



## 基于一维弹道导体的三端纳米线制冷机的性能优化

徐帅 杨贇贇 刘行 何济洲

## Performance optimization of three-terminal nanowire refrigerator based on one-dimensional ballistic conductor

Xu Shuai Yang Yun-Yun Liu Xing He Ji-Zhou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 020501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211077

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211077>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 线性不可逆热力学框架下一个无限尺寸热源而有限尺寸冷源的制冷机的性能分析

Performance analysis of a refrigerator operating between an infinite-sized hot reservoir and a finite-sized cold one within linear irreversible thermodynamics

物理学报. 2018, 67(4): 040502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172010>

#### 光子驱动量子点制冷机

Quantum dot refrigerator driven by photon

物理学报. 2019, 68(22): 220501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191091>

#### 稀释制冷机及其中的热交换问题

Dilution refrigerator and its heat transfer problems

物理学报. 2021, 70(23): 230202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211760>

#### 用于亚开温区的极低温绝热去磁制冷机

Ultra-low temperature adiabatic demagnetization refrigerator for sub-Kelvin region

物理学报. 2021, 70(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202237>

#### 基于涂覆石墨烯的三根电介质纳米线的THz波导的模式特性分析

Modes characteristics analysis of THz waveguides based on three graphene-coated dielectric nanowires

物理学报. 2018, 67(10): 108101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180036>

#### 外电场辅助化学气相沉积方法制备网格状 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米线及其特性研究

Growth and characterization of grid-like  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanowires by electric field assisted chemical vapor deposition method

物理学报. 2018, 67(21): 218101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180805>

# 基于一维弹道导体的三端纳米线 制冷机的性能优化<sup>\*</sup>

徐帅 杨贇贇 刘行 何济洲<sup>†</sup>

(南昌大学物理系, 南昌 330031)

(2021 年 6 月 7 日收到; 2021 年 9 月 18 日收到修改稿)

基于一维弹道导体, 建立了三端纳米线制冷机模型. 该模型是由一个中间空腔和左右电子库组成, 中间空腔和两电子库通过一维纳米线导体进行连接. 利用朗道方程和基本热力学公式推导出两电子库之间电荷流和能量流的表达式, 进而得出该制冷机模型的工作区间, 然后分析其性能特征并讨论制冷机性能优化. 研究表明: 不同的参数下该制冷机会有不同的制冷区间, 但每个制冷区间都存在一个温差上限, 超过该温差, 此装置将不能进行制冷. 制冷率随制冷系数变化的特征曲线为回原点扭叶型曲线, 这为衡量该制冷机性能提供了重要指标. 尽可能减小纳米线的能级宽度会提高该制冷机的工作性能.

**关键词:** 三端热电制冷机, 纳米线, 制冷率, 制冷系数

**PACS:** 05.70.-a, 73.50.Lw, 73.63.Nm, 85.80.Fi

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211077

## 1 引言

根据塞贝克效应, 热电装置可通过吸收热能来对外输出功率, 根据珀尔帖效应, 热电装置可利用电能来实现对物体的制冷. 由此可以看出, 热电装置在能源利用中发挥着重要的作用. 然而, 现有的热电装置因为效率低而不能得到广泛应用. 因此, 人们需要寻找新的热电材料来提高热电装置的功率和效率. 随着纳米技术的发展, 越来越多的纳米结构如量子点、纳米线、量子阱、超晶格等被报道<sup>[1-13]</sup>. 理论和实验结果表明, 将低维纳米结构作为热电材料可以显著提高热电装置的热力学性能.

近年来, 许多学者在三端纳米结构热电装置的热力学性能研究上取得了显著进展. 与传统的双端热电装置相比, 三端热电装置可以将电子流和热流分开, 从而显著提高热电装置的热力学性能. 例如,

Chen 和 Zhang 等<sup>[14-19]</sup>具体研究了不同能量过滤体的三端能量选择性电子器件的热力学性能. Edwards 等<sup>[20,21]</sup>提出了一种基于共振隧穿的三端量子点制冷机, 它可以将宏观电子库冷却到远低于室温的温度. 随后, Prance 等<sup>[22]</sup>通过实验证明了可以利用一个量子点制冷机对  $6\ \mu\text{m}^2$  区域内二维电子气体进行制冷. Jiang 等<sup>[23-25]</sup>分析了具有两种温度梯度的三端共振隧穿量子点热电发电机的性能. Jordan 等<sup>[26]</sup>则研究了基于半导体超晶格的三端热机和制冷机. Chen 等<sup>[27,28]</sup>则研究了能量选择性热机和制冷机的性能. He 等<sup>[29-37]</sup>研究了不同的三端热电装置, 包括基于共振隧穿量子阱的三端制冷机和热机、通过光子和热能混和驱动了三端量子点热机和制冷机、基于半导体异质结的三端热机模型, 并分析了各模型的性能特征和最佳性能. 最近, 实验上已经实现了在低温下介观系统的三端量子点热电器件<sup>[38-41]</sup>, 为纳米尺度多端热电器件的应用铺平了道路.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 11875034) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [hjzhou@ncu.edu.cn](mailto:hjzhou@ncu.edu.cn)

一维弹道导体是一个沿横向具有空间约束且长度较短的系统, 这种较短的长度保证了弹道运输, 如果纳米线<sup>[5,6,42,43]</sup>的长度保持相当短, 则也可以进行弹道运输. 目前, 基于纳米线的三端热电器件研究还很少<sup>[36]</sup>, 特别是纳米线制冷机. 由于纳米线横向空间约束, 电子能量在两个横向方向量子化, 而在传输方向具有任意能量值. 因此, 相比于量子点系统, 纳米线制冷机应该有更大的制冷率, 但制冷系数减少. 另外, 把许多平行纳米线组装在一起, 可以形成宏观尺度的热电制冷机, 为新型三端纳米线制冷机的应用提供理论依据. 本文在前人工作的基础上, 提出了基于一维弹道导体的三端纳米线制冷机模型. 利用朗道尔方程及基本的热力学公式推导出两电子库之间电荷流和能量流的表达式, 进而得出该制冷机模型的工作区间, 分析其性能特征, 并讨论其性能优化.

## 2 模型与理论分析

三端纳米线制冷机的模型如图 1(a) 所示, 该模型是由一个中间空腔和温度为  $T_i$  ( $i = L, R$ ) 的左/右电子库组成, 中间空腔和左/右电子库通过一维的纳米线导体进行连接. 中间空腔在温度为  $T_C$  时与热库处于热平衡状态. 同时各库的温度满足  $T_L = T_R > T_C$ . 电子可以通过左/右一维纳米线导体在中间空腔和左/右电子库之间进行传输, 左/右纳米线导体存在一个共振能级  $E_L / E_R$ . 两电子库之间存在偏置电压  $eV = \mu_R - \mu_L$ , 其中  $\mu_L$  ( $\mu_R$ ) 是左 (右) 电子库的化学势,  $e$  是电子电荷. 中间空腔的化学势  $\mu_C$  可以通过电荷守恒定律来确定. 此三端纳米线制冷机对中间热库制冷的物理过程为: 在外部电压  $V$  的驱动下, 电子在右库中具有在  $\mu_R$  附近分布 (Fermi 分布) 的能量, 当某电子在  $Z$  方向上的能量分量恰好处于  $E_R$  时, 则该电子有一定几率从右端电子库通过右纳米线到达中间空腔, 此时该电子的能量由  $\mu_R$  减小至  $E_R$ , 而后从中间空腔吸收热量到达  $E_L$  进而通过左纳米线到达左端电子库, 最终从左电子库回到外部电源的正极完成回路. 在这个过程中, 由于中间空腔与中间热库要保持热平衡, 所以将不断有热流从中间热库流入中间空腔从而达到了对中间热库制冷的目的.

从左/右电子库到中间腔的电流  $I_i$  和能流  $J_i$  由朗道方程给出<sup>[44]</sup>

$$I_i = \frac{2e}{h} \int [f_i - f_C] \tau_i(E) dE, \quad (1)$$

$$J_i = \frac{2}{h} \int E [f_i - f_C] \tau_i(E) dE, \quad (2)$$

其中  $f_i(E) = \{\exp[(E - \mu_i)/k_B T_i] + 1\}^{-1}$  ( $i = L, R$ ) 是左/右电子库的费米-狄拉克分布函数,  $f_C(E) = \{\exp[(E - \mu_C)/k_B T_C] + 1\}^{-1}$  是中间腔的费米-狄拉克分布函数,  $k_B$  是玻尔兹曼常数,  $h$  是普朗克常数,  $\tau_i(E)$  是一维导体的传输函数.

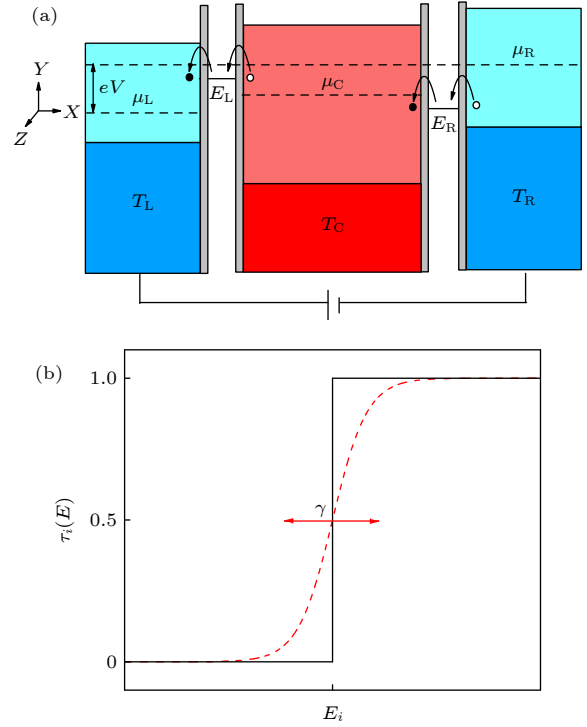


图 1 (a) 三端纳米线制冷机模型图; (b) 传输函数  $\tau_i(E)$  作为能量  $E_i$  的函数

Fig. 1. (a) The schematic diagram of a three-terminal nanowire refrigerator; (b) transmission function  $\tau_i(E)$  as a function of energy level  $E_i$ .

作为理想的一维导体, 能量  $E$  可以看作是在横向尺寸上量子化的, 并且不受传输方向 ( $X$  方向) 的限制,

$$E(x, y, z) = E_n(y, z) + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}, \quad (3)$$

其中,  $n$  是正整数,  $m^*$  是电子有效质量.

为了更现实地描述一维纳米线导体, 可以采用鞍点势传输函数<sup>[45]</sup>,

$$\tau_i(E) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \exp\left(\frac{E_{in} - E}{\gamma}\right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

其中,  $E_{in} = V_0 + (n - 0.5)\hbar\omega_y$ ,  $\gamma = \hbar\omega_x/(2\pi)$ ,  $V_0$  是电势高度,  $\hbar\omega_x$  和  $\hbar\omega_y$  分别是纵向和横向角频率. 本文讨论的热电制冷机要求  $\hbar\omega_y$  远大于温度  $k_B T$  和电压  $eV$ , 并考虑将  $E_0$  设置为接近电子库的化学势. 因此, 只有最低的能量  $E_0$  在电子传输中起重要作用. 因此左/右纳米线导体的传输函数可以近似为

$$\tau_i(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E_i - E)/\gamma]}, \quad (5)$$

其中  $\gamma$  和  $E_i$  是能级的宽度和位置, 如图 1(b) 所示. 在  $\gamma \rightarrow 0$  处, 传输函数接近阶梯函数, 即  $\tau_i(E) = \Theta(E - E_i)$ .

根据电荷守恒  $I_L + I_R = 0$ , 可以确定中间腔的化学势  $\mu_C$ . 该制冷机的输入功率可以定义为

$$P = I(\mu_R - \mu_L)/e, \quad (6)$$

其中  $I \equiv I_R = -I_L$  是通过系统的净电流. 基于中间腔中的能量守恒  $J + J_L + J_R = 0$ , 可以计算出从热库吸收的热流  $J$  即制冷率  $\dot{Q}_C$  的表达式为

$$\dot{Q}_C \equiv J = -J_L - J_R, \quad (7)$$

则该制冷机的制冷系数  $\phi$  的表达式为

$$\phi = \dot{Q}_C/P. \quad (8)$$

从等式 (1)–(8) 可以发现, 制冷率和制冷系数均是温度  $T_i$  和  $T_C$ , 化学势  $\mu_i$  和  $\mu_C$ , 能级位置  $E_i$  和能级宽度  $\gamma$  的函数. 为简单起见, 引入了温差  $\Delta T = T_i - T_C$  和平均温度  $T = (T_i + T_C)/2$ , 当电压满足  $eV = \mu_R - \mu_L$  时, 取  $\mu_R = eV/2$  和  $\mu_L = -eV/2$ . 在下面的结果分析过程中, 制冷率均以  $2(k_B T)^2/h$  为单位.

### 3 性能特征分析

在制冷机的研究过程中, 首先需要考虑其工作区间. 给定左右纳米线的能级位置  $E_L = 1.5k_B T$ ,  $E_R = -3k_B T$ . 在  $\gamma \rightarrow 0$  的情况下, 制冷率  $\dot{Q}_C$  随温差  $\Delta T$  和外加电压  $V$  变化的三维投影图如图 2(a) 所示. 图 2(a) 中的黑色曲线表示制冷率  $\dot{Q}_C = 0$  的情况, 可以判断曲线的左侧区域属于该制冷机的工作区间 (即  $\dot{Q}_C > 0, P > 0$ ). 图 2(b) 绘制了在不同的能级宽度  $\gamma$  ( $\gamma = 0, 0.5k_B T, k_B T$ ) 下的制冷区间, 可以看出在能级宽度  $\gamma$  取不同值的情况下, 制冷机的工作区间也会有所不同, 并且随着能级宽度  $\gamma$  的增大相应的制冷区间会随之减小; 而当能级宽度确定, 温差存在一个最大值  $\Delta T_{\max}$ , 如当  $\gamma = 0.5k_B T$

时, 对应的  $\Delta T_{\max}/T \approx 0.122$ ; 当能级宽度确定, 对于不同的温差  $\Delta T \leq \Delta T_{\max}$ , 电压具有不同的起始值  $V_{\min}$  和截止电压  $V_{\max}$ , 如当  $\gamma = 0.5k_B T$ ,  $\Delta T/T = 0.09$  时,  $V_{\min} \approx 1.275k_B T/e$ ,  $V_{\max} \approx 4.235k_B T/e$ .

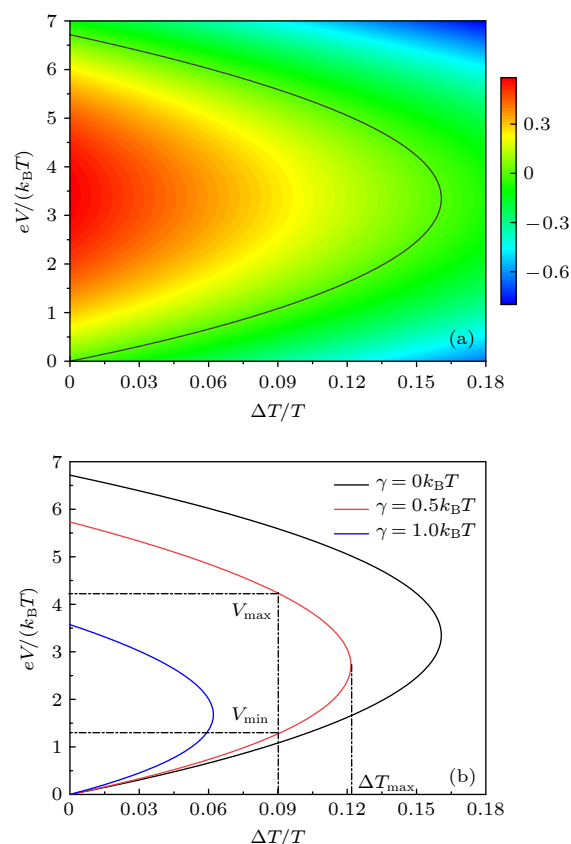


图 2 (a) 在  $\gamma \rightarrow 0$  的情况下制冷机的工作区间; (b) 当  $\gamma$  取不同的值时对工作区间的影响

Fig. 2. (a) The working region of the refrigerator in the case of  $\gamma \rightarrow 0$ ; (b) the working regions at given different value  $\gamma$ .

根据 (1)–(8) 式, 分别做出了制冷率  $\dot{Q}_C$  和制冷系数  $\phi$  在不同的能级宽度  $\gamma$  下随左右能级位置  $E_{L/R}$  变化的三维投影图, 如图 3 所示, 其中给定参数  $\Delta T/T = 0.05$ ,  $eV = 2k_B T$ . 从图 3 可以看出, 在给定温差  $\Delta T$  和电压  $eV$  的情况下, 通过改变左右能级位置也能确定制冷机的工作区间, 同时能级宽度可以影响制冷率  $\dot{Q}_C$  和制冷系数  $\phi$  的大小和极大值位置. 在能级宽度  $\gamma \rightarrow 0$  时, 制冷率的极大值大约出现在  $E_L = k_B T$  和  $E_R = -5.8k_B T$  的位置, 极大值为  $0.652(k_B T)^2/h$ , 但此时的制冷系数并没有极大值位置, 它会随着  $E_L$  和  $E_R$  的增大而增大, 然而当制冷系数增加到很大值的情况时, 制冷率已经接近于零. 在能级宽度  $\gamma$  变大时相应的制冷率和制冷系数都会减小, 制冷率的变化趋势不变, 但此时制冷



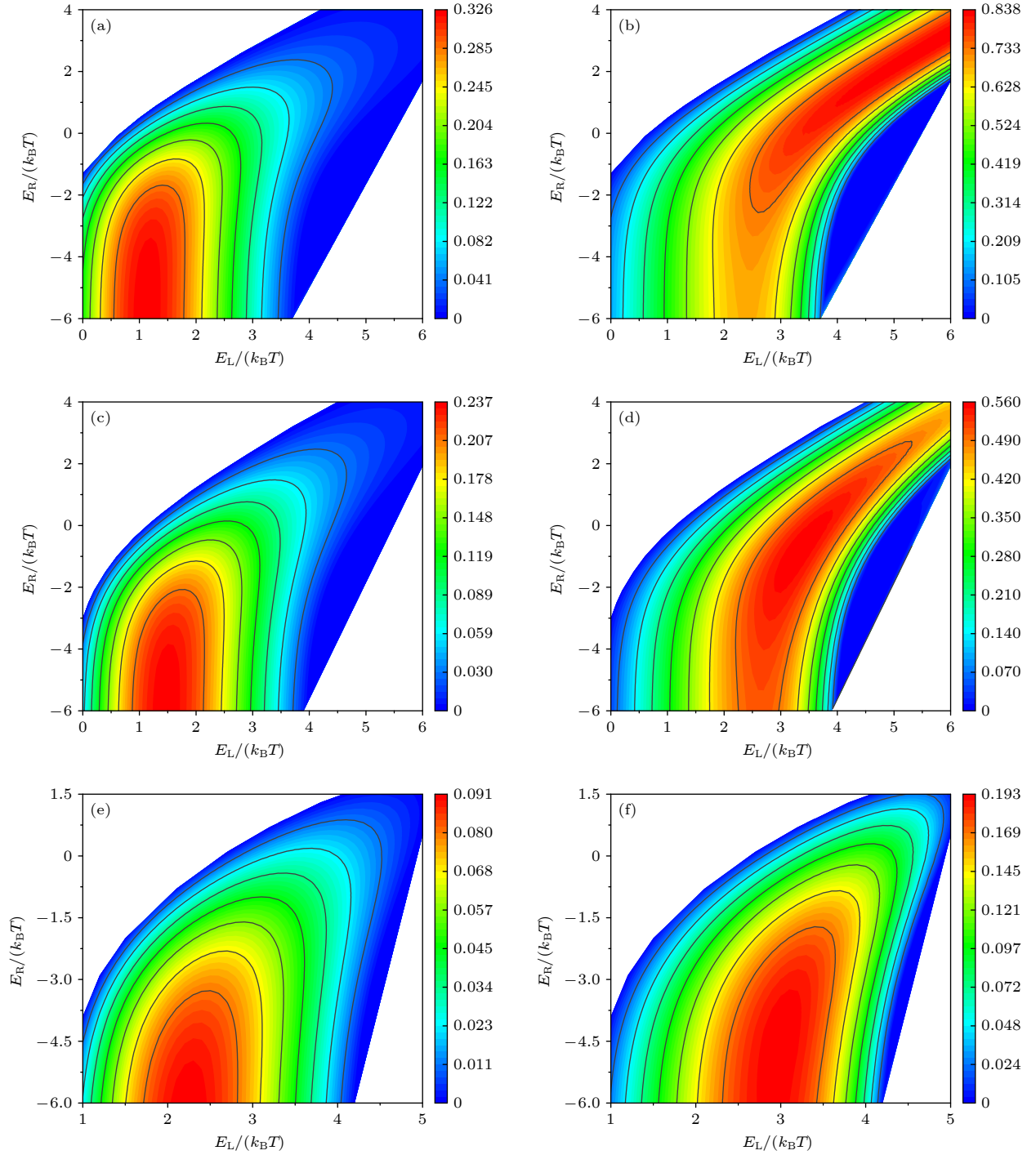


图3 在  $\gamma \rightarrow 0$  时 (a) 制冷率和 (b) 制冷系数随着能级位置变化的三维图; (c)—(f) 分别是  $\gamma = 0.5$  和  $\gamma = 1$  对应的制冷率和制冷系数的三维图

Fig. 3. Three-dimensional graphs for (a) the cooling rate and (b) the coefficient of performance varying with the energy level positions under  $\gamma \rightarrow 0$ ; (c)–(f) are the three-dimensional graphs for the cooling rate and the coefficient of performance at given  $\gamma = 0.5$  and  $\gamma = 1$ , respectively.

系数有了极大值. 如在能级宽度  $\gamma = 1$  时, 制冷率的极大值大约出现在  $E_L = 2.3k_B T$  和  $E_R = -5.8k_B T$  的位置, 而制冷系数的极大值大约出现在  $E_L = 3k_B T$  和  $E_R = -4.6k_B T$  的位置.

对于给定的参数  $E_L = 1.5k_B T$ ,  $E_R = -5k_B T$

和  $\Delta T/T = 0.05$ , 可以绘制出在不同的能级宽度  $\gamma$  下, 制冷率  $\dot{Q}_C$  和制冷系数  $\phi$  与电压  $V$  的关系曲线, 如图 4 所示. 从图 4(a) 中可以看出, 当能级宽度  $\gamma$  确定, 随着电压  $V$  的增大, 制冷率  $\dot{Q}_C$  先增大后减小, 呈抛物线对称分布. 而从图 4(b) 中可以看

出, 当能级宽度  $\gamma$  确定, 随着电压  $V$  的增大, 制冷系数  $\phi$  表现为先迅速增大后缓慢减小, 这与制冷率随电压  $V$  的变化曲线不一样. 图 4(c) 绘制了制冷率  $\dot{Q}_C$  与制冷系数  $\phi$  的特征曲线, 从图中可以清晰地看出制冷率和制冷系数之间的特征曲线是闭环型的, 这意味着在最大制冷系数下制冷率不会消失, 制冷机无法在可逆状态下运行, 制冷系数的最大值无法达到卡诺值  $T_C/(T_i - T_C)$ , 在这些闭合曲

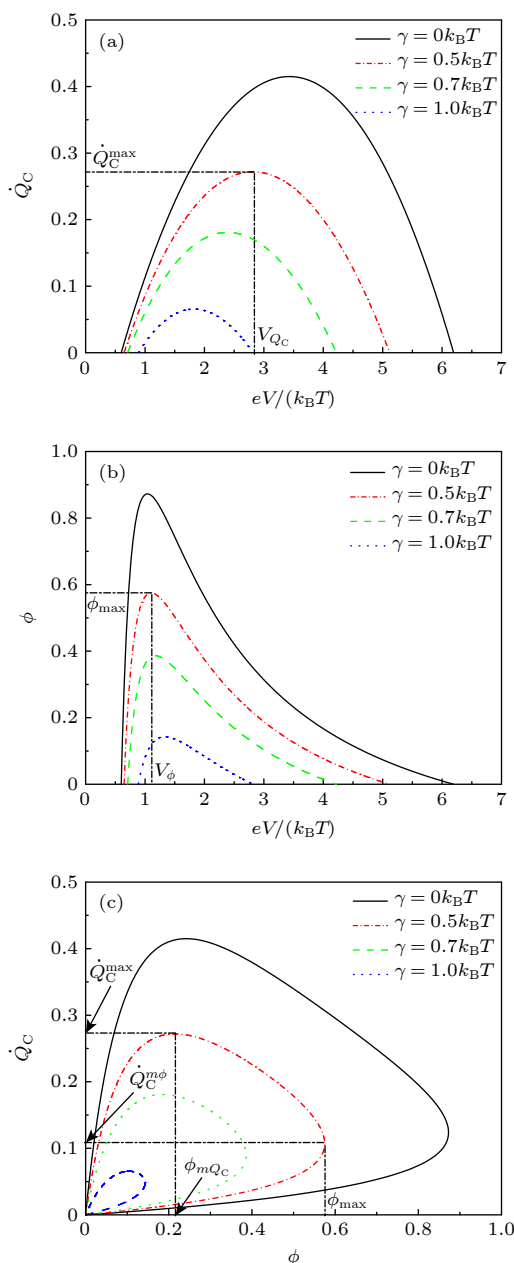


图 4 (a) 制冷率关于电压的函数图像; (b) 制冷系数关于电压的函数图像; (c) 制冷机的  $\dot{Q}_C$ - $\phi$  特征图

Fig. 4. (a) The cooling rate as a function of voltage; (b) the coefficient of performance as a function of voltage; (c) the characteristic curves of  $\dot{Q}_C$ - $\phi$  at given different value  $\gamma$ .

线中, 存在两个特殊点: 最大制冷率 ( $\phi_{mQ_C}$ ,  $\dot{Q}_C^{\max}$ ) 的点和最大制冷系数 ( $\phi_{\max}$ ,  $\dot{Q}_C^{\phi}$ ) 的点. 作为制冷机, 人们总是希望在获得尽可能大的制冷率的同时也获得尽量大的制冷系数, 或者在获得尽可能大的制冷系数的同时也尽量提升相应的制冷率, 因此该制冷机的最佳工作区间应位于  $\dot{Q}_C$ - $\phi$  特征图的负斜率范围内, 即

$$\dot{Q}_C^{m\phi} \leq \dot{Q}_C \leq \dot{Q}_C^{\max}, \quad (9)$$

$$\phi_{mQ_C} \leq \phi \leq \phi_{\max}, \quad (10)$$

其中,  $\dot{Q}_C^{\max}$  和  $\phi_{mQ_C}$  分别是最大制冷率及最大制冷率下的制冷系数,  $\phi_{\max}$  和  $\dot{Q}_C^{m\phi}$  分别为最大制冷系数以及最大制冷系数下的制冷率, 这 4 个参数是衡量本模型作为制冷机性能的重要指标, 它们可以通过数值计算得出. 而能级宽度  $\gamma$  对该制冷机性能的影响, 由图 4 可以看到制冷率  $\dot{Q}_C$  和制冷系数  $\phi$  均随能级宽度  $\gamma$  的减小而增大. 因此在实际的纳米线制冷机的工作中, 应尽可能的减小纳米线的能级宽度, 进而提高装置的性能.

## 4 优化性能分析

根据 (1)–(8) 式和极值条件

$$\frac{\partial \dot{Q}_C}{\partial E_L} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_C}{\partial E_R} = 0, \quad (12)$$

可通过数值计算来优化制冷率和相应的制冷系数. 在不同的能级宽度  $\gamma$  下, 分别得到优化制冷率  $\dot{Q}_{C,opt}$  和优化制冷率下对应的制冷系数  $\phi_{Q_C}$  随电压  $V$  变化的曲线图, 如图 5 所示, 其中给定参数  $\Delta T/T = 0.05$ . 从图 5 中看出, 随着能级宽度  $\gamma$  的增大, 优化制冷率和对应的制冷系数大致呈减小的趋势. 从图 5(a) 中可以看出, 对于一个确定的能级宽度  $\gamma$ , 优化制冷率  $\dot{Q}_{C,opt}$  的大小随着电压  $V$  的增大而表现出单调递增, 但递增的速率是逐渐减小, 直到  $eV \approx 5k_B T$  左右时, 优化制冷率  $\dot{Q}_{C,opt}$  达到饱和值, 而从图 5(b) 可以看出, 对于一个确定的能级宽度  $\gamma$ , 随着电压  $V$  的增大, 优化制冷率所对应的制冷系数  $\phi_{Q_C}$  是先迅速增大后缓慢减小的, 此时存在一个特殊的电压  $V_\phi$ , 使得优化制冷率所对应的制冷系数  $\phi_{Q_C}$  达到最大. 通过图 5(c) 可以看出, 对于一个确定的能级宽度  $\gamma$ , 优化的左能级位置

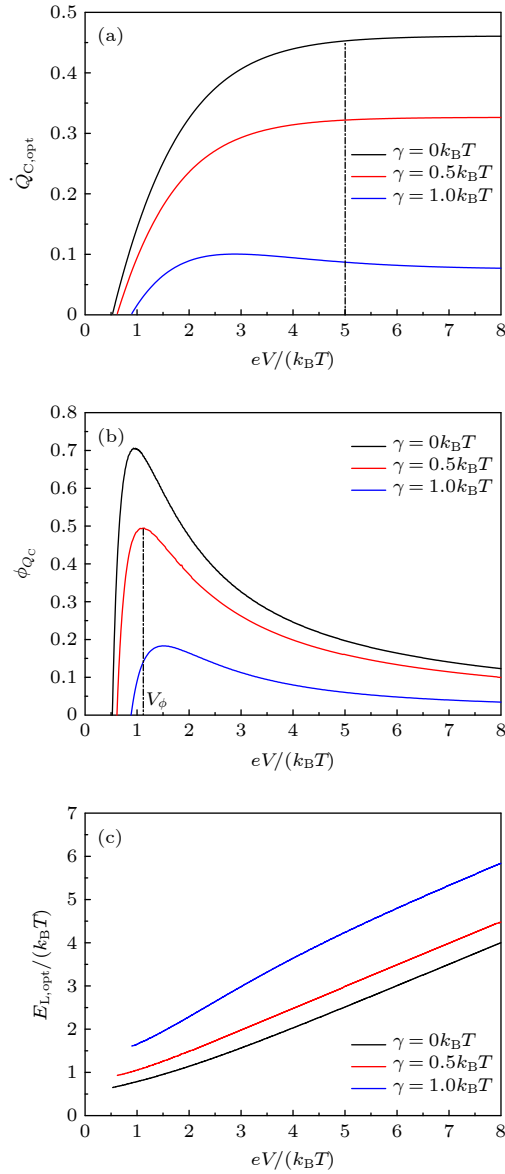


图 5 (a) 优化的制冷率随电压变化的图像; (b) 相应制冷系数随电压变化的图像; (c) 最优能级位置随电压变化的图像

Fig. 5. (a) The curves of the optimized cooling rate as a function of voltage; (b) the curves of the corresponding coefficient of performance as a function of voltage; (c) the curves of the optimal energy level position as a function of voltage.

$E_{L,opt}$  则是随着电压的增大几乎呈线性增加, 在能级宽度  $\gamma \rightarrow 0$  的情况下, 左能级位置的优化值大致满足  $E_{L,opt} \approx 0.5 eV$ . 右能级位置的优化值则未在图中示出, 其优化值是一个大的负值, 即  $-E_{R,opt} \gg k_B T$ .

在给定  $\Delta T/T = 0.05$  和饱和制冷率对应的电压  $eV = 5 k_B T$  的情况下, 可以绘制出优化的制冷率

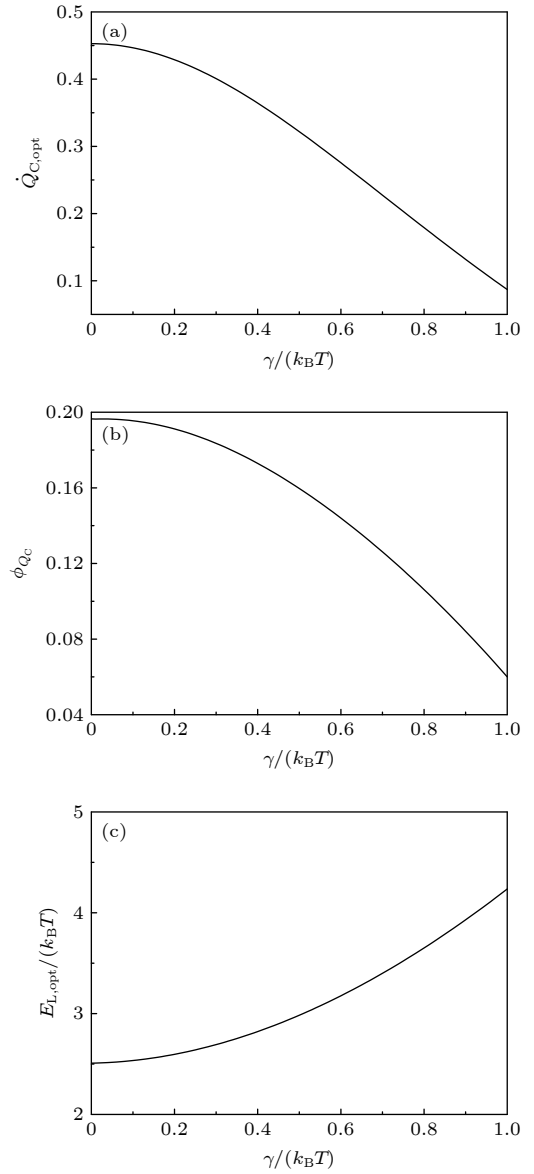


图 6 (a) 优化的制冷率随能级宽度变化的图像; (b) 相应的制冷系数随能级宽度变化的图像; (c) 最优能级位置随能级宽度变化的图像

Fig. 6. (a) The curves of the optimized cooling rate as a function of the width of energy level; (b) the curves of the corresponding coefficient of performance as a function of the width of energy level; (c) the curves of the optimal position of energy level as a function of the width of energy level.

$\dot{Q}_{C,opt}$  和所对应的制冷系数  $\phi_{Q_C}$  与能级宽度  $\gamma$  的关系曲线, 如图 6 所示. 从图 6(a), (b) 可以看出, 优化制冷率  $\dot{Q}_{C,opt}$  和对应的制冷系数  $\phi_{Q_C}$  的大小都是随能级宽度  $\gamma$  的增大而逐渐减小, 从图 6(c) 可以看出, 优化下的左能级  $E_{L,opt}$  则是随着能级宽度的增大而逐渐增大. 因此为了获取优化的制冷率, 应尽可能的减小能级宽度  $\gamma$  的值.

最后考虑温差  $\Delta T$  对制冷机性能的影响. 为了获得最大制冷率, 首先固定左右能级位置  $E_L = 2.5k_B T$ ,  $E_R = -5k_B T$ , 电压  $eV = 5k_B T$ , 能级宽度  $\gamma \rightarrow 0$ . 通过数值计算绘制出最大制冷率  $\dot{Q}_{C,\max}$  和对应的制冷系数  $\phi_{\max}$  随温差  $\Delta T$  变化的关系曲线, 如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 最大制冷率和对应的制冷系数的大小随着温差的增大而逐渐减小, 当  $\Delta T/T \approx 0.166$  时,  $\dot{Q}_{C,\max} \rightarrow 0$ ,  $\phi_{\max} \rightarrow 0$ . 通过分析制冷率和制冷系数与温差的变化关系, 似乎可以得出温差越小则相应制冷机的性能越好, 然而在温差  $\Delta T = 0$  的情况下, 制冷机将失去制冷的意义. 因而此处引入卡诺制冷系数  $\phi_C = T_C/(T_i - T_C)$ , 将最大制冷率所对应的制冷系数除以卡诺制冷系数作为该制冷机优化的评判标准. 从图 7(b) 中可以看出, 以卡诺制冷系数为单位的制冷系数随着温差的增大表现为先增大后逐渐减小的趋势, 并在  $\Delta T/T \approx 0.084$  时达到最大值.

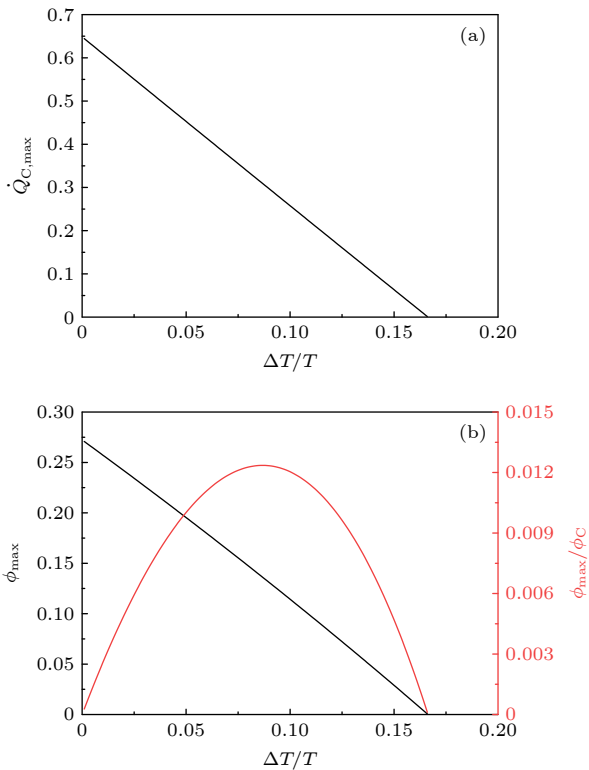


图 7 (a) 最大制冷率随温差变化的图像; (b) 最大制冷率下的制冷系数和以卡诺制冷系数为单位的制冷系数随温差变化的图像

Fig. 7. (a) The curves of the maximum cooling rate as a function of the temperature difference; (b) the curves of the coefficient of performance at the maximum cooling rate and the coefficient of performance in a unit of Carnot value as a function of the temperature difference.

## 5 结 论

本文以一维弹道导体为基础, 建立了三端纳米线制冷机模型. 利用朗道尔方程及基本的热力学公式推导出了两电子库电荷流和能量流的表达式, 进而得出了该制冷机模型的工作区间, 分析了该制冷机的性能特征, 并讨论了其性能优化. 结果表明:

- 1) 制冷机的工作区间是由各个参数共同决定, 但无论各参数如何变化, 制冷机都存在一个温差上限, 超过这个温差该装置将不作为制冷机工作;
- 2) 最大制冷率和最大制冷系数在特征曲线中出现的位置是分开的, 得到了衡量该制冷机性能的重要指标;
- 3) 对于该三端纳米线制冷机, 其输出功率或制冷率在超过某一能级位置会出现饱和值;
- 4) 尽可能减小纳米线的能级宽度会提高制冷机的工作性能.

## 参考文献

- [1] Hicks L D, Dresselhaus M S 1993 *Phys. Rev. B* **47** 12727
- [2] Hicks L D, Harman T C, Dresselhaus M S 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 3230
- [3] Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpittes T, O'Quinn B 2001 *Nature* **413** 597
- [4] Harman T C, Taylor P J, Walsh M P, LaForge B E 2002 *Science* **297** 2229
- [5] Boukai A I, Bunimovich J, Tahir-Kheli J, Yu J K, Goddard Iii W A, Heath J R 2008 *Nature* **451** 168
- [6] Björk M T, Ohlsson B J, Thelander C, Persson A I, Deppert K, Wallenberg L R, Samuelson L 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4458
- [7] Staring A A M, Molenkamp L W, Alphenaar B W, Van Houten H, Buyk O J A, Mabeoone M A A, Beenakker C W J, Foxon C T 1993 *Europhys. Lett.* **22** 57
- [8] Molenkamp L, Staring A A M, Alphenaar B W, Van Houten H, Beenakker C W J 1994 *Semicond. Sci. Technol.* **9** 903
- [9] Dzurak A S, Smith C G, Barnes C H W, Pepper M, Martín-Moreno L, Liang C T, Ritchie D A, Jones G A C 1997 *Phys. Rev. B* **55** R10197
- [10] Esposito M, Lindenberg K, Van den Broeck C 2009 *Europhys. Lett.* **85** 60010
- [11] Esposito M, Kawai R, Lindenberg K, Van den Broeck C 2010 *Phys. Rev. E* **81** 041106
- [12] Esposito M, Kumar N, Lindenberg K, Van den Broeck C 2012 *Phys. Rev. E* **85** 031117
- [13] Su S H, Zhang Y C, Peng W L, Su G Z, Chen J C 2021 *Sci. Sin. Phys.* **51** 030011
- [14] Su G Z, Zhang Y C, Cai L, Su S H, Chen J C 2015 *Energy* **90** 1842
- [15] Su G Z, Liao T J, Chen L W, Chen J C 2016 *Energy* **101** 421
- [16] Su G Z, Pan Y Z, Zhang Y C, Shih T M, Chen J C 2016 *Energy* **113** 723
- [17] Peng W L, Liao T J, Zhang Y C, Su G Z, Lin G X, Chen J C 2017 *Energy Convers. Manage.* **143** 391



- [18] Peng W L, Zhang Y C, Yang Z M, Chen J C 2018 *Eur. Phys. J. Plus.* **133** 38
- [19] Peng W L, Ye Z L, Zhang X, Chen J C 2018 *Energy Convers. Manage.* **166** 74
- [20] Edwards H L, Niu Q, De Lozanne A L 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1815
- [21] Edwards H L, Niu Q, Georgakis G A, De Lozanne A L 1995 *Phys. Rev. B* **52** 5714
- [22] Prance J R, Smith C G, Griffiths J P, Chorley S J, Anderson D, Jones G A C, Farrer I, Ritchie D A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 146602
- [23] Jiang J H, Entin-Wohlman O, Imry Y 2012 *Phys. Rev. B* **85** 075412
- [24] Jiang J H 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 194303
- [25] Jiang J H, Imry Y 2018 *Phys. Rev. B* **97** 125422
- [26] Jordan A N, Sothmann B, Sánchez R, Büttiker M 2013 *Phys. Rev. B* **87** 075312
- [27] Qiu S S, Ding Z M, Chen L G, Meng F K, Sun F R 2019 *The Euro. Phys. J. Plus.* **134** 273
- [28] Ding Z M, Chen L G, Ge Y L, Xie Z H 2019 *Sci. China: Tech. Sci.* **62** 397
- [29] Li W, Yang Y Y, Fu J, He J Z 2020 *ES. Energy Environment* **7** 40
- [30] Lin Z B, Li W, Fu J, Yang Y Y, He J Z 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 060501
- [31] Lin Z B, Li W, Yang Y Y, He J Z 2020 *Phys. Rev. B* **101** 022117
- [32] Su H, Shi Z C, He J Z 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 100501
- [33] Fu J, Li W, Shi Z C, He J Z 2018 *Chin. J. Phys.* **56** 895
- [34] Shi Z C, He J Z, Xiao Y L 2015 *Sci. Sin. Phys.* **45** 050502
- [35] Shi Z C, Qin W F, He J Z 2016 *Mod. Phys. Lett. B* **30** 1650397
- [36] Yang Y Y, Xu S, Li W, He J Z 2020 *Phys. Scr.* **95** 095001
- [37] Yang Y Y, Xu S, He J Z 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 120502
- [38] Thierschmann H, Sánchez R, Sothmann B, Arnold F, Heyn C, Hansen W, Buhmann H, Molenkamp L W 2015 *Nature Nanotechnology* **10** 854
- [39] Roche B, Roulleau P, Julien T, Jompol Y, Farrer I, Ritchie D A, Glatli D C 2015 *Nature Commun.* **6** 6738
- [40] Hartmann F, Pfeffer P, Hofling S, Kamp M, Worschech L 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 146805
- [41] Jaliel G, Puddy R K, Sánchez R, Jordan A N, Sothmann B, Farrer I, Griffiths J P, Ritchie D A, Smith C G 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 117701
- [42] Hochbaum A I, Chen R, Delgado R D, Liang W, Garnett E C, Najarian M, Majumdar, Yang P 2008 *Nature* **451** 163
- [43] Björk M T, Ohlsson B J, Sass T, Thelander C, Persson A I, Magnusson M H, Deppert K, Wallenberg L R, Samuelson L 2020 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1058
- [44] Datta S 1995 *Electronic Transport in Mesoscopic Systems* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [45] Nakpathomkun N, Xu H Q, Linke H 2010 *Phys. Rev. B* **82** 235428

# Performance optimization of three-terminal nanowire refrigerator based on one-dimensional ballistic conductor<sup>\*</sup>

Xu Shuai    Yang Yun-Yun    Liu Xing    He Ji-Zhou<sup>†</sup>

(Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

( Received 7 June 2021; revised manuscript received 18 September 2021 )

## Abstract

In this paper, the model of a three-terminal nanowire refrigerator is established based on one-dimensional (1D) ballistic conductor. It is composed of an intermediate cavity and left/right electron reservoir in which the intermediate cavity and left/right electron reservoir are connected by 1D nanowire conductor. The expression for the charge current and that for the energy current flowing from two electron reservoirs are derived by using Landauer formula and basic thermodynamic laws. Then, the working region of the refrigerator is obtained, its performance characteristics are analyzed, and its performance optimization is discussed. It is shown that the refrigerator under different parameters operates in different working regions. For each refrigeration region, there is an upper limit of temperature difference, and the refrigerator will be unable to refrigerate beyond the upper limit. The characteristic curve of the cooling rate changing with performance coefficient is a loop-shaped one, which provides an important index for us to evaluate the performance of the refrigerator. The energy level width of the nanowire can be reduced as much as possible, which will improve the performance of the refrigerator.

**Keywords:** three-terminal thermoelectric refrigerator, nanowires, cooling rate, coefficient of performance

**PACS:** 05.70.-a, 73.50.Lw, 73.63.Nm, 85.80.Fi

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211077

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundations of China (Grant No. 11875034).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [hjzhou@ncu.edu.cn](mailto:hjzhou@ncu.edu.cn)