為台灣加油打氣專欄(211)單光子累崩光偵測器和飛時測距

李家同

量測距離當然是在精密工業中非常重要的，我在這裡要介紹我們台灣工程師所研發成功的一種飛時測距的設備，光達(LiDAR)也運用了這個原理。這種設備可以量測1公分(1公分等於1百分之一米)~1000公尺，誤差是1毫米(1毫米等於1千分之一米)。這種儀器是利用光的感測，其中有一個雷射二極體可以發射出光，也有一個光偵測器可以感測到光。

如果我們想要知道某一個物體A距離我們多遠，我們可以利用雷射二極體發射一道光到物體上，假設光發射的時間點是*T1*，打到物體以後光反射回來，被光偵測器接收到的時間點是*T2*，由於光的速度是固定的，只要計算這個時間差，我們就可以知道A的距離。請看圖一，假設*c*是光速，距離*D*可以由公式*D* = *c* (*T*2 – *T*1) / 2計算得到。



圖一、飛時測距原理

時間差要怎麼偵測，是由一種叫做TDC (time to digital converter) 的電子線路來做到，請看圖二。



圖二、TDC

發射光的時候，是要先產生一個脈衝1到雷射二極體，當雷射二極體收到脈衝1時，就會發出光。當光偵測器接收到反射回來的光時，會產生脈衝2。由於光的速度非常快，脈衝1和脈衝2的時間差可能只有十億分之一秒 (10-9)，如果沒有電子線路，人類不可能偵測出這個時間差。我們的儀器完全靠TDC的電子線路，而這種線路的量測反應是非常快的。也就是說，當光偵測器收到訊號以後，電子線路可以在1奈秒(1奈秒等於10億分之一秒)中算出距離。光的來回也是相當快的，所以我們可以說，我們的距離測量設備是即時(real time)的。另外為了偵測相當近(1公分)與相當遠(1000公尺)的距離，這個線路必須依賴相當高的設計經驗，確保線路在1公分到1000公尺間的任何距離都有足夠的精確度。

有了這種量測時間差的電子線路還不夠，光偵測器一定要在收到光的千億分之一秒 (10-11) 內，把光轉換成電脈衝並送到TDC去，如果光偵測器的反應速度不夠快，也是會出問題的。最重要的是，我們的偵測器必須在微弱光時也能測量距離。比方說，汽車在黑暗中行走，遠方有一個身穿黑衣服的行人，這時候由行人反射回來的光非常微弱，我們也希望光偵測器能夠偵測到，這種極靈敏的光偵測器，稱為單光子累崩光偵測器 (SPAD)，所謂單光子，乃是因為我們可以說即使1個光子碰到了我們的光偵測器，我們的光偵測器也能有所反應。為了瞭解SPAD，我們首先看一般的光偵測器，請看圖三。



圖三、一般光偵測器原理

這種一般的光偵測器裡面有某種矽材料，這種矽材料接收到光子以後，光子的能量會使得電子離開矽原子，原本電子的位置就留下一個空洞。由於外加了一個電壓，這個電子會往正極方向加速。這種光偵測器的問題是，如果光很微弱，光子的數量少，電流就會比較小，因此很難被偵測到。

單光子累崩光偵測器的原理如圖四，這種光偵測器的特點是它極為靈敏，它能夠偵測到非常微弱的光。

如圖四中所示我們將兩端施加的電壓提高，當一個光子進入矽材料，產生出一個電子時，這個電子會被電場加速，電壓越高，電子速度就越快，能量也越高。當能量夠高的電子撞擊原子時，會產生出第二個電子，接著這兩個電子可能再產生兩個電子，如此會有四個電子，進而發生連鎖反應，產生出大量的電子，這時候的電流就會非常大，能夠很輕易的被電路偵測到。



圖四、單光子累崩光偵測器原理

這種單光子累崩光偵測器，可以只用非常少的光子，就產生出大量的電子。但是當這種連鎖反應太激烈，產生太多電子時，光偵測器會崩潰，高電流致使元件燒毀。要克服這個問題，我們的工程師有兩個重要的技術。

(1)負責電流偵測的電子線路會在電流超過一個門檻時，迅速讓施加在光偵測器兩端的電壓下降。只要電壓下降，連鎖反應就會停止下來，就可以避免光偵測器崩潰。這個線路也是我們工程師自己設計的。

(2)光偵測器也是一個半導體，對於這個半導體的形狀、結構、耐壓等要特別的設計，以避免高電場造成元件的毀損。但是一般的半導體製程並不一定能製作出這樣的光偵測器。這些工程師除了必須對半導體製程非常了解，知道很多半導體製程之間的各種規定。最後，他們終於能夠利用半導體製造廠商所提供的製程，做出了他們自己所需要的光偵測器。

我國的研究人員和工程師，已經做出了這種反應速度達到千億分之一秒的光偵測器，並且可以偵測到強度只有1個皮瓦(1皮瓦等於1兆分之一瓦)的光。要達到這樣高的規格，他們必須對電子線路和半導體製程的各種規矩都十分了解。

這種光偵測器，只有先進國家才有，但是這些國家很多大的電子公司都有自己的半導體製造工廠。我國的這些工程師面對的困難是他們沒有自己的半導體製造工廠，他們必須使用別人的工廠，因此沒有辦法自由的改變半導體製程的步驟和元件的設計方式。雖然如此，他們還是努力的鑽研，花了整整十年的功夫，才成功做出了這種高靈敏的光偵測器，也設計出極精密的電子線路，可以運用在商業用途上，值得大家給予他們鼓勵。而這個光偵測器除了他們目前使用的測距設備及光達應用上，在國外更被使用在設計精密的檢查儀器上，如核磁共振影像儀、拉曼頻譜儀、螢光生命週期顯微影像系統等。相信他們累積能量後也能往這方面前進。

相信大家都知道，這種設備是很難設計的。單單光偵測器的自製設計就是這家公司獨有的，也是經過長時間研究發展出來的。我們應該慶幸我們的工程師有機會埋頭苦幹，做這個充滿挑戰性的研究，也應該鼓勵我們的年輕人都學習他們的榜樣。