材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021051901

温度对一维压电半导体梁弯曲特性的影响

李蒙恩，韩　钰，王宇欣，陈广俊，徐梦瑶，张巧云*

（郑州大学 力学与安全工程学院，郑州 450001）

摘　要： 采用微分算子法，理论研究了一维热压电半导体梁在横向力作用下的静态弯曲问题，得到了位移、电势、载流子、温度以及剪力、弯矩、电位移和电流密度等物理场的解析解，并分析了温度对 n 型 ZnO 压电半导体悬臂梁力电热耦合性能的调控作用。研究结果表明：温度能显著影响压电半导体梁的力电场分布，造成电势、载流子、电场和电位移在高温区域发生显著变化，而对于位移、剪力和弯矩影响较小。该温度调控效果主要是由热释电效应产生的极化电荷引起的。

关键词： 压电半导体梁；静态弯曲；温度；微分算子法；多场耦合

中图分类号： TN304.9　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0662－06

Effect of Temperature on The Bending Characteristics of One-dimensional Piezoelectric Semiconductor Beams

LI Mengen, HAN Yu, WANG Yuxin, CHEN Guangjun, XU Mengyao, ZHANG Qiaoyun

(School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, CHN)

Abstract: In this paper, the static response of a thermal piezoelectric semiconductor (PSC) beam with flexural deformation is studied with a differential operator method. The analytical solutions of the deflection, electric potential, carrier density, temperature, shear force, bending moment, electric displacement and electric current density are obtained. The effects of temperature on the electromechanical behaviors of n-type ZnO piezoelectric semiconductor cantilever beam are discussed. The numerical results show that the temperature can significantly affect the electromechanical properties of PSC beams. It causes sudden changes of the electric potential, carrier density, electric field, and electric displacement in high temperature regions, while smaller changes of the deflection, shear force and bending moment. These effects are mainly induced by the polarization charges of pyroelectric effect.

Key words: piezoelectric semiconductor beam; static bending; temperature; differential operator method; multi-field coupling

0　引言

作为第三代半导体（如 ZnO，GaN，CdS 等）的关键材料，压电半导体以其独特的压电性与半导体特性的耦合作用，在新型智能和多功能电子器件领域具有重要的应用前景[1]。这类材料的核心性能是施加的偏置电压或机械力使结构产生压电势，形成的内部电场与载流子相互作用，使得材料呈现出丰富的机械、电子和光电等多场耦合特性。1960 年，Hutson 首次通过对 ZnO 等半导体材料的研究发现了压电效应，并将这些材料称为压电半导体[2]。然而，由于早期的制备条件有限，压电半导体的压电性较弱，人们通常将它们作为普通的半导体进行研究[3-4]。直到 2007 年，Wang[5-6] 发现了压电效应可以用来调控材料的半导体性能，并提出了压电电子

收稿日期：2021－05－19.

基金项目：国家自然科学基金青年项目(11702251).

* **通信作者：**张巧云

学和压电光电子学的新领域，极大地促进了压电半导体的开发和应用。目前，具有较大压电性的导体结构，例如 ZnO 梁、薄膜、板、螺旋和管等[7-9]被开发出来，并广泛应用于场效应晶体管[10]、纳米发电机[11]、声电传输设备[12]、植入式生物传感器[13]、光学探测器[14]等器件中。

典型的压电半导体梁结构被广泛应用于各种微型化、多功能化的电子器件中。为了更好地理解压电半导体梁的多场耦合行为，开发新型半导体器件，学者们做了大量的研究工作。例如：热力学平衡条件下，Wang 等[15-16]研究了压电半导体纳米线弯曲时自由载流子的电学行为及压电势的分布。Zhang 等[17]推导了考虑剪切变形的一阶梁弯曲理论，并得到了压电半导体梁在横向力作用下的内部力电场与载流子的解析解。Dai 等[18]研究了 ZnO 悬臂梁在简谐载荷驱动下的动态弯曲问题，得到了前三阶固有频率和振型。Liang 等[19]研究了压电半导体悬臂梁的瞬态弯曲振动问题，并分析了各物理场随时间的演变过程。此外，压电半导体作为一种热电材料，在太阳能发电、热电制冷、红外光传感器等领域拥有巨大的应用潜力[20-21]。研究发现，利用热驱动产生极化的电场，可以对材料的力电学行为进行调控，从而实现热传感、驱动和能量俘获等功能。例如，Wang 等[22]利用 ZnO 纳米线的热释电效应，提出一种光热诱发型纳米发电机，广泛应用于红外光传感器、生物成像、通信和光热探测等领域。Cheng 等[23]研究了温度变化对压电半导体纳米线机电场的影响，发现温度变化和电流之间可以实现传感或能量转换。

基于以上研究背景，本文采用一阶剪切梁理论，研究了一维 n 型氧化锌压电半导体梁的力电热耦合性能，给出挠度、电势、载流子、温度以及各物理场的解析解，研究了温度对材料内部力电热耦合行为的调控作用。

1　基本方程和边界条件

如图 1 所示，考虑一个长为 L，具有圆形截面，半径为 a 的压电半导体梁，其尺寸满足 $L \gg a$。材料的 c 轴沿 z 方向。在笛卡尔坐标系中，梁的长度方向与 z 轴保持一致，施加的横向力 F_0 在 y-z 平面内。基于一阶剪切变形理论，压电半导体梁的位移、电势、载流子浓度和温度可以近似表示为

$$\begin{cases} u_z(z) \cong w(z) \\ u_y(z) \cong y\psi(z) \\ \phi(z) \cong y\phi^{(1)}(z) \\ \Delta n(z) \cong y\Delta n^{(1)}(z) \\ \theta(z) \cong y\theta^{(1)}(z) \end{cases} \tag{1}$$

其中，w 和 ψ 分别表示挠度和转角，$\phi^{(1)}$，$\Delta n^{(1)}$ 和 $\theta^{(1)}$ 分别表示与电势、载流子和温度相关的量。压电半导体的平衡方程和热传导方程参见文献[18，24]，通过对平衡方程沿截面进行积分，可以得到一维热压电半导体梁的平衡方程：

$$\begin{cases} Q_{,z} = 0 \\ M_{,z} - Q = 0 \\ d_{z,z}^{(1)} - d_y^{(0)} = -qI\Delta n^{(1)} \\ j_{z,z}^{(1)} - j_y^{(0)} = 0 \\ H_{z,z}^{(1)} - H_y^{(0)} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

其中，符号“，”表示求导，M 和 Q 分别为弯矩和剪力，d_y 和 d_z 表示零阶和一阶电位移，j_y 和 j_z 表示零阶和一阶电流密度，H_y 和 H_z 表示零阶和一阶热流密度，A 和 I 分别表示梁的惯性矩和截面面积：

$$A = \pi a^2, \quad I = \int y^2 \mathrm{d}A = \frac{\pi a^4}{4} \tag{3}$$

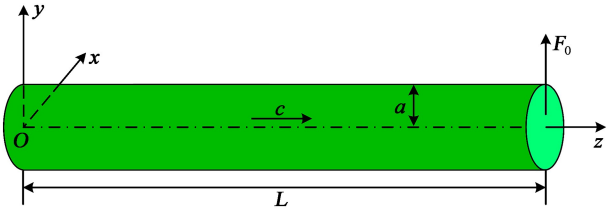


图 1　压电半导体梁模型

假设压电半导体内部载流子变化较小，则压电半导体梁的本构方程可以线性化表示为

$$\begin{cases} \sigma_{zz} = c_{33}\varepsilon_{zz} - e_{33}E_z - \lambda_{33}\theta \\ \tau_{yz} = c_{44}\gamma_{yz} - e_{15}E_y \\ D_y = e_{15}\gamma_{yz} + \kappa_{11}E_y \\ D_z = e_{33}\varepsilon_{zz} + \kappa_{33}E_z + p_3\theta \\ J_y = qn_0\mu_{11}E_y + qd_{11}N_y \\ J_z = qn_0\mu_{33}E_z + qd_{33}N_z \\ h_y = -\beta_{11}\Theta_y \\ h_z = -\beta_{11}\Theta_z \end{cases} \tag{4}$$

式中，σ_{zz} 和 τ_{yz} 表示应力分量，D_x 和 D_y 为电位移分量，J_x 和 J_y 为电流密度分量，h_x 和 h_y 为热流密度分量，c_{33} 和 c_{44} 为弹性模量，e_{33} 和 e_{15} 为压电系数，κ_{11} 和 κ_{33} 为介电常数，μ_{11} 和 μ_{33} 为电子迁移率，

d_{11} 和 d_{33} 为电子扩散系数，$q(1.602\times10^{-19}\ \mathrm{C})$，$n_0$，$\lambda_{11}$，$p_3$ 和 β_{11} 分别表示元电荷、初始电子浓度、热模量常数、热释电常数和热传导率。相应的梁的几何方程为

$$\begin{cases}\varepsilon_{zz}=y\psi_{,z}, & \gamma_{yz}=w_{,z}+\psi\\ E_y=-\phi^{(1)}, & E_z=-y\phi^{(1)}_{,z}\\ N_y=\Delta n^{(1)}, & N_z=y\Delta n^{(1)}_{,z}\\ \Theta_y=\theta^{(1)}, & \Theta_z=y\theta^{(1)}_{,z}\end{cases}\tag{5}$$

式中，ε_{zz} 和 γ_{yz} 为应变分量，E_y 和 E_z 为电场分量。将方程(5)代入方程(4)，再将方程(4)沿截面进行积分，可得

$$\begin{cases}M=c_{33}I\psi_{,z}+e_{33}I\phi^{(1)}_{,z}-\lambda_{33}I\theta^{(1)}\\ Q=c_{44}A(w_{,z}+\psi)+e_{15}A\phi^{(1)}\\ d_y^{(0)}=e_{15}A(w_{,z}+\psi)-\kappa_{11}A\phi^{(1)}\\ d_z^{(1)}=e_{33}I\psi_{,z}-\kappa_{33}I\phi^{(1)}_{,z}+p_3I\theta^{(1)}\\ j_y^{(0)}=-q\mu_{11}n_0A\phi^{(1)}+qd_{11}A\Delta n^{(1)}\\ j_z^{(1)}=-qn_0\mu_{33}I\phi^{(1)}_{,z}+qd_{33}I\Delta n^{(1)}_{,z}\\ H_y^{(0)}=-\beta_{11}A\theta^{(1)}\\ H_z^{(1)}=-\beta_{33}I\theta^{(1)}_{,z}\end{cases}\tag{6}$$

将方程(6)代入方程(2)，可以得到压电半导体梁弯曲的控制方程：

$$\begin{cases}c_{44}(w_{,zz}+\psi_{,z})+e_{15}\phi^{(1)}_{,z}=0\\ \begin{bmatrix}c_{33}I\psi_{,zz}+e_{33}I\phi^{(1)}_{,zz}-\lambda_{33}I\theta^{(1)}_{,z}-\\ c_{44}A(w_{,z}+\psi)-e_{15}A\phi^{(1)}\end{bmatrix}=0\\ \begin{bmatrix}e_{33}I\psi_{,zz}-\kappa_{33}I\phi^{(1)}_{,zz}+p_3I\theta^{(1)}_{,z}-\\ e_{15}A(w_{,z}+\psi)+\kappa_{11}A\phi^{(1)}\end{bmatrix}=-qI\Delta n^{(1)}\\ \begin{bmatrix}-n_0\mu_{33}I\phi^{(1)}_{,zz}+d_{33}I\Delta n^{(1)}_{,zz}+\\ n_0\mu_{11}A\phi^{(1)}-d_{11}A\Delta n^{(1)}\end{bmatrix}=0\\ -I\theta^{(1)}_{,zz}+A\theta^{(1)}=0\end{cases}\tag{7}$$

本研究考虑压电半导体悬臂梁模型：即梁的左端固支，右端剪力为 F_0，两端存在温度差 θ_0，相应的边界条件为

$$\begin{cases}z=0,w=0,\psi=0,\phi^{(1)}=0,\Delta n^{(1)}=0,\theta^{(1)}=0\\ z=L,Q=F_0,M=0,d_z^{(1)}=0,j_z^{(1)}=0,\theta^{(1)}=\theta_0\end{cases}\tag{8}$$

2 微分算子法求解

上述压电半导体梁的多场耦合属于线性偏微分方程组的求解问题，可采用微分算子法求解析解。我们将微分算子 D 引入控制方程(7)，可得

$$\begin{cases}c_{44}A(D^2w+D\psi)+e_{15}AD\phi^{(1)}=0\\ \begin{bmatrix}(c_{33}ID^2-c_{44}A)\psi-c_{44}ADw+\\ (e_{33}ID^2-e_{15}A)\phi^{(1)}-\lambda_{33}ID\theta^{(1)}\end{bmatrix}=0\\ \begin{bmatrix}(e_{33}ID^2-e_{15}A)\psi+(\kappa_{11}A-\kappa_{33}ID^2)\phi^{(1)}-\\ e_{15}ADw+qI\Delta n^{(1)}+p_3ID\theta^{(1)}\end{bmatrix}=0\\ \begin{bmatrix}(n_0\mu_{11}A-n_0\mu_{33}ID^2)\phi^{(1)}+\\ (d_{33}ID^2-d_{11}A)\Delta n^{(1)}\end{bmatrix}=0\\ (A-ID^2)\theta^{(1)}=0\end{cases}\tag{9}$$

假设方程(9)的系数矩阵为 $\boldsymbol{C}$，若该方程有非零解，则其系数矩阵的行列式须为零，即

$$\det(\boldsymbol{C})=0\tag{10}$$

该特征方程展开后是一个一元十次方程，求解该方程可以得到 10 个实数根，其中包括 4 个零根和 6 个非重根 $D=r_m$，$(m=1,2,\cdots,6)$，这 6 个实数根仅与材料参数有关。相应的 w，ψ，$\phi^{(1)}$，$\Delta n^{(1)}$ 和 $\theta^{(1)}$ 的通解可以表示为

$$\begin{cases}w=\sum_{m=1}^{6}A_me^{r_mz}+A_7z^3+A_8z^2+A_9z+A_{10}\\ \psi=\sum_{m=1}^{6}B_me^{r_mz}+B_7z^3+B_8z^2+B_9z+B_{10}\\ \phi^{(1)}=\sum_{m=1}^{6}C_me^{r_mz}+C_7z^3+C_8z^2+C_9z+C_{10}\\ \Delta n^{(1)}=\sum_{m=1}^{6}E_me^{r_mz}+E_7z^3+E_8z^2+E_9z+E_{10}\\ \theta^{(1)}=\sum_{m=1}^{6}F_me^{r_mz}+F_7z^3+F_8z^2+F_9z+F_{10}\end{cases}\tag{11}$$

其中，$A_1\sim A_{10}$，$B_1\sim B_{10}$，$C_1\sim C_{10}$，$E_1\sim E_{10}$ 和 $F_1\sim F_{10}$ 分别为待定系数，将以上通解的表达式代入控制方程(7)，可以将 A，B，E，F 用 C 表示出来，即待求解的共有 10 个独立常数：$C_1\sim C_{10}$。利用边界条件(8)，可以得到 10 个关于 C 的线性方程，对上述方程组进行求解，即可确定系数 $C_1\sim C_{10}$，从而得到结构内各物理量的解析解。

3 结果与讨论

作为算例，本文采用的 n 型 ZnO 压电半导体材料的参数如表 1 所示，假设梁的半径 $a=10$ nm，长度 $L=120$ nm，初始载流子浓度 $n_0=10^{21}\ \mathrm{m}^{-3}$，在压电半导体梁右端施加横向力 F_0 和温差 θ_0。需要注意的是，在分析静态弯曲时，为了确保线性化理论成立，本文施加的剪力和温度差很小，以确保载流子在

n_0 附近扰动。

表 1　氧化锌的材料参数

参数		数值
弹性系数	c_{33}/GPa	210.9
	c_{44}/GPa	42.4
压电常数	e_{33}/(C·m^{-2})	1.32
	e_{15}/(C·m^{-2})	−0.48
介电常数	ε_{11}/(C·V^{-1}·m^{-1})	7.57×10^{-11}
	ε_{33}/(C·V^{-1}·m^{-1})	9.03×10^{-11}
热模量常数	λ_{11}/(N·K^{-1}·m^{-2})	3.16×10^{6}
热释电常数	p_3/(C·K^{-1}·m^{-2})	-5×10^{-11}
电子迁移率	μ_{11},μ_{33}/(m^2·V^{-1}·s^{-1})	0.02
电子扩散系数	D_{11},D_{33}/(m^2·s^{-1})	5.17×10^{-4}
热传导率	β_{11}/(W·K^{-1}·m^{-1})	15

接下来，为了检验微分算子法所求解析解的正确性，本文还借助多物理场耦合软件 COMSOL 对上述问题进行数值求解，并将解析解与数值解进行对比。由于在 y 方向上各物理量呈线性变化，选取横截面最上端的点（$y=a$）作为代表，考虑 $F_0=1$ nN，$\theta_0=1$ K 的加载条件。

定义广义位移（包含挠度 w、转角 ψ、电势 $\phi^{(1)}$、载流子浓度 $\Delta n^{(1)}$ 和温度 $\theta^{(1)}$）为 U。图 2 给出了广义位移 U 沿 z 方向的分布，可以看出，解析解与 COMSOL 数值解的计算结果吻合很好，两组数据之间的误差很小（约为 0.098%）。

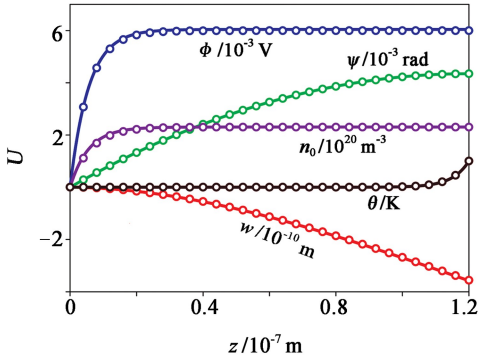
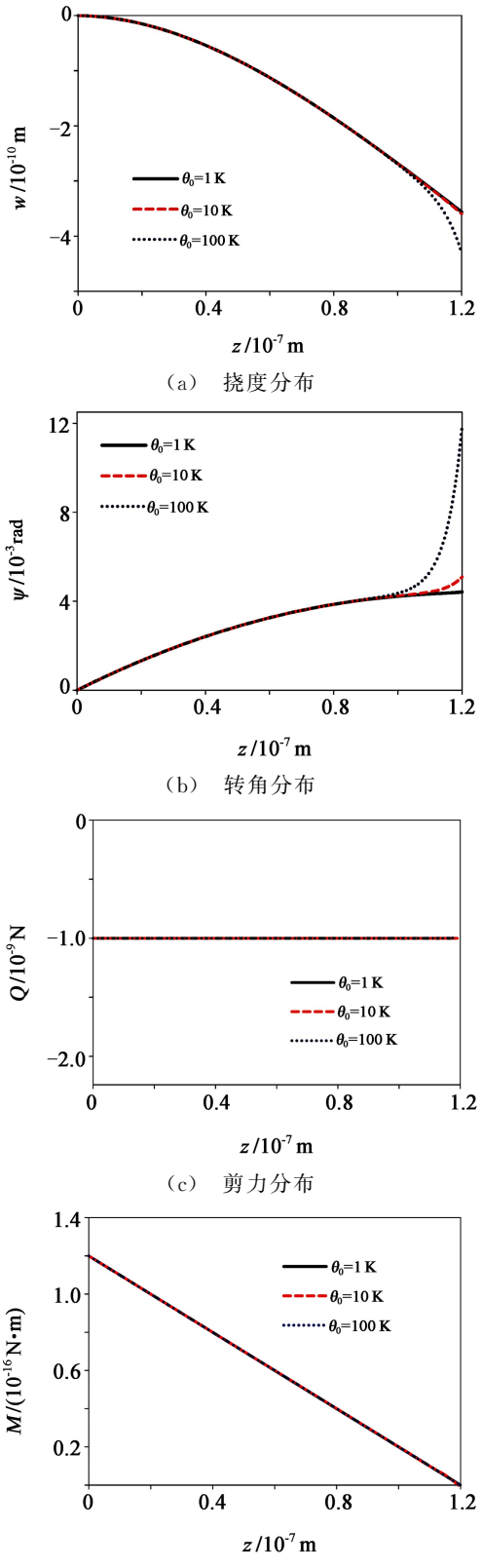


图 2　广义位移 U 沿梁轴线方向的分布（实线代表解析解，圆点代表 COMSOL 给出的数值解）

为了讨论温度场对压电半导体梁力电学性能的影响，我们采用横向力 $F_0=1.0$ nN，温差 θ_0 分别为 1，10 和 100 K 的加载条件进行分析。

图 3(a)和(b)分别给出了挠度和转角沿 z 方向的分布图。由图可知，随着 θ_0 的增大，挠度在右端附近发生小幅度的增大，而转角的增大更加明显。分析表明，影响挠度和转角增大的主要因素不是热应力，而是热释电效应。剪力和弯矩的分布如图 3(c)和(d)所示，剪力和弯矩在整个梁上均匀分布且不随 θ_0 变化，这说明了热应力不是影响力学性能的主导因素。



(a)　挠度分布

(b)　转角分布

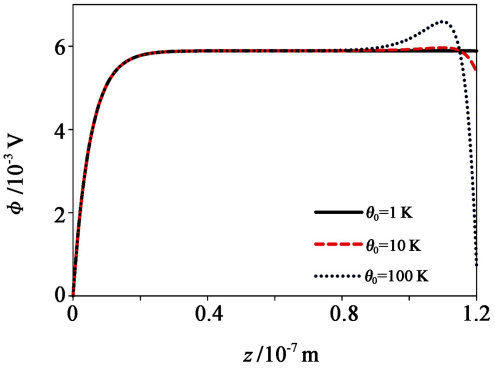
(c)　剪力分布

(d)　弯矩分布

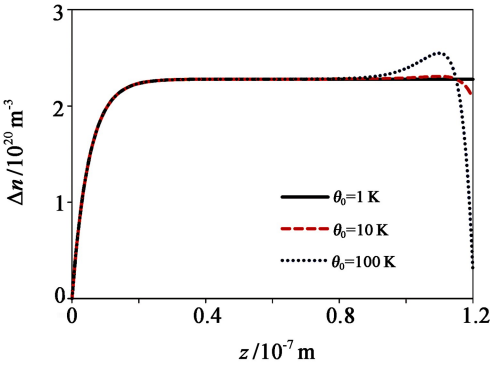
图 3　不同温差下挠度、转角、剪力和弯矩沿梁轴线方向的分布

图 4(a)和(b)分别为电势和电子浓度的分布

图。可以看出，电势和电子浓度在左端点附近迅速增大，之后达到最大值且保持不变。这是由于正压电效应，电子在极化电场的作用下重新分布，从电势低的区域流向电势高的区域，也就是向右侧聚集。而在右端附近，θ_0 增大造成电势和载流子的先增加，后迅速减小。增加是因为高温引起更强的热释电效应，减小是因为电位移边界条件的约束作用。



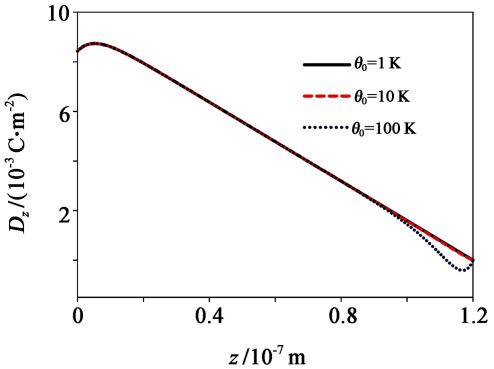
(a) 电势分布



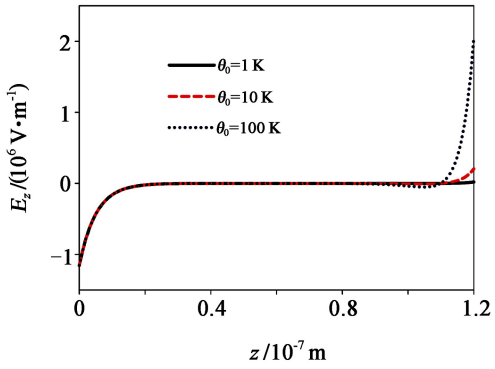
(b) 载流子浓度分布

图 4 不同温差下电势和载流子浓度沿梁轴线方向的分布

图 5(a)和(b)是温差对电位移 D_z 和电场 E_z 的影响，由图中可以看出，由于热释电效应的增强和边界条件的约束，电位移 D_z 在右端附近突然降低然后上升至零；而电场 E_z 只受到热释电的影响，在右



(a) 电位移 D_z 分布

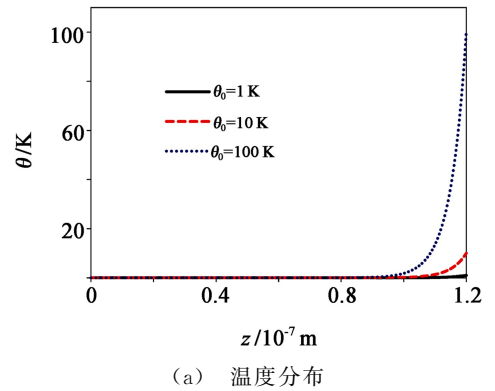


(b) 电场 E_z 分布

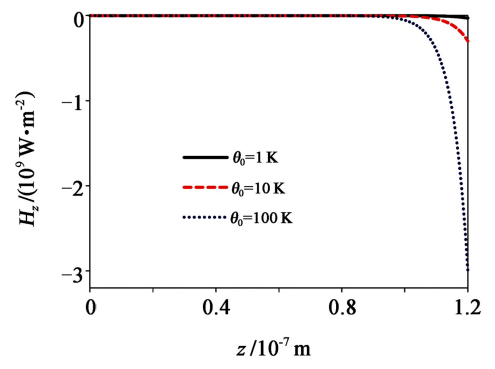
图 5 不同温差下电位移 D_z 和电场 E_z 沿梁轴线方向的分布

端附近明显增加。另外，需要指出的是，由于梁在左右两端施加的电绝缘条件，梁内部的电流密度非常小，故未给出电流密度在梁内的分布图。

如图 6(a)和(b)所示，温度和热流密度沿 z 方向呈双曲函数变化，均在右端达到最大值，这是由于温度场在压电半导体梁中属于单项耦合，这是一个纯粹的热传导效应，它只与施加的温差有关。



(a) 温度分布



(b) 热流密度分布

图 6 不同温差下温度和热流密度沿梁轴线方向的分布

4 结论

本文基于一阶剪切梁理论，推导了一维热传导-

压电半导体梁的基本方程，使用微分算子法求得静态响应的解析解，研究了 ZnO 压电半导体悬臂梁的力电热耦合性能，并分析了外力和温度对材料内部力电热耦合性能的影响。结果表明：在剪力和温度差的作用下，压电效应和热释电效应都能引起压电势，材料内部的电子会在极化电场的驱动下重新分布，从而展现出力电热耦合性能；由于热释电效应的存在，温度对结构的电学性能具有显著的调控作用，可造成电势、载流子、电场和电位移在高温区发生突变，而对位移、剪力和弯矩等力学量的调控效果较小。本文的研究为压电半导体电子器件的开发和应用提供了一定的理论依据。此外，该研究忽略了电流的非线性项和热电效应，对于较大载流子变化和高温条件，还需要展开相关课题研究。

参考文献：

[1] Wang Z L. Progress in piezotronics and piezo-phototronics [J]. Adv. Mater., 2012, 24(34): 4632-4646.

[2] Hutson A R. Piezoelectricity and conductivity in ZnO and CdS [J]. Phys. Rev. Lett., 1960, 4(10): 505-507.

[3] Hutson A R, White D L. Elastic wave propagation in piezoelectric semiconductors[J]. Appl. Phys., 1962, 4(33): 40-47.

[4] Chattopadhyay D. Piezoelectric and deformation potential acoustic scattering mobility of a two-dimensional electron gas in quantum wells[J]. Phys. Status. Solidi B, 2020, 135(2): 409-413.

[5] Wang Z L. Nanopiezotronics[J]. Adv. Mater., 2007, 19(6): 889-892.

[6] Wang Z L. Piezopotential gated nanowire devices: Piezotronics and piezo-phototronics[J]. Nano Today, 2010, 5(6): 540-552.

[7] Zhang C L, Wang X Y, Chen W Q. An analysis of the extension of a ZnO piezoelectric semiconductor nanofiber under an axial force[J]. Smart Mater. Struct., 2017, 26: 025030.

[8] Zhang X B, Taliercio T, Kolliakos S, et al. Influence of electron-phonon interaction on the optical properties of Ⅲ nitride semiconductors[J]. Phys. Condens Matter., 2001, 13(32): 7053-7074.

[9] He J H, Liu J, Chen L J. Piezoelectric gated diode of a single ZnO nanowire[J]. Adv. Mater, 2010, 19(6): 781-784.

[10] Wang X, Zhou J, Song J, et al. Piezoelectric field effect transistor and nanoforce sensor based on a single ZnO nanowire[J]. Nano. Lett., 2006, 6(12): 2768-2772.

[11] Zhu G, Yang R S, Wang S H. Flexible high-output nanogenerator based on lateral ZnO nanowire array [J]. Nano. Lett., 2010, 10(8): 3151-3155.

[12] Kumar B, Kim S W. Recent advances in power generation through piezoelectric nanogenerators[J]. J. Mat. Chem., 2011, 21(47): 18946.

[13] Rasheed H S, Ahmed N M, Matjafri M Z. Multilayer ZnO/Pd/ZnO structure as sensing membrane for extended-gate field-effect transistor (EGFET) with high pH sensitivity[J]. J. Electron. Mater., 2017, 46(10): 5901-5908.

[14] Yang Q, Guo X, Wang W H. Enhancing sensitivity of a single ZnO micro-/nanowire photo detector by piezo-phototronic effect[J]. ACS Nano., 2010, 4(10): 6285-6291.

[15] Gao Y F, Wang Z L. Equilibrium potential of free charge carriers in a bent piezo-electric semiconductive nanowire[J]. Nano Lett., 2009, 9(3): 1103.

[16] Zhang C L, Wang X Y, Chen W Q, et al. Bending of a cantilever piezoelectric semiconductor fiber under an end force [M]. Switzerland: Springer, 2018: 261-278.

[17] Gao Y, Wang Z L. Electrostatic potential in a bent piezoelectric nanowire: The fundamental theory of nanogenerator and nanopiezotronics[J]. Nano. Lett., 2007, 7(8): 2499-2505.

[18] Dai X Y, Zhu F, Qian Z H, et al. Electric potential and carrier distribution in a piezoelectric semiconductor nanowire in time-harmonic bending vibration[J]. Nano Energy, 2018, 43: 22.

[19] Liang Y, Yang W, Yang J S. Transient bending vibration of a piezoelectric semiconductor nanofiber under a suddenly applied shear force[J]. Acta Mech. Solida Sin., 2019, 32(6): 688-697.

[20] Sladek J, Sladek V, Pan E. Fracture analysis in piezoelectric semiconductors under a thermal load [J]. Eng. Fract. Mech., 2014, 126: 27-39.

[21] Cheng R R, Zhang C L. Electrical behaviors of a piezoelectric semiconductor fiber under a local temperature change [J]. Nano Energy, 2019, 66: 104081.

[22] Wang X, Dai Y, Liu R, et al. Light-triggered pyroelectric nanogenerator based on PN-junction for self-powered near-infrared photosensing[J]. ACS Nano, 2017, 11(8): 8339-8345.

[23] Cheng R, Zhang C, Yang J. Thermally induced carrier distribution in a piezoelectric semiconductor fiber [J]. J. Electron. Mater., 2019, 48(8): 4939-4946.

[24] Jin Z H, Yang J S. Energy conversion efficiency of a piezo-thermoelectric material[J]. J. Electron. Mater., 2018, 47(8): 1-6.

作者简介：

李蒙恩(1994—)，男，河南新乡人，硕士研究生，主要研究领域为压电半导体的多场耦合性能；

张巧云(1986—)，女，河南开封人，博士，副教授，研究生导师，主要研究方向为压电半导体、压电等多场材料性能分析的解析与数值方法。