

# 石墨烯与典型光导型光电探测器读出电路的对比研究

韩 钦<sup>1,2</sup>, 高恺聪<sup>1</sup>, 任思伟<sup>3</sup>, 伍 俊<sup>1</sup>, 江 英<sup>4</sup>, 赵瑞光<sup>1</sup>, 申 钧<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 4. 78092 部队, 四川 成都 610000)

**摘要:** 石墨烯光电探测器具有兼容性好和宽波段响应等优势, 其读出电路可类似于微测辐射热计等传统探测器。然而, 石墨烯光电探测器一般属于光子型, 其响应度、功耗和积分时间等具有显著差异。针对纯石墨烯、石墨烯-硫化铅异质结、硫化铅和典型微测辐射热计 4 种探测器, 结合实测器件参数, 进行读出电路的对比研究。仿真结果表明: 由于其较高的响应度, 实现相同的输出电压, 石墨烯-硫化铅异质结探测器所需的积分时间最少, 更利于高帧频应用。另一方面, 与微测辐射热计相比, 石墨烯探测器具有较高的功耗, 而分析表明合理的器件结构设计可有效减小功耗。本文的研究工作可为二维材料等新型光电探测器的读出电路选择和参数设计提供参考。

**关键词:** 石墨烯; 光电导效应; 读出电路; 光电探测器

中图分类号: TN15 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)02-0123-06

## Comparative Study on Readout Circuit for Graphene and Typical Photoconductors Photodetectors

HAN Qin<sup>1,2</sup>, GAO Kaicong<sup>1</sup>, REN Siwei<sup>3</sup>, WU Jun<sup>1</sup>, JIANG Ying<sup>4</sup>, ZHAO Ruiguang<sup>1</sup>, SHEN Jun<sup>1,2</sup>

(1. *Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chongqing 400714, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;* 4. *78092 Army, Chengdu 610000, China*)

**Abstract:** Graphene-based photodetectors have the advantages of good compatibility and wide-band response, and their readout circuits are similar to traditional detectors such as bolometers. However, graphene photodetectors are generally photon types whose responsivity, power consumption, and integration time are significantly different. Here, the readout circuits of pure graphene, graphene-lead sulfide heterostructure, lead sulfide, and typical bolometer combined with the measured device parameters are studied. Simulation results show that because of its high responsivity, when the same output voltage is achieved, the integration time of the graphene-lead sulfide heterostructure detector is the lowest, which is more conducive to high-frame-rate applications. However, compared with the bolometer, the graphene detector has a higher power consumption, and the analysis shows that a reasonable device structure design can effectively reduce the power consumption. This study can provide a reference in the selection of the readout circuit and parameter design of a new type of two-dimensional material photodetector.

**Key words:** graphene, photoconductive effect, readout circuit, photodetector

## 0 引言

红外探测技术因其“全天候”、“非接触式”、“穿透性强”等优点受到世界各国的重视, 在各个领域有

广泛的应用场景。如军事领域中利用红外成像技术进行制导、夜间作战、辨别伪装<sup>[1]</sup>; 民用领域中的无人驾驶、无接触测温; 工业领域中的故障诊断等<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2021-03-16; 修订日期: 2021-04-27.

作者简介: 韩钦 (1996-), 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要研究方向为光电探测器系统集成。E-mail: hanqin19@mails.ucas.ac.cn.

通信作者: 申钧 (1984-), 男, 重庆人, 研究员, 博士, 主要研究方向为石墨烯光电探测器、射频电子器件及忆阻器件。E-mail: shenjun@cigit.ac.cn.

基金项目: 国家自然科学基金 (61705229), 中科院青年创新促进会 (2018416)。

传统材料的红外探测器，以碲镉汞、铟镓砷<sup>[3]</sup>、锑化铟等为代表，主导了短波红外、中波红外和长波红外的探测，并且有着暗电流低、响应速度快和量子效率高的优势，但是与互补金属氧化物半导体（complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS）工艺线不兼容，材料生长以及器件制作工艺较复杂，且部分器件还需要低温工作，使得其应用领域受到一定的限制<sup>[4]</sup>。基于硅材料的光电探测器虽然已经可以很好地与 CMOS 技术集成，并在 0.4~1.1 μm 波段探测中占据主要地位<sup>[5]</sup>，但由于硅材料自身的带隙限制，较难用于更广泛的红外波段。

基于石墨烯的光电探测器具有宽波段响应、非制冷工作、成本较低、与 CMOS 兼容等前景，有望弥补传统材料的不足<sup>[6]</sup>。石墨烯光电探测器的研究最早基于光伏型，但是较低的光响应度限制了其进一步发展。通过将石墨烯与其他材料复合形成异质结，光导型石墨烯光电探测器近年来取得了较大的进展，光诱导局域场效应是其重要发现之一。光诱导局域场效应是指利用光生载流子在电荷势阱处的累积产生电势，并由此产生类栅压效果，来调整沟道中载流子浓度的现象。因为石墨烯有着大比表面积以及低态密度的特点，使得其费米能级易受外部电场调控<sup>[7-8]</sup>，光诱导局域场效应可以在保证探测器响应度较高的情况下，大幅度降低暗电流。

目前，石墨烯光电探测器大多为光电导型，相较于光伏型探测器可以自起电，无需外在偏置电压，光电导型探测器必须依靠外在电源才能工作。就器件电学模型而言，石墨烯材料在光照条件下，电子与空穴分离，空穴进入石墨烯，改变石墨烯的电阻值<sup>[9]</sup>，与工作于长波红外的微测辐射热计类似，都可以等效成光敏电阻。然而石墨烯光电探测器是光子型探测器，其光致电阻变化率远大于微测辐射热计等。因此对石墨烯光电探测器读出电路的研究有助于其更大范围的应用。

本文在对纯石墨烯、微测辐射热计、硫化铅、石墨烯-硫化铅异质结材料积分电路仿真对比的基础上，也仿真了电路参数对石墨烯-硫化铅异质结光电探测器的影响，同时也对其阵列探测器进行了设计与讨论。

## 1 电学参数测量与输入单元选择

### 1.1 电学参数测量

石墨烯由单层碳原子组成，具有二维平面结构，原子之间依靠共价键连接起来。由于单层石墨烯很

薄，本征光吸收只有 2.3%，相比于其他光电材料其光吸收率较低<sup>[10]</sup>。但石墨烯具有独特的零带隙能带结构，其内部电子跃迁很容易被外部的光子所激发。因此，以石墨烯为材料的光电探测器具有非常宽的响应范围，包括紫外波段、可见光波段以及红外波段<sup>[11]</sup>。纯石墨烯材料的阻值根据经验值为 1 kΩ 左右，在光照条件下，阻值变化率小于 1%。在 5 V 偏置电压下，暗电流为 5 mA，净光响应电流最大为 5 μA。

微测辐射热计具有非常小的热容量和大电阻温度系数，在光照条件下吸收辐射，其阻值会发生变化。微测辐射热计是目前应用范围最广的红外探测器，阻值在 120 kΩ 左右，在光照条件下，阻值变化率小于 2%<sup>[12]</sup>。在 5 V 的偏置电压下，暗电流为 41.67 μA，净光响应电流小于 0.08 μA。

硫化铅是直接带隙窄禁带的半导体材料，室温下，其能带间隙约为 0.4 eV，对近红外辐射比较敏感<sup>[13]</sup>，其工作波段为 1~3 μm，即使在室温下硫化铅材料也具有较好的灵敏度，无需在探测器上运行制冷设备。硫化铅光电探测器在军事和民用方面都有着广泛的运用。

图 1(a)为在施加 20 V 偏置电压情况下，用波长 1550 nm、最大功率为 5 mW 的激光照射在 100 μm × 60 μm 硫化铅薄膜材料上得到的电流与时间曲线。从图 1(a)可以看出，硫化铅薄膜材料的暗电流为 24.49 μA，随着光功率的变化，电流最高为 28.18 μA。易得最大净光响应电流为 3.69 μA，硫化铅材料的阻值变化范围为 709.72~816.66 kΩ，其光致电阻变化范围为 13.09%。

石墨烯材料低光吸收、零带隙结构的特点，对探测器的响应度有较大影响。通过将石墨烯与硫化铅复合，利用光诱导局域场效应，既能保持石墨烯载流子传输能力强的优点，也能增强其对光的吸收能力<sup>[14]</sup>。图 1(b)是在 5 V 偏置电压下，用波长 1550 nm，最大功率 5 mW 的激光照射在 100 μm × 100 μm 的石墨烯-硫化铅异质结上得到的电流与时间曲线。从图 1(b)可以看出，石墨烯-硫化铅异质结的暗电流为 3.65 mA，随着光功率的变化，电流最高为 3.87 mA。易得最大净光电流为 0.22 mA，阻值变化范围在 1.29~1.37 kΩ，其光致电阻变化范围为 5.84%。

### 1.2 输入单元选择

读出电路输入单元需要将探测器产生的微弱电流信号转化成电压信号，不同结构的输入单元对探测器的成像效果具有很大影响。伴源级跟随器结构的输

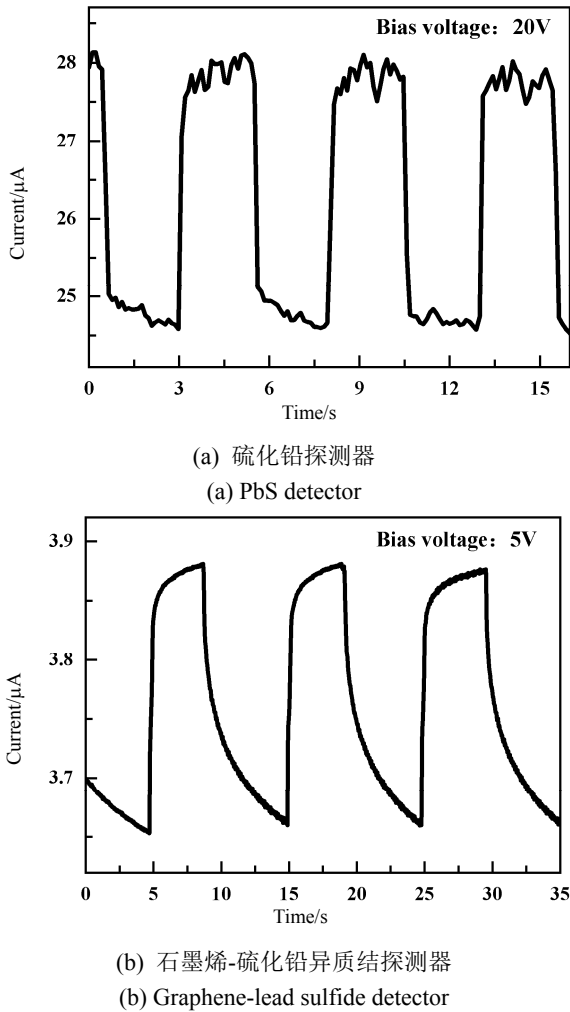


图1 两种探测器在激光照射下的电流曲线

Fig.1 Current curves of two detectors under laser irradiation

入单元虽然具有噪声极低的特点,但是电荷容量较低、响应非线性以及在极低背景条件下才能工作良好的特性限制了其在石墨烯探测方面的应用。与伴源极跟随器结构不同,直接注入结构适合在中、高背景中应用,但在低阻抗器件以及低背景应用中的注入效率较低,而石墨烯探测器的阻抗较小,因此直接注入结构同样不适合用于石墨烯探测器。电容反馈跨阻放大的结构在各个方面有着广泛的应用,输入电流通过电容转换为输出电压,其积分节点偏置稳定,响应信号与输入电流及积分时间有非常好的线性关系,在实际应用中,对暗电流加以控制,可以获得很大的动态范围。又因为石墨烯光电探测器与微测辐射热计都属于光导型探测器,区别于铟镓砷二极管等光伏型探测器。以石墨烯-硫化铅异质结探测器为例,其阻抗为  $1.37\text{ k}\Omega$ ,光致电阻变化率为  $5.84\%$ 。而典型的微测辐射热计的阻抗为  $120\text{ k}\Omega$ ,其光照下的电阻变化率一般为  $2\%$ 。所以,从阻抗和光致电阻变化的角度,石墨烯探测器可以采用类似微测辐射热计的输入级电路。

同时,石墨烯探测器的净光电流较大,输出信号需要较好的线性度。因此,电容反馈跨阻放大的结构最适合用来作为石墨烯探测器的输入单元。至于石墨烯探测器较大的暗电流,可通过偏置电路设计,抵消其对输入电流的影响,具体输入电路如图2所示。

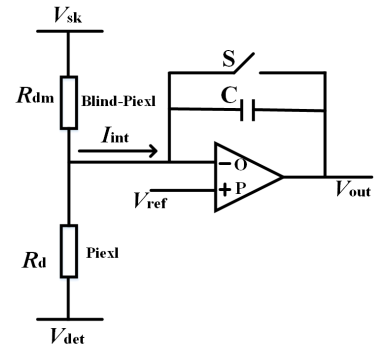


图2 基于电容反馈跨阻放大的积分电路

Fig.2 Integral circuit based on CTIA

通过电路偏置电压与匹配电阻的设置,产生与暗电流大小相等,方向相反的电流,即可确保在无光条件下输入的积分电流为0,消除暗电流对积分电路的影响。一般情况下电路参数设置为  $V_{sk} - V_{ref} = V_{ref} - V_{det}$ ,  $R_{dm} = R_d$ 。

## 2 积分电路仿真研究

### 2.1 不同探测器材料的对比仿真研究

基于电学参数测量的数据,对电容反馈跨阻放大电路使用 multisim 进行仿真,记录各材料输出电压与积分时间的关系。仿真模型所用的参数如下:

$V_{sk} = 7\text{ V}$ 、 $V_{ref} = 4\text{ V}$ 、 $V_{det} = 1\text{ V}$ ,积分电容值为  $500\text{ fF}$ ,运算放大器正向饱和电压设置为  $5\text{ V}$ ,反相饱和电压为  $3\text{ V}$ ,运算放大器视为理想运放。

图3(a)~(d)为运放输出电压与积分时间关系曲线。从仿真结果中可以看出,阻值大小及其光致电阻变化率对输出电压与积分时间有较大的影响。石墨烯-硫化铅异质结材料阻值小,且光致电阻变化率较大,因此其电压上升速率最快,达到饱和电压所需最短时间小于  $5\text{ ns}$ ;纯石墨烯材料阻值比石墨烯-硫化铅异质复合材料阻值小,但由于光致电阻变化率较小,其最快达到饱和电压需要的积分时间在  $180\text{ ns}$  左右;微测辐射热计的阻值很大,且光致电阻变化率小,因此达到饱和电压所需积分时间最长,往往超过  $10\text{ }\mu\text{s}$ ;硫化铅薄膜的光致电阻变化范围最大,但在相同的读出电路参数下,无法弥补其阻值太大导致积分电流小的影响,因此相较于石墨烯-硫化铅异质结材料依然有较大

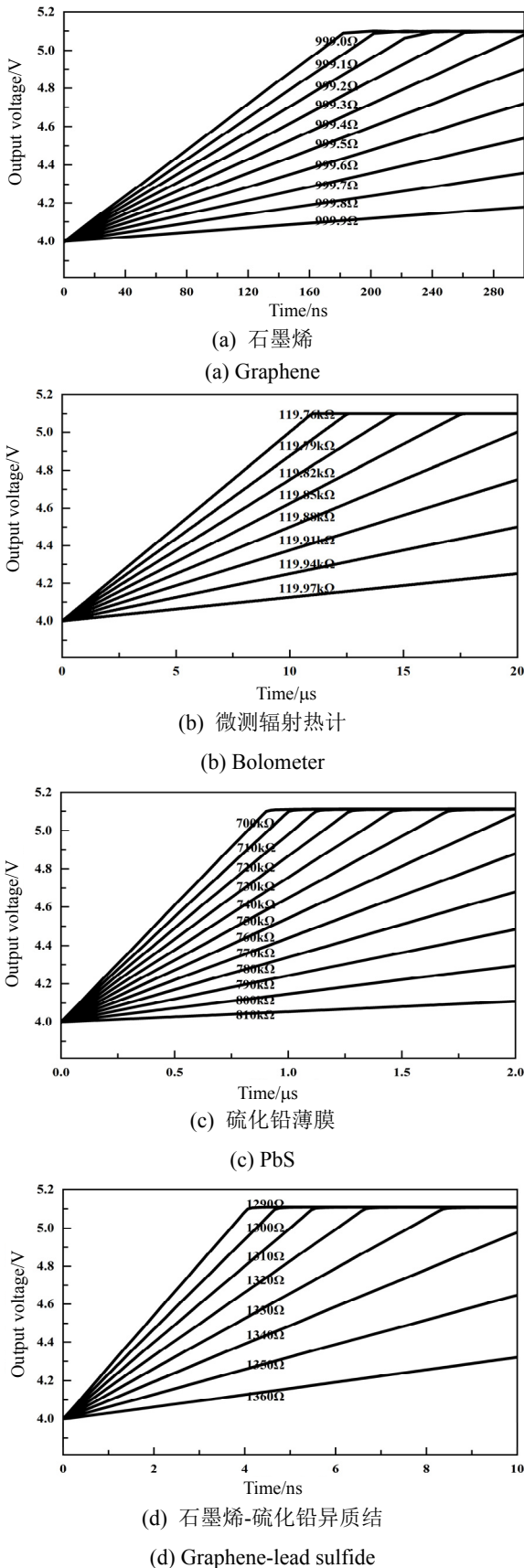


图3 各材料输出电压曲线

Fig.3 Output voltage curves of each material

差距。从仿真结果可以看出,石墨烯-硫化铅异质结材料在高速探测方面的巨大潜力。在达到相同探测效果的前提下,其探测速率是其他材料探测器的30~2000倍。同时验证了电容反馈跨导放大结构的输入级其积分电压与积分时间在正常工作范围内具有良好的线性关系。

### 2.2 电路参数改变仿真情况

基于电容反馈跨导放大的电路测量光电响应时,需要设置偏置电压、积分时间以及匹配电阻的值,任意一个电路参数的改变都会影响光电探测的效果。故对石墨烯-硫化铅异质结探测器读出电路各参数变化情况进行仿真,记录输出电压与积分时间的关系。

在保持参考电压  $V_{ref}=4V$  不变的情况下,改变  $V_{sk}$  与  $V_{det}$  的值,保持  $V_{sk}-V_{ref}=V_{ref}-V_{det}$ 。图4为  $V_{sk}-V_{ref}$  值变化时的仿真结果,从仿真结果中可以看出探测器两端压差越大,其电压上升率越快。因此,在器件允许的电压范围内,适当地调整偏置电压的值,可以改变探测速率。

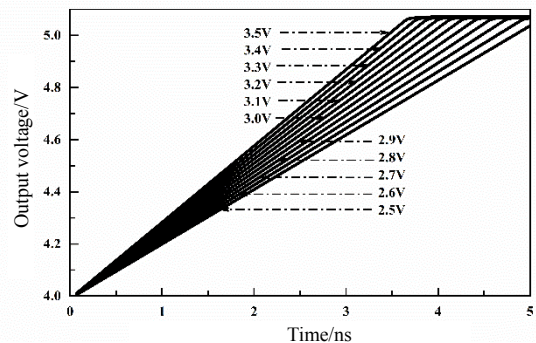


图4 偏置电压变化情况下输出电压曲线

Fig.4 Output voltage curves under bias voltage variation

从前文电容反馈跨导放大电路的设计可知,匹配电阻值的选定等于探测器在无光条件下的阻值。若匹配电阻的阻值较大,其积分电压输出与像元在光照情况下阻值减小时电压输出情况相似。若匹配电阻值较小,则积分电压就会不断减小。图5为匹配电阻较小时积分电压输出曲线。同时,若匹配电阻的值在探测器阻值变化范围内,则在光强较弱时,积分电压减小;光强增强时,像元阻值减小至匹配电阻值以下,此时积分电压会增加,整体积分电压会呈现先下降再上升的趋势。



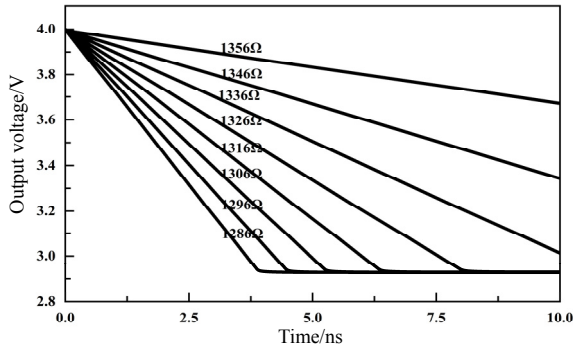


图5 匹配电阻小情况下输出电压曲线

探测器积分时间的设定,对探测速度和效果有直接的关系,图6为不同积分时间设置时的积分电压输出曲线。积分时间短(1.5 ns),输出的电压值较小,影响探测效果。积分时间较长(5.5 ns),则会影响探测速率。需要根据工作要求设定适合的积分时间。

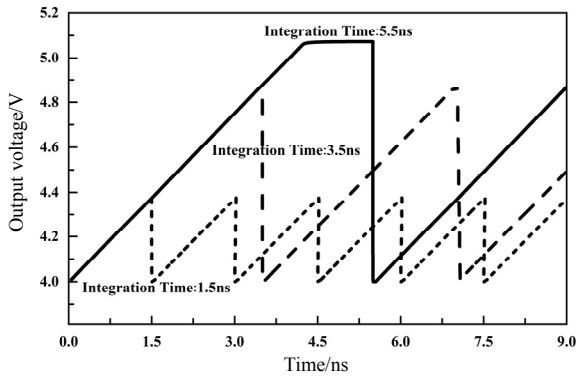


图6 积分时间不同时的输出电压曲线

Fig.6 Output voltage curves with different integration time

### 3 石墨烯阵列探测器

#### 3.1 阵列探测器信号输出

在对石墨烯-硫化铅异质结探测器单个像素光电探测仿真的基础上,对石墨烯光电探测器阵列的信号输出进行相关设计。阵列探测器如图7所示,包括行控制电路,列并行处理电路以及像素阵列。行控制电路通过控制行选通管的通断来选择一行像素点的输出。列并行处理电路包括相关双采样电路,列级模数转换电路以及多路选择器。

其中相关双采样电路是将石墨烯光电探测器的光照积分信号与复位信号进行比较,并将两者信号输入到差分放大器中。经过相关双采样,可以消除电路中复位噪声的干扰,也可以抑制低频噪声。

列级模数转换电路将经过相关双采样的模拟电压转换为数字输出。模数转换电路的选择需要考虑转换速度、精度以及电路结构的复杂度。并行比较型ADC电路转换速度 ns 级,但其电路结构复杂。双积

分型 ADC 电路结构简单,但其转换速度为 ms 级。两者都不适合石墨烯光电探测器的模数转换。逐次逼近型的 ADC 电路转换速度在 μs 量级,且其电路结构较为简单,转换精度与时间呈线性关系,可以实现对石墨烯光电探测器高速高精度的模数转换。

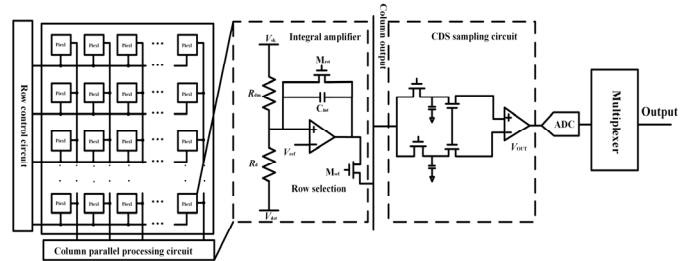


图7 石墨烯阵列探测器示意图

Fig.7 Schematic diagram of graphene array detector

采用列级 ADC,对像素阵列进行并行处理,对信号输出的带宽要求较高。利用多路选择器,将多路并行数据转换为串行输出,同时利用高速输出 IO 可提高读出电路的输出带宽。

#### 3.2 阵列探测器功率损耗

阵列探测器的功率损耗主要与偏置电压和阻值相关,如下式所示:

$$P = \frac{(V_{sk} - V_{ref})^2}{R_d} + \frac{(V_{ref} - V_{det})^2}{R_{dm}}$$

从上式可以看出,不仅探测器阻值,匹配电阻的大小对电路功耗也有很大的影响。以常见的光电探测器阵列规模 384×288 为例,读出方式为行读出,探测器两端电压为 5 V。纯石墨烯探测器、硫化铅薄膜探测器、典型微测辐射热计以及石墨烯-硫化铅异质结探测器的功耗分别大概为 19 W、24 mW、160 mW 以及 15 W。可发现纯石墨烯与石墨烯-硫化铅异质结探测器的功耗远大于其他两种材料探测器,这主要与石墨烯的半金属物理特性有关。在实际应用中,石墨烯探测器的电压一般为 2.5 V,并且可通过石墨烯图案化方法缩短其横截面长度来降低功耗。本文所测石墨烯-硫化铅异质结材料探测器的器件尺寸为 100 μm × 100 μm,在方阻一致的情况下,若器件尺寸改为 100 μm × 2 μm,则器件电阻增加为 50 倍,两端电压 2.5 V 时,石墨烯-硫化铅异质结探测器的功耗则大概为 74 mW,与硫化铅薄膜、微测辐射热计探测器的功耗相差无几。通过此类器件设计方法,在对探测效果影响不大的基础上很好地解决石墨烯探测器功耗过大的问题。

## 4 结论

石墨烯光电探测器在弥补传统光电探测器低温工作、工艺复杂等缺点的同时,也拥有光电流高,响应速度快的优点。结果表明:石墨烯光电探测器的净光响应电流可达 0.22 mA;在不影响探测效果的前提下,积分时间可缩短至 4.24 ns,适用于高帧频探测的场合;同时对石墨烯阵列探测器进行相关设计,并通过调整偏置电压,石墨烯图案化等方法可以解决其功耗过高的问题。本次研究可对石墨烯光电探测器的阵列化应用提供参考。

### 参考文献:

- [1] 任丽娜, 曲延滨. 毫米波与红外技术在军事领域中的应用[J]. 红外技术, 2004, 26(3): 66-70, 74.  
REN L N, QU Y B. The application of millimeter wave technology and infrared technology in the martial field[J]. *Infrared Technology*, 2004, 26(3): 66-70, 74.
- [2] GUO N, HU W D, JIANG T, et al. High-quality infrared imaging with graphene photodetectors at room temperature[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(35): 16065-16072.
- [3] YANG Q, WU Q M, LUO W, et al. InGaAs/graphene infrared photodetectors with enhanced responsivity[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11): 116208.
- [4] FANG H, HU W. Photogating in low dimensional photodetectors[J]. *Advanced Science*, 2017, 4(12): 1700323.
- [5] Buscema M, Island J O, Groenendijk D J, et al. Photocurrent generation with two-dimensional van der waals semiconductors[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(11): 3691-3718.
- [6] LI X M, ZHU H W, WANG K L, et al. Graphene-on-silicon schottky junction solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(25): 2743-2748.
- [7] WANG F, WANG Z X, YIN L, et al. 2D library beyond graphene and transition metal dichalcogenides: a focus on photodetection[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(16): 6296-6341.
- [8] Lee I, KANG W T, Kim J E, et al. Photoinduced tuning of schottky barrier height in Graphene/MoS<sub>2</sub> heterojunction for ultrahigh performance short channel phototransistor[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(6): 7574-7580.
- [9] Gerasimos K, Michela Badioli, Louis Gaudreau, et al. Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(6): 363-368.
- [10] Avouris P. Graphene: electronic and photonic properties and devices[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(11): 4285-4294.
- [11] Ryzhii V, Ryzhii M. Graphene bilayer field-effect phototransistor for terahertz and infrared detection[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(24): 245311.
- [12] 周云. 无 TEC 非制冷红外焦平面读出电路的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
ZHOU Y. Research on Tec-less Uncooled Infrared Focal Plane Readout Integrate Circuit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [13] 郑昕. PbS 薄膜的制备及红外光敏性能的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.  
ZHEN X. Preparation of PbS thin films and study on infrared photosensitivity[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [14] XIE C, WANG Y, ZHANG Z X, et al. Graphene/semiconductor hybrid heterostructures for optoelectronic device applications[J]. *Nano Today*, 2018, 19: 41-83.