

室内光伏理论极限效率计算：基于细致平衡原理*

董龙文¹⁾²⁾ 李媛²⁾† 魏文飞¹⁾²⁾ 周儒¹⁾†

1) (合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

2) (合肥工业大学物理学院, 合肥 230009)

物联网技术的快速发展带来低功耗电子设备的指数级增长。在此背景下, 面向自供电物联网应用的新兴室内光伏技术受到广泛关注。与标准太阳光谱 (AM1.5G) 相比, 常见室内光源光谱范围窄、强度低, 使室内光伏理论极限效率及关键参数存在显著差异。本文基于细致平衡原理, 系统研究了室内光伏电池理论极限效率的计算方法。明确了不同方法之间效率差异的物理根源及各自适用场景, 建立了从理想热力学极限到实际材料潜在性能的系统评估体系。重点分析了在不同照度和相关色温的白色发光二极管 (White Light Emitting Diode, WLED) 和荧光灯 (Fluorescent Lamp, FL) 等常见室内光源条件下, 半导体材料带隙对理论极限效率的影响规律。结果表明 WLED 光源辐照下室内光伏的最佳带隙为 1.84 eV, FL 光源辐照下室内光伏的最佳带隙为 1.94 eV, 二者均高于 AM1.5G 辐照条件下的最佳带隙 1.34 eV。3000 K WLED 和 2700 K FL 室内光源在 1000 lux 辐照条件下的 Shockley-Queisser 理论极限效率分别高达 55.31% 和 56.60%。本文还计算了 BiOI、Se、Sb₂S₃ 等多种新兴室内光伏材料在非理想吸收系数和非辐射复合影响下的光谱限制最大效率, 揭示了限制光伏材料性能的核心因素。本研究为室内光伏材料的筛选与性能预测提供了系统有效的评估依据。

关键词: 室内光伏, 细致平衡原理, Shockley-Queisser 极限, 光谱限制最大效率

PACS: 88.40.hj, 72.40.+w, 05.70.Ln, 72.20.Jv

基金: 国家自然科学基金 (批准号: 52371219) 资助的课题。

† 通信作者. E-mail: liyuan@hfut.edu.cn; zhouru@hfut.edu.cn

第一作者. E-mail: 2024111570@mail.hfut.edu.cn

1 引言

随着物联网（Internet of Things, IoT）技术的快速发展，全球已部署超过数十亿低功耗无线传感器节点，其中近半数运行于室内^[1, 2]。这些传感器节点广泛应用于智能家居、工业检测和智慧医疗等领域，通常需要脱离电网独立工作数年甚至数十年。因此，离网自供电系统至关重要^[3, 4]。基于储能电池的传统供电方案存在寿命有限、维护成本高、环境污染严重等问题，已成为制约物联网规模化部署的核心瓶颈^[5, 6]。室内光伏（Indoor Photovoltaics, IPV）技术能够采集环境光能并转换电能，可为各类低功耗物联网传感器提供可持续能量供给^[7-9]。据 Mathews 等人预测，2030 年全球室内光伏市场规模将突破 8.5 亿美元^[1]，为铅卤化物钙钛矿、有机光伏和硫化锑等新兴光伏材料体系提供了理想的商业化契机^[10-15]。

室内光源的辐照条件与室外标准太阳光谱（AM1.5G）在谱型和强度上存在显著差异，这也决定了室内光伏具有区别于传统室外光伏的材料需求和器件特性^[6]。具体来说，AM1.5G 光谱覆盖 280-4000 nm 的宽波段，一个太阳辐照度达到 100 mW/cm²，相当于 10⁵ lux 的照度。然而，常见室内光源白色发光二极管（White Light Emitting Diode, WLED）和荧光灯（Fluorescent Lamp, FL）的发射光谱主要集中在 400-700 nm 的可见光范围内，照度通常为 200-1000 lux，比 AM1.5G 低约 2-3 个数量级^[16]。这种谱型和光强上的差异造成户外主流晶体硅太阳能电池在室内环境下的光电转换效率通常低于 10%^[6]。因此，探索和开发适用于室内光照条件的高效光伏材料成为当前的研究热点。

评估某一光伏材料体系发展潜力的基础就是评估其理论极限效率。1961 年，Shockley 和 Queisser 基于细致平衡原理，提出著名的 Shockley-Queisser（S-Q）极限理论，用于预测单结太阳能电池的理论极限效率^[17]。该理论为光伏材料的筛选与优化提供了核心依据。目前，研究人员已针对室内光照条件下的太阳能电池理论效率开展了一系列工作^[18-20]。例如，Ho 等人于 2020 年基于细致平衡原理计算了室内光照条件下单结太阳能电池的理论极限效率，报道室内光源下 1.82-1.96 eV 带隙的光伏材料体系可实现 51%-57% 的光电转换效率^[18]。然而，目前领域内仍欠缺对于不同计算方法的系统研究和对比分析，主要体现在：第一，现有研究大多单独使用某一种计算方法，缺乏在统一框架下对不同计算方法之间的物理基

基础假定、计算偏差来源以及适用边界的系统对比，导致不同研究报道的结果欠缺可比性；第二，室内光源的类型、照度和相关色温（Correlated Color Temperature, CCT）对材料最佳带隙与理论极限效率的影响规律尚未完全明确，尚无可直接指导材料筛选的量化准则；第三，针对新兴无铅光伏材料体系的室内光伏性能极限评估多为零散报道，缺乏系统性的数据库与性能瓶颈分析，难以支撑材料的定向开发。

针对上述问题，本文基于细致平衡原理，在统一的理论框架下系统推导并定量对比了适用于室内光伏场景的 S-Q 极限效率和光谱限制最大效率（Spectroscopically Limited Maximum Efficiency, SLME）方法，明确了不同方法的物理本质差异与适用场景。系统分析了 WLED 和 FL 两类典型室内光源辐照条件下，照度和 CCT 对材料带隙与理论效率的影响规律。并基于 SLME，评估了 BiOI、Se 和 Sb₂S₃ 等多种新兴无铅室内光伏材料的室内光伏性能潜力，揭示了制约其效率提升的关键因素。最后，对全文进行总结与展望。

2 理论计算方法

2.1 细致平衡原理

细致平衡原理是太阳能电池理论极限效率评估的物理基础。其核心思想是器件内部电子-空穴对的产生速率与辐射复合速率在热力学平衡及非平衡状态下均遵循特定的动态平衡关系^[17]。

在无光源入射时，半导体处于热力学平衡态，吸收环境黑体辐射产生的载流子生成速率与辐射复合速率相等，净电流密度为0，即：

$$J_0 = J_{0,\text{rad}} \quad , \quad (1)$$

其中， J_0 为半导体吸收环境黑体辐射光子而产生的电流密度； $J_{0,\text{rad}}$ 为零偏压下的本征辐射复合电流密度。本文中电流密度的单位 A/m²。

当有外部光源入射时，系统偏离热力学平衡。此时，器件的总输出电流密度由光生电流密度、黑体辐射吸收电流密度与偏压依赖的辐射复合电流密度共同决定。其数学表达式为：

$$J = J_{\text{ph}} + J_0 - J_{\text{rad}} \quad , \quad (2)$$

其中， J 为器件的总输出电流密度； J_{ph} 为光生电流密度； J_{rad} 为外加偏压下的辐

射复合电流密度。辐射复合电流在外加偏压下由玻耳兹曼因子 $\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right)$ 调制，

公式（2）转化为：

$$J = J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

其中， q 为元电荷电量 ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$)； V 为器件的外加偏压，单位V； k_B 为玻耳兹曼常数 ($1.380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)； T 为器件的绝对温度（默认取300 K）。此公式定量描述了复合过程对电压的指数依赖关系。公式（3）为太阳能电池在光照条件下的电流-电压特性方程。

2.2 S-Q极限理论假设

S-Q极限是理想单结p-n结太阳能电池光电转换效率的理论上限，定义了单结光伏器件无法突破的热力学天花板。S-Q极限效率建立在严格的理想假设条件之上。最基础的假设条件包括：理想的阶跃式吸收、每个光子只产生一对电子-空穴对、载流子瞬间热化、仅存在辐射复合以及理想欧姆接触^[21]。2020年，Ho等人结合三种主要的能量损失，分析了室内光照条件下的太阳能电池S-Q极限^[18]，将总效率分解为极限效率、细致平衡效率与填充因子的乘积。2021年，Lübke等人通过直接求解太阳能电池的电流-电压特性方程，找到最大效率值点来计算太阳能电池的理论极限效率^[19]。这两种分析思路均依据S-Q法，但具体计算过程有所不同。

在上述假设的基础上，若将理想的阶跃吸收更改为实际的材料吸收，同时增加非辐射复合的影响，可以计算更接近实际体系的SLME。Zunger等人于2012年利用了该计算方法，分析了一个太阳辐照下太阳能电池的器件效率^[22]。

2.3 S-Q极限效率计算过程

S-Q极限效率的计算过程有两种常见方法。为了加以区分，并考虑两种方法各自的特点（一种为通过三因子（Three-Factor）乘积进行分析，另一种是基于电流-电压（Current-Voltage）方程进行推导），本文将这两种方法分别记作SQ-TF法和SQ-CV法。

2.3.1 SQ-TF法

该方法将总效率 η_{TF} 分解为三个因子的乘积：

$$\eta_{\text{TF}} = \eta_u \times \eta_d \times \eta_{\text{FF}} , \quad (4)$$

其中， η_u 为极限效率（Ultimate Efficiency），反映了短路电流部分的理想极限，定义为理想情况下光子与载流子之间的转换效率； η_d 为细致平衡效率（Detailed Balance Efficiency），反映了开路电压的理想极限，定义为实际开路电压与带隙电压的比值； η_{FF} 为器件填充因子（Fill Factor），反映了最大功率点与开路-短路条件的匹配程度，定义为器件的实际最大功率与开路电压和短路电流乘积之比。其物理本质是将光伏转换过程中的能量损失分解为三个独立阶段：光子吸收与载流子产生损失、开路电压损失和最大功率点匹配损失。

首先，被半导体吸收的光子通量为：

$$\phi_{\text{eh}} = \int_{E_g}^{\infty} \phi_{\text{eh}}(E) dE = \int_{E_g}^{\infty} \frac{S(E)}{E} dE , \quad (5)$$

其中， E 为光子能量，单位eV； E_g 为半导体带隙，单位eV； ϕ_{eh} 为 $E \geq E_g$ 的光子通量，单位 $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $\phi_{\text{eh}}(E)$ 为光子通量； $S(E)$ 为光谱辐照度，单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{eV})$ 。本文中光子通量的单位 $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。

短路条件下，器件中的载流子被完全收集，此时器件的短路电流密度 $J_{\text{sc}} = J_{\text{ph}} = q\phi_{\text{eh}}$ 。在开路电压等于带隙电压的理想情况下，器件产生的最大功率密度与光源的入射光功率密度之比为：

$$\eta_u = \frac{J_{\text{sc}}(E_g/q)}{P_{\text{in}}} = \frac{\phi_{\text{eh}} E_g}{P_{\text{in}}} , \quad (6)$$

其中， E_g/q 为带隙电压，单位V； $P_{\text{in}} = \int_0^{\infty} S(E) dE$ 为光源的入射光功率密度，单位 W/m^2 。将 ϕ_{eh} 和 P_{in} 代入式（6），可得：

$$\eta_u = E_g \frac{\int_{E_g}^{\infty} \frac{S(E)}{E} dE}{\int_0^{\infty} S(E) dE} = E_g \int_{E_g}^{\infty} S_{\text{norm}}(E) \frac{1}{E} dE , \quad (7)$$

其中， $S_{\text{norm}}(E)$ 为 $S(E)$ 归一化形式：

$$S_{\text{norm}}(E) = \frac{S(E)}{\int_0^{\infty} S(E) dE} , \quad (8)$$

$S(E)$ 和 $S(\lambda)$ （单位： $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ ）可进行如下转换：

$$S\left(E = \frac{hc}{\lambda}\right) = S(\lambda) \frac{\lambda^2}{hc}, \quad (9)$$

其中, λ 为光波长, 单位nm; h 为普朗克常数 ($6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$); c 为光速 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。

考虑到实际情况中存在不同谱型、强度和CCT的室内光源, 可对发射光谱进行归一化处理, 以确保对不同光源条件的计算都基于其谱型特征, 从而能在统一基准下比较不同照度下的理论性能极限^[18]。 P_{in} 通过公式 (10) 得出:

$$L = K_r P_{\text{in}} \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} S_{\text{norm}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (10)$$

其中, L 为照度, 单位lux; K_r 为常量 (683.002 lm/W), $V(\lambda)$ 为人眼的明视觉光谱光视效率函数。

依据定义式, η_d 可写作:

$$\eta_d = \frac{qV_{\text{oc}}}{E_g}, \quad (11)$$

V_{oc} 可由公式 (3) 推导得出, 在开路条件下 ($J = 0$):

$$V_{\text{oc}} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{\text{sc}}}{J_0} + 1\right) = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{F_{\text{eh}}}{F_{0,\text{rad}}} + 1\right), \quad (12)$$

其中, F_{eh} 为电子-空穴对产生通量, 单位 $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; $F_{0,\text{rad}}$ 为黑体辐射复合发射的光子通量, 单位 $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 F_{eh} 本质上是大于带隙的光子对应的光子通量。

$$F_{\text{eh}} = \phi_{\text{eh}} = P_{\text{in}} \int_{E_g}^{\infty} S_{\text{norm}}(E) \frac{1}{E} dE, \quad (13)$$

另一方面, $F_{0,\text{rad}}$ 代表器件在热力学平衡态下的辐射复合极限。根据普朗克黑体辐射定律^[23]:

$$\phi_{\text{bb}}(E) = \frac{4\pi}{h^3 c^2} \frac{E^2}{\exp(E/k_B T) - 1}, \quad (14)$$

其中, $\phi_{\text{bb}}(E)$ 为黑体在温度 T 下的辐射光子通量。半导体电池的辐射复合光子向全空间自发发射, 无方向性。

$$F_{0,\text{rad}} = \int_{E_g}^{\infty} \phi_{\text{bb}}(E) dE = \frac{4\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2}{\exp(E/k_B T) - 1} dE, \quad (15)$$

η_{FF} 常用Green经验公式计算^[24]:

$$\eta_{FF} \approx \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1}, \quad (16)$$

其中, $v_{oc} = qV_{oc} / (k_B T)$ 为归一化开路电压。

2.3.2 SQ-CV法

该方法直接通过求解太阳能电池的电流-电压特性方程（即公式（3））得出。其中, 短路电流密度 J_{sc} 计算如下:

$$J_{sc} = q \int_{E_g}^{\infty} \phi_{eh}(E) dE, \quad (17)$$

在无光照时, 根据公式（1）:

$$J_0 = q \int_{E_g}^{\infty} \phi_{bb}(E) dE, \quad (18)$$

公式（3）中 J_{sc} 和 J_0 可表述为公式（17）和公式（18）。太阳能电池的转换效率定义为最大输出功率密度与入射光功率密度的比值, 则理论极限效率为:

$$\eta_{CV} = \frac{\max(P_{out})}{P_{in}} = \frac{\max(JV)}{P_{in}}, \quad (19)$$

其中, P_{out} 为器件输出功率密度, 单位 W/m^2 。

与SQ-TF法相比, SQ-CV法在处理填充因子时采用了数值求解最大功率密度点的方法, 而非Green经验公式, 这会导致二者计算结果存在细微差异。

2.3.3 SLME法

SLME法在S-Q极限的基础上, 进一步考虑了实际材料的非理想吸收和非辐射复合, 因此其预测的极限效率更接近实际情况。

吸光度 $a(E)$ 由Beer-Lambert定律给出:

$$a(E) = 1 - \exp(-2\alpha(E)l), \quad (20)$$

其中, $a(E)$ 为材料的吸光度; $\alpha(E)$ 为材料的吸收系数; l 为吸收层厚度。 $\alpha(E)$ 使用实验测量的数值, 在 $E \leq E_g$ 时被设置为0^[20]。其中, 因子2表示光线在吸收层内进行一次往返传播。据此, 短路电流密度公式修正为:

$$J_{sc} = q \int_0^{\infty} a(E) \phi_{eh}(E) dE, \quad (21)$$

为了描述非辐射复合的影响, 引入非辐射复合因子 f_r , 表示辐射复合占总复合的比例, 修正反向饱和电流密度 J_0 :

$$J_0 = \frac{J_0^r}{f_r} = \frac{q}{f_r} \int_0^\infty a(E) \phi_{bb}(E) dE, \quad (22)$$

其中, J_0^r 为仅考虑辐射复合的电流密度。非辐射复合因子 f_r 使用玻耳兹曼因子来建模^[22]:

$$f_r = \exp \left[-\frac{(E_g^{\text{da}} - E_g)}{k_B T} \right], \quad (23)$$

其中, E_g^{da} 为半导体材料的直接允许带隙 (Direct allowed gap), 单位eV。 $f_r = 1$ 表示太阳能电池的复合完全是辐射复合。具有较大的 $\Delta = E_g^{\text{da}} - E_g$ 的间接带隙半导体会导致不现实的 f_r 值, 所以 $\Delta \geq 0.15 \text{ eV}$ 的 f_r 一般设置为 10^{-3} ^[20]。通过如下近似公式确定太阳能电池的最大功率密度点^[25]:

$$J_{\text{mpp}} = J_{\text{sc}} \left(\frac{v_{\text{oc}} - \log(v_{\text{oc}} + 1)}{v_{\text{oc}} - \log(v_{\text{oc}} + 1) + 1} \right), \quad (24)$$

$$V_{\text{mpp}} = \frac{k_B T}{q} (v_{\text{oc}} - \log(v_{\text{oc}} - \log(v_{\text{oc}} + 1) + 1)), \quad (25)$$

SLME理论极限效率为:

$$\eta_{\text{SLME}} = \frac{J_{\text{mpp}} V_{\text{mpp}}}{P_{\text{in}}}, \quad (26)$$

3 结果与讨论

图1(a)给出了AM1.5G (100 mW/cm²)、3000 K WLED和2700 K FL的发射光谱。可以看出, 室内光源与AM1.5G太阳光的谱型和强度存在显著差别。太阳光光谱宽且连续, 覆盖紫外、可见到红外区域。室内光源光谱能量高度集中在400-700 nm的可见光区域, 尤其在蓝绿光波段有较强峰值, 且几乎不含红外光子^[26]。室内光源在设计时考虑了光源光谱与人眼的明视觉光谱光视效率函数之间的良好匹配^[27]。WLED的发射谱线在可见光区域连续分布, FL的发射光谱通常包含离散的发射谱线。同时, 室内光源的强度比AM1.5G低100~1000倍^[11]。首先, 本文测量了3000 K WLED和2700 K FL光源在200、500和1000 lux照度条件下的光谱辐照度, 如图1(b)和图1(c)所示。图1(a-c)光谱数据均为实验测量所得, 测量过程为: 采用HOPOOCOLOR HPCS-330P型光谱照度计分别测定Ccobalance T5/6 W型WLED光源与NVC YZ08-T5/8 W型FL光源的表面照度值。同时, 采集3000 K

WLED与2700 K FL两种室内光源的光谱辐照度数据。基于200 lux、500 lux、1000 lux三种照度条件，对全波长范围内的光谱辐照度进行积分运算，定量计算得到对应工况下的室内光功率密度。该仪器光学分辨率为4 nm，光谱波长测量精度为 ± 0.5 nm。所有测试均在暗箱中进行，以防止环境杂散光的影响^[28]。3000 K WLED的光功率密度计算为 $276 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (1000 lux)、 $137.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (500 lux)、 $55.7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (200 lux)，而2700 K FL的光功率密度分别为 $280.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (1000 lux)、 $139.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (500 lux)、 $55.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (200 lux)。结果表明，在不同照度条件下的光源谱型无明显变化，入射光功率密度和照度基本保持线性关系。

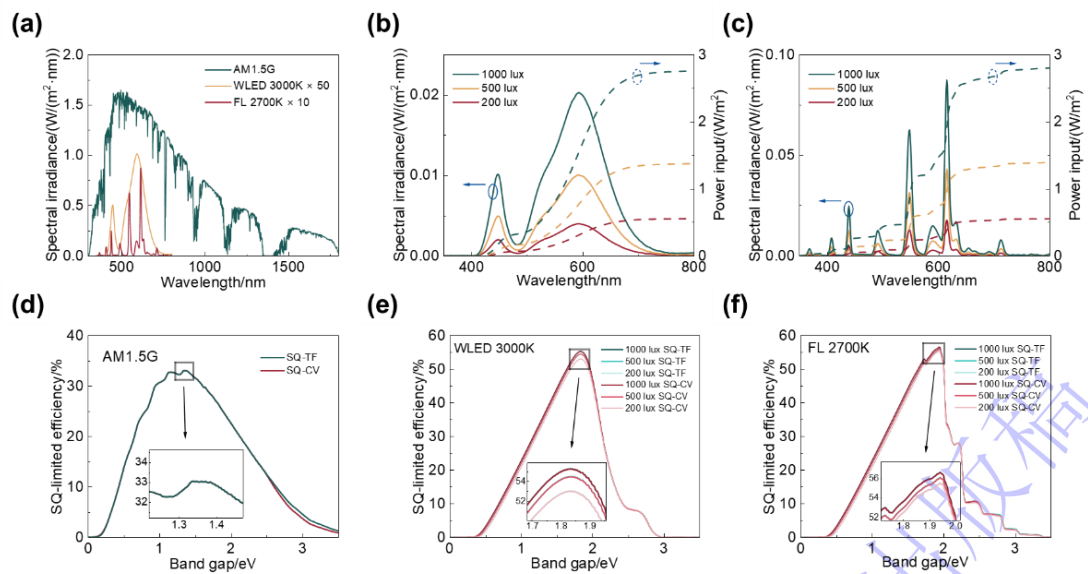


图1 不同光源的光谱特性及S-Q极限效率与半导体带隙的依赖关系 (a) AM1.5G、3000 K 1000 lux WLED和2700 K 1000 lux FL的发射光谱比较。为方便对比，WLED和FL的光谱强度分别放大了50倍和10倍；(b-c) 3000 K WLED和2700 K FL在1000、500和200 lux辐照条件下的光谱辐照度和入射光功率密度；(d) AM1.5G辐照条件下，SQ-TF和SQ-CV两种计算方法下的S-Q极限效率与带隙之间的依赖关系曲线；(e-f) 1000、500和200 lux的3000 K WLED和2700 K FL在SQ-TF和SQ-CV两种计算方法下的S-Q极限效率与带隙之间的依赖关系曲线。

Fig. 1. Spectral characteristics of various light sources and the dependence of S-Q limiting efficiency on the semiconductor bandgap: (a) Comparison of the spectral irradiance of AM1.5G, 3000 K WLED at 1000 lux, and 2700 K FL at 1000 lux. For clarity, the spectral intensities of WLED and FL are magnified by 50 and 10 times, respectively; (b-c) Spectral irradiance and incident optical power density of 3000 K WLED and 2700 K FL under illumination of 1000, 500, and 200 lux; (d) The dependence of the S-Q limiting efficiency on the bandgap under AM1.5G illumination, calculated by the SQ-TF and SQ-CV methods; (e-f) The dependence of the S-Q limiting efficiency on the bandgap for 3000 K WLED and 2700 K FL at 1000, 500, and 200 lux, calculated by the SQ-TF and SQ-CV methods.

本文首先采用SQ-TF和SQ-CV两种计算方法，得到AM1.5G、3000 K WLED和2700 K FL在不同辐照条件下的S-Q极限效率随带隙变化的曲线，如图1(d-f)所示。具体数据统计在表1中。需要注意的是，这里在使用SQ-TF法进行效率预测时，所使用不同照度下的光谱是采用1000 lux WLED和FL光谱归一化并结合照度换算的方式得到。从结果可以看出，室内光源WLED和FL对应的最佳带隙分别为1.84和1.94 eV，高于AM1.5G对应的最佳带隙1.34 eV。不同光源对应最佳带隙的确定主要依赖于辐照光谱与半导体响应之间的良好匹配。同一光源在不同照度下对应的最佳带隙并未发生变化，这是由于光源谱型基本不随照度变化而改变。同时，在同一光源下，某一固定带隙对应的理论极限效率随照度增大而增大。

表 1 采用 SQ-TF 和 SQ-CV 两种方法计算得到 AM1.5G 以及 1000、500、200 lux 辐照条件下 3000 K WLED 与 2700 K FL 光源的 S-Q 极限效率及其对应最优带隙。

Table 1. The S-Q limiting efficiencies and corresponding optimal bandgaps under the illumination of AM1.5G, 3000 K WLED, and 2700 K FL using SQ-TF and SQ-CV methods. The illumination intensities of WLED and FL are set to 1000, 500, and 200 lux.

Light Sources	E_g /eV	η_{TF} /%	η_{CV} /%
AM1.5G	1.34	33.05	33.04
3000 K 1000 lux WLED		55.31	55.28
3000 K 500 lux WLED	1.84	54.54	54.51
3000 K 200 lux WLED		53.09	53.05
2700 K 1000 lux FL		56.60	56.56
2700 K 500 lux FL	1.94	56.07	56.03
2700 K 200 lux FL		55.51	55.48

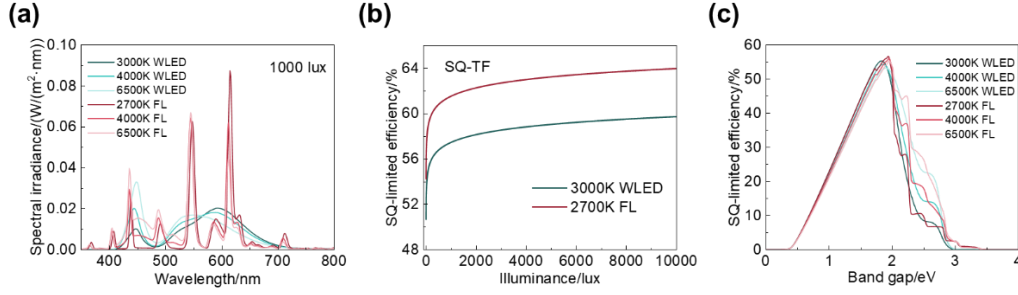


图2 不同CCT WLED与FL室内光源的发射光谱及对应辐照下基于SQ-TF方法的S-Q极限效率特性 (a) 3000 K、4000 K和6500 K WLED和2700 K、4000 K和6500 K FL在1000 lux辐照条件下的发射光谱; (b) 3000 K WLED和2700 K FL辐照条件下, 基于SQ-TF计算方法的S-Q极限效率与照度的关系曲线; (c) 3000 K、4000 K和6500 K的WLED和FL在1000 lux辐照条件下, 基于SQ-TF计算方法的S-Q极限效率与带隙的关系曲线。

Fig. 2. Spectral characteristics and S-Q limiting efficiency of WLED and FL light sources with different CCT, calculated by the SQ-TF method: (a) Spectral irradiance of WLEDs (3000 K, 4000 K, 6500 K) and FLs (2700 K, 4000 K, 6500 K) at 1000 lux illumination; (b) S-Q limiting efficiency versus illumination intensity for 3000 K WLED and 2700 K FL, calculated using the SQ-TF method; (c) S-Q limiting efficiency versus bandgap for WLEDs and FLs at 3000 K, 4000 K, and 6500 K under 1000 lux illumination, calculated with the SQ-TF method.

图2(a)为1000 lux辐照条件下WLED和FL在不同CCT下的发射光谱。对同一类型的光源来说, 不同CCT对应的光源谱型有明显差异。无论是WLED还是FL光源, CCT增大都会导致发射光谱向短波方向偏移, 同时蓝光发射 (450-480 nm) 增强而黄绿光发射 (550-580 nm) 减弱。如图2(b)所示, 两种光源的S-Q极限效率均随着照度的升高而增大, 其增长速率受到 V_{OC} 的极大限制 (见公式12)。随着照度增加, 器件的光生电流会持续升高, 但是对数函数决定了 V_{OC} 在照度持续增大的过程中趋于平缓。

CCT对器件性能与材料适配性具有显著调控作用。首先, 对于WLED与FL两类光源, 随着色温由3000 K提升至6500 K, 效率峰值对应的最佳带隙向宽带隙移动, 且极限效率峰值同步小幅降低[图2(c)]。这主要是因为高CCT光源光谱发生蓝移, 高能短波光光子占比升高, 需匹配更宽带隙的半导体材料以抑制热化损失。同时, 高能短波光子的增加会增大载流子热化损失, 从而导致效率峰值的小幅下降。其次, 室内光伏效率在窄带隙区域随着CCT的升高而降低, 而在宽带隙区域随CCT的升高而升高。WLED光源和FL光源的变化分界点分别在1.92 eV和1.98 eV附近。这种变化趋势的物理根源在于: 对某一特定带隙的半导体而言, 低于带隙的光吸收损失与高于带隙的热化损失之间存在竞争关系。在窄带隙区域, 半导体

可充分吸收室内光源辐照，损耗以热化损失为主；光源CCT越高，高能光子占比越高，热化损失越大，效率降低。在宽带隙区域，低于带隙的光吸收损失占主导；光源CCT越高，高能光子占比越高，低于带隙的光吸收损失越小，效率提高。

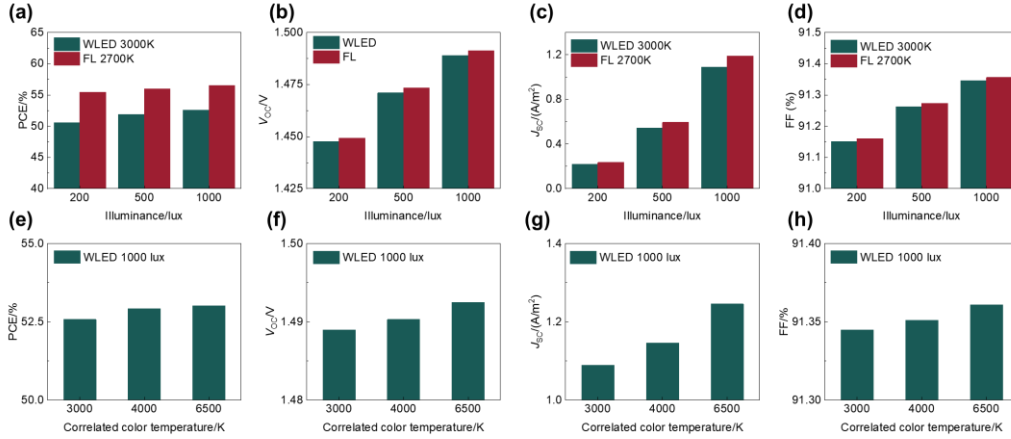


图3. BiOI太阳能电池器件在不同室内光源辐照条件下的极限光电性能参数 (a-d)3000 K WLED和2700 K FL光源在200 lux、500 lux和1000 lux辐照条件下，以及(e-h) 3000 K、4000 K和6500 K 1000 lux WLED光源辐照条件下，基于SQ-TF计算方法得到的PCE、 V_{oc} 、 J_{sc} 和FF。

Fig. 3. Ultimate photoelectric performance parameters of BiOI solar cells under different indoor light irradiation conditions: (a–d) PCE, V_{oc} , J_{sc} and FF calculated via the SQ-TF method under the irradiation of 3000 K WLED and 2700 K FL light sources at 200 lux, 500 lux and 1000 lux, and (e–h) those under 1000 lux irradiation of WLED light sources with CCT of 3000 K, 4000 K and 6500 K.

通过上述分析，室内弱光场景下单结光伏器件在 WLED 光源下的最佳带隙为 1.84 eV，在 FL 光源下的最佳带隙为 1.94 eV。接下来，本文选取与理论最佳带隙高度匹配的 BiOI（带隙为 1.93 eV）作为光吸收材料，进一步研究器件关键性能参数随辐照条件的变化规律^[29]。基于 SQ-TF 计算方法，计算了 BiOI 单结光伏器件在两组典型室内光源辐照条件下的核心光伏性能参数，如图 3 所示。两组辐照条件分别为：照度为 200 lux、500 lux、1000 lux 的 3000 K WLED 与 2700 K FL 光源；照度固定为 1000 lux，CCT 分别为 3000 K、4000 K 与 6500 K 的 WLED 光源。结果表明：PCE、 V_{oc} 、 J_{sc} 和 FF 均随光源照度的升高而升高[图 3(a-d)]，且 2700 K FL 辐照条件下的各项性能都要高于 3000 K WLED。同时，在 1000 lux WLED 辐照条件下，PCE、 V_{oc} 、 J_{sc} 和 FF 随着 CCT 的增加而增加[图 3(e-h)]。这主要是因为随 CCT 升高，WLED 发射光谱中高能光子占比提升，与器件 1.93

eV 的宽带隙匹配度改善，光生载流子浓度相较于低 CCT 情况下提高，最终实现 V_{OC} 和 J_{SC} 的提升。同时，FF 随之改善，最终使器件 PCE 整体上升。

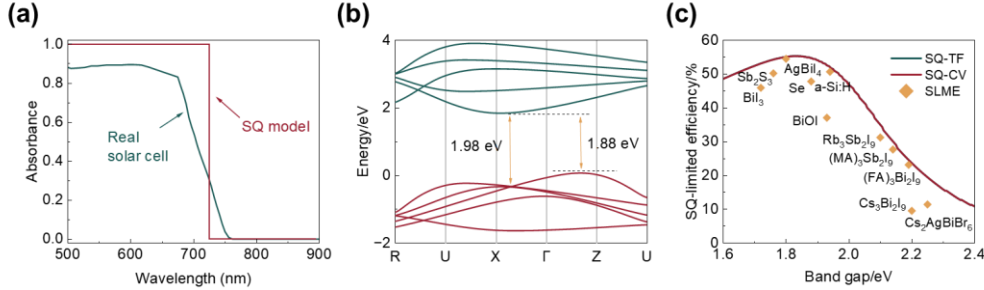


图4 Se半导体的吸光特性、电子能带结构及室内弱光下无铅光伏材料的效率极限分析 (a)理想阶跃吸收和实际吸光度；(b)电子能带结构图；(c)3000 K 1000 lux WLED光源辐照条件下的S-Q极限效率及多种无铅钙钛矿启发材料的SLME。

Fig. 4. Light absorption characteristics, electronic band structure of Se semiconductor and limiting efficiency analysis of lead-free photovoltaic materials under indoor low-light conditions: (a) Ideal step-function absorption and actual absorbance; (b) Electronic band structure; (c) S-Q limiting efficiency and SLME of various lead-free perovskite-inspired materials under 3000 K, 1000 lux WLED illumination.

与前面所讨论的SQ-TF和SQ-CV两种方法相比，SLME法则考虑了半导体材料实际的吸收系数和非辐射复合的影响。以硒（Se）为例，我们对比展示了S-Q和SLME的理论假设的差别，如图4(a-b)所示。我们选用薛丁江课题组所报道高质量硒电池对应的Se吸收层薄膜的实际吸光度进行计算分析^[7]。Se的直接带隙和间接带隙数值使用Kavanagh等人的理论计算结果^[30]。SLME随着薄膜厚度的增大而提升：当厚度较小时，材料光吸收极弱，SLME数值很低，不同材料的吸收光谱差异被掩盖，无法区分优劣，失去筛选意义；当厚度较大时，所有相同带隙的半导体材料的SLME都会收敛到同一个极限值，材料本征吸收谱形、光学类型的差异完全消失，无法筛选出理想吸收层^[22]。这里，在SLME的计算过程中，我们选用500 nm作为一个合适的吸收层薄膜厚度。

图4(a)展示了Se半导体材料的理想阶跃吸光度和实际吸光度的区别。可以看出，实际吸光度在约675-700 nm波长处开始缓慢下降。这说明在实际情况下，光

子能量低于带隙的光子也有可能被Se半导体禁带内的缺陷能级所吸收。同时，实际吸光度在500-675 nm波长处稳定在0.9附近，这表明实际薄膜对于光子能量高于带隙的光子也只有90%的概率被吸收。图4(b)给出了基于第一性原理计算的Se的能带结构图，描绘了电子能量与晶体动量（沿高对称点方向）的关系^[31]。如图所示，直接带隙半导体的导带底和价带顶对应的波矢相等，电子可以在吸收一个光子后，从价带直接跃迁到导带，不需要声子辅助。间接带隙半导体的导带底和价带顶对应的波矢不相等，电子从价带顶跃迁到导带底时，除了吸收光子，还需要吸收声子补偿动量变化。如图所示，Se是一种间接带隙半导体，其间接带隙虽然比直接带隙小，但是在动量空间上不对应，表明间接带隙半导体在辐射复合的过程中需要加入声子以实现动量守恒^[32]。声子的引入使间接带隙半导体材料更难发生辐射复合，该效应可降低饱和电流密度，为开路电压的提升提供一定空间^[33]。对于直接带隙半导体而言，两个带隙在动量空间上对应，即 $E_g^{da} = E_g$ 。S-Q模型假设 $f_r = 1$ ，即对于所有光学类型的材料，辐射复合是唯一的复合过程。这一假设对于直接带隙半导体是较好的近似，这是由于这类材料中辐射复合占据主导地位。但对于间接带隙半导体材料，非辐射复合（如俄歇复合）通常占据绝对主导（即 $f_r \ll 1$ ）^[22]。因此，更小的 f_r 实际上代表着更高的非辐射复合损耗。本文在特定光源（3000 K 1000 lux WLED）辐照下，系统计算了不同带隙无铅钙钛矿启发半导体材料的SLME[图4(c)]，详细数据放在表2中。图4(c)可以看出，Se、Sb₂S₃、AgBiI₄等新兴半导体材料的IPV性能潜力和非晶硅（a-Si:H）相当，在IPV领域表现出广阔的应用前景。

表2 3000 K 1000 lux WLED光源辐照下，各种新型室内光伏材料的带隙性质及理论极限效率

Table 2. Bandgap properties of materials and theoretical efficiency of three models under 3000 K 1000 lux WLED illumination light source.

Material	E_g /eV	E_g^{da} /eV	η_{TF}	η_{CV}	η_{SLME}	Ref.
BiOI	1.93	1.95	52.40	52.37	37.05	[29]
Se	1.88	1.98	54.69	54.66	47.78	[30]
Sb ₂ S ₃	1.76	1.84	54.32	54.29	50.17	[34]

BiI ₃	1.72	1.87	53.14	53.11	45.89	[35]
Cs ₃ Sb ₂ I ₉ (0D)	1.95	2.37	50.90	50.87	42.66	[36]
Cs ₃ Sb ₂ (I,Cl) ₉ (2D)	1.95	2.05	50.90	50.87	45.81	[36]
AgBiI ₄	1.80	-	55.06	55.03	54.47	[37]
(MA) ₃ Sb ₂ I ₉	2.14	-	29.84	29.83	27.64	[38]
(FA) ₃ Bi ₂ I ₉	2.19	-	24.55	24.54	23.13	[39]
Cs ₃ Bi ₂ I ₉	2.20	1.95	23.45	23.43	9.52	[40]
Cs ₂ AgBiBr ₆	2.25	1.51	19.44	19.43	11.41	[41]
Rb ₃ Sb ₂ I ₉	2.10	2.24	34.74	34.72	31.20	[42]
a-Si:H	1.94	-	51.78	51.75	50.63	[43]

进一步，我们将SLME法中的实际吸光度和非辐射复合假设分别设置，并与S-Q模型进行对比以定量分析某一半导体材料体系的光吸收损失和非辐射复合损失的贡献。其中，光吸收损失定义为无任何非辐射复合的理想条件下，仅由材料实际吸光能力与S-Q模型理想吸收假设的差异带来的效率损失。这里我们设置 $\alpha(E)$ 为实际材料的吸收系数，而 $\Delta = E_g^{\text{da}} - E_g = 0$ 。非辐射复合损失定义为理想吸收时，仅由非辐射复合过程引发的效率损失。这里我们设置 $\alpha(E)$ 在 $E \geq E_g$ 时为1，否则为0， Δ 为实际材料直接带隙和间接带隙的差值。基于此，计算得到：BiOI的光吸收损失为14.73%，非辐射复合损失为0.76%，这说明其性能的主要瓶颈为非理想吸收；Se的光吸收损失为0.9%，非辐射复合损失为4.43%；Sb₂S₃的光吸收损失为0.6%，非辐射复合损失为3.51%；AgBiI₄材料的光吸收损失为0.1%，非辐射复合损失为0。结果表明：Se、Sb₂S₃和AgBiI₄的光吸收损失和非辐射复合损失均较小，综合性能良好，是室内光伏领域值得重点关注和研究的半导体材料体系。

4 结 论

本文系统研究了室内光伏理论极限效率预测的物理模型和计算方法，并对多种新兴室内光伏材料体系的性能潜力进行了评估。论文首先推导并定量对比了SQ-TF、SQ-CV 和 SLME 三种适用于室内光伏场景的极限效率计算方法，明确了不同计算方法的物理假设、效率偏差来源与适用边界，其中 SQ-TF 与 SQ-CV

基于理想假设获得光伏器件的热力学极限效率，而 SLME 因纳入了材料非理想吸收与非辐射复合损失，使其预测结果更贴合实际材料的应用性能。论文通过实测标定了 WLED 与 FL 两类典型室内光源在不同照度、相关色温下的光谱特性，量化揭示了室内辐照条件对半导体材料最佳带隙与理论极限效率的调控规律：WLED 和 FL 光源辐照下的室内光伏材料最佳带隙分别为 1.84 eV 和 1.94 eV；3000 K WLED 和 2700 K FL 室内光源在 1000 lux 辐照条件下的 S-Q 理论极限效率分别高达 55.31%和 56.60%；材料理论极限效率随光源照度升高而提升并在高照度区间趋于饱和；光源 CCT 升高则会使效率峰值对应的最佳带隙向宽带隙方向偏移。在此基础上，论文基于 SLME 系统评估了 BiOI、Se、Sb₂S₃ 和 AgBiI₄ 等十余种新兴无铅 IPV 材料的性能潜力，解析了各类材料的效率损失核心来源，发现 Se、Sb₂S₃ 和 AgBiI₄ 材料的光吸收损失与非辐射复合损失均处于较低水平，在室内光伏应用场景中具备突出的发展潜力。该研究建立了从理想热力学极限到实际材料潜在性能的室内光伏全链条评估体系，为新兴室内光伏材料的筛选、定向优化与性能评估提供了核心理论依据与量化方法，对推动室内光伏技术在物联网自供电领域的规模化应用具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Mathews I, Kantareddy S N, Buonassisi T, Peters I M 2019 *Joule* **3** 1415
- [2] Zhu Z F, Lin Z M, Zhai W J, Kang X Y, Song J T, Lu C H, Jiang H Y, Chen P N, Sun X M, Wang B J, Wang Z S, Peng H S 2024 *Adv Mater* **36** 2304876
- [3] Yu H, Li N, Zhao N 2021 *Adv Energy Mater* **11** 2002646
- [4] Min J H, Demchyshyn S, Sempionatto J R, Song Y, Hailegnaw B, Xu C H, Yang Y R, Solomon S, Putz C, Lehner L E, Schwarz J F, Schwarzingner C, Scharber M C, Sani E S, Kaltenbrunner M, Gao W 2023 *Nat Electron* **6** 630
- [5] Wang Z L 2012 *Adv Mater* **24** 280
- [6] Pecunia V, Occhipinti L G, Hoye R L Z 2021 *Adv Energy Mater* **11** 2100698
- [7] Yan B, Liu X S, Lu W B, Feng M J, Yan H J, Li Z B, Liu S C, Wang C, Hu J S,

- Xue D J 2022 *Sci Adv* **8** eadc9923
- [8] Polyzoidis C, Rogdakis K, Kymakis E 2021 *Adv Energy Mater* **11** 2101854
- [9] Chen X, Hu H Y, Zhou J C, Li Y, Wan L, Cheng Z, Chen J W, Xu J, Zhou R 2024 *Mater Today Energy* **44** 101621
- [10] Opoku H, Kim Y H, Lee J H, Ahn H, Lee J J, Baek S W, Jo J W 2021 *J Mater Chem A* **9** 15294
- [11] Cui Y, Wang Y M, Bergqvist J, Yao H F, Xu Y, Gao B W, Yang C Y, Zhang S Q, Inganäs O, Gao F, Hou J H 2019 *Nat Energy* **4** 768
- [12] Chen X, Shu X X, Zhou J C, Wan L, Xiao P, Fu Y C, Ye J Z, Huang Y T, Yan B, Xue D J, Chen T, Chen J J, Hoyer R L Z, Zhou R 2024 *Light-Sci Appl* **13** 281
- [13] Wu W T, Chen Z H, Chen Y X, Fei J Y, Xie Q, Dang W, Li Z Q, Wan L, Zhou R 2025 *Appl Phys Lett* **127** 083907
- [14] Freitag M, Teuscher J, Saygili Y, Zhang X, Giordano F, Liska P, Hua J, Zakeeruddin S M, Moser J E, Grätzel M, Hagfeldt A 2017 *Nat Photonics* **11** 372
- [15] Su X S, Chen H, Wan L, Yang X, Fang X, Zhang Y, Tong G Q, Chen J W, Xu J, Zhou R 2026 *ACS Appl Mater Inter* **18** 4033
- [16] Politi B, Parola S, Gademer A, Pegart D, Piquemil M, Foucaran A, Camara N 2021 *Sol Energy* **224** 3
- [17] Shockley W, Queisser H J 1961 *Journal of Applied Physics* **32** 510
- [18] Ho J K W, Yin H, So S K 2020 *J Mater Chem A* **8** 1717
- [19] Lübke D, Hartnagel P, Angona J, Kirchartz T 2021 *Adv Energy Mater* **11** 2101474
- [20] Peng Y H, Huq T N, Mei J J, Portilla L, Jagt R A, Occhipinti L G, MacManus-

- Driscoll J L, Hoye R L Z, Pecunia V 2021 *Adv Energy Mater* **11** 2002761
- [21] Guillemoles J F, Kirchartz T, Cahen D, Rau U 2019 *Nat Photonics* **13** 501
- [22] Yu L P, Zunger A 2012 *Phys Rev Lett* **108** 068701
- [23] Liu S, Yuan J, Deng W Y, Luo M, Xie Y, Liang Q B, Zou Y P, He Z C, Wu H B, Cao Y 2020 *Nat Photonics* **14** 300
- [24] Green M A 1982 *Solar cells* **7** 337
- [25] Nayak P K, Mahesh S, Snaith H J, Cahen D 2019 *Nat Rev Mater* **4** 269
- [26] Cui Y, Hong L, Hou J H 2020 *ACS Appl Mater Inter* **12** 38815
- [27] Venkateswararao A, Ho J K W, So S K, Liu S W, Wong K T 2020 *Mat Sci Eng R* **139** 100517
- [28] Cui Y, Hong L, Zhang T, Meng H F, Yan H, Gao F, Hou J H 2021 *Joule* **5** 1016
- [29] Hoye R L Z, Lee L C, Kurchin R C, Huq T N, Zhang K H L, Sponseller M, Nienhaus L, Brandt R E, Jean J, Polizzotti J A, Kursumovic A, Bawendi M G, Bulovic V, Stevanovic V, Buonassisi T, MacManus-Driscoll J L 2017 *Adv Mater* **29** 1702176
- [30] Kavanagh S R, Nielsen R S, Hansen J L, Davidsen R S, Hansen O, Samli A E, Vesborg P C K, Scanlon D O, Walsh A 2025 *Energ Environ Sci* **18** 4431
- [31] Ganose A M, Cuff M, Butler K T, Walsh A, Scanlon D O 2016 *Chem Mater* **28** 1980
- [32] Ganose A M, Savory C N, Scanlon D O 2017 *Chem Commun* **53** 20
- [33] Kirchartz T, Rau U 2017 *J Phys Chem Lett* **8** 1265
- [34] Kondrotas R, Chen C, Tang J 2018 *Joule* **2** 857

- [35] Tiwari D, Alibhai D, Fermin D J 2018 *ACS Energy Lett* **3** 1882
- [36] Peng Y H, Li F Z, Wang Y, Li Y C, Hoyer R L Z, Feng L R, Xia K, Pecunia V 2020 *Appl Mater Today* **19** 100637
- [37] Khazaei M, Sardashti K, Chung C C, Sun J P, Zhou H H, Bergmann E, Dunlap-Shohl W A, Han Q W, Hill I G, Jones J, Lupascu D C, Mitzi D B 2019 *J Mater Chem A* **7** 2095
- [38] Hebig J C, Kuhn I, Flohre J, Kirchartz T 2016 *ACS Energy Lett* **1** 309
- [39] Lan C F, Liang G X, Zhao S, Lan H B, Peng H X, Zhang D P, Sun H B, Luo J T, Fan P 2019 *Sol Energy* **177** 501
- [40] Phuyal D, Jain S M, Philippe B, Johansson M B, Pazoki M, Kullgren J, Kvashnina K O, Klintonberg M, Johansson E M J, Butorin S M, Karis O, Rensmo H 2018 *J Mater Chem A* **6** 9498
- [41] Li Z W, Kavanagh S R, Napari M, Palgrave R G, Abdi-Jalebi M, Andaji-Garmaroudi Z, Davies D W, Laitinen M, Julin J, Isaacs M A, Friend R H, Scanlon D O, Walsh A, Hoyer R L Z 2020 *J Mater Chem A* **8** 21780
- [42] Li F Z, Wang Y, Xia K, Hoyer R L Z, Pecunia V 2020 *J Mater Chem A* **8** 4396
- [43] Matsui T, Bidiville A, Maejima K, Sai H, Koida T, Suezaki T, Matsumoto M, Saito K, Yoshida I, Kondo M 2015 *Appl Phys Lett* **106** 054901

Evaluation of Theoretical Efficiency Limits for Indoor Photovoltaics Based on the Detailed Balance Principle*

DONG Longwen^{1) 2)} LI Yuan²⁾ [†] WEI Wenfei^{1) 2)} ZHOU Ru¹⁾ [†]

1) (School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

2) (School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

With the rapid development of low-power wireless sensors for the Internet of Things (IoT), the indoor photovoltaic (IPV) is emerging as a promising sustainable off-grid power supply technology to overcome the limitations of traditional battery-powered systems. Compared with the standard AM1.5G solar spectrum, indoor light sources, including white light emitting diodes (WLEDs) and fluorescent lamps (FLs), possess relatively narrow visible spectra (400–700 nm) and low illuminance (200–1000 lux), leading to distinct optimal bandgaps and theoretical efficiency limits for IPV applications. Moreover, existing studies in this field suffer from three notable limitations: firstly, most investigations adopt only one calculation method without systematic comparison of the underlying physical assumptions, deviation sources and applicable boundaries of different methodologies under a unified framework, leading to poor comparability among reported results; secondly, the quantitative influences of illuminance and correlated color temperature (CCT) on the optimal bandgaps and theoretical efficiency of IPV materials remain incompletely clarified, lacking quantitative guidelines for direct material screening; thirdly, most evaluations of the theoretical IPV performance of emerging lead-free photovoltaic materials in the literature lack a systematic database and performance bottleneck analysis to support targeted material development. To address these issues, this study evaluates the Shockley-Queisser (S-Q) theoretical efficiency limit and the spectroscopically limited maximum efficiency (SLME) based on the detailed balance principle. The spectral irradiances of typical WLED and FL light sources under various illuminance levels (200, 500, 1000 lux) and CCT values

(2700 K to 6500 K) were measured using a calibrated spectroradiometer, and further used as the spectral input for subsequent efficiency calculations. On this basis, the dependence of the theoretical efficiency limit on the semiconductor bandgap is systematically analyzed. It is revealed that the optimal bandgaps for IPV are 1.84 eV under 3000 K WLED illumination and 1.94 eV under 2700 K FL illumination, both higher than the 1.34 eV optimal bandgap under AM1.5G irradiation. The S-Q theoretical IPV efficiency limits reach 55.31% and 56.60% under 1000 lux 3000 K WLED and 2700 K FL indoor illuminations, respectively. The theoretical efficiency limit increases with the illumination intensity and tends to saturate at high illuminance levels. Moreover, for a given indoor light source, increasing CCT blue-shifts the emission spectrum and further results in the shift of the optimal bandgap to larger values. Based on the SLME method, we evaluate over 10 emerging lead-free materials for IPV applications. It is found that the absorbers of Se, Sb_2S_3 , and AgBiI_4 show relatively low optical absorption loss and non-radiative recombination loss, exhibiting great prospects for IPV applications. This work establishes a full-chain evaluation system from ideal thermodynamic limits to practical device performance, clarifies the applicable scenarios of different theoretical models, and quantifies the impacts of indoor light parameters on key performance indicators. The findings provide a systematic theoretical basis and quantitative tools for material screening and optimization, as well as IPV performance prediction, which are of great significance for promoting the large-scale application of IPV for self-powered IoT systems.

Keywords: Indoor photovoltaics, Detailed balance principle, Shockley-Queisser limit, Spectroscopically limited maximum efficiency

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52371219).

† Corresponding author. E-mail: liyuan@hfut.edu.cn; zhouru@hfut.edu.cn
The first author. E-mail: 2024111570@mail.hfut.edu.cn