

基于驻极体发电机与能量管理电路的 自供电液晶智能窗

张 焯

浙江师范大学工学院, 浙江 金华

收稿日期: 2026年5月18日; 录用日期: 2026年5月29日; 发布日期: 2026年6月8日

摘 要

针对微纳发电机驱动液晶智能窗时存在阻抗不匹配、能量传输效率低以及大面积负载驱动困难等问题, 本文基于阻抗匹配原理, 提出了一种由动态拓扑重构能量管理电路驱动的高面积比自供电液晶智能窗系统。该系统以驻极体发电机(Electret nanogenerator, ENG)为能量输入单元, 以扭曲向列相(Twisted nematic, TN)液晶智能窗为调光负载, 并通过由电容-二极管单开关组成的管理电路实现子电容单元连接状态的动态重构, 从而匹配发电端与液晶窗负载之间的阻抗关系。实验结果表明, 在1 Hz机械激励下, ENG的输出峰值功率达到357.98 μW ; 经由包含35个子电容单元的能量管理电路调制后, 系统转移电荷量提高至4.51 μC 。基于该阻抗匹配策略, 仅采用有效面积为25 cm^2 的ENG, 即可在4 s内驱动面积为1116 cm^2 的TN型液晶智能窗, 驱动面积比达到1:45。同时, 智能窗表现出良好的电光调制性能, 其对比度为669:1, 可见光调制率为40.09%, 响应时间达到毫秒级, 并在长期循环测试中保持稳定工作。本研究有效突破了自供电智能窗的面积限制, 为零能耗绿色建筑的动态采光控制与隐私保护提供了可靠的工程方案。

关键词

自供电智能窗, 阻抗匹配, 高驱动比, 驻极体发电机, 能量管理电路

Self-Powered Liquid Crystal Smart Window Based on an Electret Nanogenerator and Energy Management Circuit

Ye Zhang

College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: May 18, 2026; accepted: May 29, 2026; published: June 8, 2026

Abstract

To address the impedance mismatch, low energy transfer efficiency, and difficulty in driving large-area loads encountered when micro/nano generators are used to power liquid crystal smart windows, this study proposes a high-area-ratio self-powered liquid crystal smart window system driven by a dynamically reconfigurable energy management circuit based on impedance matching. The system employs an electret nanogenerator (ENG) as the energy input unit and a twisted nematic (TN) liquid crystal smart window as the optical modulation load. A capacitor-diode-single-switch management circuit is introduced to dynamically reconfigure the connection states of the sub-capacitor units, thereby matching the impedance between the power generation unit and the liquid crystal window load. Experimental results show that, under 1 Hz mechanical excitation, the ENG achieves a peak output power of 357.98 μW . After modulation by the energy management circuit containing 35 sub-capacitor units, the transferred charge of the system increases to 4.51 μC . Based on this impedance matching strategy, an ENG with an effective area of only 25 cm^2 can drive a TN liquid crystal smart window with an area of 1116 cm^2 within 4 s, corresponding to a driving area ratio of 1:45. In addition, the smart window exhibits favorable electro-optical modulation performance, with a contrast ratio of 669:1, a visible-light modulation of 40.09%, a millisecond-level response time, and stable operation during long-term cycling tests. This study effectively overcomes the area limitation of self-powered smart windows and provides a viable engineering approach for dynamic daylight control and privacy protection in zero-energy green buildings.

Keywords

Self-Powered Smart Window, Impedance Matching, High Driving Area Ratio, Electret Nanogenerator, Energy Management Circuit

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球“双碳”目标与节能减排需求的推动下，降低建筑能耗已成为绿色低碳发展的重要研究方向。建筑能耗占全社会总能耗的比例超过 30% [1]，其中玻璃窗户能耗约占建筑能耗的 60% [2]，是影响建筑节能性能的重要环节。随着现代建筑中玻璃幕墙广泛应用，传统静态节能玻璃，难以满足室内光照、温度和隐私状态的动态调节需求[3]。因此，开发具有可调光、可控热和低能耗特征的智能窗技术，对提升建筑能源利用效率具有重要意义[4]。

目前，智能窗技术主要包括光致变色智能窗[5]、热致变色智能窗[6] [7]、气致变色智能窗[8]和电致变色智能窗[9] [10]等。其中，基于液晶材料的电致智能窗具有响应速度快、光调制范围较大、制备工艺成熟等优点，在建筑采光调控、隐私保护和低功耗光学器件中具有良好的应用前景[11]。然而，传统液晶电致智能窗需要外部电源持续供电，在一定程度上限制了其在建筑窗体和独立调光场景中的应用。为降低对外部电源的依赖，研究者提出了自供电智能窗系统，即通过能量收集装置将环境能量转化为电能，并直接或间接驱动电致智能窗工作[12]。

相较于电磁式能量收集器[13]、摩擦纳米发电机(Triboelectric nanogenerator, TENG) [14] [15]、介电弹性体发电机[16]等能量收集装置，基于静电感应与可变电容耦合机制的驻极体发电机(Electret nanogenerator,

ENG)具有结构简单、低频机械能收集、无持续磨损等特点,在低频机械能驱动的自供电器件中具有应用价值。然而,对于液晶智能窗等大面积电容性负载而言,以 ENG 和 TENG 为代表的微纳发电机通常表现为高电压、高内阻和低电荷输出,而大面积液晶智能窗需要高的驱动电荷和稳定的电压。

近年来,基于微纳能源的自供电智能窗已验证了技术可行性,但其规模化驱动仍然受到电源-负载之间匹配的限制。例如,Huang 等人[17]构建了一种结合 TENG 与有机太阳能电池的自供电电致变色智能窗系统,但由于 TENG 高内阻特性与电致变色智能窗之间存在阻抗不匹配,该系统发电端与调光端面积比约为 1:1,并需要长时间连续机械激励才能达到工作电压。Wang 等人[18]报道了一种由独立滑动式 TENG 驱动的胆甾相液晶智能窗系统,该系统 TENG 单周期转移电荷量为 172 nC,200 cm²的发电机仅驱动 4 cm²智能窗,驱动的面积比为 50:1。上述研究表明,尽管微纳发电机能够为智能窗提供自供电驱动途径,但面向大面积液晶负载时,仍需解决高内阻电源与大面积液晶负载之间的能量传输效率问题。

针对上述问题,本文提出了一种基于阻抗匹配原理的高面积比自供电液晶智能窗系统。该系统以 ENG 收集环境能量,扭曲向列相液晶(Twisted nematic liquid crystal, TNLC)智能窗作为负载,通过引入由电容-二极管组成的动态拓扑重构电路。通过子电容单元的动态切换,可调节系统等效阻抗,实现 ENG 输出端与液晶窗负载端之间的匹配,从而提高从“高压低电荷”输出向“低压高电荷”驱动需求的能量转换效率。本研究建立了电源-电路-负载的耦合模型,对 ENG 输出性能、电路拓扑参数和液晶窗驱动性能进行了实验研究。结果表明,在优化匹配条件下,有效面积为 25 cm²的 ENG 可在 4 s 内驱动面积为 1116 cm²的 TN 型液晶智能窗,发电机面积与驱动的智能窗面积比达到 1:45。该研究为微纳发电机驱动大面积液晶智能窗提供了一种可行的策略,并为自供电建筑光调控与隐私保护系统设计提供参考。

2. 系统设计与实验方法

2.1. 系统架构与工作原理

为解决高内阻微纳发电机与大面积液晶智能窗负载之间的阻抗不匹配问题,本文构建了一种基于动态拓扑重构电路的自供电液晶智能窗系统。系统整体架构如图 1 所示,主要由 ENG、能量管理电路和扭曲向列相液晶智能窗(Twisted nematic liquid crystal smart window, TNLC-SW)三部分组成。其中,ENG 作为系统的机械能输入与电能转换单元;能量管理电路作为发电端与液晶负载之间的阻抗匹配单元;TN 型液晶窗作为系统的负载和光学调制单元。三者共同构成“机械能输入-能量调控-电光调制”的自供电智能窗系统。

如图 1 所示,ENG 位于系统前端,在外部机械激励下产生电能输出。其后端连接整流与能量管理电路,使 ENG 输出的交流电被转换并调控为适合液晶智能窗驱动的电信号。TNLC-SW 位于系统末端,其导电层被划分为多个相互独立的液晶子单元,各子单元既作为光学调制区域,又作为电容性负载参与系统等效阻抗调节。通过能量管理电路对子单元连接方式的调控,可实现发电端与负载端之间的阻抗匹配,从而提高 ENG 对大面积液晶智能窗的驱动能力。

从功能来看,系统可分为三个模块。第一,能量收集模块由 ENG 构成,负责将环境低频机械能转化为电能。第二,能量管理模块由整流电路、电容-二极管拓扑网络构成,负责对 ENG 输出电信号进行整流、分配和阻抗匹配。第三,光学调制模块由 TNLC-SW 构成,负责在电场作用下改变液晶分子取向,从而实现透明态与暗态之间的切换。该结构将低频机械能收集、电路阻抗匹配和液晶电光调制集成于同一系统中,为自供电驱动大面积智能窗提供了硬件基础。

图 2 进一步给出了系统各组成部分的工作原理。ENG 采用垂直接触-分离模式,如图 2(a)所示,其核心由带有准永久电荷的驻极体层和相对电极构成。在初始分离状态下,驻极体表面电荷在相对电极中等效出等量异号电荷。当两电极间距发生变化时,系统电容和感应电荷分布随之改变,从而在外电路中

产生电荷转移；当电极间距恢复，感应电荷反向流动，形成交变脉冲电输出。因此，ENG 能够将周期性机械位移转化为交流电信号。该类型发电机的输出通常表现为高电压、高内阻和低转移电荷量，若直接驱动大面积液晶窗，将难以满足液晶负载对驱动电荷的需求。

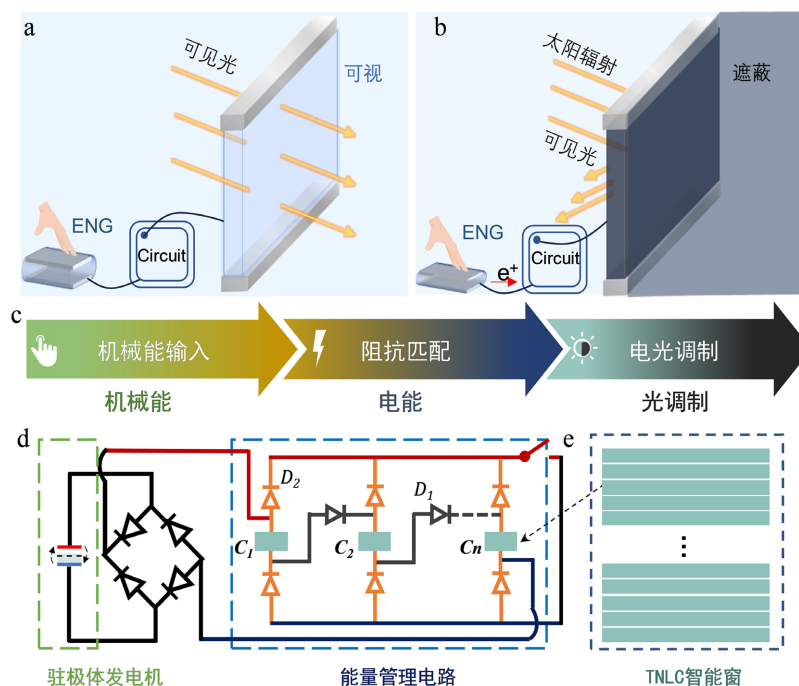


Figure 1. Structure and circuit schematic of the self-powered TN liquid crystal smart window system. (a) Transparent state; (b) Dark state; (c) Energy conversion process of the system; (d) Circuit diagram of the self-powered system; (e) Structure of the large-area TN smart window

图 1. 自供电 TN 型液晶智能窗系统结构与电路原理图。(a) 透明态；(b) 暗态；(c) 系统能量转换过程；(d) 自供电系统电路图；(e) 大面积 TN 型智能窗结构

如图 2(b)所示，能量管理电路由二极管-液晶子电容阵列和放电开关组成。本文所述“动态拓扑重构”是指电路在不同工作阶段中，由二极管单向导通特性和开关状态所引起的电路连接状态，而不是液晶智能窗物理结构的改变。其工作过程可分为串联充电、驱动保持和放电恢复三个阶段。

在串联充电阶段，ENG 输出的交流电经整流后进入能量管理电路。二极管 D_1 导通、 D_2 截止，电流沿二极管依次流经各液晶子电容单元，使 C_1 至 C_n 在等效拓扑上形成近似串联结构。该拓扑提高了液晶智能窗负载侧等效输入阻抗，使大面积液晶窗负载能够与 ENG 的高内阻输出特性相匹配。与此同时，ENG 产生的转移电荷被分配至每小块液晶子单元上，在液晶层两端逐步建立驱动电压。

在放电恢复阶段，储存在各液晶子电容中的电荷维持子单元两端电压，使液晶层内保持有效驱动电场，由于二极管网络限制了电荷向 ENG 源端的反向泄漏，智能窗能够维持暗态一段时间。放电恢复时，闭合外部放电开关后，液晶子电容中储存的电荷经放电通路释放，子单元电压下降至液晶阈值电压以下，液晶分子在弹性恢复力作用下恢复初始扭曲排列，智能窗重新回到透明态。由此，能量管理电路通过“串联充电-分区保持-统一放电”的动态拓扑电路，实现了阻抗匹配、电荷存储和光学状态可逆调控。

TNLC-SW 的电光调制机理如图 2(c)所示。其结构包括两片相互正交的偏振片、ITO 导电基板和夹层中的扭曲向列相液晶层。在无外加电场时，液晶分子在取向层作用下形成约 90° 的扭曲排列，入射光的偏振方向随液晶分子取向发生旋转，并能够通过第二片偏振片，因此智能窗处于透明态。当 ENG 向液晶窗

注入电荷并建立电场后，液晶分子沿电场方向重新排列，原有旋光效应减弱，入射光无法有效通过正交偏振片，智能窗转变为暗态。释放液晶子单元中存储的电荷后，液晶分子在弹性恢复力作用下回到初始扭曲排列，智能窗恢复透明态。

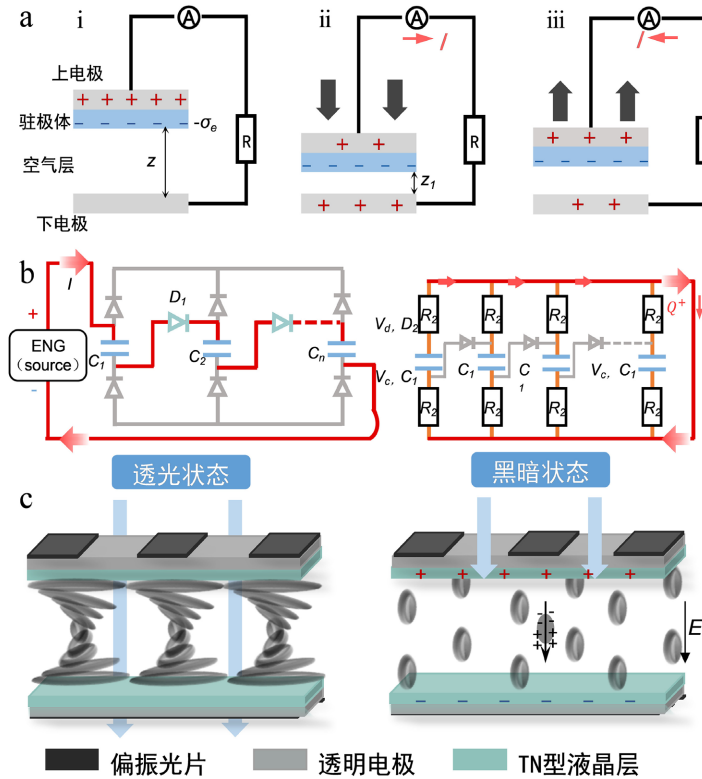


Figure 2. Working principles of the self-powered liquid crystal smart window system. (a) Power generation mechanism of the ENG; (b) Charging and discharging principles of the energy management circuit; (c) Working principle of the TN liquid crystal smart window
图 2. 液晶窗自供电系统工作原理。(a) ENG 发电原理；(b) 能量管理电路充放电原理；(c) TN 型液晶智能窗工作原理

基于上述工作机制，系统的运行过程可概括为三个阶段：首先，在无机机械激励时，ENG 无有效电能输出，TNLC-SW 处于透明态；其次，在机械激励作用下，ENG 产生交流电输出，经能量管理电路流向液晶子单元转移电荷，使液晶窗端电压升高并驱动进入暗态；最后，通过开关释放液晶窗子单元中存储的电荷，液晶分子恢复初始取向，智能窗重新回到透明态。为进一步阐明系统阻抗匹配与大面积驱动能力之间的关系，本文将 ENG 等效为高内阻电荷源，将 TNLC-SW 子单元等效为电容性负载，并建立发电端、能量管理电路与液晶负载之间的等效电路模型。

当发电机受到外部机械激励，导致上下电极发生相对改变时，回路中的电荷会转移。假设间距由 z_1 变化至 z_2 ，相应的转移电荷 Q 为：

$$Q = \int_{z_1}^{z_2} dQ = \int_{z_1}^{z_2} \frac{(\sigma_e + \sigma') S d \epsilon_r}{(z \epsilon_r + d)^2} dz = \frac{(\sigma_e + \sigma')(z_2 - z_1) S d \epsilon_r}{(z_2 \epsilon_r + d)(z_1 \epsilon_r + d)} \quad (1)$$

其中， z 表示上下电极的间距， z_1 、 z_2 分别为变化后的间距。由式(1)转移电荷量求导，并结合极板运动速度，计算出输出电流 I ：

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dz} v = \frac{(\sigma_e + \sigma') S dv \varepsilon_r}{(z \varepsilon_r + d)^2} \quad (2)$$

其中, v 为两极板运动的相对速度, S 为驻极体材料有效面积, d 为驻极体厚度。

在整个电路工作时, ENG 产生的电流经整流后直接加在 N 个电容 C_1 和 $N-1$ 个连接二极管 D_1 上。所以在串联充电时, 负载侧的总等效阻抗 Z_{in} 如公式(3)所示。

$$Z_{in} = \sqrt{\left[(N-1)R_1 \right]^2 + \left(N \frac{1}{2\pi f C_1} \right)^2} \quad (3)$$

其中, R_1 表示二极管 D_1 的电阻, f 代表 ENG 工作频率。从等效电路角度看, 未分割的大面积液晶窗可近似视为一个大电容负载, 其等效电容随面积增加而增大, 等效容抗随之降低, 难以与 ENG 的高内阻输出特性相匹配。将大面积液晶窗划分为 N 个相同的子单元后, 单个子单元电容为 C_1 。在充电阶段, 二极管网络是 N 个子单元形成串联充电拓扑结构, 此时智能窗等效阻抗可表示为:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_{eq}} = \frac{N}{2\pi f C_1} \quad (4)$$

而未分割整块液晶窗的等效电容约为 NC_1 , 其等效阻抗为:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f NC_1} \quad (5)$$

因此, 相较于未分割大面积液晶智能窗, 基于阻抗匹配分割制备的大面积智能窗的等效容抗提高了 N^2 倍。该结果表明, 子单元分割和串联充电拓扑能够显著提高负载侧等效阻抗, 从而改善 ENG 与液晶窗负载之间的阻抗匹配关系。

TN 型液晶调光玻璃在结构上类似电容器, 根据电容器电压电容计算公式, 电路中电容器两端的电压由转移电荷量 Q_m 决定:

$$V_c = \frac{Q_c}{NC_1} = \min(V_{c1}, V_{c2}) = \min\left(\frac{V_{in} - (N-1)V_t}{N}, \frac{Q_{in} - \frac{(N-1)}{N}C_j V_t}{C_1} \right) \quad (6)$$

其中, V_{in} 是驻极体发电机输入电压, Q_m 是每个周期 ENG 传输到能量管理电路中的总电荷量。由式 $V_c = Q_c/NC_1$ 可知, 等效电容两端电压 V_c 的建立是累积的电荷量决定的。

考虑二极管非线性压降和漏电损耗后, 系统输入能量可近似表示为:

$$E_{in} = E_{stored} + E_D + E_{leak} \quad (7)$$

其中, E_{stored} 为储存在液晶子单元中的有效能量, E_D 为二极管压降所引起的损耗, E_{leak} 为液晶负载漏电损耗。单个子单元中存储的能量为

$$E_i = \frac{1}{2} C_1 V_c^2 \quad (8)$$

当各子单元电压近似一致时, 系统总储能为:

$$E_{stored} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} C_1 V_{c,i}^2 \approx \frac{1}{2} NC_1 V_c^2 \quad (9)$$

从该式中, 可以看出系统有效储能同时受子单元电容 C_1 、单元数 N 和子单元两端电压 V_c 影响。当 C_1 过小时, 虽然子单元电压较高, 但可储存电荷量有限; 当 C_1 过大时, 负载侧等效阻抗降低, 导致单元

电压不足。当 N 过小时，系统等效阻抗偏低，难以充分接收 ENG 输出电荷；当 N 过大时，串联电路中的二极管和等效阻抗进一步增加，二极管压降、漏电及线路损耗占比提高，使储能和转移电荷量下降。因此，能量管理电路存在最优的 C_1 和 N ，以实现阻抗匹配、电荷转移和液晶驱动电压之间的平衡。

2.2. 器件制备与测试表征

驻极体发电机核心功能层为聚四氟乙烯(PTFE)驻极体薄膜。实验中使用美国杜邦公司生产的 PTFE 薄膜，厚度分别为 12.5、30、50 和 100 μm 。将 PTFE 薄膜裁剪为 5 cm \times 5 cm 的样品，经清洗和干燥后置于金属电极表面，采用多针尖电晕放电进行极化处理。电晕极化在室温约 20 $^{\circ}\text{C}$ 下进行，放电电流为 0.2 mA，处理时间为 7 min。极化后的 PTFE 薄膜与相对电极及支撑结构组装成驻极体发电机。

TN 型液晶智能窗由 ITO 导电玻璃、聚酰亚胺取向层、液晶层和正交偏振片组成。实验制备了 10 cm \times 10 cm 和 31 cm \times 37 cm 两种尺寸的液晶智能窗。其中，部分 31 cm \times 37 cm 的大面积 ITO 玻璃经激光切割和 HF 刻蚀形成 35 个独立的导电子单元。制备时，ITO 玻璃经清洗和表面处理后，在导电面旋涂聚酰亚胺平行取向剂，并经热固化和摩擦取向形成取向层。随后将上下基板按摩擦方向正交对位贴合，采用含 5 μm 间隔子的紫外固化胶密封成盒，并通过毛细作用注入混合液晶材料。最后在液晶盒外侧贴附透射轴相互正交的偏振片并引出电极，得到 TN 型液晶智能窗。

测试平台由机械激励系统和电学测试系统组成。机械激励由步进电机驱动的曲柄滑块机构提供，可实现 1~5 Hz 的周期性垂直接触 - 分离运动。ENG 的输出电压、电流和转移电荷量分别采用 Keithley 6514 和 6517B 静电计采集，系统电学信号采用 Model 341 高压静电电压表测量，ENG 负载匹配特性采用 HIOKI IM3523 阻抗分析仪表表征。实验数据通过 NI-DAQ 和 LabVIEW 平台采集，并采用 Origin 软件进行后续处理。

3. 结果与分析

3.1. 驻极体发电机电学性能与电路的参数研究

在 1 Hz 机械激励频率和 2 mm 接触 - 分离位移下，测试了不同 PTFE 薄膜厚度对 ENG 输出性能的影响。如图 3(a)所示，随着 PTFE 厚度由 12.5 μm 增加至 100 μm ，ENG 的开路电压峰值由 145 V 提高至 189 V，整体呈上升趋势。这与驻极体发电机的可变电容输出特性相符，即在开路状态下，接触 - 分离过程中电极间距增大导致等效电容降低，从而使两电极间电势差升高。

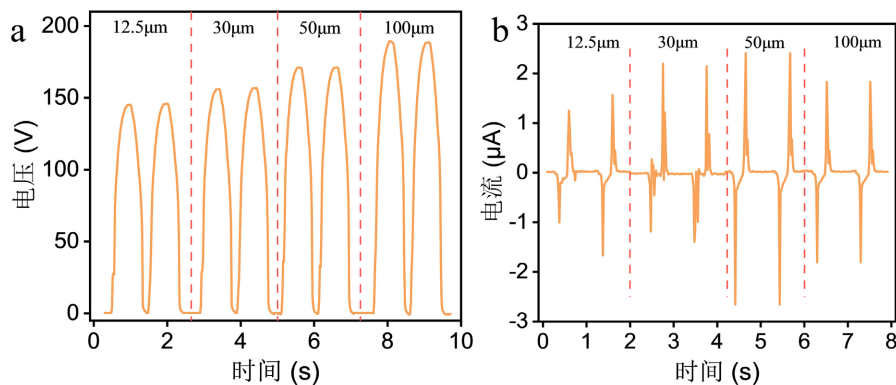


Figure 3. Output performance of the ENG with PTFE films of four different thicknesses. (a) Open-circuit voltage (V_{oc}); (b) Short-circuit current (I_{sc})

图 3. 四种厚度 PTFE 薄膜下 ENG 的输出性能。(a) 开路电压(V_{oc}); (b) 短路电流(I_{sc})

不同厚度 PTFE 薄膜下的短路电流如图 3(b)所示。ENG 的短路电流呈现双向脉冲特征。随着 PTFE

厚度增加, 短路电流峰值先升高后降低, 由 $12.5\ \mu\text{m}$ 时的 $1.56\ \mu\text{A}$ 增加至 $50\ \mu\text{m}$ 时的 $2.68\ \mu\text{A}$, 随后在 $100\ \mu\text{m}$ 时下降至 $1.82\ \mu\text{A}$ 。对短路电流积分得到的转移电荷量分别为 137 、 172 、 206 和 $161\ \text{nC}$, 其中 $50\ \mu\text{m}$ PTFE 薄膜对应的转移电荷量最高。虽然 $100\ \mu\text{m}$ 样品具有更高的开路电压, 但其电流和转移电荷量低于 $50\ \mu\text{m}$ 样品, 过厚的 PTFE 薄膜不利于电荷转移能力的进一步提升。综合考虑开路电压、短路电流和转移电荷量, 后续实验选用 $50\ \mu\text{m}$ 的薄膜制备 ENG, 并在 $1\ \text{Hz}$ 、 $2\ \text{mm}$ 条件下进行负载匹配和输出功率测试。

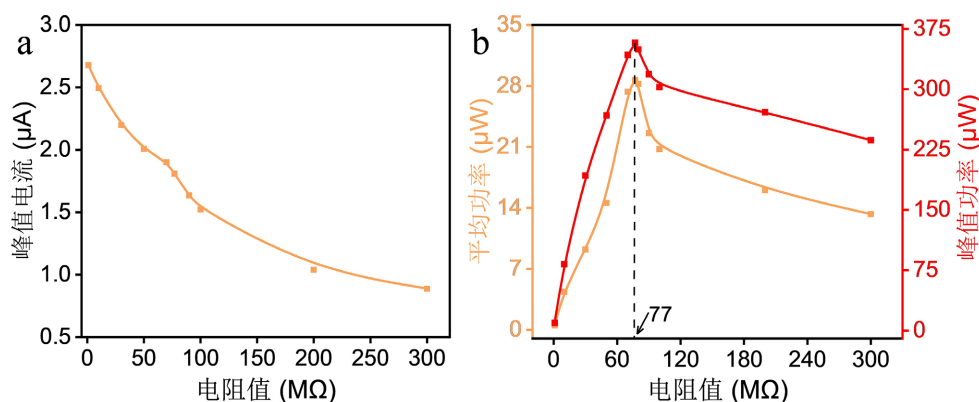


Figure 4. Output performance of the ENG under impedance matching. (a) External circuit current; (b) External circuit power

图 4. 阻抗匹配下 ENG 的输出性能。(a) 外电路电流; (b) 外电路功率

在 $50\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \text{Hz}$ 和 $2\ \text{mm}$ 的最优工况下, 测试了 ENG 的负载输出功率。如图 4 所示, 随着外接负载阻抗增加, ENG 的平均功率和峰值功率均先升高后降低。当负载阻抗为 $77\ \text{M}\Omega$ 时, 输出功率达到最大值, 峰值功率和平均功率分别为 $357.98\ \mu\text{W}$ 和 $28.63\ \mu\text{W}$ 。根据最大功率传输定理, 该负载阻抗近等于 ENG 的等效内阻, 表明所制备 ENG 具有明显的高内阻特征, ENG 虽提供一定输出功率, 但直接驱动大面积 TN 型液晶窗时仍存在阻抗失配问题。

在固定单元数 $N = 25$ 机械激励频率 $1\ \text{Hz}$ 条件下, 进一步研究子单元电容值对能量管理电路输出性能的影响。如图 5(a) 所示, 随着电容值由 $1\ \text{nF}$ 增加至 $47\ \text{nF}$, 单个电容两端电压逐渐降低, 由 $9.5\ \text{V}$ 下降至 $1.71\ \text{V}$, 说明较大的电容负载会降低单元充电电压。

图 5(b) 给出了不同电容值下的开路电压和储存电荷量变化。随着电容值增加, 系统储存电荷量先升高后略有下降, 并在 $C_1 = 22\ \text{nF}$ 时达到最大值 $2.1\ \mu\text{C}$ 。此时单元电压为 $3.81\ \text{V}$, 仍高于 TN 型液晶智能窗的驱动阈值, 可满足液晶窗切换需求。继续增大电容至 $47\ \text{nF}$ 后, 智能窗子单元电压降至 $1.71\ \text{V}$, 已低于液晶窗有效驱动电压范围, 同时系统储能能力也出现下降。

该结果表明, 子单元电容值对能量管理电路的阻抗匹配具有显著影响。当电容过小时, 单元电压较高但可储存电荷有限; 电容过大时, 等效负载阻抗降低, 导致输出电压不足并影响能量传输效率。综合考虑储存电荷量和液晶窗驱动电压, 后续实验选取 $C_1 = 22\ \text{nF}$ 作为能量管理电路的匹配电容参数。

在确定子单元电容值为 $22\ \text{nF}$ 后, 进一步研究单元数量 N 对能量管理电路输出性能的影响。如图 6(a) 所示, 随着 N 增加, 单个子单元两端电压 V_c 整体呈下降趋势。这是由于 ENG 在单次机械激励中产生的电荷有限, 当接入的子单元数量增加时, 电荷被分配至更多电容单元中, 导致单个单元的充电电压降低。

不同单元数下的储存电荷量如图 6(b) 所示。随着 N 从 1 增加至 35, 系统储存电荷量由 $0.23\ \mu\text{C}$ 提高至 $4.51\ \mu\text{C}$, 表明增加子单元数量能够有效提升系统的总电荷储存能力。当 N 继续增加时, 储存电荷量开始下降, 说明过多单元会使系统等效阻抗偏离 ENG 的最佳匹配状态, 从而降低电荷转移效率。综合电压

和储荷量结果, 当 $N = 35$ 时, 系统表现出最优输出性能, 此时单个子单元电压为 5.88 V , 储存电荷量为 $4.51 \mu\text{C}$, 储存能量为 $13.51 \mu\text{J}$ 。

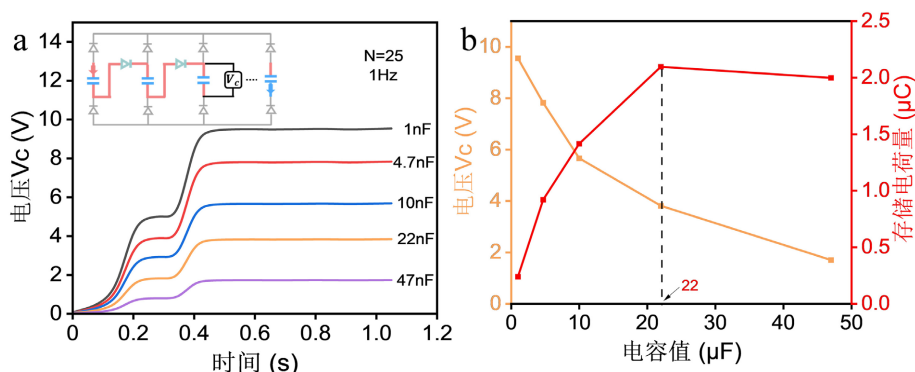


Figure 5. Effect of different capacitance values on system performance. (a) Charging voltage; (b) Voltage and charge of the energy management circuit

图 5. 不同电容值对系统性能的影响。(a) 充电电压; (b) 能量管理电路的电压、电荷量

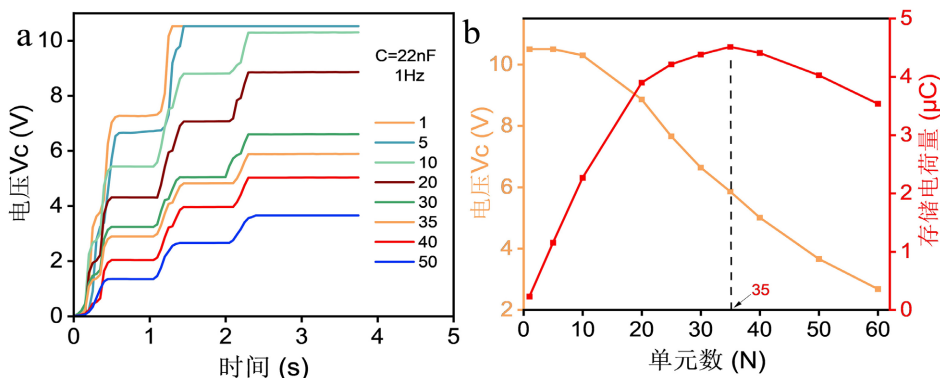


Figure 6. Effect of the number of units on system performance. (a) Charging voltage; (b) Voltage and charge of the energy management circuit

图 6. 不同单元数对系统性能的影响。(a) 充电电压; (b) 能量管理电路的电压、电荷量

上述结果表明, 子单元数量是影响能量管理电路阻抗匹配效果的重要参数。对于大面积 TN 型液晶智能窗, 将整块 ITO 导电层分割为 35 个子单元, 不仅能够使单个子单元电压保持在液晶窗有效驱动电压以上, 还能够提高系统的总转移电荷量。因此, 上文制备大面积智能窗采用 35 个独立子单元, 以实现 ENG 输出特性与液晶负载之间的匹配, 并提升自供电系统的面积驱动能力。

3.2. 大面积比自供电液晶智能窗的驱动性能

在完成 ENG 输出特性和能量管理电路参数优化后, 将二者与大面积 TN 型液晶智能窗耦合, 验证系统对大面积电容性负载的驱动能力。实验采用有效面积为 25 cm^2 的 ENG, 在 1 Hz 机械激励下分别测试直接整流驱动和经能量管理电路驱动两种模式下的液晶窗电压响应与透过率变化, 结果如图 7 所示。

在直接驱动模式下, ENG 经整流后直接连接面积为 1116 cm^2 的 TN 型液晶智能窗。由图 7(a)可见, 连续机械激励 6 s 后, 液晶窗两端电压仅升高至约 0.2 V , 远低于 TN 型液晶窗的阈值电压 V_{th} (1.32 V)。因此, 液晶分子无法发生取向变化, 器件可见光透过率维持在 40.16% , 未产生明显光学调制。该结果说明, 仅依靠 ENG 直接驱动大面积液晶窗时, 高内阻发电端与大面积低阻抗电容性负载之间存在明显阻抗

失配，无法成功驱动大面积液晶窗。

引入能量管理电路后，液晶窗端电压表现出明显的阶梯式上升特征。由图 7(a)可见，在相同 1 Hz 激励下，电压在约 1.2 s 时超过液晶窗阈值电压 V_{th} ，对应透过率开始快速下降；当电压进一步升高并超过饱和电压 V_{sat} (3.0 V) 后，液晶窗进入稳定暗态，可见光透过率由初始的 40.16% 降至约 0.06%。当系统放电后，液晶窗端电压迅速降低至阈值电压以下，液晶分子在弹性恢复力作用下恢复初始排列，透过率重新回到高透状态，表明该自供电驱动过程具有良好的可逆性。

图 7(a)中放电阶段的电压快速下降进一步说明，闭合放电开关后，液晶子电容阵列中储存的电荷能够经放电通路释放，使液晶窗端电压迅速低于 V_{th} 。对应地，透过率恢复至初始高透状态，证明所设计的二极管-单开关动态拓扑能够完成大面积液晶窗的充电驱动与放电恢复闭环控制。

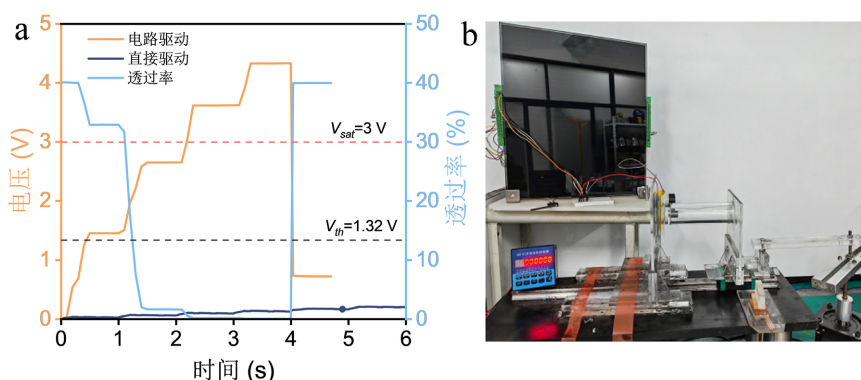


Figure 7. Voltage curves of the system under two operating modes at an area ratio of 1:45. (a) Voltage and transmittance curves; (b) Dark-state operating mode

图 7. 面积比为 1:45，两种模式下系统电压曲线。(a) 电压与透过率曲线；(b) 暗态工作模式

上述结果表明，动态拓扑重构能量管理电路能够有效提高 ENG 向液晶负载端的电荷转移能力，使 25 cm² 的 ENG 在 4 s 内驱动 1116 cm² 的 TN 型液晶智能窗，实现发电单元面积与智能窗面积比为 1:45 的光调制。与直接驱动模式相比，阻抗匹配电路显著改善了大面积液晶窗端的电压建立和光学调制，证明该方法可有效突破微纳发电机驱动大面积液晶智能窗时的面积限制。

3.3. TN 型液晶智能窗的电光特性与响应速度

为评估 TN 型液晶智能窗的电光调制性能，测试了其在不同驱动电压下的可见光透过光谱及动态响应特性。如图 8(a)所示，在 0~1 V 电压范围内，智能窗在 380~780 nm 可见光区间保持较高透过率，表明液晶分子仍处于初始扭曲排列状态，器件呈透明态。当驱动电压继续升高后，液晶分子在电场作用下逐渐重新取向，旋光效应减弱，透过率显著降低；当电压达到 3 V 以上时，透过率接近最低值，智能窗进入稳定暗态。积分法：引入标准光源光谱分布和人眼视觉敏感度函数进行加权积分，公式如下：

$$T_{lum} = \frac{\int_{380}^{780} T(\lambda) D_{65}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} D_{65}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

其中： $T(\lambda)$ 是 TN 型智能窗在可见光波长范围的实测透过率、 $D_{65}(\lambda)$ 是 AM1.5 标准太阳相对光谱函数、 $\varphi(\lambda)$ 是标准人眼视觉效率函数。计算得出 0 V 透明态透过率 T_{lum} 为 40.16%，4 V 暗态 T_{lum} 为 0.06%，可见光光学调制幅度 ΔT_{lum} 为 40.09%，以及极高的光学对比度(CR \approx 669:1)，表现出优异的明暗切换能力。

图 8(b)给出了智能窗在 3 V 方波电压驱动下的动态响应曲线。施加电压后，液晶分子在电场作用下

快速取向，透过率迅速下降；撤去电压后，液晶分子依靠弹性恢复力回到初始扭曲排列，透过率逐渐恢复。由实验计算得知，器件的上升时间和下降时间分别为 4.2 ms 和 24 ms。其中，上升过程主要由外加电场驱动，因此响应较快；下降过程依赖液晶分子的弹性回复，所需时间相对较长。

上述结果表明，该 TN 型液晶智能窗兼具低驱动电压、高光学对比度和毫秒级响应速度。其中，阈值电压约为 1.32 V，饱和电压约为 3.0 V，与前述能量管理电路输出电压范围相匹配，可满足 ENG 自供电系统对大面积液晶窗快速调光和隐私遮蔽的驱动需求。

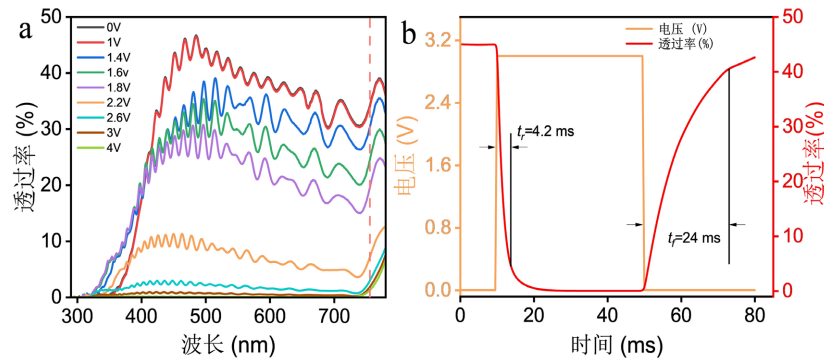


Figure 8. Optoelectronic characteristics of the TN smart window. (a) Transmittance; (b) Response time

图 8. TN 型智能窗的光电特性。(a) 透过率；(b) 响应时间

3.4. 器件循环稳定性

为评估 ENG 的长期工作稳定性，对其进行 5000 s 连续机械激励测试。如图 9 所示，ENG 输出电压在测试过程中基本保持稳定，峰值由约 172 V 小幅下降至约 170 V，衰减幅度低于 2%；单周期转移电荷量也维持在约 206 nC，未出现明显衰减。该结果说明，电晕极化后的 PTFE 驻极体具有较好的电荷保持能力，且器件在长期接触-分离循环中保持了稳定的机械接触状态，可为自供电液晶智能窗系统提供持续稳定的电能输入。

为进一步评估 TN 型液晶智能窗的光学循环稳定性，测试了其在 555 nm 处的透过率随开关循环次数的变化。实验中，以 0 V 和 3 V 分别作为 OFF 态和 ON 态驱动电压，对器件进行 1000 次连续开关循环测试。如图 10 所示，在整个循环过程中，智能窗在 0 V 下的透过率稳定在 41%，而在 3 V 驱动下的透过率保持在 0.5%，未出现明显透过率漂移或漏光现象。

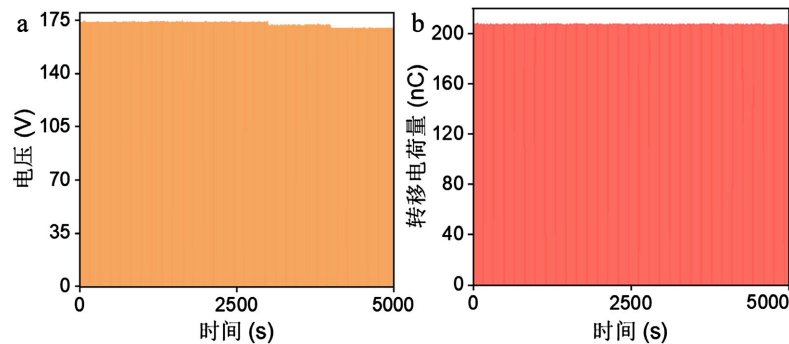


Figure 9. Output performance stability of the ENG over 5000 cycles. (a) Open-circuit voltage; (b) Transferred charge

图 9. 5000 次循环 ENG 输出性能稳定性。(a) 开路电压；(b) 转移电荷量

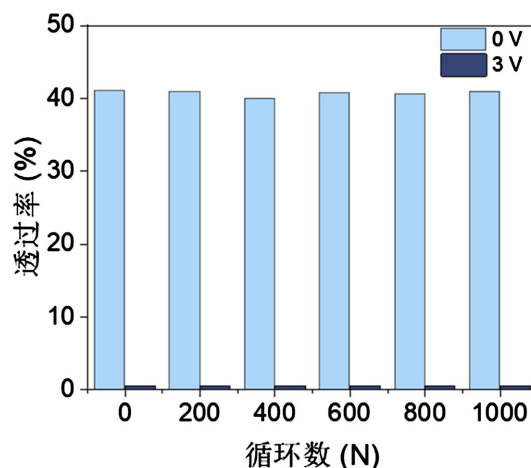


Figure 10. Transmittance variation of the TN liquid crystal smart window at 555 nm over 1000 cycles

图 10. 1000 次循环 TN 型液晶智能窗在 555 nm 处的透过率

3.5. 自供电液晶智能窗系统的应用示范

为验证系统的实际应用效果，搭建了由 ENG、能量管理电路和大面积 TN 型液晶智能窗组成的自供电调光示范平台，如图 11 所示。系统中 ENG 的有效工作面积为 25 cm^2 ，用于收集手部按压产生的低频机械能；TN 型液晶智能窗的有效显示面积为 1116 cm^2 ，作为光学调制负载；能量管理电路用于完成整流、阻抗匹配和电荷调控。

在无机机械激励时，ENG 无电能输出，液晶窗处于断电状态。由于 TN 型液晶窗采用常白模式，液晶分子保持扭曲排列，背景图案和文字可清晰观察到，器件呈透明态(图 11(a))。当对 ENG 施加手部按压后，输出电能经能量管理电路调控后输入液晶智能窗，使液晶子单元两端电压升高并驱动液晶分子重新取向，器件迅速切换至暗态。此时背景图案和文字被有效遮挡，智能窗整体呈现均匀的低透过状态(图 11(b))。

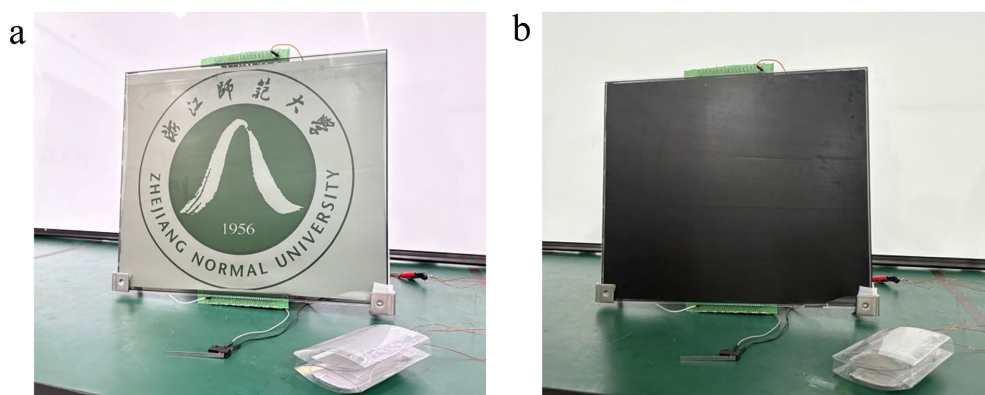


Figure 11. Application demonstration of the self-powered liquid crystal smart window system for privacy protection. (a) Transparent state; (b) Dark state

图 11. 自供电液晶智能窗系统的隐私保护的应用演示。(a) 透明态；(b) 暗态

该应用示范表明，基于阻抗匹配能量管理电路， 25 cm^2 的 ENG 可驱动 1116 cm^2 的大面积 TN 型液晶智能窗，实现 1:45 的高面积比自供电调光。该系统可在无需外部电源的条件下完成透明态与暗态切换，展示了其在建筑采光调控和隐私保护场景中的应用潜力。

4. 结论

本文针对微纳发电机直接驱动大面积液晶智能窗时存在的阻抗失配和电荷转移不足问题,提出了一种基于动态拓扑重构能量管理电路的高面积比自供电 TN 型液晶智能窗系统。实验结果表明,50 μm PTFE 驻极体发电机在 1 Hz、2 mm 激励下具有最优性能,其最佳匹配阻抗约为 77 M Ω ,峰值输出功率达到 357.98 μW ;当能量管理电路采用 22 nF 子单元电容和 35 个单元时,系统储存电荷量提高至 4.51 μC ,单元电压达到 5.88 V。引入该阻抗匹配电路后,25 cm^2 ENG 可在 4 s 内驱动 1116 cm^2 的 TN 型液晶智能窗,实现 1:45 的高面积比自供电调光。所制备智能窗的可见光调制幅度为 40.09%,光学对比度约为 669:1,响应时间达到毫秒级,并具有良好的循环稳定性。研究表明,动态拓扑重构能量管理电路能够有效提升高内阻微纳发电机对大面积液晶负载的驱动能力,为自供电智能窗和低功耗建筑光调控系统提供了一种可行方案。

参考文献

- [1] Zhang, Z., Zhang, L., Zhou, Y., Cui, Y., Chen, Z., Liu, Y., *et al.* (2023) Thermochromic Energy Efficient Windows: Fundamentals, Recent Advances, and Perspectives. *Chemical Reviews*, **123**, 7025-7080. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00762>
- [2] Souviron, J., van Moeseke, G. and Khan, A.Z. (2019) Analysing the Environmental Impact of Windows: A Review. *Building and Environment*, **161**, 106268. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106268>
- [3] Wang, X., Li, M., Wang, D., Zhang, H., Duan, R., Zhang, D., *et al.* (2020) Low-Cost, Robust Pressure-Responsive Smart Windows with Dynamic Switchable Transmittance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 15695-15702. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c00300>
- [4] Liu, Y., Wang, J., Wang, F., Cheng, Z., Fang, Y., Chang, Q., *et al.* (2021) Full-Frame and High-Contrast Smart Windows from Halide-Exchanged Perovskites. *Nature Communications*, **12**, Article No. 3360. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23701-z>
- [5] Kim, C.W., Santoro, E.G., Pawar, A.U., Lee, D.K., Peña-Rodríguez, O., Pal, U., *et al.* (2023) Swift Photochromic Smart Window Based on Plasmonic Yolk-Shell Nanophosphors. *Advanced Optical Materials*, **11**, Article 2202171. <https://doi.org/10.1002/adom.202202171>
- [6] Li, J., Gu, P., Pan, H., Qiao, Z., Wang, J., Cao, Y., *et al.* (2023) A Facile Yet Versatile Strategy to Construct Liquid Hybrid Energy-Saving Windows for Strong Solar Modulation. *Advanced Science*, **10**, Article 2206044. <https://doi.org/10.1002/advs.202206044>
- [7] Wu, S., Cossio, G., Braun, B., Wu, F.C.M. and Yu, E.T. (2023) Smart Window Structures Based on Highly Conductive, Transparent Metal Nanomeshes and Thermochromic Perovskite Films. *Advanced Optical Materials*, **11**, Article 2202409. <https://doi.org/10.1002/adom.202202409>
- [8] Gao, G.H., Xue, S., Wang, H., Zhang, Z., Shen, J. and Wu, G. (2023) Medium-Scale Production of Gasochromic Windows by Sol-Gel. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **106**, 331-340. <https://doi.org/10.1007/s10971-021-05721-9>
- [9] Kandpal, S., Ghosh, T., Rani, C., Bansal, L., Tanwar, M. and Kumar, R. (2023) Tungsten-Oxide/Polypyrrole Film for Hybrid Solid-State Electrochromic Smart Window. *Journal of Applied Physics*, **133**, Article 023101. <https://doi.org/10.1063/5.0125482>
- [10] Zhang, H., Feng, J., Sun, F., Zhou, D., Cao, G., Wang, S., *et al.* (2023) Self-Driven Ni-Based Electrochromic Devices for Energy-Efficient Smart Windows. *Advanced Materials Technologies*, **8**, Article 2201688. <https://doi.org/10.1002/admt.202201688>
- [11] Kim, H.N. and Yang, S. (2019) Responsive Smart Windows from Nanoparticle-Polymer Composites. *Advanced Functional Materials*, **30**, Article 1902597. <https://doi.org/10.1002/adfm.201902597>
- [12] Zhou, L., Liu, D., Liu, L., He, L., Cao, X., Wang, J., *et al.* (2021) Recent Advances in Self-Powered Electrochemical Systems. *Research*, **2021**, Article ID: 4673028. <https://doi.org/10.34133/2021/4673028>
- [13] Vidal, J.V., Rolo, P., Carneiro, P.M.R., Peres, I., Kholkin, A.L. and Soares dos Santos, M.P. (2022) Automated Electromagnetic Generator with Self-Adaptive Structure by Coil Switching. *Applied Energy*, **325**, Article 119802. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119802>
- [14] Fu, X., Pan, X., Liu, Y., Li, J., Zhang, Z., Liu, H., *et al.* (2023) Non-Contact Triboelectric Nanogenerator. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article 2306749. <https://doi.org/10.1002/adfm.202306749>

-
- [15] Gao, X., Huang, M., Zou, G., Li, X. and Wang, Y. (2023) Self-Powered Vibration Sensor Based on the Coupling of Dual-Mode Triboelectric Nanogenerator and Non-Contact Electromagnetic Generator. *Nano Energy*, **111**, Article 108356. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108356>
- [16] Xu, Z., Tan, J., Chen, H., Di, K., Bao, K., Cheng, J., *et al.* (2023) Fatigue-Resistant High-Performance Dielectric Elastomer Generator in Alternating Current Method. *Nano Energy*, **109**, Article 108314. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108314>
- [17] Huang, J., Ren, Z., Zhang, Y., Fong, P.W., Chandran, H.T., Liang, Q., *et al.* (2022) Tandem Self-Powered Flexible Electrochromic Energy Supplier for Sustainable All-Day Operations. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article 2201042. <https://doi.org/10.1002/aenm.202201042>
- [18] Wang, J., Meng, C., Wang, C., Liu, C., Chang, Y., Li, C., *et al.* (2021) A Fully Self-Powered, Ultra-Stable Cholesteric Smart Window Triggered by Instantaneous Mechanical Stimuli. *Nano Energy*, **85**, Article 105976. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105976>