

四象限光電二極體用於高精度位移測量系統的應用案例

■作者：SILEGO Technology 供文

四象限光電二極體是光學跟蹤和位移測量系統中的關鍵部件。典型應用包括光學資料存放裝置中拾取鐳射的光束居中，鐳射鑄（光阱）系統中的珠位元測量與阱剛度標定、掃描探針顯微鏡中的懸臂位移測量，以及各種長距離鐳射跟蹤的應用，如航太和衛星光通信，以及針對土木工程和採礦業校準的應用。此外，由於其簡單、可靠的設計和高靈敏度，四象限光電二極體是二維光束對中和位移測量最常用的位置敏感器件。不過，四象限光電二極體的電路，例如類比信號處理鏈後面的電路限制了整個傳感系統的特性。因此，要特別注意配套電路的設計。通常情況下，基於四象限光電二極體的位移測量系統都用於戶外（如土木工程和採礦業），其中的測量系統必須是電池供電的。考慮到這種測量系統的廣泛應用，需要不斷降低電源電壓和功耗，因此必須密切關注電路設計。

在本應用筆記中，我們將提出一個針對高精度位移測量、基於 SILEGO SLG88104V 軌至軌 I/O 375 nA 四運放的低電壓、超低功耗、低雜訊四象限光電二極體電路設計。

用四象限光電二極體測量位置

測量系統的具體要求往往取決於：精度、準確性、線性度、動態範圍和頻率頻寬。在進行測量的位置和四象限光電物體之間，使用由一個光源組成的光學系統（通常使用鐳射或 LED），通常是非常簡單的無源光學元件來完成這些指定要求。這種特殊而簡單的光學系統起到確定物體位置和光點在四象

限光電二極體敏感表面的作用。象限光電二極體表面的光斑輻照度分佈主要取決於所用光源，也取決於目標光學耦合系統的特性。無論四象限光電二極體表面的光點輻射分佈如何，大多數關於四象限光電二極體中心的光點位置評估演算法都是基於光點重心的位置計算。這樣的演算法實現了高靈敏度、高速度、高解析度的位置測量。每個四象限光電二極體都由沉積在一個晶片上的四個匹配的光電二極體組成，如圖 1 所示。

根據四象限光電二極體表面的光點位置和形狀，每個光電二極體都將產生電流，其線性依賴於捕獲的光功率量。因此，如果光點對稱於兩個軸，且集中在四象限光電二極體中心，所有四個光電二極體的電流都是一樣的。如果光點中心從四象限光

圖 1：在一個晶片上沉積四個匹配光電二極體的四象限光電二極體

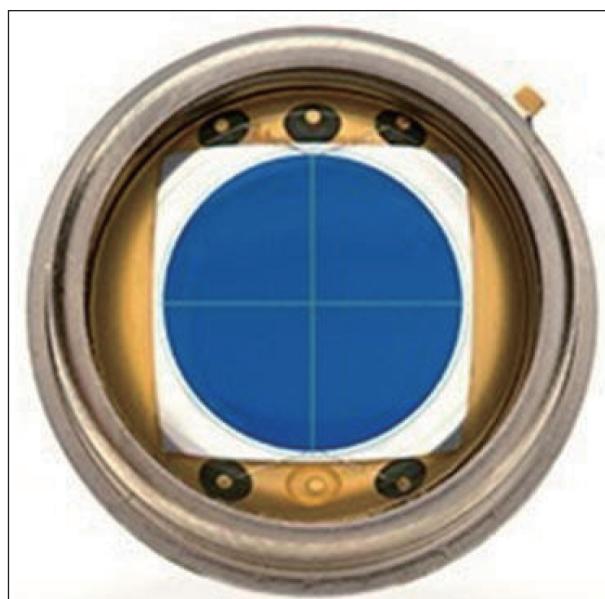
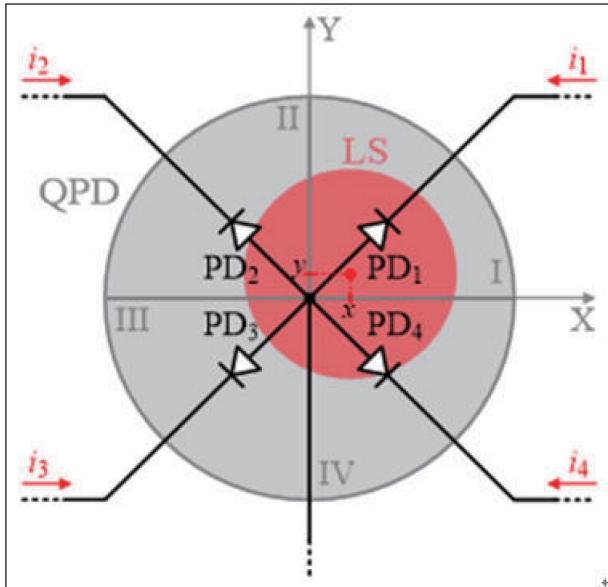


圖 2: 四象限光電二極體 (QPD) 由四個光電二極體 (PD1、PD2、PD3 和 PD4) 組成，以其表面形成光點 (LS) 的極管的照片方式照明



電二極體中心移動，電流會有所不同。

為了確定光點中心對於象限光電二極體中心的位置，光電二極體電流必須以這樣一種方式處理，即在電路輸出，我們有與沿兩個軸的光點位移成正比的電壓信號。此外，由於四象限光電二極體捕獲的整體光功率可能不同，其輸出電路必須提供與光總功率有關的電壓信號。這個信號用作歸一化信號。為了滿足所有這些要求，相應的電路可以基於 SILEGO SLG88104V 軌至軌 I/O 375 nA 四運算放大器成功製作。

通過處理來自四象限光電二極體的電流信號來直接測量相對於四象限光電二極體中心的光點中心位置是不可能的。不過，通過測量這些電流信號，就可以通過光強分佈參數的比例估計四象限光電二極體表面的光點位置。為了確定這些關係，關鍵是要知道四象限光電二極體表面的輻照度分佈。由於光點中心位置和光電二極體產生的電流之間複雜的數學關係，是不可能精確測量這些比例的。通常在象限光電二極體表面運動的光點都很小。因此，光點中心位置與以下方式的光電二極體電流成正比：

其中 x 和 y 分別是沿 X 軸和 Y 軸的光點中心位置，而 i_j 是通過四象限光電二極體 j -th 象限獲得的

圖 3: 建議的象限光電二極體電路

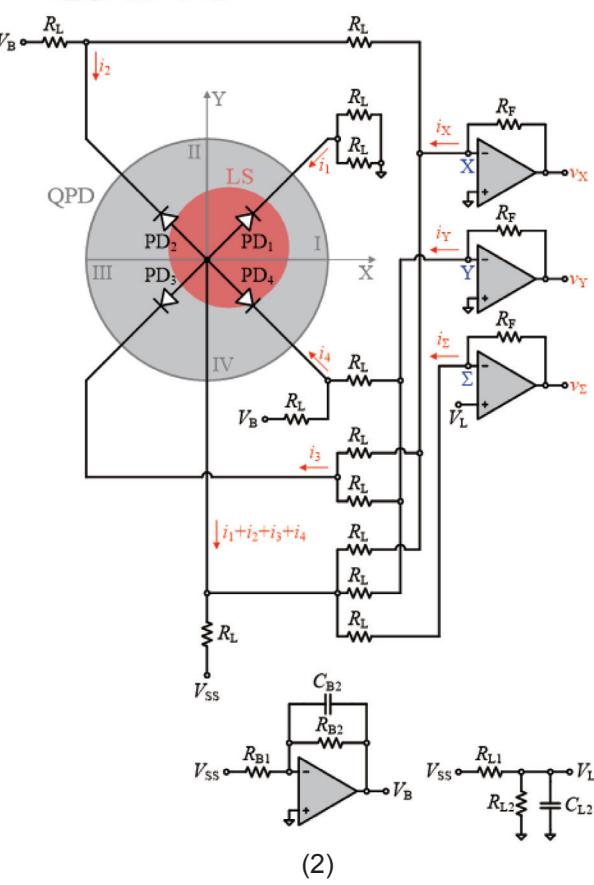
$$x \propto \frac{(i_1 + i_4) - (i_2 + i_3)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4} \quad (1)$$

$$y \propto \frac{(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}$$

$$i_x = \frac{1}{2}(i_2 + i_3) - \frac{1}{4}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) = -\frac{1}{4}[(i_1 + i_4) - (i_2 + i_3)]$$

$$i_y = \frac{1}{2}(i_3 + i_4) - \frac{1}{4}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) = -\frac{1}{4}[(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)]$$

$$i_z = -\frac{1}{4}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4)$$



電流，其中 $j = 1, 2, 3, 4$ ，如圖 2 所示。為了消除在測量過程中可能出現的光源發射功率變化的影響，必須有歸一化的整體捕獲光功率，即電流差信號 $((i_1+i_4) - (i_2+i_3))$ 和 $((i_1+i_2) - (i_3+i_4))$ 必須除以與所有四個光電二極體電流之和 $(i_1+i_2+i_3+i_4)$ 成正比的相應信號。

四象限光電二極體電路

為了實現光點位置的測量，即對應目標的位置，四象限光電二極體後面的電路必須提供電流差信號以及與所有光電二極體電流總和成正比的信號。滿足這樣條件的典型電路至少包括七個運算放大器。大量的運算放大器會增加整體功耗，同時惡化整個信號處理鏈的特性。為了提供低電壓、超低功耗、低雜訊四象限光電二極體電路，只使用三個運算放大器處理光電二極體電流的類比信號，而第四個運算放大器只用於偏置目的。這種相對簡單的電路如圖 3 所示。從圖 3 中你可以注意到，所有需要的演算法都是採用相同值 R_L 組成的電阻網路來實現的。

跨阻放大器將電流信號轉換成相應的電壓信號 v_X , v_Y 和 v_Σ 通過下式給出：

$$\begin{aligned} v_X &= R_F i_X = -\frac{1}{4} R_F [(i_1 + i_4) - (i_2 + i_3)] \\ v_Y &= R_F i_Y = -\frac{1}{4} R_F [(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)] \\ v_\Sigma &= R_F i_\Sigma = -\frac{1}{4} R_F (i_1 + i_2 + i_3 + i_4) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 R_F 是回饋電阻器電阻和跨阻放大器增益。

值得一提的是，這兩個電阻 R_L 的用途是連接在光電二極體 PD1 的陰極之間，而地是對稱的，即所有四個光電二極體都必須連接到相同電阻，以匹配其頻率回應。

四象限光電二極體偏置電路

運算放大器具有雙電源，即由兩個電壓源 V_{DD} ($V_{DD} > 0$) 和 V_{SS} ($V_{SS} < 0$) 進行偏置。為了使四象限光電二極體進入光感模式，電壓源 V_{SS} 通過連接到四象限光電二極體共陽極的 R_L 提供負偏置。不過，這種負偏置增加了跨阻放大器輸出的 DC 電壓，即使四象限二極體沒有被光照，也由此引入了測量誤差。因此，引入兩個恒定電壓 V_B 和 V_L 來彌補四象限光電二極體負偏置的影響，並消除測量誤差。忽略運算放大器的失調電壓，以及四象限光電二極體的輸

入電流和漏電流，當四象限光電二極體沒有被照亮時，所有三個跨阻放大器的輸出都必須等於零。如果滿足了以下兩個條件，這些條件就滿足了：

$$\begin{aligned} V_B &= -\frac{2(R_F + R_L)}{3R_F + 5R_L} V_{SS} \\ V_L &= \frac{R_F}{3R_F + 5R_L} V_{SS} \end{aligned} \quad (4)$$

提供這兩個恒電壓的輔助電路顯示在圖 3 底部。為了能夠簡單地將這兩個電壓設置在所需級別，而不使用電位器，可以簡單地選擇 $R_F = R_L = R$ ，得出以下等式： $V_B = -V_{SS}/2$ 、 $V_L = V_{SS}/8$ 、 $R_{B1}/R_{B2} = 2$ 和 $R_{L1}/R_{L2} = 7$ 。需要指出的是，如果電路是用電池供電的，電池電壓的下降將不會影響所有三個跨阻放大器輸出的電壓水準，與電池電壓降無關。

四象限光電二極體電路的小信號分析

當四象限光電二極體暴露在光的照射下時，來自光電二極體的光電流會流入電路，從而提供關於光點位置的資訊。相應的電壓信號由方程 (3) 給出。不過，這些電流可以影響四象限光電二極體的兩級的電壓。光電二極體的兩級電壓通過下式給出：

$$\begin{aligned} V_{PD1} &= V_B - \frac{1}{4} R_L (i_1 + i_2 + i_3 + i_4) - \frac{1}{2} R_L i_1 \\ V_{PD2} &= V_B - \frac{1}{4} R_L (i_1 + i_2 + i_3 + i_4) - \frac{1}{2} R_L i_2 \\ V_{PD3} &= V_B - \frac{1}{4} R_L (i_1 + i_2 + i_3 + i_4) - \frac{1}{2} R_L i_3 \\ V_{PD4} &= V_B - \frac{1}{4} R_L (i_1 + i_2 + i_3 + i_4) - \frac{1}{2} R_L i_4 \end{aligned} \quad (5)$$

為了保持四象限光電二極體處在感光模式，需要保證施加在四個光電二極體的電壓都是反向電壓。考慮到位置測量的高度線性要求，必須滿足 $i_1 \approx i_2 \approx i_3 \approx i_4 \approx I/4$ ，其中 $I = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$ ，四象限光電二極體感光模式的條件通過下式給出：

$$I < \frac{4V_B}{3R_L} = -\frac{2V_{SS}}{3R} \quad (6)$$

其中 $R_F = R_L = R$ ，並假設 $V_B = -V_{SS}/2$ 。這個條件限制了照射到四象限光電二極體光源的最大光功率，得以保持整個四象限光電二極體電流在不等式

定義的最大值以下 (6)。四象限光電二極體電路的雜訊分析由於使用了大量元件，圖 3 所示的四象限光電二極體電路中有大量噪音源，這使得雜訊分析相當複雜和耗費時間。不過，如果我們讓 $R_F = R_L = R$ ，跨阻放大器輸出的電壓雜訊信號的功率譜密度 $\langle v_{Xn}^2 \rangle$ 和 $\langle v_{Yn}^2 \rangle$ 得到了更簡單的形式：

$$\langle v_{Xn}^2 \rangle \approx \langle v_{Yn}^2 \rangle \approx R^2 \langle i_n^2 \rangle + \frac{55}{16} \langle e_n^2 \rangle + \frac{1}{8} R^2 qI + 9kT R \quad (7)$$

其中 $\langle i_n^2 \rangle$ 和 $\langle e_n^2 \rangle$ 分別為運算放大器輸入電流和電壓雜訊的功率譜密度， $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C 是基本正電荷， I 是四象限光電二極體所有二極體的總電流和， $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 是玻爾茲曼常數， T 是電路絕對溫度。第三跨阻放大器輸出端的電壓雜訊信號的功率譜密度與每個光電二極體電流之和成正比，其中電壓信號為 v_{Σ} ，這個信號比其他兩個信號高得多，不需要過多考慮它，它與電流差成正比，因而對雜訊引起的干擾不太敏感。最後，跨阻放大器輸出的信噪比 SNR_X 和 SNR_Y 是：

$$SNR_X = \frac{R^2 i_X^2}{\langle v_{Xn}^2 \rangle B} \approx \frac{1}{16} \left(\frac{[(i_1 + i_4) - (i_2 + i_3)]^2}{\langle i_n^2 \rangle + \frac{55}{16} \langle e_n^2 \rangle + \frac{1}{8} qI + \frac{9kT}{R}} \right) B \quad (8)$$

$$SNR_Y = \frac{R^2 i_Y^2}{\langle v_{Yn}^2 \rangle B} \approx \frac{1}{16} \left(\frac{[(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)]^2}{\langle i_n^2 \rangle + \frac{55}{16} \langle e_n^2 \rangle + \frac{1}{8} qI + \frac{9kT}{R}} \right) B$$

其中 B 是要測試的頻寬。

四象限光電二極體電路的頻率響應

通常，光電二極體可以作為一個電流源與光電二極體寄生電容並聯連接的感光模式建模。為了消除較高頻率下的串擾和測量誤差，電阻值存在一定的限制。

如果光電二極體阻抗比連接到光電二極體的電路輸出阻抗高得多，串擾和測量誤差可以忽略不計。因此，必須滿足以下條件：

$$\frac{1}{\omega C_{PD}} \gg \frac{3}{4} R \quad (9)$$

其中 ω 是角頻率，而 CPD 是四個光電二極體

中每一個的電容。記住， B 是要測試的頻寬，我們得到了以下電路電阻的最大值：

$$R \ll \frac{2}{3\pi B C_{PD}} \quad (10)$$

用軌至軌 I/O 四運算放大器實現

四象限光電二極體類比信號處理電路的實現將基於 SILEGO SLG88104V 軌至軌 I/O 375 nA 四運算放大器的獨特特點。這些運算放大器的使用將使我們能夠設計低電壓、超低功耗和低雜訊的電路，其輸出將提供與兩個維度的位移成正比的信號。由於感測器的高靈敏度和低雜訊設計，這些信號將提供關於達到納米領域位移的非常精確的資訊。

完整電路旨在測量要測試物件的物理位置。通常，在機械運動的情況下，要測試的頻率範圍低於 1 kHz ($B \leq 1$ kHz)，其中光電二極體寄生電容的典型值在 10 pF 的範圍 ($CPD \approx 10$ pF)。

根據不等式 (10)，電阻器的電阻必須滿足 $R \ll 21 M\Omega$ 。如果我們選擇 $R = 1 M\Omega$ ，那麼串擾低於 1.6%，另一方面，這明顯低於四象限光電二極體的典型跨象限串擾 5%。不等式 (6) 限制了四象限光電二極體的最大總電流。如果我們用一個 $V_{ss} = -1.5$ V 的簡單電池供電，那麼根據不等式 (6)，光電二極體的最大總電流必須低於 $1 \mu A$ ($I < 1 \mu A$)。根據方程 (3)，跨阻放大器輸出電壓信號的最大振幅與光電二極體電流的總和成正比，必須低於 250 mV。當為四象限光電二極體選擇適當光功率的光源時，應當考慮這一資料。

為了在實際實驗驗證之前測試電路的特點，基於 SILEGO SLG88104V 軌至軌 I/O 375 nA 四運算放大器 spice 模型進行了 LT Spice XVII 套裝軟體的模擬。電路模型如圖 4 所示。除了電阻值為 $R = 1 M\Omega$ ，還要選擇以下值的元件： $V_{DD} = 1.5$ V， $V_{ss} = -1.5$ V， $R_{B1} = 2 M\Omega$ ， $R_{B2} = 1 M\Omega$ 和 $C_{B2} = 220$ nF (選擇這個電容值是為了保持角頻率低於 1 Hz)。

提供直流電壓 V_L 的輔助電路 (簡單分壓器) 是一個簡單的 $R-2R$ 電壓分壓器，因為電壓 V_L 為電源

電壓 V_{SS} 的 8 到 23 分之一。為了抑制雜訊信號，在第一輔助電路中使用與電容 $CL6 = 220nF$ 的相同值。人們可以注意到，通過使用有相同電阻值的電阻器，可以完成整個電路。

在 0.2pF 範圍，跨阻放大器回饋電阻通常都有寄生電容，可能惡化放大器的特性。因此，每個回饋電阻器都有這個值的並聯電容。

最後，每個光電二極體都作為與 10pF 電容並

聯的電流源來建模，它代表了光電二極體寄生電容的典型值。

假設四象限光電二極體是脈衝光照，模擬結果即光電二極體電流被建模為脈衝電流源，如圖 5 所示。模擬結果表明，在電路的瞬態響應中，(a) 光點中心位於第一象限；(b) 光點中心位於光電二極體的第二象限。

為了找到完整電路的頻率回應，針對代表相應

圖 4: 電路模擬模型

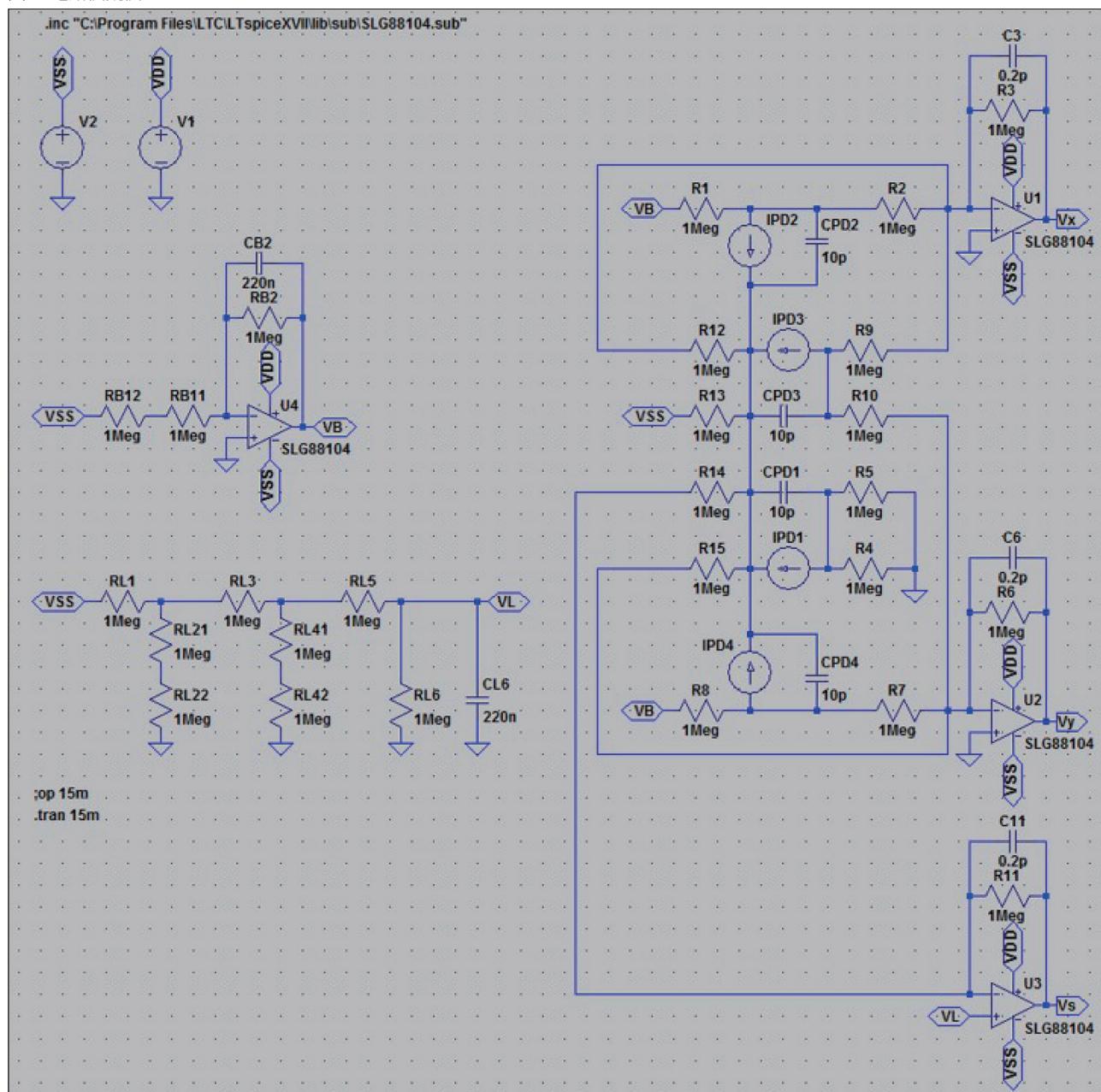


圖 5: 在模擬結果中，(a) 光點中心位於第一象限；(b) 光點中心位於第二象限

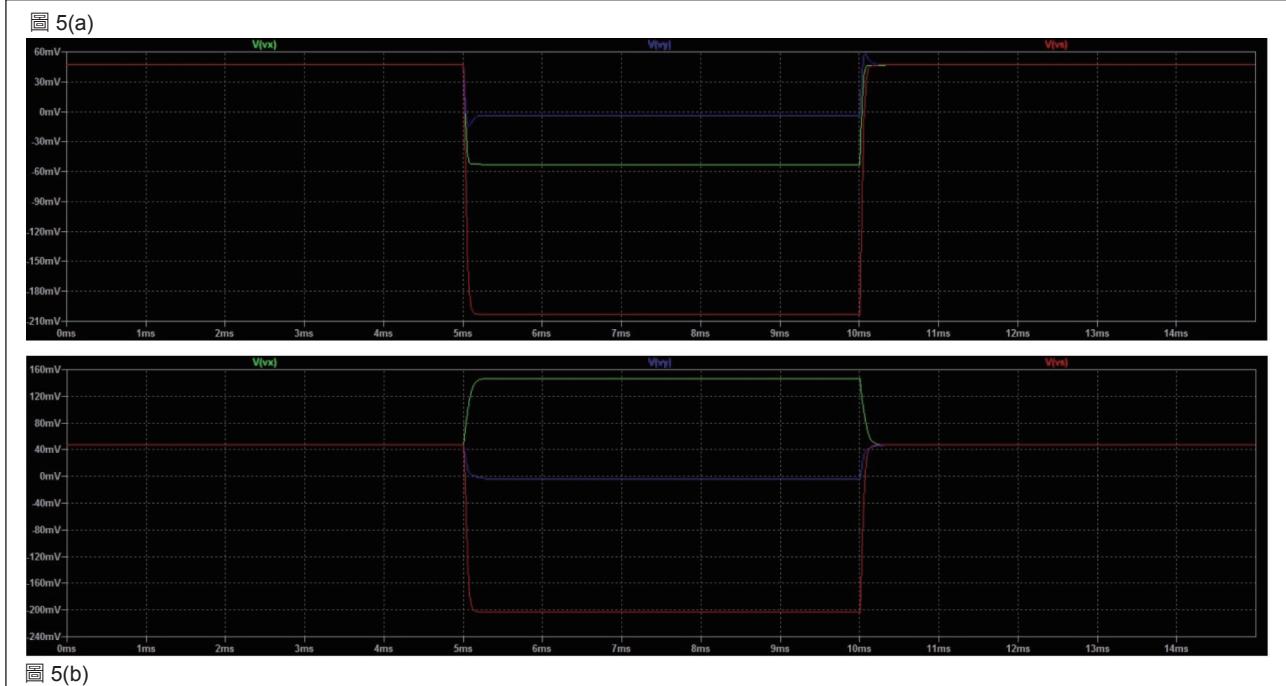


表 1:AC 分析模擬結果

	VX	VY	VS
IPD1	6.7 kHz	6.7 kHz	6.8 kHz
IPD2	2.8 kHz	3.2 kHz	5.3 kHz
IPD3	4.8 kHz	4.7 kHz	4.5 kHz
IPD4	3.2 kHz	2.8 kHz	5.3 kHz

光電二極體的每個電流源，以及跨阻放大器的每個輸出進行了單獨的 AC 分析。表 1 顯示了模擬結果，表中數

字表示相應頻寬。你可以注意到，每個頻寬都明顯大於捕捉快速機械運動所需的典型 1 kHz 頻寬。

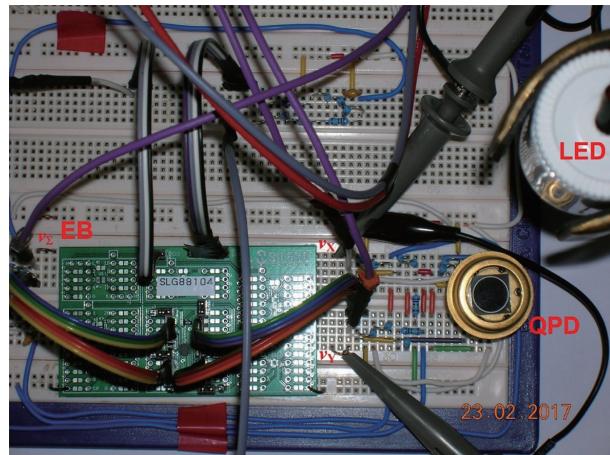
考慮 $B \approx 1$ kHz 的要測試頻寬和方程 (7) 紿出的跨阻輸出電壓信號的功率譜密度，可以得到約 $15 \mu\text{V}$ 的 1σ 本底雜訊。

最後，根據模擬結果，當四象限光電二極體不發光時，完整電路的總功耗約為 $9 \mu\text{W}$ 。請記住，四象限光電二極體總電流小於 $1 \mu\text{A}$ ，因此，如果有光照射到四象限光電二極體，功耗不應該明顯大於這個值。

示例實現

基於為 SILEGO SLG88104V 軌至軌 I/O 375 nA 四運放和 80 mm^2 有源區的四象限 PIN 光電二極體 QDY80PP 提供的評估板已經構建完成。實現電

圖 6: 電路的照片，其中 EB 是評估板，QPD 是四象限光電二極體，而 LED 是發光二極體

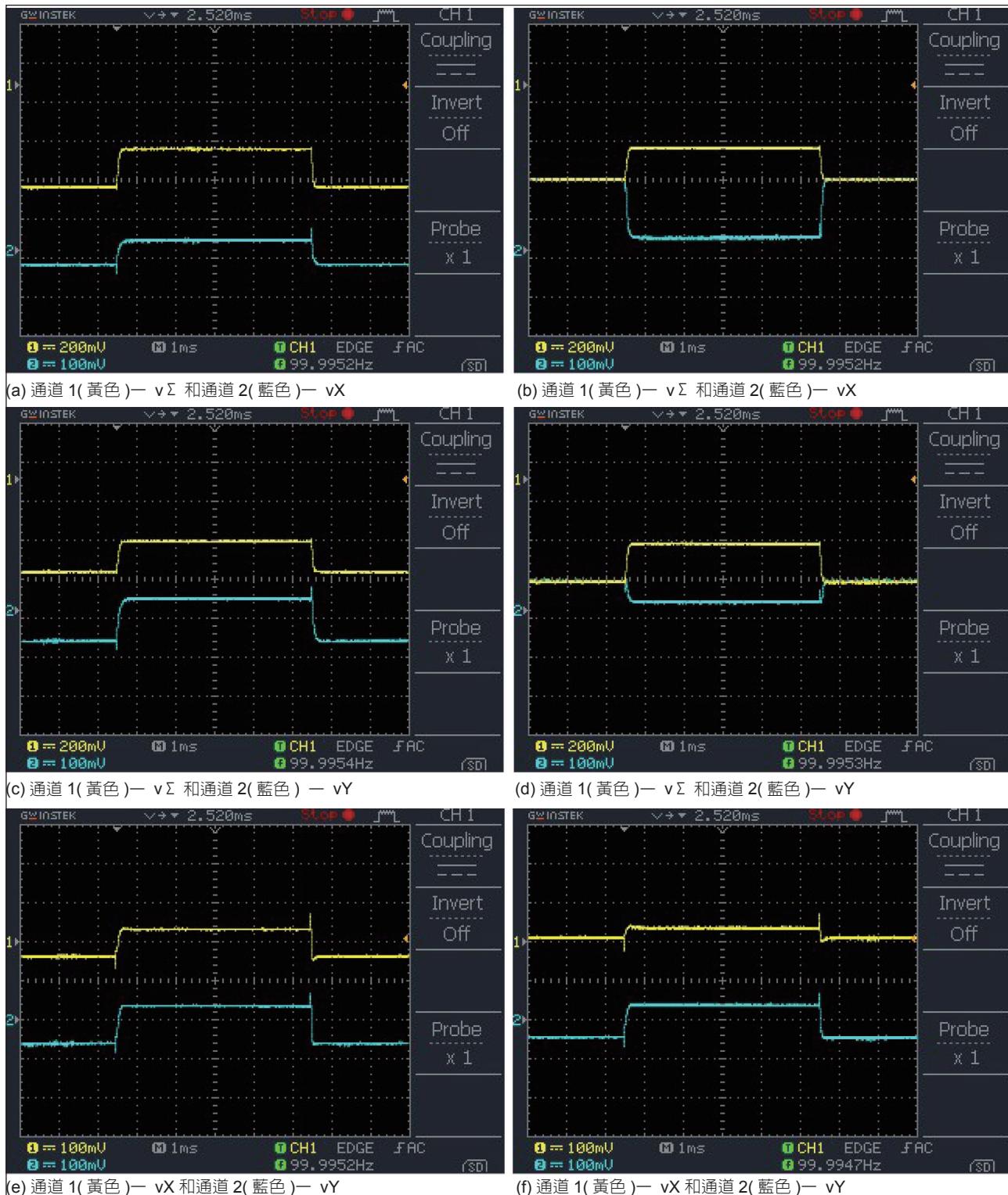


路的原型板照片如圖 6 所示。

為了測試電路特點，利用紅外 LED 的幫助，象限光電二極體被暴露於小輻射角的脈衝光下。必須特別注意，作為 LED 發射光功率的 LED 驅動電流必須在幾 μW 範圍。

這種低功耗將使象限光電二極體保持在感光模式下，從而提供整個電路的高線性度。根據在四象限光電二極體有效表面的不同光點位置，我們進行了幾次跨阻輸出電壓信號的測量。這些測量通過數

圖 7: 用數位存儲示波器捕獲的跨阻放大器輸出電壓信號



位存儲示波器進行了捕獲，如圖 7 所示。

圖 (a)、(c) 和 (e) 分別表示當光點中心位於第

一象限時的電壓信號 v_Σ 和 vX ， v_Σ 和 vY ， vX 和 vY 。圖 (b)、(d) 及 (f) 分別代表光點中心位於第三象

限時的電壓信號 $v\Sigma$ 和 vX , $v\Sigma$ 和 vY , 以及 vX 和 vY 。

結論

基於四象限光電二極體和相應電路的高精度位移測量已非常廣泛地用在許多應用領域。通過引入一個低電壓、超低功耗測量系統，可以很容易地用電池供電，應用領域將更加廣泛。具有非常獨特設計的電路可以測試不同類型的四象限光電二極體，驗證電路設計的概念。此外，還可以採用此測試結果來提高設計精度和頻寬。

About the Author

姓名 : Lazo M. Manojlovic

背景 : Lazo M. Manojlovic 於 1996、2003 和 2010 年分別獲得塞爾維亞貝爾格勒大學電氣工程理學學士學位和電氣工程理科碩士學位，以及塞爾維亞諾維薩德大學博士學位。他目前是塞爾維亞茲雷尼亞寧技術學院的正教授。他當前的研究興趣包括干涉法、光學傳感系統和鐳射測距儀。

Contact: appnotes@silego.com 

產業協力促成「影像監控系統資安產業標準」年底問世

影像視訊在物聯網整體應用中是最為重要的資訊擷取工具，包括安全監控、人工智慧、智慧醫療、虛擬實境等創新應用都需要使用網路攝影機作為影像偵測的重要設備。在工業局支持下，協助產業針對我國最有競爭優勢之網路攝影機，積極發展資安產業標準及測試規範，從源頭開始加強安全設計，遠離資安漏洞。期望在市場優勢及技術人才的加乘效益下，促進物聯網產業的蓬勃發展，協助產業在競爭激烈的國際市場中，掌握競爭之優勢。

由中華電信數據通信分公司馬宏燦總經理擔任主席，國內產官學研專家共同參與「影像監控系統網路攝影機資安產業標準第二場公開說明會」，會中公佈「影像監控系統網路攝影機資安標準(草案)」0.9 版，預期將於今年 12 月完成標準制定。

經濟部工業局林組長俊秀表示，目前影像監控系統的國際標準及測試規範仍呈現混沌不明的情勢，正是台灣發展相關自主產業標準的機會，我們應匯聚產業能量加速完成影像監控系統資安產業標準及驗測機制，未來將積極輔導業者提供資安培訓與諮詢，協助業者發展符合資安標準之產品，取得相關標準認證，帶領台灣產業創新升級、轉型，提高生產力及國際競爭力。

目前資策會資安所協同國內有關業者晶睿通訊、奇偶科技、友訊科技、中華電信、安華聯網等，在台灣資通產業標準協會(TAICS)「網路與資訊安全技術工作委員會」之下，陸續開展一系列影像監控系統產業標準及測試規範，未來將於國內進行標準實證試煉，並推動與國際標準接軌。