

以單層連續金屬膜建構無彩色濾光片與無p-n接面之全彩式光偵測器

Filter-free, Junctionless Color Image Sensors

林敬哲¹、林耕德¹、陳學禮¹、賴宇紳²、陳仕鴻²、林昆霖²、陳博義²

¹國立台灣大學材料科學與工程研究所、²國家奈米元件實驗室

摘要

精簡的結構、良好的色彩分光、卓越的光電轉換效率、元件功率低耗能等，是當代彩色濾光感測器非常重要的特性。於此研究中，我們成功製備出無需使用傳統彩色濾光片、無 p-n 接面之全彩式光偵測器，在低電壓之操作下，元件便有良好的光熱電轉換效能與具備快速的響應時間。雖然此開發之元件僅由單一層鋁金屬膜之溝槽結構所構成，但卻具備良好的光收集效果、選擇性光波段吸收與光熱電轉換等多功能特性。此元件更結合了近場表面電漿現象與共振腔效應，以提升入射光在特定波段下之電場振幅強度，進而產生顯著的電流訊號輸出。本研究不僅簡化傳統彩色濾光感測器之結構，更大幅地簡化製造流程，例如：可以透過單一次的微影、蝕刻、金屬膜沉積步驟而同時製作出紅、綠、藍三原色之彩色光偵測器。此外，於本研究所提出之方法更具有極大的潛力可應用至不同種類之基板上，以連結色彩感測技術之各類應用。

Abstract

A simple structure, efficient color splitting, sufficient output of electrical signals, and low power consumption are the important characteristics of contemporary devices for color sensing. In this study, we developed filter-free, junctionless structures that exhibited a superior photo-thermo-electrical response under a low bias voltage and a short response time in milliseconds. Although our compact sensor had a simple single-layer trench-like aluminum (Al) structure, it could perform multiple functions, including light harvesting, color-selective absorption, photo-thermo-electrical transformation, and the ability to collect photoinduced differences in electrical signals. This device exploited near-field surface plasmon resonance and cavity effects to enhance the intensity of the electric field and the color-selective absorption, ultimately resulting in significant current signals in its structured Al film.

This strategy significantly simplifies not only the components of the color sensor but also its fabrication; for example, red, green, and blue color detection devices could be prepared simultaneously through a single lithography, etching, and deposition step. Furthermore, this strategy has great potential for the production of devices that operate on different kinds of substrates, thereby bridging various applications of color sensing technologies.

關鍵字 / Keywords

- 全彩式光偵測器、孔洞陣列、表面電漿共振、選擇性波段吸收
- Color Image Sensors、Hole Array、Surface Plasmon Resonance (SPR)、Wavelength-selective Absorption

前言

現今，光電元件結合奈米結構之設計已廣泛應用於光收集、光譜成像技術、光偵測器等領域^[1-8]。一般來說，彩色光偵測器主要由顯微透鏡、彩色濾光片、光導管、金屬導線層、光偵測器陣列等元件所組成，製程步驟較為繁複。因此，人們開始思考有哪些方式可以簡化製程的步驟，但又能同時使得元件保持良好的分光與光電轉換性能。

Park^[9-10]團隊提出利用垂直式矽奈米線取代傳統之彩色濾光片，此結構為p-i-n光感測器，可以將所吸收的光子直接轉換集成電訊號，然而缺點為所成長之矽奈米線數量不易控制且不易使之整齊排列，造成元件所產生的電訊號數值不穩定。此外，接面型式(Junction-type)之感測器製程較為繁複，往往需要施加較大的偏壓於元件，才能使其產生電訊號之輸出。於本研究中，我們希望所製備出的元件結構即同時具備良好的分光能力與光熱電轉換功能，因此我們提出一個不需使用彩色濾光片，而改採用以表面電漿現象與共振腔效應所建構之彩色濾光片為基礎，以開發出無接面型式(Junctionless-type Photoconductor)之全彩式光偵測器，此種感測器僅由一層數十奈米且具有淺溝槽結構的金屬鋁膜(Single-layer/Trench-like Thin Metallic Structure)與基板形成歐姆接面所構成，相較於接面型式之元件，將可以大幅地簡化元件之結構，且製程也相對容易且便宜。此外，透過改變金屬膜之週期性孔洞陣列結構，所產生的表面電漿效應不

但可達到良好的分光效果，以使得特定波段之入射光能夠進入至共振腔之中，而後能更能進一步地結合溝槽結構於近場處產生電場之增益，以使得此單層連續金屬薄膜具有良好的選擇性光波段吸收之特性，進而建構出紅綠藍三原色分光之全彩式感測器。

結果與討論

2.1 單層連續金屬膜結合溝槽結構之全彩式光偵測器

圖1(a)所示為我們所提出的單層連續金屬膜結合溝槽結構之全彩式光偵測器(Color-selective Single-Layer/trench-like Thin Metallic Structure, CSSTTM)示意圖。此元件僅由單層鋁金屬膜與其下方具有結構之基板所構成，於本研究中為將金屬鋁膜沉積於蝕刻出具有六方最密堆積排列溝槽狀結構之二氧化矽層上，以完成整體元件之製作。本研究中，溝槽狀結構金屬鋁膜扮演兩個主要功能：一、作為電漿子彩色濾光片；二、作為電極，我們將可以藉由連續結構金屬膜之孔洞寬度(Width, W)、週期(Period, P)、厚度(Thickness, T)與蝕刻深度(Depth, D)之調控來輕易地調製出發生高吸收之波段，此提出之結構將可藉由表面電漿共振(Surface Plasma Resonance, SPR)現象[11-12]與三維共振腔效果(3D Cavity Effects)，使得特定波長的光可以進入結構之中與其產生交互作用，進而使得此結構於特定波段下具有高吸收之特性。如圖1(b)所示為當入射光與結構發生共振與非共振時情況時之比較，

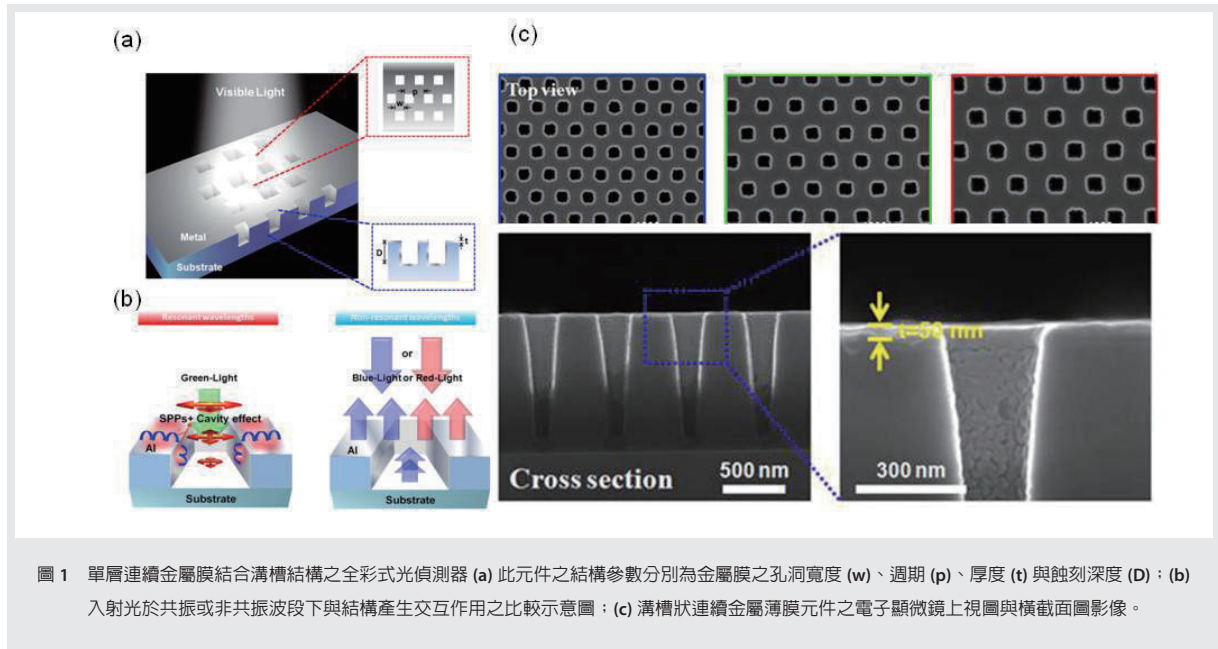


圖 1 單層連續金屬膜結合溝槽結構之全彩式光偵測器 (a) 此元件之結構參數分別為金屬膜之孔洞寬度 (w)、週期 (p)、厚度 (t) 與蝕刻深度 (D)；(b) 入射光於共振或非共振波段下與結構產生交互作用之比較示意圖；(c) 溝槽狀連續金屬薄膜元件之電子顯微鏡上視圖與橫截面圖影像。

表 1 不同鋁光柵週期下對銻層穿透率之模擬數據表。

Symbol	H019P04	H02P045	H022P05	H024P055	H027P06	H029P065
Diameter (μm)	0.19	0.2	0.22	0.24	0.27	0.29
Period (μm)	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65

假使今天所設計之結構與綠光會發生共振，大部分的綠光將會耦合成表面電漿波，而少部分未耦合成表面電漿波的綠光仍會傳遞進入共振腔，藉由此兩種方式綠光都可以被金屬吸收而產生聲子震盪或與金屬內部的電子發生散射之現象，使得元件在照光後，金屬鋁膜的溫度會有所上升，而其關鍵技術在於元件照光時，會改變金屬鋁膜的電阻特性，使光電流在照光前後有所變化，進而達到光偵測的目的；相反的，紅光和藍光與此結構不會產生共振，大部分非共振波段的光將會被反射，僅有極小部分會被結構所吸收，因此非共振波段的光對光電流改變所造成之影響並不顯著，進而達成選擇性波段偵測之效果。圖1(c)所示為所製作出元件結構之冷場發射掃描式電子顯微鏡影像，從上視圖可以看到此金屬鋁膜具有六方最密堆積排列且有特定的孔洞直徑與週期。在此為了方便於後續的討論，我們對於此連續金屬溝槽結構

以他們特有的尺寸(如：孔洞寬度與週期)來進行命名。舉例來說，一個元件的孔洞陣列結構若是孔洞寬度為190 nm而週期為400 nm，則我們將其命名為” H019P04”，而其他的元件結構以相同的命名方式陳列於表1。而於本研究中，於實驗上主要用到的元件結構為H019P04、H022P05與H027P06，依序分別對應到藍光(455 nm)、綠光(525 nm)、紅光(625 nm)之表面電漿元件。

2.2 CSSTTM元件結構之光學性質

首先，為了分析元件結構的分光能力，我們採用三維時域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain Method, FDTD)來進行光學模擬，探討在不同金屬孔洞參數對於分光能力之影響。在此，我們固定元件之蝕刻深度(D)為1000 nm，金屬鋁膜厚度(t)為50 nm，於此條件下進一步的改變孔洞寬度的大小(w)與孔洞陣列的週期(p)。我們在元件上方1 μm 處設定有一個平面波光源傳遞進入元件，

分別在鋁金屬-二氧化矽界面下方5 nm處設定一個接收穿透光(T)的偵測器；而在入射波光源上方200 nm處設定一個接收反射光(R)的偵測器，如此我們便可以更進一步計算得知該元件的吸收值(A=1-R-T)。此外，鋁、二氧化矽、矽材料在模擬中所使用之介電常數值皆取自於相關文獻[13]。

圖2(a)-(c)分別為模擬一道平面波入射到特定設計為藍、綠、紅分光的金屬孔洞週期結構的電場分佈圖。圖2(a)由左而右依序表示為光波長為455、525、625 nm在通過元件H019P04之電場強度分佈圖，當入射之波長為455 nm時，其靠近SPR穿透之峰值波長，因此我們可以觀察到明顯的電場強度穿透進入溝槽狀金屬孔洞陣列之中，且在溝槽結構的共振腔中有明顯的電場增強效益，進而使得此結構於該波段下具有極高的吸收。另一方面，當我們改變入射平面波之波長時，如525、625 nm，大部分的入射光都被反射(R=82.8%)，代表著穿透至結構中的電場強度將大幅減少，而其原因為這些波段並不是

對應到H019P04這個元件結構所設計之SPR波段。同理，圖2(b)與圖2(c)分別顯示出H022P05與H027P06元件結構的模擬結果，其元件設計波段分別為綠光和紅光。模擬結果充分顯示溝槽狀金屬孔洞陣列的電場強度的共振波段分別為525 nm與625 nm。因此，我們將此元件所表現出之選擇性波段吸收特性歸功於溝槽狀金屬孔洞陣列結構所具有的表面電漿現象與共振腔效應。

圖2(d)為溝槽狀金屬孔洞陣列結構之光學模擬吸收結果，可得知光譜響應及吸收峰值的位置可藉由改變孔洞寬度與週期的尺寸大小而被調整，當結構之孔洞寬度與週期隨之變大時，則吸收之峰值會有明顯的紅移現象。圖2(e)為元件實際之實驗量測結果，與圖2(d)中之光學模擬結果差異不大，而造成此些許差異之因素，我們推測為溝槽狀結構之側壁並非完美的垂直，而是具有一小角度之傾斜角，如圖1(c)截面圖所示，因而造成於光學特性上的些微差異。圖2(f)為針對H019P04元件於入射具有不同偏振態角度之440 nm光波長時，所量測計算而得

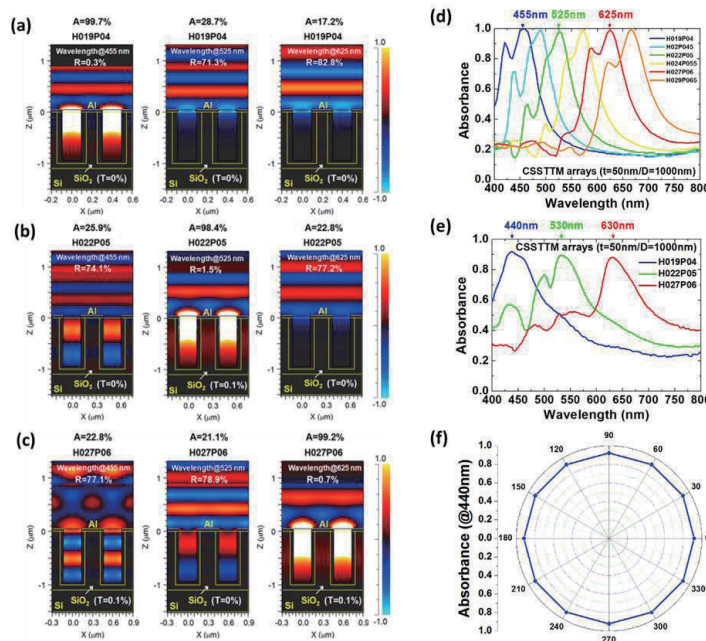


圖 2 (a-c) 計算不同波長通過不同鋁金屬孔洞陣列之電場強度分佈圖，入射波長分別為 455、525、625 nm，元件結構分別對應到 (a) H019P04；(b) H022P05；(c) H027P06 之元件；(d) 改變溝槽狀金屬孔洞陣列結構尺寸之光學模擬吸收結果；(e) 所製作出元件之光學吸收量測結果；(f) H019P04 元件於入射具有不同偏振態角度之 440 nm 光波長的吸收值。

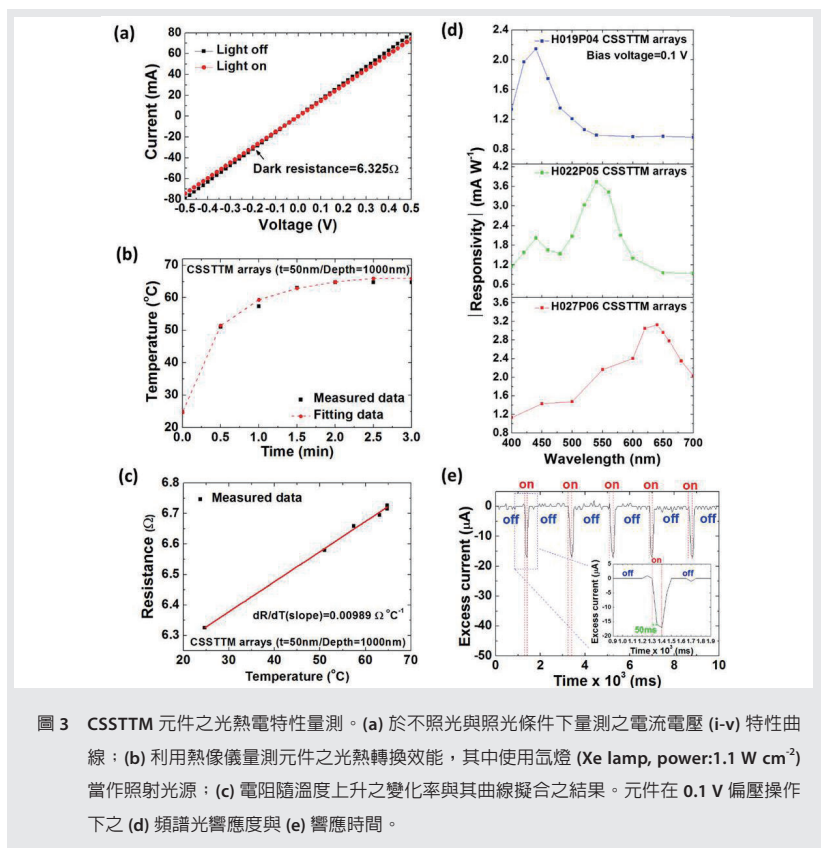


圖 3 CSSTTM 元件之光熱電特性量測。(a) 於不照光與照光條件下量測之電流電壓 (i-v) 特性曲線；(b) 利用熱像儀量測元件之光熱轉換效能，其中使用氙燈 (Xe lamp, power:1.1 W cm⁻²) 當作照射光源；(c) 電阻隨溫度上升之變化率與其曲線擬合之結果。元件在 0.1 V 偏壓操作下之 (d) 頻譜光響應度與 (e) 響應時間。

的吸收值，於本研究中，由於溝槽狀金屬孔洞陣列所採用的為六方最密堆積排列，故此結構所展現之光學吸收特性不受入射光之偏振態所影響。

2.3 CSSTTM 元件之光熱電特性

於本研究中所提出之元件僅由單層鋁金屬膜與其下方已含有結構之二氧化矽基板所構成，我們將分別利用電源電表儀與熱像儀測量元件在光照前後之光-熱-電特性，其中包含元件之電阻與溫度之變化。如圖3(a)所示，量測H027P06元件在光照前與光照後之電流-電壓 (Current-voltage, I-V) 特性曲線，可以發現光照前所測得的電阻值較小為6.325 Ω，而光照後電阻值上升成6.727 Ω，其原因為元件在光照後，金屬鋁膜的溫度會上升，進而導致電阻值的上升。因此，在施以固定之偏壓下，元件照光前後之電流有著明顯的改變，如此代表著此元件可以用以測量入射光之強度。此外，當我們對元

件施予更大的偏壓時，元件之光暗電流會有更大的差異，如圖3(a)之插圖所示。然而，為了降低量測時所產生之電阻熱來干擾實質上照光所造成之溫度變化，我們固定於0.1 V的偏壓下對元件進行量測。圖3(b)為利用熱像儀量測元件之光熱(Photothermal)轉換效能，我們採用氙燈(Xe lamp, Power:1.1 W cm⁻²)作為照射光源，量測H027P06元件之溫度隨著照射時間改變之變化，於此可以發現元件僅歷經三分鐘之照射時間，溫度很快地從室溫25°C上升至64.8°C，如此代表著元件上方之單層鋁膜具有很好的光熱轉換性質。圖3(c)顯示元件之電阻值隨溫度上升而上升，並將電阻隨溫度上升之變化率透過計算進行曲線擬合，可以得到電阻值隨溫度上升之變化率呈

線性關係，其斜率為0.00989 Ω °C⁻¹。接著，我們於施加0.1 V偏壓下，量測元件之光電流進而用量測到的數據計算其光響應率(Spectral Responsivity) (單位: AW⁻¹)。圖3(d)顯示H019P04、H022P05與H027P06元件三者之峰值位置都非常接近顏色匹配函數的數值，分別落在440(藍)、540(綠)、640(紅) nm，並且所量測到的最大光響應度分別為2.15、3.74、3.13 mA W⁻¹。由實驗之結果可以得知元件僅須於施予0.1 V偏壓的情況下，即具有良好的光響應度來區分不同波段的光，代表我們所提出的元件能夠以低耗能的方式來偵測外來環境的光，此特點對日常生活將有很大的實用價值。光感測器除了須具備良好的光電流、暗電流分辨特性外，另一個重要的特徵是快速的響應時間。圖3(e)顯示元件過剩電流(Excess Current)隨時間變化的關係，所謂過剩電流定義為光電流與暗電流的差值。由實驗結果發現，元件的響應時間，即其光照後電訊號之上升時間(Rise Time)與光源關掉後電訊號之下降時

間(Fall Time)分別僅需50 ms與100 ms，證實此元件縱使於極短的光照時間下，即可有電流的變化來做為光感測器使用。

結 論

本研究成功地製備出以表面電漿技術為基礎之溝槽狀單層連續金屬薄膜全彩式光偵測器，利用溝槽狀之週期性孔洞陣列結構所產生的表面電漿現象與共振腔效果，來使得進入結構中之光波長於近場處產生電場增益，因此，此單層連續金屬薄膜元件不但具有良好的選擇性光波段吸收之特性，更擁有極佳的光熱電轉化效能、快速的響應時間、低耗能等特性。此外，我們所提出的全彩式光偵測器不僅簡化彩色光感測器之結構，更大幅簡化元件的製造流程，此元件的製作過程僅需要一次的黃光微影製程即可完成。因此，我們所提出的元件設計策略具有極高的潛力直接應用於現今半導體製程相容的電路設計之中，並可望應用至不同的基板上，以連結色彩感測技術之各類應用。

致 謝

感謝中華民國行政院科技部給予經費補助(計畫編號: MOST-103-2221-E-002-041-MY3與MOST-103-2221-E-002-092-MY3)。

參考資料

- [1] T. Xu, Y.-K. Wu, X. Luo and L. J. Guo, *Nat. Commun.*, 1, 59, 2010.
- [2] Z. Fan, H. Razavi, J. Do, A. Moriwaki, O. Ergen, Y.-L. Chueh, P. W. Leu, J. C. Ho, T. Takahashi, L. A. Reichertz, S. Neale, K. Yu, M. Wu, J. W. Ager and A. Javey, *Nat. Mater.*, 8, 648, 2009.
- [3] J.-H. Ahn, H.-S. Kim, K. J. Lee, S. Jeon, S. J. Kang, Y. Sun, R. G. Nuzzo and J. A. Rogers, *Science*, 314, 1754,

- 2006.
- [4] B. Tian, X. Zheng, T. J. Kempa, Y. Fang, N. Yu, G. Yu, J. Huang and C. M. Lieber, *Nature*, 449, 885, 2007.
- [5] L. Cao, J. S. White, J.-S. Park, J. A. Schuller, B. M. Clemens and M. L. Brongersma, *Nat. Mater.*, 8, 643, 2009.
- [6] L. Cao, J.-S. Park, P. Fan, B. Clemens and M. L. Brongersma, *Nano Lett.*, 10, 1229, 2010.
- [7] S.-K. Kim, R. W. Day, J. F. Cahoon, T. J. Kempa, K.-D. Song, H.-G. Park and C. M. Lieber, *Nano Lett.*, 12, 4971, 2012.
- [8] J. Walia, N. Dhindsa, M. Khorasaninejad and S. S. Saini, *Small*, 10, 144, 2014.
- [9] H. Park, Y. Dan, K. Seo, Y. J. Yu, P. K. Duane, M. Wober and K. B. Crozier, *Nano Lett.*, 14, 1804, 2014.
- [10] K. Seo, M. Wober, P. Steinvurzel, E. Schonbrun, Y. Dan, T. Ellenbogen and K. B. Crozier, *Nano Lett.*, 11, 1851, 2011.
- [11] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio and P. A. Wolff, *Nature*, 391, 667-669, 1998.
- [12] W. L. Barnes, A. Dereux and T. W. Ebbesen, *Nature*, 424, 824-830, 2003.
- [13] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, 1998.