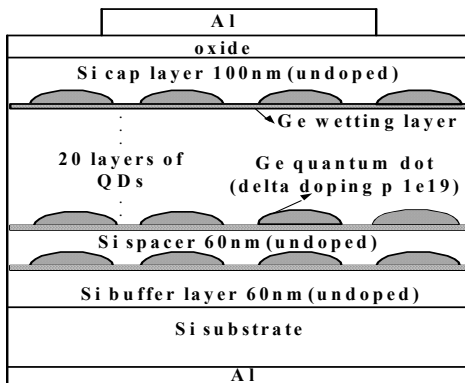
研究目的

對偵測器光電元件來說，響應和頻寬為相當重要的規格。製造出高響應及高頻寬的量子光電元件，例如常溫長波長紅外光偵測器 (2~20 μm)，是相當具有挑戰性的。因此除了利用半導體可吸收光能量而產生電子電洞對的特性之外，再者利用鍺量子點結構所製作的金氧半光偵測器更可應用於長波長紅外光偵測上。紅外光偵測器在軍事，醫療及天文觀測上均有相當大的用處，目前多為 III-V 族元件所製造，成本相當高，而利用矽鍺材料異質接面產生的量子侷限 (quantum confinement) 現象，亦可應用於紅外光偵測上。其原理是在逆向偏壓時的金氧半結構可以有效的減少導因於穿透氧化層的暗電流效應。被紅外線暴露在矽/鍺量子點/量子井所激發的電洞，可以藉著在P型半導體的relaxation，而傳輸進入背面的電極。delta摻雜在量子點/量子井裡可以有效的增加responsivity。因為電洞濃度的增加，介於矽鍺間價電帶的差異，造成在鍺量子點(井)的不連續的量子態，電洞的transition能量由量子點(井)裡的能帶結構所決定。

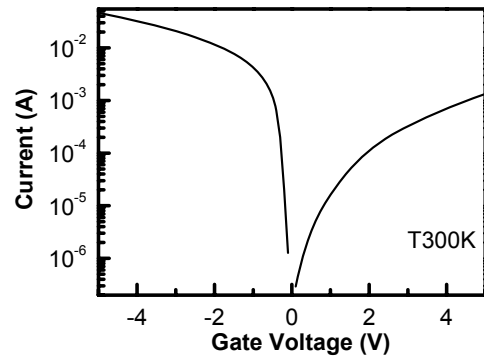
結果與討論

一個利用超高真空/化學氣相沉積(圖一)所長成具有 3nm wetting 層，二十週期的自對齊鍺/矽量子點，被做成金氧半穿隧式二極體。利用了低溫液像沉積的技術，而具有濃度 10^{19} cm^{-3} 的硼，在鍺量子點成長時被導入。圖二顯示 NMOS 量子點紅外線光偵測器的 IV 特性，逆向偏壓時金氧半穿隧二極體的暗電流，由空乏區還有矽/二氧化矽表面缺陷之熱產生電子電洞對所主宰。在累積偏壓時電子流從鋁電極穿透到 P 型基板 在紅外線照射及逆向偏壓時，被限制的電洞可以被激發形成光電流。一個 3.5-5 微米的吸收已經在小偏壓時被明顯的觀察到

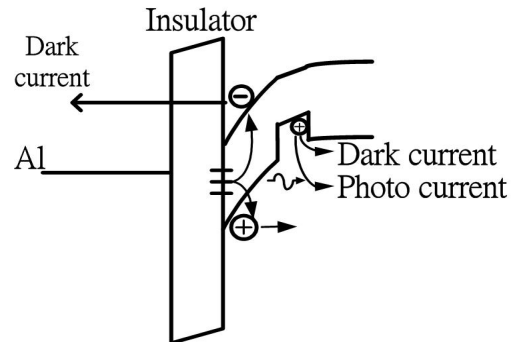
(圖四)。而 2-3 微米在 15K 偵測的吸收 responsivity 為 0.15 ma/W，起因於在鍺量子點 P 型 delta-摻雜，其 responsivity 約比為摻雜的量子點紅外線光偵測器大 100 倍。然而暗電流還是因為更多的電洞從量子點的熱激發而增加。操作溫度因為暗電流上升而降低。操作溫度和 responsivity 其中之一高，另一個自然就會下降。如前所示量子點紅外線光偵測器元件可以用於 2-3 微米的偵測且低於 180K 運作如圖 5 所示。在電致發光量子點訊號的低能量邊緣頻譜相當於介於矽導帶與鍺的價電帶束縛態的能量差。因此矽鍺的能位障推算約為 0.4 電子伏特(3.1 微米) 長波長偵測如 3.5-5 微米來自這量子點的 intraband 躍遷。delta 摻雜也被導入金氧半矽鍺量子井紅外線光偵測器，此結構與量子點元件相似，但量子點被五層 3 奈米厚的 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 量子井所取代，外加不同電壓的頻譜響應如圖七所示，量子井元件的吸收波長為一到較長的波長處，因為量子井元件的限制能量較量子點小，在 $V_G=5$ 且 15K 峰值 responsivity 為 1.8 ma/W。矽鍺量子井偵測器有較量子點偵測器有較大的 responsivity，被光激發的電洞可能會被之後的量子點/量子井層所捕陷。在量子井元件裡被捕陷的電洞較容易被熱激發導因於較小的限制能量，這將導致比量子點元件有較大的 responsivity。量子井結構在吸收光譜低於 3 微米以下亦有較大的 responsivity，在低溫時 3 微米的吸收波長包含 interband & intraband transition，在高溫時似乎只有 interband transition 被觀察到。



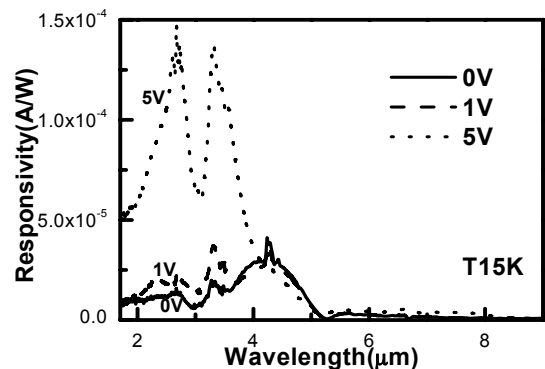
圖一 金氧半矽/鍺量子點紅外線光偵測器的結構 此 20 層的鍺量子點由超高真空/化學氣相沉積所製成。



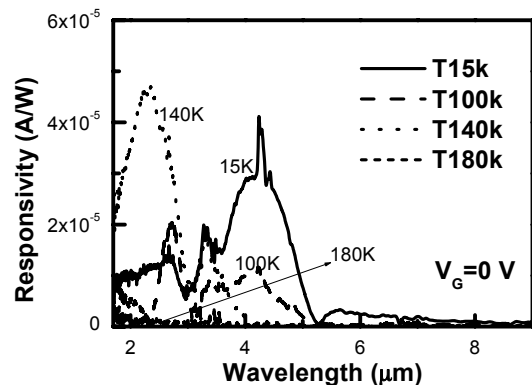
圖二 金氧半矽/鍺量子點紅外線光偵測器的暗電流，反轉電流較累積電流小。



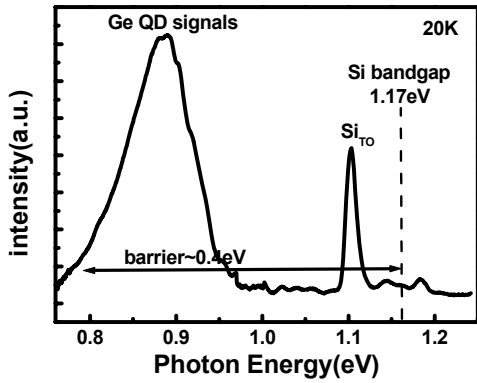
圖三 NMOS 矽/鍺量子點紅外線光偵測器在逆偏壓時的能帶圖，在紅外線照射時可以激發被限制的電洞。



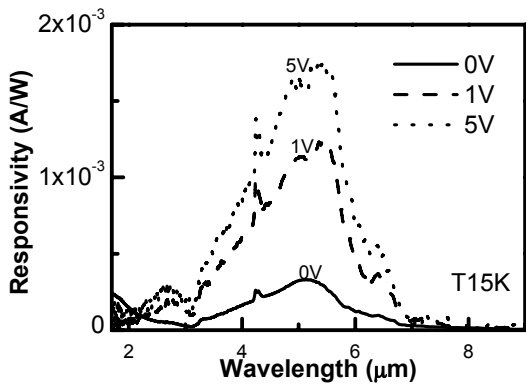
圖四 量子點元件在不同電壓時的頻譜響應，3.5-5 微米的吸收已經在小偏壓時被明顯的觀察到。



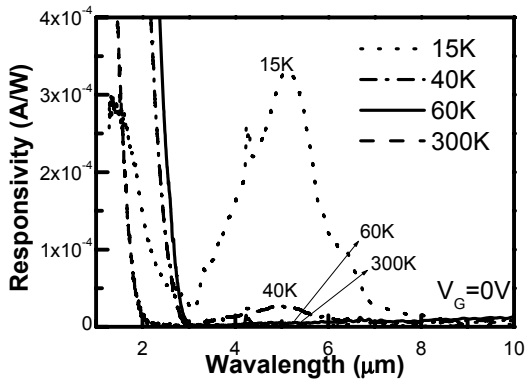
圖五 量子點元件在不同溫度的頻譜響應，在 180K 時 2-3 微米的吸收幾乎消失。



圖六 多層矽/鍺量子點結構在 20K 的 PL。



圖七 量子井元件在不同外加電壓的頻譜響應，15K 峰值 responsivity 為 1.8 ma/W。



圖八 量子井元件在不同溫度的頻譜響應，在 60K 時 3-7 微米的吸收幾乎消失

B. high-k & metal gate

研究目的

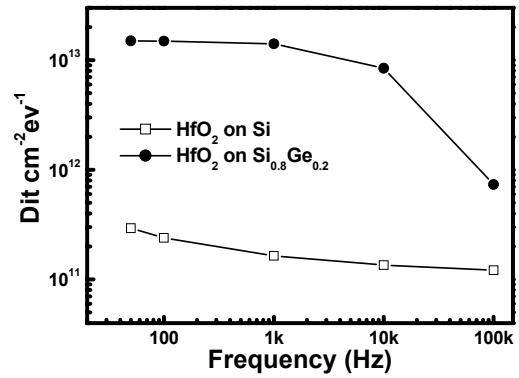
MOSFET 之開疊為決定元件動作最重要的控制開關，隨製程持續微縮，開疊絕緣層厚度必須隨之愈來愈薄以維持對電晶體的良好控制能力與提高元件驅動能力(因為汲極輸出電流大小與開極介電層的電容成正

比)，同時可改善短通道效應。以現今製程能力， SiO_2 為材料之絕緣層厚度可以微縮達到 12\AA ，僅相當於三層 SiO_2 原子堆疊的厚度，實已接近獲得高品質且平整開極絕緣層之物理極限。特別是當氧化層小於 3 nm 時，由於直接穿隧(direct tunneling)機率的增強，引起開極電流急遽的增加。另一方面，當氧化矽厚度小於 1.3 nm 後，實驗上發現元件的驅動力不再隨厚度縮小而增強，因開極寄生電阻有關反而呈退化的情形。由上面的說明可知，發展替代 SiO_2 的高介電係數 (high-k) 開疊絕緣層材料與模組技術已是刻不容緩且勢在必行的關鍵技術。又因為 high-k 的成長溫度比 SiO_2 來的低，所以可以將其應用在矽鍺基板上，使其元件獲得較高的遷移率。

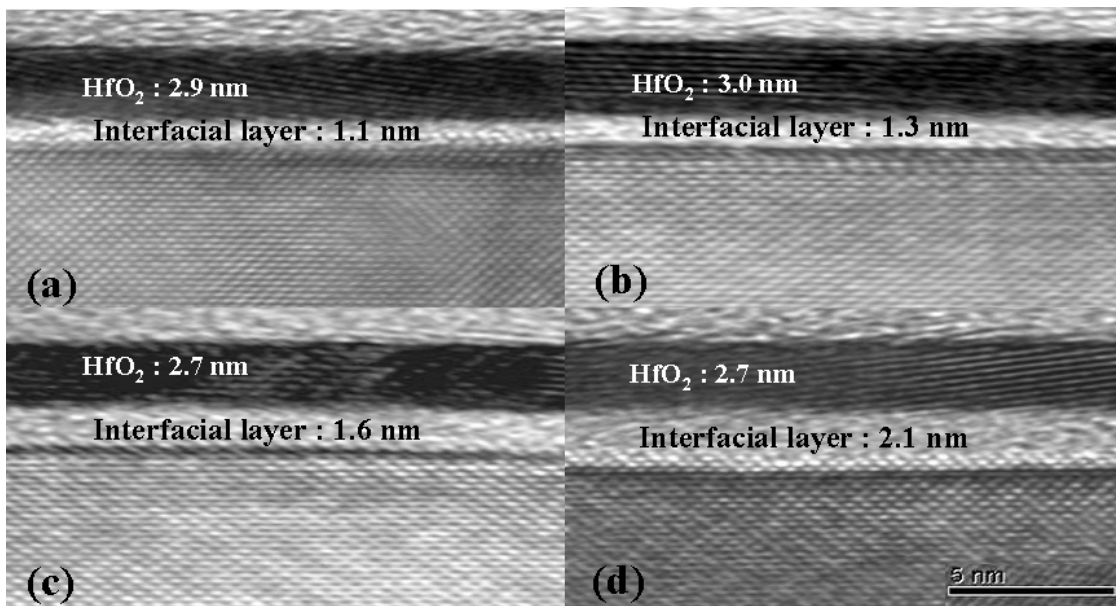
結果與討論

圖九為氧化鈉在矽和矽鍺基板上的穿隧電子顯微圖片。a 是在矽基板，b 是在矽鍺基板上用 600°C 退火 c 是在矽基板，d 是在矽鍺基板上用 900°C 退火。只要用相同的退火溫度，矽鍺基板與氧化鈉的介面層，就會比矽基板上的介面層來的厚，如此可知，對於高溫的退火而言，矽基板的熱穩定性還是比矽鍺來的好。圖十是用來說明氧化鈉在矽和矽鍺基板上的 flatband voltage 與介面缺陷密度 (Dit) 隨著不同的退火的溫度的特性變化。由 flatband voltage 在矽或是矽鍺基板上的變化，可以得知，高溫退火應該是會產生負的電荷(包含介面與介電層內的電荷總和)。接下來再圖十一中可以了解到氧化鈉在矽和矽鍺基板上的介面缺陷密度 (Dit) 隨著不同的量測頻率的特性變化。由介面缺陷密度在矽鍺基板上由低頻往高頻的時候，有明顯的減少，因為在矽鍺基板上的介面缺陷密度大都是 slow traps 所以才會跟不上高頻的量測。由於 high-k 材料與 poly Si 的介面會產生額外的氧化層以及 poly depletion 的現象需要克服，所以搭配 metal gate 也是研究 high-k 材料中重要的一環。由圖十二中可以看出在成長 TaN 時不同的氮氣的流量之下電容值的變化。根據

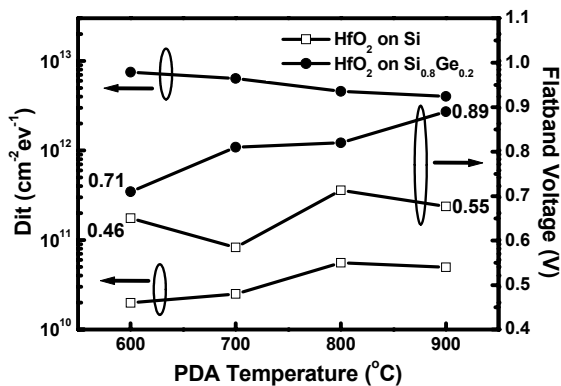
PMA900°C 的趨勢變化，可以看出在氮氣流量超過 13 sccm 時，電容的消散現象就十分嚴重。接下來可以從圖十三中得知在不同的氧化層厚度之下金屬功函數對氮氣的流量的關係。很明顯的隨著氮氣流量的增加功函數也為之上升，但是依超過 13 sccm 之後的趨勢就不固定，這個可以由圖十二的電容消散現象加以解釋。最後在圖十四說明了 high-k 材料在光電元件上的應用，其中氧化鈉在矽基板上的光強度經過 10000 秒的定電流破壞的特性變化。有分別使用氬氣及氬氣退火去改善介面特性，很明顯可以看出，氬氣退火擁有比較穩定介面特性，且能夠經過長時間的電流破壞。



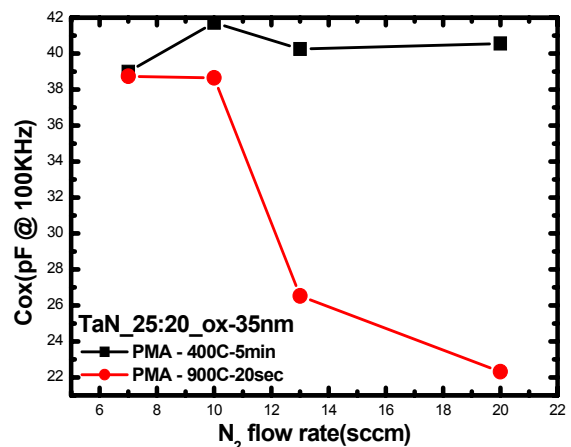
圖十一 氧化鈉在矽和矽鍺基板上的介面缺陷密度 (Dit) 隨著不同的量測頻率特性變化。



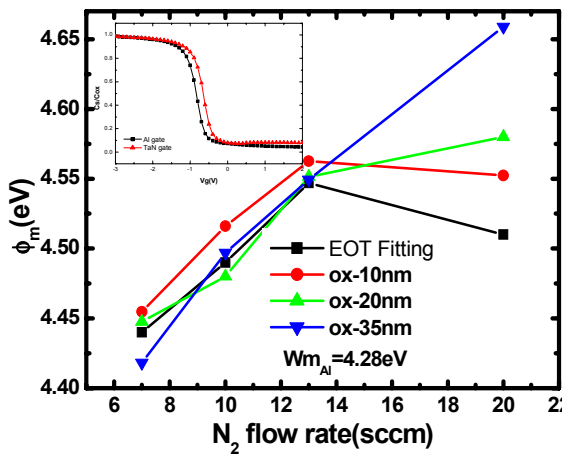
圖九 氧化鈉在矽和矽鍺基板上的穿隧電子顯微圖片。a 是在矽基板,b 是在矽鍺基板上用 600°C 退火 c 是在矽基板,d 是在矽鍺基板上用 900°C 退火。



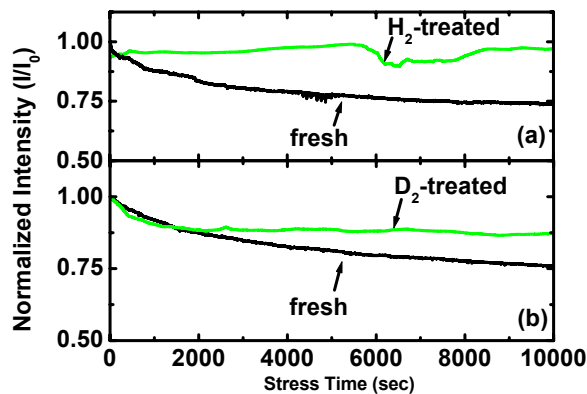
圖十 氧化鈉在矽和矽鍺基板上的 flatband voltage 與介面缺陷密度 (Dit) 隨著不同的退火的溫度的特性變化。



圖十二 在不同的氮氣的流量之下電容值的變化。



圖十三 在不同的氧化層厚度之下金屬功函數對氮氣的流量的關係。



圖十四 氧化鈣在矽基板上的光強度經過 10000 秒的定電流破壞的特性變化。

References

- [1] C. W. Liu et al., IEDM Tech. Dig., pp.749-752, 1999.
- [2] B.-C. Hsu et al., IEDM Tech. Dig., pp.91-94, 2002.
- [3] B.-C. Hsu et al., IEEE Electron Device Letters, vol. 25, pp. 544-546, 2004

Publication list

1. T. C. Chen, L. S. Lee, W. Z. Lai and C. W. Liu, "The Characteristic of HfO₂ on Strained SiGe," *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 8, No. 1-3, pp. 209-213, 2005.
2. T. C. Chen, L. S. Lee, W. Z. Lai and C. W. Liu, "The Characteristic of HfO₂ on Strained SiGe," *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 8, No. 1-3, pp. 209-213, 2005.
3. C.-Y. Yu, T. C. Chen, S.-H. Huang, L. S. Lee, and C. W. Liu, "Electrical and Optical

Reliability Improvement of HfO₂ Gate Dielectric by Deuterium and Hydrogen Incorporation," *11th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, 2004.

4. T. C. Chen, L. S. Lee, W. Z. Lai, and C. W. Liu, "The Characteristic of HfO₂ on Strained SiGe," *2nd International SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM)*, Frankfurt (Oder), Germany, May 16-19, 2004.