

线偏振光电位移矢量振动方向对 InGaP/InGaAs/Ge 三结太阳能电池开路电压的影响*

肖文波[†] 何兴道 高益庆

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

(2011年8月29日收到; 2011年10月8日收到修改稿)

研究了线偏振光振动方向对 InGaP/InGaAs/Ge 三结太阳能电池开路电压的影响, 结果表明开路电压随线偏振光电位移矢量振动方向按周期性变化, 变化的幅度在 1%—4% 左右. 理论分析证实了线偏振光电位移矢量的调制可以改变太阳能电池的输出开路电压, 是由于三结太阳能电池晶体结构以及应力影响导致能带结构出现各向异性产生的. 此外, 实验结合理论分析, 研究了三结太阳能电池开路电压随光照度的变化关系, 得出开路电压随光强变化成对数关系. 拟合结果说明三结级联太阳能电池可以简单看成三个单结太阳能电池串联, 其理想因子接近 6, 是由于三结太阳能电池中缺陷影响的结果.

关键词: 三结太阳能电池, 线偏振光, 电位移矢量振动方向, 开路电压

PACS: 88.40.jj, 84.60.Jt

1 引言

随着经济发展, 能源需求越来越大. 能源储存量的有限问题促使人类去开发、寻找、应用新的替代能源. 在世界各国日益重视环境及可持续发展的今天, 自然会把目光投向太阳能的光电转换器件 - 太阳能电池的开发利用^[1,2]. 但是太阳能电池作为能源利用的光电转换器件存在热效应^[3]和漏电流^[4]等, 限制了其光电转换效率的提高. 因此, 充分利用太阳能电池材料和晶体结构各向异性, 讨论偏振光对太阳能电池性能的影响成为人们关注的一个方面. 目前, 实验证明了 s 波和 p 波照射下的太阳能电池光电流与偏振光的入射角度有关^[5], 偏振光入射角度使 Si 基 pn 结太阳能电池光电转换效率有明显差异^[6], 文献^[7]报道了 GaAs 基太阳能电池中存在偏振光相关电子复合与吸收. 此外, 由于多结太阳能电池的光电转换效率有望突破 50%^[8], 其光电性能引起了人们的广泛兴趣^[9-13]. 文献^[14]的研究表

明可以通过调制入射光电位移矢量振动方向提高三结太阳能电池中少数载流子的寿命^[14].

尽管目前的研究结果显示偏振光对于太阳能电池的光电转换效率有影响, 但是线偏振光对于三结太阳能电池性能的影响程度以及影响机制, 物理上还没有给出清晰的图像. 为此, 本文实验研究了线偏振光电位移矢量振动方向对 InGaP/InGaAs/Ge 三结太阳能电池开路电压的影响, 以及光强变化下的开路电压的特性, 并进行了理论分析. 研究结果阐明了偏振光对太阳能电池性能的影响机制, 以及三结级联太阳能电池可以简单看成三个单结太阳能电池串联. 本研究对于利用三结太阳能电池各向异性提高其光电转换效率具有重要意义.

2 实验装置、样品结构及测量方法

实验测量装置原理如图 1 所示. 银盛科技公司生产的 InGaP/InGaAs/Ge 三结太阳能电池放置在与

* 国家自然科学基金 (批准号: 10904059, 41066001, 61072131, 61177096)、航空科学基金 (批准号: 2010ZB56004)、江西省教育厅基金 (批准号: GJJ11176) 和无损检测技术教育部重点实验室开放基金 (批准号: ZD201029005) 资助的课题.

[†] E-mail: xiaowenbo1570@163.com

入射激光共轴位置. 太阳电池的样品结构如图 1(a) 所示, InGaP 子电池、InGaAs 子电池以及 Ge 子电池是利用金属有机化合物化学气相淀积 (MOVCD) 在 p 型 Ge 衬底上沿着 [110] 方向生长; 子电池的厚度分别约为 1, 3 和 2 μm . InGaP 子电池、InGaAs 子电池以及 Ge 子电池的光谱响应峰值大约在 660, 900 以及 1800 nm; 每两个子电池之间夹一层隧穿势垒, 势垒的厚度约为 0.03 μm . 整个电池片的尺寸为 2 mm \times 2 mm.

测量时为了激发所有子电池光伏响应, 且为了容易调制入射线偏振光, 一束 He-Ne (632.8 nm) 平行激光首先通过连续衰减片, 然后通过半反半透镜; 一半反射光进入探测器测量光强, 另外一半

透射光利用格兰泰勒棱镜起偏; 起偏后的一半光强线偏振激光垂直入射到太阳电池表面. 太阳电池固定在一个可以连续旋转的表盘上面 (如图 1(b) 所示), 实验测量时, 通过旋转表盘的角度来控制太阳电池与入射线偏振光电位移矢量振动方向的夹角, 即由于太阳电池旋转了, 而入射线偏振光电位移矢量振动方向没有改变, 所以太阳电池与线偏振光电位移矢量振动方向之间的夹角发生了改变. 实验过程中每隔 10 $^\circ$ 表盘测量太阳电池开路电压. 固定表盘方向, 改变入射 He-Ne 激光的强度, 测量太阳电池输出开路电压随光强的变化. 所有实验在室温暗室条件下完成, 且保证每次操作条件相同.

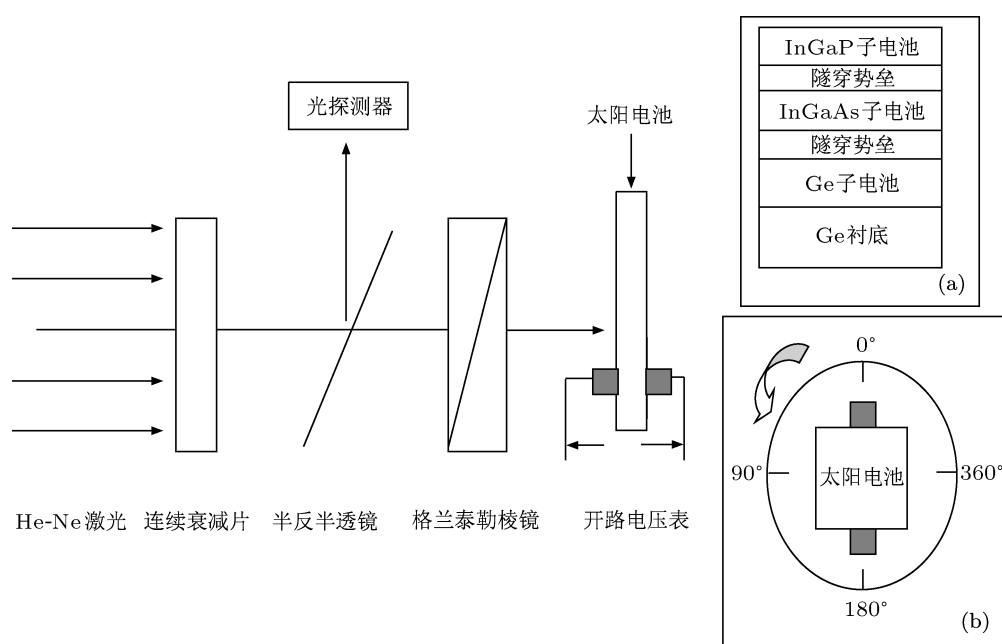


图 1 测量太阳电池开路电压随线偏振光电位移矢量振动方向变化的实验装置示意图 (a) 样品结构示意图; (b) 太阳电池安装以及测量过程示意图

3 实验结果及讨论

图 2 示出了激光照度在 19.6, 74.0, 130.3 和 154.1 lx 下, 开路电压 (V_{OC}) 随旋转角度 (θ) 变化的结果. 可以看出, 太阳电池经过 360 $^\circ$ 旋转时, 开路电压整体趋势按照周期性波形变化, 出现两个峰值与两个谷值, 峰 - 谷之间的变化强度在 1%—4% 左右. 两个峰值分别大约出现在 20 $^\circ$ 和 200 $^\circ$, 两个谷值分别出现在大约 110 $^\circ$ 和 290 $^\circ$; 峰 - 峰值 (谷 - 谷值) 之间相差的角度约为 180 $^\circ$. 值得注意的是, 在测

量过程中光的照度没有改变, 只是入射线偏振光的电位移矢量振动方向相对于太阳电池发生了变化. 换言之, 入射线偏振光电位移矢量振动方向的调制可以改变太阳电池的输出开路电压, 也即可以改变太阳电池的输出功率. 由此可知, 太阳电池输出效率与入射线偏振光的电位移矢量振动有一定的关系.

从图 1(a) 样品的结构可以看出, InGaP/InGaAs/Ge 三结太阳电池晶体结构以及应力影响导致能带结构出现各向异性, 其中线偏振

激光从价带激发到导带子带的电子跃迁矩阵元为

$$Q_{nn'}(k, \theta) = \frac{2}{m_0} |\hat{\varepsilon} \cdot P_{nn'}(k, \theta)|^2, \quad (1)$$

其中 $\hat{\varepsilon}$ 是光偏振方向上的单位矢量, $P_{nn'}(k, \theta)$ 是跃迁矩阵元, nn' 代表电子和空穴相应的态. 由此可以看出, 入射线偏振光电位移矢量振动方向影响电子跃迁概率. 跃迁概率与跃迁矩阵元绝对值平方成正比, 可知跃迁概率包括对称跃迁和非对称跃迁概率. 其中非对称跃迁概率 (I_A) 与旋转角度 (θ) 有以下近似关系 [15]:

$$I_A \sim \cos(2\theta), \quad (2)$$

所以, 非对称跃迁引起的太阳电池开路电压 (V_{OC}^A) 有如下近似关系:

$$V_{OC}^A \sim \cos(2\theta), \quad (3)$$

而太阳电池开路电压 (V_{OC}) 与总电子跃迁概率成正比, 所以

$$\begin{aligned} V_{OC} &= V_{OC}^N + V_{OC}^A \\ &= V_{OC}^N + B \cos(2\theta + C), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 V_{OC}^N 是对称跃迁引起的开路电压, B 是非对称跃迁引起的太阳电池开路电压, C 是相位移动常数.

实验结果发现, 开路电压随旋转角度出现两个峰值与两个谷值如 (4) 式所描述的关系, 根据 (4) 式拟合光照为 19.6, 74.0, 130.3 和 154.1 lx 下 V_{OC} 随 θ 的变化 (如图 2 中所示拟合曲线), 得到以下拟合参数:

$$V_{OC}^N \approx 1.46742 \pm 0.00185,$$

$$B \approx 0.01638 \pm 0.00289,$$

$$C \approx 184.6763 \pm 0.18572;$$

$$V_{OC}^N \approx 1.68587 \pm 0.00125,$$

$$B \approx 0.01028 \pm 0.00196,$$

$$C \approx 184.54568 \pm 0.19926;$$

$$V_{OC}^N \approx 1.75767 \pm 0.00041,$$

$$B \approx 0.00806 \pm 0.00064,$$

$$C \approx 184.8119 \pm 0.08439;$$

$$V_{OC}^N \approx 1.76025 \pm 0.00038,$$

$$B \approx 0.00742 \pm 0.00061,$$

$$C \approx 184.13812 \pm 0.08384.$$

从拟合可以看出, 结果符合得很好. 对称跃迁

引起的开路电压 V_{OC}^N 随光强的增加而增加, 而非对称跃迁引起的太阳电池开路电压 B 反而减弱. 原因可能是光强增加后, 对称跃迁概率增加, 所以相应开路电压增大. 但是当光强增加后, 三结太阳电池的热效应增强, 所以导致非对称跃迁概率减少, 对应开路电压下降. 从拟合的相位移动常数 C 几乎没有改变说明由于非对称跃迁引起的电子跃迁概率改变仅在固定的方向, 也即该三结太阳电池仅在入射线偏振光电位移矢量振动固定方向有显著的偏振相关性. 注意到开路电压的变化强度在 1%—4% 左右, 这比线偏振光激发样品后发射的荧光偏振相关性要小四个量级左右 [16]. 主要原因是光激发后产生的载流子电子除了受光学声子散射外, 还可能在输运过程有其他的准弹性散射使它们丧失其动量分布的方向性, 导致线偏振光照射下开路电压比荧光与偏振相关性要更弱.

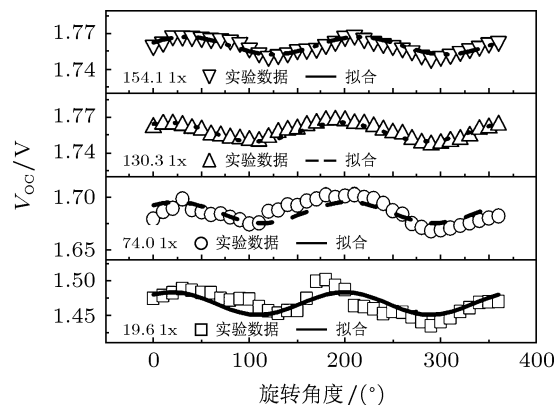


图 2 不同光照下太阳电池开路电压随旋转角度的变化

上述分析解释了三结太阳电池能带结构的各向异性对开路电压的影响, 那么各向异性表现最强烈的时候, 开路电压随光照度的变化趋势如何? 图 3 示出了固定表盘在 20° 和 110° 时, 输出开路电压随光照度的变化, 发现它们都不是简单的线性关系, 开路电压的上升呈坡度上升, 并且逐渐趋于饱和. 实际上, 光激发下的三结太阳电池可以简单地看成三个单结太阳电池串联系统 (如图 3 中插图), 所以其开路电压可简单表达如下 [10,17]:

$$V_{OC} = \frac{Ak_0T}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right), \quad (5)$$

式中, A 为与理想因子有关的常数, 由于单个太阳电池理想因子处于 1 到 2 之间, 所以这里对于三个单结太阳电池串联系统中应有 $3 < A < 6$; k_0

为 Boltzmann 常数, T 为室温绝对温度, q 是电子电量, I_{SC} 为短路电流, I_0 为饱和暗电流.

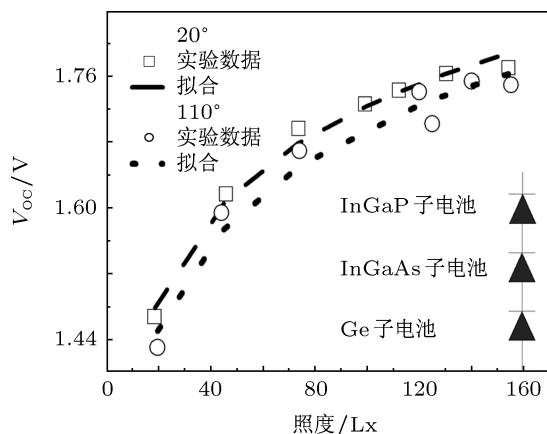


图3 固定表盘在 20° 和 110° 时, 太阳能电池开路电压随光照度的变化 插图是三结太阳能电池串联等效电路图

根据 (5) 式, 可知开路电压随短路电流成对数关系, 而短路电流与光照强度成正比; 所以开路电压随光强变化应是对数变化; 拟合实验结果 (如图 3 中拟合部分) 符合得很好. 且发现表盘在 20° 时 $A \approx 5.7541 \pm 0.2806$, 表盘在 110° 时 $A \approx 5.95741 \pm 0.48382$, 值的大小符合理论分析. 理想因

子都接近 6, 原因可能是三个单结太阳能电池串联系统中, 只要有一个 pn 结生长不好, 那么整个器件中缺陷会导致电子空穴复合增强, 漏电流增大, 从而三结太阳能电池的性能就接近于非理想二极管的性能 [18].

4 结论

本文实验研究了线偏振光电位移矢量振动方向与三结太阳能电池开路电压的关系, 并进行了理论分析; 太阳能电池开路电压随线偏振光电位移矢量振动方向整体趋势按照周期性变化, 出现两个峰值与两个谷值, 峰谷之间的变化强度在 1%—4% 左右. 峰 - 峰值 (谷 - 谷值) 之间相差的角度约为 180° . 理论证实入射线偏振光电位移矢量的调制之所以能够改变太阳能电池的输出开路电压, 是由于三结太阳能电池的晶体结构以及应力影响能带结构出现各向异性, 从而导致电子跃迁概率差别产生的. 发现三结太阳能电池开路电压随光照度的变化成对数关系, 拟合结果说明三结级联太阳能电池理想因子接近 6, 是由于三结太阳能电池中缺陷影响的结果.

- [1] Shah A, Torres P, Tschamer R, Wyrsh N, Keppner H 1999 *Science* **258** 692
- [2] Goetzberger A, Luther J, Willeke G 2002 *Solar Cells* **74** 1
- [3] Singh P, Singh S N, Lal M, Husain M 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 1611
- [4] Breitenstein O, Bauer J, Rakotoniaina J P 2007 *Semiconductors* **41** 440
- [5] Rud' V Yu, Rud' Yu V, Khvostikov V P 1999 *Semiconductors* **33** 689
- [6] Hagglund C, Zach M, Petersson G, Kasemo B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 053110
- [7] Žutić I, Fabian J, Sarma S D 2010 *Phys. Rev. B* **64** 121201(R)
- [8] Baur C, Bett A W, Dimroth F, Siefert G, Meusel M, Bensch W, Köstler W, Strobl G 2007 *J. Sol. Energy Eng.* **129** 258
- [9] Nishioka K, Takamoto T, Agui T, Kaneiwa M, Uraokac Y, Fuyuki T 2006 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90** 1308
- [10] Nishioka K, Sueto T, Uchida M, Ota Y 2010 *J. Electron. Mater.* **39** 704
- [11] Chen M B, Cui R Q, Wang L X, Zhang Z W, Lu J F, Chi W Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3632 (in Chinese) [陈鸣波, 崔容强, 王亮, 张忠卫, 陆剑峰, 池卫英 2004 物理学报 **53** 3632]
- [12] Liu L, Chen N F, Wang Y, Bai Y M, Cui M, Gao F B 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 16 (in Chinese) [刘磊, 陈诺夫, 汪宇, 白一鸣, 崔敏, 高福宝 2009 科学通报 **54** 16]
- [13] Zheng X X, Zhang X D, Yang S S, Wang G H, Xu S Z, Wei C C, Sun J, Geng X H, Xiong S Z, Zhao Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068801 (in Chinese) [郑新霞, 张晓丹, 杨素素, 王光红, 许盛之, 魏长春, 孙建, 耿新华, 熊绍珍, 赵颖 2011 物理学报 **60** 068801]
- [14] Xiao Y G, Li Z Q, Li Z M S 2008 *Proc. SPIE* **7043** 70430B
- [15] Xia J B, Zhu B F 1995 *Semiconductor Superlattice Physics* (Shanghai: Shanghai Science and Technology Press) pp427—432 (in Chinese) [夏建白, 朱邦芬 1995 半导体超晶格物理 (上海科学技术出版社) 第 427—432 页]
- [16] Huang K, Zhu B F 1991 *Chin. J. Semicond.* **12** 193 (in Chinese) [黄昆, 朱邦芬 1991 半导体学报 **12** 193]
- [17] Hu J M, Wu Y Y, Qian Y, Yang D Z, He S Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5051 (in Chinese) [胡建民, 吴宜勇, 钱勇, 杨德庄, 何世禹 2009 物理学报 **58** 5051]
- [18] Martíl I, Redondo E, Ojeda A 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 2442

Experimental investigation on open-circuit voltage of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell influenced by the vibration direction of the electric vector of linearly polarized light*

Xiao Wen-Bo[†] He Xing-Dao Gao Yi-Qing

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(Received 29 August 2011; revised manuscript received 8 October 2011)

Abstract

In this paper, it is investigated experimentally that the open-circuit voltage of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell is influenced by the vibration direction of the electric vector of linearly polarized light. The results show that those voltages are subjected to periodic changes with the vibration direction of the electric vector, and the magnitude of change is about 1%—4%. It is due to the effect of anisotropy of band structure in the three-junction solar cell, which is confirmed by theoretical analysis. In addition, through combining the experimental study with theoretical analysis, the relationship between open-circuit voltage and illumination, is studied, showing that they are related to each other logarithmically, which is different from characteristics of a single-junction solar cell. From fitting results, it is indicated that the triple-junction solar cells may be regarded as three diodes connected in series, of which the ideality factor is close to 6. This is due to many defects in three-junction solar cells.

Keywords: three-junction solar cell, linearly polarized light, the vibration direction of the electric vector, open-circuit voltage

PACS: 88.40.jj, 84.60.Jt

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10904059, 41066001, 61072131, 61177096), the Aeronautical Science Foundation of China (Grant No. 2010ZB56004), the Scientific Research Foundation of Jiangxi Provincial Department of Education, China (Grant No. GJJ11176), and the Open Fund of the Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, China (Grant No. ZD201029005).

[†] E-mail: xiaowenbo1570@163.com