

超微型電磁強健光纖光學麥克風

Miniaturized Electromagnetic Robust Fiber-optic Microphone

劉承揚、力博宏、陳維鈞、黃薇瑄

Cheng-Yang Liu, Po-Hung Li, Wei-Chun Chen, Wei-Hsuan Huang

本研究提出一種高靈敏度微型化光纖式 Fabry-Perot 聲學麥克風，結合毛細管結構與水凝膠振膜，實現寬頻光學聲壓感測，感測頭尺寸僅約 $125\ \mu\text{m} \times 170\ \mu\text{m}$ ，具高度微型化優勢。實驗結果顯示，在 1550 nm 波長操作下，於 100 Hz 至 10 kHz 具穩定線性響應，當水凝膠濃度為 40% 與 80% 時，靈敏度分別達 122 mV/Pa 與 410 mV/Pa，此感測器具結構簡單、低成本及抗電磁干擾等優點，適用於人工電子耳、助聽器、醫療器材與消費性電子產品。

This study presents a high-sensitivity, miniaturized fiber-optic Fabry-Perot acoustic microphone that integrates a capillary-tube structure with a hydrogel diaphragm to achieve wideband optical acoustic pressure sensing. The sensing head has an overall size of approximately $125\ \mu\text{m} \times 170\ \mu\text{m}$, demonstrating a highly compact form factor. Experimental results show that, when operated at a wavelength of 1550 nm, the proposed microphone exhibits stable and linear frequency response over a range from 100 Hz to 10 kHz. For hydrogel concentrations of 40% and 80%, the achieved sensitivities reach 122 mV/Pa and 410 mV/Pa, respectively. Owing to its simple structure, low fabrication cost, and strong immunity to electromagnetic interference, the proposed sensor is well suited for applications in cochlear implants, hearing aids, medical devices, and consumer electronics.

一、前言

麥克風作為聲學感測與聲音轉換的核心元件，長期以來在多項關鍵技術與應用領域中扮演不可或缺的角色，包括生醫影像系統、語音互動與人機介面，以及助聽器與聽力輔具等醫療裝置⁽¹⁻³⁾。隨著智慧醫療、穿戴式裝置與消費性電子產品的快速發展，市場對於聲學感測元件在靈敏度、穩定性、微型化與抗干擾能力方面皆提出更高要求。然而，目前主流的電性麥克風技術，如動圈式、壓電式與電容式麥克風⁽⁴⁾，雖已具備成熟製程與廣泛應用基礎，仍不可避免地受到電磁干擾、電路雜訊與靈敏度提升瓶頸等限制，尤其在高電磁環境、微型化系統與長距離訊號傳輸場域中，其性能往往受到顯著影響。相較之下，光纖式麥克風以光訊號作為資訊載體，具備高靈敏度、低傳輸損耗、低背景雜訊以及對電磁干擾具高度免疫性等優點，因此逐漸成為新一代聲學感測技術的重要發展方向。近年來，研究人員已提出多種

基於光學共振與干涉原理的光纖聲學感測架構，包括 Michelson 干涉儀、Mach-Zehnder 干涉儀、光纖布拉格光柵、微結構干涉儀，以及 Fabry-Perot 干涉儀等⁽⁵⁻⁷⁾。其中，Fabry-Perot 型光纖麥克風因其結構簡單、體積小、易於與光纖系統整合，且具備高靈敏度等特性，受到廣泛關注。

特別是光纖端面式 Fabry-Perot 干涉儀，其通常由光纖端面與一反射振膜形成微型光學腔體，聲壓作用於振膜時會導致腔長變化，進而調變反射光訊號。此類元件的感測效能高度依賴於微腔結構與振膜材料的物理特性，過去數十年中，已有多種材料被用作 Fabry-Perot 光纖麥克風的振膜，包括矽、氮化矽、玻璃、鋁、銀、高分子材料、石墨烯、氧化石墨烯、幾丁聚醣、以及各式複合薄膜等⁽⁸⁻¹⁰⁾。這些振膜多為圓形結構，並固定於中空腔體端面形成封閉腔室，其內部空氣所造成的阻尼效應，往往導致振膜振幅衰減，進而限制聲學靈敏度。此外，傳統振膜在振動過程中所產生的徑向拉伸效應，以及製程中殘留的機械應力，亦會對感測器的靈敏度與頻率響應造成不利影響，特別是在低頻區域更為明顯。為克服上述限制，近年來具備可調式機械性質的水凝膠材料逐漸被視為新型振膜的潛力選項，水凝膠振膜不僅具有良好的柔順性與快速響應特性，亦具備可調控的彈性模數、優異的化學穩定性與低成本優勢，同時對電磁干擾具天然免疫能力。透過調整交聯密度與材料濃度，水凝膠振膜的厚度與機械特性可被精確控制，並可由天然或合成高分子網絡簡易製備。此外，其良好的生物相容性與刺激響應特性，使其在生醫感測與微流體系統中具有額外的應用潛力。

基於上述研究背景，本研究提出一種新型微型化 Fabry-Perot 光纖聲學麥克風，結合單模光纖、毛細管結構與水凝膠振膜，以實現高靈敏度且寬頻響應的光學聲壓感測。該感測器之製作流程僅包含熔接、切割、浸鍍與紫外光固化四個步驟，製程簡單且具高度重現性。藉由將毛細管熔接並切割於單模光纖端面，可形成穩定的 Fabry-Perot 微型腔體，再於毛細管另一端形成水凝膠振膜，最終使感測頭整體尺寸僅約為 125 μm ，與裸光纖直徑相當，展現極高的微型化優勢。本研究進一步透過調整水凝膠濃度，系統性探討振膜機械特性對聲學靈敏度、頻率響應與最小可偵測聲壓的影響。實驗結果顯示，所提出之光纖聲學麥克風可於 100 Hz 至 10 kHz 頻段內提供穩定且高線性的感測表現，並可在非共振條件下維持平坦的低頻響應。綜合而言，本研究所提出之水凝膠 Fabry-Perot 光纖麥克風，不僅在尺寸、靈敏度與抗電磁干擾能力方面具備顯著優勢，也為其在結構健康監測、生醫聲學感測與微尺度聲學量測等應用領域，提供一項具高度實用價值的儀器技術方案。

二、感測原理和數值模擬

本研究所提出之光纖式 Fabry-Perot 聲學麥克風，係以毛細管結構與水凝膠振膜所形成之微型干涉腔體作為核心感測單元，其感測原理奠基於光學干涉與振膜機械變形之耦合效應。如圖 1(a) 所示，單模光纖端面與水凝膠振膜之間形成一空氣間隙，構成 Fabry-Perot 干涉微腔，當外界聲波作用於水凝膠振膜時，聲壓將引發振膜產生週期性位移，使腔長隨時間產生微小變化，進而調變反射光強，完成聲學訊號至光學訊號的轉換。由於單模光纖端面反射率相對較低，該 Fabry-Perot 微腔可近似視為雙光束干涉系統，其反射光強可透過干涉強度解調方式進行分析。在穩定雷射波長操作下，反射光強與腔長變化之關係呈現明確的週期性行為。當雷射波長調整並鎖定於干涉條紋的正交點 (quadrature point) 時，系統可同時獲得最大靈敏度與最佳動態範圍，且操作於線性區域，有利於後續訊號解調與量測穩定性。圖

1(b) 定義了該微型光纖麥克風的幾何參數，其中毛細管長度為 l ，水凝膠振膜厚度為 h ，毛細管與振膜半徑分別為 r_s 與 r_h 。在此結構下，反射光強 I_r 可表示為干涉函數，其主要取決於入射光強、干涉可見度以及微腔長度變化。當聲波入射至振膜時，振膜中心將隨聲壓以角頻率 ω 產生位移，導致腔長出現振幅為 Δl 的正弦調變。由此可知，反射光強的變化幅度與振膜位移呈線性關係，使得聲壓訊號可透過光強變化進行直接解調，最終，經由光電二極體將調變後的光訊號轉換為交流電訊號，即可完成聲學量測。

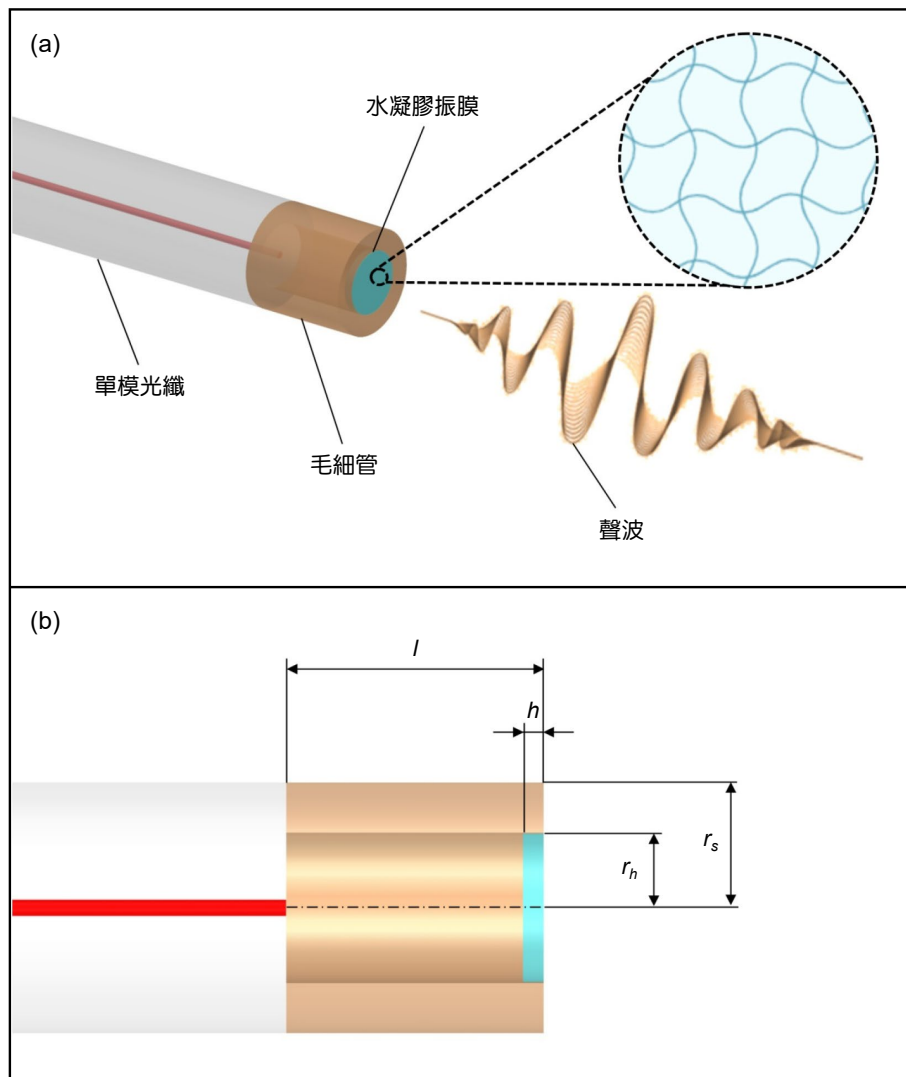


圖 1. (a) 基於 Fabry-Perot 干涉微腔與水凝膠振膜之微型化光纖式麥克風示意圖；(b) 微型光纖式麥克風之幾何結構定義圖。

為深入了解所提出光纖式 Fabry-Perot 麥克風的動態響應特性，本研究進一步利用有限元素法進行數值模擬，分析不同水凝膠濃度下振膜的共振行為與位移響應。水凝膠材料選用聚乙二醇二丙烯酸酯 (PEGDA)，其機械性質可透過改變濃度進行調控，相關材料參數則透過拉伸試驗進行量測與驗證。模擬中，40% 與 80%

PEGDA 水凝膠之密度分別設定為 1210 kg/m^3 與 1340 kg/m^3 ，楊氏模數分別為 5.8 MPa 與 11.5 MPa ，而泊松比分別為 0.149 與 0.318 。上述參數顯示，隨著水凝膠濃度增加，其材料剛性明顯提升，進而影響振膜的動態特性，在固定振膜直徑與厚度條件下，振膜的共振頻率與聲壓靈敏度皆與水凝膠濃度呈高度相關。模擬結果如圖 2(a) 所示，在相同入射平面聲波壓力 (100 Pa) 下，振膜的共振頻率會隨水凝膠濃度增加而顯著提升，第一階共振頻率由 40% 水凝膠的 $31,276 \text{ Hz}$ 增加至 80% 水凝膠的 $46,102 \text{ Hz}$ ，顯示材料剛性對高頻響應具有關鍵影響。此外，模擬亦顯示，在相同聲壓條件下，80% 水凝膠振膜的最大位移可達 28.8 nm ，高於 40% 水凝膠的 22.5 nm ，反映其在特定頻率區間內具備更高的感測靈敏度潛力。圖 2(b) 則呈現振膜中心位移與聲壓之關係，結果顯示在 400 Hz 操作頻率下，振膜位移於 10 Pa 至 200 Pa 範圍內呈現良好的線性響應，證實該感測結構適合用於實際聲壓量測應用，此一線性特性對於光學干涉解調尤為重要，可確保反射光強變化與輸入聲壓之間具備穩定對應關係，降低非線性誤差。

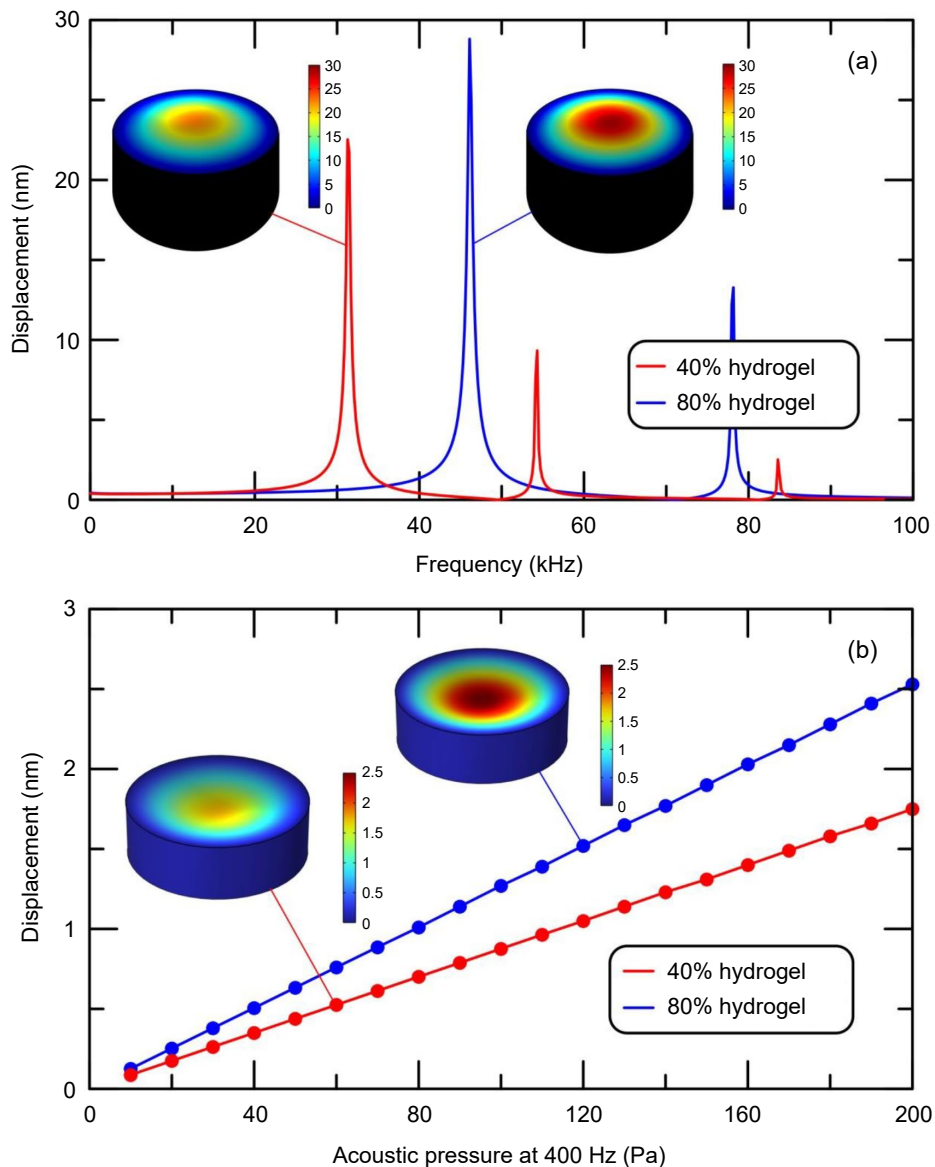


圖 2. (a) 40% 與 80% 濃度水凝膠振膜之共振頻率模擬結果；(b) 不同濃度水凝膠振膜之聲壓響應模擬結果。

隨著 PEGDA 濃度由 40% 提升至 80%，水凝膠振膜之楊氏模數與機械剛性明顯增加，使其共振頻率向高頻區域位移，此一剛性提升不僅影響振膜的動態響應行為，也改變其不同頻段下對聲壓的轉換效率，進而主導光學干涉腔之腔長調變幅度與整體感測靈敏度。綜合上述感測原理與數值模擬結果可知，透過調整水凝膠濃度，可在振膜共振頻率、靈敏度與頻率響應之間取得彈性調控，使該光纖式 Fabry-Perot 麥克風能同時兼顧寬頻量測與高靈敏度需求，此一設計策略不僅提升元件的工程彈性，也為未來針對不同應用場景，如低頻聲學監測或高靈敏生醫感測，進行客製化設計，提供重要的物理依據與實用指引。

三、製程與實驗

本研究提出之 Fabry-Perot 光纖式聲學麥克風，其感測頭主要由三個元件組成，分別為單模光纖、毛細管結構以及水凝膠振膜，整體設計目標在於兼顧高度微型化、結構穩定性與高靈敏度聲學感測能力，同時降低製作成本與製程複雜度，使其具備實際應用與量產潛力。如圖 3(a) 所示，感測器製程首先選用內徑 $75\ \mu\text{m}$ 、外徑 $125\ \mu\text{m}$ 的石英毛細管，利用光纖熔接機將其熔接至已切割平整之單模光纖端面，此步驟為形成 Fabry-Perot 干涉腔體的關鍵，其熔接品質將直接影響微腔光學穩定性與反射干涉條紋品質。完成熔接後，研究人員於顯微鏡輔助觀察下，使用光纖切割器精準切除毛細管另一端，將其長度控制為 $l = 170\ \mu\text{m}$ 。透過此方式，可確保 Fabry-Perot 微腔腔長一致性，並有效提升不同樣品之間的製程重現性。接續步驟為水凝膠振膜之製作，切割完成之光纖端頭固定於線性馬達控制平台，並緩慢浸入預先配置完成的 PEGDA 水凝膠溶液中，使毛細管端面形成一層均勻薄膜。為降低水凝膠之楊氏模數、提升振膜柔順性與聲學靈敏度，本研究於水凝膠溶液中添加微量氧化石墨烯作為功能性添加物，氧化石墨烯溶液係將氧化石墨烯粉末分散於去離子水中，濃度控制為 $1\ \text{mg/mL}$ 。在材料配置方面，40% PEGDA 水凝膠溶液係由 4 g PEGDA 與 0.1 g 光起始劑溶解於 4 mL 去離子水與 2 mL 氧化石墨烯溶液中，而 80% PEGDA 溶液則以 8 g PEGDA 與 0.1 g 光起始劑溶解於 2 mL 氧化石墨烯溶液中，所有水凝膠溶液均於避光環境中充分混合，以避免光起始劑提前反應。完成浸鍍後，樣品隨即進行紫外光照射 5 分鐘，透過自由基聚合反應使水凝膠薄膜快速固化，最終形成穩定之水凝膠振膜。此一製程僅包含熔接、切割、浸鍍與紫外光固化四個步驟，製作流程簡單，對儀器與環境要求相對低，具備高度工程可行性。

圖 3(b) 為完成製作後之 Fabry-Perot 光纖麥克風感測頭顯微影像，可清楚觀察到水凝膠振膜均勻覆蓋於毛細管端面。經量測，其振膜厚度約為 $h = 24\ \mu\text{m}$ ，顯示浸鍍與固化製程具備良好厚度控制能力。進一步透過掃描式電子顯微鏡觀察振膜表面形貌，如圖 3(c) 所示，水凝膠振膜表面呈現高度平整且均勻的微觀結構。此一特性對於 Fabry-Perot 干涉腔而言至關重要，可有效提升干涉條紋對比度，確保反射光訊號穩定且具高訊噪比。透過線性馬達控制浸鍍深度與速度，本研究製作之水凝膠振膜厚度穩定控制於約 $24\ \mu\text{m}$ ，不同樣品間厚度與反射光譜自由光譜範圍皆具良好重現性。水凝膠的光學特性則與 PEGDA 濃度密切相關，根據估算，40% 與 80% PEGDA 水凝膠之折射率分別約為 1.39 與 1.43。隨著 PEGDA 濃度增加，水凝膠振膜的透明度顯著提升，有助於光訊號於微腔內有效傳輸並降低散射損耗，進一步提升感測精度。圖 3(d) 顯示不同濃度水凝膠振膜於室溫下之應力應變曲線，在線性彈性區間內，應變與應力呈良好線性關係，符合虎克定律，可觀察到當 PEGDA 濃度由 40% 提升至 80% 時，其線性區間斜率明顯增加，代表水凝膠楊氏模數隨濃度提升而增大，此結果顯示該水凝膠振膜具備可調式機械特性，相較於傳統矽或塑膠振膜，更具設計彈性。為評估

Fabry-Perot 微腔之光學品質，本研究利用寬頻光源、光纖循環器與解析度 0.5 nm 之光譜分析儀進行反射光譜量測，圖 3(e) 顯示 80% PEGDA 水凝膠振膜所對應之反射光譜，其自由光譜範圍 (free spectral range, FSR) 約為 2 nm，與微腔幾何尺寸相符。隨著水凝膠濃度降低，反射光譜之 FSR 與干涉條紋對比度亦隨之下降，顯示材料光學性質對干涉效應具有明顯影響。

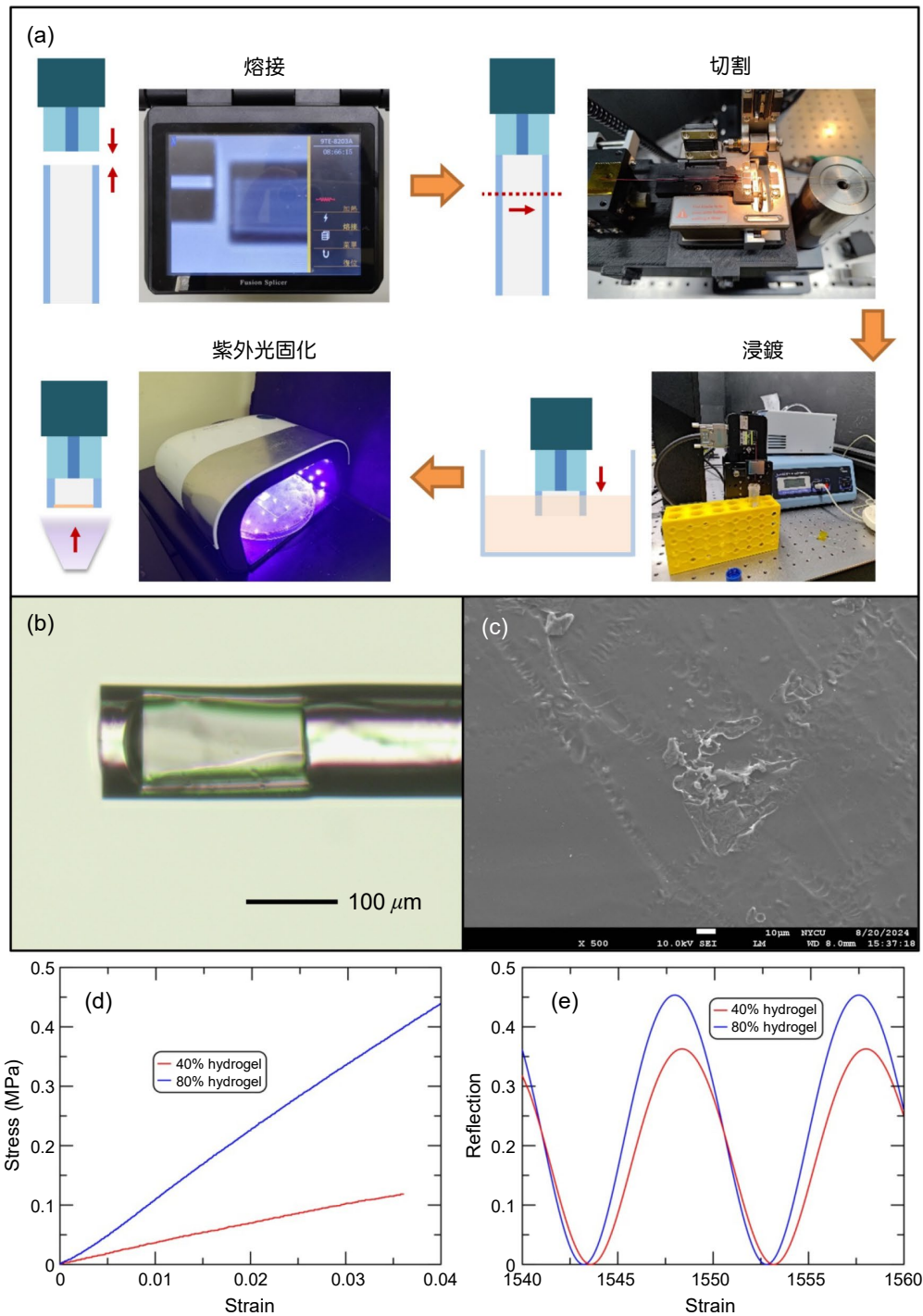


圖 3. (a) 具 Fabry-Perot 干涉微腔與水凝膠振膜之微型化光纖式麥克風製作流程示意圖；(b) 製作完成之光纖式麥克風感測頭顯微影像；(c) 水凝膠振膜之前視掃描式電子顯微鏡影像；(d) 水凝膠振膜之應力應變曲線；(e) 光纖式 Fabry-Perot 微腔之反射光譜。

圖 4 為聲壓量測實驗系統，整體系統包含分佈回饋雷射、光纖循環器、揚聲器、光電偵測器與示波器。雷射光源中心波長為 1550 nm，可進行約 0.6 nm 範圍之精細調諧，以確保系統操作於干涉正交點。聲學訊號由電腦控制揚聲器產生，經空氣傳遞後作用於光纖麥克風振膜，反射光訊號再經光電偵測器轉換為電訊號，並由示波器記錄其振幅變化。實驗中，感測頭以水平方式固定，並精準對準揚聲器中心，兩者距離維持 10 mm。揚聲器另安裝於旋轉平台，以調整聲波入射角度。整套系統置於暗室中，以避免環境雜散光對量測結果造成影響。所有量測實驗均於室溫一般實驗室環境下進行，未特別控制濕度條件；由於光纖感測架構具抗電磁干擾特性，環境電磁雜訊對量測結果影響可忽略。在 200 mPa 聲壓條件下，量測光纖麥克風之時間域響應，如圖 5 所示。對於 40% 與 80% 凝膠振膜，在 100 Hz 至 5000 Hz 不同頻率下，皆展現低總諧波失真，其中 40% 振膜之 THD 介於 0.119%–0.189%，80% 振膜則介於 0.066%–0.485%，顯示其具備良好線性與高保真度聲學感測能力。頻率域分析結果如圖 6 所示，透過快速傅立葉轉換可獲得明顯主頻峰值。40% 水凝膠振膜於 100 Hz、400

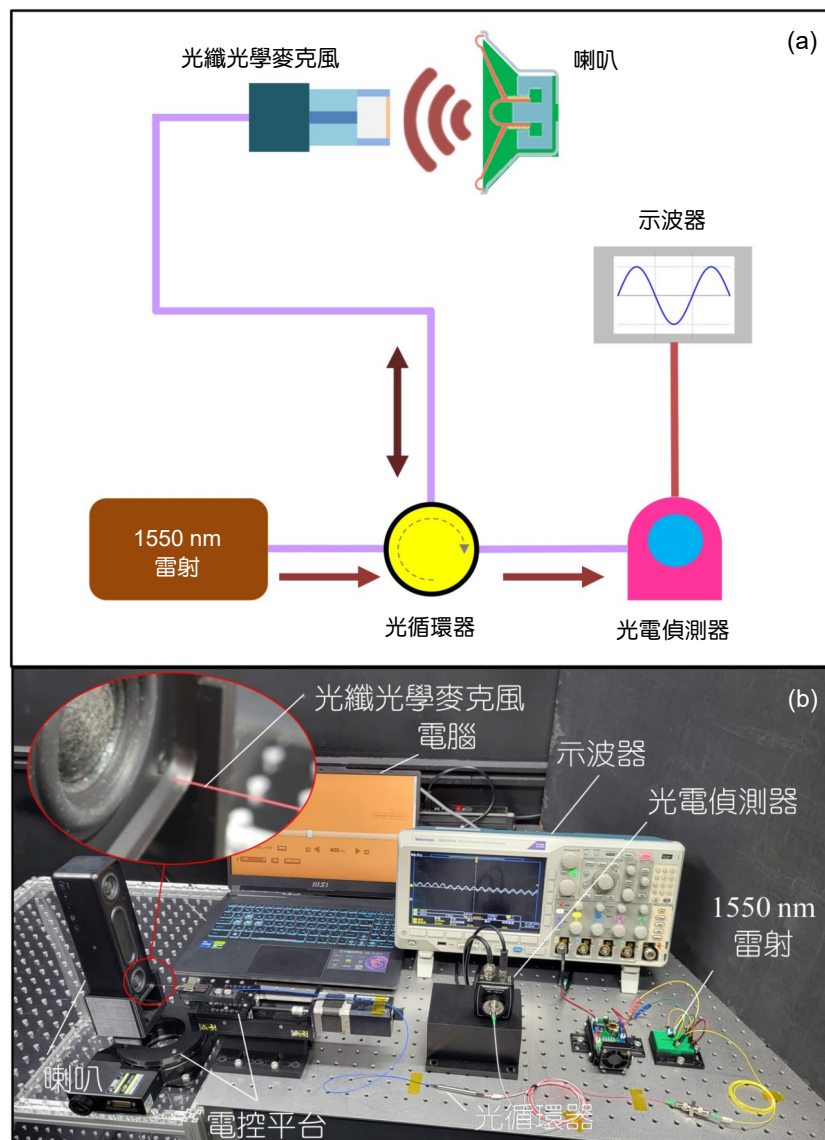


圖 4. (a) 聲壓量測實驗系統架構示意圖；(b) 聲壓量測實驗系統實際配置照片。

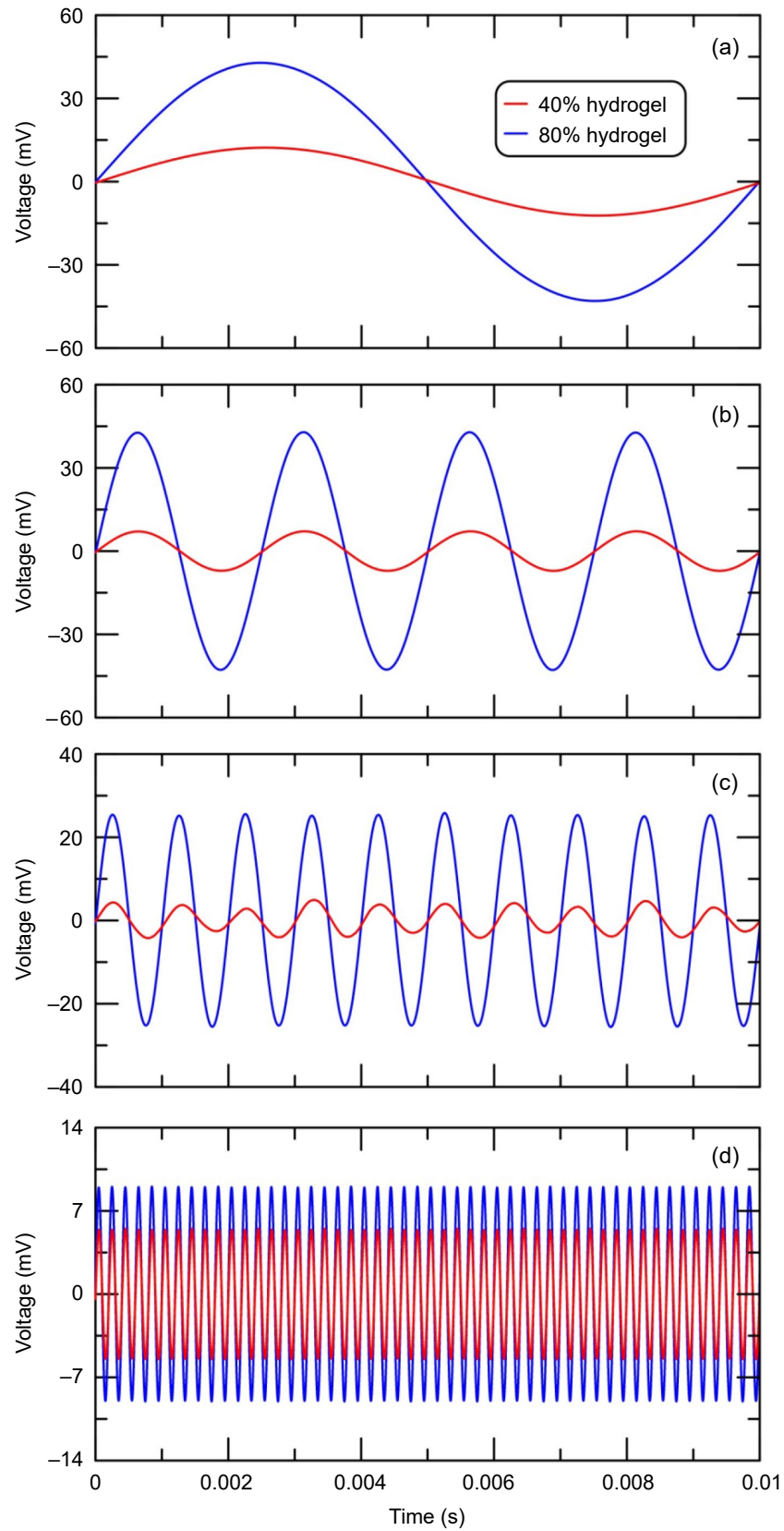


圖 5. 具 40% 與 80% 水凝膠振膜之光纖式麥克風在不同聲學頻率下的時間域響應：(a) 100 Hz、(b) 400 Hz、(c) 1000 Hz 及 (d) 5000 Hz。

Hz、1000 Hz 與 5000 Hz 時之訊噪比分別為 57 dB、56 dB、30 dB 與 54 dB，80% 水凝膠振膜則分別為 49 dB、60 dB、50 dB 與 55 dB。最小可偵測聲壓則依據噪聲底與 SNR 計算，在 400 Hz 時，40% 與 80% 水凝膠振膜分別為 $66.69 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 與 $44.37 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ ，顯示高濃度水凝膠於高頻段具更優異感測性能。

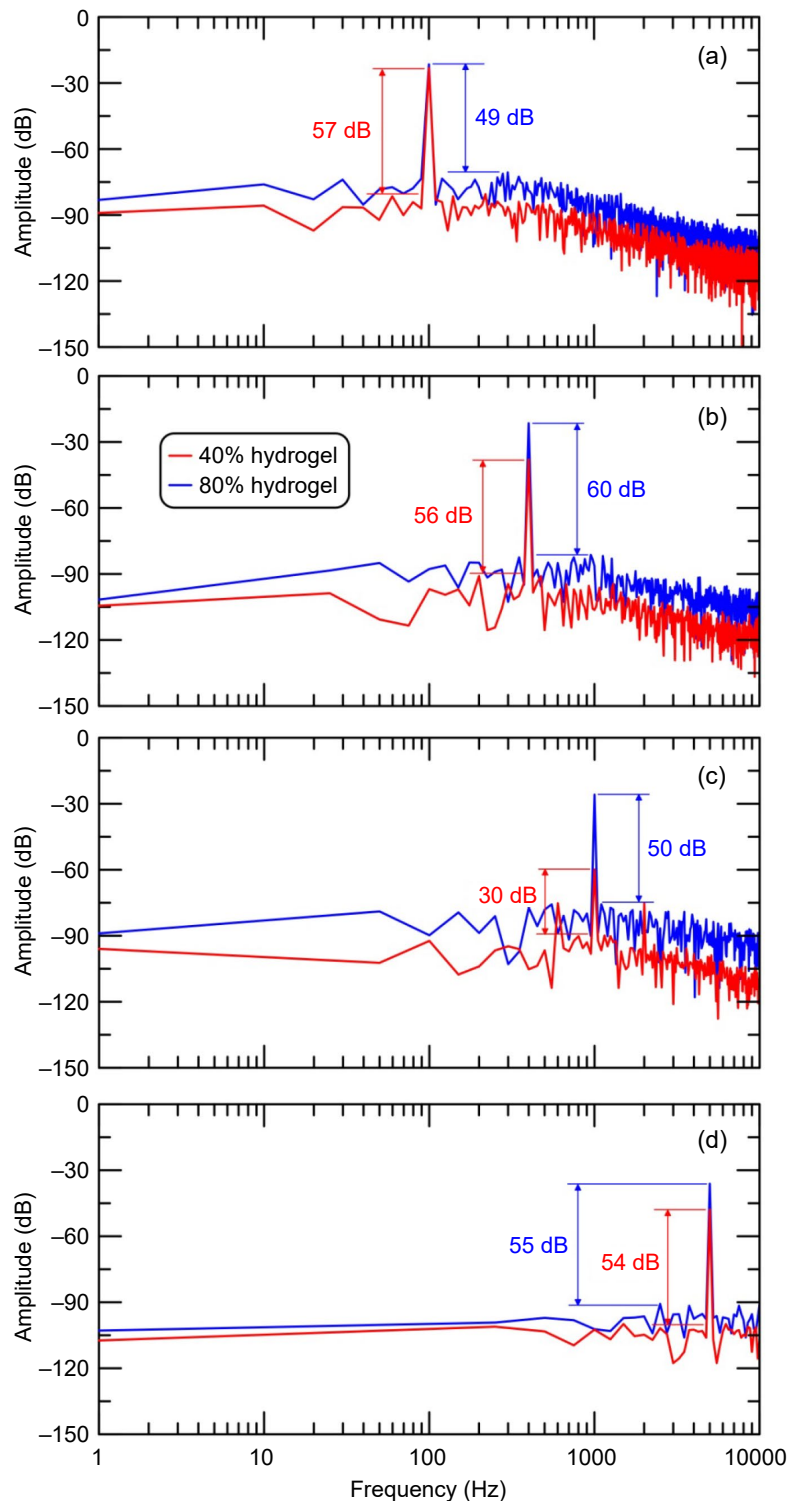


圖 6. 具 40% 與 80% 水凝膠振膜之光纖式麥克風在不同聲學頻率下的頻率域響應：(a) 100 Hz、(b) 400 Hz、(c) 1000 Hz 及 (d) 5000 Hz。

為全面評估所提出 Fabry-Perot 光纖式聲學麥克風之實際量測性能，本研究針對頻率響應、靈敏度、線性度、方向性、長時間穩定性以及與既有技術之性能比較等面向，進行一系列系統性實驗與分析。所有量測結果均針對兩種不同濃度之水凝膠振膜 (40% 與 80%) 進行比較，以探討材料機械特性對聲學感測行為之影響。圖 7(a) 顯示所提出光纖式麥克風在 100 Hz 至 10 kHz 頻率範圍內的頻率響應結果，對於 80% 水凝膠振膜，其頻率響應曲線可明顯區分為三個區段：首先，在 100 Hz 至 400 Hz 區間呈現相對平坦的平台區，顯示該振膜於低頻範圍內可提供穩定且一致的聲壓響應；其次，在 400 Hz 至約 4500 Hz 區間，響應曲線呈現較為陡峭的上升斜率；最後，於 4500 Hz 至 10 kHz 高頻區域，響應快速上升，顯示振膜逐漸接近其共振頻率。相較之下，40% 水凝膠振膜的頻率響應行為則呈現不同趨勢，其響應幅度自低頻起逐漸下降，並於約 2500 Hz 附近達到最低點後，再隨頻率提升而緩慢上升。此「先下降後上升」的頻率響應特性，主要可歸因於水凝膠振膜的機械性質與共振行為。在低頻區域，振膜因具較高柔順性，可有效隨聲壓振動，形成相對平坦的頻率響應；隨著頻率增加，振膜的機械阻抗提升，使其振動幅度逐漸受限，導致感測響應下降；當頻率進一步接近振膜的固有共振頻率時，振膜振幅再次放大，造成響應回升。值得注意的是，該共振效應在 80% 水凝膠振膜中表現更為明顯，主要原因在於其較高的楊氏模數與材料剛性，使其共振頻率高於 40% 水凝膠振膜，此結果顯示，透過調整水凝膠濃度，可有效調控感測器於不同頻率區間內的響應行為，為實際應用提供高度設計彈性。由於 80% 水凝膠振膜具較高剛性，其第一階共振頻率高於 40% 樣品，使其在中高頻區段 (400 Hz 以上) 更接近共振操作條件，因而產生較大的有效位移與光學干涉訊號變化，呈現較高聲壓靈敏度，相對地，40% 水凝膠振膜因柔順性較佳，則有利於在較寬頻段內維持平坦頻率響應。

在頻率為 400 Hz 的條件下，進一步量測光纖式麥克風輸出振幅隨聲壓變化之關係，如圖 7(b) 所示。實驗結果顯示，無論為 40% 或 80% 水凝膠振膜，其輸出振幅皆隨聲壓呈現良好線性增加趨勢，顯示該感測系統具備穩定且可預測的聲壓轉換能力。在頻率為 400 Hz 的條件下，進一步量測光纖式麥克風輸出振幅隨聲壓變化之關係，如圖 7(b) 所示。實驗結果顯示，無論為 40% 或 80% 水凝膠振膜，其輸出振幅皆隨聲壓呈現良好線性增加趨勢，顯示該感測系統具備穩定且可預測的聲壓轉換能力。由線性擬合結果可得，40% 與 80% 水凝膠振膜之線性度分別為 0.9645 與 0.9922，顯示其線性響應表現優異。其中，80% 水凝膠振膜展現更高線性度與更大斜率，對應之最高聲壓靈敏度分別達 122 mV/Pa 與 410 mV/Pa，顯示高濃度水凝膠振膜在此頻率下具備更優異的聲壓感測能力。此高靈敏度表現主要歸功於 Fabry-Perot 干涉式微腔結構，其可即時量測振膜最大位移，並將微小腔長變化轉換為可觀測的光強變化，進而提升整體感測解析度。此外，高濃度水凝膠振膜因具較高剛性，可在相同聲壓下產生更顯著的干涉訊號變化，使其整體靈敏度優於低濃度樣品。

為評估所提出光纖式麥克風對入射聲波方向之響應特性，本研究於消音室中進行方向性量測實驗，揚聲器固定於可程式控制的水平旋轉平台上，並使水凝膠振膜法向與揚聲器中心位於同一平面。當振膜正對揚聲器時，入射角定義為 $\theta = 0^\circ$ ，如圖 8(a) 內嵌示意圖所示。在固定聲壓 200 mPa、頻率 400 Hz 的條件下，每次旋轉角度設定為 15° ，量測不同入射角下之輸出振幅。所有量測結果均以 $\theta = 0^\circ$ 時的最大響應進行正規化。實驗結果顯示，兩種水凝膠振膜皆呈現明顯方向性特徵，於 $\theta = 0^\circ$ 時響應最大，而於 $\theta = \pm 180^\circ$ 時降至最低，符合單一振膜式聲學感測元件之典型指向性行為。此外，可觀察到 80% 水凝膠振膜於各入射角度下的響應幅度均高於 40% 水凝膠振膜，進一步驗證其較高靈敏度優勢，此結果顯示，該感測器除具備高靈敏度外，亦可用於具方向性需求之聲學量測應用。

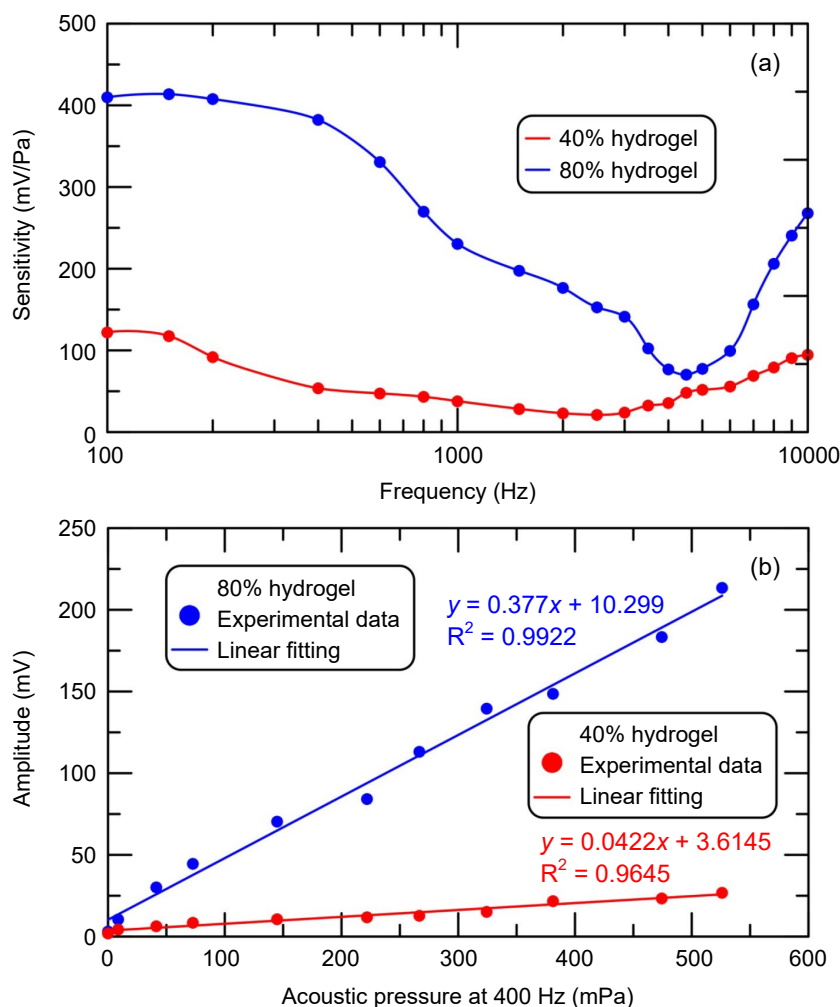


圖 7. (a) 具 40% 與 80% 水凝膠振膜之光纖式麥克風頻率響應特性；
(b) 於 400 Hz 下輸出響應振幅隨施加聲壓之變化關係。

為驗證感測器於長時間操作下之穩定性，本研究在固定 400 Hz 聲波激發條件下，連續量測 8 小時內的時間域響應。結果顯示，不同時間點量測所得之波形與頻譜幾乎無顯著差異，與圖 5(b) 所示結果一致。圖 8(b) 進一步呈現訊噪比隨時間變化之結果，其中 40% 與 80% 水凝膠振膜之 SNR 分別穩定維持於約 56 dB 與 60 dB，僅出現極小幅度波動，顯示該光纖式麥克風具備良好長期穩定性，適合實際連續監測應用。此外，圖 8(c) 顯示感測器在不同距離下之距離響應特性。當感測頭與揚聲器表面接觸時，定義距離為 0 mm，此時可獲得最大正規化響應，隨距離增加，感測訊號逐漸衰減，透過此結果可選擇最佳操作距離，以確保聲學量測具有最佳訊號強度與穩定度。

表 1 彙整並比較既有光纖式麥克風與本研究所提出裝置之性能指標，既有技術之靈敏度與頻率範圍取自文獻⁽⁸⁻¹⁰⁾，其測試條件多集中於共振頻率附近，且感測頭尺寸多為毫米等級，結果顯示，80% 水凝膠振膜所達到之 410 mV/Pa 靈敏度，較石墨烯振膜麥克風 (約 300 mV/Pa) 提升超過 36%，且顯著優於金屬振膜結構 (約 100 mV/Pa)。此外，本研究所實現之 100 Hz 至 10 kHz 頻率範圍，約為部分既有 Fabry-Perot 光纖麥克風的兩倍。在尺寸方面，本

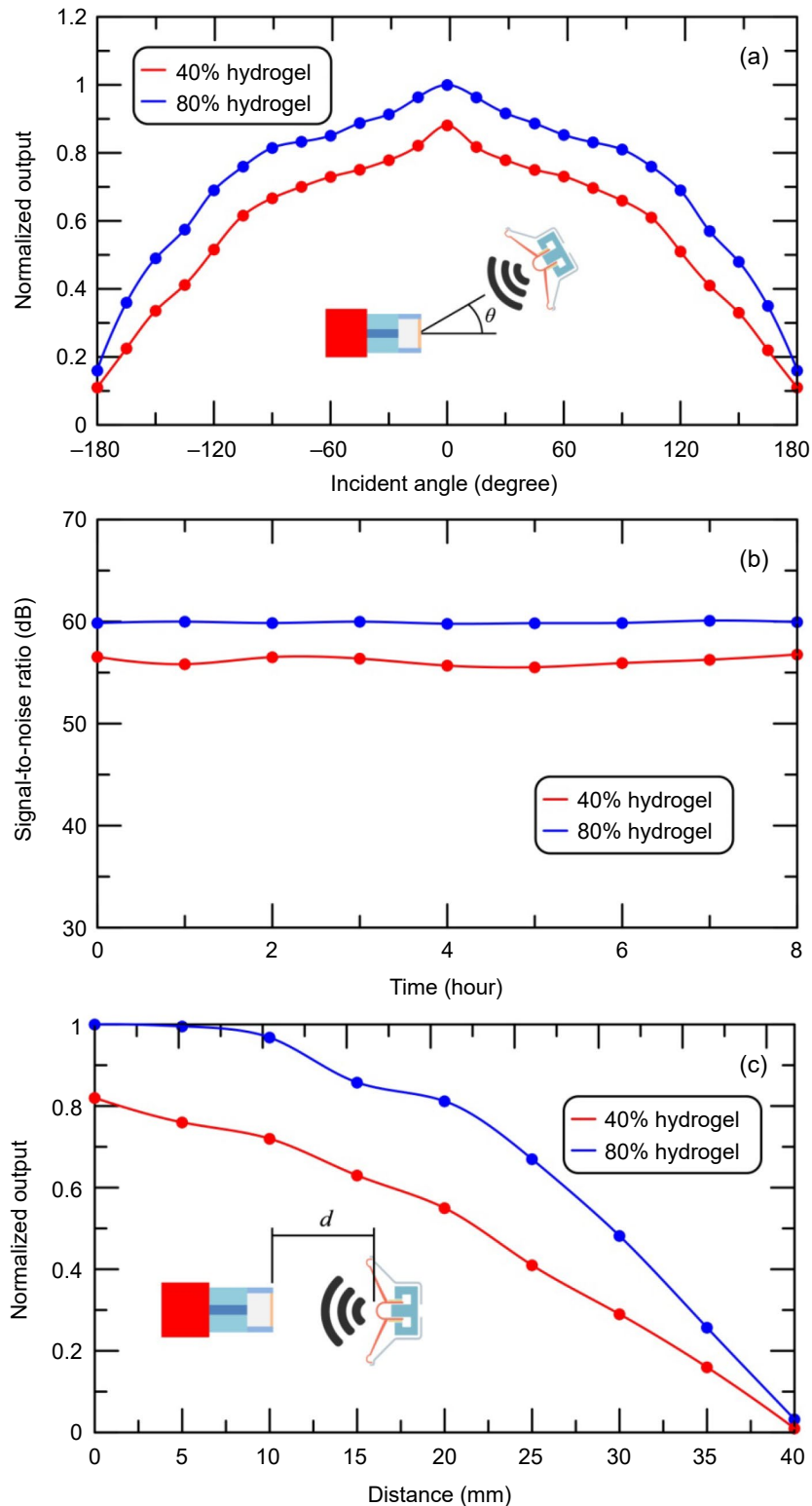


圖 8. (a) 於 400 Hz 下具 40% 與 80% 水凝膠振膜之光纖式麥克風方向性響應；(b) 光纖式麥克風之訊噪比；(c) 光纖式麥克風之距離響應。其中，方向性響應曲線以 $\theta = 0^\circ$ 時之最大強度進行正規化，距離響應曲線之原點設於揚聲器表面，並以原點位置之最大強度作為正規化基準。

表 1. 現有技術與本研究所提出之光纖光學麥克風性能比較表。

特性	本研究提出之光纖麥克風	現有技術 ⁽⁸⁻¹⁰⁾
靈敏度	40% 和 80% 水凝膠振膜分別為 122 mV/Pa 和 410 mV/Pa	金屬和石墨烯振膜分別為 ~100 mV/Pa 和 ~300 mV/Pa
頻率範圍	100 Hz 到 10 kHz	100 Hz 到 5 kHz 或更窄範圍
尺寸	直徑 125 μm 、長度 170 μm	大，通常是毫米等級
製造成本	低	高
功耗	可忽略	光學裝置可忽略、電子裝置則功耗高
製程	簡單	複雜

研究所提出之感測頭尺寸僅為 125 $\mu\text{m} \times 170 \mu\text{m}$ ，遠小於多數毫米等級的金屬或複合材料麥克風，配合低成本水凝膠材料與簡化製程，使其在實際製造成本與系統整合上更具優勢。再者，由於其為被動式光學感測架構，幾乎不需額外電力消耗，在能源效率與抗電磁干擾能力方面亦明顯優於傳統電性麥克風。

四、結論

本研究成功提出並驗證一種結合水凝膠振膜之微型化 Fabry-Perot 光纖式聲學麥克風，透過理論分析與實驗量測，完整展示其於高靈敏度、寬頻聲壓感測上的可行性與實用潛力。該感測器以單模光纖與毛細管所構成之 Fabry-Perot 干涉微腔為核心架構，搭配具可調式機械特性的水凝膠振膜，使微小聲壓引起的振膜位移能有效轉換為穩定且高解析度的光學訊號。在製程方面，本研究提出之光纖式麥克風僅需熔接、切割、浸鍍與紫外光固化四個步驟即可完成，製作流程簡單且具高度重現性，有效降低製程複雜度與設備門檻。最終成品之感測頭尺寸僅約 125 μm 直徑與 170 μm 長度，與裸光纖尺寸相當，展現極佳的微型化優勢，特別適合應用於空間受限或高度整合之感測系統中。實驗結果顯示，當水凝膠振膜濃度為 80% 時，該光纖式麥克風在 100 Hz 至 10 kHz 頻率範圍內皆可維持穩定聲壓感測表現，其聲壓靈敏度超過 70 mV/Pa，且在 400 Hz 下之最小可偵測聲壓可達 44.37 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ ，顯示其具備優異的弱聲訊號解析能力。此外，該感測器於方向性量測與長時間操作測試中，亦展現良好穩定性與一致性，證實其適合長時間連續聲學監測應用。整體而言，本研究提出之水凝膠 Fabry-Perot 光纖式聲學麥克風，兼具高靈敏度、體積小、製程簡單、低功耗與抗電磁干擾等優點，為傳統電性麥克風於特殊應用場域所面臨的限制提供一項具體可行的替代方案。由於感測頭尺寸與單模光纖相容，所提出之光纖式麥克風可直接整合於既有光纖模組、醫療導管或微型聲學系統中，具高度系統整合可行性。此一技術不僅可應用於精密聲學量測與結構健康監測，亦具有進一步拓展至醫療器材、助聽輔具、人工電子耳及消費性電子產品等領域之發展潛力，對於未來高整合度與高性能聲學感測系統的發展具有重要參考價值。在醫療應用方面，該微型光纖式麥克風可應用於人工電子耳或助聽器中作為高靈敏聲學感測元件，其超小尺寸有助於植入或貼附式設計，且光學被動架構可降低功耗與電磁干擾風險。需要注意的是，水凝膠材料之機械性質可能隨長時間環境濕度或溫度變化而產生微幅漂移，未來可透過表面封裝層設計、材料交聯改質或系統層級補償機制進一步提升長期穩定性。此外，針對實際應用場域之環境適應性與封裝可靠度，仍有進一步研究與工程優化空間。

參考文獻

1. G. Hong, *Science*, **369**, 638 (2020).
2. K. Ma, H. Chen, Z. Wu, X. Hao, G. Yan, W. Li, L. Shao, G. Meng, and W. Zhang, *Science Advances*, **8**, eadc9230 (2022).
3. C. Lenk, P. Hovel, K. Ved, S. Durstewitz, T. Meurer, T. Fritsch, A. Männchen, J. Kuller, D. Beer, T. Ivanov, and M. Ziegler, *Nature Electronics*, **6**, 370-380 (2023).
4. Z. Lin, S. Duan, M. Liu, C. Dang, S. Qian, L. Zhang, H. Wang, W. Yan, and M. Zhu, *Advanced Materials*, **36**, 2306880 (2024).
5. Y. Zhao, F. Xia, M. Chen, and R. Lv, *Sensors and Actuators A: Physical*, **273**, 107-112 (2018).
6. H. Yin, Z. Shao, R. Wang, and X. Qiao, *Optics Letters*, **48**, 5911-5914 (2023).
7. H. Wei, Z. Wu, Y. Wei, C. Wang, H. Zhang, F. Pang, C. Marques, C. Caucheteur, and X. Hu, *Optics & Laser Technology*, **168**, 109977 (2024).
8. Y. Chen, H. Wan, Y. Lu, Z. Wang, W. Fan, Z. Zhang, and F. Hu, *Optical Fiber Technology*, **68**, 102754 (2022).
9. G. Baglioni, R. Pezone, S. Vollebregt, K. Zobenica, M. Spasenović, D. Todorovi, H. Liu, G. Verbiest, H. Zant, and P. Steeneken, *Nanoscale*, **15**, 6343-6352 (2023).
10. Z. Zhu, H. Shuai, K. Jia, Y. Sun, B. Jia, and P. Zhou, *IEEE Access*, **12**, 30427-30433 (2024).

作者簡介

劉承揚先生為國立成功大學機械工程研究所博士，現為國立陽明交通大學生物醫學工程學系教授。 Cheng-Yang Liu received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Biomedical Engineering at National Yang Ming Chiao Tung University.

力博宏先生為國立陽明大學臨床醫學研究所博士，現為振興醫院耳鼻喉部主治醫師、國立陽明交通大學醫學系合聘教授。

Po-Hung Li received his Ph.D. in Clinical Medicine from National Yang Ming University. He is currently an Attending Physician in the Department of Otolaryngology at Cheng Hsin General Hospital and a Jointly Appointed Professor in the Department of Medicine at National Yang Ming Chiao Tung University.

陳維鈞先生為國立陽明交通大學材料科學與工程研究所博士，現為國研院國儀中心研究員暨鍍膜組組長。

Wei-Chun Chen received his Ph.D. in Materials Science and Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Researcher and Director of Intelligent Coating Equipment Technology Division at the National Center for Instrumentation Research, NIAR.

黃薇瑄小姐現為國立陽明交通大學生物醫學工程所碩士生。

Wei-Hsuan Huang is currently a M.S. student in the Department of Biomedical Engineering at National Yang Ming Chiao Tung University.