

# 中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國中組 生活與應用科學科

第一名

030810

瘋持電掣—自製顯微電擊系統的輸出電量對組織細胞的影響

學校名稱：新北市立新莊國民中學

作者： 國一 吉志軒	指導老師： 朱家蔚 張加孟
---------------	---------------------

關鍵詞：顯微系統、電擊、組織細胞

## 得獎感言

### 瘋持電擊-自製顯微電擊系統的輸出電量對組織細胞的影響

參加科展，是從小學時期便開始醞釀的想法，去年升上國中,學校徵選科展作品，自此展開了我的科學之旅。

全心投入才發現：這是不同以往任何競賽的經驗！無論思考計畫主題、蒐集資料、規劃實驗、突破瓶頸、分析結果、撰寫作品、設計海報、練習簡報技巧等等，每個階段都得左思右想、傾盡全力，方能獲得滿意的成果，從而深刻瞭解「學海無涯、唯勤是岸」的道理。

雖對自己的研究作品與現場表現深具信心，面對頒獎典禮成績揭曉的那一刻，仍不免感到萬分緊張；當獲知拔得頭籌後，所有勞苦早已拋出九霄雲外，緊握獎座的同時，深知所有付出都已值得，滿懷著更多的感謝之情。

謹在此感謝父母師長的諄諄教誨，不厭其煩地給予指正；感謝所有評審教授的辛勞，公正客觀地銘賜佳績；感謝所有工作人員的協助，不遺餘力地熱心服務。最後，謹以此殊榮獻給曾經幫助我的人！日後的我依舊會秉持勤奮不懈的精神，習得更多知識，強化自身能力，為世人貢獻一己之力。

## 摘要

自製「顯微電擊系統」以改良整合不適用舊（廢）品為設計原則，由「可調高電壓電源供應器」與「光學穿透反射兩用數位顯微鏡」組成，為本研究最重要電擊測試與觀察設備。另取洋蔥、吊竹草葉下表皮細胞進行測試研析，得知：電擊組織細胞過程，破壞面積隨電擊筆尖徑愈粗而增大，但破壞深度相對變淺，破壞區域深／寬比與輸出電流密度大小呈正比；不同植物細胞對電擊耐受度不同，破壞洋蔥下表皮細胞輸出電量為 385V、0.53mA、0.2W，而破壞吊竹草葉下表皮細胞僅 200V、0.3mA、0.06W，估算燃燒單位厚度細胞壁所需功率約為 0.03W/ $\mu\text{m}$ 。拖曳電擊筆連續擊破細胞如同切口效果，切割路徑相對於細胞長度及其軸向角度，將直接影響其切口寬度。

## 壹、研究動機

少數人有觸電的經驗，其中的極少數甚至曾遭到雷擊，無論哪種情況，有人因而喪命，有人卻無明顯損傷；此外，日常生活使用的電蚊拍，也是利用類似的原理，有時電得蚊子四分五裂，有時卻又只是暫時昏厥。生物的最小單元組織為細胞，觸電的過程究竟會對細胞產生什麼影響？多大的電量會造成細胞破裂？怎樣的細胞較為天賦異稟、對電量耐受度較高？這些問題可藉此研究一窺究竟！

在網路與交通大學浩然圖書館進行文獻搜尋，獲得三篇國際間開發不同形式奈米刀治療癌症的報導，其原理無論係以近紅外線照射體內奈米金柱標靶、轉化超音波偵測獵殺癌細胞【1】，還是利用帶正電奈米粒子、翻轉穿透帶負電的病菌細胞膜【2】，甚或藉高壓電場壟罩病灶周邊的細電擊針、摧毀危險患部腫瘤細胞【3】，這些尖端醫療技術都令我心嚮往不已，遂決定參與生醫光電研究；經查相關文獻發現本研究內容乏人問津，稍有關聯議題多為細胞於特定流道溶液因高壓電場隨機裂解，侷限於基因轉殖或裂解取油研究【4-5】，然本研究並無此限制，深信其成果對醫療電燒器械與奈米刀之實務與理論，定能有所貢獻【6-7】。

此研究與本學年度研習「自然與生活科技」第一冊教材【8】的許多教學單元，均有極為直接的關聯。首先是開卷可見的「進入實驗室」單元，內容介紹諸多實驗器材，部分已應用於本研究，且教材對各單元活動的陳述方式，也與科展說明書的撰寫大綱極為近似，這表示只要用心熟讀教材的實驗操作程序，自可習得正式報告的撰寫模式；其次，已試著運用「探究自然的方法」單元提到的標準研究程序，讓本研究思考面向更嚴謹；再者，「細胞的發現與細胞學說」單元描述顯微鏡基本架構與操作方式，為本研究改裝顯微鏡基礎觀念；最後，「細胞的構造」單元提到的植物細胞，在此更躍上檯面成為主要研究對象，內容不但指導如何辨識細胞特徵，有關細胞試片取樣方式，也是本研究必須使用的方法。

然而，僅依靠上述教材內容是不夠的，在設備不足的情況進行這項研究，勢須開發必要設備因應。因此，本研究還須導入電學入門觀念，未來在「自然與生活科技」第五冊第四章「電」【9】、以及第六冊第一章「電流的效應」【10】的部分內容，必須在此提前稍作涉獵。此研究不僅能加深個人對細胞特性的瞭解，甚至堪稱初入生醫光電工程領域的門檻，實可做為日後深入研究的基礎。

## 貳、研究目的

- 一、研判自製可調高電壓電源供應器之可行性，以最少費用建置最適用的設備。
- 二、量測單電池倍壓前後的電壓、電流值，評估電擊組織、細胞的適用電量及設備輸出上限。
- 三、利用量測所得數據，明確知悉倍壓線路轉換電量的倍率（或效率），藉此易於推估原始值或放大值，以利後續實驗應用。
- 四、分析改良顯微鏡的可行性，整併現有設備，自製適用於本研究的光學顯微鏡。
- 五、研究操作器械的尺寸差異，於電擊過程對植物組織、細胞的影響及其成因。
- 六、以不同電流、電壓的直流功率組合，探討洋蔥與吊竹草組織、細胞之破壞模式、最低破壞電量、及其與細胞壁厚度之關係。
- 七、藉由連續移動輸出能量之電擊方式，探討影響破壞植物細胞路徑寬度的變因。
- 八、預期本研究成果，對細胞工程研究、臨床醫療操作、尖端醫技開發均能有所貢獻。

## 叁、研究設備及器材

### 一、耗材

- (一) 電線、鱷魚夾
- (二) 不鏽鋼絲
- (三) 電工膠帶、熱縮套管
- (四) 熱熔膠
- (五) 銲錫
- (六) 糖果盒、保鮮盒、名片盒
- (七) 廢棄塑膠筆桿
- (八) 塑膠環扣（含螺桿、螺帽）
- (九) 保鮮膜
- (十) 橡皮筋

### 二、工具

- (一) 剪刀、鉗子
- (二) 銲槍
- (三) 吸銲錫槍
- (四) 培養皿、滴管、濾紙
- (五) 鑷子
- (六) 咖啡攪拌棒
- (七) 銅箔雙面膠、載玻片
- (八) 模具雕刻筆（含鑽頭、飛輪鋸、金鋼砂研磨棒、布拋輪…）
- (九) 游標尺
- (十) 打火機

### 三、設備

- (一) 自製光學穿透反射兩用數位顯微鏡：切除家中老舊複式顯微鏡已無法使用的部位，修改成可與數位顯微鏡（機型為 MIC002、最大觀察倍率 500X）搭配組裝的設備，如此便可同時兼具光學穿透式與反射式觀察的功能。
- (二) 自製可調高電壓電源供應器：採購所需電子零件自行組裝焊接，可自由調整提供 0~13V（實測值）基本電壓；其電路增設安培、伏特雙顯示數位錶頭，可量測直流電壓 0~33V、電流 0~3000mA，量測精度為  $\pm 0.3\%+2$ ，資料更新頻率為 5Hz。此設備與倍壓線路組合，依三用電錶量測極限確認可任意調整輸出電壓 0~1260V，依標註於電蚊拍柄額定電壓研判，經計算極限值近 10000V，惟須視其電子元件本身耐受度而定。
- (三) 自製倍壓線路單元：將家中淘汰老舊電蚊拍（Zoueshoai 日象牌、電源為 2 個 1.5V 的 3 號乾電池、拍柄標示額定電壓為 2300V）的倍壓線路拆除，改裝成單一組件。
- (四) 自製電擊筆：將輸出高壓電量，以針筆型式（尖徑 20、60、200 $\mu$ m）傳至細胞組織。
- (五) 自製綜合電池盒：內含三種不同電池組合，提供三種不同基本電壓（1.5V、3V、9V）的電量供應。
- (六) 自製光源架暨顯微載物雙用台座
- (七) 三用電錶：機型為 TENMARS YF-1000，直流電壓精確度 $\pm 0.5\%+3$ （實際量測電壓上限值為 1260V）、直流電流精確度 $\pm 2\%+5$ 、電阻 $\pm 1\%+2$ ，資料更新頻率為 3Hz。
- (八) 可錄影數位相機（含腳架）

### 四、藥品

- (一) 亞甲藍液
- (二) 生理食鹽水

### 五、軟體

- (一) Microsoft Win 8 系統搭配 Office 2003 Word、Excel 軟體
- (二) AMCAP - Direct Show 影像擷取程式（9.016 版）
- (三) Windows Movie Maker 2012 軟體

## 肆、研究過程或方法

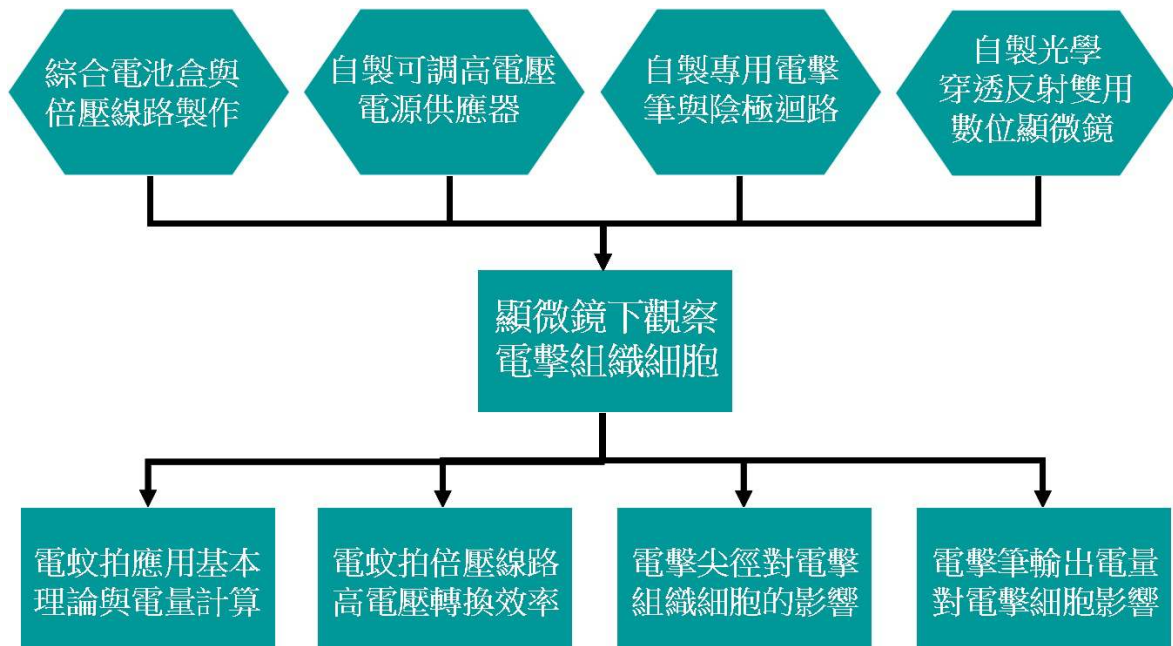


圖 1 研究流程圖

### 一、量測單電池倍壓前後之電壓電流值

市售電蚊拍依電源差異，大致可分電池式、充電式二類；其網面型式，可分二層式與三層式（中間層接正極、上下層接負極）。本研究所使用廢電蚊拍均屬前者，拍柄註明額定電壓為 2300V，由蚊子遭電蚊拍電斃屍體損傷狀況（腹部電爆、斷腳、甚至燒焦），研判其電量足以對蚊子組織細胞產生明顯影響，故進行研究過程須注意安全。

一般三用電錶可量測最大電壓值為 1000V，量測值大於 1000V 的設備則相當昂貴，短期之內似乎也難以借得，故考量改裝 3 號單電池座供電（原為雙電池串聯），後續將記錄經電蚊拍之倍壓線路耗電 500 分鐘實況，其間輔以電擊蚊子效果，做為推估選用電源供應器電量的基準。

## 二、自製適用的可調高電壓電源供應器

經過反覆思考，本研究可獲適當電量的因應對策，計有下列四項：

- (一) 考量市售電源供應器：經遍尋網路及電子材料專賣店，發現一款最大電壓、電流分別可達 30V、6A 較平價之電源供應器，雖可單獨調整電壓、電流，但缺點是體積大、重量重、單價貴，近 3000 元的價格實在難以接受。
- (二) 使用大量乾電池串聯：乾電池供電雖為最簡單方法，然最大問題是：如果要升高電壓至 100V，至少須使用 11 個 9V 電池串聯，價格為 319 元（後續研究證明需要更多），組裝耗時攜帶不便，持續使用時間甚短，且難調電壓值，未必是經濟有效的方法。
- (三) 電池與倍壓線路組合：此法可取代一堆電池串聯問題，但只有安裝乾電池的倍壓前、後二種電量變化，如欲採用介於其間的電量，須進行放電消耗方可達到目的，此舉頗為耗資費時，只能用來進行初步電量評估，如需微調測試電量，勢須自製適用設備。
- (四) 自製適用電源供應器：在電子材料專賣店採購電子零件，包括變壓器、可變電阻、電晶體、二極體…等，完成組裝成品能將 110V 家用交流電，轉為可自由微調 0~13V 直流電，雖仍無法單獨調整電流，然其體積小、重量輕、價格便宜（僅花費 240 元），若與倍壓線路組合，自為本研究最經濟有效的電源供應器。

## 三、自製本研究專用電擊筆與陰極迴路

後續進行的研究，不僅須電擊植物組織觀察其反應，測試尺度甚至須達細胞等級，大約只有 50~300 $\mu$ m 範圍【8】，這樣的實驗必須在顯微鏡下操作。

一般細胞觀察須使用複式顯微鏡，它是利用光線穿透頗為透明的試片，經過顯微鏡傳送到人眼聚焦成像；如欲於顯微鏡清楚觀察電擊組織細胞的動作，置於載玻片的觀測試片須與電源供應器形成通電迴路，同時接觸試片的導電材料不能遮蔽光源影響觀察。為符合這些要求，必須自行設計接觸試片的適用電極——陰極迴路與電擊筆，藉此輔助後續實驗的進行。

## 四、自製光學穿透反射雙用數位顯微鏡

一般細胞觀察須使用複式顯微鏡，此種設備專用於光線可穿透的近透明試片，經過



顯微鏡聚焦成像。然而，一般見到的複式顯微鏡並不具照相或錄影功能，若加裝則需增加一筆高額費用，經確認校內無此設備可借用；若直接將數位相機鏡頭疊接於複式顯微鏡接目鏡上，二鏡頭不時須因錯位調整，且數位相機腳架頗為妨礙實驗操作；如欲改用品市售的數位顯微鏡升降架（詳如圖 2），僅能以反射光線進行觀察，此模式不適用於生物試片。有鑑於此，必須另想辦法製作適用的觀測設備。

家中原有二組簡單的顯微鏡：一組是入門等級的老舊複式顯微鏡（詳如圖 3），具備一般基本功能（三段式倍率），或許因為價格過於便宜，600X 倍率影像始終看不清楚，更別奢望有錄影功能；另一組是具備簡易支架、無上下調焦功能的數位顯微鏡（詳如圖 4），連接電腦後既可照相、又可錄影，還可連續調整倍率，本身也可提供光源，最高倍率達 500X。對本研究而言，這二組顯微鏡各有其優缺點，但任一組都不符所需。經苦思後決定：這二組顯微鏡既然都是私人財產，當可截長補短，自己動手來個功能升級！



圖 2 市售的數位顯微鏡升降架



圖 3 複式顯微鏡



圖 4 數位顯微鏡

## 五、顯微鏡觀察組織細胞電擊實驗程序

依序完成前述各部組件，並確認完全達到各自預期功能後，表示可順利整合成為自製顯微電擊系統，隨即開始進行洋蔥與吊竹草（詳如圖 5）的組織、細胞電擊測試。全程實驗步驟概述如下：

- (一) 在乾淨空白的載玻片上，先滴少許生理食鹽水；
- (二) 剝取一小片植物葉下表皮細胞，由上表皮向下表皮方向對摺，輕撕拉出透明且薄的下

表皮，剪下一小片置於載玻片生理食鹽水處；

- (三) 滴入亞甲藍液將細胞進行染色，為避免電擊過程深色液滴散佈影響觀察，須以濾紙將多餘混合液體吸除（經實驗比較，此舉對試片染色效果無不當影響）；
- (四) 以鑷子小心夾取待電擊觀察試片邊緣（不可夾到觀測部位），將其移至載玻片已黏銅箔之陰極迴路上，須以無皺褶方式平貼陰極迴路；
- (五) 將已置入待觀測試片之陰極迴路載玻片，裝設於顯微鏡載物台上，並確認玻片表面延伸銅箔，已確實壓接於貼附顯微鏡載物台面之外接銅箔；
- (六) 因數位顯微鏡之接物鏡頭為內凹式設計，為避免電擊過程試片殘餘液體噴濺，導致鏡頭髒汙無法拭淨，須平撐保鮮膜覆蓋鏡頭，並以橡皮筋固定；
- (七) 將數位顯微鏡之 USB 接頭接至電腦，並於電腦開啟數位顯微鏡驅動軟體；
- (八) 電腦畫面進入觀察頁面後，依序以顯微鏡的低、高倍鏡進行觀察，待電擊部位調整至適當倍率並完成聚焦時，先予以拍照；
- (九) 電源可酌情依實際測試需求，採用前述自製綜合電池盒或可調高電壓電源供應器，使之與倍壓線路組、三用電錶銜接形成通路，並於量測預設之電壓（以低於 2300V 為原則）、電流值後關閉開關；
- (十) 將倍壓線路組之輸出負極，以鱷魚夾導線銜接至顯微鏡載物台之外接銅箔；倍壓線路組之輸出正極，則以香蕉頭導線連接至電擊筆。全電擊系統至此已裝接完畢（詳如圖 6），務須確認裝接方式無誤，再進行後續步驟；
- (十一) 開啟數位顯微鏡錄影功能，另在旁亦架設數位相機，開啟後進行測試內容與全系統操作解說錄影。
- (十二) 開啟電路開關進行電擊，由電腦顯示影像確認組織、細胞是否達到預期測試狀態，隨即關閉前述二項錄影工作，並對電擊後試片影像進行拍照；
- (十三) 由顯微鏡載物台取下載玻片，再由載玻片取下電擊觀測試片，依前述(一)~(十一)程序重新進行試片準備與電擊測試；
- (十四) 最後比較不同植物組織、細胞之電擊差異，進行分析檢討，並判斷正確結果。



(a) 吊竹草葉面



(b) 吊竹草葉背

圖 5 吊竹草外觀照片

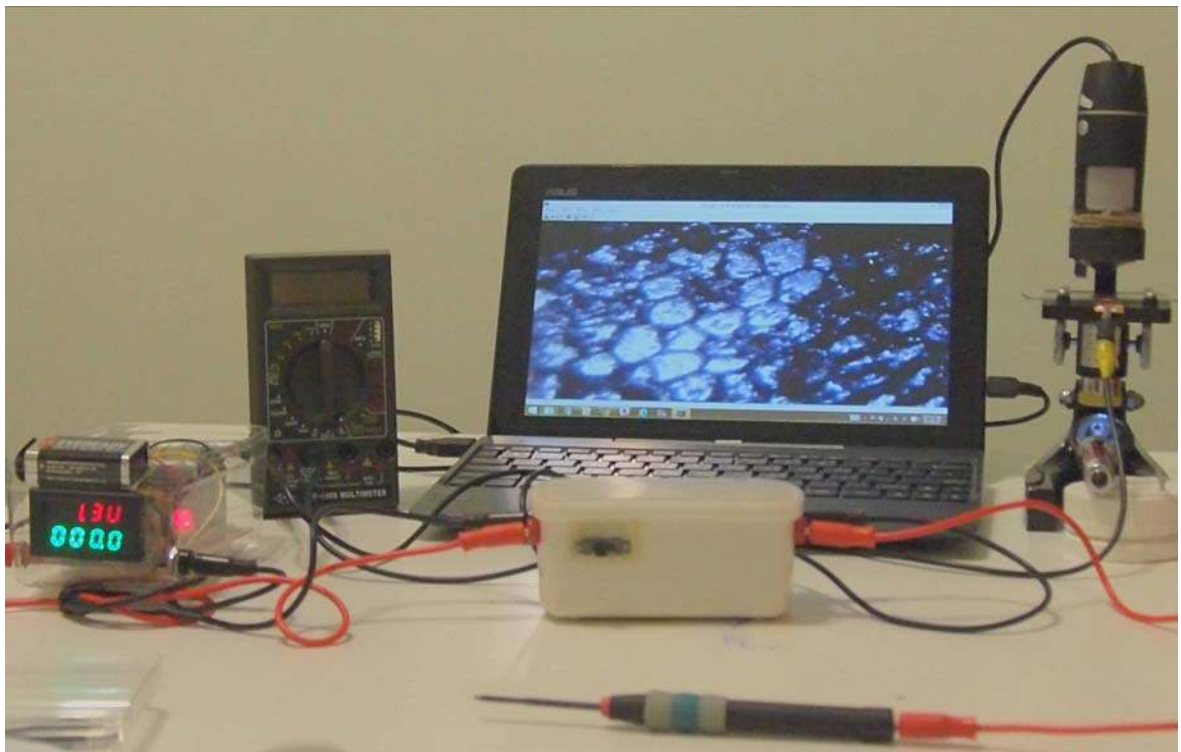


圖 6 自製顯微電擊系統全貌

## 伍、研究結果

### 一、統計單電池倍壓前後之電壓電流值

以 3 號單電池銜接電蚊拍倍壓線路短路通電 500 分鐘，並取 TENMARS YF-1000 三用電錶量測，藉此瞭解電擊蚊子持續耗電狀態，測試數據及其曲線圖詳如表 1 與圖 7。

觀察曲線圖可發現：無論倍壓前、後之電壓、電流，隨時間增長而呈現降低趨勢；前 20 分鐘降幅較為劇烈（乾電池電壓由 1.49V 降至 1.37V、電流由 2.76A 降至 2.12A），後續 240 分鐘維持較穩定輸出，歷時 500 分鐘結束，此時電量已相當微弱（乾電池電壓 0.75V、電流 0.26A）。另一方面，串聯安裝二個新的乾電池累計通電前 240 分鐘，擊斃蚊子效率較佳，表示至少須達 1500V、1mA 電量，方可達此效果。

由於後續電擊組織、細胞的尺寸，遠小於蚊子體積，故須再調整更低適用電量。

### 二、完成自製的可調高電壓電源供應器

(一) 自製綜合電池盒：將 3 號單電池盒、3 號雙電池串聯盒、以及 1 個 9V 電池扣，並聯組合於一塑膠盒裡，以便任意提供 1.5V、3V、9V 電壓，但使用過程並不建議同時將這些電池座裝上乾電池，以免引發危險。

綜合電池盒製作程序概述如下（詳如圖 8）：

1. 取一適當大小塑膠盒，在表面以筆繪出加工位置。
2. 以模具雕刻筆裝設鑽頭或飛輪鋸，對塑膠盒體進行鑽孔與切割。
3. 整修電池座外型，以便後續固定電線位置。
4. 裝入電池座與香蕉頭插座端子，銲合線路後，以熱熔膠固定電池座，即告完成。

(二) 自製倍壓線路組：將家中待報廢電蚊拍內部的倍壓線路拆下，更新老舊損壞線路，並加工適用的外覆絕緣盒體，完成組裝即為本研究之放大電壓單元。若依電蚊拍柄刻印的額定電壓 2300V，初估此倍壓線路將使 1.5V 串聯雙電池的原始電壓值放大 767 倍，但在中間區段不易細部調整電壓（僅能放電消耗），須另自製使用設備，以應後續研究所需。倍壓線路組之盒體製作與組裝程序近似自製綜合電池盒，基於操作方便與安全考量，電路須加裝開關與懸空固定，並酌情包覆熱縮套管或電工膠帶（詳如圖 9）。

表 1 以三用電錶量測 3 號單電池倍壓前、後持續通電消耗之輸出電壓、電流值

時間歷程 量測項目		0 分鐘	5 分鐘	10 分鐘	15 分鐘	20 分鐘	25 分鐘	30 分鐘	35 分鐘	40 分鐘	45 分鐘
倍壓前	電壓	1.49 V	1.45 V	1.42 V	1.40 V	1.37 V	1.36 V	1.35 V	1.34 V	1.32 V	1.32 V
	電流	2.76 A	2.60 A	2.45 A	2.34 A	2.12 A	2.10 A	2.11 A	2.09 A	2.06 A	2.05 A
倍壓後	電壓	1258 V	1149 V	1154 V	1128 V	1089 V	1076 V	1074 V	1058 V	1046 V	1044 V
	電流	1.58 mA	1.47 mA	1.42 mA	1.39 mA	1.35 mA	1.33 mA	1.32 mA	1.30 mA	1.29 mA	1.28 mA
時間歷程 量測項目		50 分鐘	55 分鐘	60 分鐘	65 分鐘	70 分鐘	75 分鐘	80 分鐘	90 分鐘	100 分鐘	110 分鐘
倍壓前	電壓	1.31 V	1.31 V	1.30 V	1.30 V	1.29 V	1.29 V	1.28 V	1.28 V	1.27 V	1.26 V
	電流	2.02 A	2.00 A	2.00 A	1.94 A	1.93 A	1.90 A	1.90 A	1.84 A	1.80 A	1.73 A
倍壓後	電壓	1034 V	1027 V	1024 V	1020 V	1011 V	1008 V	1000 V	987 V	983 V	969 V
	電流	1.27 mA	1.27 mA	1.26 mA	1.26 mA	1.25 mA	1.24 mA	1.24 mA	1.23 mA	1.21 mA	1.21 mA
時間歷程 量測項目		120 分鐘	150 分鐘	190 分鐘	230 分鐘	270 分鐘	310 分鐘	350 分鐘	400 分鐘	450 分鐘	500 分鐘
倍壓前	電壓	1.26 V	1.25 V	1.21 V	1.17 V	1.11 V	1.08 V	0.94 V	0.89 V	0.78 V	0.75 V
	電流	1.71 A	1.50 A	1.33 A	1.16 A	0.97 A	0.90 A	0.71 A	0.53 A	0.40 A	0.26 A
倍壓後	電壓	960 V	920 V	876 V	830 V	778 V	732 V	610 V	521 V	402 V	324 V
	電流	1.19 mA	1.15 mA	1.10 mA	1.03 mA	0.95 mA	0.85 mA	0.65 mA	0.55 mA	0.43 mA	0.39 mA

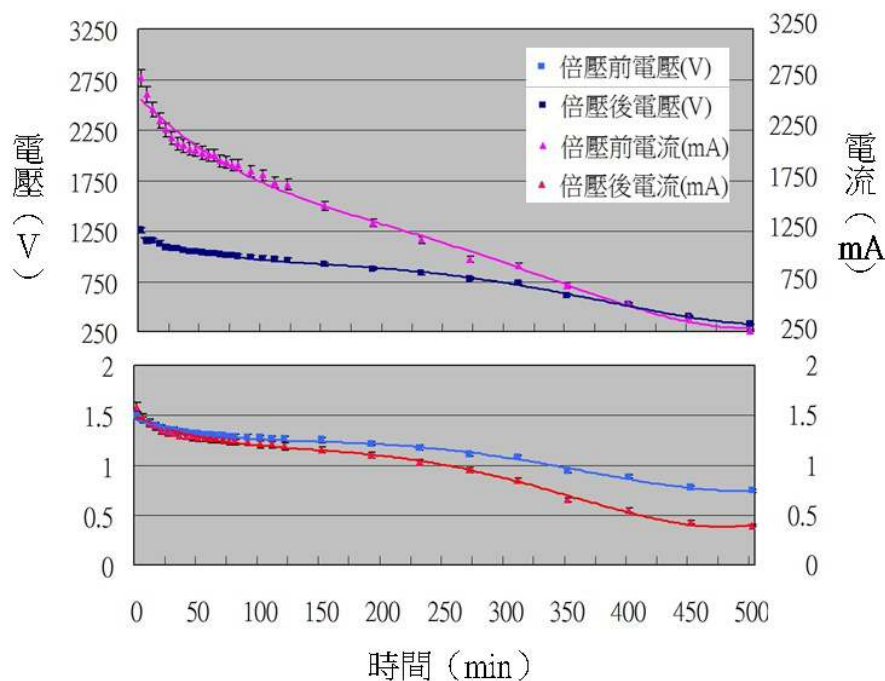
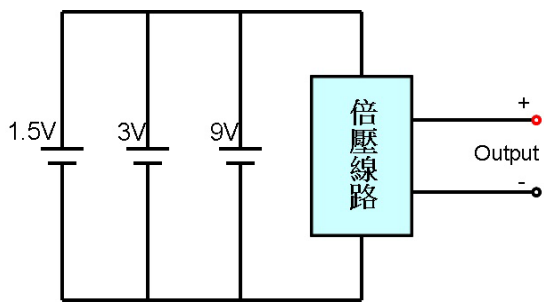


圖 7 3 號單電池倍壓前、後持續通電消耗之輸出電壓、電流趨勢曲線

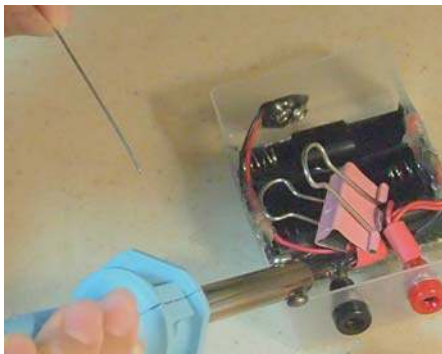




(a) 電路示意圖



(b) 盒體鑽孔

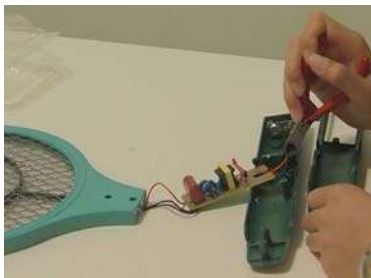


(c) 銲接線路



(d) 完成綜合電池盒

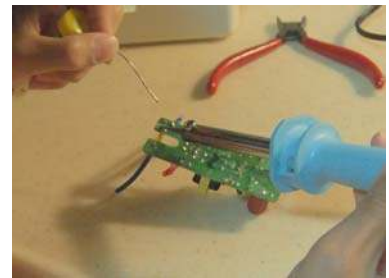
圖 8 綜合電池盒製作過程



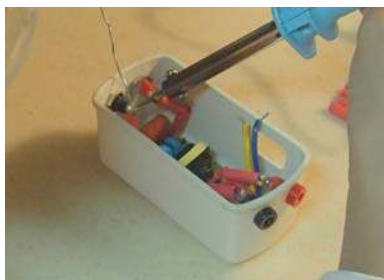
(a) 拆解倍壓線路



(b) 盒體鑽孔



(c) 更換電線與重銲零件



(d) 銲接香蕉頭插座端子



(e) 固定熱縮套管



(f) 完成倍壓線路組成品

圖 9 倍壓線路組製作過程

(三) 自製電源供應器：依零件表（詳如表 2）清點各式電子零件無誤後，研究自製可調電壓式電源供應器的電路圖（詳如圖 10(a)），其工作原理與組裝程序【11】概述如下：

1. 工作原理：

- (1) 先將家用 110V 交流電先降壓為 12V 交流電。
- (2) 二極體 D1~D4 組成橋式整流器，將交流轉為直流，再由電容 C1 濾波使之穩定。
- (3) 電晶體 Tr1 為誤差放大器兼驅動電路，主要用於放大電阻 R2、R3 所獲電壓分壓，再驅動電晶體 Tr2 達到穩壓輸出功能。
- (4) 電阻 R1 及 D5 LED 共同構成電源指示燈迴路，電容 C2 為誤差放大器 Tr1 輸入端之濾波電容。

2. 組裝程序：

- (1) 依照零件裝配圖（詳如圖 10(b)）將各零件安裝於電路板。電解電容、發光二極體（LED）的長腳為正極，負極旁殼體通常會以印字或凹痕標示；二極體兩腳也有極性，有記號標示端為 K 角。零件接錯組件將無法正常運作，銲前須仔細檢查。
- (2) 銲槍表面若氧化，可用濕海綿擦拭；銲錫與銲槍靠近被銲位置，將熔為液態適量銲錫移至被銲位置，接觸時間愈短愈好，以免過熱損傷零件（詳如圖 10(c)）。
- (3) 熔融銲錫於電路板冷凝後，確認零件銲牢後，以斜口鉗剪除零件或導線的多餘尾端，自製可調電壓式電源供應器之電子組件即完成。

對本研究而言，這個自製電源供應器電路算是成本效益最高、相當適用的組件，唯一美中不足之處是本身未附任何檢測儀錶，而家中只有一個三用電錶，如欲同時監控電壓放大前後的電量變化，設備顯然不足。為解決此問題，特別在大型電子材料專賣店增購一個安培、伏特雙顯示數位錶頭，但使用說明書【12】描述三種安裝方式，其正確組合方式，也令人頗費心思，苦思研究數日之後，評估結果如下：

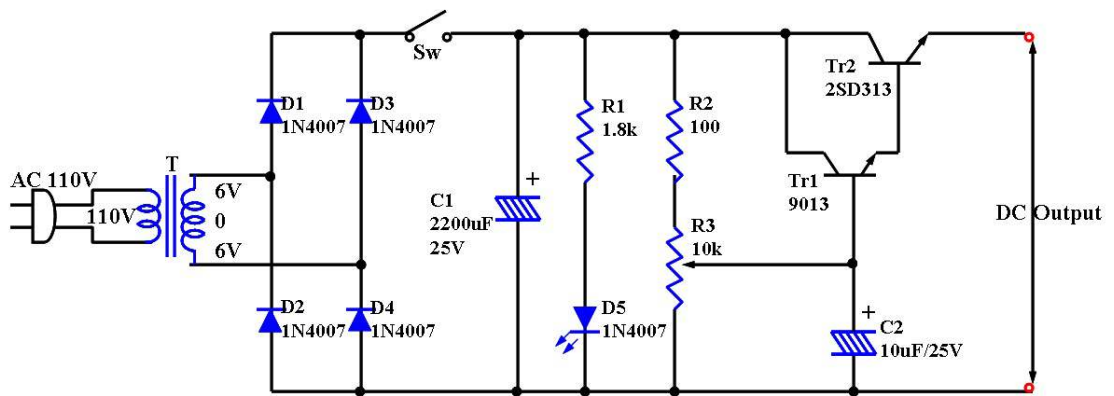
1. 錶頭電源獨以乾電池供應：說明書內容顯示驅動錶頭的電壓，須維持在 3.5~28V 之間。若使用單一 9V 方塊電池提供電源，即便待測電路之電壓因調整可變電阻而降至 3.5V 以下，也不會讓錶頭停止工作，研判此項適用（詳如圖 11(a)）。
2. 錶頭電源由待測電路供應：此錶頭雖直接與電源供應器結合，若實驗電壓進行到 3.5V 以下，錶頭便無法驅動，反而在此形成斷路；此外，本研究不需另加裝 DC-DC

變壓器，故研判不適用（詳如圖 11(b)）。

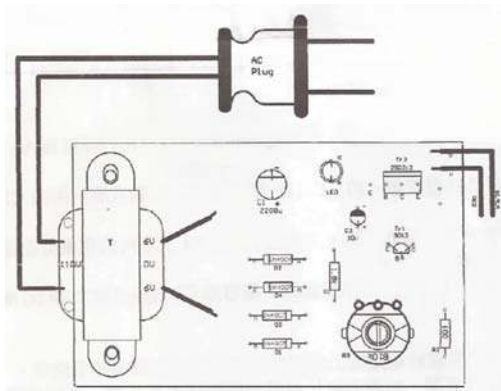
3. 錶頭與待測電路共用電源：此處雖未加裝 DC-DC 變壓器，但實驗電壓低於 3.5V 時，同樣無法驅動錶頭；若將電源供應器看成圖 11(c)顯示的用電器，實際卻以 110V 家用電源插座供電，電壓明顯過大，不符實際要求。

表 2 電源供應器零件表

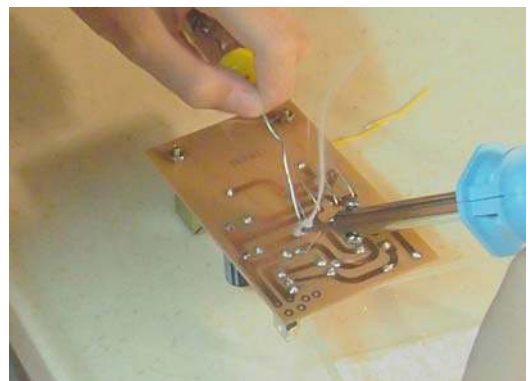
零件	編號	規格型式	數量	零件	編號	規格型式	數量
電阻	R1	1.8k / 0.25W(棕灰紅)	1	電晶體	Tr1	2SD313	1
電阻	R2	100 / 0.25W(棕黑棕)	1	電晶體	Tr2	9013	1
可變電阻	R3	10k / B Type(附開關)	1	插頭	AC Plug	含電源線	1
電容	C1	2200 $\mu$ F / 25V(電解質)	1	變壓器	T	P:110 S:6-0-6	1
電容	C2	10 $\mu$ F / 25V(電解質)	1	鱷魚夾	—	紅、黑各一	2
二極體	D1~D4	1N4007	4	電線	—	9 cm	1
發光二極體	LED	—	1	螺絲	—	2.6x6 mm 含螺帽	2
電路板	—	CHD133	1	—	—	—	—



(a) 電路圖



(b) 零件配置圖



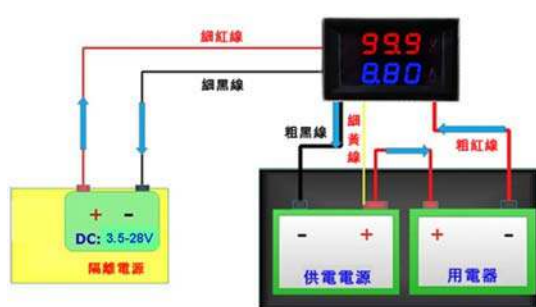
(c) 電源供應器之電子元件銲接

圖 10 自製電源供應器之電路圖、零件配置圖與銲接實況

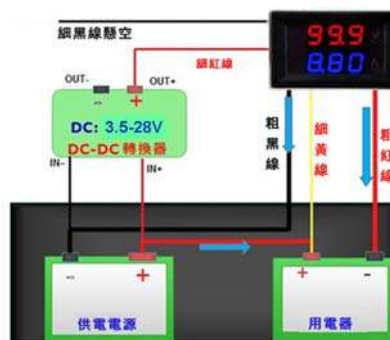


根據上述分析可知：第 1 種方法最好。由安培、伏特雙顯示錶頭延伸出五條線（詳如圖 11(d)），可將細紅、黑線分別接於方塊電池扣的正、負極，粗黑線連接至電源供應器輸出端負極（可調電壓式電源供應器電路圖標示黑線位置），細黃線連接至電路板輸出端正極（可調電壓式電源供應器電路圖標示紅線位置），並由此自行延伸一條紅電線至紅色端子，錶頭的粗紅線則連接至電源供應器的黑色端子。

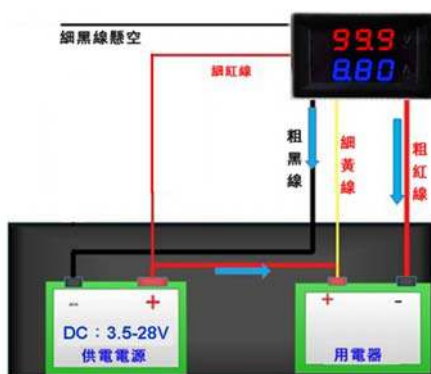
為使自製可調電壓式電源供應器更安全、美觀、便於攜帶，特選尺寸合適的市售糖果塑膠盒，加工製成外覆盒體，將電源供應器電路組件與安培、伏特雙顯示錶頭組裝於預定位置，自製可調電壓式電源供應器即宣告完成（詳如圖 12）。



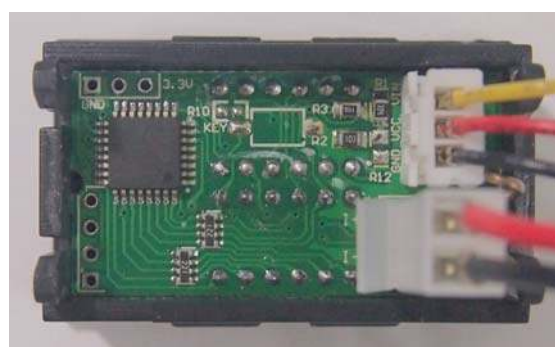
(a) 錶頭電源獨以乾電池供應



(b) 錶頭電源由待測電路供應



(c) 錶頭與待測電路共用電源



(d) 安培、伏特雙顯示錶頭電路板照片

圖 11 安培、伏特雙顯示錶頭安裝方式示意圖



(a) 電源供應器之盒體加工 (b) 電源供應器之變壓器銲接 (c) 電源供應器

圖 12 電源供應器組裝過程

### 三、完成自製的專用電擊筆與陰極迴路

- (一) 自製顯微鏡觀察專用的電擊筆：為能精確控制電擊位置，輸出陽極須與組織、細胞具備對等尺寸，方不致產生無意義實驗結果。此處以不銹鋼研磨電蝕加工，製成 20、60 與 200 $\mu\text{m}$  半徑針尖（詳如圖 13）；基於安全須進行絕緣設計，故拆下廢原子筆外殼加工，內部安裝插拔式導電座，以絕緣較佳導線連至筆尾端子，組合全筆身再以高絕緣性熱縮套管包覆外部（詳如圖 14），以便實驗過程手持，確保操作安全。
- (二) 自製顯微鏡觀察專用的陰極迴路：陰極迴路是在透明載玻片貼上銅箔，並將銅箔裁切成四種不同款式（詳如圖 15），經多次觀察篩選，以銅箔中央穿一大孔者最適用於透明試片，無孔洞銅箔者適用於不透明試片表面觀察。將銅箔延伸至載玻片邊緣，壓接於顯微鏡載物台的導電銅箔，便可用含導線的鱷魚夾，夾持外部銅箔形成陰極迴路。



(a) 頂端半徑 20 $\mu\text{m}$  針尖 (b) 頂端半徑 60 $\mu\text{m}$  針尖 (c) 頂端半徑 200 $\mu\text{m}$  針尖

圖 13 自製電擊筆針尖尺寸外觀

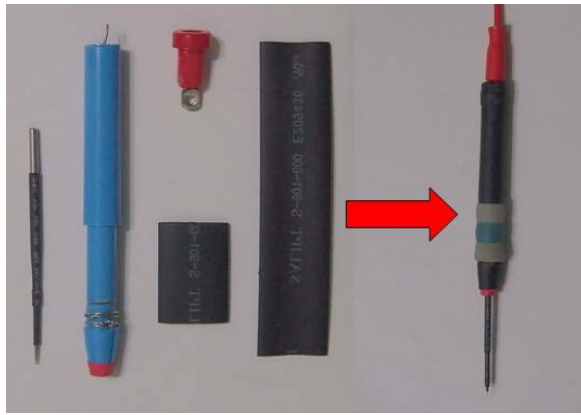


圖 14 自製顯微鏡觀察專用的電擊筆

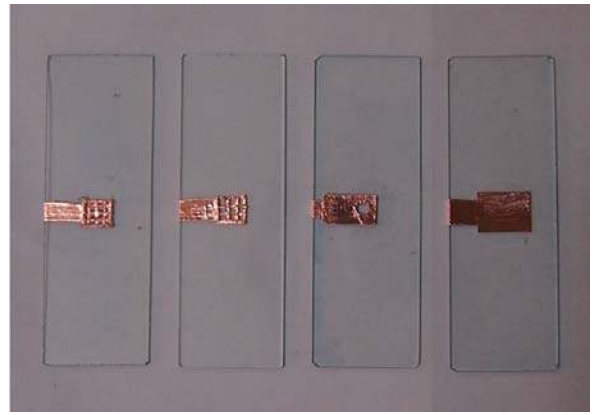


圖 15 自製顯微鏡觀察專用的陰極迴路

#### 四、完成光學穿透反射雙用數位顯微鏡

經過反覆思考，便著手拆解整併顯微鏡（詳如圖 16）。拆除複式顯微鏡的整個鏡頭單元，雖會造成調節輪功能完全喪失，然其頂端與載物台結合，固定於物鏡之下，聚焦功能便由鏡頭移轉至載物台。

切下調節輪後，可取塑膠扣環固定於鏡臂頂端，藉此固鎖數位顯微鏡，須注意鏡頭須與反射鏡、載物台孔洞中心連成直線，以便反射鏡上傳光源至鏡頭，如此自製光學穿透反射雙用數位顯微鏡即告完成，試以此顯微鏡直接觀察微尺規（Microbar）效果極佳。



(a)複式顯微鏡拆解零件分佈

(b)部分零件修改或更換

(c)光學穿透反射數位顯微鏡

圖 16 自製光學穿透反射雙用數位顯微鏡過程

## 五、顯微鏡下觀察組織細胞遭電擊實驗

在本研究中，由於組織電擊是處於尺寸較大的範圍，所以會使用針尖半徑為 20、60 與 200 $\mu\text{m}$  的電擊筆分別對下列三種組織進行測試；細胞電擊則受限於細胞本身尺寸，為避免傳輸電量分送不同細胞，造成研判結果的誤差，故僅採用針尖半徑為 20 $\mu\text{m}$  的電擊筆進行測試。

正式進行電擊測試前，先取最細針尖半徑的電擊筆，以不通電方式輕劃組織表面，藉此確認適當施力大小，以免因施力過大刺破組織或細胞，造成結果的誤判。

本研究採用二種不同植物之組織、細胞，測試結果分述如下：

### (一) 洋蔥組織、下表皮細胞電擊實驗

1.洋蔥組織電擊實驗：取未通電針尖半徑 20 $\mu\text{m}$  電擊筆，以稍大外力劃過晶瑩剔透的洋蔥表面，被劃破的組織在凹陷處會囤積流出的細胞質（詳如圖 17）；若以 2 個全新 3 號乾電池串聯，連接倍壓線路將電壓放大，並以相同針尖通電輸出約 2300V、1.58mA 的電量，輕觸洋蔥組織表面非但瞬間擊爆細胞，且表面破損區域邊緣均有燒焦痕跡（詳如圖 18），由於擊爆細胞過程未見到細胞質向外噴濺，可推知細胞質似乎是瞬間蒸發；以相同能量分別取針尖半徑 60 $\mu\text{m}$ 、200 $\mu\text{m}$  電擊筆進行相同實驗，可發現燒灼面積隨尖徑愈粗而明顯增大，但擊破深度會因此變淺（詳如圖 19、20）。

2.洋蔥下表皮細胞電擊實驗：若觀察範圍趨向更小的細胞尺度（詳如圖 21），僅以 1 個全新 3 號乾電池連接倍壓線路將電壓放大，針尖半徑 20 $\mu\text{m}$  電擊筆輸出約 1250V、1.50mA 的電量，可發現細胞壁在顯微鏡下瞬間消失，足見電量過大。即便將電量降至 778V、0.95mA 電擊（1 個消耗電量近一半的乾電池，詳如圖 22），經擷取錄影畫面放電後瞬間，可發現細胞壁發生燃燒（詳如圖 23），到熄火經計算錄影時程僅歷時 0.3 秒，並在擊破位置留下近似乾涸的細胞質（詳如圖 24）。最後以電源供應器搭配倍壓線路組輸出 385V、0.53mA 電量，方出現逐漸熔穿細胞型態（先穿小孔、再逐漸擴大，詳如圖 25），此時便可發現電擊燃燒後殘餘蒸氣（詳如圖 26 中央下方）。

(二) 吊竹草下表皮細胞電擊實驗：取頂端半徑 20 $\mu\text{m}$  針尖，經多次電擊測試結果，最終以電源供應器搭配倍壓線路輸出 200V、0.3mA，便可擊穿吊竹草下表皮細胞。放電後的燒灼形式與洋蔥下表皮細胞類似，但似乎更容易沿細胞壁呈火網型式漫燒。



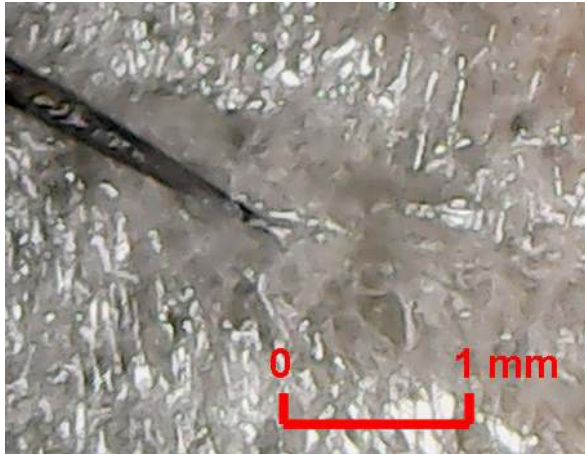


圖 17 未通電頂端半徑 20 $\mu$ m 針尖戳破  
洋蔥組織表面

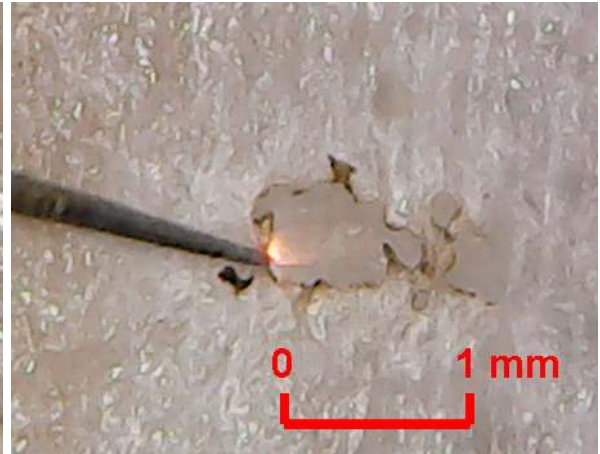


圖 18 3 號雙電池串聯經倍壓輸出 2300V、  
1.58mA，以 R20 $\mu$ m 針尖電擊洋蔥表面

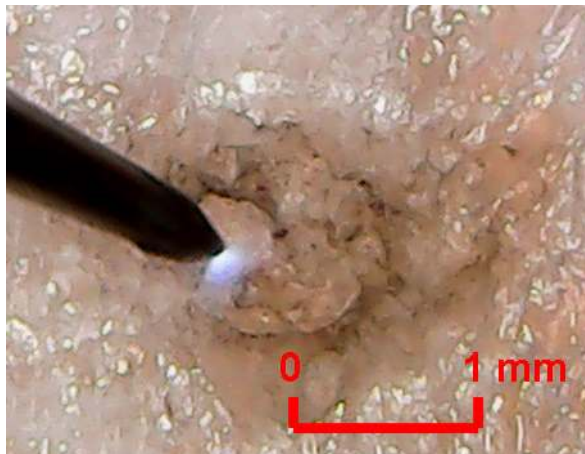


圖 19 3 號雙電池串聯經倍壓輸出 2300V、  
1.58mA，以 R60 $\mu$ m 針尖電擊洋蔥表面



圖 20 3 號雙電池串聯經倍壓輸出 2300V、  
1.58mA，以 R200 $\mu$ m 針尖電擊洋蔥表面

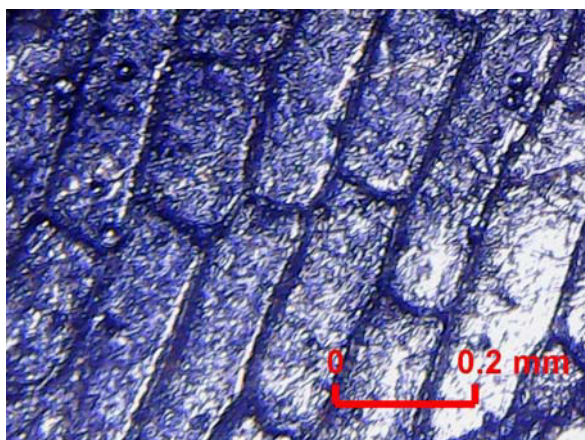


圖 21 洋蔥下表皮細胞

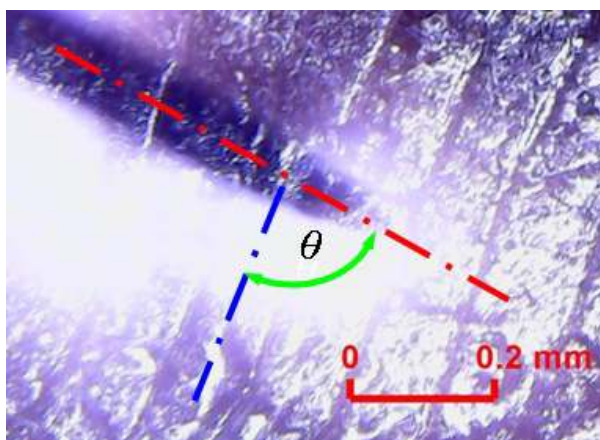


圖 22 3 號單電池經倍壓輸出 778V、0.95  
mA，以 R20 $\mu$ m 針尖對洋蔥細胞放電



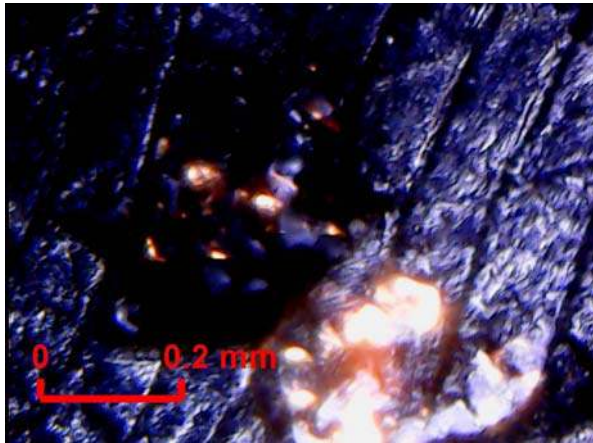


圖 23 3 號單電池經倍壓輸出 778V、0.95 mA，以 R20 $\mu$ m 針尖對洋蔥細胞電擊燃燒

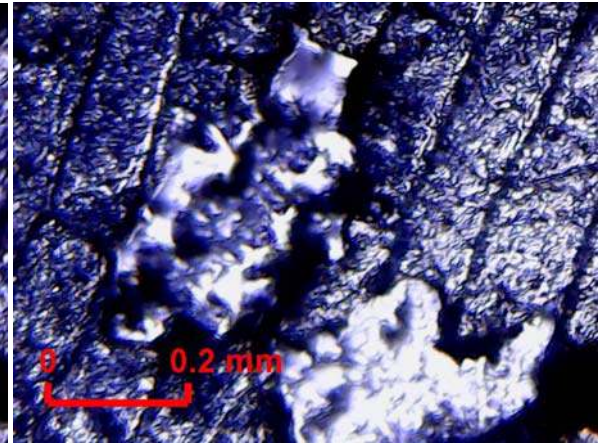


圖 24 3 號單電池經倍壓輸出 778V、0.95mA，以 R20 $\mu$ m 針尖電擊洋蔥細胞後樣貌

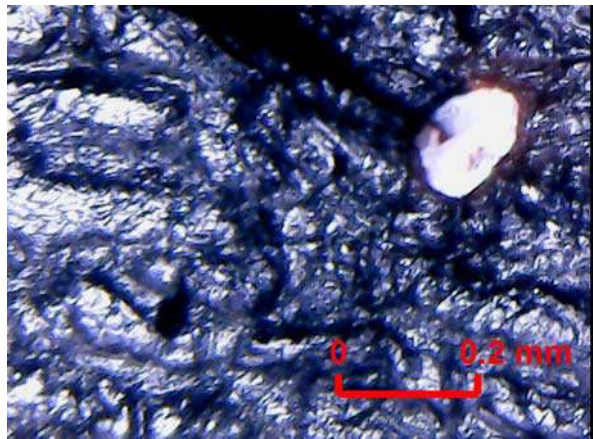


圖 25 電源供應器經倍壓輸出 385V、0.53mA，以 R20 $\mu$ m 針尖對洋蔥細胞電擊燃燒

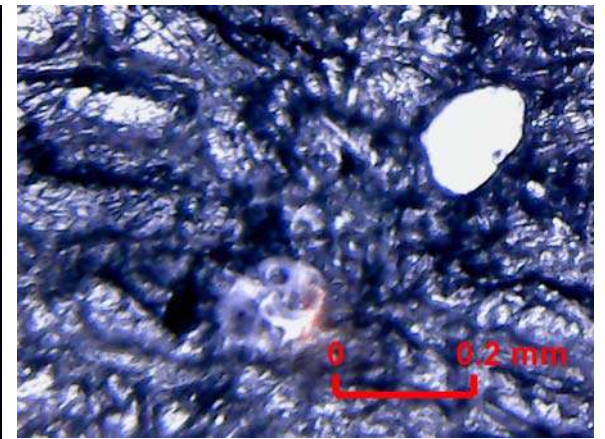


圖 26 電源供應器經倍壓輸出 385V、0.53mA，以 R20 $\mu$ m 針尖對洋蔥細胞電燒出現蒸氣

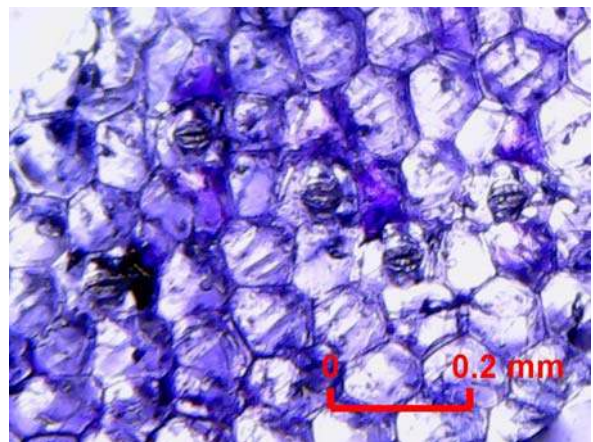


圖 27 吊竹草葉下表皮細胞

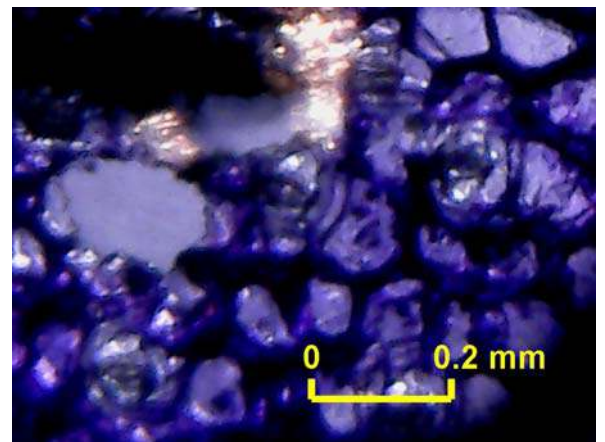


圖 28 電源供應器經倍壓輸出 200V、0.3mA，以 R20 $\mu$ m 針尖對吊竹草細胞電擊燃燒

## 陸、分析與討論

### 一、電蚊拍應用的基本理論與電量計算

由研究結果已知：電蚊拍具備擊斃蚊子的較佳時機，為連續形成放電通路的前 4 小時，所幸電蚊拍僅需揮拍擊蚊的瞬間通電即可，故不致短時間便使電池耗盡電力。以大於 1500V 電壓、1mA 電流，仍足以將肚子灌飽血液的蚊子電爆（由四處噴濺的人類血點可推知），電斃飢餓的蚊子當然也沒問題。若將此電壓、電流換算為功率（P），可採用下列公式

$$V = I \times R \quad (\text{公式 1})$$

$$P = V \times I = I^2 \times R = V^2 / R \quad (\text{公式 2})$$

其中 V 為電壓，單位為伏特（Volt），符號為 V；

I 為電流，單位為安培（Ampere），符號為 A；

R 為電阻，單位為歐姆（Ohm），符號為  $\Omega$ ；

P 為功率，單位為瓦特（Watt），符號為 W。

公式 1 就是電學裡著名的歐姆定律。若將電壓 1500V、電流 1mA 代入公式 2，可獲得電斃蚊子所需較低功率為  $P = 0.001 \text{ (A)} \times 1500 \text{ (V)} = 1.5 \text{ (W)}$ 。由此可判斷在公式 2 之  $P = V^2 / R$ ，電壓於平方值所產生的功率大幅差距，才是造成蚊子被電斃的主因；當然，必須維持一定的電流量，才能讓電壓有驅動的對象，輔助發揮電斃蚊子的效果。

### 二、電蚊拍倍壓線路之高電壓轉換效率

若將表 1 的量測數據，以公式 2 加以運算，可得倍壓前、後功率值；對倍壓前、後之電壓、電流、功率轉換倍（效）率，及其隨時間消耗概況，計算方式詳如下列公式，而其數據則詳列於表 3，並繪成圖 29 曲線圖。

$$V_T = V_1 / V_0 \quad (\text{公式 3})$$

$$I_T = I_1 / I_0 \quad (\text{公式 4})$$

$$P_T = P_1 / P_0 = (V_1 \times I_1) / (V_0 \times I_0) = (V_1 / V_0) \times (I_1 / I_0) = V_T \times I_T \quad (\text{公式 5})$$

其中  $V_T$ 、 $I_T$ 、 $P_T$  分別為電壓、電流、功率之轉換倍（效）率，單位為倍數或%；



$V_1$ 、 $I_1$ 、 $P_1$ 分別為電壓、電流、功率之轉換後量測值，採用既有單位；

$V_0$ 、 $I_0$ 、 $P_0$ 分別為電壓、電流、功率之轉換前量測值，採用既有單位。

隨著消耗電量時間的增加，乾電池於倍壓前、後的電壓、電流、功率固然會因此下降，原以為放大倍率會是固定值；然而，觀察表 3 電壓、電流、功率轉換倍率曲線圖，卻發現電壓轉換倍率隨之降低（由 842 倍降至 435 倍），電流、功率轉換倍（效）率隨之升高（前者由 0.00057 倍升至 0.0015 倍、後者由 48.2% 升至 65.2%）。經查閱相關文獻【13】，得知本研究所使用倍壓線路係以切換電容方式提升電壓，輸出電壓大小確實會影響倍壓線路的轉換效率，由於此部分與本研究主題較無直接關聯，且內容涉及較為艱澀的電子電路專業知識，故列入未來研究方向，留待日後再以專題深入討論。

後續以自製可調高電壓電源供應器為輸出電源設備，由於其加裝內部的安培、伏特雙顯示數位錶頭，量測擷取資料頻率僅為 5Hz，這對非穩定的瞬間電擊電量量測，可能會產生數據誤差，故可藉三用電錶測得的倍壓後數據同步確認，輔以表 3 曲線圖回溯當時放大倍率，便可推估電源供應器本身輸出電量大小。

表 3 3 號單電池倍壓前、後持續通電消耗之輸出功率與轉換效率

時間歷程 量測項目	0 分鐘	5 分鐘	10 分鐘	15 分鐘	20 分鐘	25 分鐘	30 分鐘	35 分鐘	40 分鐘	45 分鐘
電壓轉換效率	842.03	792.96	813.82	808.60	792.58	794.10	794.38	792.51	790.63	791.51
電流轉換效率	0.057%	0.057%	0.058%	0.059%	0.064%	0.063%	0.063%	0.062%	0.063%	0.062%
倍壓前功率	4.12 W	3.77 W	3.47 W	3.26 W	2.91 W	2.85 W	2.85 W	2.79 W	2.73 W	2.70 W
倍壓後功率	1.99 W	1.69 W	1.64 W	1.57 W	1.47 W	1.43 W	1.42 W	1.38 W	1.35 W	1.34 W
功率轉換效率	48.2 %	44.8%	47.2%	48.0%	50.5%	50.3%	49.7%	49.3%	49.5%	49.4%
時間歷程 量測項目	50 分鐘	55 分鐘	60 分鐘	65 分鐘	70 分鐘	75 分鐘	80 分鐘	90 分鐘	100 分鐘	110 分鐘
電壓轉換效率	787.51	784.57	785.88	784.62	783.11	782.61	778.82	772.30	771.59	767.22
電流轉換效率	0.063%	0.064%	0.063%	0.065%	0.065%	0.065%	0.065%	0.067%	0.067%	0.070%
倍壓前功率	2.65 W	2.62 W	2.61 W	2.52 W	2.49 W	2.45 W	2.44 W	2.35 W	2.29 W	2.18 W
倍壓後功率	1.31 W	1.30 W	1.29 W	1.29 W	1.26 W	1.25 W	1.24 W	1.21 W	1.19 W	1.17 W
功率轉換效率	49.5%	49.8%	49.5%	51.0%	50.7%	51.1%	50.8%	51.6%	51.9%	53.7%
時間歷程 量測項目	120 分鐘	150 分鐘	190 分鐘	230 分鐘	270 分鐘	310 分鐘	350 分鐘	400 分鐘	450 分鐘	500 分鐘
電壓轉換效率	761.30	736.59	722.77	706.98	701.53	680.30	646.87	588.04	518.71	434.90
電流轉換效率	0.070%	0.077%	0.083%	0.089%	0.098%	0.094%	0.092%	0.104%	0.108%	0.150%
倍壓前功率	2.16 W	1.87 W	1.61 W	1.36 W	1.08 W	0.97 W	0.67 W	0.47 W	0.31 W	0.19 W
倍壓後功率	1.14 W	1.06 W	0.96 W	0.85 W	0.74 W	0.62 W	0.40 W	0.29 W	0.17 W	0.13 W
功率轉換效率	53.0%	56.5%	59.8%	62.8%	68.7%	64.3%	59.2%	61.0%	55.8%	65.2%



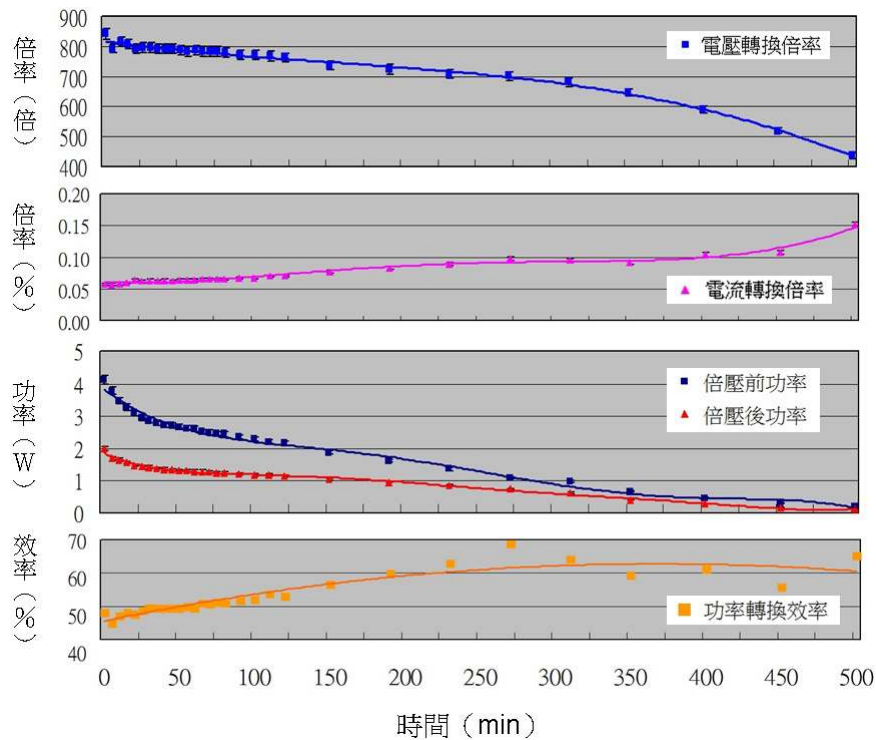


圖 29 3 號單電池倍壓前、後持續通電消耗之輸出功率與轉換效率趨勢曲線

### 三、電擊筆尖徑對電擊組織細胞的影響

使用不同尖徑的電擊筆尖，在組織表面的損壞型態也相對不同：筆尖愈小者，破壞區域外觀的深／寬比愈大，反之則愈小，此現象應係源自針尖放電之電流密度差異所致。以針尖半徑為 20、60 與 200 $\mu\text{m}$  的電擊筆輸出電量同為 2300V、1.58mA 的案例來看，三種針尖截面積分別為 0.001256、0.011304 與 0.1256  $\text{mm}^2$ ，則分佈於針尖的電流密度分別為 1257.96、139.77 與 12.58  $\text{mA}/\text{mm}^2$ ，其大小差距可達 100 倍，由實際觀察可知：各電流密度所造成組織表面破壞形貌的深／寬比，還具正比關係。

### 四、電擊筆輸出電量對電擊細胞的影響

細胞壁的主要成分為纖維素與果膠，用於支撐和維持植物細胞的形狀。提高電擊筆尖的輸出電量，對擊穿細胞壁或汽化細胞質都有較佳的效率，能量過高甚至會導致細胞壁燒焦，隨著電擊筆尖輸出電量的降低，愈能清楚觀察細胞壁被燒為灰燼的過程。

不同來源的組織細胞，由於基本組成的差異，對電擊耐受度自也有所不同；使用最小針尖半徑（20 $\mu\text{m}$ ）電擊筆，電破洋蔥下表皮細胞所需適當輸出電量為 385V、0.53mA；而對吊竹草葉下表皮細胞欲達到近似效果，則僅需 200V、0.3mA 即可。這表示前者對電量的耐受程度為 0.20W，後者則為 0.06W，而前者細胞壁厚度（約 6.6 $\mu\text{m}$ ）恰約後者（約 2.2 $\mu\text{m}$ ）3 倍；經計算可知：燃燒單位厚度細胞壁所需能量約為 0.03W/ $\mu\text{m}$ ，故點燃後者所需能量較低，更容易觀察細胞壁漫燒實況，燃燒過程於 0.3 秒內完成。

由此可知，以上述針尖半徑搭配電量於固定位置電擊，僅可定點擊破數層洋蔥或吊竹草下表皮細胞深度；若拖曳針尖持續電擊，則連續移動擊破之數層細胞可形成切開效果（詳如圖 18）。另由前述提高電流密度可增大破壞區域外觀的深／寬比可知：若大幅提升輸出能量，亦可遽增破壞區域外觀的深／寬比，更能瞬間蒸發細胞質，此時再以持續拖曳方式電擊，必可呈現更明顯的切開效果，單以肉眼觀察將如同利刃切割之情況。由於此破壞模式係依拖曳路徑連續破壞單一細胞所串接，故拖曳路徑相對於細胞長度及其長軸方向夾角（詳如圖 22 之  $\theta$  角），便成為決定切口寬度的要因。

## 五、本研究成果之未來應用與發展方向

動、植物細胞結構之最明顯差異，在於後者具有富含纖維素的細胞壁；細胞壁厚度（ $\geq 2\mu\text{m}$ ）【14-15】不僅遠大於細胞膜（6~10nm）【16】，由纖維素構成的纖維絲（直徑約 1~40nm）【14】則提供更高的結構強度。本研究自行開發顯微電擊系統，既可輕易擊破（或熔穿）植物細胞壁，若降低電量並精確調整，自可於動物細胞膜產生類似效果；然造價低廉、製造與操作簡便、及其豐碩的研究成果，均已實質證明價值所在。

以往稍有關聯研究之設備，皆以電泳將細胞移至二電極間，利用非均勻電場迫使細胞膜破裂，以便續行 DNA 取樣、基因轉殖或裂解取油用途，但無法選擇特定單一細胞執行，且須在特調成分濃度之溶液操作，否則細胞裂解效果將大受影響，甚至使取樣對象連帶受損【4-5】；相對地，本研究自製之顯微電擊系統，易於大氣環境對單一細胞任意位置精準操作（當針尖明顯小於細胞尺寸），不僅有助細胞工程基礎研究，尚能藉微創手術技巧精準擊破癌細胞，更可摧毀抗藥性日趨強大的病菌，稱之為現今最新開發各式奈米刀技術之延伸研究【1-3】亦不為過，對生醫光電領域之貢獻實不容小覷。

## 柒、結論

- 一、本研究自製的「顯微電擊系統」，係以「可調高電壓電源供應器」與「光學穿透反射兩用數位顯微鏡」所組成，在此為最重要之電擊測試與觀察設備。
- 二、自製「可調高電壓電源供應器」之實際輸出電壓至少可達 2300V，經計算其理論極限值近 10000V，惟須視其電子元件本身耐受度而定。
- 三、當輸入倍壓線路組之電量為固定值，其轉換倍率（或效率）亦為固定值；若輸入電量為浮動值，較大電壓、較小電流與功率，有助減少倍壓轉換過程能量損耗。
- 四、自製「光學兩用數位顯微鏡」兼具穿透與反射方式提供光源，觀察倍率可於 10~500 倍範圍自由調整，既可照相又可錄影，還能直接調整焦距。
- 五、定點進行電擊組織、細胞過程，破壞面積隨尖徑愈粗而明顯增大，但電擊深度會相對變淺；換言之，組織細胞表面破壞形貌的深／寬比，與電流密度大小呈正比關係。
- 六、電擊筆愈尖愈可降低電擊輸出功率，細胞壁由燃燒轉為熔穿模式，過程約 0.3 秒完成；洋蔥下表皮細胞(385V、0.53mA、0.2W)對電擊耐受度大於吊竹草(200V、0.3mA、0.06W)，其差異與細胞壁厚度（前者 6.6 $\mu\text{m}$ 、後者 2.2 $\mu\text{m}$ ）呈正比，燃燒單位厚度細胞壁所需能量約為 0.03W/ $\mu\text{m}$ 。
- 七、持續拖曳針尖電擊呈現切割效果，切割路徑相對於細胞長度及其長軸方向夾角，將決定不同的切口寬度。
- 八、本研究自製顯微電擊系統，不僅造價低廉、製造與操作簡便，其研究成果亦有助細胞工程基礎研究，尚能藉微創手術技巧精準擊破癌細胞，更可運用於摧毀抗藥性日趨強大的病菌，對生醫光電領域之貢獻不容小覷。

## 捌、參考資料及其他

### 一、參考資料：

1. 謝達斌、李百祺、王崇人（2009）。奈米探針開創光聲醫療。科學人，86，102-105。
2. Elizabeth Svoboda（2012）。細菌剋星奈米刀。科學人，119，37。
3. 沈雅雯（2014年1月3日）。奈米刀電擊癌細胞、台大成果居亞洲之先。中央廣播電台。取自 <https://tw.news.yahoo.com/%E5%A5%88%E7%B1%B3%E5%88%80%E9%9B.html>
4. 鄧志鵬（2007）。利用尖端微結構與直流脈衝裂解細胞之研究（碩士論文）。嘉義市：國立嘉義大學生物機電工程學系。
5. 林承中、吳希天（2014）。綠能科技研究之微藻電穿孔裂解技術發展現況分析。新新季刊，42(1)，86-97。
6. 張瓊方、林格立（2013年5月）。電燒隱形冠軍—大瓏企業。台灣光華雜誌。取自 <http://news.sina.com.tw/magazine/article/11253.html>
7. 詹修菱（2011）。微創醫療電燒對組織熱損傷及組織沾黏研究（碩士論文）。台北市：台北醫學大學口腔醫學院牙醫系研究所。
8. 教育部審定（2014）。自然與生活科技—1。新北市：南一書局。
9. 潘禹岑（2014）。活用國中自然教學理化講義—5。新北市：建弘出版社。
10. 王捷（2014）。國中點線面全方位評量講義—6。新北市：南一書局。
11. Knight Lu（2014）。CHD—133可調直流電源供應器組裝說明書。新北市：堃喬股份有限公司。
12. Knight Lu（2014）。數字型直流電壓電流雙顯示錶頭組裝說明書。新北市：Light-Tech Electronic Co., LTD。
13. 陳廷杰（2007）。高效率 PWM-PFM 雙模升壓轉換-調整器隻白光二極體驅動設計分析（碩士論文）。台中市：朝陽科技大學資訊工程系。
14. 謝從華、柳俊（2004）。植物細胞工程。北京市：高等教育出版社。
15. 細胞壁（2015）。百度百科。取自 <http://baike.baidu.com/view/42836.htm>。
16. 王瀚穎（2013）。窺探動作電位的離子通道基礎。科學月刊，524，595-596。

## 【評語】 030810

1. 本作品自製顯微電極系統，並探討其輸出電量與組織細胞間之關係。作者知識豐富，在作品的書面與文字表現上都很努力。
2. 本作品若能在系統的應用動機及工作範圍更明確的界定並與飛秒雷射技術作切割，可讀性將更高。