

Low-Noise Readout Circuit for Sensitive Array Terahertz Radiation Detectors

Yufeng Pei, Chao Wan, Zhou Jiang, Xuecou Tu, Peng Xiao, Chengtao Jiang, Lin Kang

School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing Jiangsu
Email: kanglin@nju.edu.cn

Received: Jun. 11th, 2016; accepted: Jun. 27th, 2016; published: Jun. 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A low-noise multi-channel readout circuit is designed for 1×64 array Nb_5N_6 microbolometers based on Nb_5N_6 microbolometer's ultralow noise and high responsivity. The readout circuit consists of DC offset circuit, first and second stage amplifier circuits and multi-channel selection circuit, which is robust against the different impedance of the detectors. 64 weak voltage signals are successfully amplified and collected by the readout circuit. The noise of the circuit, as low as Nb_5N_6 microbolometers', is $8.6 \text{ nV/Hz}^{1/2}$. The effect of circuit's noise on Nb_5N_6 microbolometer is measured and analyzed. The input impedance, gain and bandwidth of the circuit are $100 \text{ k}\Omega$, 60 dB and 30 kHz respectively.

Keywords

THz Detection, Nb_5N_6 Microbolometer, Low Noise, Readout Circuit

高灵敏太赫兹阵列检测器的低噪声读出电路

裴宇峰, 万超, 姜周, 涂学凑, 肖鹏, 蒋成涛, 康琳

南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京
Email: kanglin@nju.edu.cn

收稿日期: 2016年6月11日; 录用日期: 2016年6月27日; 发布日期: 2016年6月30日

摘要

本文基于 Nb_5N_6 微测辐射热计(microbolometer)低噪声、高阻抗和高响应率的特性, 为 1×64 阵列的

Nb₅N₆ microbolometer设计了极低噪声的多通道读出电路。读出电路包含直流偏置电路，一、二级放大电路和多通道选择电路等几个部分，对检测器阻抗变化具有较强的鲁棒性，成功实现对64通道的微弱电压信号的放大和采集。电路具有优异的低噪性能，测量且分析比较了电路噪声对**Nb₅N₆ microbolometer**的影响。电路单通道输入阻抗达100 kΩ，增益约为60 dB，带宽约为30 kHz，噪声约为8.6 nV/Hz^{1/2}。

关键词

THz检测, Nb₅N₆ Microbolometer, 低噪声, 读出电路

1. 引言

太赫兹波是指介于毫米波段和红外波段的电磁辐射。近年来，太赫兹领域取得许多进展，利用太赫兹波具有的高相干性，低能性，透射性等特性，太赫兹技术可以广泛应用于生物医学，天文研究，安全检测，通信等领域。

太赫兹检测是太赫兹技术中的关键技术之一，高灵敏度，高响应率，低噪声的太赫兹检测器是近年研究的热点[1]。目前国际上有许多课题组，利用 CMOS，肖特基二极管，场效应管，氧化钒材料等进行太赫兹检测器的研究，进一步进行阵列太赫兹检测器件的研究[2]-[5]。Nb₅N₆ microbolometer 是利用 Nb₅N₆ 薄膜材料制备的测辐射热器件，其具有低噪声、高响应率、易制备大规模阵列等优点。Nb₅N₆ microbolometer 为基于热敏电阻原理的检测器[6]，利用 Nb₅N₆ 薄膜在常温下的高电阻温度系数(-0.7% K⁻¹)、高太赫兹辐射吸收率的性质进行太赫兹信号的检测。Nb₅N₆ microbolometer 的本征等效噪声功率能小于 1×10^{-12} W/Hz^{1/2}，噪声小于 8 nV/Hz^{1/2}。器件的直流电阻比较大，约为 1~3 kΩ。对于这样一个高灵敏度、低噪声、高阻抗的检测器，为不损失器件的性能，需要有噪声性能优异，且具有高输入阻抗的读出放大电路与之相配。

我们利用低噪声运算放大器 LT1028，为 1×64 Nb₅N₆ microbolometer 阵列芯片构建了 64 通道的负反馈放大读出电路。多通道读出电路具有结构简单、输入阻抗高、噪声低、串扰小、一致性高等特点，很好的完成了对 1×64 Nb₅N₆ microbolometer 阵列芯片检测信号的采集、放大和传输。

2. 读出电路架构设计

阵列 Nb₅N₆ microbolometer 工作原理：平面偶极子天线耦合吸收太赫兹辐射，吸收的能量使 Nb₅N₆ microbolometer 微桥温度上升，其电阻下降，在通以直流偏置电流的情况下，其电阻变化反映在其两端的电压变化，做到太赫兹辐射强度到电压信号的变换。实际检测时，太赫兹源信号加以频率为 1~10 kHz，占空比为 50% 的方波脉冲调制，检测器输出的电压信号表现为对应频率和占空比的方波电压信号，其峰值为 100 uV 左右，且带有一直流电压分量，此信号即为读出电路的待处理信号。

基于阵列 Nb₅N₆ microbolometer 的结构和工作原理，设计如图 1 的读出电路原理架构[7] [8]。 1×64 Nb₅N₆ microbolometer 所需的 64 个偏置电流由直流偏置电路提供，其检测输出的 64 个待处理信号，先由第一级 64 个并联输出的低噪声放大电路放大，然后由 64 选 1 的多路开关进行选通，再经第二级放大电路串行放大，最后用 ARM 嵌入式芯片进行数据采集和处理。这种结构下，第一级放大电路可以有效的抑制检测器阻抗不同对后部多路选通器的影响。第一级放大电路的噪声是系统的主要噪声，在第一级放大电路的噪声与 Nb₅N₆ microbolometer 本征噪声相当时，提高第一级放大电路的信噪比可以有效提高系统的信噪比。

3. 电路实现

3.1. 直流偏置电路

单个 Nb₅N₆ microbolometer 工作需要的直流偏置电流约为 0.1~0.5 mA，为了保证 Nb₅N₆ microbolometer

的低噪声性能尽可能不被读出电路影响，采用低噪声的直流源来提供偏置电流。针对 1×64 阵列的 Nb_5N_6 microbolometer，相应设计了 64 阵列的可调的直流偏置电路(图 2)，以达到灵活调节 Nb_5N_6 microbolometer

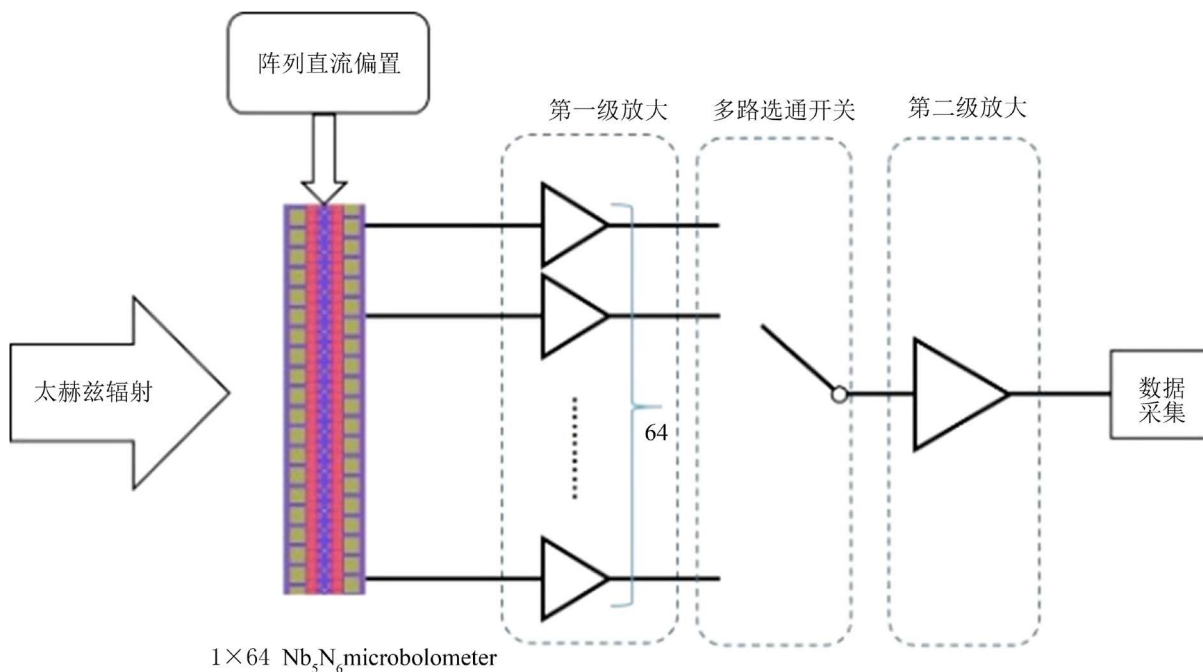


Figure 1. Readout circuit architecture

图 1. 读出电路架构

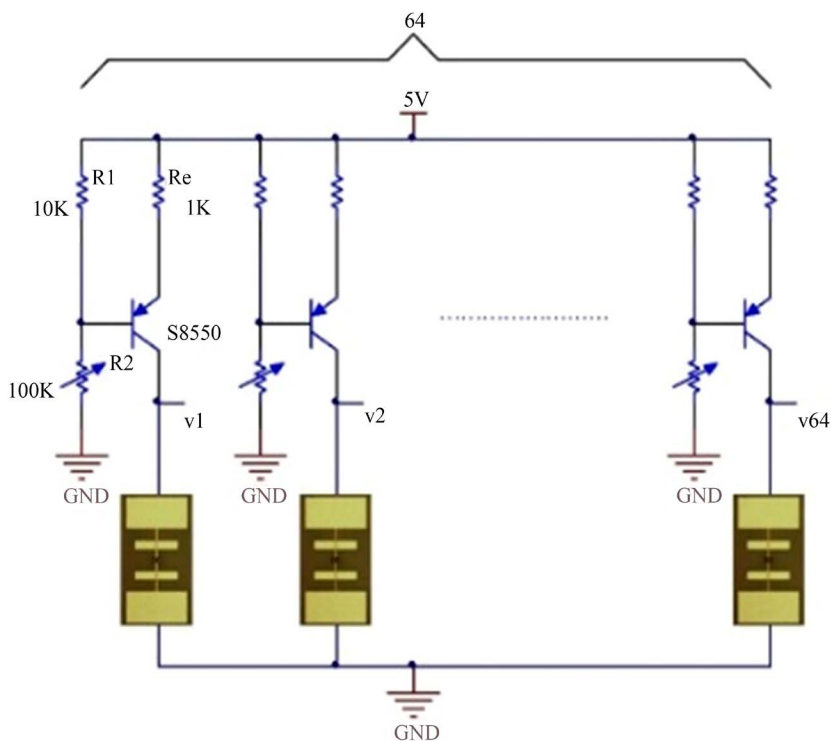


Figure 2. Array DC bias circuit

图 2. 阵列直流偏置电路

最佳的直流工作点的目的。PNP 三极管 S8550 正常工作时 V_{BE} 约为 -0.7 V, 调节滑动变阻器 R_2 的值, V_B 变化范围为 $0\sim 4.5$ V。 V_B 为 4.3 V 时, V_E 接近 5 V, I_E 为 0 mA。 V_B 为 3.8 V 时, V_E 为 4.5 V, I_E 为 0.5 mA。利用三极管工作在放大区时 $I_E \approx I_C$ 的特性便能获得 $0\sim 0.5$ mA 范围可调的偏置电流, 在 Nb_5N_6 microbolometer 阻值变化时($1\sim 3$ k Ω), 此偏置电流几乎不变。功耗方面, 相较于直接利用大电阻与 Nb_5N_6 microbolometer 串联, 通过限流来提供偏置的方式[6], 此电路的功耗更低, 在大阵列的情况下明显优于前者。

3.2. 第一级放大电路

为保证放大电路的低噪性能, 需要选用低噪声运放搭建放大电路。除去外部噪声, 运放的内部噪声主要表现为电压噪声, 电流噪声, 散粒噪声和随机噪声[9] [10]。其中折合到输入端的电压噪声和折合到输入端的电流噪声是放大器噪声的主要指标, 如果两者不相关, 运放的噪声可用下式表示:

$$V_{noise} = \sqrt{v_n^2 + (R_s \times i_n)^2 + V_{ex}^2} \quad (1)$$

其中:

V_{noise} 表示折合到输入端的总体噪声。

v_n 表示折合到输入端的电压噪声。

R_s 表示源阻抗。

i_n 表示折合到输入端的电流噪声。

V_{ex} 表示外部噪声。

Nb_5N_6 microbolometer 常温电阻约为 $1\sim 3$ k Ω , 本文中使用的 Nb_5N_6 microbolometer 常温电阻约为 1 k Ω , 属高源阻抗器件, 应选用电流噪声较低的运放以降低公式中 $R_s \times i_n$ 的值。同时, 所选运放的电流噪声和电压噪声应与源阻抗满足:

$$\frac{v_n}{i_n} \approx R_s \quad (2)$$

综合考虑以上因素, 选择了低噪声运放 LT1028 来搭建放大电路。LT1028 具有优异的噪声性能, 在 1 kHz 处的等效输入电压噪声为 0.85 nV/Hz^{1/2}, 等效输入电流噪声为 1 pA/Hz^{1/2}, 其主要参数如表 1。 $v_n/i_n \approx 0.85$ k Ω , 与 Nb_5N_6 microbolometer 常温阻抗相接近, 电流噪声流经源阻抗后约为 1 nV/Hz^{1/2}, 相对较低。

第一级放大电路为以低噪声运放 LT1028 搭建的负反馈放大电路, 电路细节如图 3。考虑到电路处理的为 $1\sim 10$ kHz 的方波信号, 故设计电路为一低频放大电路。为了降低噪声, 在电路输入端做了隔直和 RC 滤波, 在反馈回路中加入了 C_F 以限制带宽。

由于源信号很微弱, 源阻抗较大, 放大电路实际放大的信号为经源阻抗和放大电路输入阻抗分压后的源信号。放大电路相对于源阻抗应具有较高的输入阻抗, 才能保证放大电路获得尽可能大的信号输入, 提高其输出信号的幅值。在此电路中输入阻抗主要由 R_2 决定, 在信号频率为 1 kHz 时:

Table 1. LT1028 parameters

表 1. LT1028 参数

参数	数值
等效输入电压噪声	0.85 nV/Hz ^{1/2}
等效输入电流噪声	1 pA/Hz ^{1/2}
差分输入阻抗	20 k Ω
增益带宽积	75 MHz

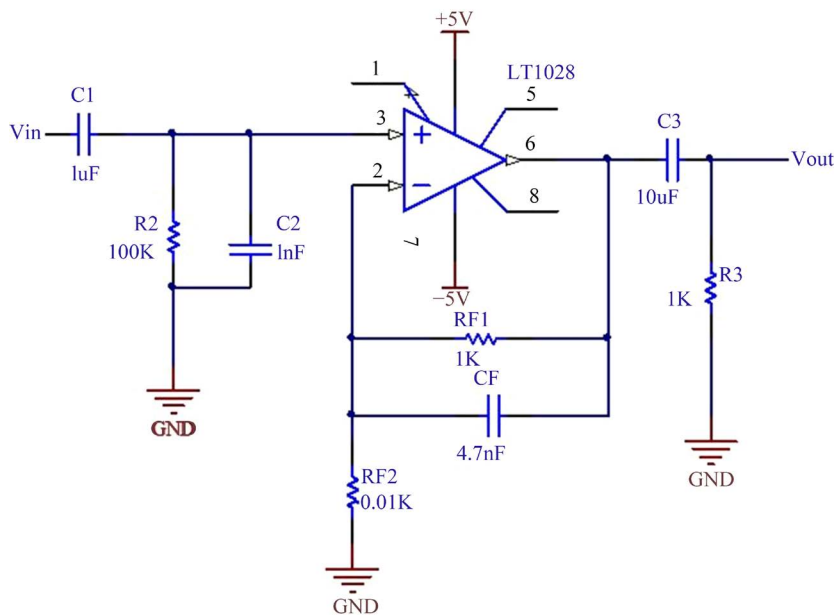


Figure 3. First stage amplifier circuit
图 3. 第一级放大电路

$$R_{in} = \frac{R_2 \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) + \frac{1}{j\omega C_2}}{j\omega R_2 C_1 + \frac{C_1}{C_2}} \approx 100K\Omega \quad (3)$$

由 R_{F1} , R_{F2} 和 C_F 构成的负反馈回路决定了电路的增益, 1 kHz 处电路电压增益:

$$Gain = \frac{\frac{1}{j\omega C_3} + \frac{R_{F1}}{j\omega R_{F1} C_F + 1} + R_{F2}}{R_{F2} \left(\frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{j\omega C_1 R_2} + 1 \right)} \approx 40dB \quad (4)$$

由 R_{F1} 和 C_F 主要决定了电路的带宽, 截止频率:

$$f_T = \frac{1}{2\pi R_{F1} C_F} \approx 30kHz \quad (5)$$

考虑到增益过低无法有效的提高信号的信噪比, 增益过高则使得信号在后续的多路选择电路进行多路选通时易引起通道间的串扰, 经过实验测试将第一级放大电路的增益设定为 40 dB。由于源信号为方波信号, 若带宽过窄则易引起失真, 如果带宽设计的过宽则会引入过多的高频分量, 使得引入的噪声增加。经过尝试, 将带宽设定为 30 kHz 时可以得到较好的结果。

3.3. 多路选通和第二级放大电路

由第一级放大电路放大后的信号经 64 选 1 多路选通后再由第二级放大电路放大。多路选通电路用 2 块 32 选 1 的多路选通芯片 ADG732 搭建。ADG732 的常温导通电阻为 4 Ω, 通道切换时间为 23 ns, 其极低的导通电阻对信号的影响较小。

第二级放大电路如图 4, 其结构与第一级放大电路相似, 区别在于增益为 20 dB, 输出端对放大后的信号加入了直流电平分量以匹配数据采集的要求和提高模数转换的精度。

4. 仿真与测量

对于设计的多通道电路，对其做了频响的仿真，并且与实际测量的结果进行了对比，结果如图 5，

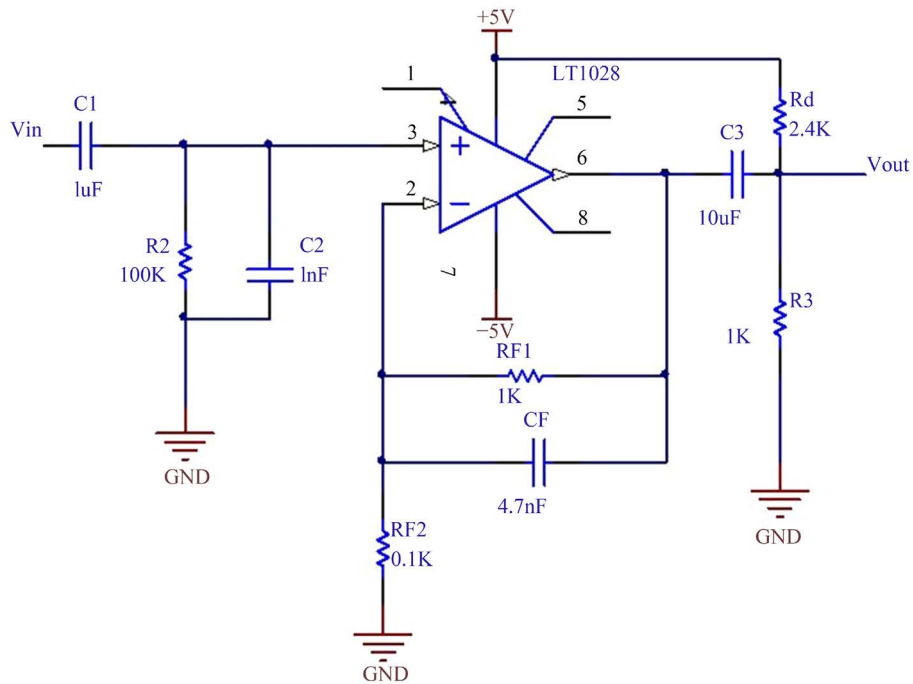


Figure 4. Second stage amplifier circuit

图 4. 第二级放大电路

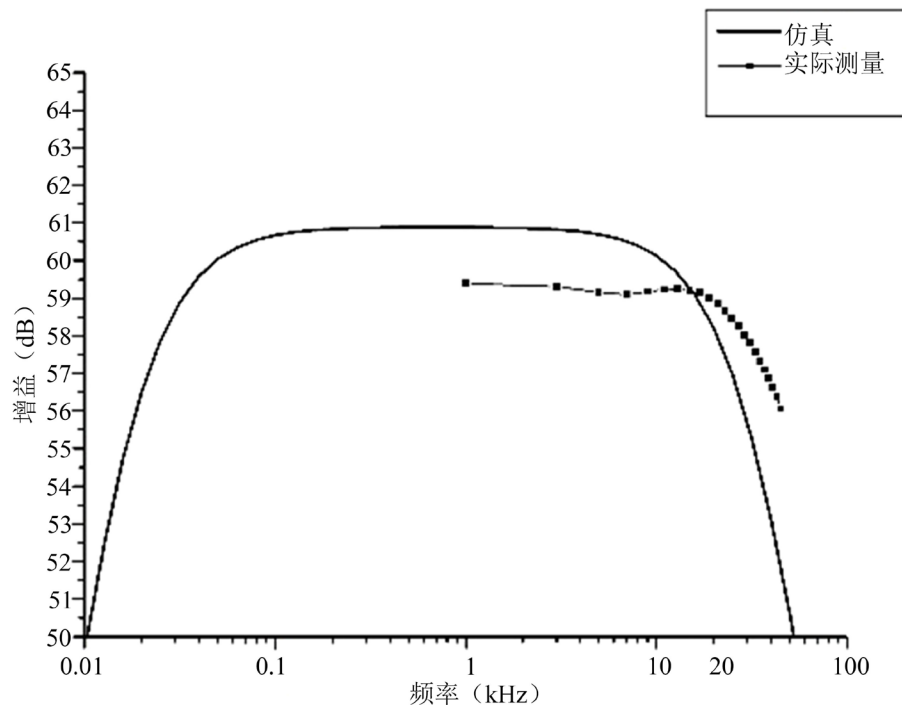


Figure 5. Frequency response curve

图 5. 频响曲线

从图中仿真曲线看出，在 1 kHz 处的增益为 60 dB 左右，通频带宽约为 30 kHz，都与设计值相近。图 5 中实际测量曲线上 1 kHz 处电路的实测增益约为 59 dB，与仿真值基本吻合。带宽约为 35 kHz，稍大于仿真值。图 6 为对所有通道的增益的实际测量结果，实测增益与仿真结果十分接近。从测量结果也可以看出，实际电路中各通道间的增益的一致性表现非常好，放大电路中采取的负反馈放大结构很好的保证了通道间增益的一致性，有效的降低了电路对检测结果引入的失真。

通过对比电路输入端接 Nb₅N₆ microbolometer 和电路输入端短路两种情况下的电路噪声来评价电路的噪声性能。将电路与阵列 Nb₅N₆ microbolometer 连接好后，选择了几个通道在输出端测量噪声功率谱密度，结果如图 7(a)。选择的 5 个通道的噪声功率谱密度一致性很好，1/f 噪声的拐点较低，高频部分水平曲线对应白噪声，噪底大约为 8 uV/Hz^{1/2}，电路的增益为 59 dB 左右，所以折合到输入端的噪声密度约为 8.6 nV/Hz^{1/2}。选取同样的通道，短接其输入端，然后在输出端测量噪声功率谱密度，结果如图 7(b)。图中噪底大约为 6 uV/Hz^{1/2}，折合到输入端约为 6.4 nV/Hz^{1/2}。

Nb₅N₆ microbolometer 常温电阻约为 1 kΩ，理论本体热噪声约为 4 nV/Hz^{1/2}。从上述测量结果计算 Nb₅N₆ microbolometer 热噪声得：

$$\sqrt{8.6^2 - 6.4^2} = 5.7 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} \tag{6}$$

理论值较接近，且与电路本体噪声 6.4 nV/Hz^{1/2} 相近。表明电路噪声与 Nb₅N₆ microbolometer 本体热噪声相近，确保 Nb₅N₆ microbolometer 的灵敏度受电路影响很小。

5. 总结

为阵列 Nb₅N₆ microbolometer 设计且成功实现了多通道、低噪声的读出电路。电路具有良好的低噪性能，带 Nb₅N₆ microbolometer 时的噪声为 8.6 nV/Hz^{1/2}，很好的保证了 Nb₅N₆ microbolometer 的高灵敏度特

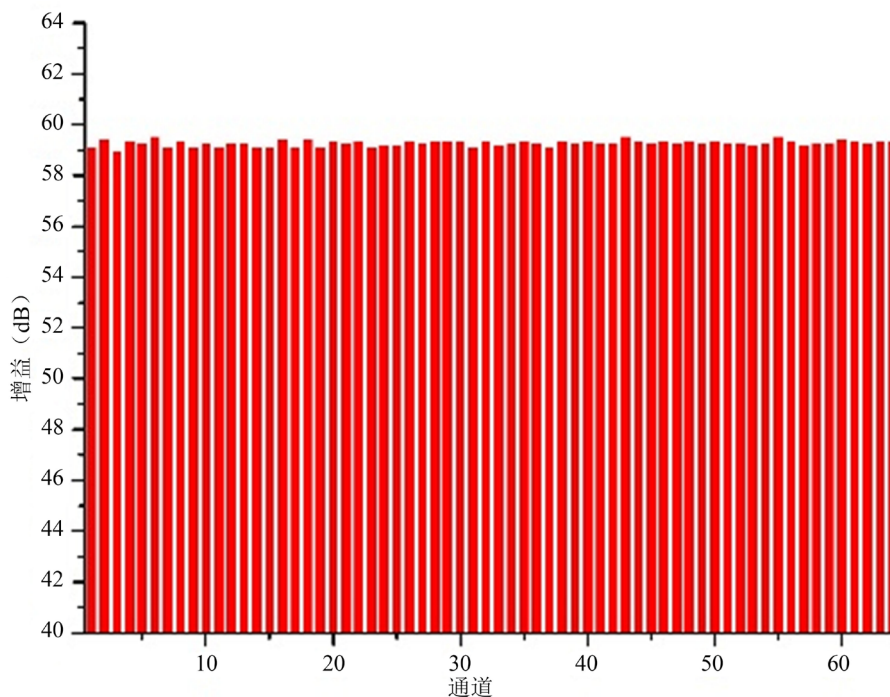


Figure 6. Gain statistics
图 6. 各通道增益统计

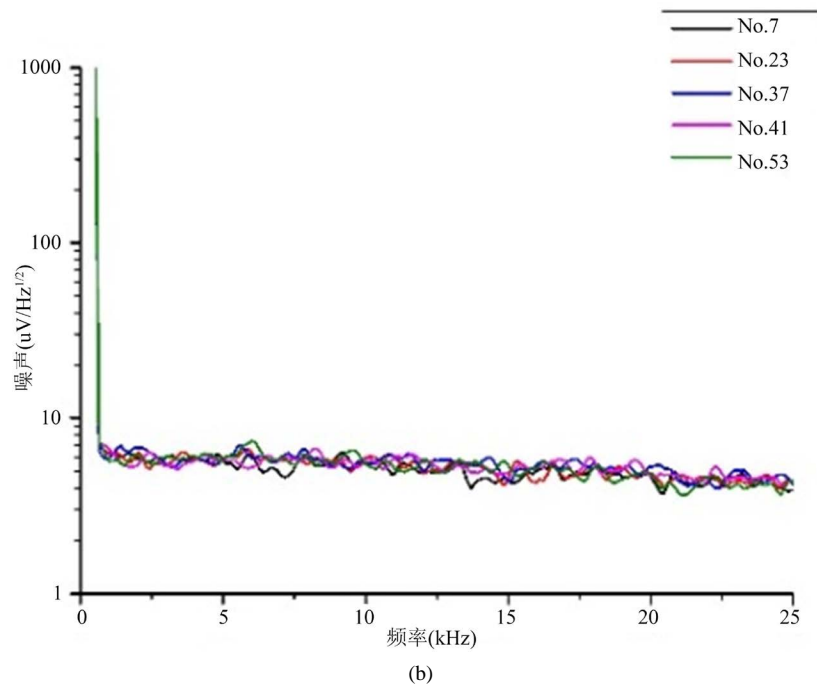
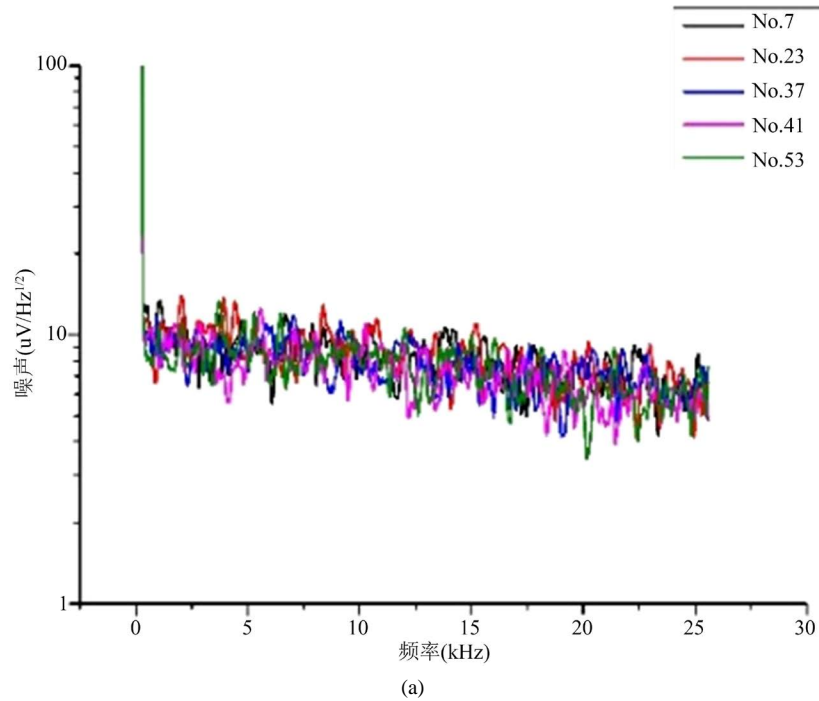


Figure 7. (a) Noise spectral density with device; (b) Noise spectral density with input shorted
图 7. (a) 带器件时的噪声谱密度; (b) 输入短路时的噪声谱密度

性，成功实现了 1×64 阵列 Nb_5N_6 microbolometer 的信号读出。电路结构可以作为更大规模阵列 Nb_5N_6 microbolometer 读出电路的参考。

参考文献 (References)

- [1] Oda, N., Ishi, T., Kurashina, S., *et al.* (2013) Palm-Size and Real-Time Terahertz Imager, and Its Application to De-

- velopment of Terahertz Sources. SPIE Defense, Security, and Sensing. *International Society for Optics and Photonics*, **8716**, 10 p.
- [2] Schuster, F., Coquillat, D., Videlier, H., *et al.* (2011) Broadband Terahertz Imaging with Highly Sensitive Silicon CMOS Detectors. *Optics Express*, **19**, 7827-7832. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.007827>
- [3] Sun, J.D., Sun, Y.F., Wu, D.M., *et al.* (2012) High-Responsivity, Low-Noise, Room-Temperature, Self-Mixing Terahertz Detector Realized Using Floating Antennas on a GaN-Based Field-Effect Transistor. *Applied Physics Letters*, **100**, 013506. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3673617>
- [4] Pocas, S., Deronzier, E., Brianceau, P., *et al.* (2013) Technological Customization of Uncooled Amorphous Silicon Microbolometer for THz Real Time Imaging. SPIE OPTO. *International Society for Optics and Photonics*, **8624**, 8 p.
- [5] Simoens, F. and Meilhan, J. (2013) Terahertz Real-Time Imaging Uncooled Array Based on Antenna-And Cavity-Coupled Bolometers. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **372**, 20130111. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0111>
- [6] Tu, X.C., Mao, Q.K., Wan, C., *et al.* (2014) Nb₅N₆ Microbolometer Array for a Compact THz Imaging System. SPIE OPTO. *International Society for Optics and Photonics*, **8985**, 6 p.
- [7] Chisum, J.D., Grossman, E.N. and Popović, Z. (2011) A General Approach to Low Noise Readout of Terahertz Imaging Arrays. *Review of Scientific Instruments*, **82**, 065106. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3599419>
- [8] Levinzon, F.A. (2008) Ultra-Low-Noise High-Input Impedance Amplifier for Low-Frequency Measurement Applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, **55**, 1815-1822. <http://dx.doi.org/10.1109/TCSI.2008.918213>
- [9] Bowers, D.F. (1989) Minimizing Noise in Analog Bipolar Circuit Design. *Proceedings of the 1989 Bipolar Circuits and Technology Meeting*, Minneapolis, 18-19 September 1989, 107-111.
- [10] Surhone, L.M., Timpledon, M.T., Marseken, S.F., *et al.* (2010) Noise (Electronics). Betascript Publishing, Hong Kong.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>