光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022120601

光伏探测器响应非线性的机理分析

查　诚[1,2]，乔　辉[1,2*]，顾明剑[1,2]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 随着光伏探测器在傅里叶变换红外(FTIR)光谱探测领域的广泛应用，光伏型器件的响应非线性现象逐渐成为影响FTIR光谱反演精度的关键问题。文章对光伏探测器的响应非线性进行研究，首先，总结了光伏探测器的一般原理与等效电路；然后，对导致探测器出现响应非线性的内部效应与外部因素进行分析；最后，总结了内外因素之间的关联，并在结论中给出了对探测器进行非线性校正的工作方向。这对揭示半导体器件对不同通量辐射的响应规律、对于改善研究光伏探测器的非线性问题以及提高FTIR光谱探测精度具有重要的意义。

关键词： 光伏探测器；光电二极管；非线性响应；傅里叶红外

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0193－06

Mechanism Analysis of Photovoltaic Detector Response Nonlinearity

ZHA Cheng[1,2], QIAO Hui[1,2], GU Mingjian[1,2]

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In recent years, with the wide application of photovoltaic detectors in the field of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) detection, the nonlinear response of photovoltaic devices has increasingly become a key issue affecting the accuracy of FTIR spectroscopy inversion. Firstly, the general principle and equivalent circuit of the photovoltaic detector were summarized. Then, the internal effects and external factors leading to the nonlinear response of the detector were analyzed. Finally, the correlation between the internal and external factors was summarized, and the working direction of nonlinear correction of the detector was given in the conclusion. The nonlinear response of photovoltaic detectors was investigated in this paper. This is important for revealing the response law of semiconductor devices to different fluxes of radiation, for improving the study of nonlinearities in photovoltaic detectors, and for improving the accuracy of FTIR detection.

Key words: photovoltaic detector; photodiode; nonlinear response; Fourier infrared

0　引言

光伏型红外探测器具有良好的响应性能，可以实现高分辨率、宽谱段探测，在红外光谱学、红外天文学、气象学等遥感领域得到广泛的应用[1-3]。目前光伏型红外探测器主要有InGaAs，InSb，HgCdTe等几种类型[4]。光伏探测器的输出信号可以是光生电压和光生电流；其输出电流信号理论上正比于入射光通量，也被称为线性响应[5]，这样就可以在探测信号和入射辐射之间建立简单的线性对应关系。但在实际应用中经常会发现响应的非线性现象，尤其是针对入射信号光通量较大的应用。因此需要对光伏型红外探测器的响应非线性物理机理进行分析，并建立相应的模型以在实际应用中对器件的响应非

收稿日期：2022－12－06.

*通信作者：乔　辉　E-mail：qiaohui@mail.sitp.ac.cn

线性进行修正处理，这样对于入射信号动态范围较大的应用中就可以在响应信号和入射辐射之间建立正确的映射关系。

而对于高光谱探测来说，传统的探测仪，如滤光片探测仪或光栅分光探测仪，已经无法满足特定应用中的科学研究要求。而傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)具有高光谱分辨率和高光通量等优点，能较好地解决系统高探测灵敏度与高光谱分辨率之间的矛盾，目前已经成为各国高光谱探测发展的重点。光伏探测器由于具有比光导型器件更小的响应非线性，而成为高性能 FTIR 探测系统的首选，同时也使得光伏器件的响应非线性机理变得十分重要[6-7]。本文对于国内外就光伏型探测器响应非线性现象的研究进行了调研和总结，以对探测器进行非线性校正提供参考。

1 光伏探测器基本原理与等效电路

光伏探测器基于光生伏特效应原理，核心是存在内建电场可以对入射辐射产生响应的“结”，按“结”的种类不同，可分为 pn 结型、PIN 结型、异质结构和金属半导体结型等。

当光子能量大于禁带宽度的信号辐射入射到半导体中，吸收层价带顶的电子被入射光子激发跃迁到导带底，成为可移动的导带电子，价带则产生可移动的空穴。电子-空穴对在内建电场的作用下分离并迁移至不同的电极，被收集后在外电路产生光电流信号[8]。概括来说光伏探测器的工作过程大致可以分为以下三个部分：

(1)吸收层吸收入射光子，并产生电子-空穴对；

(2)电子-空穴对在内建电场作用下分离并迁移至不同电极；

(3)在外电路产生电流信号。

对于理想光伏探测器，可把光照下的 pn 结看做一个恒流源和理想二极管并联并且有一外负载。而实际存在将电池材料本身以及不可避免引入的附加电阻与漏电流、pn 结缺陷等其他缺陷造成的电阻用并联电阻 R_{sh} 来表示，这些缺陷可能会导致短路，虽然对短路电流基本没有影响，但是会导致开路电压降低，因此 R_{sh} 反映的是光伏组件电池片的漏电水平[9]。

光伏型探测器的等效电路如图 1 所示，其组成有二极管 D、光生电流 I_L、串联电阻 R_S 和并联电阻 R_{sh}。串联电阻 R_S 主要是电池自身电阻，加上连接电阻(包括柳线造成的横向电阻、导电银浆造成的电极电阻以及电极印刷和烧结造成的接触电阻等)；I_L 与光强成比例，I_D，I' 分别是流过二极管 D，并联电阻 R_{sh} 的电流，I_O，V_O 分别为 PV 型探测器输出的电流信号和电压信号，V_D 是二极管两端的电压。

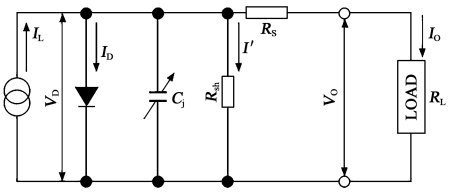


图 1 光电二极管的等效电路

使用上述等效电路，输出电流为：

$$I_O = I_L - I_D - I' = I_L - I_S\left(\exp\left(q\frac{V_D}{kT}\right)-1\right) - I' \tag{1}$$

而二极管电流 I_D 为：

$$I_D = I_{SC}\left[\exp\left(q\frac{V_O + I_{SC}R_S}{kT}\right)-1\right] \tag{2}$$

式中，I_{SC} 为光电二极管反向饱和电流，k 为玻尔兹曼常数，q 是电子电荷，T 是光电二极管的绝对温度。流过并联电阻的电流 I' 为：

$$I' = \frac{R_S I_O + V_O}{R_{sh}} \tag{3}$$

从以上等效电路来看，导致光伏器件出现响应非线性的原因可以从光伏器件内部以及外部的电路形态两方面进行分析[10]。

2 引起光伏探测器响应非线性的主要内部效应

2.1 空间电荷效应

空间电荷，也就是在半导体内部部分区域存在的剩余电荷。通过空间电荷区的电流主要是在空间电荷效应下的载流子漂移电流，决定了载流子密度再次影响到这个漂移电流大小的电场强度。此时的载流子密度，区域的电场强度，以及漂移电流是互相制约的[11]。

2018 年徐作冬等通过对光生载流子在中性区扩散过程及过量载流子输运时的结电场进行分析。研究认为在电场的作用下光生载流子能迅速从耗尽区漂移出去是光电探测器正常工作的前提。入射光功率越大，单位时间内产生的载流子就越多，理论上

不不能完全吸收，从而导致载流子积累并产生空间电荷效应。使本征域中的电场强度降低，抑制了载流子漂移出耗尽区的运动，因此造成输出非线性[12-13]。

2.2　碰撞电离效应与弗兰兹-凯尔迪什效应

2010 年，Hastings 等指出当载流子在光电二极管的耗尽区经历高电场（大于 100 kV/cm）时，发生碰撞电离，从电场中获得足够能量的载流子使相邻载流子电离，使探测器的非本征吸收系数小幅度增加（增益）[14]。其中相对高的偏置电压与薄的耗尽区相结合为碰撞电离创造了理想的条件，即光伏器件有时需要工作于外加偏压条件下，由此导致的强电场会对载流子运动进行加速使其获得足够高的能量，经过一系列的碰撞电离，产生电子-空穴对。通过多级这种运动会产生更多的电子-空穴对。

可以将电子和空穴产生速率写为[15]：

$$G_i=\alpha_n\frac{|J_n|}{q}+\alpha_p\frac{|J_p|}{q} \tag{4}$$

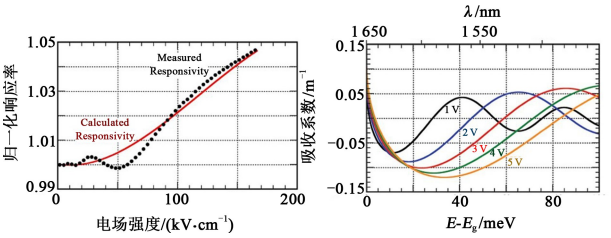
式中，α_n 和 α_p 分别是电子和空穴的碰撞电离系数，变量 J_n 和 J_p 是电子和空穴的电流密度，由下式给出：

$$J_n=qnv_n(E)+qD_n\nabla n \tag{5}$$

$$J_p=qpv_p(E)-qD_p\nabla p \tag{6}$$

在强电场和足够长的加速区的情况下，这种机制可能导致雪崩击穿。在 P-I-N 光电探测器中，由于电子太快离开加速区，加速长度太小，无法导致雪崩击穿。尽管如此，这种碰撞电离可以导致电子和空穴密度的显著增加，这会使探测器产生非线性的输出。

并且研究认为通过在弗兰兹-凯尔迪什效应和碰撞电离效应相互补偿的光谱区域中操作可以实现高线性，即碰撞电离和弗兰兹-凯尔迪什效应可以相互抵消[16]。所谓弗兰兹-凯尔迪什效应就是当入射光的光子能量接近吸收体的带边时，弗兰兹-凯尔迪什效应导致能量大于带隙的载流子跃迁概率发生振荡，并且由于在施加电场的情况下带隙以下的带弯曲，电子态隧穿到禁带中，半导体的光吸收变化的效应。图 2(a)，(b)分别是光探测器的响应度随电场强度的增大而增大，以及在某一确定入射光子能量下，吸收系数（响应度）随偏压的增大而减小的图像。因此，两种作用同时存在时，可以相互抵消，在某些波长上表现出相反的效应。结果表明，当对波长和偏置电压进行优化时，这两种效应可以相互补偿，并最小化光电二极管的非线性[17]。



(a) 响应度随电场强度的变化　(b) 吸收系数随光子能量的变化[17]

图 2　响应度、吸收系数随电场强度和光子能量的变化

2.3　非耗尽区的吸收

2011 年 Hastings 等研究发现，包括区吸收和吸收饱和也是引起输出电流非线性的重要原因[18]：

(1)在 p/n 掺杂区域中，存在与光电流成正比的小电场，这使得在耗尽区边缘产生的少数载流子漂移到耗尽区并贡献光电流。此外，在 p 区域产生的电子会比在 n 区域产生的空穴产生更大的影响。作为光生电流函数的一个效应，这将增加探测器的响应度，导致非线性。

(2)光电探测器的响应度受到吸收饱和的影响。耗尽区的光生载流子浓度会随着入射光功率的增加而向饱和点靠拢。在这个基础上光功率的提高并不会造成光电流的等量提高，材料的吸收率降低，引起响应度的降低。

光电探测器的电极和 p 区通常使用高掺杂的窄带材料来减少接触电阻。当辐射光强足够大时，非耗尽区也会产生光生载流子并漂移到耗尽区，在载流子足够长的寿命内影响总光电流。但这些载流子的速度普遍较慢，这就造成了探测器输出非线性。

2.4　串联电阻

由于 p 型欧姆接触的工艺并不完善，串联电阻较大，但同时发现，串联电阻约为零偏电阻的千分之一，其对响应率影响不大[19]。唐恒敬等根据 InGaAs 线列探测器在无光照情况下串联电阻 R_S 改变时获取的器件 I-V 曲线，分析随着串联电阻的减小，器件到达正向开启电压后电流 I 迅速上升；而串联电阻 R_S 在零偏压附近对 I-V 特性影响不大，串联电阻的作用可忽略。但由于串联电阻会增大零偏电阻，在有光照的情况下，信号电流开始有损失；而串联电阻越大，光电流损失越多。因此在器件制作过程中，应尽量减小接触电阻，减小光电流损失[20]。

2.5　探测器响应时间

一般认为光电二极管响应时间的影响因素有以

下几种：

(1)电阻电容(RC)时间常数：与二极管结特性及外部参数有关。

在有光照的情况下，光强越强，产生的电子-空穴对越多，PIN 的等效电阻越小，而两边的偏置电压不变，其势垒电容也不变，因此 RC 变小。另外，耗尽区内过剩载流子的极高浓度诱发结电容增大，也使得 RC 时间常数变大。

(2)从吸收区扩散到耗尽区的光生载流子运动的过程。

在远离本征区所产生的光生载流子由于没有外电场作用，要通过扩散才能到达外电极，而扩散时间通常比漂移时间长得多，因此严重限制了光电探测器工作速率，所以有必要详细讨论载流子扩散过程。

(3)光生载流子漂移穿过耗尽区的渡越时间。

一般 PN 结势垒区较薄，可以忽略载流子在势垒区的渡越时间影响。但对于 PIN 光电二极管中的 PIN 结来说，由于势垒区较大，就需要考虑在渡越势垒区的过程中所延迟的时间。而光强增强的过程，光生载流子的漂移速度不变，但数量增多，可以更容易的使光电二极管导通，因此响应时间变短。

3 引起光伏探测器响应非线性的主要外部效应

3.1 外部负载

当在暗状态下向光电二极管施加电压时，观察到的电流与电压特性类似于传统整流二极管的曲线，如图 3 所示。然而，当光线照射到光电二极管时，曲线由①切换到②。而且，增加入射光量会使该特性曲线进一步移动到位置③。同时，根据入射光强度。至于②和③，如果光电二极管端子短路，光电流 I_{SC} 或与光强成比例的 I_{SC} 将从阳极流向阴极。如果电路开路，将产生开路电压 V_{OC}，正极性位于阳极。开路电压 V_{OC} 是 $I_O=0$ 时的输出电压。因此 V_{OC} 为：

$$V_{OC}=\frac{kT}{e}\ln\left(\frac{I_L-I'}{I_S}+1\right) \tag{7}$$

由于 R_S 是几欧姆，R_{sh} 是 $10^7\sim10^{11}$ 欧姆，所以一般 I'可以忽略不计，因为 I_S 相对于环境温度呈指数增长，V_{OC} 与环境温度成反比，与 I_L 的对数成正比。然而，这种关系并不适用于非常低的光照水平。

短路电流 I_{SC} 为负载电阻，V_O 均为 0 时的输出电流，有：

$$I_{SC}=I_L-I_D-I'=I_L-I_{SC}\left[\exp\left(q\frac{I_{SC}R_S}{kT}\right)-1\right]-\frac{R_SI_{SC}}{R_{sh}} \tag{8}$$

在上述关系中，第 2 项和第 3 项限制了 I_{SC} 的线性。由于 R_S 一般是几欧姆，R_{sh} 一般是 $10^7\sim10^{11}$ 欧姆，这些项在相当大的范围内可以忽略不计。在一般情况下可以认为短路电流 I_{SC} 与光照功率成线性关系，即 $I_{SC}=-I_p=-S\cdot P$ (S 为光电池灵敏度)。

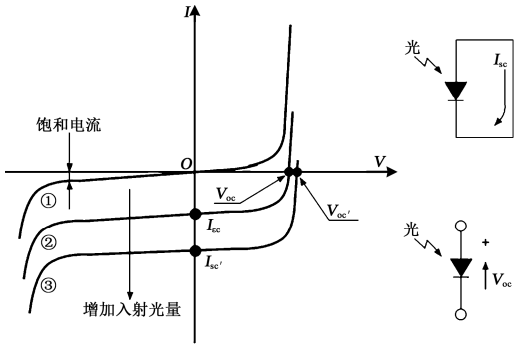


图 3 光电二极管电流电压特性

推导的结果是短路电流 I_{SC} 与辐射强度 P 成线性关系，这是理想情况下，而实际上肯定有负载。对应在 I-V 图上就是随着辐射强度的增大，工作点并非沿着 $-y$ 轴下移，而是在与负载曲线的交点上。从伏安特性曲线上来看就是对应工作点处于不平缓的区域，如图 4。

可以考虑对光伏探测器加低噪声反向偏置电压 V_R(低噪小电压)，如图 4。由于第三象限区的 I-V 曲线相对平缓，可认为其输出是近似线性的。

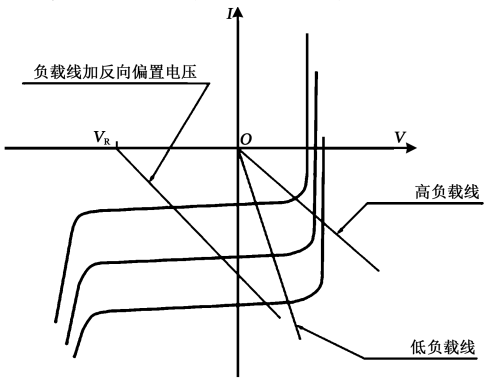


图 4 电流电压特性和负载线

3.2 电容效应

结电容(C_j)是光电二极管的一个重要性质，对光电二极管的带宽和响应有很大影响。在反向偏压应用中，结的耗尽区宽度增加，会有效地减小结电

容，增大响应速度。光电二极管耗尽区电容越大，二极管响应就越慢。为达到最优响应，一般要综合考虑探测器的吸收层厚度和光电探测器的面积。增大探测器材料的吸收层厚度可以有效减小耗尽区电容并提高探测器的量子效率。但是吸收层厚度的增加会导致耗尽区宽度的变大，光生载流子渡越时间变长，因此对探测器的响应速度有负面影响。

3.3　器件工作环境温度升高导致的热效应

投入实用的探测器一般都有比较完整的制冷措施，因此被讨论的并不多。基本只有室温下的 pn 结型探测器对此进行讨论[21-23]。具体表现为温度升高导致本征载流子浓度增大，从而导致探测器暗电流增大，pn 结势垒降低对内建电场造成影响，丧失分离电子-空穴对的能力所致。

3.4　主要内外效应关联

2018 年，徐晓慧等总结了一些非线性影响因素，以及一些主要内部效应与外部参数之间的关系如图 5 所示[24]。

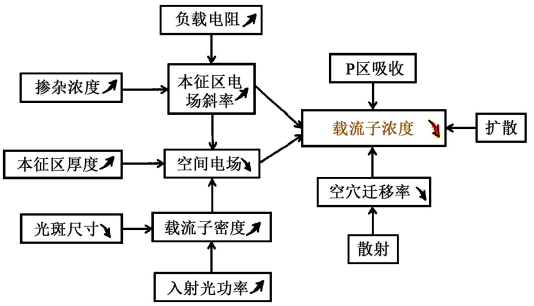


图 5　引起光探测器非线性的内部效应与外部参数之间的关系图[24]

几乎所有的因素都是直接或间接影响载流子速度从而最终引起探测器输出的非线性。也有特殊的情况如碰撞电离，通过影响载流子的数量引起光探测器输出光电流的非线性。

4　结束语

随着光电探测技术的发展，探测器的响应规律在制备高性能抗干扰探测器方面有了重要价值，而由于高性能光伏探测器在 FTIR 中的重要应用，这使得光伏器件的响应机理与性能提升引起了越来越多的关注。为促进探测器精度的发展，国内外研究者对内外等多个因素进行了深入探索。研究结果有助于理解光伏探测器响应过程，在分析光伏探测器非线性机制的同时，研究者们也提出了一些改善非线性的可行方案。如：①对具有外部反向偏置电压的光伏探测器根据外部负载的实际情况设计添加反向偏压的电路，使其保持更好的线性关系；②利用不同的非线性影响因素之间的制约关系进行抵消的方案；③对掺杂浓度、电容效应这些固有的因素进行调整以改进探测器响应性能的研究等。本文主要总结了光伏探测器响应性能的非线性变化规律。尽管在非线性响应的研究上取得了不少进展，但仍旧存在着挑战。如何在内部因素与外部参数上进行改良以满足应用的需求，还需要更深入细致的研究。

参考文献：

[1]　罗和昊. 基于 N 型硅肖特基结自供电窄带光电探测器的研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2020.
Luo Hehao. Self-powered narrowband photodetector based on N-type silicon Schottky junction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.

[2]　Hocine L, Samira K M, Tarek M, et al. Automatic detection of faults in a photovoltaic power plant based on the observation of degradation indicators[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 603-617.

[3]　Alam M K, Khan F H, Johnson J, et al. PV faults: Overview, modeling, prevention and detection techniques[C]// IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2013: 1-7.

[4]　褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京：科学出版社，2005.
Chu Junhao. Physics of Narrow Gap Semiconductor[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[5]　George T, Dutta A K, Islam M S, et al. Detector response to high repetition rate ultra-short laser pulses. I[J]. Proc. SPIE, 2015, 9467: 946726.1-946726.7.

[6]　张书魁. 二维半导体光电探测性能增强机理与器件研究[D]. 上海：中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所)，2021.
Zhang Shukui. Research on enhancement mechanism and devices of two-dimensional semiconductor optoelectronic detection[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021.

[7]　江　天，程湘爱，郑　鑫，等. 光伏碲镉汞探测器在波段内连续激光辐照下的非线性响应机理研究[J]. 物理学报，2012，61(13)：416-424.
Jiang Tian, Cheng Xiangai, Zheng Xin, et al. Study on the nonlinear response mechanism of photovoltaic mercury cadmium telluride detector under continuous laser irradiation in band[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 416-424.

[8]　黄军意. 光伏型自驱动光伏探测器性能的研究[D]. 河南：河南大学，2022.
Huang Junyi. Study on the performance of photovoltaic self-actuated photovoltaic detector[D]. Henan: Henan University,

2022.

[9] Madeti S R, Singh S N. Modeling of PV system based on experimental data for fault detection using kNN method[J]. Solar Energy, 2018, 173: 139-151.

[10] Deng S, Xu R, Li M, et al. Influences of surface charges and gap width between p-type and n-type semiconductors on charge pumping[J]. Nano Energy, 2020, 78: 105287.

[11] Zhou X J, Wannberg B, Yang W L, et al. Space charge effect and mirror charge effect in photoemission spectroscopy [J]. J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2005, 142(1): 27-38.

[12] 徐作冬，张检民，林新伟，等. 纳秒激光辐照下 HgCdTe 光伏探测的瞬态响应特性退化[J]. 红外与激光工程，2018，47(1)：0106001.
Xu Zuodong, Zhang Jianmin, Lin Xinwei, et al. Degradation of transient response characteristics of HgCdTe photovoltaic detection under isonanosecond laser irradiation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0106001.

[13] Chen G, Tanaka Y, Takada T, et al. Effect of polyethylene interface on space charge formation [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 113-121.

[14] Hastings A S, Tulchinsky D A, Williams K J, et al. Minimizing photodiode nonlinearities by compensating voltage-dependent responsivity effects[J]. J. of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3329-3333.

[15] Hu Y, Marks B S, Menyuk C R, et al. Modeling sources of nonlinearity in a simple p-i-n photodetector [J]. J. of Lightwave Technol., 2014, 32(20): 3710-3720.

[16] Godinez M E, McDermitt C S, Hastings A S, et al. RF characterization of zero-biased photodiodes [J]. J. of Lightwave Technol., 2008, 26(24): 3829-3834.

[17] Draa M N, Hastings A S, Williams K J. Comparison of photodiode nonlinearity measurement systems [J]. Opt. Express, 2011, 19(13): 12635-12645.

[18] Hastings A S, Tulchinsky D A, Williams K J. Photodetector nonlinearities due to voltage-dependent responsivity [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(21): 1642-1644.

[19] 唐恒敬，吴小利，张可锋，等. InGaAs 线列探测器的 *I-V* 特性研究[J]. 红外与激光工程，2008，37(4)：598-601.
Tang Hengjing, Wu Xiaoli, Zhang Kefeng, et al. Current-voltage characteristics of InGaAs linear detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 598-601.

[20] 张理嫩，刘 超，崔利杰，等. 硅基Ⅱ-Ⅵ族单结及多结太阳电池研究进展[J]. 半导体技术，2014，39(4)：241-247.
Zhang Linen, Liu Chao, Cui Lijie, et al. Research progress of silicon-based group Ⅱ-Ⅵ single-junction and multi-junction solar cells[J]. Semiconductor Technol., 2014, 39(4): 241-247.

[21] 马丽芹，陆启生，程湘爱，等. 激光辐照光电探测器的非线性效应[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版)，2003，24(1)：87-90.
Ma Liqin, Lu Qisheng, Cheng Xiangai, et al. Nonlinear effects of photoelectric detectors under laser irradiation [J]. J. of Qingdao University of Science and Technology (Natutral Science Edition), 2003, 24(1): 87-90.

[22] 江 天. 单元光电探测器在连续激光辐照下的响应机理研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2012.
Jiang Tian. Study on response mechanism of unit photodetector under continuous laser irradiation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.

[23] 马丽芹，陆启生，杜少军. 光伏型光电探测器漂移-扩散模型的改进[J]. 半导体光电，2006，27(4)：399-401.
Ma Liqin, Lu Qisheng, Du Shaojun. Improvement on drift-diffusion model for photovoltaic detectors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(4): 399-401.

[24] 徐晓慧. 光探测器非线性的物理成因与相关 RoF 调制技术[D]. 北京：北京邮电大学，2019.
Xu Xiaohui. Physical causes of nonlinearity of optical detectors and related RoF modulation techniques[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.

作者简介：

查 诚(1999—)，女，安徽省安庆市人，主要研究方向为光电信号获取与处理技术；

乔 辉(1979—)，男，山东省莱阳市人，研究员，博士生导师，主要从事光电材料与器件方向的研究。