

入射光谱及功率密度对 GaSb 热光伏电池性能的影响

王新, 陈学*, 潘虹宇, 柳秀丽, 夏新林

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 热光伏发电技术具有高效率、高功率密度、适应热源广泛等特征, 揭示其核心部件—电池芯片内部光电能量转换物理机制及影响规律, 有利于系统性能的进一步提升。针对 GaSb 热光伏电池内部的光-电转换过程, 建立了微观载流子输运模型, 采用光-电耦合仿真方法对其性能参数进行了数值模拟。重点探究了入射辐射光谱特性及功率密度对电池性能的影响。结果表明: 当入射光谱辐射功率相同时, 电池转换效率随光谱变化呈现明显的非单调性, 在波长 1.42 μm 处达到峰值 22.50%。同一光谱下, 随着辐射功率密度提高, 电池最大输出电功率密度等比例增大, 转换效率也随之增大但增幅逐渐减小, 波长 1.42 μm 时增幅最大约 4.85%。

关键词: 热光伏电池; 辐射光谱; 辐射功率; 光-电耦合模拟

中图分类号: TK121

文献标识码: A

Effects of incident spectrum and radiative power intensity on the performance of GaSb thermophotovoltaic cell

WANG Xin, CHEN Xue*, PAN Hong-Yu, LIU Xiu-Li, XIA Xin-Lin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Thermophotovoltaic systems perform the characteristics of high efficiency, high power intensity and wide range of heat sources. To further enhance its energy conversion performance, the physical mechanism of opt-electrical conversion and its influence factors need to be analyzed in detail. Therefore, based on the spectral opt-electrical conversion process in the thermophotovoltaic cell, the microscopic carrier transport model in the cell is established. The coupled opt-electrical model is used for the simulation of GaSb thermophotovoltaic cell to explore the effects of spectral characteristics and power intensity of the incident radiation on the cell performance. The results show that under the fixed incident radiation power intensity, the energy conversion efficiency of the cell shows obvious non-monotonicity with the change of wavelength and the peak appears at 1.42 μm . In addition, under the fixed wavelength, with the rise of radiation power intensity, the maximum electrical output power intensity accordingly increases while the rise of the energy conversion efficiency gradually slows down. At 1.42 μm , the rise of the energy conversion efficiency reaches the maximum about 4.85%.

Key words: thermophotovoltaic cell, radiation spectra, radiation power, coupled opt-electrical simulation

引言

“双碳”战略要求构建清洁低碳、安全高效的能源体系^[1], 急需发展可再生能源利用及高效的能量转换技术^[2-4]。利用高温红外辐射能的热光伏技术 (Thermophotovoltaic, TPV) 作为一种基于光伏效应

的静态热电转换技术^[5], 以其高稳定性、高效率、低成本、低排放等优势逐渐成为研究前沿^[6]。同时, 热光伏还具有热源普适性, 燃料燃烧热能^[7]、聚光太阳能^[8,9]和工业废热^[10]等均可作为其潜在的能量输入, 具有广泛的应用前景。热光伏电池作为 TPV 系统中进行光-电转换的核心元件, 目前报道最高的热

收稿日期: 2022-05-10, 修回日期: 2022-10-19

Received date: 2022-05-10, revised date: 2022-10-19

基金项目: 黑龙江省头雁创新团队计划 (XNAUEA5640206420), 中国博士后科学基金特别资助 (2020T130145)

Foundation items: Supported by the Heilongjiang Touyan Innovation Team Program (XNAUEA5640206420), the China Postdoctoral Science Foundation (2020T130145)

作者简介 (Biography): 王新 (1998-), 女, 黑龙江双鸭山人, 硕士研究生, 主要研究领域为红外辐射传输及光伏器件内部传输机理研究, E-mail: 15801375219@163.com

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hit_chenxue@hit.edu.cn

光伏电池效率已经超过 40%, 高于涡轮热机的平均效率^[11]。热光伏电池不同于太阳能电池, 其使用高温辐射源发射出的高能红外辐射作为输入能量, 将红外辐射能转换为电能输出, 具有两方面优势: 首先, 其输出电功率密度远高于太阳能电池, 且单结电池的能量转换效率也具有一定优势; 其次, 其克服了太阳能电池在日落后无法工作的弊端, 可以实现全天候稳定工作。

通过对光伏电池内部的光电转换机理探索及分析, 能够有效指导电池的设计、制备及测量评估^[12-20]。虽然, 太阳能光伏电池的光电转换开展了较多研究, 建立了相应的数理模型, 但通常以全光谱及响应谱带进行分析。Li 等早期建立了二/三维热光伏电池的光-电耦合数值模拟方法; 并在后期将热效应耦合到光-电物理场中, 开发了光-电-热多场耦合计算方法^[12, 13]。对于热光伏电池而言, 入射辐射具有更高的热流密度且电池的带隙明显变小, 对于其内部的物理机理探索及性能分析虽然已经进行了部分研究, 但是对其入射光谱特征及光谱功率密度的响应缺乏讨论。如 Zhang 等^[14]开发了半导体器件中电荷和辐射传输的双向耦合迭代模型, 分别针对近场和远场 GaSb 热光伏系统进行了全光谱的光电转换性能分析。

除了电池材料^[21]、温度^[22]、掺杂浓度^[23]等基本参数外, 作为能量输入的热辐射源对热光伏电池性能的影响也不可忽视。Wang 等^[24]发现在不同温度的黑体辐射下, 超薄膜 GaSb 电池的光电流密度随辐射器温度的升高而增加。Khvostikov 团队^[25]和 Xuan 团队^[26]也展开了类似的研究, 结果表明电池效率随辐射器温度的升高而有所增加。Utlu 等^[27]探究了辐射器温度对 GaSb 电池的开路电压、短路电流、填充因子和能量转换效率等性能参数的影响。虽然, 有部分学者就入射辐射的光谱性质对热光伏电池性能的影响开展了讨论, 如 Krupke 等^[28]采用三个不同单发射波长的泵浦碱蒸气激光器实验证明了在不同波长下, 光伏电池的电功率密度及能量转换效率存在明显差异。但是, 大多数针对辐射源影响电池性能的研究中, 或将辐射源的光谱作为全光谱处理, 未针对单光谱进行独立分析, 或限于实验条件研究光谱有限。此外, 针对辐射源进行光谱调控的研究也已较为广泛, 如 Seungtae 等^[29]制备的晶圆级光谱选择性辐射器, 与钨和石墨辐射器相比效率分

别提高了 13% 和 9%。但是, 对于辐射源的设计往往仅参考带隙等表观参数作为优化标准, 并未考虑不同波长下电池能量转换效率的变化。综上, 由于高温辐射源的辐射能量密度较大, 光谱特性变化产生的性能影响也会更加明显, 针对入射辐射光谱特性对电池性能的影响分析不容忽视。

本文针对不同功率下辐射源的连续光谱特性进行了详细的数值模拟与分析, 以期更精确地指导辐射源的优化。基于光-电耦合数值仿真方法, 重点探究了辐射源的光谱分布特性及功率密度对 GaSb 热光伏电池性能的影响。建立 GaSb 电池的载流子输运物理模型, 通过计算对比验证了模拟方法的可靠性, 进一步分析电池性能参数以及内部载流子特性参数。通过对电能输出特性分析, 获得辐射源的光谱特性和功率密度对 GaSb 电池性能参数的影响规律。

1 数学物理模型

如图 1 所示, 本文研究对象为基于同质 PN 结的 GaSb 热光伏电池, 其相对介电常数为 15.7, 带隙为 0.726 eV, 电子亲和性为 4.06 eV。热光伏电池主体部分由 P 型及 N 型 GaSb 半导体构成, 厚度分别为 L_p 与 L_n 。假设电池表面存在减反射膜, 反射率 $R=0.05$ 。在高温热源辐射条件下, 大于带隙能量的光子被吸收后能够在半导体内激发出自由载流子, 被激发后的自由电子(空穴)由 PN 结处向下(上)定向移动, 从而形成光生电流。

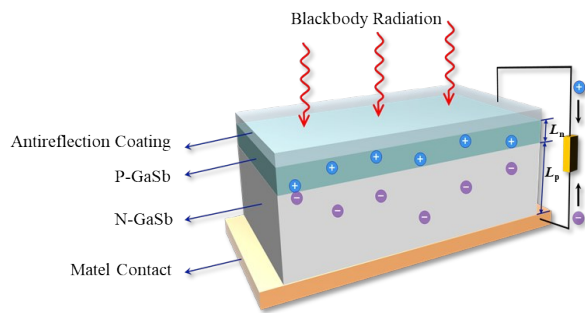


图 1 GaSb 热光伏电池模型示意图

Fig. 1 Schematic of GaSb thermophotovoltaic cell model

热光伏电池内部辐射能-电能转换过程的控制方程包括载流子输运方程和泊松方程。其中, 载流子输运方程^[30-31]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot [D_p \nabla p + p D_{p,T} \nabla T + p \mu_p \\ (\phi + \chi + E_g - \frac{k_B T}{q} \ln(N_V))] + G_p - U_p = 0 \\ \nabla \cdot [-D_n \nabla n - n D_{n,T} \nabla T + n \mu_n \\ (\phi + \chi + \frac{k_B T}{q} \ln(N_C))] + G_n - U_n = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, n 、 p 分别为电子、空穴的浓度, μ 为载流子迁移率(下角标中 n 和 p 分别代表电子和空穴), N_n 、 N_p 分别为施主、受主掺杂浓度, N_C 、 N_V 分别为有效导带、价带态密度, q 为电荷量, ϕ 为静电势, k_B 为玻尔兹曼常数, D 、 D_T 分别为扩散系数、热扩散系数, T 为载流子和晶格的温度。结合泊松方程即式(2), 可获得材料内的电势分布; 与式(1)迭代后可以得到材料内非平衡载流子浓度的分布^[30]。

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \\ \rho = q(n - p + N_C - N_V) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, ρ 为空间电荷密度, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数。

载流子浓度的变化主要由其产生与复合两个过程决定。其中, 载流子的生成过程主要指光伏电池在束缚的电子(空穴)内受到光子激发后完成能带跃迁产生自由电子(空穴)的过程。载流子生成率定义为单位时间单位体积内被吸收光子转化为载流子的数目^[32]:

$$\begin{cases} G_{n(p)} = \int_0^{\lambda_{ng}} g(\lambda, x) d\lambda \\ g(\lambda, x) = \alpha(\lambda)(1 - R(\lambda)) \frac{q(\lambda)\lambda}{hc} e^{-\alpha(\lambda)x} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, G 为全光谱辐射下载流子生成率, $g(\lambda, x)$ 为某特定波长辐射下载流子生成率, λ_{ng} 为半导体材料的截止波长, $\alpha(\lambda)$ 为光谱吸收系数, $R(\lambda)$ 为光谱反射率, $q(\lambda)$ 为特定波长的入射辐射功率, x 为电池内沿光传播方向某一点离光入射表面的距离, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速。

载流子的复合过程主要指被激发的自由电子(空穴)重新形成电子空穴对并且释放能量的过程, 可以分为体复合和表面复合两类。其中, 体复合又包括直接复合、缺陷复合和俄歇复合^[30], 三者同时存在于电池内部。载流子复合率定义为单位体积单位时间内载流子的复合数目。各种体复合率可表示为:

$$\begin{cases} U = U_{rad} + U_{Aug} + U_{SRH} \\ U_{rad} = r_{rad}(np - n_i^2) \\ U_{Aug} = (r_{p,Aug} p + r_{n,Aug} n)(np - n_i^2) \\ U_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{n,SRH}(p + p_i) + \tau_{p,SRH}(n + n_i)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, U_{rad} 、 U_{SRH} 和 U_{Aug} 分别为载流子直接复合率、缺陷复合率和俄歇复合率, r_{rad} 、 r_{Aug} 和 τ_{SRH} 分别为载流子的直接复合因子、俄歇复合因子和缺陷复合因子。

表面复合存在于半导体材料表面或不同半导体材料及多晶体材料的界面, 可由式(5)计算^[33]:

$$\begin{cases} W_n = U_{sn} \delta x = S_n(n - n_0) \\ W_p = U_{sp} \delta x = S_p(p - p_0) \end{cases}, \quad (5)$$

式中, W 为载流子表面复合率, S 为载流子的表面复合因子, n_0 、 p_0 分别为导带、价带中自由电子、空穴的粒子数密度。

此外, 电池效率由式(6)计算:

$$\eta = \frac{P_{e,max}}{P_{in}}, \quad (6)$$

式中, $P_{e,max}$ 为电池最大输出功率, P_{in} 为入射辐射功率, 针对黑体辐射器, 其辐射功率由式(7)计算:

$$E_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda, \quad (7)$$

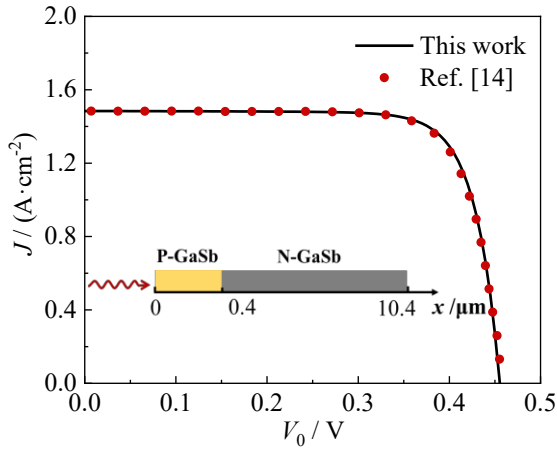
式中, $c_1 = 3.74 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ 为普朗克定律第一辐射常数, $c_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 为普朗克定律第二辐射常数。

基于上述理论模型, 对热光伏电池的能量转换过程进行数值模拟。高温辐射源设置在热光伏电池上面, 电池上表面为金属正电极, 采用半导体-金属的理想欧姆接触, 下表面为负电极, 为半导体-金属接触的理想欧姆接触, 假设电池整体的温度均匀恒定($T_c = 300 \text{ K}$)。

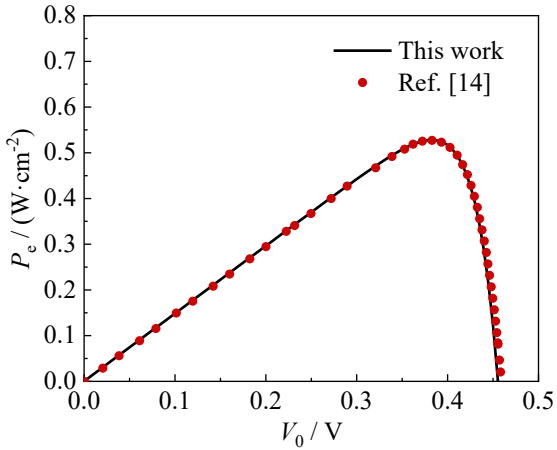
2 数值计算可靠性验证

为验证本文光-电耦合计算方法的可靠性, 采用与文献[14] GaSb 电池一致的物理模型及物性参数, 对计算结果如电池的 J - V 、 P - V 特性曲线等进行比较。考虑载流子的体复合与表面复合, 图2为本文计算得到的 J - V 与 P - V 特性曲线与文献[14]中结果的对比, 可见曲线吻合良好。最大输出功率密度($P_{e,max}$)、短路电流密度(J_{sc})、开路电压(V_{oc})和填充因子(FF)具体数值对比情况如表2所示。最大相对误差仅为 0.45%, 验证了本研究使用的光-电

耦合方法具有可靠性。



(a)



(b)

图2 本文(a) J - V 曲线与(b) P - V 曲线计算结果与文献[14]结果的对比

Fig. 2 Comparison of the (a) J - V curves and (b) P - V curves in this work with that in Ref. [14]

表1 本文电性能参数计算结果与文献[14]结果的对比

Table 1 Comparison of electrical performance parameters results in this work with that in Ref. [14]

Result	$P_{e, \max} / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	$J_{sc} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$V_{oc} / (\text{V})$	FF
Ref. [14]	0.527	1.484	0.457	0.777
This work	0.528	1.484	0.456	0.781

3 结果与讨论

3.1 GaSb 电池的能量转换特性分析

针对典型 GaSb 热光伏电池内部的能量转换过

程进行分析, 电池模型的厚度^[34]为: $L_n = 0.4 \mu\text{m}$, $L_p = 500 \mu\text{m}$, 掺杂浓度^[14]为: $N_p = 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $N_n = 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 电子及空穴的状态有效质量^[35]分别为: $m_n^* = 0.041m_0$, $m_p^* = 0.412m_0$, 进而根据 m_n^* 与 m_p^* 计算 ($N = 2 \times (2\pi m^* kT)^{3/2} / h^3$)^[30] 得到导带及价带态密度分别为: $N_c = 2.08 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $N_v = 6.63 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. 电池的载流子输运参数、体复合因子和表面复合因子如表3所示。黑体辐射源温度 $T_e = 2000 \text{K}$, 依据普朗克定律, 光谱辐射力分布如图3(a)所示, $0.5 \mu\text{m}$ 波长前光子通量密度很小, 故主要考虑 GaSb 热光伏电池在 $0.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段辐射下辐射能-电能的转换性能。图3(b)中给出了 GaSb 材料的复折率^[37], 其对高于带隙的光谱能量具有较强的吸收。

表2 本文 GaSb 热光伏电池模型的仿真参数

Table 2 Simulation parameters of the GaSb thermophotovoltaic cell in this work

Parameter	Value	Reference
$\mu_n / (\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	4 484.83	[22]
$\mu_p / (\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	378.51	[22]
$r_{rad} / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	8.5×10^{-11}	[22]
$\tau_{n, SRH} / \text{ns}$	11	[14]
$\tau_{p, SRH} / \text{ns}$	600	[36]
$r_{n(p), Aug} / (\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^{-30}	[38]
$S_{n(p)} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^5	[34]

GaSb 热光伏电池的 J - V 及 P - V 特性曲线如图4所示。可以看出, 短路电流密度为 30.86A/cm^2 , 开路电压为 0.57V , 电池最大输出功率密度 $P_{e, \max} = 13.74 \text{W/cm}^2$, 此时对应的电压为 0.47V . 考虑输入功率密度为 $0.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段内的辐射功率。此时, $P_{in, \Delta\lambda} = E_{b, \Delta\lambda} = 36.62 \text{W/cm}^2$, 从而计算得到效率 $\eta_{\Delta\lambda} = P_{e, \max} / P_{in, \Delta\lambda} = 37.52\%$. 进一步考虑输入功率为 2000K 黑体的全光谱辐射功率时, 采用热光伏系统整体效率, 即 $P_{in, \lambda} = E_{b, \lambda} = 90.72 \text{W/cm}^2$, $\eta_t = P_{e, \max} / P_{in, \lambda} = 15.15\%$.

在 $V_0 = 0.47 \text{V}$ 时, 电池内部准费米能级差值 ($E_{Fn} - E_{Fp}$) 和静电势 (Φ) 在厚度方向的变化如图5(a)所示。电池前表面处准费米能级差值为 0.51eV , 随着电池深度的增加逐渐减小, 在 $0.1 \mu\text{m}$ 位置开始降低, 到 $0.4 \mu\text{m}$ 附近降至 0.49eV . 随后, 准费米能级差值再次升高, 达到峰值 (0.50eV) 后逐渐下降。分析结果可知, 在 PN 结附近, 准费米能级差值要高于电池的电势差, 且为非均匀分布。主要是因为高注入效应引起的少数载流子浓度增加, 导致了准费

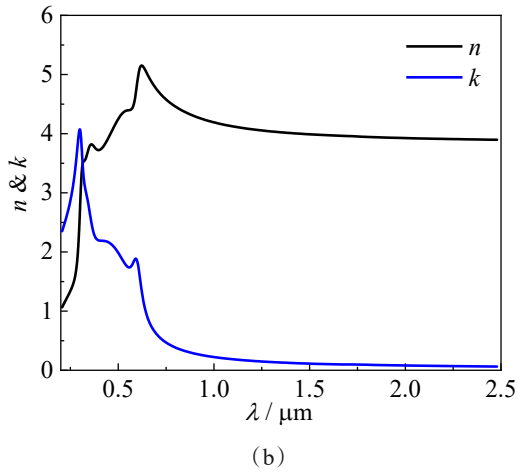
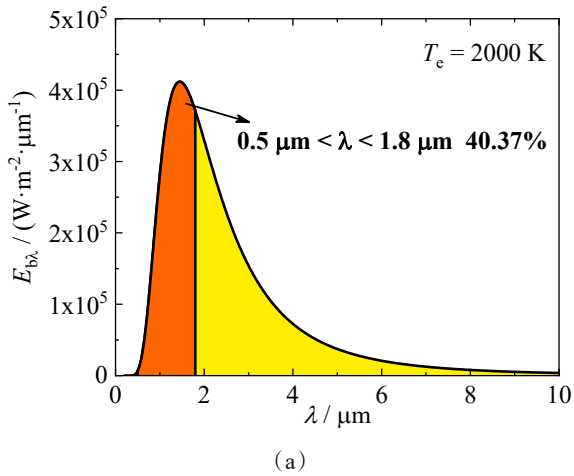


图3 (a) 2000 K 黑体光谱辐射力, (b) GaSb 材料的复折射率^[37]

Fig. 3 Diagrams of (a) the blackbody radiation intensity at 2000 K and (b) the complex refractive index of GaSb^[37]

米能级差值超过了此时电池电压的电势差。电池厚度方向上静电势如图5(b)所示,其作为载流子漂移运动的驱动力,空间电荷区静电势差为0.23 eV;中性区内,P型半导体的静电势为4.33 eV,N型半导体中静电势为4.10 eV。

当电压 $V_0=0.47$ V 时,电池内部非平衡载流子的分布情况如图6(a)所示。自由电子由N型半导体扩散至P型半导体中,从 10^{17} cm^{-3} 降至 10^{13} cm^{-3} 左右。类似地,空穴由P型半导体扩散至N型半导体中,浓度由 10^{19} cm^{-3} 降至 10^{15} cm^{-3} 左右。P型半导体内少数浓度整体小于N型半导体内少数浓度,主要原因是电子寿命小于空穴寿命,自由电子的扩散长度更小。另一方面,电池内部载流子生成率和复合率如图6(b)所示。载流子生成率在电池表面为

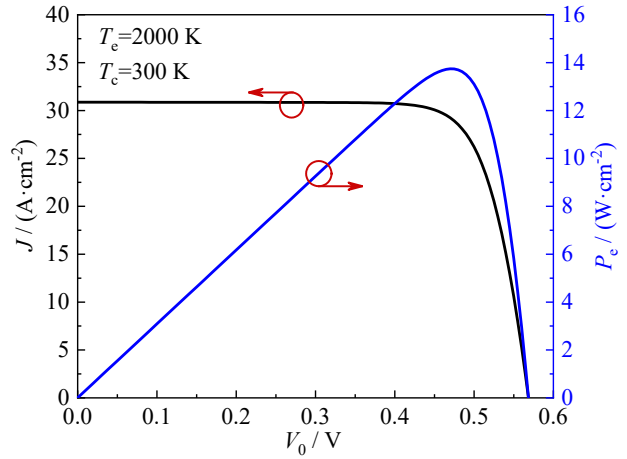


图4 2000 K 黑体辐射下 GaSb 热光伏电池的 J - V 及 P - V 特性曲线

Fig. 4 Diagram of J - V and P - V curves for the GaSb thermophotovoltaic cell under 2000 K blackbody radiation

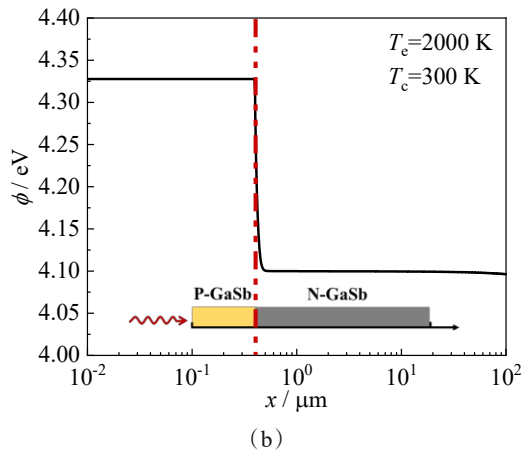
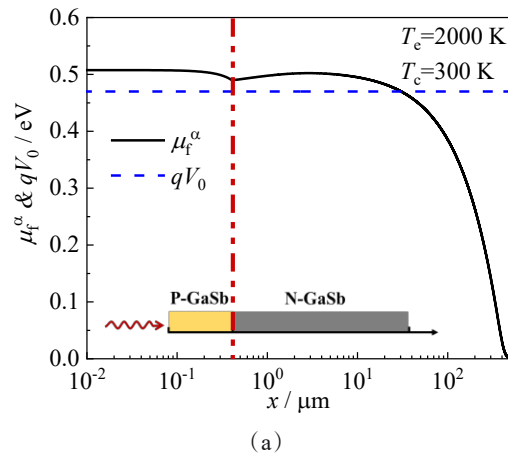
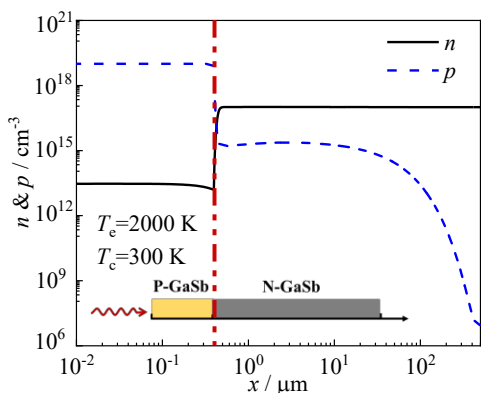
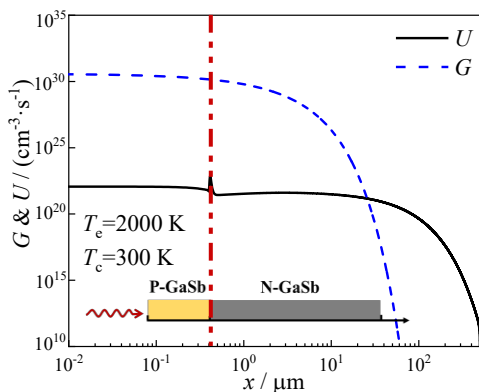


图5 电池内部的 (a) 准费米能级差值及 (b) 静电势
Fig. 5 Diagrams of (a) the Quasi Fermi level difference and (b) the electrostatic potential in the cell

$3.7 \times 10^{30} \text{ cm}^{-3}$, 随着电池深度的增加呈指数趋势下降。载流子复合率在空间电荷区内急剧增加, 峰值为 $7.45 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$; 在中性区内, P 型半导体中稳定在 $1.15 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 左右, N 型半导体中稳定在 $3.98 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 左右。其主要原因是, 空间电荷区内, 自由载流子通过 PN 结向两侧扩散, 少子与 N(P) 型半导体中的电子(空穴)不断复合; 中性区内, 复合率取决于少子浓度, 从而平衡在某一稳定值, 故 P 型半导体中体复合率低于 N 型半导体中体复合率。



(a)



(b)

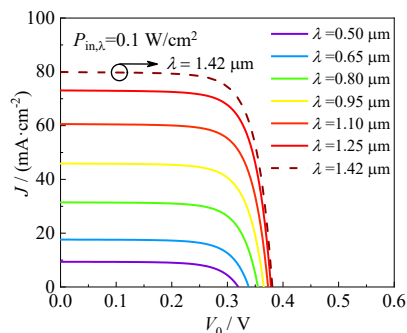
图 6 电池内部的 (a) 载流子浓度及 (b) 载流子生成/复合率
Fig. 6 Diagrams of (a) the carrier concentration and (b) the carrier generation/recombination rate in the cell

3.2 辐射光谱对能量转换的影响

本节针对不同辐射光谱下 GaSb 热光伏电池的电能输出性能进行了研究。各个波长的入射光谱辐射功率密度 ($P_{in,\lambda}$) 均为 0.1 W/cm^2 , 分别模拟了 $0.5 \sim 1.8 \text{ μm}$ 波段内各波长下电池的性能参数, 其 $J-V$ 和 $P-V$ 特性曲线如图 7(a) 和 7(c) 所示。可见, 在不同辐射波长 (λ) 下, 电池的电流密度和输

出功率密度表现出明显差异。为更加直观地展示入射辐射光谱对电池工作性能的影响, 进一步分析了短路电流密度随入射辐射波长的变化, 如图 7(b) 所示。随着 λ 由 0.5 μm 变化到 1.42 μm , 短路电流密度由 9.34 mA/cm^2 增加到 79.91 mA/cm^2 , 增加了 70.57 mA/cm^2 。随着 λ 继续增大, 短路电流密度快速下降。超过 GaSb 电池的截止波长 1.708 μm 后, 由于光子能量不足以激发出载流子, 短路电流密度为零。整体来看, 短路电流密度在不同入射辐射波长下表现出明显的非单调性, 在 $\lambda = 1.42 \text{ μm}$ 时达到峰值。主要原因是 GaSb 在短波范围内吸收指数 k 很大 (如图 3(b) 所示), 光子在电池上表面附近即可被几乎完全吸收, 此时由吸收光子激发出的自由载流子受前表面复合的严重影响, 大部分载流子无法被收集产生电流。而长波范围内吸收指数 k 相对较小, 光子直到电池厚度较深区域才被几乎完全吸收, 激发的载流子受体复合过程的影响较大; 因而短路电流在带隙波长左侧存在峰值。此时, 受表面复合过程和体复合过程的影响最小, 有较多的载流子被电极收集。相同条件下最大输出功率密度随入射辐射波长的变化如图 7(d) 所示, 在整体趋势上与短路电流密度的变化一致。在 $0.5 \sim 1.42 \text{ μm}$ 波段内, 最大输出功率密度增加了 20.45 mW/cm^2 , 在 $\lambda = 1.42 \text{ μm}$ 时达到峰值 22.50 mW/cm^2 。

开路电压、最大输出功率密度对应电压、填充因子和电池效率随入射辐射光谱的变化如图 8 所示。开路电压在 0.32 V 到 0.38 V 范围内变化, 最大输出功率密度所对应电压在 0.25 V 到 0.31 V 范围内变化, 二者峰值均在 $\lambda = 1.42 \text{ μm}$ 左右。填充因子变化趋势与开路电压一致, 在波长 0.5 μm 处为 0.69 , 在波长 1.42 μm 时达到峰值 0.74 。电池转换



(a)

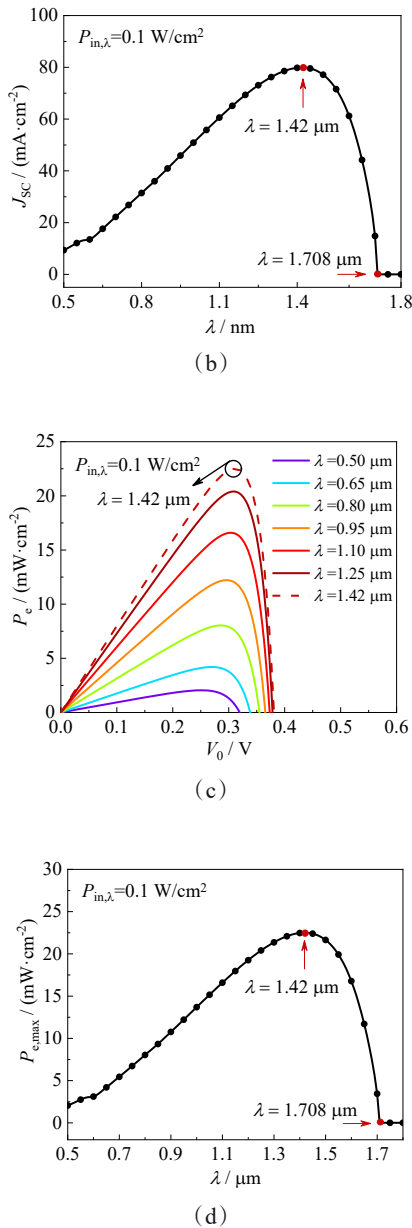


图7 不同辐射光谱下电池的性能参数: (a) J - V 特性曲线, (b) 短路电流密度, (c) P - V 特性曲线, (d) 最大输出电功率密度

Fig.7 Diagrams of performance characteristics of the cell under different wavelength: (a) J - V characteristic curves, (b) short-circuit current density, (c) P - V characteristic curves, (d) maximum output electric power intensity

效率与短路电流密度的变化趋势一致,在0.5~1.42 μm 波段内增加了20.45%,在波长1.42 μm 时达到峰值。基于上述结果可知,通过优化辐射源的光谱分布,即减小低效率波长的辐射功率的同时增大高效率波长的辐射功率,更好地匹配热光伏电池能量

转换效率的光谱曲线,从而提升TPV系统的热-电转换性能。

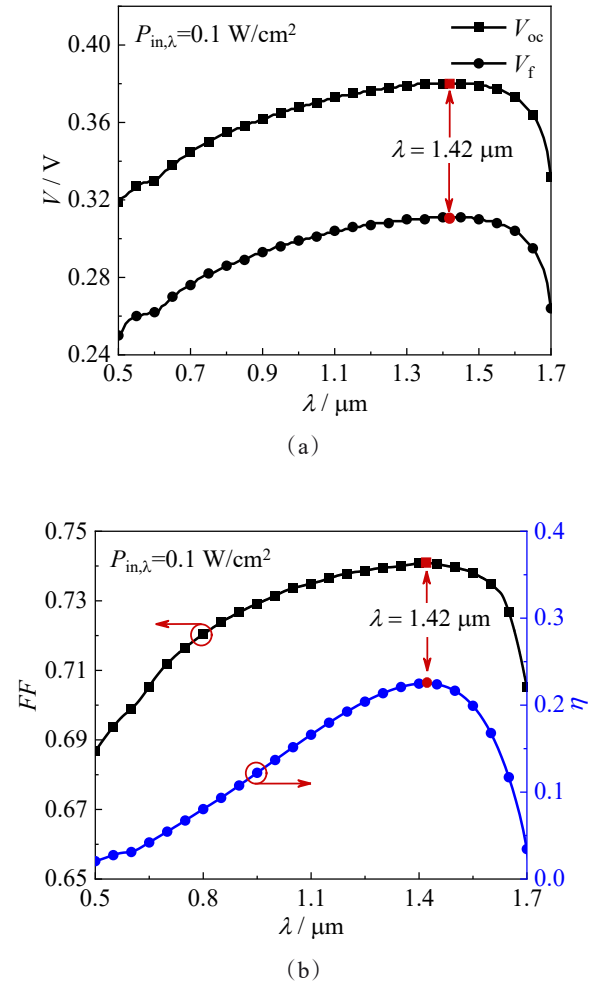


图8 不同辐射光谱下电池的 (a) 开路电压及最大输出电功率密度对应电压, (b) 填充因子和电池效率

Fig.8 Diagrams of (a) open circuit voltage and corresponding voltage of maximum output electric power intensity, (b) filling factor and efficiency of the cell under different wavelengths

3.3 辐射功率对于能量转换的影响

本节讨论入射光谱辐射功率密度($P_{in,\lambda}$)变化时(从0.1 W/cm^2 增加到1.0 W/cm^2),GaSb电池的输出性能变化。以入射辐射波长 $\lambda=1.10 \mu\text{m}$, $\lambda=1.42 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=1.60 \mu\text{m}$ 为例,电池的 J - V 特性曲线如图9(a)所示, $\lambda=1.42 \mu\text{m}$ 时,随辐射功率的增加,短路电流密度由79.91 mA/cm^2 上升至799.65 mA/cm^2 ,整体呈线性单调递增趋势,另外两组波长下短路电流的变化趋势与之相同。主要原因为入射光谱辐射功率密度增大,用于激发载流子的光子增多,从而产生更大的电流密度。 P - V 特性曲线如图9(b)所

示, $\lambda=1.42 \mu\text{m}$ 时, 随辐射功率的增加, 最大输出功率密度从 22.50 mW/cm^2 增加到 273.54 mW/cm^2 , 整体趋势同短路电流密度的变化一致, 其余两组波长下最大输出功率的变化趋势与之一致。

如图 10(a) 所示, 入射光谱辐射功率密度 ($P_{\text{in}, \lambda}$) 由 0.1 W/cm^2 增加至 1.0 W/cm^2 , $\lambda=1.42 \mu\text{m}$ 时, 开路电压和最大电输出功率对应电压都增加了 0.063 V , 均呈对数上升趋势, 另外两组波长下开路电压的变化趋势与之相同。另外, 填充因子和电池效率也具有类似的变化趋势。如图 10(b) 所示, $\lambda=1.42 \mu\text{m}$ 时, 随辐射功率的增加, 填充因子从 0.741 增加到 0.772 , 电池转换效率增加了 4.85% , 但增幅随 $P_{\text{in}, \lambda}$ 的增大而逐渐减小。在 $0.1\sim 0.4 \text{ W/cm}^2$ 的较小范围内, 电池效率就增加了 2.97% ; 而在 $0.4\sim 1.0 \text{ W/cm}^2$ 的较大范围内, 电池效率仅增加了 1.88% 。可见, 提高 $P_{\text{in}, \lambda}$ 在一定范围内可以同时较大地提高输出功率及效率, 但随着 $P_{\text{in}, \lambda}$ 的进一步增大, 效率的提升效果不再显著, 另外两组波长情况下填充因子和效率呈同样变化趋势。因此, 在实际应用的高功率辐射输入下, 应同时考虑到输出功率及效率的变化。

在 $0.5\sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段内各个入射波长下, 电池效率的光谱曲线随入射光谱辐射功率密度 ($P_{\text{in}, \lambda}$) 的变化如图 11 所示。截止波长前的光谱范围内, 随着 $P_{\text{in}, \lambda}$ 的增加, 电池效率的光谱曲线整体上升, 但上升幅度逐渐减小。当 $P_{\text{in}, \lambda}$ 一定时, 电池效率随入射波长的变化趋势同 4.2 节分析一致, 存在先上升后下降的趋势, 峰值位于波长 $1.42 \mu\text{m}$ 处。结果显示, 随

$P_{\text{in}, \lambda}$ 从 0.1 W/cm^2 增加到 1.0 W/cm^2 , $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 处效率仅增大 0.63% 。随着 λ 的增大, 效率随 $P_{\text{in}, \lambda}$ 的变化越来越明显, 于 $\lambda = 1.42 \mu\text{m}$ 处增幅最大, 效率增大了 4.85% 。随后, 效率增幅迅速减弱。因此, 只有在光电转换效率高的入射波长下, 增加 $P_{\text{in}, \lambda}$ 可以更加有效地提高电池转换效率。

4 结论

本文采用光-电耦合方法数值模拟了 GaSb 热光伏电池的热辐射能-电能转换过程, 计算了电池内部的载流子分布与运输情况, 针对微观载流子输运特性以及宏观电性能表征进行了详细分析; 研究了辐射源的光谱特性及功率密度对电池性能的具体影响。主要结论如下:

(1) 入射光谱辐射功率密度一定, 随入射波长的增加, GaSb 热光伏电池各性能参数均产生明显的非单调性变化趋势。光谱功率密度 0.1 W/cm^2 时, 随入射波长增加, 电池的转换效率呈现出先上升后下降的趋势, 在 $\lambda=1.42 \mu\text{m}$ 处存在峰值, 增加了 20.45% 。若考虑 2000 K 黑体全光谱入射时, 电池总效率可达 15.15% 。

(2) 入射辐射光谱一定时, 随辐射功率的增加, GaSb 电池最大输出功率整体呈线性上升趋势, 转换效率有所增大但增幅逐渐减小。 $\lambda=1.42 \mu\text{m}$ 时, 入射光谱辐射功率密度从 0.1 W/cm^2 增加到 1.0 W/cm^2 , 最大电功率线性增加了 251.04 mA/cm^2 , 转换效率在 $0.4\sim 1.0 \text{ W/cm}^2$ 的范围内增速减缓 (1.88%)。

(3) 在不同入射波长下, 随着辐射功率密度的

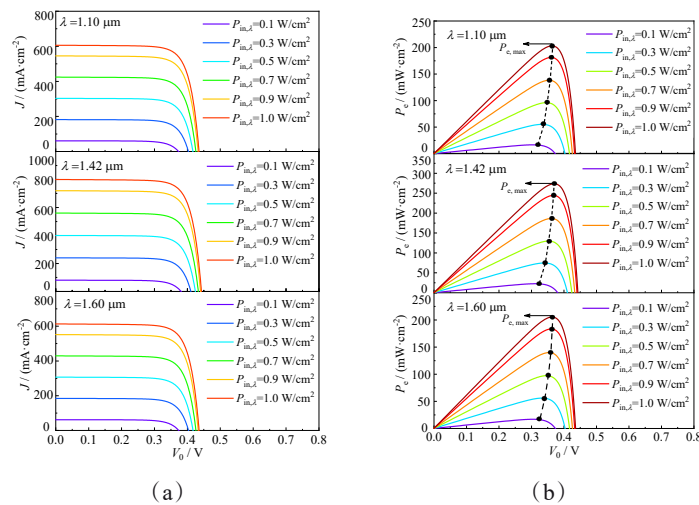


图9 不同辐射功率密度下电池的 (a) J - V 及 (b) P - V 特性曲线

Fig. 9 Diagrams of (a) J - V and (b) P - V characteristic curves of the cell under different incident power intensities

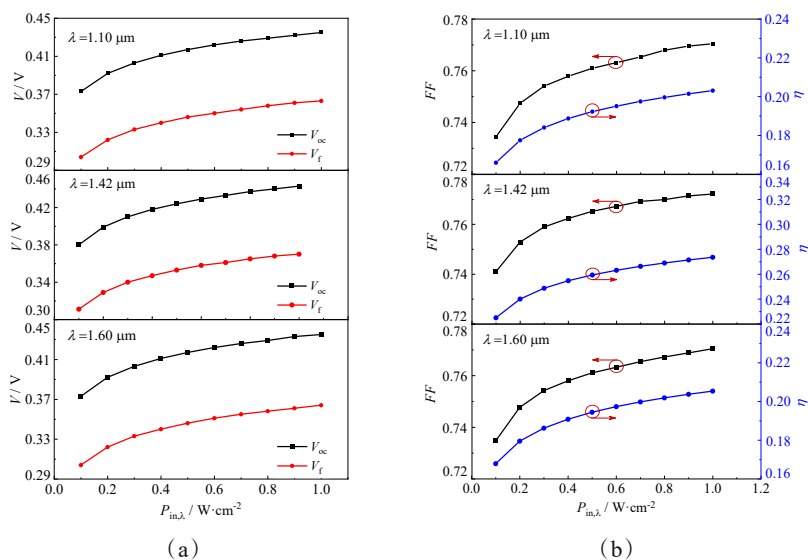


图 10 不同辐射功率密度下电池的 (a) 开路电压及最大输出功率密度对应电压, (b) 填充因子和电池效率

Fig. 10 Diagrams of (a) open circuit voltage and corresponding voltage of maximum output electric power intensity, (b) filling factor and efficiency of the cell under different incident power intensities

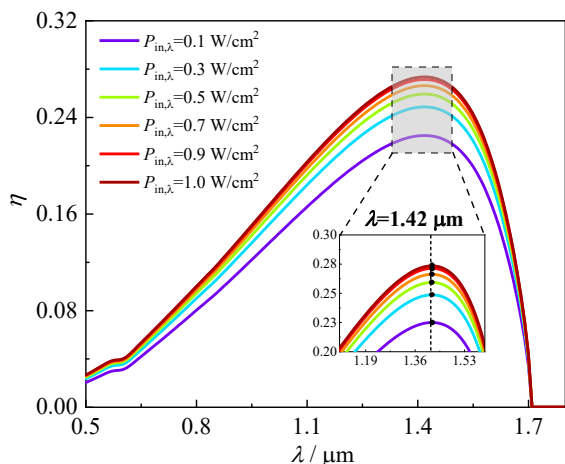


图 11 不同入射光谱辐射功率密度下 GaSb 电池转换效率的光谱曲线

Fig. 11 Diagram of the spectral curves for the cell efficiency under different incident power intensities

增加, 电池的转换效率整体提高。入射光谱辐射功率密度由 0.1 W/cm^2 增加到 1.0 W/cm^2 , 在峰值效率对应的入射波长下, 效率增幅最大(4.85%)。

References

[1] TAN Xian-Dong, LIU Jun, XU Zhi-Cheng, *et al.* Power supply and demand balance during the 14th five-year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. *Electric Power*, 2021, **54**(5): 1-6. (谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. "双碳"目标下"十四五"电力供需形势[J]. *中国电力*), 2021, **54**(5): 1-6.

[2] CHENG Zi-Ming, HAN Han, WANG Fu-Qiang, *et al.* Efficient radiative cooling coating with biomimetic human skin wrinkle structure [J]. *Nano Energy*, 2021, **89**: 106377.

[3] WANG Fu-Qiang, ZHANG Xin-Ping, DONG Yan, *et al.* Progress in radiative transfer in porous medium: A review from macro scale to pore scale with experimental test [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, **210**: 118331.

[4] LIANG Hua-Xu, SU Rong-Hua, HUANG Wei-Ming, *et al.* A novel spectral beam splitting photovoltaic/thermal hybrid system based on semi-transparent solar cell with serrated groove structure for co-generation of electricity and high-grade thermal energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, **252**: 115049.

[5] BURGER T, SEMPERE C, ROY-LAYINDE B, *et al.* Present efficiencies and future opportunities in thermophotovoltaics [J]. *Joule*, 2020, **4**: 1660-1680.

[6] BASU S, CHEN Yu-Bin, ZHANG Zhuo-Min. Microscale radiation in thermophotovoltaic devices—A review [J]. *International journal of energy research*, 2007, **31**: 689-716.

[7] FRAAS L M, AVERY J E, HUANG Han-Xiang. Thermophotovoltaic furnace - generator for the home using low bandgap GaSb cells [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2003, **18**(5): 247.

[8] VICTORIA M, ASKINS S, HERRERO R, *et al.* Assessment of the optical efficiency of a primary lens to be used in a CPV system [J]. *Solar Energy*, 2016, **134**: 406-415.

[9] HUSAIN A A F, HASAN W Z W, SHAFIE S, *et al.* A review of transparent solar photovoltaic technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **94**: 779-791.

[10] YANG Zhi-Min, PENG Wan-Li, LIAO Tian-Ru, *et al.* An efficient method exploiting the waste heat from a direct carbon fuel cell by means of a thermophotovoltaic cell [J].

- Energy Conversion and Management*, 2017, **149**: 424–431.
- [11] ALINA L, KEVIN L S, MYLES A S, *et al.* Thermophotovoltaic efficiency of 40 [J]. *Nature*, 2022, **604** (7905): 287–291.
- [12] LI Xiao-Feng, HYLTON N P, GIANNINI V, *et al.* Multi-dimensional modeling of solar cells with electromagnetic and carrier transport calculations [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, **21** (1): 109–120.
- [13] SHANG Ai-Xue, LI Xiao-Feng. Photovoltaic devices: opto-electro-thermal physics and modeling [J]. *Advanced Materials*, 2017, **29**(8): 1603492.
- [14] CALLAHAN W A, FENG Du-Dong, ZHANG Zhuo-Min, *et al.* Coupled charge and radiation transport processes in thermophotovoltaic and thermoradiative cells [J]. *Physical Review Applied*, 2021, **15**(5): 054035.
- [15] GARNETT E, YANG Pei-Dong. Light trapping in silicon nanowire solar cells [J]. *Nano Letters*, 2010, **10** (3): 1082–1087.
- [16] DEINEGA A, JOHN S. Finite difference discretization of semiconductor drift-diffusion equations for nanowire solar cells [J]. *Computer Physics Communications*, 2012, **183** (10): 2128–2135.
- [17] DEINEGA A, JOHN S. Solar power conversion efficiency in modulated silicon nanowire photonic crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(7): 770–777.
- [18] TOURNET J, PAROLA S, VAUTHELIN A, *et al.* GaSb-based solar cells for multi-junction integration on Si substrates [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, **191**: 444–450.
- [19] DEMEO D, SHEMELYA C, DOWNS C, *et al.* GaSb thermophotovoltaic cells grown on GaAs substrate using the interfacial misfit array method [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(4): 902–908.
- [20] CEDERBERG J G, HAFICH M, BIEFELD R M, *et al.* The preparation of InGa(As)Sb and Al(Ga)AsSb films and diodes on GaSb for thermophotovoltaic applications using metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, **248**: 289–295.
- [21] GAMEL M M A, LEE H J, KER P J, *et al.* A Review on Thermophotovoltaic Cell and Its Applications in Energy Conversion: Issues and Recommendations [J]. *Materials*, 2021, **14**(17): 4944.
- [22] MARTIN D, ALGORA C. Temperature-dependent GaSb material parameters for reliable thermophotovoltaic cell modelling [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2004, **19**(8): 1040–1052.
- [23] BLANDRE E, CHAPUIS P O, VAILLON R. High-injection effects in near-field thermophotovoltaic devices [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 15860.
- [24] NI Qing, SABBAGHI P, WANG Li-Ping. Optoelectronic analysis of spectrally selective nanophotonic metafilm cell for thermophotovoltaic energy conversion [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, **268**: 107625.
- [25] KHVOSTIKOV V P, GRACHEV Y V, VLASOV A S, *et al.* Reducing optical losses in thermophotovoltaic systems [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, **501**(2): 229972.
- [26] LI Dian-Hong, XUAN Yi-Min. Design and evaluation of a hybrid solar thermophotovoltaic-thermoelectric system [J]. *Solar Energy*, 2022, **231**: 1025–1036.
- [27] UTLU Z, NAL B S. Performance evaluation of thermophotovoltaic GaSb cell technology in high temperature waste heat [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, **307**: 012075.
- [28] KRUPKE W F, BEACH R J, PAYNE S A, *et al.* DPAL: A new class of lasers for cw power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths [J]. *Beamed Energy Propulsion*, 2004, **702**: 367–377.
- [29] OH S, CHO J W, JEONG D, *et al.* High-Temperature Carbonized Ceria Thermophotovoltaic Emitter beyond Tungsten [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13**: 42724–42731.
- [30] WANG Dong, YANG Guan-Dong, LIU Fu-De. Solar photovoltaics working principles and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014, 34–41. (王东, 杨冠东, 刘富德. 光伏电池原理及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014, 34–41.
- [31] WACHUTKA G K. Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1990, **9** (11): 1141–1149.
- [32] DONALD L C. Fundamentals of thermophotovoltaic energy conversion [M]. UK: Elsevier, 2007, 313–315.
- [33] LIU En-Ke, LUO Bing-Sheng, LUO Jin-Sheng. Semiconductor Physics (7th Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008, 158–159. (刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学 (第七版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008, 158–159.
- [34] TANG Liang-Liang, FRAAS L M, LIU Zhu-Ming, *et al.* N-type vapor diffusion for the fabrication of GaSb thermophotovoltaic cells to increase the quantum efficiency in the long wavelength range [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2019, **194**: 137–141.
- [35] LEVINSHTEIN M, RUMYANTSEV S, SHUR M. Handbook series on Semiconductor Parameters [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2000, 129–130.
- [36] TANG Liang-Liang, FRAAS L M, LIU Zhu-Ming, *et al.* Doping Optimization in Zn-Diffused GaSb Thermophotovoltaic Cells to Increase the Quantum Efficiency in the Long Wave Range [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, **64**(12): 5012–5018.
- [37] DJURIŠIĆ A B, LI E Herbert, RAKIĆ D, *et al.* Majewski. Modeling the optical properties of AlSb, GaSb, and InSb [J]. *Applied Physics*. 2000, **70**: 29–32.
- [38] STOLLWERCK G, SULIMA O V, Bett A W. Characterization and simulation of GaSb device-related properties [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, **47** (2): 448–457.