双歧杆菌婴儿亚种35624薄膜的综合光学、电学和湿度传感特性

S.OZTURK[a]、H. TATLIPINAR[a]*、K. BOZKURT[a]、O. OZDEMIR[a]、B.C. OMUR[a]、A. ALTINDAL[b]和 H.S. BOZKURT[ca]物理系，文理学院，耶尔德兹技术大学，埃森勒，伊斯坦布尔，*34220*，土耳其[b]物理工程系，伊斯坦布尔技术大学，伊斯坦布尔，*34469*，土耳其，以及[c]彭迪克博尔盖国际医院，胃肠病学诊所，多乌区，彭迪克，伊斯坦布尔，*34890*，土耳其*（日期：2026年3月8日）

arXiv:2603.07762v1 [physics.app-ph] 8 Mar 2026

摘要。 本研究全面考察了长双歧杆菌 亚种长双歧杆菌 35624（BB35）薄膜的结构、光学和电学性质，并展示了其作为新型相对湿度传感器的应用。紫外-可见光谱显示，BB35具有两个不同的光吸收区域，分别对应 2.1 ± 0.05 eV和 2.8 ± 0.05 eV的直接带隙；Tauc 图分析证实了这一点，表明BB35确实是一种宽带隙半导体材料。在280 nm激发下进行的光致发光测量呈现出宽广的发射光谱，该光谱经解卷积后可分为四个高斯峰，中心分别位于434 nm（2.86 eV）、499 nm（2.48 eV）、543 nm（2.3 eV）和620 nm（2.0 eV），表明存在多个半导体材料所特有的辐射复合中心。电学表征显示，电荷输运具有色散特性，电流衰减遵循幂律 $I \propto t^{-\alpha}$($\alpha \approx 0.3$)，这表明存在无序有机半导体中通常可观察到的 Poole-Frenkel 导电机制。采用金叉指电极，在15%–90%相对湿度范围内评估了BB35薄膜的相对湿度（RH）传感性能。随着相对湿度从15%升高至90%，传感器表现出可逆响应，灵敏度由0.85线性增加至4.80。器件在两个月内表现出优异的稳定性，基线电流衰减低于5%。这些结果表明，BB35薄膜是一种用于湿度传感应用的前景广阔的环保型半导体材料，并为将生物材料集成到电子和光电器件中开辟了新途径。

Key词语： 婴儿双歧杆菌，薄膜，湿度传感器，半导体

* 通讯作者电子邮箱：htatli@yildiz.edu.tr

I. 引言

对相对湿度（RH）进行精确监测和控制，对于众多科学与工业领域都至关重要。从确保制药和食品行业的最佳储存条件，到维持半导体洁净室严格的环境控制，再到提升呼吸设备中的患者护理水平，对高性能湿度传感器的需求不断增长 [1, 2]。传统湿度传感器主要基于陶瓷氧化物（如氧化铝、TiO_2）或聚合物材料，已成功实现商业化。然而，它们往往存在滞后、长期漂移、对其他气体的交叉敏感性，以及制备工艺相对复杂或能耗较高等局限 [3]。这推动了人们对新型功能材料的研究兴趣不断增长，尤其关注灵敏度、稳定性和选择性更高，且适用于可持续、低成本制备技术的材料。近期研究探索了多种材料，包括用于湿度传感应用的多孔 TiO_2 结构 [4], 、基于 TiO_2 量子点的复合材料 [5], 以及金属有机框架 [6] 。

近年来，生物学与电子学的交汇为传感器技术开辟了新的前沿。从 DNA、酶到完整细胞生物体，各类生物材料凭借其固有的识别能力和独特的电子特性，已被研究用作各种传感平台中的活性层 [7]。其中，益生菌，尤其是双歧杆菌属菌种，展现出一条引人关注但尚未得到充分探索的研究路径。这些微生物不仅具有重要的生物学意义，还拥有复杂的细胞壁结构和代谢途径，能够与环境分析物相互作用，并可能调节其电导率。仿生材料和基于生物分子的传感器因其环保、可持续的特性而受到广泛关注 [8, 9]。

长双歧杆菌 亚种 婴儿 （35624 菌株，通常称为 BB35）是一种特征明确的益生菌，以其在肠道健康和免疫调节中的作用而闻名。其细胞包膜由多种组分构成，其中包括一种独特的胞外多糖（EPS）结构，该结构已在基因组水平上得到充分表征。Altmann 等人证明，BB35 的 EPS 由含有半乳糖、葡萄糖、半乳糖醛酸以及罕见糖 6-脱氧-L-塔罗糖的支链六糖重复单元组成 [10]。这种固有的亲水性，加上可通过旋涂等溶液可加工方法形成均匀薄膜的能力，使 BB35 成为相对湿度传感应用的有力候选材料。此外，EPS 复杂的分子结构表明，BB35薄膜可能表现出独特的电学性质，包括湿度依赖性电导率，本文对此进行了系统研究。

在我们先前关于动物双歧杆菌亚种 乳 BB-12 的工作中，我们证明益生菌中的电荷传输显著受大气条件影响；与干燥条件相比，潮湿环境下电导率提高了六个数量级 [11]。这种湿度依赖性电导率调制归因于细菌表面氨基和羧基的电离，并已由傅里叶变换红外光谱和 zeta 电位测量证实。此外，我们已成功将双歧杆菌与海藻酸钠结合，开发出用于组织工程应用的生物杂化材料，结果表明细菌的掺入会影响复合薄膜的结晶度和力学性能 [12]。最近，我们探索了婴儿双歧杆菌 35624 的生物降解潜力，证明其能够在好氧条件下通过生物膜形成和酶活性降解聚丙烯微塑料 [13]。

尽管BB35的生物学功能已得到证实，且我们对相关菌株也取得了初步研究结果，但BB35薄膜全面的物理和电子特性，尤其是其光学能带结构和电荷传输机制，仍未得到充分表征。深入理解这些特性对于诠释其传感行为至关重要。例如，紫外-可见光谱可用于阐明能带隙；能带隙是影响电子行为的材料固有特性，而光致发光（PL）光谱则可揭示辐射复合中心和亚带隙态，这些可能成为分析物相互作用的活性位点。细菌组分（如黄素和芳香族氨基酸）的荧光特性已有充分记载 [14, 15]。此外，电荷载流子传输的动态特性，无论呈带状传输还是弥散传输，都会决定传感器的响应时间和频率依赖特性。对各种纳米材料的研究，包括SnO_2 纳米线 [16] 以及rGO/MoS_2 范德华复合材料 [17] 等二维（2D）材料，已证明理解电荷传输机制对于优化传感器的重要性。

本研究旨在通过全面研究 BB35薄膜的结构、光学和电学性质，并评估其作为新型湿度传感生物传感材料的潜力，弥补这一研究空白。在先前关于 BB-12 电荷传输机制 [11] 以及 BB35 生物降解能力 [13], 的研究基础上，我们现在聚焦于 BB35薄膜的光学和电子特性表征。首先，我们利用紫外-可见光谱进行详细的光学分析，以确定 BB35 的直接带隙特性，并辅以功率依赖的PL测量，识别细菌基质中的多个发光态。随后，我们通过电流-电压（I-V）和频率依赖的导纳光谱，仔细研究其电学性质，以阐明

主要的电荷输运机制，结果显示其符合普尔-弗兰克尔效应的色散输运模型。最后，本研究的核心在于原型湿度传感器的制造与表征。

II. 光学表征

A. 紫外-可见透射/反射/吸收测量

通过紫外-可见吸收测量，可根据吸收率随波长变化的曲线（见图1-a）确定 BB35 的带隙。显然，

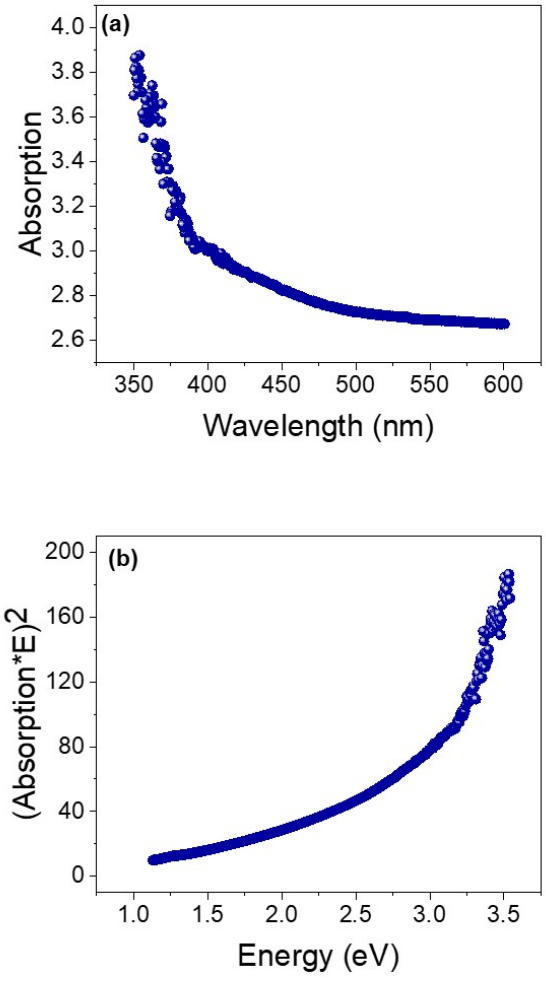

图1. (a) 吸收率随波长的变化；(b) BB35 的（吸收率 × 能量）的平方随能量变化曲线。

吸收在两个区域开始增强；其中一个位于 390–490 nm 范围内，另一个则在 390 nm 以下。延伸能量横坐标上述区域表明，带隙分别约为 2.3 eV（对应 540 nm）和 3.0 eV（对应 410 nm）。另一方面，通过绘制 $(alphaxenergy)^2$ 随能量变化的曲线（见图 1-b），不仅验证了这两个带隙值（分别为 2.8 eV 和 2.1 eV），还明确了其具有直接带隙特性。这种直接带隙行为与其他用于传感应用的有机-无机杂化材料中观察到的现象相似 [18]。

B. 光致发光测量

为相互验证带隙，使用峰值波长为 280 nm 的单色光照射样品，并通过光纤耦合 Ocean Optic 光谱仪检测双歧杆菌发出的光（由辐射复合过程产生）。首先，在室温下记录不同发光二极管功率（从 5 mW 到 30 mW）下的光致发光光谱，如图2所示。

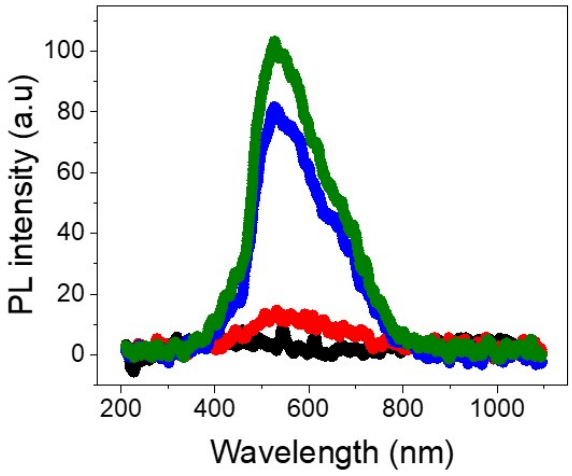

图 2. BB35 的室温光致发光光谱随激发光功率的变化。

在低功率下，信号几乎无法检测到；而在较高功率下，则可获得清晰的 PL 光谱，其峰值位于 530 nm。此外，出乎意料的是，PL 光谱并非高斯形状，而是在长波长区域展宽，这表明双歧杆菌中存在其他发射带。通过引入 4 个高斯峰（见图 3），开始对 PL 光谱进行拟合；拟合成功的表现是拟合曲线与测得的 PL 光谱重合，而每个高斯峰均表示 BB35 中存在一个发射带。因此，确定了四个发射带，峰值分别位于 434 nm（2.86 eV）、499 nm（2.48 eV）、543 nm（2.3 eV）和 620 nm（2.0 eV）。这些发射带是多种细菌荧光团的特征，包括黄素和芳香族氨基酸，此前已有文献报道

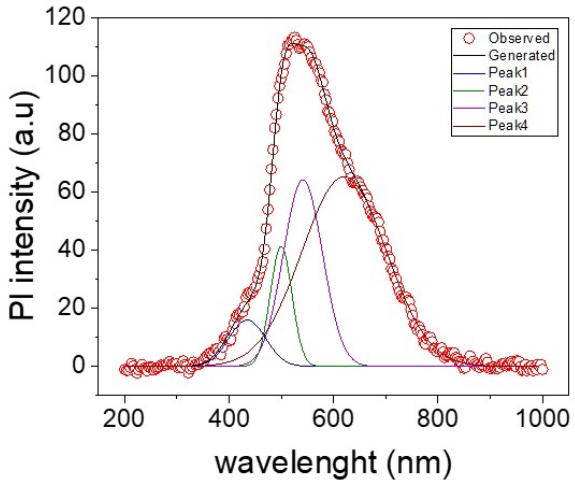

图3. LED光源激发功率最高时BB35的解卷积光致发光光谱。

过 [14, 15]。尤其是，在 530 nm 处观察到的发射峰与文献中已充分记载的黄素绿色自发荧光高度吻合，其发射带通常位于 500–550 nm 之间 [14]。

III. BB35的电学性质

A. 薄膜制备与表征详情

使用轮廓仪测量BB35薄膜的厚度，结果约为500 nm。金叉指电极的指宽和间隙宽度均为 100 μm，共有25对指电极，因此有效传感面积为5 mm x 5 mm。这种电极配置与其他基于薄膜的湿度传感器所用的配置类似 [17]。

B. 电流-电压与电流衰减测量

在室温下测量双歧杆菌的电流 (I)-电压 (V) 特性；随后，在选定的偏置电压 (± 1V) 下监测电流随时间的衰减情况，分别如图4-a和4-b所示。

如图4所示，短时间内的初始饱和电流值开始随时间衰减。约经过 10^5 s后，在两种偏置电压下，电流均趋于稳定于较低值。电流的下降遵循 $t^{-\alpha}$ 关系，其中 t 为时间，α 为衰减常数。电流出现这种衰减表明，BB35双歧杆菌内存在色散载流子输运，这可能是通过Poole-Frenkel载流子传导机制实现的。

注入载流子的色散迁移率会影响载流子的弛豫时间，这一现象可通过导纳测量进行研究。在各种无序有机体系和纳米结构材料中也观察到了类似的色散输运行为 [16, 19]。

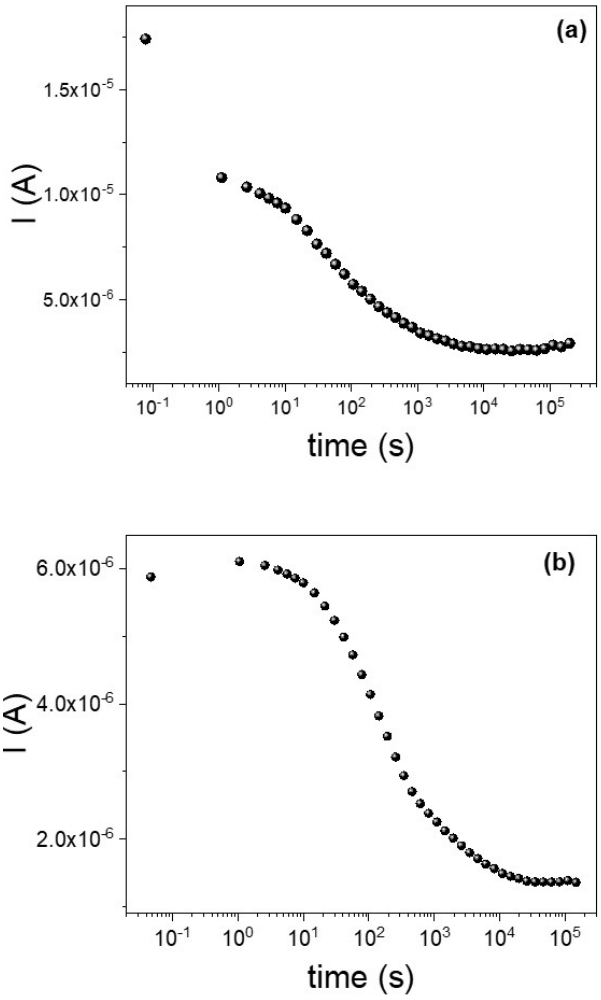

图4. BB35双歧杆菌在(a) +1 V、(b) -1 V偏置电压下的电流衰减。

C. 导纳测量

使用HP4192A LCR表在5 Hz - 13 MHz的频率范围内测量导纳 (Y)，并由此提取电容 $C(\omega)[= \mathrm{Im}(Y)/\omega]$和电导 $G(\omega)[= \mathrm{Re}(Y)]$ ，如图5所示。如图所示，电容随频率发生显著变化。

对于非色散输运，弛豫时间（或注入载流子从阴极到达阳极的输运时间）

ode) 与迁移率 μ 有关

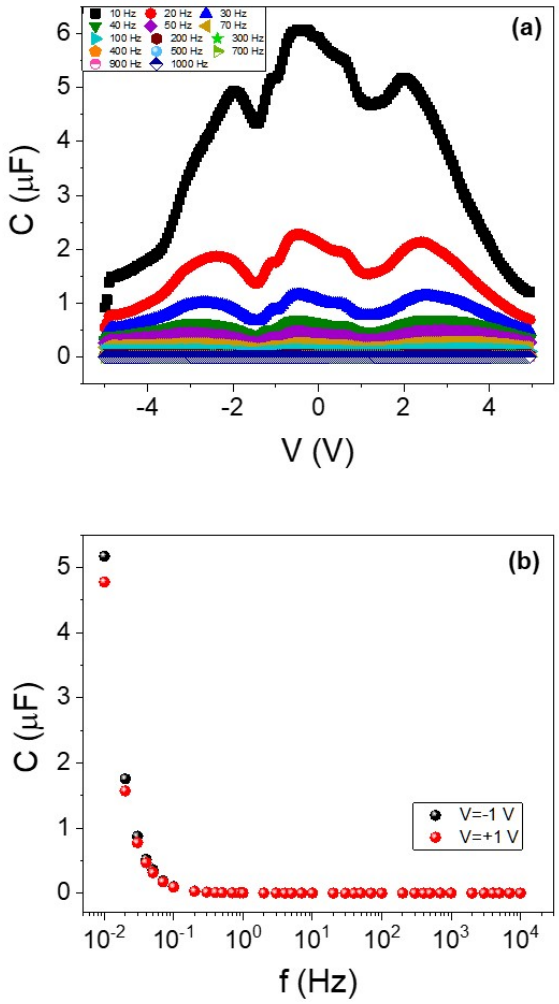

图 5. BB35 的电容变化：(a) 恒定 f ($< 1kHz$) 下随偏置电压的变化；(b) 恒定偏置电压下随频率的变化

$$\tau = \frac{L^2}{\mu V} \tag{1}$$

具有 L 厚度和 V 施加偏置电压。

另一方面，色散输运可用等待时间的衰减分布函数建模； $\psi(t) = t^{-(1+\alpha)}(0 < \alpha < 1)$表示连续两次跳跃之间的等待时间。在短时间内，平均位置 $< d >$ 随时间呈次线性变化，因此注入电荷的 $< d > \propto t^{\alpha}$ 会降低，导致迁移率下降；而在长时间内， μ_{dc}由漂移速度决定。总的来说，载流子的减速对应于一种频率相关的迁移率，其形式为

$$\mu_{\mathrm{nor}}(\Omega) = \frac{\mu(\Omega)}{\mu_{dc}} = 1 + M(i\Omega)^{1-\alpha} \tag{2}$$

其中，$\Omega = \omega\tau_t$ 和 μ_{nor} 为归一化迁移率， M 为比例常数。

计算得到的导纳为：

$$Y(\Omega) = \frac{\epsilon A}{\tau_t L} \cdot \frac{\Omega^3}{2i\tilde{\mu}(\Omega)^2} \times \frac{1}{[1 - \exp(-i\Omega/\tilde{\mu}(\Omega))] + 2\tilde{\mu}(\Omega)\Omega - i\Omega^2} \tag{3}$$

选择 M、 α 和 τ_t 作为拟合参数，将计算电容 ($\mathrm{Im}\, Y(\omega)/\omega$) 与测得的电容进行拟合，并得到连续拟合结果。通过拟合分析，我们得到 $\alpha = 0.28 \pm 0.02$、 $M = 0.45$ 和$\tau_t = 2.3\times10^{-4}$ s。这些值与其他无序系统中报道的弥散输运参数一致 [19]。

IV. BB35 的相对湿度传感性能

本节采用有机玻璃基底上的金叉指换能器结构，研究了 BB35 薄膜在 15%–90% 不同相对湿度水平下的相对湿度传感能力。同时，还测试了器件在不同相对湿度下的稳定性。

A. 实验

用于相对湿度传感实验的器件由金电极叉指阵列（IDA）构成，该阵列通过光刻工艺图案化在预先清洁的有机玻璃基底上。采用旋涂法制备 BB35 薄膜。在电极上沉积薄膜期间，基底温度保持恒定在 300 K。薄膜电导率随相对湿度变化的情况在实验室搭建的温控腔室中测量。通过将氮气（N_2）通入去离子水中鼓泡，获得所需的相对湿度。首先，向测试腔室通入干燥的 N_2 气体进行吹扫，直至传感器电流达到稳定值。随后，将薄膜表面暴露于 15% 至 90% 之间的六种不同相对湿度水平下 10 分钟，然后再用 N_2 吹扫 10 分钟。使用 Keithley 617 型静电计监测传感器电流随时间的变化，该静电计通过 IEEE 488 数据采集接口连接至个人计算机。这套实验装置与先前湿度传感研究中使用的装置类似 [1, 2]。

V. 讨论

A. 光学和电学测量

紫外-可见吸收测量显示出两个明显的吸收区域，表明 BB35 中存在多个光学带隙。第一个吸收区域（390-490 nm）对应的带隙约为 2.3 eV，而第二个区域（低于 390 nm）对应的带隙约为 3.0 eV。Tauc 图分析（$(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$的关系）确认带隙分别为 2.1 eV 和 2.8 eV，并证实该材料具有直接带隙特性。这种双带隙行为令人联想到用于各种传感应用的有机-无机杂化材料 [18]。

光致发光测量提供了有关电子结构的补充信息。对光致发光光谱进行解卷积后，显示出四个 distinct 的发射带，分别位于 434 nm（2.86 eV）、499 nm（2.48 eV）、543 nm（2.3 eV）和 620 nm（2.0 eV）。这些发射带表明，细菌基质中存在多个辐射复合中心，这些中心可能源自细菌细胞壁的不同分子组分，例如芳香族氨基酸（色氨酸、酪氨酸）、黄素或其他已知会在可见光范围内产生荧光的代谢副产物 [14, 15]。这些状态的存在与观察到的双带隙相一致，并可能在湿度传感过程中的电荷转移过程中发挥作用。尤其是，543 nm（2.3 eV）处的发射峰与文献充分记载的黄素绿色自发荧光高度吻合，后者通常表现出位于 500–550 nm 之间的发射带 [14]。

电学表征揭示了色散输运行为，其证据是电流随时间的幂律衰减（$I \propto t^{-\alpha}$），且 $\alpha \approx 0.3$。这种色散输运是无序系统的特征，可由泊尔-弗伦克尔传导机制描述，其中载流子在局域态之间跳跃。频率依赖的导纳测量进一步证实了这一行为，电容表现出明显的频率色散，可使用第3.2节中介绍的色散输运方程进行建模。拟合参数（$\alpha = 0.28 \pm 0.02$、 $M = 0.45$、$\tau_t = 2.3 \times 10^{-4}$ s）与其他无序有机体系所报告的数值一致 [19]。这些发现与我们此前对BB-12的观察结果一致，即电荷传输同样被发现强烈依赖于环境条件 [11]。

B. 灵敏度测量

在相对湿度传感测量过程中，薄膜从干燥氮气中的稳定状态开始，反复暴露于不同相对湿度下，并监测传感器电流的变化。每次暴露持续 10 分钟，随后在干燥 N_2 中恢复 10 分钟。不同相对湿度水平（15% 至 90%）对BB35涂覆的叉指换能器电导率的影响如室温下的图 6 所示。从图 6 可以看出，水分子与 BB35薄膜表面的相互作用会使传感器电流可逆地增加，并在几分钟内达到近乎稳定的数值。

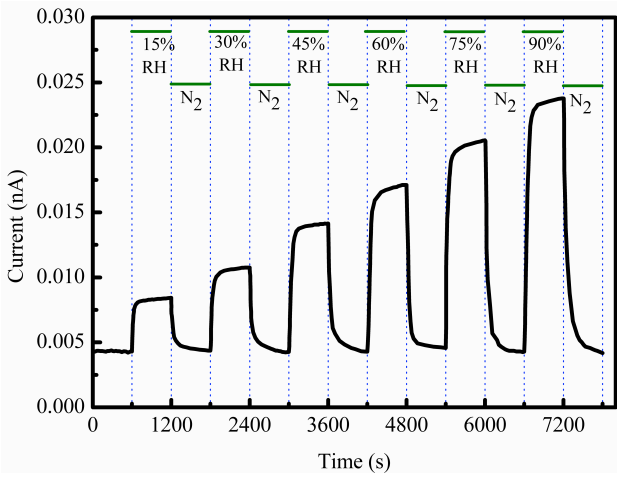

图6. 不同相对湿度水平下，基于BB35的传感器的响应-恢复行为。

响应时间（达到饱和度 90% 所需的时间）为 120–180 秒，具体取决于相对湿度水平；恢复时间（回到高于基线 10% 处所需的时间）为 180–240 秒。传感器电流的增加表明，水分子与 BB35 双歧杆菌之间的相互作用基于电荷转移，而电荷转移在很大程度上取决于分析物的分子结构。在相对湿度环境中暴露数分钟后，通入干燥氮气会使电流先快速下降，随后缓慢漂移，直至关闭相对湿度后电流恢复至初始值，这证明吸附过程是可逆的。表征湿度传感器的典型参数是灵敏度，可根据响应与恢复曲线得出。传感器的灵敏度 S 定义为

$$S = \frac{I_m - I_0}{I_0} \tag{4}$$

其中， I_m 是相对湿度气氛中的传感器电流最大值，I_0 是载气中的基线电流。

图 7 绘出了 BB35 涂层传感器的灵敏度随相对湿度水平的变化情况。如图 7 所示，传感器灵敏度随相对湿度水平升高而增加。灵敏度值从 15% 相对湿度时的 $S = 0.85$ 增至 90% 相对湿度时的 $S = 4.80$ 。线性回归分析显示二者呈线性关系，相关系数为 $R^2 = 0.992$，表明在测量范围内具有出色的线性。与其他生物基湿度传感器相比，BB35 的灵敏度具有竞争力。其性能也可与

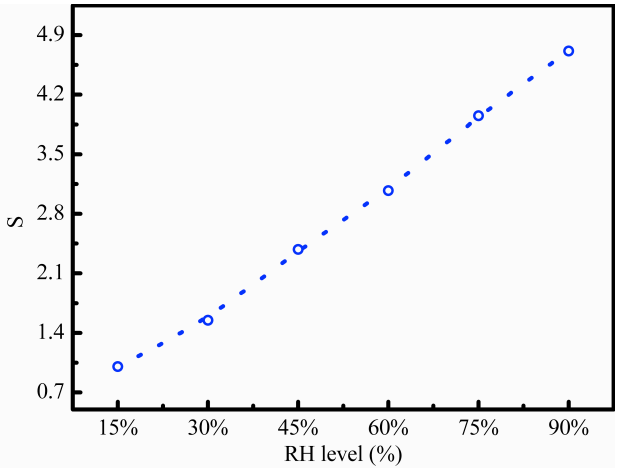

图 7. 灵敏度对相对湿度水平的依赖关系。

或优于文献报道的多种无机和复合湿度传感器 [4, 5, 17]。线性响应尤其有利于实际校准和应用 [8]。

BB35薄膜的灵敏度也超过了许多金属氧化物基传感器 [16] ，并且与我们此前关于 BB-12 的研究结果一致：我们观察到在潮湿条件下电导率增加了六个数量级 [11]。其性能也可与基于金属有机框架的湿度传感器 [6]相媲美。湿度传感技术在极端环境和生物医学应用方面的最新进展，进一步凸显了 BB 等环保材料的潜力35 [1, 9]。传感器灵敏度随相对湿度水平升高而增加，这表明水分子在薄膜表面的吸附是一个多层过程。在室温下，灵敏度随相对湿度水平线性增加，这表明传感器可用于相对湿度为 15-90% 的检测范围内的实际应用。

BB35 的冻干形式（5×10^9 菌落形成单位）在暴露于潮湿环境后仍保持活性，从而确保薄膜在整个测量过程中维持生物完整性。经过 60 天后，传感器的基线电流仍保持在初始值的 95% 以内，灵敏度仍保持在初始值的 92% 以内，展现出良好的长期稳定性。这种稳定性可与许多传统湿度传感器相媲美，甚至更胜一筹 [3]。

VI. 结论

本研究首次全面探究了婴儿双歧杆菌35624薄膜的多功能特性，涵盖光学、电学和湿度传感表征。光学性质与细菌组分（如黄素和芳香族氨基酸 [14, 15]）的荧光特性相一致。研究发现，电荷传输本质上呈弥散性，这是无序系统的特征，并可用Poole-Frenkel机制很好地描述，其拟合参数与以往关于相对湿度机制的综述一致。

最重要的是，我们证明了BB35薄膜可作为一种有效且环保的相对湿度传感器。该传感器在较宽的范围（15-90%相对湿度）内表现出高度线性（$R^2 = 0.992$）且可逆的响应，其灵敏度从15%相对湿度下的0.85提高到90%相对湿度下的4.80，响应时间为120-180秒，恢复时间为180-240秒。该性能可与文献报道的各种无机及复合型湿度传感器相媲美。

本研究的一项关键发现是，益生菌基薄膜表现出固有的半导体特性，具有定义明确的直接带隙以及常规半导体材料中通常可观察到的特征性电荷传输机制。这一发现表明，BB35不仅可作为生物传感层，还是一种真正的半导体材料，并有望应用于湿度传感以外的领域。所观察到的双带隙结构（2.1 eV和2.8 eV）使BB35处于宽禁带半导体的范围内，其性能可与氮化镓、氧化锌以及用于光电器件的某些金属氧化物等材料相媲美。此外，由泊尔-弗伦克尔传导主导的色散电荷输运机制表明，细菌薄膜中的载流子表现出与无序有机半导体中载流子相似的行为，为通过固体物理学视角理解生物系统开辟了新的可能性。

所展示的 BB35薄膜电学性质，尤其是其随湿度变化的电导率调制和半导体行为，为基础物理学研究和先进材料应用开辟了新途径。未来的研究将探索 BB35薄膜在超级电容器应用中的介电性质；细菌生物膜的高表面积和离子电导率有望提升储能容量。此外，还将开展温度依赖的电荷传输研究，以确定活化能，并深入了解这些生物薄膜中的泊尔-弗伦克尔传导机制。双带隙特性也表明其在有机光伏和光催化系统中具有潜在应用价值，其中细菌胞外多糖基质可作为量子点敏化或纳米颗粒修饰的天然模板。此外，将 BB35薄膜集成到有机-无机杂化异质结构中，或可揭示与下一代光电器件相关的新型界面现象。

总之，在一种益生菌中发现半导体特性，代表着我们对生物材料及其集成到电子和光电子系统中的潜力的理解发生了范式转变。

致谢

本研究由耶尔德兹技术大学资助，项目编号为 FCD-2025-7057 和 FBA-2021-4247.

数据可用性声明

数据可应作者要求提供。

[1] X. Dong、D. Li、A. Chen、D. Zheng，化学传感器**14**，20 2026 10 3390（），数字对象标识符：./chemosensors 14010020

[2] H. Farahani、R. Wagiran、M.N. Hamidon，传感器**14**，7881 2014 10 3390（），数字对象标识符：./s 140507881

[3] T.A. Blank、L.P. Eksperiandova、K.N. Be- likov，《传感器与执行器B》**228**，416（2016），数字对象标识符：10 1016 2016 01 015 ./j.snb. . . Z. Wang、L. Shi、F. Wu、S. Yuan、Y.

[4] Zhao、M. Zhang，纳米技术**22**，275502（2011），数字对象标识符：10.1088/0957- 4484 22 27 275502 / / / W. Liu、D. Zhang、H. Zhang、Y. Sun、

[5] Z. Wang、X. Ji、Y. Liu、J. Wang、G. Jiao，化学工程杂志**495**，153551（2024 10 1016 2024 153551 ），数字对象标识符：./j.cej. . K. Wu、

[6] T. Fei、T. Zhang，纳米材料**12**，4208（2022），数字对象标识符：10 3390 12234208 ./nano M.A.A. Abdelhamid、M.R. Ki、S.P.

[7] Pack，国际分子科学杂志 **25**, 4678 2024 10 3390 25094678

[8] （），数字对象标识符：./ijms Y. Xiao、C. Yu、Z. Xu、Q. Lin、C. Zhang、Y. Sun、Z. Zheng、J. Wu、L. Zhang、F. Wang，微系统与纳米工程**11**，221（2025），数字对象标识符：10.1038/s41378-025-01086-z [9] S. Pandey、J. Jency Rubia、A. Majhi、R.K. Jha、J.T. Mazumder、A. Kaushik、R.K. Jha，ACS应用纳米材料 **9**, 2616 2026 10 1021 5 03735 （），数字对

[10] 象标识符：./acsanm. c F. Altmann、P. Kosma、A. O’Callaghan、S. Leahy、F. Bottacini等，公共科学图书馆·综合**11**，e0162983（2016），数字对象标识符：10 1371 0162983 ./journal.pone. K. Bozkurt、C. Denktaş、O.

[11] Özdemir、A. Altındal、Z. Avdan、H.S. Bozkurt，开放应用科学期刊**9**，506（2019），数字对象标识符：10 4236 2019 96040 。/ojapps.。C.

[12] Denktaş、D. Yılmaz Baysoy、A. Bozdoğan、H.S. Bozkurt、K. Bozkurt、O. Özdemir、M. Yılmaz，《应用高分子科学杂志》**139**, 52086 2021 10 1002 52086 （），数字对象

[13] 标识符：。/app。H.S. Bozkurt、H. Civelek Yörüklü、K. Bozkurt、C. Denktaş、A. Bozdoğan、O. Özdemir、B. Özkaya，《国际全球变暖杂志》**26**，430（2021），数字对象标识符： 10 1504 2022 122435 。/

[14] IJGW.。L. Mullerova、K. Markova、S. Obruca、F. Mravec，微生物 **10**，1179（2022），数字对象标识符：10.3390/microorgan-isms10061179[15] M.S. Ammor，《荧光杂志》**17**，455（2007），数字对象标识符：10 1007 10895 007 0180 6 。/s - - - Q. Kuang、C. Lao、Z.L. Wang、Z.

[16] Xie、L. Zheng，《美国化学会志》**129**，6070（2007），数字对象标识符：10.1021/ja070788m [17] S.Y. Park、Y.H. Kim、S.Y. Lee、W. Sohn、J.E. Lee、D.H. Kim、Y.S. Shim、K.C. Kwon、K.S. Choi、H.J. Yoo、J.M. Suh、M. Ko、J.H. Lee、M.J. Lee、S.Y. Kim、M.H. Lee、H.W. Jang，《材料化学A》**7**，5142（2019），数字对象标识符：10.1039/c7ta11375g [18] J. Dai、T. Zhang、H. Zhao、T. Fei，《传感器与执行器B》**242**, 1108 2017 10 1016 2016 09 139 （），数字对象标识

[19] 符：。/j.snb.。。R. Rahman、Z.N. Turjo、S.B. Sayhid，《下一代材料》**9**，100917 2025 10 1016 2025 100917（），数字对象标识符：。/j.nxmate.。