



國立中山大學機械與機電工程研究所

碩士論文

Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

可攜帶型溶液酸鹼度、溫度及離子濃度之

感測系統電路設計與原型開發

Circuit Design and Prototype Development on a Portable

System for Sensing Solution pH, Temperature

and Ionic Concentration

研究生：嚴瑋星

Wei-Hsing Yen

指導教授：林哲信 教授

Dr. Che-Hsin Lin

中華民國 107 年 7 月

July 2018

# 論文審定書

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校機械與機電工程學系碩士班

研究生嚴瑋星（學號：M043020107）所提論文

可攜帶型溶液酸鹼度、溫度及離子濃度之感測系統電路設計與原型開發

Circuit Design and Prototype Development on a Portable System for Sensing Solution pH, Temperature and Ionic Concentration

於中華民國 107 年 7 月 30 日經本委員會審查並舉行口試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人 傅龍明 傅龍明 委員 林哲信 林哲信

委員 林家裕 林家裕 委員 陳世傑 陳世傑

委員 李佳言 李佳言 委員 \_\_\_\_\_

指導教授(林哲信) 林哲信 (簽名)

# 論文公開授權書

國立中山大學博碩士論文公開授權書



etd-0805118-115957

2018-09-05 12:41:29

本授權書所授權之論文為授權人嚴瑋星在國立中山大學 機械與機電工程學系研究所 106學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：可攜帶型溶液酸鹼度、溫度及離子濃度之感測系統電路設計與原型開發

指導教授：林哲信 教授

### 注意事項：

1. 依本校102年1月9日101學年度第1學期第10次行政會議通過，研究所畢業生可於上傳電子論文時自行選擇紙本及電子檔開放年限。
2. 因專利申請涉及論文公開時間，為避免因喪失新穎性而無法申請專利，請各位老師及同學上網參考「專利各項申請案件處理時限表」（網址路徑：經濟部智慧財產局→專利→專利情報通→專利處理時限）後再選定論文公開時間。  
另有關著作權相關資訊，請參考「經濟部著作權專區」（網址路徑：經濟部智慧財產局→著作權）。  
若尚有任何專利申請與著作權等相關問題，歡迎洽詢本校產學營運中心智財技轉組，分機2626。
3. 授權書一式兩份，經本人及指導教授共同簽名後，將論文公開授權書裝訂於審定書之後，辦理畢業離校時，除繳交一本論文至圖書館外，另一本繳交至教務處註冊組。

• **電子檔：** 此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化方式將論文全文(含摘要)進行重製，及公開傳輸。亦提供讀者非營利使用線上檢索、閱覽、下載或列印。

立即公開傳輸數位檔案。

因特殊原因，校內校外(含國家圖書館)均永不將論文公開或上載網路公開閱覽。

※ 論文電子檔公開日期：校內永不公開，校外(含國家圖書館)永不公開。

• **紙本論文：** 此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以紙本方式將論文全文(含摘要)進行收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

同意立即公開。

因特殊原因，欲延後公開，永不公開陳覽

※ 紙本論文公開日期：永不公開。

※ 紙本論文永不公開原因：牽涉專利授權相關事宜。

授權人：嚴瑋星

學 號：M043020107

授權人： 嚴瑋星 (簽章)

嚴瑋星

指導教授： 林哲信 (簽章)

林哲信

中華民國 107 年 9 月 5 日

### ※ 此授權書嚴禁塗改

- 若欲修改權限，請登入系統修改後重新列印此授權書。
- 若論文已審核通過，請聯繫etd@mail.nsysu.edu.tw或校內分機2452，修改後重新列印並簽章。
- 授權書將自動列印兩份。請於圖書館和教務處辦理離校手續時，裝訂於繳交的紙本論文內。

## 中文摘要

本研究開發出一套結合氧化銻錫(Indium tin oxide, ITO)酸鹼度、溫度及離子濃度整合型晶片之溶液感測電路裝置，完成水質多參數量測並即時顯示量測數值，同時設計手機應用程式(App)以藍牙傳輸進行遠端資料存取。為了解決溶液量測所面臨的串擾問題，本論文以切換電路設計解決溶液中各個感測數值的互相干擾。感測電路設計部分，使用延伸式閘極場效應電晶體(Extended-gate field effect transistor, EGFET)架構，將感測晶片之酸鹼度量測區直接連接市售場效應電晶體之積體電路(Integrated circuit, IC)閘極，搭配一參考電極，即可進行溶液氫離子含量偵測，後端使用轉阻放大器(Transimpedance amplifier, TIA)與反向放大器，將測得之酸鹼度轉換為電壓輸出，以利訊號擷取設備讀取。溫度感測使用惠斯同電橋(Wheatstone bridge)量測溫度電阻變化，再以儀表放大器將訊號讀出。由電導度(Electrical conductivity, E.C.)推算而得的離子濃度，則使用韋恩電橋(Wien bridge oscillator)盪出正弦波進行溶液中離子含量的測量，以轉阻放大器將不同離子濃度造成的阻值變化轉為電壓輸出，再利用精密整流電路將交流訊號轉為直流訊號並經濾波處理，最後輸出量測電壓。本研究中將感測電路結合 Arduino 單晶片模組，控制感測電路的量測與訊號接收，並與藍牙模組及液晶顯示器(Liquid-crystal display, LCD)溝通以進行資料輸出。同時為了使 ITO 感測晶片在封裝上更具有便利性，進而改良舊有 ITO 架構並將其模組化，搭配電路所量測之酸鹼度，靈敏度為 111.2 mV/pH， $R^2 = 0.9902$ ，溫度量測靈敏度為 60.2 mV/°C， $R^2 = 0.9994$ ，電導度量測為  $R^2 = 0.9989$ ，同時感測電路響應時間小於 10 ms，重覆性測試中酸鹼度、溫度與電導度量測之變異係數(Coefficient of variation, C.V.)分別為 0.097%、0.997%及 0.230%。本研究設計之感測電路能夠在溶液中進行酸鹼度、溫度及離子濃度量測，成功解決串擾問題，並結合微控制器模組進行量測程序控制以及訊號處理運算，最終實現溶液多參數感測系統電路之原型開發。

**關鍵字：**氧化銻錫、酸鹼度、溫度、離子濃度、串擾、Arduino、藍牙

# Abstract

This study develops a solution sensing circuit device that combines the ITO chip for sensing pH, temperature and ion concentration that developed by our laboratory to complete the multi-parameter measurement of water quality and display the values instantly, and the mobile App is designed to remotely receive data via Bluetooth communication. This research uses the switching circuit design to solve the crosstalk between each sensor when doing multi-parameter measurement in the solution. In the sensing circuits design part, the pH measurement uses an EGFET, and the sensing chip is directly connected to the gate of the commercial transistor IC, and then the reference potential is given by the Ag/AgCl reference electrode to detect the pH of the solution. The change of the drain current caused by the concentration of the hydrogen ion is converted into the voltage through a TIA and an inverting amplifier, and it is convenient for the signal acquisition device to read. The temperature sensing measures the variance of resistance with Wheatstone bridge, and then reads the signal with the instrumentation amplifier. The ion concentration derived from the E.C., the sensing circuit architecture uses Wien bridge to produce a sinusoidal wave to measure the impedance in the solution, and the TIA converts the impedance change caused by different ion concentrations into a voltage output. The precision rectification circuit is used to convert the AC signal into a DC signal and filter it, and finally the voltage output is obtained. The sensing circuit combines the Arduino module to control the measurement and signal reception of the sensing circuit, and communicates with the Bluetooth module and the LCD for data output. In order to make the ITO sensing chip more convenient in packaging, the research improve into a new sensing chip module. The pH sensitivity measured by the circuit is 111.2 mV/pH,  $R^2 = 0.9902$ , and the temperature measurement sensitivity is 60.2 mV/°C,  $R^2 = 0.9994$ , the E.C. measurement is  $R^2 = 0.9989$ , and the sensing circuit also has a

response time of less than 10 ms. In the repetitive test, the C.V. of pH, temperature and E.C. of the chip was 0.097%, 0.997% and 0.230%, respectively. Finally, this study realize the prototype of the solution sensing device which can measure pH, temperature and ion concentration in the solution, successfully solve the crosstalk, and combine the data display and Bluetooth communication.

*Keywords: ITO, pH, temperature, electrical conductivity, crosstalk, Arduino, Bluetooth*

# 目錄

論文審定書 .....	i
論文公開授權書 .....	ii
中文摘要 .....	iii
Abstract.....	iv
目錄 .....	vi
圖目錄 .....	ix
表目錄 .....	xii
符號表 .....	xiii
簡寫表 .....	xv
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 整合感測器與溶液量測 .....	2
1.2.1 酸鹼度感測 .....	2
1.2.2 溫度感測 .....	3
1.2.3 離子濃度感測 .....	5
1.2.4 整合型感測器的發展與應用 .....	8
1.2.5 溶液感測器之間的干擾 .....	10
1.3 研究動機與目的 .....	13
1.4 論文架構 .....	15
第二章 量測原理與實驗架設 .....	16
2.1 量測原理與電路設計 .....	16
2.1.1 酸鹼值量測與數值讀出 .....	16
2.1.2 溫度量測與數值讀出 .....	18
2.1.3 電導度量測與數值讀出 .....	19

2.2 感測系統電路製作 .....	21
2.3 感測晶片製作 .....	22
2.4 實驗設計 .....	25
第三章 感測電路設計 .....	27
3.1 酸鹼值感測電路 .....	27
3.1.1 延伸開極式場效應電晶體 .....	27
3.1.2 電流-電壓轉換器與負回授放大器 .....	28
3.2 溫度感測電路 .....	28
3.2.1 惠斯同電橋 .....	29
3.2.2 儀表放大器 .....	29
3.3 電導度感測電路 .....	30
3.3.1 韋恩振盪電路 .....	31
3.3.2 電流電壓轉換器與精密全波整流電路 .....	31
3.4 時序量測邏輯控制 .....	32
3.5 資料處理與藍牙傳輸 .....	33
3.5.1 資料儲存與顯示 .....	33
3.5.2 與遠端裝置軟體之溝通 .....	35
第四章 系統整合與量測結果 .....	37
4.1 ITO 晶片量測 .....	37
4.2 商業化考量之感測晶片模組量測 .....	41
4.3 系統軟硬體架構與量測 .....	43
4.3.1 感測電路硬體架構 .....	43
4.3.2 系統電源品質測試 .....	45
4.3.3 系統響應時間測試 .....	48
4.3.4 系統電源容忍度測試 .....	49
4.3.5 控制程式邏輯撰寫 .....	51



4.4 重覆性測試.....	55
4.5 感測電路原型機.....	57
第五章 結論與未來展望.....	59
5.1 結論.....	59
5.2 未來研究方向.....	60
參考文獻.....	61
自述.....	65

# 圖目錄

圖 1-1 熱電偶量測架構.....	4
圖 1-2 電導度量測原理示意圖.....	6
圖 1-3 線圈式溶液電導度感測架構.....	7
圖 1-4 用於監控乳酪保存品質之溫度、光強度及溼度整合感測器.....	8
圖 1-5 FPC 穿戴式整合感測晶片架構圖.....	9
圖 1-6 在溶液中進行酸鹼度、溫度與電導度感測之等效干擾示意圖.....	11
圖 1-7 整合 pH 值、電導度與溫度感測應用於精密農業測量的感測晶片.....	11
圖 1-8 商用手持式整合電極多參數檢測計.....	12
圖 1-9 商用雙感測孔多參數水質檢測計.....	13
圖 1-10 論文架構圖.....	15
圖 2-1 商用連接玻璃感測電極之酸鹼值量測 IC.....	17
圖 2-2 EGFET 電晶體特性量測架構.....	17
圖 2-3 溫度電阻量測電路架構.....	18
圖 2-4 商用二極式阻抗量測 IC.....	19
圖 2-5 四極式電導度量測電路架構.....	20
圖 2-6 電路設計軟體操作介面.....	21
圖 2-7 利用 EasyEDA 軟體轉換出之 PCB layout 圖.....	22
圖 2-8 ITO 感測晶片與市售 SATA 插槽連接之轉接板.....	23
圖 2-9 新型晶片量測架構之連接板設計.....	24
圖 2-10 晶片模組連接圖.....	25

圖 2-11 晶片模組優化過程之各設計圖 .....	25
圖 2-12 Arduino Nano 微控制器模組 .....	26
圖 3-1 pH 感測電路設計圖 .....	27
圖 3-2 溫度感測電路設計圖 .....	29
圖 3-3 電導度感測電路設計圖 .....	30
圖 3-4 晶片與感測電路連接示意圖 .....	33
圖 3-5 資料儲存在 EEPROM 內示意圖 .....	35
圖 3-6 手機 App 使用者介面 .....	36
圖 4-1 ITO 晶片酸鹼度、溫度及電導度量測曲線 .....	38
圖 4-2 ITO 晶片時序量測結果圖 .....	39
圖 4-3 ITO 晶片時序量測之放大檢視圖 .....	40
圖 4-4 新型感測晶片模組酸鹼度、溫度及電導度量測曲線 .....	41
圖 4-5 新型感測晶片模組時序量測結果圖 .....	42
圖 4-6 新型感測晶片模組時序量測之放大檢視圖 .....	43
圖 4-7 感測電路總架構圖 .....	45
圖 4-8 系統電源穩壓前後之比較圖 .....	46
圖 4-9 參考電極與 pH 感測電路輸出之交流雜訊測試 .....	47
圖 4-10 溫度惠斯同電橋電路輸出電壓交流雜訊測試 .....	48
圖 4-11 電導度電路由正弦波振盪器至精密整流濾波電路之輸出波形分析 .....	48
圖 4-12 感測電路在 pH 值、溫度與電導度模式下的輸出響應曲線 .....	49
圖 4-13 感測電路之電源容忍度測試 .....	50

圖 4-14 固定 pH 值進行十次循環性量測.....	56
圖 4-15 固定溫度進行十次循環性量測.....	56
圖 4-16 固定電導度進行十次循環性量測.....	57
圖 4-17 感測電路原型機實體圖.....	57
圖 4-18 本研究開發之感測系統與市售儀器之比較圖.....	58

# 表目錄

表 1-1 不同 pH 感測方式比較.....	3
表 1-2 不同溫度感測方式比較.....	5
表 1-3 電極常數與所測定電導度範圍之關係.....	6
表 1-4 不同電導度感測方式比較.....	7

## 符號表

A	單電極有效感測面積
$A_v$	韋恩電橋之放大器倍率
bit	位元
bps	位元/秒
byte	位元組
C.V.	變異係數
$C_{ox}$	閘極氧化層之單位電容大小
d	兩感測電極間距
E	氫電極電位
$E_0$	參考電極電位
F	法拉第常數
$f_r$	振盪頻率
g	儀表放大器放大倍率
$g_m$	互導值
GND	接地電位
Hz	頻率單位(赫茲)
$I_{DS}$	源極電流
K	電極常數
L	閘極長度
M	莫耳濃度
ms	時間單位(毫秒)
n	電子濃度
nF	電容單位( $10^{-9}$ 法拉)
p	電洞濃度

pA	電流單位( $10^{-12}$ 安培)
pH	酸鹼度
R	理想氣體常數
S	席貝克係數
T	絕對溫度
$T_{\text{for\_temp}}$	進行溫度數值取樣前之電路量測花費時間
$T_{\text{measure}}$	單一模式電路量測花費時間
$T_{\text{total}}$	時序量測電路總花費時間
V	電壓單位(伏特)
$V_{\text{AC}}$	交流電訊號
$V_{\text{DC}}$	直流電訊號
$V_{\text{DS}}$	源極電壓
$V_{\text{GS}}$	閘極電壓
$V_t$	臨界電壓
W	閘極寬度
$\kappa$	電導度
$\mu\text{F}$	電容單位( $10^{-6}$ 法拉)
$\mu_n$	電子遷移率
$\mu_p$	電洞遷移率
$\sigma$	電導
$\Omega$	電阻單位(歐姆)
$[\text{H}^+]$	氫離子濃度
$\Delta T$	溫度變化
$\Delta V$	電壓差

## 簡寫表

ADC	Analog-to-digital converter	類比數位轉換器
BJT	Bipolar junction transistor	雙極性接面型電晶體
BOM	Bill of materials	電子材料清單
bps	Bits per second	位元/秒
C.V.	Coefficient of variation	變異係數
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor	互補式金屬氧化物半導體
COM	Common	共接點
CPS	Cyber-physical system	網宇實體系統
DPDT	Double pole double throw	雙軸雙切
E.C.	Electrical conductivity	電導度
EEPROM	Electrically erasable programmable read only memory	電子可抹除式唯讀記憶體
EGFET	Extended-gate field effect transistor	延伸式閘極場效應電晶體
FFC	Flat flexible cable	軟排線
FPC	Flexible printed circuit	軟性印刷電路板
GND	Ground	接地電位
I/O	Input/output	輸入/輸出
I <sup>2</sup> C	Inter-integrated circuit	積體電路匯流排
IC	Integrated circuit	積體電路
IDE	Integrated development environment	整合開發環境
IoT	Internet of things	物聯網
ISFET	Ion-sensitive field effect transistor	離子感測場效應電晶體
ITO	Indium tin oxide	氧化銦錫
LCD	Liquid-crystal display	液晶顯示器



LSB	Least significant bit	最低有效位
LSI	Large scale integration	大型積體電路
MLCC	Multi-layer ceramic capacitor	積層陶瓷電容
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field effect transistor	金屬氧化物半導體場效電晶體
MSB	Most significant bit	最高有效位
NC	Normally close	常關
NO	Normally open	常開
NTC	Negative temperature coefficient	負溫度係數
OPA	Operational amplifier	運算放大器
ORP	Oxidation-reduction potential	氧化還原電位
PCB	Printed circuit board	印刷電路板
PET	Polyethylene terephthalate	聚對苯二甲酸乙二酯
PSRR	Power supply rejection ratio	電源抑制比
PTAT	Proportional to absolute temperature	與絕對溫度成正比
PTC	Positive temperature coefficient	正溫度係數
PTSA	P-toluenesulfonic acid monohydrate	甲苯磺酸
RMS	Root mean square	方均根
RTD	Resistance temperature detector	電阻溫度感測器
SATA	Serial advanced technology attachment	序列式匯流排
SMD	Surface mounted devices	表面黏著型元件
SPI	Serial peripheral interface	序列周邊介面
TCO	Transparent conductive oxide	透明導電氧化物
TCR	Temperature coefficient of resistance	電阻溫度係數
TDS	Total dissolved solids	總溶解固體濃度

TI	Texas instruments	德州儀器公司
TIA	Transimpedance amplifier	轉阻放大器
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter	通用非同步收發傳輸器

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

自工業 4.0 計畫提出之後，物聯網(Internet of things, IoT)與感測器這兩個名詞變得密不可分，因資料儲存的成本相較於以往大幅降低，利用感測器收集海量資訊，並結合大數據、雲端運算甚至人工智慧進行工業化智慧製造已成未來趨勢，結合了感測器、致動器、訊號處理單元與人機介面，以網宇實體系統(Cyber-physical system, CPS)為基礎的自動化製造系統，利用感測器取得如機台、產線、環境與人員等等大量資訊，經由演算法分析並進行大數據分析，應用於工廠生產線可以提升產品良率、加快生產效率甚至進行風險預測，實現智慧自動化生產；而在感測領域例如水質檢測、空氣品質監控或是人體健康追蹤等等，感測器收集的巨量資料所能造成的影響超乎想像，藉由數據的即時收集與分析，可以馬上偵測何處工廠排放廢水與廢氣，運動員可以即時得知目前身體各項參數，而巨量、長時間的資料收集更能夠看出過去科技所看不到的趨勢[1, 2]。

因感測器發展的成熟，越來越多整合型感測器問世，利用一個量測裝置便可測量相較於以往更多的數值，使空間、成本降低，所得到的資料量卻大幅提升，對於環境監控、生理監測、農業發展、工業自動化等各種領域將更能掌握其趨勢[3-10]。但感測器的整合勢必會遇到一些挑戰，尤其是當需要施加電訊號的感測器在進行溶液的量測時，其不同感測器在同一溶液中會遇到串擾(Crosstalk)問題，各元件之間的量測會彼此干擾，此為發展整合型溶液感測器的一大難題[11, 12]。本研究接續前人所開發之 ITO 薄膜為基底的酸鹼度、離子濃度及溫度整合感測晶片[13-15]，開發出一套可連接該晶片並同時量測此三種參數的感測電路系統原型，並解決酸鹼度、離子濃度與溫度量測在溶液中的串擾問題，搭配 Arduino 微控制器模組進行量測控制，將量測數值即時顯示在液晶顯示器，並結合藍牙傳輸將訊號發送至手機 App，達到遠端監控及資料儲存功能，同時本研究也為了因應商業化之封裝需求，改善了原本感測晶片的架構，解決感測晶片在模組化封裝中出現之連接及防水問

題。本研究開發出低成本、反應快速之感測電路系統，搭配感測晶片的量測，在未來可實際應用於不同水質感測領域，如養殖漁業、河川或海洋監控，甚至能應用於生醫領域，如人體尿液、汗液的檢測。

## 1.2 整合感測器與溶液量測

### 1.2.1 酸鹼度感測

傳統的酸鹼度量測有酸鹼試劑、酸鹼試紙及玻璃電極等方法。酸鹼試劑具有快速低成本及使用簡單、容易取得的優勢，其酸鹼指示劑變色理論利用弱酸(鹼)性的指示劑分子和解離後之共軛結構會呈現不同顏色，再以顏色去判斷酸鹼度[16]，常見的指示劑有硝基酚類、酚酞類、磺代酚酞類及偶氮化合物類，不同的成份在不同範圍的酸鹼值下有相異的靈敏度，故可針對不同酸鹼量測範圍去選用適合的酸鹼指示劑。酸鹼指示劑的缺點為量測範圍的限制，以及利用比色的方式進行量測判定，使量測精準度較低且較易產生誤差。酸鹼試紙的原理同酸鹼試劑，將試紙條浸泡酸鹼試劑並乾燥後而得，廣用試紙為最常見的酸鹼試紙，其在試紙條上分成多個不同的酸鹼判斷區塊，分別浸泡不同的酸鹼指示劑，使在進行溶液量測的時候，不同區塊會呈現相異的顏色變化，最後以比色表與試紙所呈現的顏色變化進行比對而得酸鹼值，其量測範圍可從 pH 0 至 pH 14，但只能進行粗略的數值判別，而無法達到精準的量測。

若要得到較精確的 pH 值量測，最廣為使用的就是玻璃電極酸鹼度計，主要量測核心為一玻璃電極，其概念在 1906 年由 Cremer 提出，主要由感測電極與參考電極組成，在玻璃電極前端有一層離子選擇半透膜，利用氫離子與玻璃膜間的交換造成電位變化，進而得知 pH 變化[17]。玻璃電極酸鹼度計可以得到精確的酸鹼度值，但是量測平衡時間較久，價格也較高昂，每次使用前需要進行兩點或三點校正，並在量測前後要用去離子水(De-ionized water)清洗電極，平時保存時要浸泡在電極保存液中，故此方法雖可以量測到精確數值，但維護成本與使用難度也因此提高。

隨著半導體科技的進步，一種快速、低成本的 pH 量測新架構被提出，學者陸續提出離子感測場效應電晶體 (Ion-sensitive field effect transistor, ISFET)[18-21]與其為基底發展的 EGFET[22-26]。ISFET 架構為將一顆金屬氧化物半導體場效應電晶體(Metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET)去掉閘極金屬後在二氧化矽(Silicon dioxide, SiO<sub>2</sub>)氧化層覆蓋上一層離子選擇性薄膜，並使用銀/氯化銀電極(Ag/AgCl reference electrode)做為參考電極，量測時將電晶體與參考電極一起浸入溶液中，使溶液能與感測層接觸，利用溶液氫離子與感測層產生的吸附鍵結效應[27-29]，使感測層表面產生電位變化，而 MOSFET 閘極感應到不同的電壓，進而使電晶體通道電流改變，如此便可藉由電流變化推得酸鹼值[30]。EGFET 則不對 MOSFET 做任何處理，直接將閘極端用導線與外部感測單元連接[31, 32]，不僅省去了將 MOSFET 閘極金屬去除以及製作感測膜在閘極氧化層上的步驟，感測膜的面積也不再被 MOSFET 的體積影響，量測時也只需要將感測單元浸入溶液中，而不必像 ISFET 必須連同電晶體本身一起泡入溶液，降低了電晶體損壞的風險，也減少製程成本[33]。表 1-1 為不同 pH 感測方式的比較。

表 1-1 不同 pH 感測方式比較。

	酸鹼指示劑	酸鹼試紙	玻璃電極	ISFET	EGFET
優點	快速低成本	快速低成本	精準度高	體積小	體積小
缺點	精準度差	精準度差	昂貴、反應慢、維護不易	製程複雜	精準度較玻璃電極差

## 1.2.2 溫度感測

市面上常見溫度量測架構有熱電偶(Thermocouple)、電阻溫度感測器(Resistance temperature detector, RTD)以及熱敏電阻(Thermistor)等方式[34]。熱電偶量測(圖 1-1)的原理為席貝克效應(Seebeck effect)，當兩個不同金屬相接時，溫度變

化會產生相對應的電壓差，即熱電電壓 (Thermoelectric voltage)，關係式如下：

$$\Delta V = S\Delta T \dots\dots\dots(1-1)$$

其中 $\Delta T$  為溫度變化， $\Delta V$  為兩金屬之電壓差， $S$  為單位溫差所產生的電壓差，稱為席貝克係數(Seebeck coefficient)[35, 36]。由於熱電偶具一定程度的精確度，且價格便宜，也有較廣的量測範圍，利用不同金屬組合甚至可以從 $-200^{\circ}\text{C}$  量測至  $1000^{\circ}\text{C}$  以上，且不需額外電源驅動，屬被動式溫度感測器，在量測範圍較大時呈現非線性。

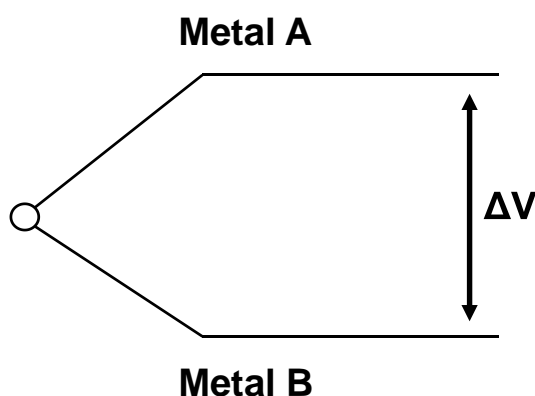


圖 1-1 熱電偶量測架構。由兩種不同金屬(Metal A 與 Metal B)透過席貝克效應而產生的電壓差來量測溫度。

電阻溫度感測器與熱敏電阻，兩者皆藉由溫度變化時本身電阻值的改變來判斷溫度的變化，其不同材料會擁有不同的電阻溫度係數(Temperature coefficient of resistance, TCR)，同為主動式溫度感測元件，進行量測時需施加外部電源[37]。電阻溫度感測器原理為純金屬的電阻值隨著溫度變化而改變，常見材料為銅、銀、鎳、金、白金，而最廣為使用的材料為白金，常見之白金 RTD 型號有 Pt-100 以及 Pt-1000，在  $0^{\circ}\text{C}$  時的電阻分別為  $100\ \Omega$  及  $1000\ \Omega$ 。RTD 主要分為繞線型與薄膜型，繞線型 RTD 是由細金屬線纏繞而成，薄膜型則是由一片很薄的金屬膜蓋在基板上，因金屬膜厚度極薄，金屬用量可大為減少，成本降低，故薄膜式 RTD 在市面上較為常見，RTD 具有高穩定性及精確度，但由於利用純金屬特性進行量測，故價格也相對高昂。熱敏電阻通常為半導體材料，隨著溫度變化，其材料內部載子也跟著變化，材料電導關係式如下式：

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \dots \dots \dots (1-2)$$

其中  $\sigma$  為材料電導， $n$  為電子濃度， $p$  為電洞濃度， $\mu_n$  為電子遷移率， $\mu_p$  為電洞遷移率。由於電子電洞的濃度與遷移率皆是溫度的函數，故材料的電導特性與溫度相關，而市面上常見以金屬氧化物做為熱敏電阻的材料。熱敏電阻一般分為正溫度係數 (Positive temperature coefficient, PTC) 以及負溫度係數 (Negative temperature coefficient, NTC)，因 PTC 材料電阻值隨著溫度上升而提高，故除了用於溫度感測外，也常在一些加熱控制裝置上用作電流限制，而 NTC 則主要用於溫度測量。表 1-2 為不同溫度感測方式之比較。

表 1-2 不同溫度感測方式比較。

	熱電偶	RTD	熱敏電阻
溫度量測範圍	-200°C 至 2000°C	-200°C 至 650°C	-100°C 至 500°C
優點	範圍大、反應快、低成本	精度高、線性	低成本、高靈敏度
缺點	精度差	成本高	範圍小、非線性

### 1.2.3 離子濃度感測

溶液的電導度可以推得溶液中離子濃度的多寡，而電導度的量測原理為利用兩根電極浸泡在溶液中，並在其上施加交流電，量測水中的交流阻值進而得知溶液電導度，並可推算水中離子含量的多寡[38]。而利用交流電訊號而非直流電進行電導度的量測，是因為若在電極上施加直流電，會使溶液中的正離子趨向負極，負離子趨向正極，使電極造成極化的現象，長期下來會影響電極使用壽命以及量測的精準度，故改用交流電訊號可以改善此問題，並且可以降低電極本身的電容效應，避免影響量測數值。當在選擇電導度感測電極時，電極常數為選擇時的一大考量，其兩電極之間的距離與電極所露出的感測面積，是決定電極常數的重要因素(圖 1-2)，關係式如下：

$$K = d/A \dots \dots \dots (1-3)$$

K 為電極常數，A 為單電極有效之感測面積，d 則為兩感測電極之間的距離。而電導度量測與電極常數的關係式如下：

$$\kappa = \sigma \times K \dots \dots \dots (1-4)$$

$\kappa$  為溶液電導度， $\sigma$  為電導，是溶液中電阻的倒數，故當電導度量測儀器在更換不同的感測電極時，必須透過校正的方式，利用已知電導度的校正液體進行量測，使儀器測得溶液電導後，搭配已知的電導度值去計算出目前所使用電極的電極常數，之後進行量測時便可經由量測所得的溶液電導，乘以電極常數後得知電導度值，市售電導度計的校正原理即是找出感測電極的電極常數。不同電極常數的感測電極適用於不同範圍的電導度量測，如表 1-3 所示。

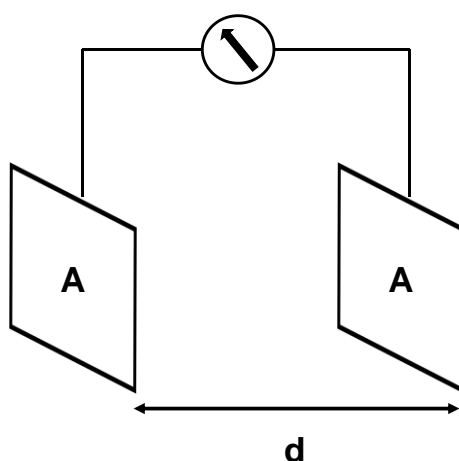


圖 1-2 電導度量測原理示意圖。量測電極的電極常數與其面積大小與間距有關。

表 1-3 電極常數與所測定電導度範圍之關係。

電極常數( $\text{cm}^{-1}$ )	測定之電導度( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )範圍
0.01	20 以下
0.1	1 至 200
1	10 至 2000
10	100 至 20000
50	1000 至 200000



常用的電導度量測架構分為電極式與無電極式，電極式架構又分為二極式與四極式電極，二極式為最簡單之量測架構，係利用兩根電極進行量測，電極本身施加一交流電壓，並偵測流經溶液之電流判斷溶液阻抗大小，若電極施加電流源，則改為量測兩電極之電壓降(Voltage drop)得知阻抗。四極式架構則將四根電極分為電源供給端與訊號接收端，電源供給端電極提供一交流電流，而另一組電極則以固定的間距，偵測在溶液之中該組電極兩端的電位差，以此得知溶液阻值，並推得電導度值。無電極電導度量測架構主要是利用兩個環形線圈，其中一個線圈施加交流電壓使溶液中的離子形成離子流，另一線圈則會感應到溶液中離子流的大小進而產生相對應的感應電流，此感應電流大小會與溶液電導度成正比，以此法進行量測不需將感測單元與液體直接接觸，故可在較極端的環境下進行量測(圖 1-3)。表 1-4 為不同電導度量測方式的比較。

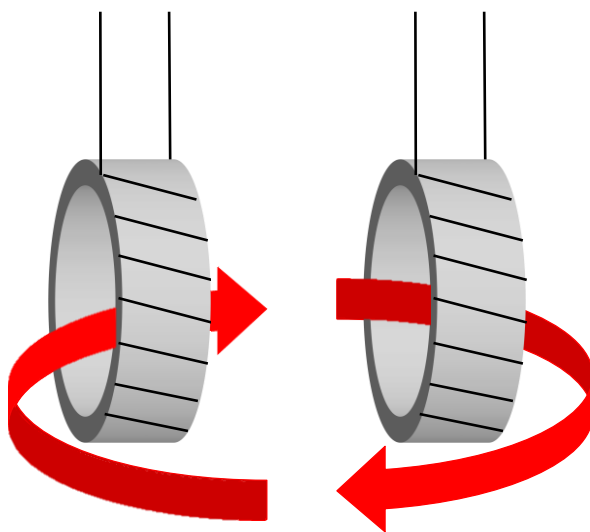


圖 1-3 線圈式溶液電導度感測架構。左側環形線圈施加交流電壓使溶液中離子形成離子流，離子流的大小決定了右側線圈所產生的感應電流，進而推算電導度。

表 1-4 不同電導度感測方式比較。

	二極式	四極式	線圈式
優點	架構簡單	量測精準、不易受電極影響	不需與溶液直接接觸
缺點	量測易受電極影響	架構複雜	架構複雜

## 1.2.4 整合型感測器的發展與應用

因科技的進步，各類感測器發展越趨成熟，所能量測的參數也愈來愈多，以往單參數量測的感測器也發展成為整合型感測器以符合市場需求。如 Grassi 等人利用互補式金屬氧化物半導體(Complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 180 nm 製程發展結合溫度、光強度及相對濕度的整合感測器應用於乳酪的食品保存中，由於食品在保存或運輸過程中的外在條件變化容易造成食物變質，而溫度、光照及濕度常常是其重要指標，故利用這些指標進而去監控乳酪的保存狀況[39]。其利用兩顆雙極性接面型電晶體(Bipolar junction transistor, BJT)產生一與絕對溫度成正比(Proportional to absolute temperature, PTAT)之電壓進行溫度量測，光強度則利用光二極體偵測，濕度感測使用聚酰亞胺(Polyimide)為基底之指叉型電容，當環境濕度變化時其介電質會跟著變化造成電容值改變，進而由後端電路讀出，如圖 1-4。

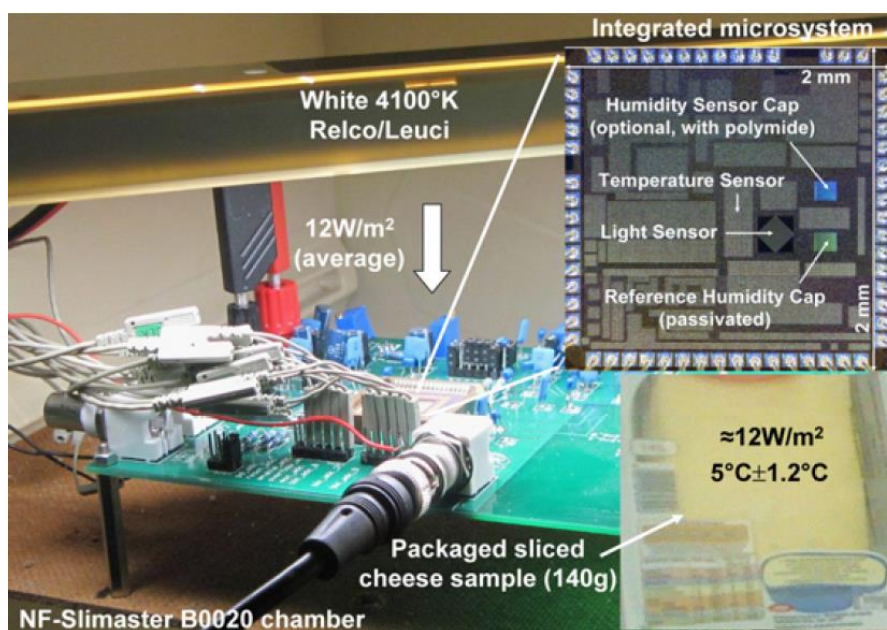


圖 1-4 用於監控乳酪保存品質之溫度、光強度及溼度整合感測器。由 Grassi 等人利用 CMOS 180 nm 製程製造之整合晶片，可實際運用於食品保存監控[39]。

近年來穿戴式裝置興起，而穿戴式智慧科技的研發也愈受矚目，如 2016 年 Gao 等人發展了將感測器與運算電路整合在一軟性印刷電路板(Flexible printed circuit,

FPC)上的人體穿戴式裝置[40]，利用電漿蝕刻製程製作出能感測鈉離子、鉀離子、葡萄糖、乳酸及溫度的感測晶片，分別設計五種參數的感測電路，並整合類比數位轉換器(Analog-to-digital converter, ADC)、微處理器及藍牙接收器，最後將該整合型穿戴式裝置直接固定在人體皮膚上，利用藍牙傳輸量測數值至手機 App，即可進行生理訊號的感測，如圖 1-5 所示。

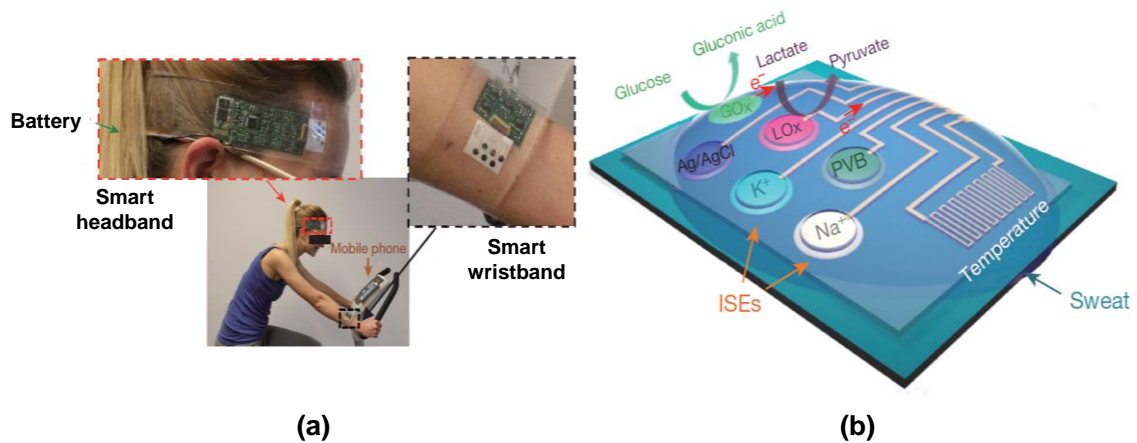


圖 1-5 FPC 穿戴式整合感測晶片架構圖。(a)將晶片與電路整合於 FPC 上，外接電池後可直接穿戴在皮膚上進行量測，(b)為感測晶片架構圖，可偵測人體的鈉、鉀、葡萄糖、乳酸及溫度[40]。

2012 年 Futagawa 等人利用大型積體電路(Large scale integration, LSI)製程研發酸鹼值、電導度與溫度感測晶片(圖 1-7)，應用於精密農業的溶液量測[41]，由於礦物質在酸性或鹼性的溶液中，其溶解度會有所差異，造成溶液濃度的變化，而電導度則反映溶液中的離子總濃度，而在精密農業之中會使用的營養液，其溶液的離子組成固定比例，故得知總離子濃度即可推測營養液中的物質含量，溫度感測則用以監控環境溫度變化。其 pH 感測使用 ISFET 架構並以氮化矽(Silicon nitride, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)做為 pH 感測層，電導度量測使用白金作為感測電極材料，溫度則使用 P-N 接面(P-N junction)二極體架構，搭配後端感測電路及濾波處理，最後輸出量測電壓。

## 1.2.5 溶液感測器之間的干擾

利用整合型多重感測器在進行溶液的量測時，最常遇到的問題即是感測器間的串擾，若相互干擾情形較輕，可利用後端電路進行訊號處理作檢量線的補償，但若干擾較嚴重者，則必須將各感測器進行絕緣處理，但如酸鹼值、離子濃度等量測原理必須將感測單元直接與溶液接觸，則沒有辦法靠絕緣處理來消除干擾，尤其酸鹼值的量測係監控溶液中氫離子對感測單元造成的電位變化，而離子濃度的量測為施加電流在溶液中量測溶液阻抗，兩者很容易造成串擾，而其他不需與溶液實際接觸的量測參數(如溫度)也需進行防水處理以杜絕干擾，如圖 1-6。進行 pH 量測時，溶液中電導度電極的交流訊號  $V_{AC}$  及溫度感測所施加的直流電  $V_{DC}$  皆會被 pH 感測電極接收到，進而造成不可預期之等效電路干擾，而接地電位(Ground, GND)更是會造成短路的危險，同理電導度的感測也會受到 pH 參考電極與溫度電源的直流準位影響，溫度在沒有絕緣處理的情況下，亦會受到 pH 參考電極與電導度交流訊號影響。而 Futagawa 等人自行製作感測晶片(圖 1-7)，pH 感測膜使用  $Si_3N_4$  做為 ISFET 感測層，電導度量測使用白金電極，溫度則使用 P-N 二極體架構[41]。該團隊解決干擾方法為直接從製程中利用 P 型摻雜層將溫度感測單元進行絕緣，阻隔 pH 感測電位變化及電導度量測漏電流對其造成的干擾，電導度感測電極施加一直流準位為零之交流電壓，而 pH 值量測則使用空乏型(Depletion type) ISFET 架構，其參考電極可運作在零電位，使參考電極不會因其直流準位與電導度電極直流準位不同而造成串擾，由於 pH 值量測原理遵循能斯特方程式(Nernst equation)：

$$E = E_0 + (RT/F)\log[H^+] \dots\dots\dots(1-5)$$

其中 E 為氫電極電位， $E_0$  為參考電極電位，T 為絕對溫度，R 是理想氣體常數，F 為法拉第常數， $[H^+]$  為氫離子濃度。而電導度量測所施加的交流電會影響能斯特方程式中的  $E_0$  項，故會造成 pH 值量測輸出產生閃爍雜訊(Flicker noise)，因此必須在 pH 值量測輸出端加上低通濾波電路以消除此雜訊，同樣的電導度量測輸出端也需連接高通濾波電路。此作法雖可使 pH 值、電導度與溫度在同一時刻進行測量，但

必須利用半導體製程製作晶片，且後端電路需要增加許多濾波電路，pH 參考電極與電導度電極的直流準位也必須沒有電位差才不會造成互相干擾，如此便大大提升製作成本與電路複雜度，而由量測結果也可看出，該研究雖可達到三參數同時量測，但電導度在量測條件不變之下，穩定性較 pH 值及溫度量測差。

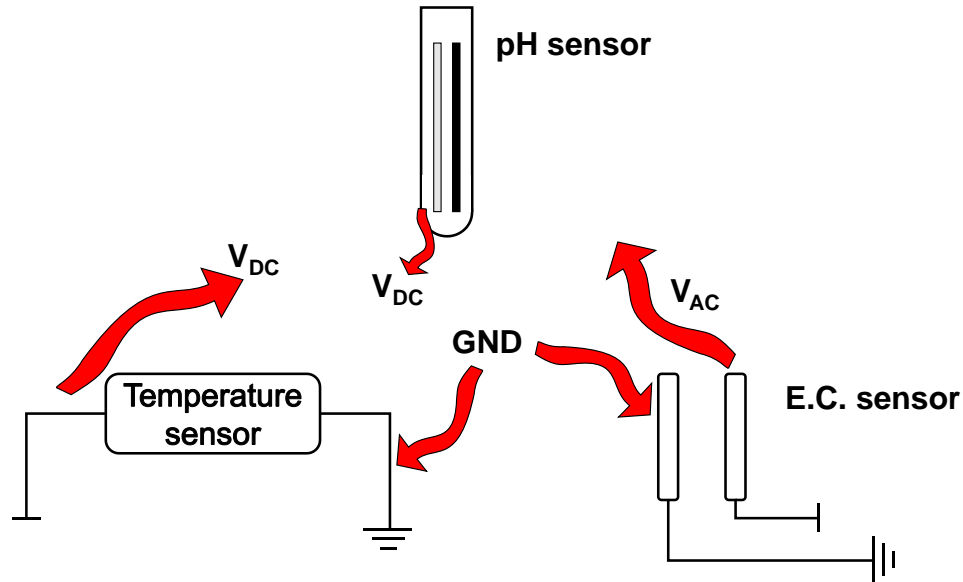


圖 1-6 在溶液中進行酸鹼度、溫度與電導度感測之等效干擾示意圖。在進行溶液量測時，感測器之間會接收到彼此的電訊號，造成不可預期之等效電路干擾。

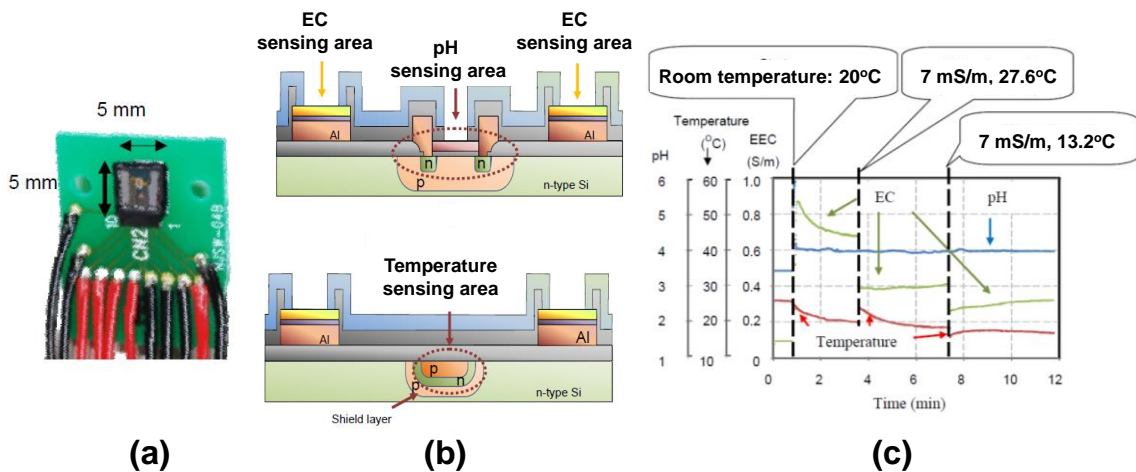


圖 1-7 整合 pH 值、電導度與溫度感測應用於精密農業測量的感測晶片。(a)為晶片實體照片，(b)為 LSI 晶片製程示意圖，(c)為量測結果，可看出電導度量測穩定性較差[41]。

市面上也有販售許多整合型多參數感測儀器，而針對串擾問題也都有相對應的解決策略，如美國哈納儀器(Hanna instruments)公司生產的 HI9813-6™ 手持式酸鹼度、電導度、總溶解固體濃度(Total dissolved solids, TDS)及溫度檢測計，該產品將 pH 電極、電導度電極與 NTC 溫度感測器整合在同一根電極內，且溫度感測部分與外界絕緣，使用者可從儀器介面中選擇欲量測 pH 值或是電導度(或以 TDS 單位顯示)，以手動進行量測模式的切換，此裝置將三參數感測器整合在一起，而同一時間只對 pH 值或電導度進行檢測防止干擾的產生，如圖 1-8 所示。



圖 1-8 商用手持式整合電極多參數檢測計。哈納儀器公司生產之 HI9813-6™ 將 pH 電極、電導度電極與 NTC 溫度感測器整合在一根電極內，同一時間只進行 pH 值或是電導度(TDS)的量測，溫度感測則可持續進行量測。

而由啟盤科技(Pyxis)生產之 SP-700™ 多功能水質檢測計，包含了 pH 值、氧化還原電位(Oxidation-reduction potential, ORP)、電導度、甲苯磺酸(P-toluenesulfonic acid monohydrate, PTSA)及溫度測量，如圖 1-9。在此裝置上具有兩個溶液浸泡孔，上方為 pH 值與 ORP 感測孔，由於 pH 值與 ORP 皆為量測溶液電位，故彼此不易發生串擾，而下方溶液浸泡孔則為電導度量測，以及以螢光法為原理之甲苯磺酸含量偵測和溫度量測。此儀器利用兩個浸泡感測孔的設計巧思，將容易相互干擾的參數直接以物理隔絕的方式分開，使其不在同一溶液中，成功進行多參數同時量測並避免串擾問題，但過程中必須使用人工操作將溶液分別滴在兩個感測孔中。

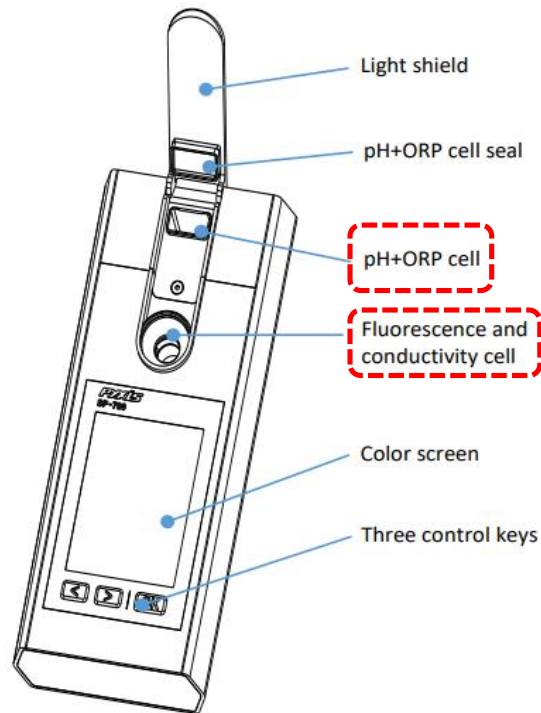


圖 1-9 商用雙感測孔多參數水質檢測計。由啟盤科技生產之 SP-700™ 利用兩個感測孔的設計將易造成串擾的電導度與 pH 值量測分開在不同感測孔，使同一時間可進行所有參數的測量。

本研究分別設計 pH 值、離子濃度與溫度感測電路，並設計繼電器控制電路，使感測電路與多參數整合型晶片的每個接腳間通過繼電器作連接，在同一時間中只會有一種參數的感測電路與感測晶片的該參數量測接腳連通，而利用微處理器控制繼電器的切換，以時序性切換量測的方式來達到多參數量測之目的，如此可避免為了達到多參數同時刻量測所需之感測晶片絕緣加工處理及複雜的後端電路。

### 1.3 研究動機與目的

由於水質感測的重要性，愈來愈多學者與業界皆發展出結合微處理運算單元甚至無線傳輸的整合型感測系統[42-44]，而前人所研發之 ITO 感測晶片具有 pH 值、溫度與電導度感測功能，且低成本、快速反應時間與穩定的特性，非常適合用於發展新型態之多參數水質感測系統。目前商業化的感測裝置，其 pH 值量測原理

多為利用傳統玻璃電極作為量測架構，因價格高昂、保存不易及反應時間冗長等缺點，使應用範圍仍受到限制。若需要進行多參數的量測時，目前所見之量測策略大多利用模式切換的方式，一次進行單一參數量測，也有利用兩個以上的感測區盛裝液體，使容易互相干擾的量測參數(如 pH 值及電導度)分別在不同液體中進行反應，儘管這些方式能夠讓感測裝置達到量測多種參數，但仍需以人為方式進行模式切換或是將待測溶液分裝至不同感測區，若要進行長時間的自動化量測，則沒有辦法完成多參數量測，即使為了達到同時間多參數量測而設計的感測晶片，也因其昂貴的晶片製程與複雜的後端處理電路而大幅提升成本，其量測結果的穩定度也仍會受到一定程度的影響[41]，故本研究希望以低成本的方式解決多參數量測的干擾問題，因此設計繼電器切換電路，搭配微控制器的控制邏輯進行時序量測，在單一時刻只進行一種數值的測量，但利用繼電器的切換可達到不同參數的完整循環量測，經過訊號處理後可即時顯示在顯示器中，並開發手機 App 利用藍牙傳輸將感測資料傳送至手機中，完成感測系統的無線傳輸功能，使此研究之系統原型實現多參數感測、訊號處理、即時顯示及遠端監控的功能。



## 1.4 論文架構

本研究論文架構如圖 1-10 所示。第一章介紹溶液感測參數量測及整合型溶液感測器所面臨的問題，第二章則針對本研究量測參數進行數值讀出原理的探討與實驗設計。第三章進入感測電路的開發，提出串擾解決策略，並說明如何透過微控制器模組進行量測程序控制與訊號處理，第四章則為感測電路與感測晶片量測結果討論。最後在第五章進行總結與未來展望。



圖 1-10 論文架構圖。

## 第二章 量測原理與實驗架設

### 2.1 量測原理與電路設計

#### 2.1.1 酸鹼值量測與數值讀出

由於傳統 pH 玻璃電極利用離子交換方法進行溶液氫離子的量測，本身電極阻抗極大，不同的電極設計其電阻範圍可從 10 MΩ 至 1000 MΩ 不等，後端數值讀出電路的輸入阻抗更須遠高於電極阻抗才不會造成阻抗匹配問題。玻璃電極架構之酸鹼值量測一般在 pH 值由 0 至 14 時的電壓輸出為 415 mV 至 -415 mV，此解析度已足夠讓一般市售資料擷取設備所讀出，故後端電路常使用極高輸入阻抗之電壓隨耦器(Voltage follower)直接將 pH 感測電位讀出，並利用電阻分壓器經過緩衝器(Buffer)施加固定電位給 pH 電極內之參考電極使用。例如由德州儀器公司(Texas instruments, TI)生產之 LMP91200™ 為專門用來連接市售玻璃電極進行 pH 量測的 IC 元件，元件內部為兩顆運算放大器(Operational amplifier, OPA)組成，圖 2-1 中做為 pH buffer 之放大器的非反向輸入端(Non-inverting input)直接連接 pH 玻璃電極，為電壓隨耦器架構，其輸入偏壓電流(Input bias current)最大不超過 6.5 pA，可有效減少偏壓電流因玻璃感測電極之高阻抗，所造成的輸出電壓誤差。參考電極電壓的施加則利用電阻分壓後，直接利用圖中的 VCMHI (High impedance common-mode output)接腳或是經過 VCM (Buffered common-mode output) buffer 之放大器的 VCM 接腳連接至參考電極。

隨著 ISFET 與 EGFET 的出現，也開始有商用儀器採用此架構進行酸鹼感測，而在後端電路設計部分，不同於傳統 pH 電極因具有高阻抗，而需要使用輸入阻抗極高之運算放大器，ISFET 及 EGFET 架構的輸出訊號為電晶體源極電流，可直接利用商用半導體特性分析儀器(圖 2-2)或是電流轉電壓電路將電流訊號轉變為一般資料擷取設備所能讀取的電壓訊號，感測靈敏度也可藉由多顆電晶體的並聯來加以提升。本研究即使用 pH 量測架構即為 EGFET 形式，利用商用 CMOS 場效應

電晶體，將內部多顆 N-MOS 並聯，並直接將閘極端連接本研究使用的 ITO 感測晶片，再以銀/氯化銀電極做為參考電極進行量測，而後端電路則利用電流轉電壓電路將電晶體源極電流輸出轉換為電壓訊號讀值。

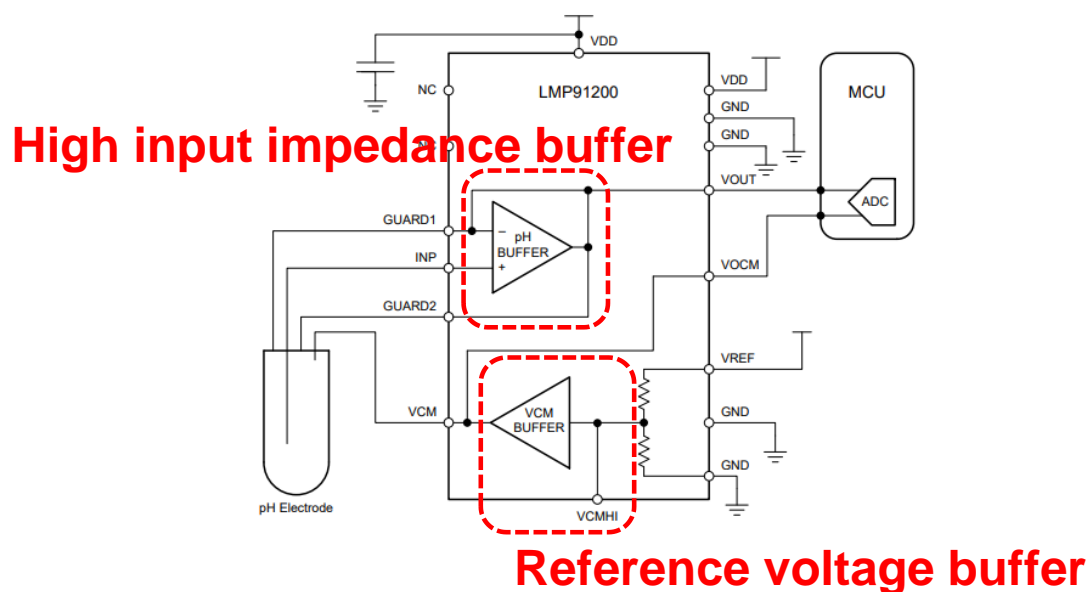


圖 2-1 商用連接玻璃感測電極之酸鹼值量測 IC。由 TI 公司生產之 LMP91200™ 可直接與 pH 玻璃感測電極連接，圖中之 pH buffer 為高輸入阻抗之運算放大器，VCM buffer 則為參考電壓經過電阻分壓後連接至參考電極前的緩衝放大器。

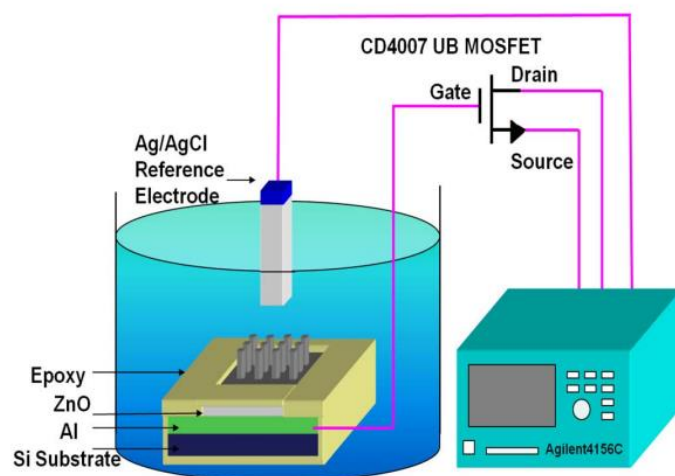


圖 2-2 EGFET 電晶體特性量測架構。使用半導體特性分析儀量測電晶體源極電流變化，進而推導出 pH 值變化[45]。

## 2.1.2 溫度量測與數值讀出

溫度電阻量測常見架構為二線式、三線式及四線式量測，如圖 2-3 所示，二線式量測最為單純，其電源供給端與量測端使用同樣的兩條導線  $L_1$  與  $L_2$ ，其導線電阻值分別為  $R_{L1}$  和  $R_{L2}$ ，優點為架構簡單，缺點則是當導線電阻較高時，總電阻量測結果會受導線電阻影響而失真，二線式電阻量測所測得總電阻值為  $R_{L1} + R_T + R_{L2}$ 。三線式量測目的為消除導線電阻對總量測電阻值的影響，共使用三條線與溫度電阻連接，若導線電阻值相等，則可由導線  $L_1$  與  $L_3$  兩端量測到總電阻值  $R_{L1} + R_T + R_{L3}$ ，減去由導線  $L_2$  與  $L_3$  所量測總電阻值  $R_{L2} + R_{L3}$ ，則可得到真正溫度電阻量測值  $R_T$ 。四線式溫度電阻量測則可以完全消除導線電阻造成的影響，儘管各導線電阻值可能不同。四線式量測架構將電源供給端與量測端分開，使量測端直接與溫度電阻並聯，故  $R_{L1}$  與  $R_{L4}$  不會被系統量測到，且導線  $L_2$  與  $L_3$  連接高輸入阻抗之設備進行電壓量測，將  $R_{L2}$  與  $R_{L3}$  的影響降至最低，如此一來不管電路與溫度電阻的距離有多遠，所量測到的電阻值都是真實的溫度電阻變化。本研究使用架構最單純之二線式量測進行溫度電阻測量，降低感測晶片與電路連接腳位數量，並利用惠斯同電橋量測電阻值變化[46]，而本研究所使用的 ITO 晶片屬於正溫度係數，其對溫度變化之靈敏度約為  $2 \Omega/^\circ\text{C}$ ，而在 2.3 節會討論為了商業化封裝考量而採用的新型感測架構所使用到的市售晶片型熱敏電阻，則為負溫度係數型。

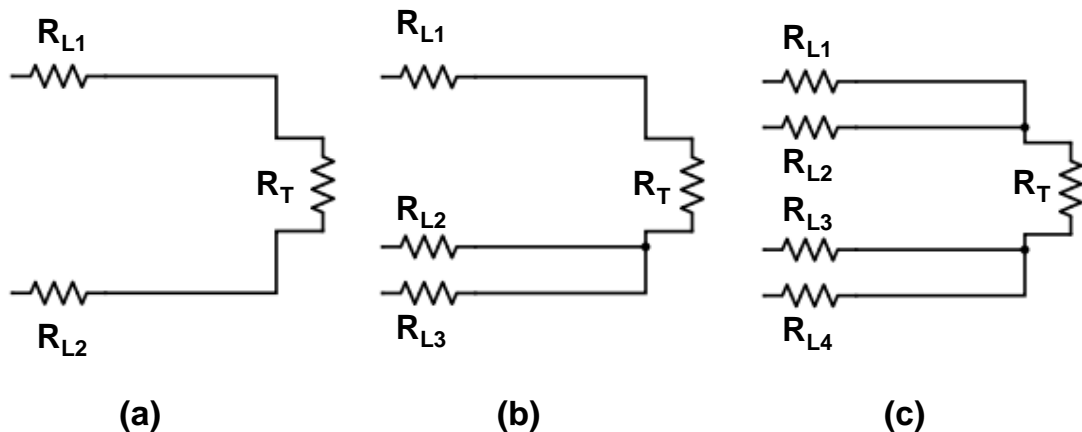


圖 2-3 溫度電阻量測電路架構。(a)、(b)、(c)依序為二線、三線及四線式量測。

### 2.1.3 電導度量測與數值讀出

商用常見之二極式電導度量測電路，其中一根電極為訊號產生端，另一根則為量測接收端，例如由亞德諾半導體(Analog devices)公司生產的 AD5933™ 阻抗量測 IC，其訊號發送端利用具可程式化控制頻率及振幅之正弦波產生電路，產生量測所需之交流振盪訊號，而量測接收端則為電流轉電壓之電路架構，如圖 2-4 所示，使用時將圖中的 VOUT 與 VIN 腳位連接感測電極，並置於待測溶液中，振盪訊號則會從其中一根電極流經待測溶液後進入另一根電極，隨著溶液阻值的不同而測到不同的電流值，利用電流電壓轉換器將交流電流轉換為電壓訊號，再經過放大與低通濾波後，由後端 ADC 進行訊號接收，完成電導度的二極式量測。

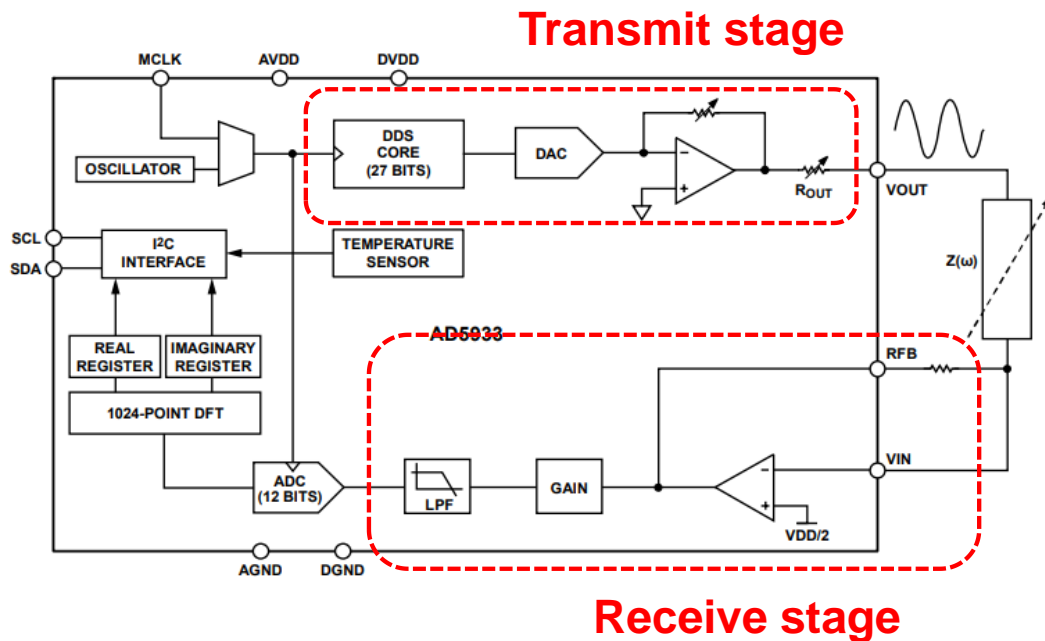


圖 2-4 商用二極式阻抗量測 IC。由亞德諾公司生產之 AD5933™ 在訊號發送端具有可程式調整振幅及頻率的正弦波產生電路，接收端則為將待測阻抗轉換為電壓輸出的電流電壓轉換器，經由輸出放大及低通濾波後由 ADC 接收。

四極式電導度量測架構，其中兩根電極負責量測訊號的產生，另外兩根電極則負責進行量測，此方法利用兩對電極，將電訊號供給端與量測端分開，可降低二極

式量測架構因感測電極長久使用的極化或損壞，造成對訊號量測的直接影響，也比二極式電導度量測電極更為精準。日本堀場(Horiba)公司研發了許多檢測儀器，其中也包含四極式電導度檢測計，而在其每半年發行一次的技术期刊“Readout”中也對四極式電導度量測電路架構有詳盡的說明，如圖 2-5。在其量測架構中，訊號發送端的兩根電極負責施加交流訊號至溶液中進行阻抗量測，並以電流偵測電路量測輸出電流的大小，訊號接收端的兩根電極則在溶液中以固定間距測量在溶液中兩根電極的電位差，並與量測之電流大小相除後可得知溶液電阻值，將電阻值取倒數後再乘以訊號接收端電極的電極常數即可推得電導度值。因前人所發展之 ITO 感測晶片設計具有兩根感測電極，故本研究延續其架構，採用二極式電導度量測架構進行設計與實驗，並自行設計正弦波產生電路、溶液阻抗轉換電路以及交流訊號轉直流訊號之精密整流電路，最後轉換為直流電壓讀出，有效減少電路元件成本及方便未來模組化設計。

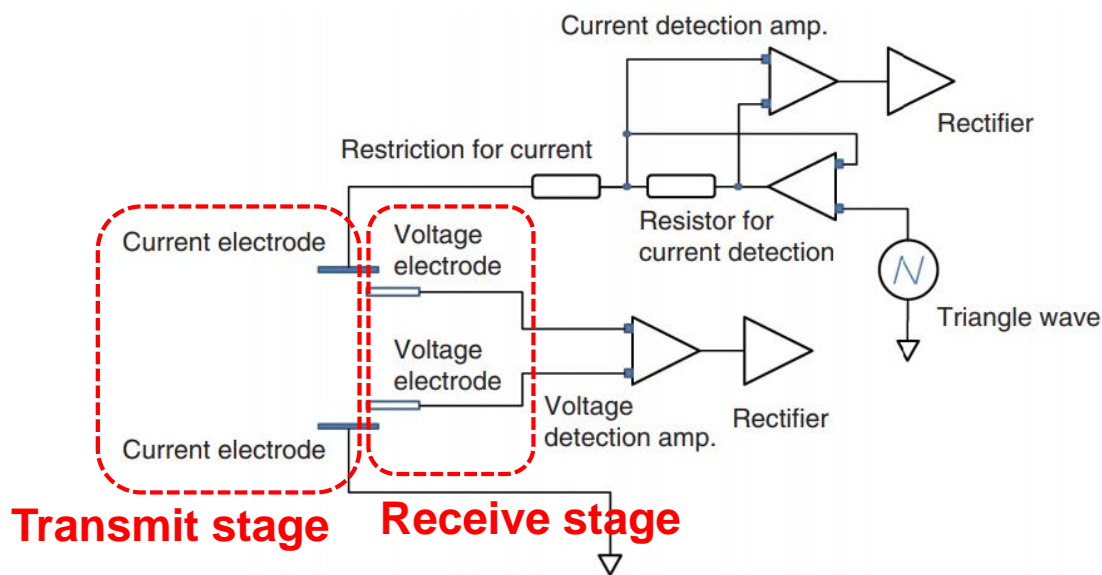


圖 2-5 四極式電導度量測電路架構。堀場公司之技術期刊說明四極式電導度量測策略，訊號發送端的兩根電極負責施加電訊號至待測溶液中，訊號接收端的電極則負責量測溶液中兩根電極的電壓差。

## 2.2 感測系統電路製作

本研究使用線上電路圖繪製軟體 EasyEDA 進行電路設計圖繪製以及印刷電路板(Printed circuit board, PCB)走線 layout 設計，使用者操作介面如圖 2-6，其具有廣大電子元件封裝資料庫及直覺的使用者操作方式，並可輸出電子材料清單(Bill of materials, BOM)和 Gerber 檔。Gerber 格式為一種二維向量圖檔，為業界印刷電路板製作廠商廣為使用的標準格式，其可用來製作印刷電路板走線層、防焊層、文字層及鑽孔層等等的曝光底片。在電路圖繪製階段需先完成電路中所有元件的腳位連接，並定義元件的封裝形式及型號等各種參數，完成後則將設計圖轉換為 PCB Layout 模式，在此模式中所有元件會以定義的封裝形式出現在操作介面中，使用者再自行排列各元件位置及進行走線設計，本研究分別對 pH 值、溫度及電導度感測電路進行元件擺放與走線設計，最後在 PCB Layout 模式中將三者合併，並整合繼電器電路、電源處理電路及感測晶片連接處等設計，完成總電路 layout 圖，最後將 layout 圖匯出成 Gerber 檔案，並輸出 BOM 表，即可交與印刷電路板製造廠進行洗板打件工作。圖 2-7 為本研究之 pH 感測電路 layout 設計，元件的封裝皆為表面黏著型元件(Surface mounted devices, SMD)，在設計階段將 pH 值、溫度及電導度感測電路分別進行 layout 設計完成後，便可合併在一起完成感測電路整體設計。

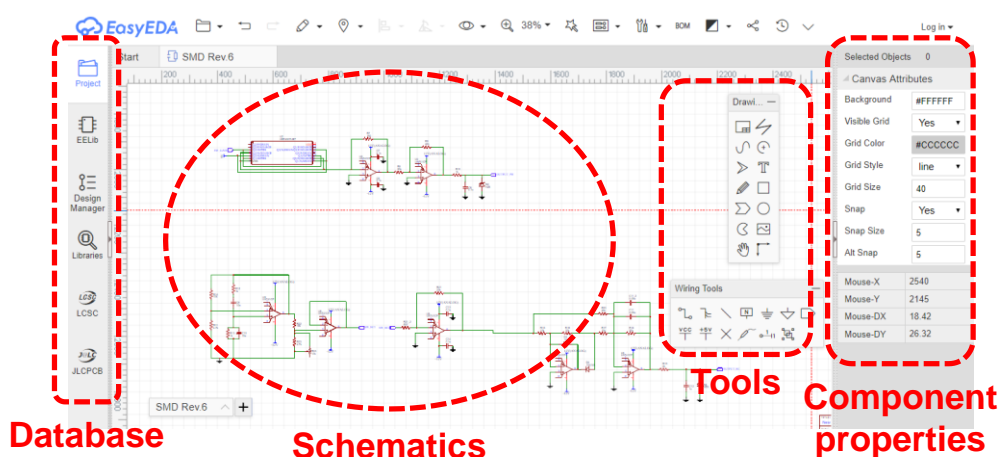


圖 2-6 電路設計軟體操作介面。EasyEDA 線上電路繪製軟體具有直覺的使用者操作介面與為數眾多的元件資料庫，電路設計完成後可轉換成 PCB Layout 模式進行實體電路板設計，並可輸出 Gerber 檔與 BOM 表給電路製造廠商進行製作。

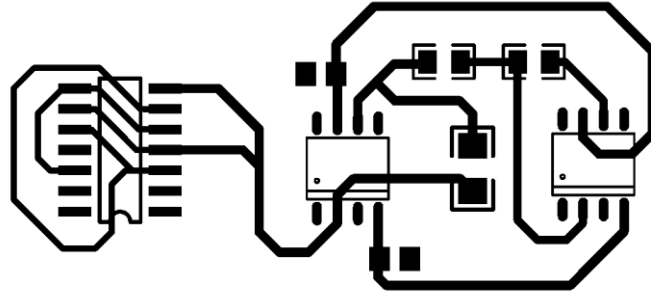


圖 2-7 利用 EasyEDA 軟體轉換出之 PCB layout 圖。首先在設計圖中定義好所有元件連接、封裝型號與數值，再轉換至 PCB Layout 模式進行元件排列與走線，此電路為本研究設計之 pH 值感測電路 layout 圖。

### 2.3 感測晶片製作

本研究所使用的感測晶片分別為前人所發展之 ITO 感測薄膜，與為了因應商業化封裝遇到的問題，進而改良其晶片架構而得的新形態感測晶片。氧化銦錫材料為一種透明導電氧化物(Transparent conductive oxide, TCO)，具有良好光學特性與導電性，多用於觸控面板內之導電層。本研究使用之 ITO 為捲對捲(Roll-to-roll)濺鍍製程所製作，其製程濺鍍基板材質主要為聚對苯二甲酸乙二酯(Polyethylene terephthalate, PET)等厚度薄於 0.1 mm 之薄板，具有快速低成本大量生產的優勢。取得 ITO 感測薄膜後，利用繪圖軟體設計 ITO 晶片之 pH 值、溫度與離子濃度感測區域，再利用二氧化碳雷射雕刻機(GCC LaserPro venus II)對晶片進行加工，便完成 ITO 感測晶片的製作。晶片與電路的連接透過自行設計之連接板作轉接，架構如圖 2-8，連接板上半部六根連接腳位與 ITO 晶片接腳間距相等，可使用異向性導電膠將晶片與電路板對齊黏貼，利用異向性導電膠垂直方向導通的特性，使 ITO 晶片的各腳位分別與連接板的各腳位導通，pH 感測所使用的參考電極則可焊接在連接板上的參考電極預留孔位。在連接板尾端設計間距 1.0 mm 的六腳位連接點，使用時可直接將連接板插入一般市售之序列式 ATA(Serial advanced technology attachment, SATA)連接槽進行連接，接槽另一端以 1.0 mm 之 6 腳位軟排線(Flat flexible cable, FFC)連接至電路，即完成感測晶片與電路的連接。



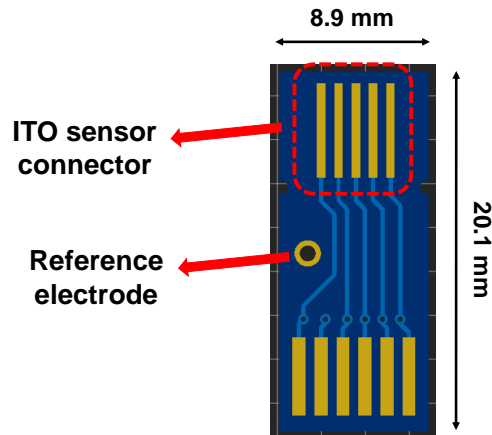


圖 2-8 ITO 感測晶片與市售 SATA 插槽連接之轉接板。晶片與板子的連接使用異向性導電膠，尾端的連接腳位可直接插入 SATA 插槽中。

而為了未來能夠實際應用於商業化場合，其晶片必須得到完整的模組化封裝與防水，各接腳與連接元件的相接必須具有良好的電性接觸，原先利用異向性導電膠黏貼的方式雖可達到晶片各腳位與連接板的相接，但卻沒有辦法有效固定晶片，若晶片前端不小心遭受外力觸碰，則晶片與連接板之間的導電膠很容易被撕扯，造成導電膠垂直方向導通的特性受到影響，造成使用者的不便。在防水的部分，需要將晶片與板子的連接處與參考電極孔位進行防水處理，另外 ITO 晶片的溫度感測區域也需要絕緣處理，因此必須在晶片的溫度感測區域塗上防水膠料，才能夠實現溶液中的溫度量測，此步驟使 ITO 晶片的製程多一道加工手續，提升製程複雜度。故本研究進行新架構之感測晶片設計，捨棄了原本晶片上之溫度與電導度感測區域，使 ITO 薄膜本身只用於 pH 值的量測，並設計新型連接板(圖 2-9)，圖中 ITO 晶片的連接處，可使用導電銅膠帶或其他導電材料進行 ITO 薄膜與連接板的電性連接，使晶片與連接板的連接變得更為單純，不需像先前架構需要以異向性導電膠才能將晶片與連接板作連接，此架構也可讓 ITO 薄膜有連接板面做支撐，讓使用者不慎彎折晶片的機率降至最低。電導度量測為直接在電路板上露出兩個焊接點當作感測電極使用，溫度感測則利用由 Sunlord 公司生產之 NTC 熱敏電阻 SDNT2012X103F3950FTF，直接焊在電路板上進行溫度量測，板子上也預留參考電極的连接孔，可將孔位設計在緊鄰 ITO 晶片的位置。此架構需要進行防水處理的

區域為溫度熱敏電阻的焊點、參考電極的连接孔以及 ITO 薄膜與電路板连接處，如圖中所標示，進行防水處理時可以將连接板前端畫線部分以上直接浸於防水膠中，即可完成溫度與參考電極的防水處理，ITO 薄膜與其连接處可用防水膠料進行塗佈，或直接設計外殼封裝進行防水。在连接板尾端同樣設計間距 1.0 mm 的六腳位连接點與插槽连接，最後也以 FFC 線连接至電路系統，如圖 2-10。本研究針對 ITO 薄膜與板子的连接面積，以及元件相對位置的擺放進行優化調整，圖 2-11(a) 為最初连接板設計，连接板上之 ITO 薄膜连接面積的長寬分別為 5.0 mm 及 1.5 mm，電導度量測點位在板子最上方，溫度及參考電極连接孔則在 ITO 连接處下方，防水處理部分為 ITO 连接處以下。圖 2-11(b)則將 ITO 连接觸面積加大，長寬改為 5.1 mm 與 3.3 mm，使薄膜與板子的连接特性擁有更高的安全係數，並將溫度量測點與參考電極连接孔改置板子上方，方便防水膠料的沾塗，而 ITO 薄膜與板子的连接處亦塗佈防水膠料進行絕緣處理，或可自行設計外殼將之進行防水封裝，使感測晶片模組的製程更為完整。圖 2-11(c)即為圖 2-9、圖 2-10 所使用之晶片架構，除了將 ITO 與板子连接面積拉高至長寬為 5.6 mm 與 5.1 mm，也將板子本身長度加長，使 ITO 薄膜能夠加長，具有更大的 pH 感測面積，同時將參考電極连接孔以對稱式設計將之置於板寬的正中央，即為最終版本設計。

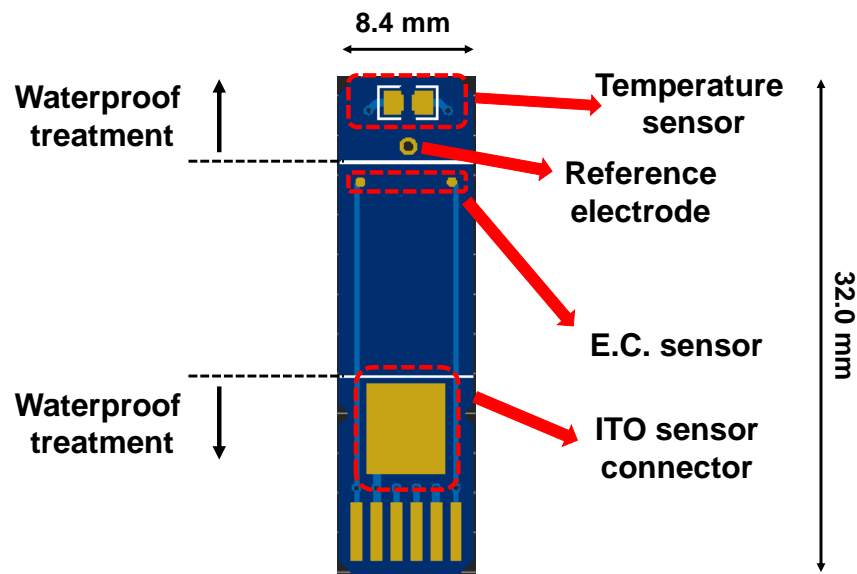


圖 2-9 新型晶片量測架構之连接板設計。ITO 晶片負責 pH 量測，電導度利用露出之焊接點作為感測電極，溫度使用熱敏電阻，尾端连接腳位可插入 SATA 插槽。

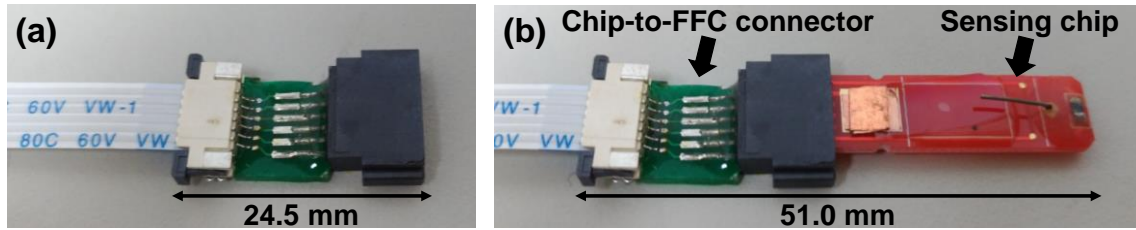


圖 2-10 晶片模組連接圖。(a)利用自行製作之轉接板將市售 SATA 插槽與 FFC 軟排線作連接，插槽可插入晶片模組，軟排線則連接至感測電路。(b)感測晶片實際插入 SATA 插槽中。

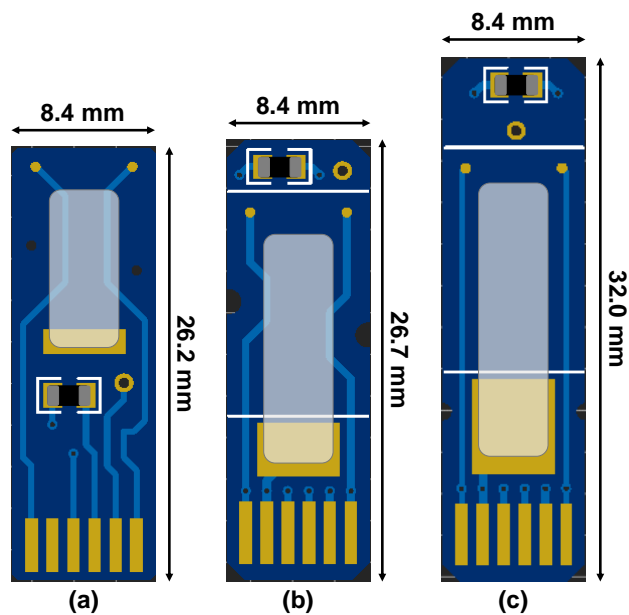


圖 2-11 晶片模組優化過程之各設計圖。(a)至(c)除了增加 ITO 薄膜與連接板的接觸面積，也將板長加長使 ITO 薄膜尺寸可以加大，具有更大的 pH 感測面積，元件的擺放位置也經過防水處理的便利性考量。

## 2.4 實驗設計

本研究利用自行設計之感測電路，搭配 ITO 感測晶片與為了因應商業化封裝而設計之新型量測晶片架構進行 pH 值、溫度與電導度的檢量線量測，並利用 Arduino Nano 模組控制繼電器切換電路，控制三種感測電路的啟動與關閉以達到三參數時序量測，並也實際進行溶液測量以驗證時序量測的可行性與穩定性，並會對感測電路進行電源品質、反應速度、輸出穩定性等測試。

本研究使用市售 Arduino Nano 當作微控制器模組(圖 2-12)，所使用處理器 IC 型號為 ATmega328P，是由 Atmel 公司生產之 AVR 微處理器系列，為 8-bit 精簡指令型控制器，擁有 32 kbytes 快閃記憶體，1 kbytes 電子可抹除式唯讀記憶體 (Electrically erasable programmable read only memory, EEPROM)，及 23 個輸入/輸出 (Input/output, I/O) 通道，並支援通用非同步收發傳輸器 (Universal asynchronous receiver/transmitter, UART)、積體電路匯流排 (Inter-integrated circuit, I<sup>2</sup>C)、序列周邊介面 (Serial peripheral interface, SPI) 等通訊協定，且內建 10 bits 解析度之 ADC，可利用官方整合開發環境 (Integrated development environment, IDE) 進程式撰寫，控制 I/O 腳位來達到繼電器控制電路的切換，並利用三個腳位讀取 pH、溫度及電導度量測數值，再由 ADC 轉換為數位訊號進行處理，最後將結果顯示於 LCD 顯示器與藍牙傳輸至手機 App。

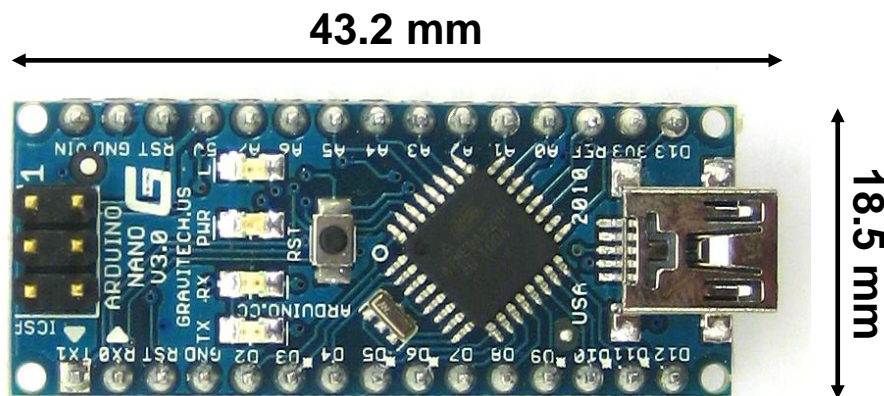


圖 2-12 Arduino Nano 微控制器模組。以程式撰寫來控制 I/O 腳位、ADC 訊號處理，及 LCD 顯示器及藍牙模組資料輸出。

藍牙功能利用 HC-05 主從一體式藍牙模組達成，其為藍牙 2.0 EDR (Enhanced data rate) 傳輸規格，以 UART 通訊協定與 Arduino 通訊，並使用可變更藍牙模組參數設定之 AT 指令 (AT-command) 設定模組傳輸速率 (Baud rate)、主從架構選擇、配對密碼等。本研究設定模組在從端模式下運作，以智慧型手機為主連線端，主動與模組發起連線配對，模組的傳輸速率與 Arduino 模組序列傳輸速率同樣設定為 9600 位元/秒 (Bits per second, bps)，可實現藍牙模組控制及資料傳送功能。

## 第三章 感測電路設計

### 3.1 酸鹼值感測電路

pH 量測電路架構為 EGFET，由閘極延伸端連接 ITO 感測晶片，搭配銀/氯化銀電極，電晶體輸出電流經過兩級運算放大器，最終輸出電壓訊號以供後端訊號處理裝置讀取，如圖 3-1 所示。

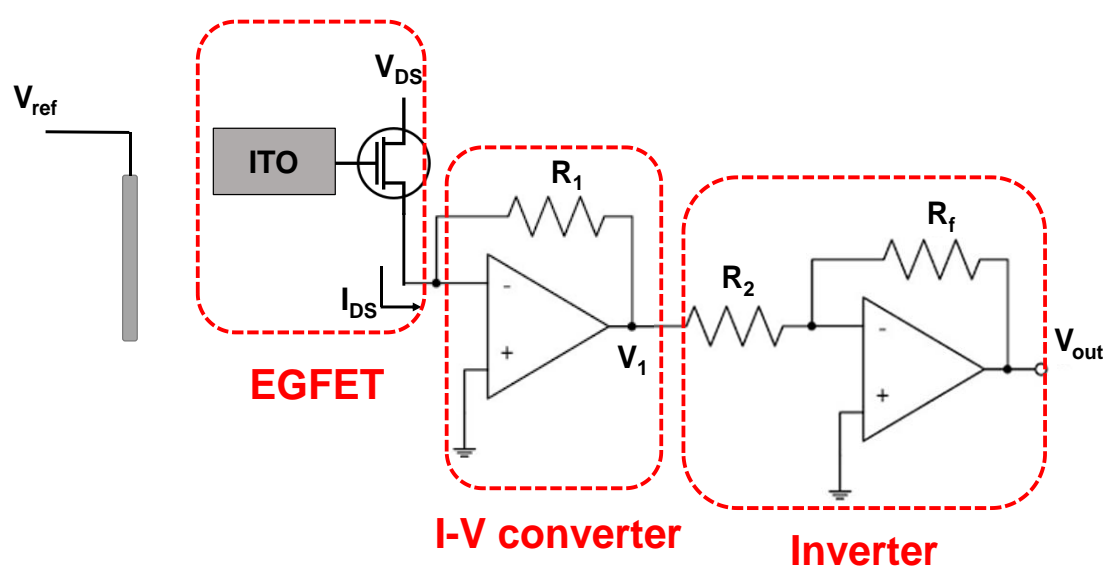


圖 3-1 pH 感測電路設計圖。利用 EGFET 經由電流電壓轉換器與反向放大器構成。

#### 3.1.1 延伸閘極式場效應電晶體

本研究利用市售 HEF4007UB 電晶體，使用內部三顆 N-MOS 並聯，目的在增加 pH 變化造成閘極電位改變後對於源極電流變化之靈敏度，將電晶體閘極端延伸出來連接 ITO 晶片之 pH 感測區域接腳，並以銀/氯化銀線做為參考電極，在前人之研究中[13]，施加 3 V 直流電壓為最佳參數，且電晶體經過 I-V 曲線特性分析後，決定源極端電壓為 9 V 直流電，以達最佳閘極電壓與通道電流互導值( $g_m$ )。本研究使 MOSFET 運作在飽和區，其電性公式如下：

線性區之源極電流  $I_{DS}$  之公式：

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS} \left( V_{GS} - V_t - \frac{V_{DS}}{2} \right) \dots \dots \dots (3-1)$$

飽和區  $I_{DS}$  之理想公式：

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_t)^2 \dots \dots \dots (3-2)$$

其中  $\mu_n$  為電子遷移率， $C_{ox}$  為閘極氧化層之單位電容大小， $W$  為閘極寬度， $L$  為閘極長度， $V_{DS}$  為源極電壓， $V_{GS}$  為閘極電壓， $V_t$  為臨界電壓。

### 3.1.2 電流-電壓轉換器與負回授放大器

電晶體汲極端連接至運算放大器構成的電流-電壓轉換器(Current-to-voltage converter)，又稱為轉阻放大器，目的在將通道電流變化轉換為電壓訊號輸出給後端資料擷取設備讀取，利用圖 3-1 之  $R_1$  放大通道電流變化之靈敏度，其公式如下：

$$V_1 = -I_{DS} \times R_1 \dots \dots \dots (3-3)$$

因為轉換後之電壓為負電壓輸出，故需要將電壓由負轉為正，方便後端設備讀取，本研究利用負回授放大器，將  $V_1$  轉為正電壓，並選擇電阻  $R_2$  及  $R_f$  數值調整放大倍率。 $V_{out}$  即為 pH 感測電路之最終輸出電壓，公式如下：

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_2} V_1 \dots \dots \dots (3-4)$$

最後在電壓輸出端連接 RC 被動低通濾波器以及 5.1 V 齊納二極體，過濾高頻雜訊以及限制輸出電壓上限，避免對後端量測裝置造成傷害。

## 3.2 溫度感測電路

ITO 感測晶片之溫度感測原理為熱敏電阻架構，故以惠斯同電橋量測微小電阻變化，再由儀表放大器進行電橋兩端電壓之差動放大，藉由輸出電壓改變即可得知感測晶片隨溫度之電阻變化，如圖 3-2。

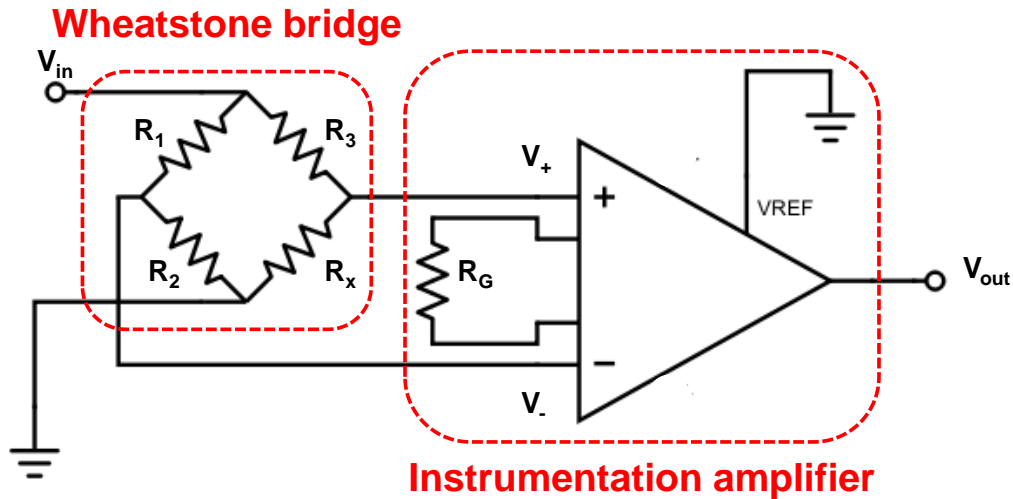


圖 3-2 溫度感測電路設計圖。由惠斯同電橋與儀表放大器構成。

### 3.2.1 惠斯同電橋

惠斯同電橋由圖 3-2 之電阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  以及 ITO 溫度感測區域之電阻  $R_x$  組成，其中  $V_{in}$  施加 3 V 電壓，端點電壓  $V_+$  與  $V_-$  關係如下：

$$V_+ - V_- = \left( \frac{R_x}{R_x + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{in} \dots \dots \dots (3-5)$$

當  $R_2 R_3 = R_1 R_x$  時， $V_+ - V_- = 0$ ，因感測晶片在室溫  $25^\circ\text{C}$  下電阻約為  $7\text{ k}\Omega$ ，故  $R_1$  及  $R_3$  選用  $6\text{ k}\Omega$ ， $R_2$  則選用略低於  $7\text{ k}\Omega$  之電阻，使  $V_+ - V_-$  之輸出在室溫下為正電壓，並在整個溫度量測區間輸出皆大於零。

### 3.2.2 儀表放大器

惠斯同電橋兩端點電壓  $V_+$  與  $V_-$ ，經由儀表放大器放大其差值，使 ITO 晶片電阻隨溫度變化造成之輸出電壓變化得到放大，本論文所使用之儀表放大器 IC 為德州儀器公司生產之 INA128，其放大倍率  $g$  由電阻  $R_G$  調整，公式如下：

$$g = 1 + \frac{50\text{ k}\Omega}{R_G} \dots \dots \dots (3-6)$$

調整  $R_G$  使溫度電路輸出電壓在所量測之溫度區間內不超過 5 V，以利後端電路讀取。最後同樣在電壓輸出端連接 RC 被動低通濾波電路及 5.1 V 齊納二極體，濾除高頻雜訊和增加電路安全係數。

### 3.3 電導度感測電路

電導度感測電路架構如圖 3-3 所示，交流電源的產生，本研究使用韋恩振盪電路產生正弦波，再經過分壓電阻調整弦波振幅並連接緩衝級運算放大器，避免振幅因負載效應而被後端電路影響，ITO 感測晶片的兩根感測電極連接於圖 3-3 之  $R_x$  位置，利用轉阻放大器量測溶液阻抗，進而推算電導度。為了使交流訊號轉為直流電壓，本研究使用精密全波整流穩壓電路，優點在於避免單純二極體整流造成單顆 0.3 至 0.7 V 壓降的問題，在待測訊號較微小的量測電路當中，此壓降會造成極大誤差，故選用以二極體搭配運算放大器構成的整流電路消除此問題，並搭配濾波電容進行整流後的漣波效應消除，最終得到直流電壓輸出。

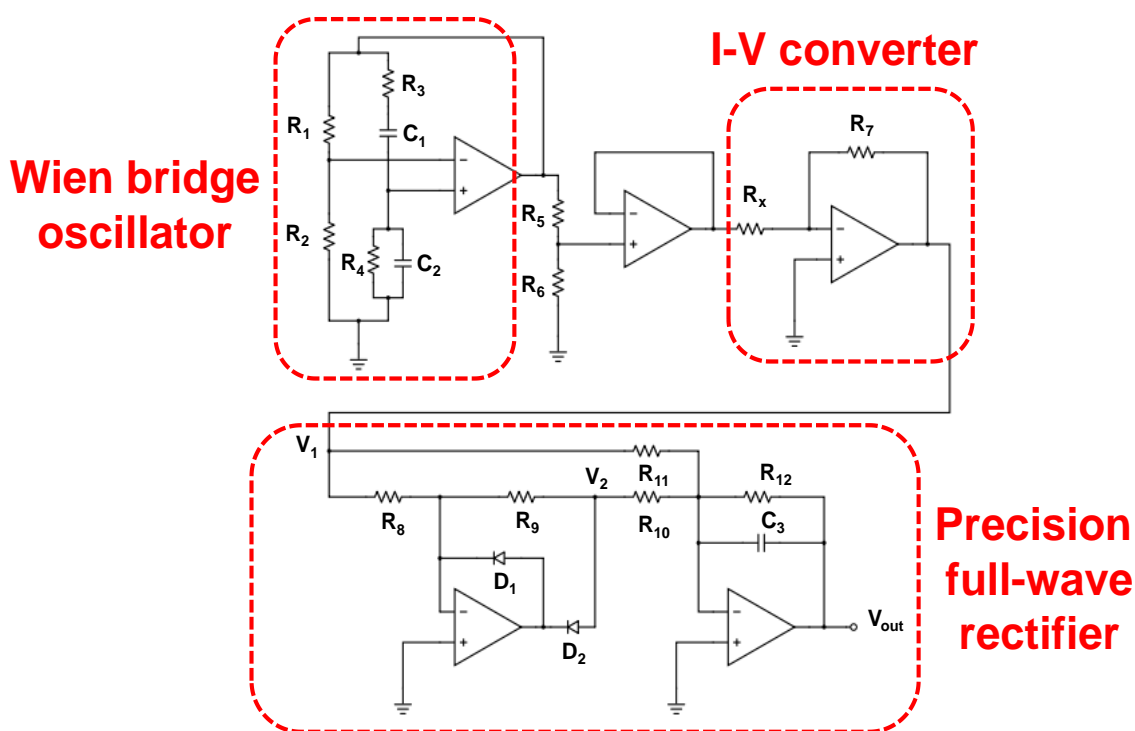


圖 3-3 電導度感測電路設計圖。由韋恩電橋振盪器產生正弦波，調整振幅並經過緩衝器後，進行待測溶液阻抗量測，以電流電壓轉換器轉成電壓輸出，再透過精密整流電路將交流訊號轉為直流電壓，最後由濾波電容消除漣波。



### 3.3.1 韋恩振盪電路

第一級放大器作用為產生正弦波振盪，利用電阻電容組成帶通濾波(Band pass filter)電路調整振盪頻率，通常使圖 3-3 之  $R_3 = R_4 = R$ ， $C_1 = C_2 = C$ ，振盪頻率  $f_r$  公式如下：

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \dots\dots\dots(3-7)$$

$R_1$  及  $R_2$  為放大器之倍率調整，為滿足韋恩電橋振盪條件，其放大倍率  $A_v$  需大於等於 3 倍，公式如下：

$$A_v = 1 + \frac{R_1}{R_2} \geq 3 \dots\dots\dots(3-8)$$

於前人研究[13]中，ITO 晶片電導度量測頻率高於 10 kHz 有較佳量測靈敏度，故選擇  $R_3 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ ， $C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$ ，產生高於 10 kHz 之正弦波供晶片量測使用。

### 3.3.2 電流電壓轉換器與精密全波整流電路

第二、三級放大器分別為振幅調整及晶片量測訊號轉換，利用電阻分壓電路將正弦波的峰對峰電壓設定為 2.0 V，並連接第二級之緩衝器達到阻抗匹配使分壓電路不影響後級電導度量測。第三級為電流電壓轉換器架構，ITO 晶片電導度感測接腳連接  $R_x$  位置，利用晶片電極量測溶液中的阻抗，並將溶液阻抗利用電流電壓轉換器轉換為電壓輸出。第四、五級放大器為精密型全波整流電路，由於電導度感測為施加交流訊號進行量測，故需要將訊號整流處理，使最終輸出電壓為直流訊號方便後端設備讀取，而一般橋式整流器由於二極體會造成 0.3 至 0.7 V 之壓降，在較為敏感之感測電路中此壓降會造成極大量測誤差，故搭配運算放大器構成精密型整流電路，消除壓降問題，電阻值選用  $R_8 = R_9$ ， $R_{11} = R_{12} = 2R_{10}$ 。第四級放大器在訊號為正、負半周時，具有不同功能，在訊號  $V_1$  為正半周時，二極體  $D_1$  截止， $D_2$  導通，此時  $R_8$ 、 $R_9$  與放大器構成一個負回授放大架構，且放大倍率為 -1。第五級放大器為反向加法器，輸出電壓  $V_{out}$  之關係為：

$$V_{out} = -(V_1 + 2V_2) \dots \dots \dots (3-9)$$

故在  $V_1$  為正半周時：

$$V_2 = -V_1 \dots \dots \dots (3-10)$$

經過反向加法器後電壓輸出：

$$V_{out} = V_1 \dots \dots \dots (3-11)$$

當  $V_1$  電壓為負值時， $D_1$  導通， $D_2$  截止，此時第四級放大器作用為將其反向輸入端的電位維持在 0V。由於第五級放大器的反向輸入端電位也等於 0V，故  $R_9$  左端與  $R_{10}$  右端的電位相等，無電流通過，此時由  $R_{11}$ 、 $R_{12}$  和第五級放大器構成反向放大電路架構，放大倍率為 -1，所以在  $V_1$  為負半周時：

$$V_{out} = -V_1 \dots \dots \dots (3-12)$$

因此達到了全波整流的效果，並且無壓降損失，最後使用電容  $C_3$  來進行濾波處理，使輸出電壓為一平穩之直流訊號。最後在電壓輸出端同樣連接 RC 被動低通濾波器及 5.1V 齊納二極體提供雜訊抑制及保護功能。

### 3.4 時序量測邏輯控制

為了達到時序量測且有效隔絕各電路間串擾問題，本論文使用 Fujitsu 公司生產的 FTR-B4CA4.5Z 雙軸雙切繼電器，具有非常低的導通電阻，在斷路時也有 1000 MΩ 以上之絕緣特性，將其連接在 ITO 感測晶片各接腳與電路之間，並使用微控制器控制繼電器的開關，來達到三種電路的依序量測，由於一種電路運作的同時，其餘兩種電路被繼電器斷開，故不會對正在進行量測的電路造成等效電路的干擾，繼電器具有極低之導通電阻，且機械式結構能夠完全斷開兩接點，以達良好的電性隔絕，感測晶片與電路的連接如圖 3-4 所示。繼電器電路以穩壓器提供 5V 電壓至繼電器線圈一端，另一端則串聯 BJT 集極端，射極端接地，基極端串聯 2kΩ 限流電阻後連接微控制器的 I/O 腳位，以控制器操控繼電器的開關。由於繼電器為電感型負載，當施加與關閉電源造成瞬間電流改變時，因電磁感應會產生感應電動勢，

當微控制器控制電晶體關閉時，繼電器線圈在電流消失瞬間產生的反電動勢有可能損壞電晶體元件，故在繼電器線圈兩端反向並聯一個二極體，提供反電動勢一個路徑來消耗能量，避免對電晶體造成傷害，增加系統穩定度。

利用微控制器的三個 I/O 端當作控制腳位，進行各電路啟動與關閉的控制，再用三個 I/O 端作為輸入腳位，讀取各電路輸出電壓值，並利用 Arduino 開發環境撰寫程式以控制量測程序邏輯。在量測程序開始之前先將所有控制腳位設定為低電位，之後便依序將一個控制腳位設定為高電位，使該電路開始運作，並在電路運作期間從輸入腳位讀取數筆電壓值取平均，取樣頻率設定為 20 Hz，量測時間為 1 秒，資料讀取完畢後將控制接腳設定回低電位，依此類推依序完成三種電路的量測。

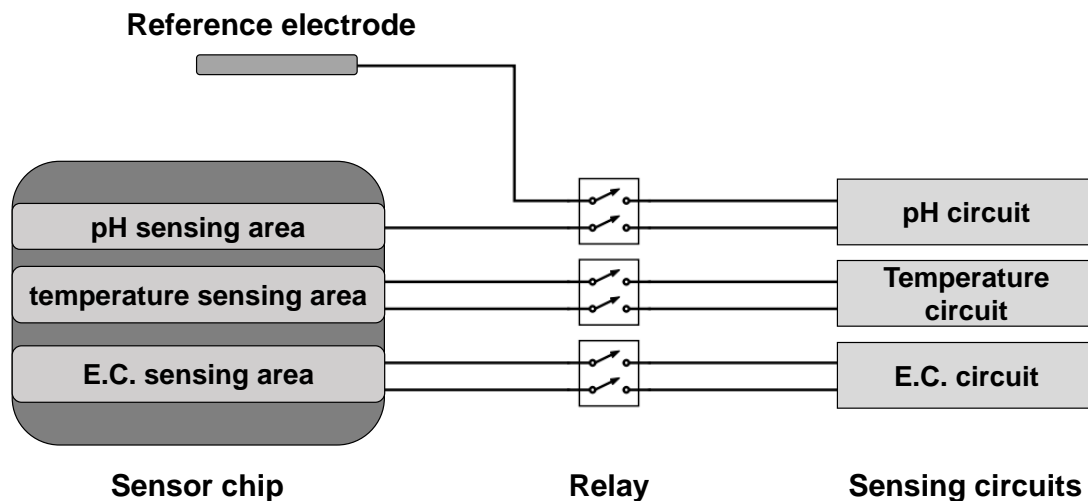


圖 3-4 晶片與感測電路連接示意圖。使用 DPDT 繼電器作為電路與感測晶片的橋接，利用繼電器的切換使在進行 pH 值、溫度與電導度量測時不會發生串擾。

## 3.5 資料處理與藍牙傳輸

### 3.5.1 資料儲存與顯示

系統結束時序量測的循環，並進行資料處理後，可直接利用市售 I<sup>2</sup>C 通訊協定之 LCD 顯示器進行即時顯示，隨後即進入資料儲存與傳輸階段，此階段將晶片量測之 pH 值、溫度與電導度存入 Arduino 內建 EEPROM 內，以位元組為儲存單位，

本論文所使用之 ATmega328 晶片，其 EEPROM 大小為 1024 個位元組。為了將儲存空間達到最大化利用，我們將包含一位小數點之 pH 輸出值用一個位元組儲存，將一個位元組的八個位元分成一半，包含最高有效位(Most significant bit, MSB)的四個位元用來儲存 pH 值整數值，其表示值可以涵蓋 0 至  $15(2^4-1)$ ，對本系統之量測範圍已足夠，而包含最低有效位(Least significant bit, LSB)的四個位元則用來表示一位小數點，例如一個位元組資料為 0101 0011，則表示 pH 值為 5.3。溫度與電導度則各使用兩個位元組來儲存，第一個位元組表示整數值(表示值涵蓋 0 至 255)，第二個位元組表示兩位數小數值，例如 00011010 01000111 表示溫度值 26.71°C，而 00001111 00100110 表示電導度值 15.38 mS/cm。三種數值總共花費五個位元組來儲存，時間的儲存部分，使用 Unix 時間格式，即從 1970 年一月一日零時零分零秒開始至今所過的秒數作為儲存結構，共花費四個位元組完成儲存，量測一次所增加的總資料儲存量為九個位元組。

由於 ATmega328 微處理晶片擁有 1024 位元組的 EEPROM 儲存空間，本研究利用 EEPROM 最前面的兩個位元組(位址 0 與位址 1)來記錄目前記憶體使用到哪個位址，兩個位元組所能表示的十進位數可以從 0 至  $65535(2^{16}-1)$ ，對於擁有 1024 個位址的 EEPROM 來說已足夠，而扣掉頭兩個記憶體位址，從位址 2 至位址 1023 共有 1022 個位址可用來做資料儲存，而一筆資料耗費 9 個位元組，故從位址 2 到位址 1023 共可儲存 113 筆資料。EEPROM 未被使用過的預設值通常為 11111111(十進位為 255)，而作為記憶目前儲存進度的最前面兩個位址而言，其所表示的二進位值最小為 00000000 00000010(十進位為 2)，最大為 00000011 11111111(十進位為 1023)，位址 0 的記憶體在正常使用狀況下永遠不可能為 11111111，因此程式可藉由讀取位址 0 的十進位值是否為 255 來判定 EEPROM 是否還沒被使用過。

圖 3-5 為資料儲存示意圖，資料目前儲存至位址 622，而 622 的二進位表示為 00000010 01101110，位址 0 儲存 00000010(十進位為 2)，位址 1 儲存 01101110(十進位為 110)，如此一來每當有新的資料需要儲存，程式會先讀取位址 0 與 1 的數值，找到目前資料儲存到的位址，並將新的資料從該位址的下一個位址開始儲存。



圖 3-5 資料儲存在 EEPROM 內示意圖。位址 0 與 1 負責記錄目前資料儲存到的位址，一筆完整循環量測的資料量為 9 個位元組。

### 3.5.2 與遠端裝置軟體之溝通

本研究使用 Android Studio 作為軟體開發環境，以 ASUS ZenFone 3 智慧型手機為開發平台，利用物件導向程式語言 JAVA 自行設計撰寫 App，主程式架構分為藍牙連線、資料傳輸、資料庫儲存，以及使用者介面呈現四部分。

#### A. 藍牙連線

使用 Android 藍牙開發相關類別(Class)包內的 BluetoothAdapter 類別，進行手機裝置是否支援藍牙連線的判斷，搜尋已配對之藍牙裝置，在確認連線裝置後即可建立一個執行緒(Thread)，利用 InputStream 與 OutputStream 類別來建立兩裝置的資料發送與接收功能，即完成兩裝置的藍牙連線初始化，可以開始資料的傳輸。

#### B. 資料傳輸

程式在執行緒裡傳送特定請求字元至感測電路，待藍牙模組接收到訊號後，Arduino 則將內建 EEPROM 儲存的資料以字串形式逐筆傳送給手機，並清空 EEPROM 內部資料。若在 App 與感測電路連線期間有進行量測，則新的資料會直接傳送至手機端，並同時在 App 中顯示量測結果，也同時將該筆資料存入資料庫。

#### C. 資料庫儲存

手機端利用 Android 內建的 SQLite 資料庫，使用 SQL 語法，將 Arduino 傳送過來的資料逐筆新增至資料庫中。資料庫的相關處理獨立定義成一個類別，負責資

料庫表格的產生、資料儲存以及從資料庫中讀取資料等功能。App 在藍牙連線成立後所接收的資料，會以一組 pH 值、溫度、電導度及時間為單位，利用 SQL 語法逐筆存入資料庫表格中，當使用者欲查看過往紀錄時，再將資料讀出。

#### D. 使用者介面

圖 3-6 為手機 App 介面，其中上半部左側包含了 pH 值、溫度及電導度的按鈕，右側則是即時顯示窗格，下半部則為圖表輸出。當 App 與感測電路連線期間，感測電路會先將 EEPROM 內資料傳送至 App，進而儲存至手機資料庫中，而感測電路若在藍牙連線期間進行時序量測，則在量測完當下即會把資料傳送至 App，並在顯示窗格中顯示量測數值，若使用者想以圖表方式即時觀看數值變化，則可以點選上半部左側的按鈕以選擇欲觀看 pH 值、溫度或電導度的動態量測圖表。而使用者在未進行量測時想查看目前所儲存之資料，則可分別長按三個按鈕，使輸出圖表轉變為該數值之長時間量測趨勢圖，本研究圖表繪製係使用 AChartEngine 繪圖工具庫的 TimeSeries 類別來進行視覺化呈現。

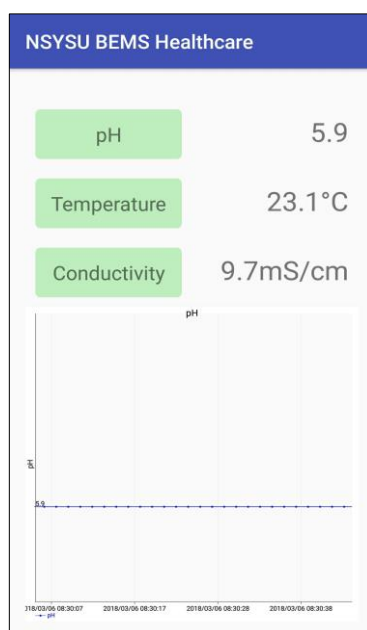


圖 3-6 手機 App 使用者介面。介面上半部左側為使用者操作按鈕，可利用按鈕進行圖表的動態曲線圖觀看與長時間趨勢觀察，右側則為即時顯示窗格。介面下半部為數據圖表顯示位置。

## 第四章 系統整合與量測結果

### 4.1 ITO 晶片量測

實際將感測電路連接 ITO 感測晶片，以韌體控制繼電器作動切換量測模式，分別進行 pH 值、溫度以及電導度的單一參數量測，由結果可得知在進行單獨參數量測時，輸出訊號穩定，結果如圖 4-1 所示。pH 值量測時將電路切換為 pH 量測模式，只讓 ITO 薄膜之 pH 量測腳位及參考電極與感測電路導通，ITO 薄膜之溫度感測區還有電導度感測區與感測電路處於斷路。本研究使用 1M 氫氧化鉀 (Potassium hydroxide, KOH)、1M 鹽酸(Hydrochloric acid, HCl)及去離子水，搭配市售玻璃電極酸鹼度計(Horiba F-71AS)調配出 pH 4、pH 6、pH 8、pH 10 的緩衝溶液，感測電路(圖 3-1)之電流電壓轉換器回授電阻  $R_1$  選擇 150  $\Omega$ ，反向放大器電阻  $R_2$  及  $R_f$  選用 20 k $\Omega$  將放大倍率設定為 1 倍，將 ITO 晶片依序放入四杯緩衝液中，觀察輸出電壓，靈敏度達 53.1 mV/pH， $R^2 = 0.9958$ ，可有效分辨不同酸鹼值之溶液。

溫度量測係將感測電路調整為溫度量測模式，只讓 ITO 晶片之溫度電阻與電路連通，浸入裝滿去離子水之燒杯中，以加熱板進行隔水加熱，並使用熱電偶溫度計(DER EE DE-3003 K-type)記錄溫度，從 15°C 量測至 50°C，儀表放大器倍率調整電阻(圖 3-2 之  $R_G$ )選用 125  $\Omega$ ，可測得靈敏度為 48.2 mV/°C， $R^2 = 0.9964$ 。

電導度感測使用 ITO 晶片之兩根感測電極與電路連通進行量測，搭配市售桌上型電導度計(Horiba DS-71AS)，利用去離子水與氯化鈉(NaCl)調配出多杯不同電導度範圍之溶液，再將 ITO 晶片浸入液體中觀察輸出電壓變化，電導度電路(圖 3-3)之負回授放大器回授電阻  $R_7$  選用 20 k $\Omega$ 。電導度量測乃測量溶液中離子多寡所造成的溶液交流阻值變化，本研究以電流電壓轉換器將電流變化轉為電壓輸出，而溶液阻值變化，會造成電流電壓轉換器的電壓放大倍率改變，利用此架構進行電導度的量測，其輸出電壓會與電導度的關係呈現一個二次多項式曲線[47]，而由實驗測得之溶液電導度對應輸出電壓曲線，也可利用二次多項式趨勢線擬合，求得  $R^2 = 0.9914$ ，並選用該二次多項式作為程式中的電壓與量測數值轉換公式。另酸鹼度與

電導度皆為溫度的函數，由前人研究當中可得知 ITO 薄膜的 pH 值量測對於溫度的影響甚小，故在本研究中將溫度對於 pH 值的影響忽略[13]。而溶液中離子濃度會隨著溫度而改變，不同的離子物質對於溫度變化造成的電導度改變具有不同程度的影響，因此在清楚知道離子物質的應用場合時，溫度校正補償較為容易，若在較複雜的溶液量測環境中，電導度受溫度的影響甚至可從 1.5%/°C 至 7.5%/°C 不等 [48]，因此本研究先行忽略溫度對於電導度造成的影響，降低量測複雜度。

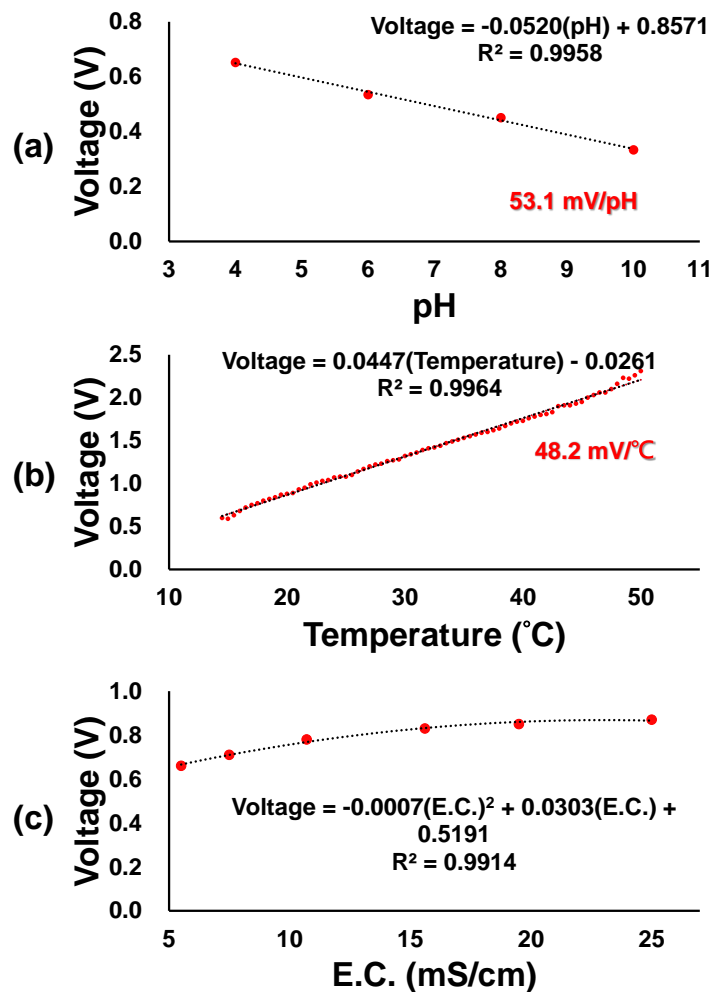


圖 4-1 ITO 晶片酸鹼度、溫度及電導度量測曲線。(a)為 pH 值量測，(b)為溫度量測，(c)為電導度量測。

對 pH 值、溫度以及電導度進行單一參數量測，取得檢量線後，本研究接續進行時序性切換量測實驗，完成一次性循環量測並同時取得三參數數值，實驗中以微處理器控制繼電器的切換，使電路分別進入電導度量測模式、pH 值量測模式及溫



度量測模式，利用程式設定每個模式從開啟至關閉共三秒鐘(每個模式量測三秒)，任兩模式切換中間停留一秒，以方便觀察電路切換時三種量測數值輸出電壓的變化情形，總共循環量測十次。pH 值、溫度及電導度輸出電壓的持續監控使用另一組 Arduino 模組當作多通道之類比數位轉換器以同時接收三種電壓數值，在韌體中設定取樣頻率為 5 Hz，並將循環量測結果繪製成圖 4-2。

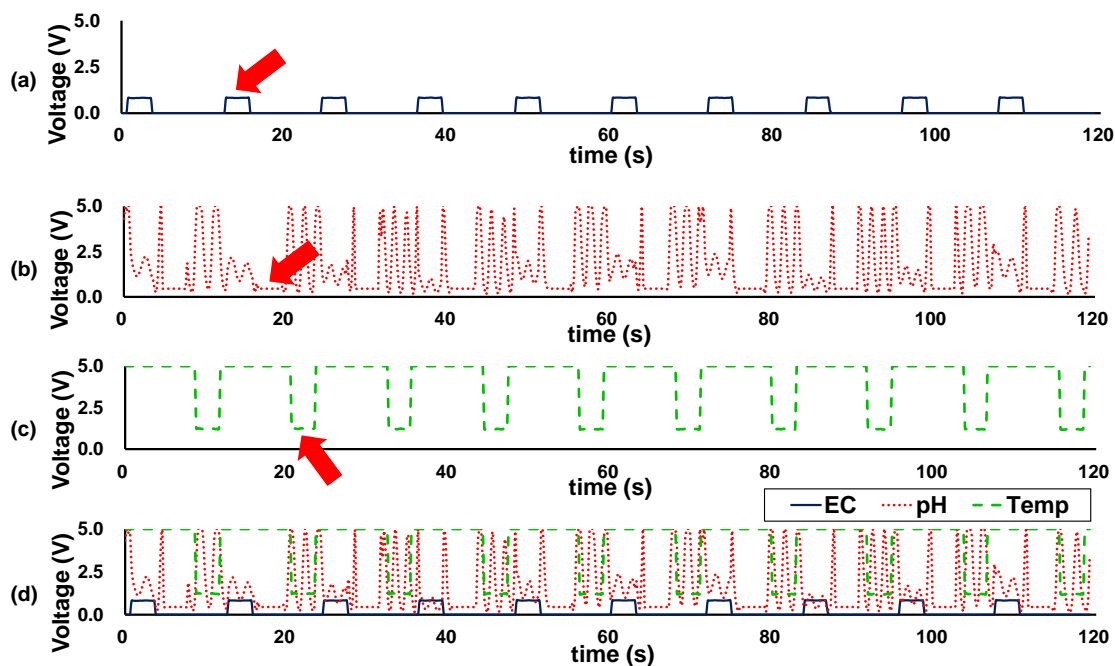


圖 4-2 ITO 晶片時序量測結果圖。(a)至(c)依序為電導度、pH 值及溫度輸出電壓隨著量測模式開關的電壓變化，(d)則在同一時間軸之下觀察三種模式切換量測的輸出電壓。

實驗調配液體之電導度為 15.4 mS/cm，酸鹼值為 pH 8.1，溫度為 27.5 °C，而圖中(a)部分至(c)部分為電導度、pH 值與溫度之輸出電壓量測，由(a)可發現電導度模式開啟下，輸出電壓確實反映溶液之電導度值。當電導度模式關閉後，由於電導度量測係使用負回授放大器架構，當繼電器與電路斷開時，圖 3-3 中的  $R_x$  電阻值相當於無限大，故該負回授放大器之輸出電壓為零。(b)部分則為 pH 值輸出電壓曲線，當 pH 模式開啟下，ITO 感測晶片與 MOSFET 開極連通，參考電極電位為 3 V，此時 EGFET 量測架構成立，ITO 晶片與溶液中氫離子進行反應，故電壓維持

在一固定值，而關閉量測後，此時 MOSFET 閘極與 ITO 斷開，閘極等同於浮接狀態，因此將 MOSFET 源極電流經過電流電壓轉換後之電路輸出電壓也會呈現浮接狀態之跳動，等待下一次 pH 模式開啟後，電壓隨即穩定在相同數值，而在未量測 pH 值時的閘極浮接跳動，在 4.3 節會進行討論並說明。溫度切換量測結果則在圖 4-2(c)部分可看出，當溫度模式關閉時輸出電壓處在 5 V，這是因為溫度採用韋恩電橋架構，而最終輸出電壓大小則根據電橋兩端之電壓差並加以放大而得，故在未量測溫度時，圖 3-2 中之  $R_x$  等同於斷路，儀表放大器之  $V_+$  輸入端接收電壓幾乎等同於供給電壓的 3 V，此時  $V_+$  與  $V_-$  之電壓差已超過 ITO 溫度感測時會遇到的範圍，故經放大後輸出電壓在 5 V 以上，並被穩壓二極體限制在 5 V，當開啟溫度模式後，輸出電壓便回復至正常量測範圍。

圖 4-2(d)則為(a)至(c)的結合圖，可利用圖中箭頭來觀察時序切換量測的電壓輸出，以及量測模式切換時電壓的變化過程。圖 4-3 為圖 4-2 時序量測第一個循環的放大檢視，可觀察到在 5 Hz 的取樣頻率下，當控制電導度、pH 值及溫度電路的繼電器導通的瞬間，輸出電壓在下一個取樣點即上升至穩定值，可得知晶片電導度及 pH 值響應在 0.2 秒內即達穩定輸出，由於溫度電阻之熱平衡是在接觸溶液後即開始進行，故在此量測架構與設定下，可得知溫度感測在經過了量測電導度與 pH 值的時間(此實驗下為 8 秒)後，即已達到穩定，故進行溫度量測取樣時便可讀取正確數值。針對晶片感測反應速度的量測會在 4.3.3 節進行詳細的討論。

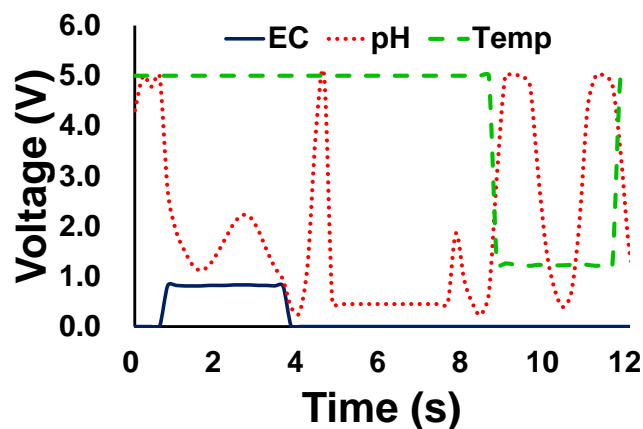


圖 4-3 ITO 晶片時序量測之放大檢視圖。在取樣頻率為 5 Hz 情況下，可觀察到電導度、pH 值及溫度感測電路從導通至穩定輸出的時間，皆在 0.2 秒以內達成。

## 4.2 商業化考量之感測晶片模組量測

利用感測晶片模組進行與上節同樣的實驗，如圖 4-4 所示，pH 感測電路反向放大器(圖 3-1)的回授電阻  $R_f$  改為 43 k $\Omega$  以提升輸出靈敏度，其 pH 量測靈敏度達 111.2 mV/pH，線性回歸求得  $R^2 = 0.9902$ 。市售 NTC 熱敏電阻由於本身靈敏度較高，故將溫度感測電路(圖 3-2)的  $R_G$  設定為 43 k $\Omega$  減低放大倍率，從量測結果靈敏度為 60.2 mV/ $^{\circ}\text{C}$ ， $R^2 = 0.9994$ 。電導度使用商用電路板做成的電極進行測試，而電路板電極之電極常數與 ITO 晶片不同，故調整感測電路之電流轉電壓電路(圖 3-3)的回授電阻  $R_7$  為 3 k $\Omega$ ，量測結果同樣以二次多項式曲線進行擬合，求得  $R^2 = 0.9989$ 。

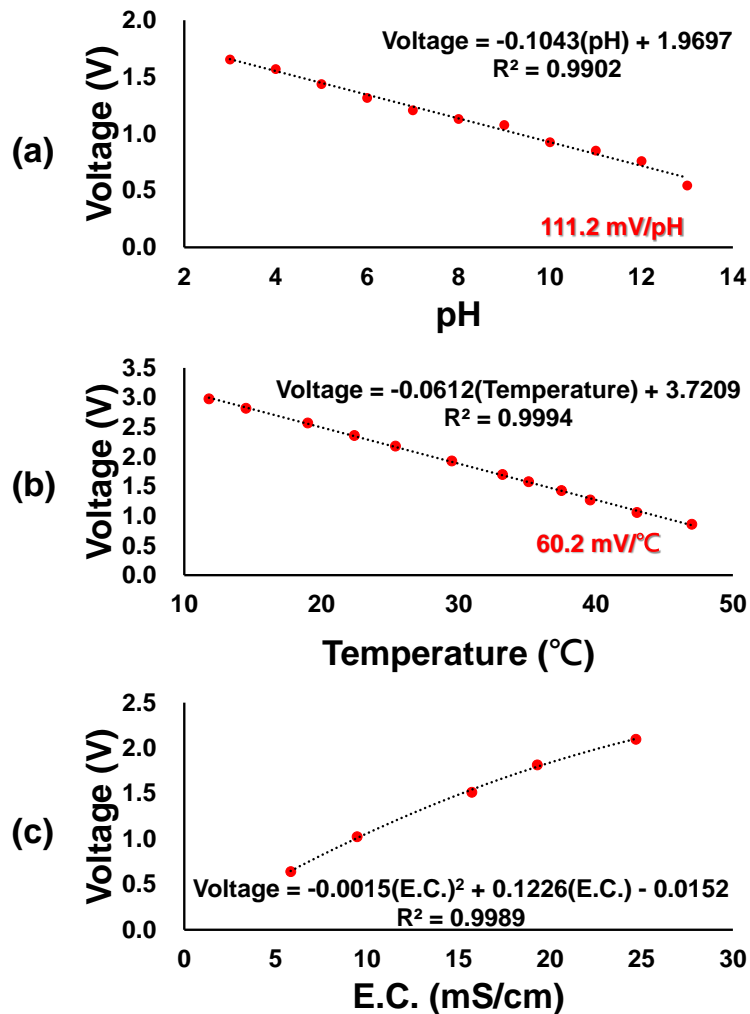


圖 4-4 新型感測晶片模組酸鹼度、溫度及電導度量測曲線。(a)為 pH 值量測，(b)為溫度量測，(c)為電導度量測。

時序量測同樣為電導度模式、pH 模式與溫度模式進行循環量測，每個模式量測三秒，任兩模式之間停頓一秒，量測結果如圖 4-5。此實驗調配電導度為 4.9 mS/cm，pH 7.0，溫度 26.0°C 之溶液進行時序測量，圖中的(a)至(c)部分分別為電導度、pH 值與溫度，從(d)的時序量測圖分解而得，可看出單一參數在進行量測時與不斷切換的狀態下，輸出平穩，在上一節中討論之 pH 量測模式未啟動下閘極浮接電壓跳動在此被消除，4.3 節會進行電路優化說明。由(d)可觀察不同參數的循環量測彼此不重疊，故可在不發生串擾下進行多參數的量測。圖 4-6 則在 5 Hz 的取樣頻率下觀察各參數輸出電壓在繼電器導通後的下一個取樣點即上升至穩定值，故可得知晶片電導度及 pH 值響應在 0.2 秒內即可達到穩定輸出，而由於溫度電阻之熱平衡是在接觸溶液後即開始進行，故在此量測架構與設定下，在進行溫度感測數值取樣之前已過了 8 秒，大於該熱敏電阻的規格表中提到之反應速度為 5 秒之內。

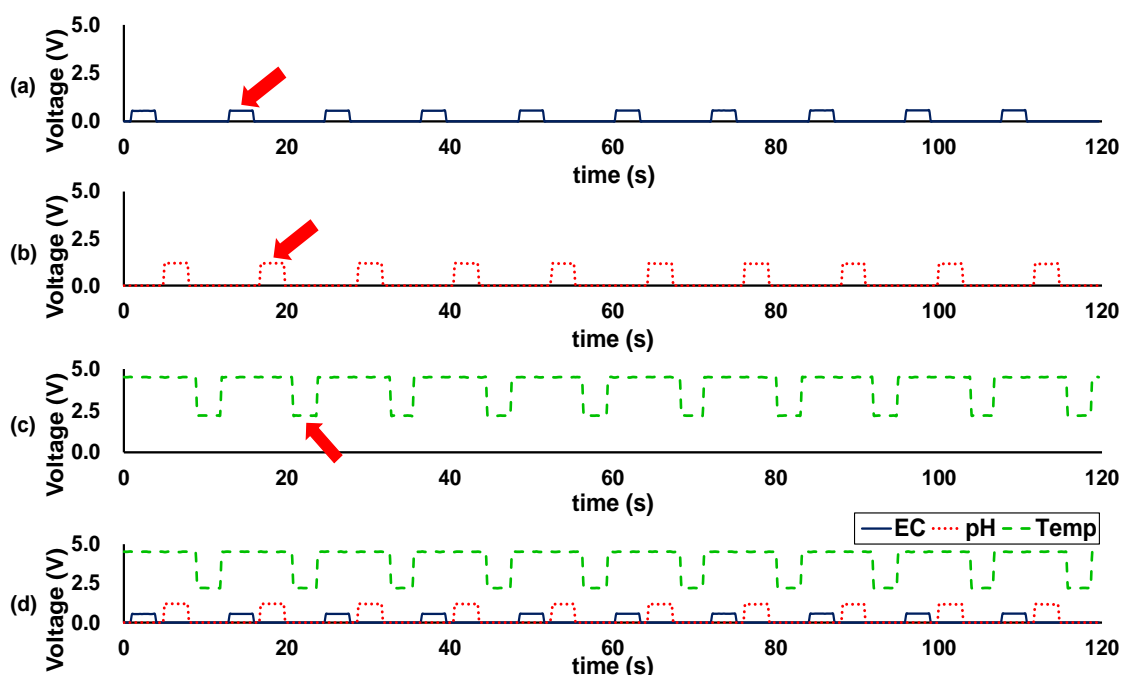


圖 4-5 新型感測晶片模組時序量測結果圖。圖(a)至(c)依序為電導度、pH 值及溫度輸出電壓隨著量測模式開關的電壓變化，圖(d)則在同一時間軸之下觀察三種模式切換量測的輸出電壓。

由於此架構之感測晶片模組，ITO 晶片與連接板具有較良好之電性接觸，也具有固定 ITO 薄膜防止彎折之功能，防水處理也更為直覺與容易，不需在 ITO 膜上塗佈防水膠料，因此便利性與實用性大幅提升，故後續的電路系統特性量測皆以此架構進行實驗。

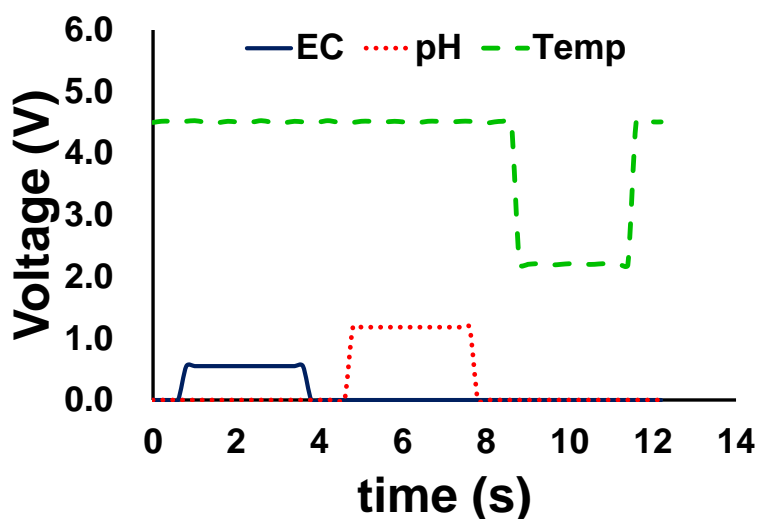


圖 4-6 新型感測晶片模組時序量測之放大檢視圖。

## 4.3 系統軟硬體架構與量測

### 4.3.1 感測電路硬體架構

圖 4-7 為感測系統架構總圖，圖 4-7(a)部分包含了酸鹼值、溫度及電導度感測電路，而感測電路與晶片的連接皆先經過圖 4-7(b)部分的三顆雙軸雙切繼電器，繼電器的供電使用穩壓器來創造繼電器所需之感應線圈啟動電壓，並串聯一顆電晶體作為開關，利用 Arduino 模組控制電晶體的開關進而使繼電器作動。第一顆繼電器負責 EGFET 架構之電晶體閘極與晶片之連接，閘極接在繼電器之共接點 (Common, COM)，而晶片的 pH 感測腳位則連接在常開(Normally open, NO)接點，而 4.1 節所描述之在 pH 模式關閉下，電晶體閘極浮接造成的輸出電壓跳動，可藉由將繼電器的常關(Normally close, NC)接點進行接地，如此一來在 pH 模式關閉時，電晶體閘極端不與感測晶片連接而是直接接地，使電晶體通道電流完全關閉，消除

輸出電壓不必要之跳動。參考電極所需電壓連接在同顆繼電器之另一組 COM 端點，而另組 NO 接點則實際連接銀/氯化銀電極。其餘兩顆繼電器分別負責溫度電路與晶片溫度量測腳位，以及電導度電路與晶片電導度量測腳位的開關。

圖 4-7(c)為感測電路與感測晶片連接之處，在電路中預留六腳位 FFC 連接插槽與六腳位排針的焊接點以方便電路與晶片連接進行量測及連接跳線測試等用途。圖 4-7(d)為電路的電源處理部分，負責從正負電源至供應電路所需之電壓處理，電源端使用穩壓 IC 進行一級穩壓提供正負 12 V 給類比感測電路所有放大器 IC 使用，而數位電路(Arduino 模組及其連接之藍牙模組與 LCD 顯示器)所需之正 12 V 則從電源端再使用一組穩壓 IC 穩出，將類比電路與數位電路之供電利用穩壓 IC 從電源端來做區隔。pH 感測電路 MOSFET 源極之 9 V 電壓由電源端使用一級穩壓穩出，而參考電極由於直接與感測晶片一起進行溶液氫離子吸附鍵結反應，其電位穩定性需求相對較高，故使用二級穩壓處理，從 9 V 再穩壓至 3 V 並串聯一電感輸出，降低交流雜訊。溫度惠斯同電橋則同樣使用二級穩壓後未串聯電感之 3 V 輸出作為量測供電。電導度量測所用電源為韋恩電橋振盪產生之正弦波，而振盪所使用之放大器 IC 則是利用一級穩壓後之正負 12 V 電壓來驅動。

圖 4-4(e)為數位電路，核心為 Arduino 模組，提供正 12 V 驅動，負責施加控制訊號以開關繼電器達成時序測量，再利用內建 ADC 接收三種感測電路之輸出電壓並進行訊號處理，再將數值以 LCD 顯示器或藍牙模組發出。LCD 顯示器及藍牙模組的供電係直接使用 Arduino 模組內部穩壓之 5 V 電源腳位輸出，故類比電路與數位電路的供電確實從電源端由兩顆穩壓 IC 來做區隔。

圖 4-7(f)則為電路總電源供給端，可利用中央抽頭變壓器從市電轉換成 12 V-0 V-12 V 交流電，再提供給本電路，電路中會進行橋式全波整流，再以數個電解電容器進行濾波以產生正負 12 V 直流電，而此電路也能直接施加正負 15 V 直流電當作供電使用(此時橋式整流器之二極體並無作用，單純消耗功率，當施加直流電源時也可選擇性將橋式整流器從電路中拿掉)。

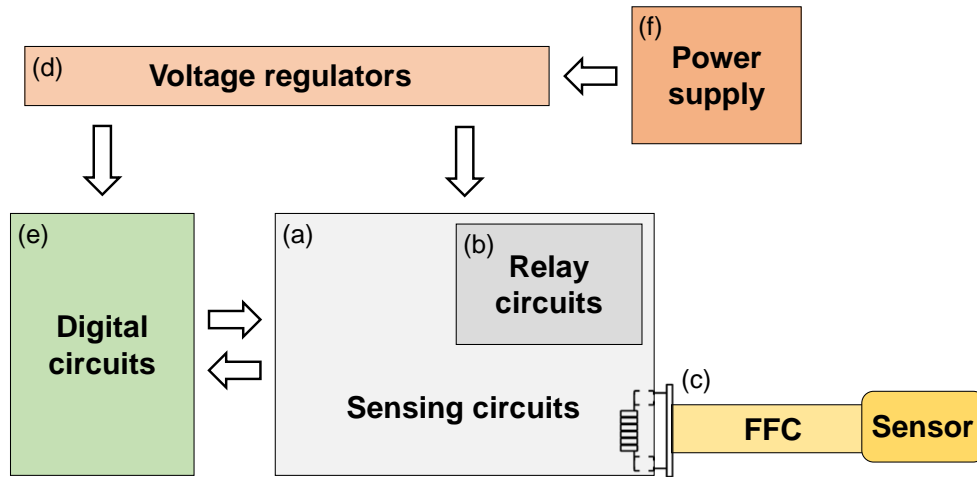


圖 4-7 感測電路總架構圖。(a)pH 值、溫度與電導度感測電路，(b)繼電器切換電路，解決三參數量測的干擾問題，(c)電路以 FFC 連接插槽與晶片連接，(d)電源穩壓處理，提供給數位電路及感測電路使用，(e)以 Arduino 模組為核心，並含有 LCD 顯示器及藍牙模組，(f)電路總電源處理，包含橋式整流與濾波電路。

### 4.3.2 系統電源品質測試

本研究比較經過電源處理前後之漣波大小差異，使用 12 V-0 V-12 V 變壓器提供之交流電經過整流穩壓電路後，利用示波器(Tektronix TBS 1102B-EDU)的交流耦合(AC coupling)模式可觀察到正電源的峰對峰值電壓超過 250 mV，在經過 12 V 一級穩壓(使用 LM7812 穩壓器，輸入、輸出電容分別使用 100  $\mu$ F 與 10  $\mu$ F 電解電容)處理後可成功將漣波峰對峰電壓減少至 10 mV；負電源同樣在經過整流濾波後，峰對峰值電壓為 80 mV，在經過-12 V 一級穩壓(使用 LM7912 穩壓器，輸入、輸出電容分別使用 100  $\mu$ F 與 10  $\mu$ F 電解電容)處理後也下降至 10 mV，如圖 4-8。

EGFET 架構使用商用多通道 MOSFET 並聯進行實驗[13, 49, 50]，本研究選用 HEF4007 電晶體，源極電壓施加 9 V，參考電極電位選擇使用 3 V 進行量測。由於參考電極電位為能斯特方程式中之參考電位項，故穩定性相當重要，本研究利用二級穩壓(使用 LM317 穩壓器，輸入、輸出電容分別使用 0.1  $\mu$ F 與 1  $\mu$ F 陶瓷電容)產生 3 V 電壓並串聯一電感輸出，以示波器觀察交流雜訊峰對峰值電壓下降至 6 mV。源極電壓則使用一級穩壓(使用 AS7809 穩壓器，輸入、輸出電容分別使用 100  $\mu$ F

與 10  $\mu\text{F}$  電解電容)提供 9 V 給電晶體運作，本研究將參考電極之 3 V 直接連接至電晶體閘極端，經過電流-電壓轉換電路後的輸出電壓交流雜訊為 10 mV，等同於在輸出端有  $\pm 5$  mV 的雜訊波動，結果如圖 4-9 所示。從 4.2 節所量測之晶片 pH 靈敏度 111.2 mV/pH 可得知，5 mV 的波動相當於 pH 0.04 的變動，因此本電路可將 pH 值輸出解析度控制在 pH 0.1 以內。

溫度電路使用惠斯同電橋進行量測，電源供給同樣使用二級穩壓之 3 V，而連接感測晶片處使用 5 k $\Omega$  電阻替代，儀表放大器放大電阻(圖 3-2 之  $R_G$ )選用 43 k $\Omega$  電阻(放大倍率約 2.2 倍)，測試在固定電阻值下輸出電壓的穩定性，而由儀表放大器輸出端量測到的交流雜訊峰對峰值為 6 mV，等同於在溫度電路輸出端有  $\pm 3$  mV 的雜訊波動，如圖 4-10，由溫度感測靈敏度 60.2 mV/ $^{\circ}\text{C}$  可得知溫度感測電路的輸出浮動值為 0.05 $^{\circ}\text{C}$ ，因此溫度解析度也可控制在 0.1 $^{\circ}\text{C}$  以內。

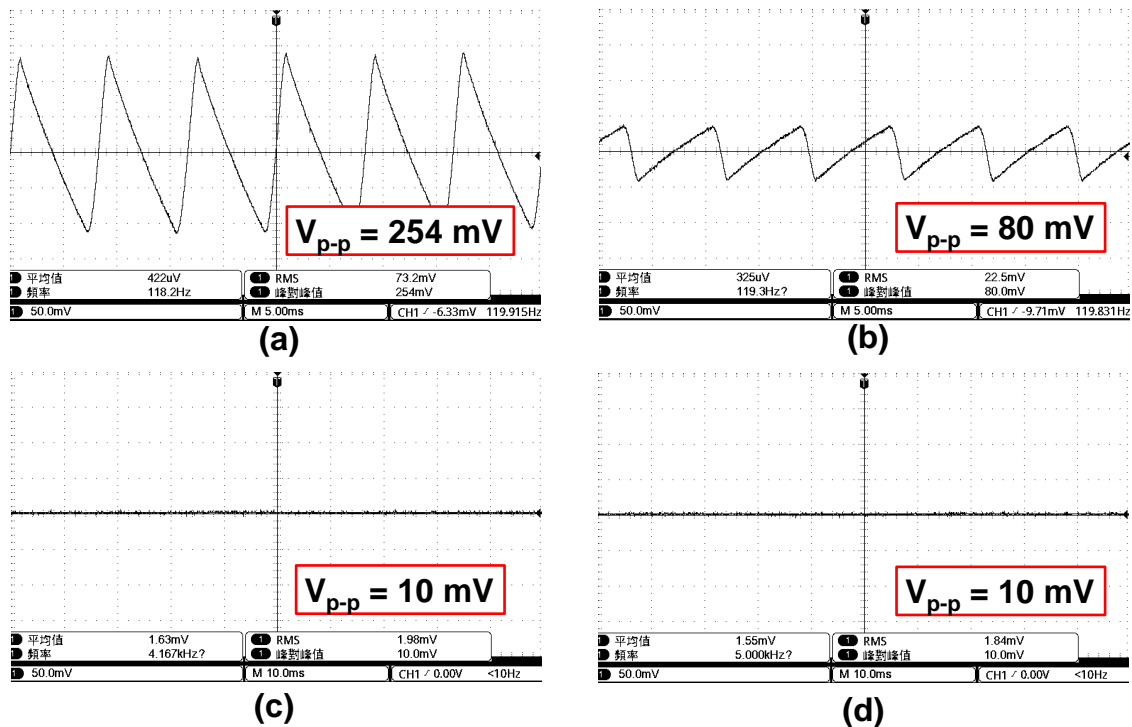


圖 4-8 系統電源穩壓前後之比較圖。(a)、(b)分別為變壓器經過橋式整流並濾波後之正負電源波形，(c)、(d)分別為正負電源經過穩壓處理後所得波形。



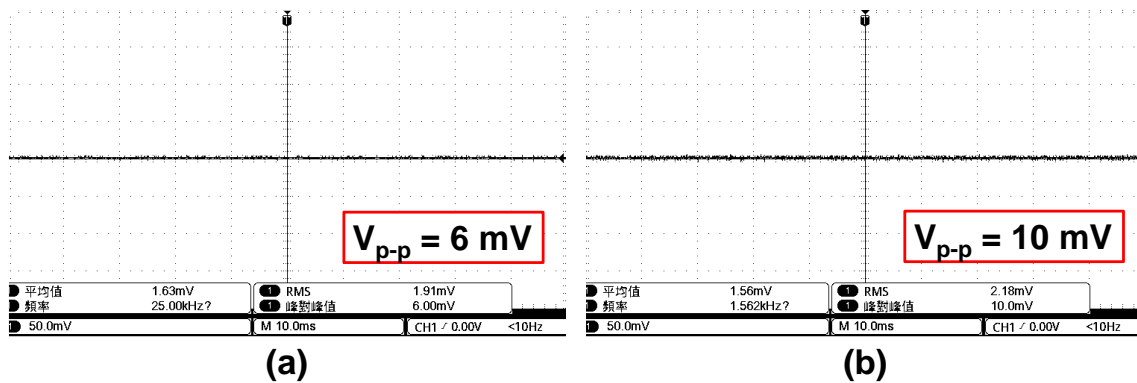


圖 4-9 參考電極與 pH 感測電路輸出之交流雜訊測試。(a)為經二級穩壓處理之參考電極電位，峰對峰值下降至 6 mV，(b)為參考電極電壓與電晶體閘極端連接，並觀察源極電流經過電流轉電壓電路後輸出電壓之交流雜訊，其峰對峰值為 10 mV。

電導度量測電路由韋恩電橋振盪器、負回授放大器與精密全波整流濾波電路組成，本研究分別針對各電路產生之電訊號進行測試，首先由振盪器產生的正弦波，利用電阻分壓將振幅峰對峰值調整為 2.0 V 後用示波器觀察振盪頻率及波形完整性。而本研究利用 2 kΩ 電阻取代感測晶片進行電導度電路輸出電壓測量，負回授放大器之回授電阻(圖 3-3 之 R<sub>7</sub>)選擇 3 kΩ 電阻，使振盪電路之正弦波被放大 1.5 倍，用示波器觀察負回授放大器輸出端，可由圖 4-11 得知正弦波之方均根(Root mean square, RMS)電壓確實得到 1.5 倍之放大，輸出之正弦訊號再來經過精密全波整流電路將之由交流訊號轉為直流輸出以方便後端設備接收及量測，並使用電容(圖 3-3 之 C<sub>3</sub>)進行濾波，可發現輸出訊號成功整為直流訊號，而濾波電容使用兩顆積層陶瓷電容(Multi-layer ceramic capacitor, MLCC)分別為 33 nF 與 0.1 μF，在示波器的交流耦合模式下，輸出訊號僅有 10 mV 的峰對峰值交流訊號，等同±5 mV 浮動，成功將交流訊號轉換為直流訊號。將 4.2 節之電導度二次多項式曲線的頭尾兩個資料點取直線計算出斜率，概略計算出電導度感測靈敏度為 77.1 mV/(mS/cm)，與輸出交流雜訊作分析後可得到電路之電導度量測輸出浮動值為 0.06 mS/cm，小於本研究所要求之 0.1 mS/cm 解析度。

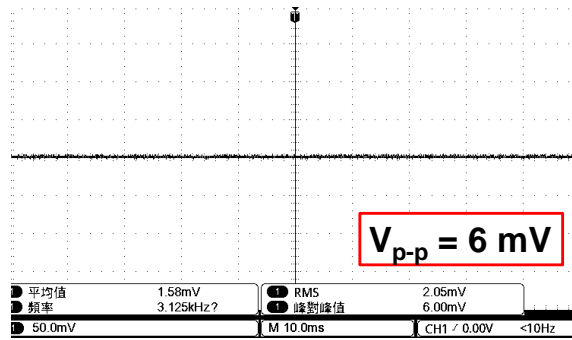


圖 4-10 溫度惠斯同電橋電路輸出電壓交流雜訊測試。將連接感測晶片處以 5 kΩ 電阻取代，放大倍率設定為 2.2 倍，觀察輸出電壓交流雜訊峰對峰值為 6 mV。

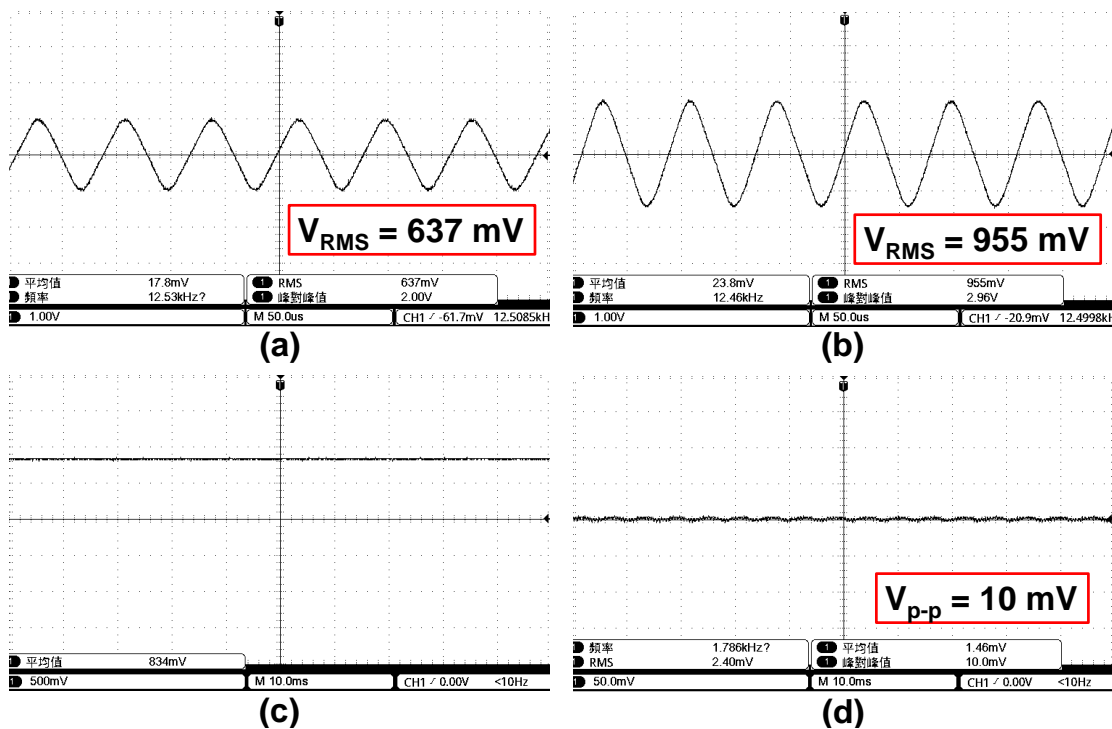


圖 4-11 電導度電路由正弦波振盪器至精密整流濾波電路之輸出波形分析。(a)利用電阻分壓電路將振幅峰對峰值調整為 2.0 V，(b)為經過 1.5 倍負回授放大後之波形，(c)、(d)為經過精密整流濾波電路後的直流與交流耦合分析，峰對峰值為 10 mV。

### 4.3.3 系統響應時間測試

本研究利用感測電路連接晶片，分別測試 pH 值、溫度與電導度量測模式開啟瞬間，各參數的輸出響應時間，並利用桌上型電錶(Agilent 34410A)以 10 ms 時間解析度觀察輸出電壓響應。pH 值響應時間測試係將 ITO 晶片與參考電極泡在隨機

調配出之緩衝溶液(pH 8.9)中，透過電錶紀錄 pH 值量測模式由關閉至開啟的電壓變化。溫度測試為將晶片之溫度感測區浸於以加熱板稍微加熱過後(31.2°C)之自來水中，由電錶紀錄溫度量測模式開啟後輸出電壓達到穩定之時間。電導度測試則以食鹽與自來水調配出電導度為 8.3 mS/cm 之溶液，將晶片浸於其中，觀察模式切換的電壓響應。由圖 4-12 可得知三者的響應時間在遠小於 10 ms 內均可達到穩定電壓輸出，對本研究時序控制的時間尺度而言(4.3.4 節會詳細說明)，可完全忽略在設計流程控制邏輯時，對此響應時間的考量。

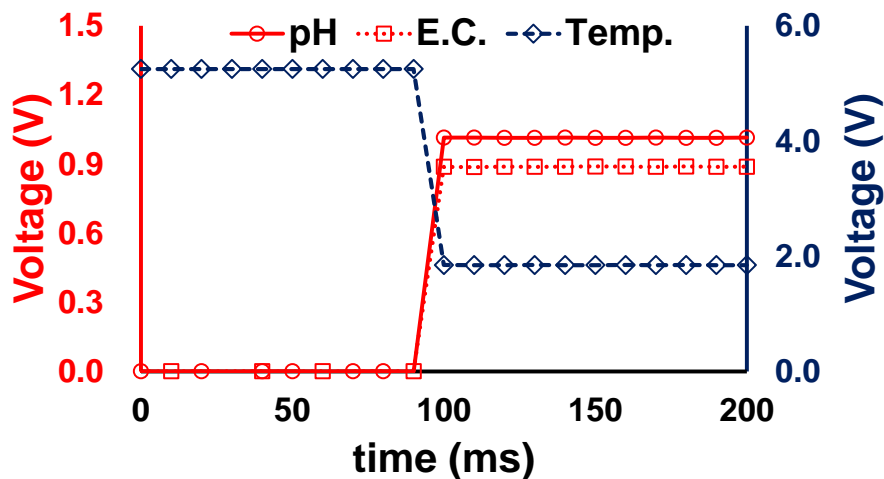


圖 4-12 感測電路在 pH 值、溫度與電導度模式下的輸出響應曲線。使用桌上型電錶以 10 ms 時間解析度進行量測，可得知三參數的響應時間皆遠小於 10 ms。

#### 4.3.4 系統電源容忍度測試

電源抑制比(Power supply rejection ratio, PSRR)為電路系統在面對電源供應電壓的變化時，能維持固定輸出電壓的能力，本實驗以此概念，利用可程式數位電源供應器(Tecpel TPT-3025)提供  $\pm 6\text{ V}$  至  $\pm 18\text{ V}$  的直流電源給感測電路，直接連接感測晶片進行實際測量，觀察輸出電壓隨供應電源的變化。本研究感測電路有進行穩壓設計的部分為提供所有放大器的正負 12 V 穩壓、EGFET 電晶體汲極端 9 V 穩壓、參考電極與溫度感測所使用的 3 V 穩壓，及數位電路使用之 12 V 穩壓，因此刻意使供應電壓低於本研究所設定之操作電壓  $\pm 15\text{ V}$ ，觀察對於輸出數值的影響程

度，如圖 4-13。pH 值電源容忍度測試利用隨機調配出來的緩衝溶液(pH 8.9)，將電路設定為 pH 量測模式後，從  $\pm 18\text{ V}$  開始施加至電路，將感測晶片泡入溶液中以電錶量測輸出電壓，並依序量測  $\pm 17\text{ V}$ 、 $\pm 16\text{ V}$  直至  $\pm 6\text{ V}$ ，由圖 4-13 可觀察到當電壓下降至  $\pm 10\text{ V}$  時，pH 值感測輸出與供電為  $\pm 15\text{ V}$  時的輸出相比，誤差值高於 1%，而到達  $\pm 6\text{ V}$  則對輸出電壓造成嚴重影響。溫度輸出穩定度的測量為將晶片置於室溫( $26.2^\circ\text{C}$ )空氣中，改變供應電源並觀察輸出電壓，由結果得知從  $\pm 18\text{ V}$  至  $\pm 7\text{ V}$  電壓輸出沒有明顯變化，到達  $\pm 6\text{ V}$  則嚴重影響量測結果(誤差值大於 1%)，可得知溫度量測對於供電的敏感度較低，高於  $\pm 7\text{ V}$  即可有誤差值小於 1% 的穩定輸出值。電導度電路的量測使用韋恩電橋振盪器產生固定頻率之正弦波，振幅則根據施加給運算放大器的電壓而改變，因此施加電壓越低，正弦波振幅也越小，造成電導度電極施加於溶液的電壓降低，使輸出電壓跟著下降。由於所有感測電路的放大器供電皆使用正負  $12\text{ V}$  穩壓器提供，因此當電源供給低於  $12\text{ V}$  穩壓器的正常運作範圍時，即會直接影響正弦波之振幅。實驗中利用食鹽與自來水隨機調配出之  $6.6\text{ mS/cm}$  溶液進行測試，由圖可觀察到當電壓下降至  $\pm 13\text{ V}$  時，電導度輸出電壓與供電為  $\pm 15\text{ V}$  時輸出電壓的誤差到達 1% 以上，而直至  $\pm 6\text{ V}$  時量測失效。

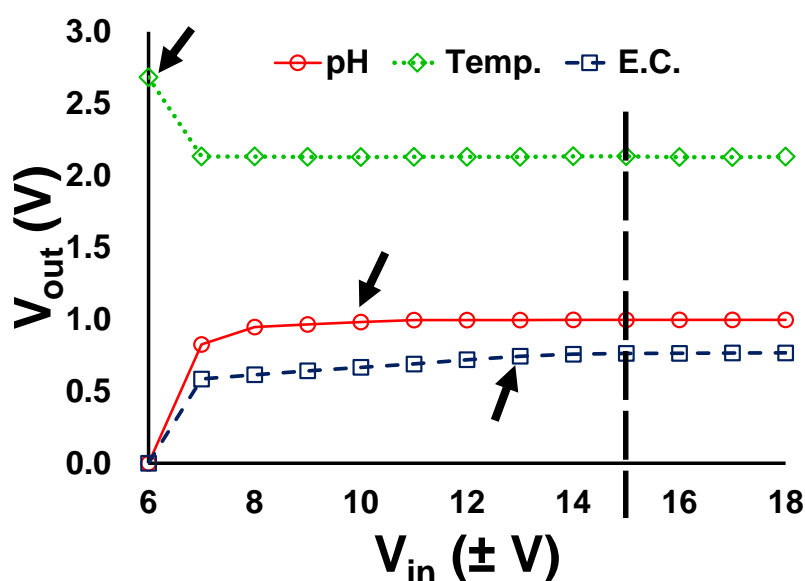


圖 4-13 感測電路之電源容忍度測試。pH、溫度與電導度感測電路的供應電壓分別在  $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 6\text{ V}$  及  $\pm 13\text{ V}$  時，與供電為  $\pm 15\text{ V}$  的輸出電壓之誤差值來到 1% 以上。

### 4.3.5 控制程式邏輯撰寫

本研究利用市售 Arduino Nano 模組，優點為體積小、價格低廉、完整模組化、將底層語言包裝成函式庫，以及廣大開發者社群所擁有的開源程式碼資源，其具有基本 I/O 功能及 ADC，支援 UART、I<sup>2</sup>C 及 SPI 等傳輸協定，不需逐行撰寫底層語言與暫存器溝通，可直接利用官方函式庫讓使用者快速進行實驗開發，大幅提升研發速度。本研究利用 Arduino 作為整體電路量測流程控制以及訊號處理的元件，軟體開發使用官方 IDE 進程式撰寫，量測程式主要分為四個區塊來做說明：

#### A. 初始化設定

首先程式需要初始化與電腦進行資料傳輸的參數，如此便可利用開發環境中的序列埠監控視窗(Serial monitor)，進行與 Arduino 程式的互動，Arduino 與電腦的資料傳輸使用 UART 序列傳輸，而 Nano 模組內建一組具有 USB 轉序列傳輸之序列埠與 USB 接口並接，可連接電腦作資料傳輸使用，一般鮑率(Baud rate)會設定為 9600 bps，而在序列埠監控視窗端也調整為 9600 bps，如此資料便可同步、正確的傳遞。另外程式還需引入所要使用功能之相關函式庫，藍牙模組與 Arduino 的溝通也使用 UART 序列傳輸，因 Arduino Nano 模組內唯一一組硬體序列埠需保留給連接電腦作資料傳輸使用，故引入官方 SoftwareSerial.h 函式庫，定義模組的其中兩隻 I/O 腳位為虛擬序列埠的傳輸腳位 TX 與接收腳位 RX，分別與藍牙模組的 RX 與 TX 相連，利用軟體方法將實體序列埠的功能延伸至其他腳位，並也將鮑率設定為 9600 bps，即完成藍牙模組的初始化。LCD 顯示器採用 I<sup>2</sup>C 通訊協定，引入官方 Wire.h 及非官方 LiquidCrystal\_I2C.h 函式庫提供相關語法使用，一般市售 I<sup>2</sup>C 協定之 LCD 模組的位址預設為 0x27(十六進位制)，初始化該模組時需將此位址當作參數寫入相關初始化函式中。

感測電路所使用的控制腳位數量為三個，分別控制三顆繼電器的開關，由於控制繼電器所需使用的電壓狀態只有高電位與低電位兩種，故選用模組中的三個數位 I/O 腳位(本研究選用 D2、D3 及 D4 腳位)，在程式初始化階段將其定義為

OUTPUT 腳位，之後便可利用程式控制腳位狀態為 HIGH(高電位)或 LOW(低電位)進而開關繼電器；數值接收腳位也有三個，分別接收感測電路中 pH 值、溫度及電導度的電壓輸出，由於需使用到類比轉數位的功能，故選用模組中的其中三個類比 I/O 腳位(本研究選用 A0、A1 及 A2 腳位)，並定義為 INPUT 腳位，之後可用程式隨時讀取腳位上的電壓值。在完成所有腳位的定義及外接模組的設定後，將控制繼電器的 OUTPUT 腳位定義為 LOW，使所有繼電器處於關閉，即完成初始化工作。

## B. 量測觸發邏輯

Arduino 語言架構分為兩個主函式，第一為 setup()函式，程式中的初始化設定即寫在此處，每次開機只會執行一次，之後便會進入 loop()函式中，不斷迴圈執行函式內的動作，本研究設計兩種觸發情境，第一種為實驗操作方便為設計重點，使用情境為將 Arduino 連接個人電腦，從開發環境中的序列埠監控視窗施加指令控制電路選擇進行 pH 模式、溫度模式或是電導度模式的測量，抑或是讓電路進行時序性切換量測。程式的 loop()函式預設為讓電路不斷進行時序量測，而在 loop()函式之外使用 serialEvent()函式，當使用者從序列埠監控視窗輸入指令時，程式在當下的 loop()函式執行完畢後會馬上接著執行 serialEvent()函式內之動作，讓使用者選擇進行 pH 值、溫度或電導度單一量測或是三者切換的時序量測，也可將量測狀態關閉。該函式接收使用者在監控視窗中輸入的特定字元(在程式中已定義)以告知接下來的電路運作模式，而在返回 loop()時則依照該字元去進行電路的切換，即可達成使用情境，方便使用者進行實驗操作。

第二種量測情境為藉由觸發來啟動電路進行循環量測，在此模式下，程式在初始化階段將電路切換為電導度量測模式，在 loop()函式內不斷監聽電導度量測電路輸出電壓，由於電導度量測架構為阻抗量測，在電導度電極尚未接觸任何液體時，電極量測到的阻抗等同於無限大，故輸出電壓為零。本研究設定電導度量測範圍為 1 mS/cm 至 25 mS/cm，可將電導度值略低於 1 mS/cm 之溶液的輸出電壓設為臨界值，當感測晶片接觸溶液後電壓值高於此值時則啟動電路時序量測，量測結束後再回歸至電導度量測模式，以等待下次的觸發。由於上述之觸發情境只適用高於特定

電導度值之溶液量測，因此可將觸發方式由電導度電壓臨界值判定，改成直接以無段式按鈕開關來進行人為觸發，將開關的一端連接 Arduino 模組沒有使用到的 I/O 腳位，並將該腳位內建之上拉電阻(Pull-up resistor)在程式中設定為啟用，開關另一端接地，當開關未按下時，I/O 腳位因上拉電阻的關係呈現高電位，而當按下按鈕導通後，腳位則呈現低電位，如此便可直接利用開關按下與否造成的高低電位改變來啟動電路時序量測。

### C. 時序量測控制

當觸發條件達成，電路會開始進行循環量測，首先為電導度模式測量，在 pH 值及溫度量測控制之繼電器關閉的情況下，將電導度量測之繼電器控制腳位設定為 HIGH 使繼電器開啟，並等待 500 ms，此時間常數在程式中名稱定義為 OPEN\_DELAY，接下來即開始進行輸出電壓值取樣，本研究取樣 20 個(常數名稱為 NUM\_OF\_SAMPLES)電壓數值，每個取樣動作之間間隔 50 ms (常數名稱 SAMPLING\_INTERVAL)，共花費約 1000 ms，故取樣頻率為 20 Hz，並將電壓數值儲存在陣列當中，完成取樣後將電導度繼電器控制腳位設定回 LOW，並停頓 200 ms(常數名稱為 CLOSE\_DELAY)，即完成電導度之量測，共花費約 1.7 秒。電導度量測完成後則進行 pH 值量測，最後則是溫度測量，量測程序同電導度模式之說明，完成整個時序量測的時間約為 5 秒，在程式中的量測時間計算方式如下(忽略 Arduino 進行腳位定義、ADC 取樣以及程式執行和運算等耗費時間)：

單一模式電路量測花費時間( $T_{\text{measure}}$ )：

$$T_{\text{measure}} = \text{OPEN\_DELAY} + (\text{NUM\_OF\_SAMPLES} \times \text{SAMPLING\_INTERVAL}) + \text{CLOSE\_DELAY}$$

時序量測電路總花費時間( $T_{\text{total}}$ )：

$$T_{\text{total}} = T_{\text{measure}} \times 3$$

本實驗將電導度的測量排在第一順位，而溫度電阻量測需要足夠時間進行熱平衡，故將溫度輸出電壓的數值取樣排在最後順位，讓晶片的溫度感測部分能在此量測架構下與液體有最充足的時間進行反應，依上述設定，從啟動電路量測(若觸發模

式為電導度量測觸發，則感測晶片接觸液體的時間點等於電路啟動量測的時間點)直到準備進行溫度量測電壓取樣時，經過大約 4 秒的時間可讓晶片溫度感測部分與液體充分接觸進行熱平衡，程式計算方式如下：

進行溫度數值取樣前之電路量測花費時間( $T_{for\_temp}$ )：

$$T_{for\_temp} = T_{measure} \times 2 + OPEN\_DELAY$$

OPEN\_DELAY 常數的用意為讓系統進行數值取樣時，晶片與溶液已進行反應一段時間，使數值收取可更加精準，CLOSE\_DELAY 則是不同量測模式間的緩衝，防止上一個模式尚未關閉，下一個就開啟造成量測干擾及晶片損壞，而溫度電阻的量測反應速度參照本研究使用之市售熱敏電阻，其響應速度時間常數小於 5 秒，故調整取樣時間、OPEN\_DELAY 及 CLOSE\_DELAY 等參數使  $T_{for\_temp}$  剛好可落在 4 秒左右，使溫度量測有充裕的時間進行熱平衡，也同時兼顧各參數最佳化。本研究所設定之常數數值可依不同量測情境作調整。

#### D. 訊號處理及輸出

系統在進行電導度、pH 值及溫度輸出電壓取樣時，以 for 迴圈執行 20 次 (NUM\_OF\_SAMPLES)，迴圈內使用 analogRead() 函式讀取電壓接收腳位之電壓值進行類比數位轉換，並停頓 50 ms (SAMPLING\_INTERVAL)，待迴圈執行完畢共得到 20 組資料並存在陣列當中，等待三個參數皆量測完畢並儲存當下時間後再進行訊號數值運算。由於 Arduino Nano 所使用微處理器內建 ADC 解析度為 10 bits，最高接收電壓為 5 V，也就是讀取到的電壓值在經過 ADC 後會轉換為 0 至 1023 ( $2^{10} - 1$ ) 的整數值儲存在陣列，例如當輸出電壓值為 5 V，則會得到 1023 整數值，電壓值為 3.4 V 時則會得到 695 整數值。系統在得到電導度、pH 值及溫度的整數陣列後，先分別將其陣列內的數值取平均，得到三個浮點數，再將浮點數除以 1023 後再乘以 5，轉換為類比電壓數值，再來則是將三個類比電壓數值代入電導度、pH 值及溫度量測檢量線公式中以得到對應的量測數值，並直接顯示在 LCD 顯示器中，並同時將量測數值及時間存入 EEPROM 中。在每次 loop() 函式結束前會監聽手機 App 是否有發送資料傳輸請求給藍牙模組，若有接收到請求字元則將 EEPROM 內



所儲存的所有資料傳送給手機端，並清空 EEPROM 內所有資料，將位址 0 的數值改為 255，如此一來當下次有資料進來時，程式在讀取位址 0 時即可知道目前 EEPROM 內並無資料，故從位址 2 開始進行儲存。

#### 4.4 重覆性測試

本節將感測晶片連接電路系統，分別在固定之 pH 值、溫度與電導度下進行晶片反覆性測試，以驗證在量測條件不變之下，本研究所開發之感測系統具有良好穩定度，能夠真正用於實際溶液的測量。首先隨機調配出 pH 8.9 緩衝溶液作為 pH 重覆性實驗的測試液體，並將感測電路調整為 pH 量測模式，以手動將晶片模組反覆泡入與拿出溶液，同時以桌上型電錶記錄輸出電壓的變化，共進行十個循環，觀察晶片泡入溶液時獲得的量測數值是否穩定。圖 4-14 為將晶片反覆泡入與拿出溶液十次後獲得之電壓輸出曲線，將晶片泡入溶液時的輸出電壓平均並計算後可得 C.V. 為 0.097%，當晶片抽離溶液時，由於此時 pH 感測電路中的 EGFET 閘極沒有施加明確的電位，處於浮接狀態，因此輸出電壓會呈現閘極浮接時之電壓跳動，而由本實驗可得知此效應對於 pH 量測結果不具影響。溫度重覆性實驗利用恆溫水槽 (HiPoint BC-2D-10L) 將自來水維持在固定溫度，實驗設定為 38.0°C，將晶片在室溫 (26.1°C) 下重覆泡入與拿出溶液，由圖 4-15 可觀察在進行十個循環測試後的輸出電壓曲線，其使用的 NTC 熱敏電阻在泡入溶液後，輸出電壓馬上有所變化，並漸漸趨於平緩，晶片拿出溶液後電壓又再度回升。由於熱敏電阻需與待測溶液進行熱平衡，量測反應時間會比 pH 值與電導度量測還久，由圖可看出當晶片泡入溶液後，電壓反應曲線並沒有馬上到達穩定值，故本實驗的輸出電壓取樣平均方式為等待晶片泡入溶液 3 秒後再進行數值收取，讓熱敏電阻有充足的時間進行熱平衡反應。最後將十次循環的平均量測結果進行分析，得到 C.V. 為 0.997%。電導度量測使用食鹽與自來水隨機調配出 8.4 mS/cm 之溶液進行十次循環測試，可由圖 4-16 看出在晶片泡入溶液後輸出電壓隨即達到穩定，當抽離溶液時，此時所量測到的電阻相

當於無限大，因此電路輸出電壓會趨近於零，圖中可看出當晶片離開溶液後，因其感測電極表面尚有殘餘液體，故電壓並沒有馬上降至零，而是直至兩個感測電極區域不在同一滴液珠內時才會測得無限大之阻值。經過計算後可得循環十次測得之電壓輸出 C.V. 為 0.230%。

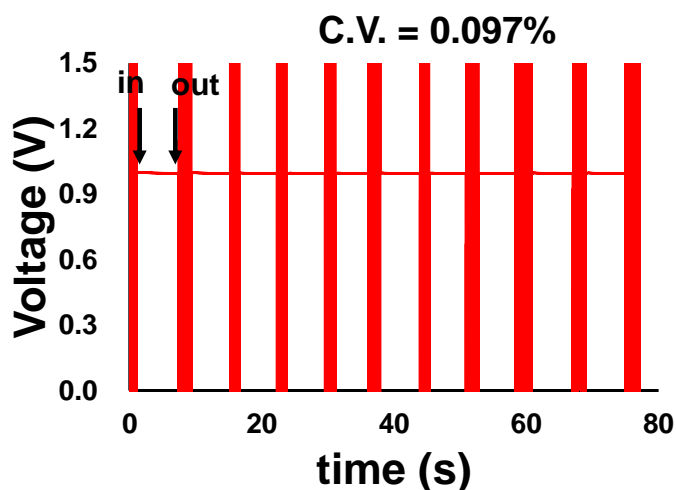


圖 4-14 固定 pH 值進行十次循環性量測。圖中箭頭指示處為感測晶片浸泡與拿出溶液的時間點。

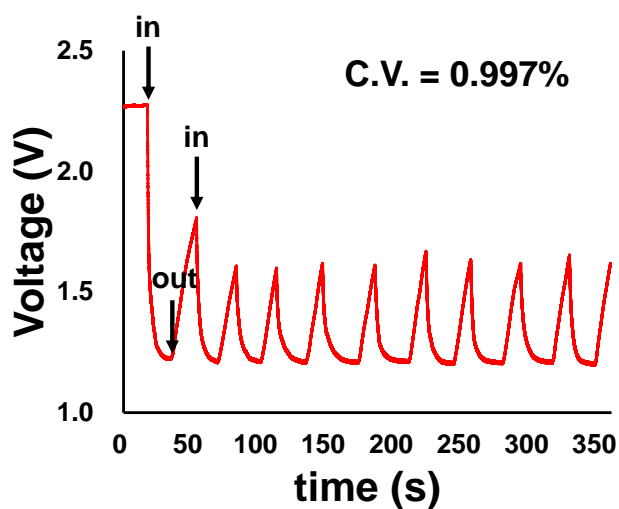


圖 4-15 固定溫度進行十次循環性量測。圖中箭頭指示處為感測晶片浸泡與拿出溶液的時間點。

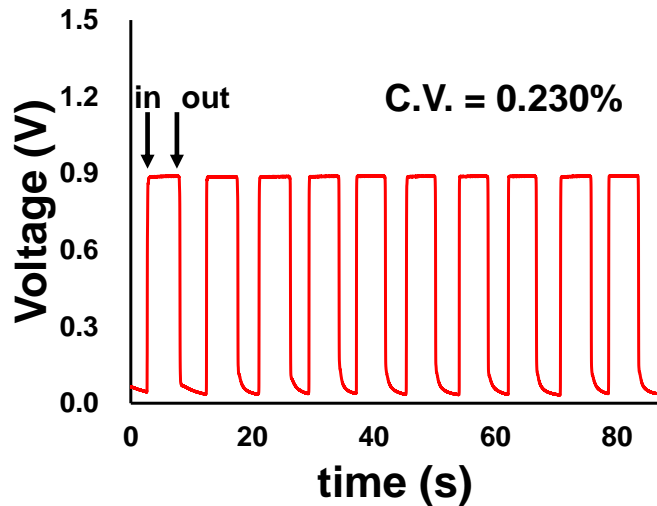


圖 4-16 固定電導度進行十次循環性量測。圖中箭頭指示處為感測晶片浸泡與拿出溶液的時點。

#### 4.5 感測電路原型機

電路效能皆測試完畢後，本研究將交換式電源供應器及感測電路板整合成一個完整模組，使電源插頭及連接感測晶片的連接線露出，使用時接上電源及感測晶片後即可開始運作，並將 LCD 顯示器安裝於外殼最上方，方便使用者讀取量測數值，也可利用手機 App 進行遠端數值讀取，感測系統實體如圖 4-17 所示。

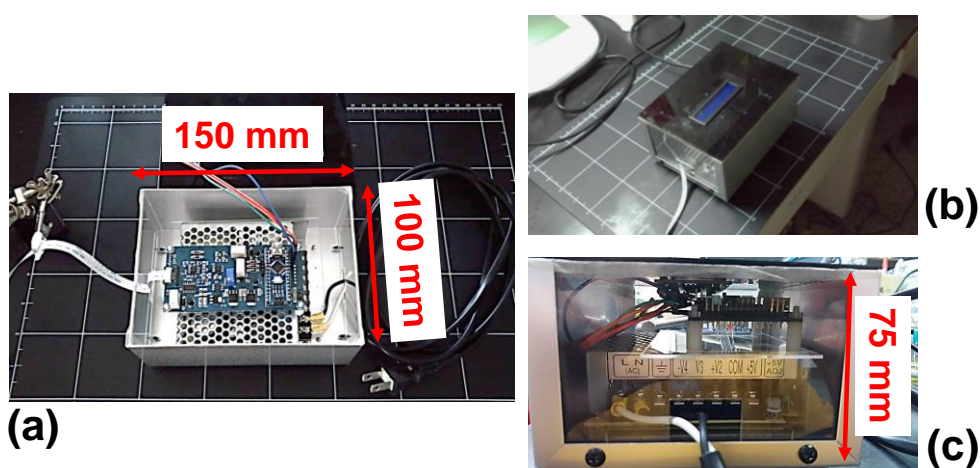


圖 4-17 感測電路原型機實體圖。(a)原型機內部由電路板與電源供應器組成，電源線及連接晶片之軟排線由自行切割之孔位拉出。(b)為組裝後之樣貌，上方 LCD 顯示器可即時顯示量測數值。(c)側視圖。

估算此研究感測電路製作成本，並以市面上的多參數感測裝置比較，可發現商用裝置售價普遍較高昂，且儘管市面上可見將酸鹼度、溫度及離子濃度感測功能整合為一根電極，或是直接使用多個感測電極連接至裝置進行量測，皆沒有辦法只將感測器放入溶液中就完成多參數自動量測，而是需以手動切換量測模式的方法來分別進行酸鹼度及離子濃度的量測。本研究開發之感測電路，搭配 ITO 感測晶片模組，不僅具有整合感測器架構，也因為切換電路與量測程序控制的設計，讓使用者在使用時只需將感測器進入溶液中，此單一動作即可完成酸鹼度、溫度及離子濃度的循環測量，並即時顯示出量測數值，在一些工業化自動檢測的需求中，此架構即具有很高應用價值。圖 4-18 為本研究與商用裝置之比較。

	Hanna HI9813-6	Eutech pH450	Mettler Toledo SevenCompact Duo S213	BEMS Lab.
Price (TWD)	6300	25600	60000	below 1500
pH - range/resolution	0 – 14 pH / 0.1 pH	-2 – 16 pH / 0.01 pH	-2 – 20 pH / 0.001, 0.01, 0.1	3 – 13 pH / 0.1 pH
E.C. - range/resolution	0 – 4 mS/cm / 0.01 mS/cm	0 – 2000 ppm / 0.01, 0.1, 1	0.001 $\mu$ S/cm – 1 S/cm / 0.001 to 1	0.5 – 25 mS/cm / 0.1 mS/cm
Temperature - range/resolution	0 – 60°C / 0.1°C	-10 – 110°C / 0.1°C	-5 – 130°C / 0.1°C	0 – 55°C / 0.1°C
Mode switching	By hand	By hand	By hand	Automatic

圖 4-18 本研究開發之感測系統與市售儀器之比較圖。

## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

本論文結合前人所開發之 ITO 感測晶片，設計一套可以同時量測酸鹼度、溫度及離子濃度的感測電路，利用 Arduino Nano 模組當作處理核心，以切換電路設計成功解決了整合感測器在進行溶液量測時電訊號的干擾，並可將量測數值即時顯示在 LCD 顯示器及利用藍牙傳輸至手機 App，達到遠端監控的目的，同時也考慮感測晶片在封裝時遇到的問題，進而設計新型感測晶片模組降低封裝難度，最後成功開發出低成本快速溶液感測系統。本研究針對前人所發展之 ITO 酸鹼值、溫度與電導度感測晶片進行改良並製作成感測晶片模組，其保留 ITO 薄膜進行 pH 值量測，溫度量測改為使用市售 NTC 熱敏電阻，電導度感測則直接利用感測模組連接板的焊接點作為電極，並使用自行設計之電路進行量測，在 pH 3 至 pH 13 測得酸鹼值檢量線靈敏度為 111.2 mV/pH，解析度為 pH 0.1，電壓範圍為 0.5 V 至 2.0V。溫度感測從 15°C 量測至 50°C 之靈敏度為 60.2 mV/°C，解析度 0.1°C，電壓範圍為 1.0 V 至 3.0 V。電導度量測由 5 mS/cm 至 25 mS/cm，輸出範圍在 0.5 V 與 2.5 V 之間，解析度為 0.1 mS/cm。在量測完三參數之檢量線後，利用 Arduino 模組控制切換電路進行三個參數的切換量測，由結果可得知本量測架構可成功進行三參數量測並消除整合型感測器在進行溶液電性量測時的串擾問題。

本系統直接連接感測晶片測試各參數量測模式開啟瞬間的輸出反應速度，利用桌上型電錶以 10 ms 時間解析度紀錄輸出電壓的變化，由結果可得知不管在 pH 值、溫度還是電導度的量測，從繼電器開啟瞬間到穩定輸出的間隔皆小於 10 ms，以本研究時序切換量測的時間尺度而言，系統反應速度不會對時序控制造成影響。為了測試感測晶片量測在不同供應電源下的影響，使用可程式數位電源供應器從 ±18 V、±17 V 依序施加至 ±6 V，可觀察到 pH 量測容忍度為 ±10 V 之上，溫度量測容忍度為 ±7 V 之上，電導度則需高於 ±13 V。本研究也將電路系統連接晶片進行重覆性測試，將晶片不斷泡入與抽離溶液，觀察輸出電壓穩定性，pH 值與電導

度皆量測十個循環，C.V.分別為 0.097%與 0.230%，溫度量測五個循環，將熱平衡所需較久時間與量測液體在室溫中回溫的誤差考慮進去後可得 C.V.為 0.997%。

最後將感測電路包裝成一完整模組，可直接連接市電，接上感測晶片進行量測，量測數值會顯示於 LCD 顯示器，也可透過藍牙傳輸至手機 App 進行資料讀取，實現遠端監控與數據儲存。本研究設計之感測系統原型具有能夠同時量測 pH 值、溫度及電導度且不會互相干擾之能力，結合 ITO 感測晶片模組的使用，可提供快速且低成本的溶液量測，與市面上現有的檢測儀器相比，此感測系統不但成本遠低於市售儀器，更能以時序切換的方式自動進行三參數的量測並回傳感測結果，不需以人為方式來輔助進行多個感測器的量測，且 ITO 感測晶片模組成本低廉，採拋棄式架構，不需額外進行感測晶片的維護與保養，利用此優勢，本系統未來在各個水質感測領域，例如養殖漁業、農業灌溉、工業廢水監控，或人體尿液汗液的檢測等，皆具有重大的應用潛力。

## 5.2 未來研究方向

本研究提出一同時量測 pH 值、溫度及電導度之感測系統原型，而在未來可以針對系統的電源進行優化，目前系統中所有運算放大器皆施加  $\pm 12\text{ V}$  電壓，EGFET 汲極端施加  $9\text{ V}$ ，若在未來欲使用電池供電，則可以先從降低供應電源來著手，而電導度用來產生正弦波的韋恩電橋，其振盪出來的振幅與供應電源直接相關，若能將韋恩電橋所使用的放大器供電設定為定值，則能夠大幅增加電導度感測的電源容忍程度。本研究電導度的測量範圍設定為  $0.5\text{ mS/cm}$  至  $25\text{ mS/cm}$ ，而在未來可因應不同的水質感測應用，去調整轉阻放大器之回授電阻，或甚至使用可程式化之數位可變電阻，即可利用程式控制的方式進行倍率的切換，以符合各種量測範圍。感測系統的架構在本研究中已確立，在未來可以著重在資料的分析以及雲端儲存系統，並設計符合使用者需求的操作介面及體驗，更可結合大數據及機器學習等方法，將感測系統更趨完整並應用在實際場合，對水質感測領域貢獻一份心力。

## 參考文獻

- [1] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18-23, 2015.
- [2] C. Bohnke, H. Duroy, and J. L. Fourquet, "pH sensors with lithium lanthanum titanate sensitive material: applications in food industry," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 89, pp. 240-247, 2003.
- [3] K. Takei, W. Honda, S. Harada, T. Arie, and S. Akita, "Toward flexible and wearable human-interactive health-monitoring devices," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 4, pp. 487-500, 2015.
- [4] J. Ko, C. Lu, M. B. Srivastava, J. A. Stankovic, A. Terzis, and M. Welsh, "Wireless sensor networks for healthcare," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, pp. 1947-1960, 2010.
- [5] S. Patel, H. Park, P. Bonato, L. Chan, and M. Rodgers, "A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation," *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 9, p. 21, 2012.
- [6] J. C. Yeo and C. T. Lim, "Emerging flexible and wearable physical sensing platforms for healthcare and biomedical applications," *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 2, p. 16043, 2016.
- [7] Q. Wei, R. Nagi, K. Sadeghi, S. Feng, E. Yan, S. J. Ki, R. Caire, D. Tseng, and A. Ozcan, "Detection and spatial mapping of mercury contamination in water samples using a smart-phone," *ACS Nano*, vol. 8, pp. 1121-1129, 2014.
- [8] C. Pang, C. Lee, and K. Y. Suh, "Recent advances in flexible sensors for wearable and implantable devices," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 130, pp. 1429-1441, 2013.
- [9] J. Jiang, X. Wang, R. Chao, Y. Ren, C. Hu, Z. Xu, G. L. Liu, "Smartphone based portable bacteria pre-concentrating microfluidic sensor and impedance sensing system," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 193, pp. 653-659, 2014.
- [10] W. Y. Chung, A. A. Silverio, V. F. S. Tsai, C. Cheng, S. Y. Chang, M. Y. Zhou, C. Y. Kao, S. Y. Chen, D. G. Pijanowska, D. Rustia, and Y. W. Lo, "An implementation of an electronic tongue system based on a multi-sensor potentiometric readout circuit with embedded calibration and temperature compensation," *Microelectronics Journal*, vol. 57, pp. 1-12, 2016.
- [11] C. Leng, G. Lai, F. Yan, and H. Ju, "Gold nanoparticle as an electrochemical label for inherently crosstalk-free multiplexed immunoassay on a disposable chip," *Analytica Chimica Acta*, vol. 666, pp. 97-101, 2010.
- [12] C. Cha, M. Shao, and C. Liu, "Problems associated with the miniaturization of a

- voltammetric oxygen sensor: chemical crosstalk among electrodes," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 2, pp. 239-242, 1990.
- [13]高尉馨,"工業用 PET 聚酯基觸控薄膜於溫度、離子濃度、酸鹼度檢測及其製程技術開發," 國立中山大學機械與機電工程學系研究所學位論文, pp. 1-62, 2017.
- [14]吳尚璟,"以觸控膜為基材之延伸閘極場效應電晶體應用於水中氫離子濃度感測," 國立中山大學機械與機電工程學系研究所學位論文, pp. 1-103, 2015.
- [15]吳永成,"觸控薄膜適用於延伸閘極酸鹼值感測器之研究," 國立中山大學機械與機電工程學系研究所學位論文, pp. 1-107, 2015.
- [16]J. C. Greyson, *Carbon, nitrogen, and sulfur pollutants and their determination in air and water*. Taylor & Francis Publishing, pp. 265-267, 1990.
- [17]A. A. Belyustin, "The centenary of glass electrode: from Max Cremer to FGK Baucke," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 15, pp. 47-65, 2011.
- [18]P. Bergveld, "Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, pp. 70-71, 1970.
- [19]Y. L. Chin, J. C. Chou, T. P. Sun, W. Y. Chung, and S. K. Hsiung, "A novel pH sensitive ISFET with on chip temperature sensing using CMOS standard process," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 76, pp. 582-593, 2001.
- [20]C. E. Lue, C. S. Lai, I. Wang, and C. M. Yang, "Sensitivity of trapping effect on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sensing membrane for ion sensitive field effect transistor/reference field effect transistor pair application," *Sensor Letters*, vol. 8, pp. 725-729, 2010.
- [21]B. Liu, Y. Su, and S. Chen, "Ion-sensitive field-effect transistor with silicon nitride gate for pH sensing," *International Journal of Electronics Theoretical and Experimental*, vol. 67, pp. 59-63, 1989.
- [22]J. van der spiegel, I. Lauks, P. Chan, and D. Babic, "The extended gate chemically sensitive field effect transistor as multi-species microprobe," *Sensors and Actuators*, vol. 4, pp. 291-298, 1983.
- [23]J. C. Chen, J. C. Chou, T. P. Sun, and S. K. Hsiung, "Portable urea biosensor based on the extended-gate field effect transistor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 91, pp. 180-186, 2003.
- [24]N. C. S. Vieira, E. G. R. Fernandes, A. A. A. d. Queiroz, F. E. G. Guimarães, and V. Zucolotto, "Indium tin oxide synthesized by a low cost route as SEGFET pH sensor," *Materials Research*, vol. 16, pp. 1156-1160, 2013.
- [25]A. Das, D. H. Ko, C. H. Chen, L. B. Chang, C. S. Lai, F. C. Chu, L. Chow, and R. M. Lin, "Highly sensitive palladium oxide thin film extended gate FETs as pH sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 205, pp. 199-205, 2014.
- [26]L. T. Yin, J. C. Chou, W. Y. Chung, T. P. Sun, and S. K. Hsiung, "Separate structure extended gate H<sup>+</sup>-ion sensitive field effect transistor on a glass substrate," *Sensors*



- and Actuators B: Chemical*, vol. 71, pp. 106-111, 2000.
- [27] D. E. Yates, S. Levine, and T. W. Healy, "Site-binding model of the electrical double layer at the oxide/water interface," *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, vol. 70, pp. 1807-1818, 1974.
- [28] P. Bergveld, "Thirty years of ISFETOLOGY: What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 88, pp. 1-20, 2003.
- [29] S. Martinoia, G. Massobrio, and L. Lorenzelli, "Modeling ISFET microsensor and ISFET-based microsystems: a review," *Sensors and Actuators B: chemical*, vol. 105, pp. 14-27, 2005.
- [30] D. Tomaszewski, C. M. Yang, B. Jaroszewicz, M. Zaborowski, P. Grabiec, and D. Pijanowska, "Electrical characterization of ISFETs," *Journal of Telecommunications and Information Technology*, pp. 55-60, 2007.
- [31] P. D. Batista and M. Mulato, "Polycrystalline fluorine-doped tin oxide as sensing thin film in EGFET pH sensor," *Journal of Materials Science*, vol. 45, pp. 5478-5481, 2010.
- [32] Y. S. Chiu, C. Y. Tseng, and C. T. Lee, "Nanostructured EGFET pH sensors with surface-passivated ZnO thin-film and nanorod array," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 930-934, 2012.
- [33] L. L. Chi, J. C. Chou, W. Y. Chung, T. P. Sun, and S. K. Hsiung, "Study on extended gate field effect transistor with tin oxide sensing membrane," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 63, pp. 19-23, 2000.
- [34] P. Childs, J. Greenwood, and C. Long, "Review of temperature measurement," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, pp. 2959-2978, 2000.
- [35] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Observation of the spin Seebeck effect," *Nature*, vol. 455, p. 778, 2008.
- [36] A. Van Herwaarden and P. Sarro, "Thermal sensors based on the Seebeck effect," *Sensors and Actuators*, vol. 10, pp. 321-346, 1986.
- [37] F. Warkusz, "The size effect and the temperature coefficient of resistance in thin films," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 11, pp. 689, 1978.
- [38] J. Rhoades, P. Raats, and R. Prather, "Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity 1," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 40, pp. 651-655, 1976.
- [39] M. Grassi, L. Piccoli, F. Conso, P. Malcovati, G. F. Regnicoli, and G. Perretti, "Integrated multi-sensor circuit for environmental data tracing in safe food storage and delivery: The sliced Emmental cheese case study," *IEEE Sensors conference*, pp. 1-4, 2012.

- [40] W. Gao, S. Emaminejad, H. Y. Y. Nyein, S. Challa, K. Chen, A. Peck, H. M. Fahad, H. Ota, H. Shiraki, D. Kiriya, D. H. Lien, G. A. Brooks, R. W. Davis, and A. Javey, "Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis," *Nature*, vol. 529, pp. 509, 2016.
- [41] M. Futagawa, T. Iwasaki, H. Murata, M. Ishida, and K. Sawada, "A miniature integrated multimodal sensor for measuring pH, EC and temperature for precision agriculture," *Sensors*, vol. 12, pp. 8338-8354, 2012.
- [42] D. K. Fisher and H. Kebede, "A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 74, pp. 168-173, 2010.
- [43] E. Sardini and M. Serpelloni, "Self-powered wireless sensor for air temperature and velocity measurements with energy harvesting capability," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 1838-1844, 2011.
- [44] Z. Rasin, H. Hamzah, and M. S. M. Aras, "Application and evaluation of high power Zigbee based wireless sensor network in water irrigation control monitoring system," *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, vol. 2, pp. 548-551, 2009.
- [45] Y. S. Chiu, C. Y. Tseng, and C. T. Lee, "Nanostructured EGFET pH sensors with surface-passivated ZnO thin-film and nanorod array," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 930-934, 2012.
- [46] S. Ekelof, "The genesis of the Wheatstone bridge," *Engineering Science & Education Journal*, vol. 10, pp. 37-40, 2001.
- [47] A. K. Rêgo Segundo, J. H. Martins, P. M. d. B. Monteiro, R. A. de Oliveira, and G. M. Freitas, "A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils," *Sensors*, vol. 15, pp. 25546-25563, 2015.
- [48] T. S. Light, S. Licht, A. C. Bevilacqua, and K. R. Morash, "The fundamental conductivity and resistivity of water," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 8, pp. E16-E19, 2005.
- [49] Y. C. Wu, S. J. Wu, and C. H. Lin, "High performance EGFET-based pH sensor utilizing low-cost industrial-grade touch panel film as the gate structure," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 6279-6286, 2015.
- [50] Y. C. Wu, S. J. Wu, and C. H. Lin, "Mass-produced polyethylene-terephthalate film coated with tantalum pentoxide for pH measurement under ISFET detection configuration," *Microsystem Technologies*, vol. 23, pp. 293-298, 2017.

# 自述

姓名：嚴瑋星 (Wei-Hsing, Yen)

出生日期：1992/11/06

性別：男

電子信箱：m043020107@student.nsysu.edu.tw

學歷：

國立中山大學 機械與機電工程研究所 碩士 2016/01~2018/06

國立中山大學 機械與機電工程學系 學士 2011/09~2016/01

新北市立永平高級中學 2008/09~2011/06

發表著作：

國際研討會

Wei-Hsin Kao, **Wei-Hsing Yen**, and Che-Hsin Lin, “Low-cost and high-performance urine sensor utilizing laser aberration on commercial touch panel film,” *The 13th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE NEMS 2018)*, Grand Hyatt, Singapore, April, 2018

國內研討會

**嚴瑋星** 高尉馨 林哲信, “氧化銻錫導電薄膜於酸鹼度、溫度及電導度量測之電路設計與特性研究,” *中國機械工程學會第34屆全國學術研討會(Conference on Chinese Society of Mechanical Engineers – CSME 2017)*, 台中, 台灣, 十二月, 2017