

文章编号:1001-9014(2006)03-0183-05

微测辐射热计的红外热响应模拟

袁宁一¹, 李格¹, 李金华¹, 陈效双²

(1. 江苏工业学院 功能材料实验室, 江苏 常州 213016;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:利用有限元法对微桥结构的测辐射热计进行了二维热模拟. 定量地分析了探测单元的大小尺寸、支撑层的厚度、支撑臂的长度和宽度、引线材料的选取等对微测辐射热计探测单元在红外辐射下温度的变化和热响应的快慢情况. 评估了真空封装对微测辐射热计红外响应的影响. 同时作为比较对平板空腔结构的红外探测器也进行了分析.

关键词:微测辐射热计; 红外热响应; 有限元; 模拟

中图分类号:TN215; O484.1 **文献标识码:**A

THERMAL RESPONSE SIMULATION OF MICROBOLOMETER

YUAN Ning-Yi¹, LI Ge¹, LI Jin-Hua¹, CHEN Xiao-Shuang²

(1. Functional Materials Lab., Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China;

2. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: Two-dimensional thermal simulations of the microbolometer with a micro-bridge structure by finite element method were done. The effects of pixel size, suspended film thickness, length and width of suspended leg, down-lead, vacuum package on the temperature changes and thermal time constants of pixels induced by infrared radiation were analyzed. To compare, the performance of microbolometer with a cavum structure was also discussed.

Key words: microbolometer; infrared thermal response; finite element; simulation

引言

非致冷红外探测器不需要致冷, 制造成本低, 重量轻, 响应波段宽和工作时间长等诸多优点, 非常适用于军事领域诸如陆、海、空的侦察、监视与目标捕获, 导弹与灵巧武器制导等; 在民用方面可用于工业生产监控、公安执法、消防灭火、医疗诊断、搜索救援、高压输电线路检测、火车车轮和车闸测温、夜间辅助驾驶等. 美国、日本、英国、加拿大等国家在非致冷红外探测器的研究和制造方面相对领先于其他国家^[1,2]. 微测辐射热计焦平面阵列的规模已达到 640×480 , 像元的尺寸减小到 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 性能接近致冷式光子探测器. 但我国在这方面发展较慢.

非致冷探测器的制备, 最常用的方法是通过机械加工在 CMOS 读出电路上制作悬桥来实现微测辐射热计. 微测辐射热计是将敏感膜电阻随温度的

变化作为电压或电流信号变化检出并成像. 通常采用氧化钒、非晶硅等材料作为敏感层, 红外辐照引起敏感膜的温度升高从而使材料的电阻发生变化. 红外辐射的吸收效率、敏感膜的电阻温度系数, 探测器的热隔离是决定探测器响应灵敏度的关键. 微桥结构制造工艺比较复杂, 另外非致冷探测器常用的氮化硅、氧化硅吸收层, 像元的大小, 微桥支撑层的厚度, 支撑臂的长度, 探测器的封装对探测器灵敏度都很大的影响. 因此很有必要做一个详细的分析. 本文利用有限元法对不同的像元结构进行了热学模拟. 同时对平板空腔结构的探测器单元的红外响应也做了计算.

1 微桥结构

1.1 模型

图 1 是典型的微测辐射热计像元结构图, 硅读

收稿日期: 2005-11-20, 修回日期: 2006-02-21

Received date: 2005-11-20, revised date: 2006-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(60277019) 红外物理国家重点实验室开放课题(200406)

作者简介: 袁宁一(1966-), 女, 江苏南京人, 江苏工业学院信息科学系副教授, 博士, 主要从事功能薄膜材料及非常态器件研究.

出电路上方通常用热导率小的氮化硅制作绝热微桥支撑,桥面上沉积氧化钒薄膜等热敏感薄膜,它们通过两条支撑臂上的引线与 Si 衬底中的信号处理电路相连.这样敏感膜吸收的热量绝大部分只能从支撑臂传入 Si 衬底,降低了探测器的热导,提高了红外辐射引起的温度变化幅度.电阻上方用 Si₃N₄ 或 SiO₂ 作为红外吸收膜,红外光照射在探测器上时一部分被吸收层吸收,另一部分透过吸收层和敏感膜被微桥下的金属层反射回来,再次被吸收膜所吸收.桥面距金属层的距离 2.5 μm,对于 8~14 μm 波长的红外辐射,文献报道,吸收系数可大于 80% [3].

由于微桥上的探测单元横向尺寸远远大于其纵向厚度,所以探测单元的温度分布可以简化为二维问题进行求解,热扩散方程:

$$cpd \frac{\partial(\Delta T)}{\partial t} + 4\sigma\epsilon T_0^3 \Delta T + h\Delta T - \text{div}(k \text{ grad}(\Delta T)) = \eta I \quad (1)$$

其中 η 是探测单元的红外吸收系数, ϵ 是热辐射系数, T_0 是探测单元所处的环境温度, $\Delta T = T - T_0$ 是单元相对于环境的温度, Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, h 是探测单元与环境之间对流传热的传输系数.对于由 Si₃N₄ 支撑层、敏感膜、吸收层,还有电极引线组成的多层结构,相应的热容 cpd 和热导 kd 分别可以通过下式计算:

$$cpd = \sum_{i=1}^n (cp)_i d_i \quad kd = \sum_{i=1}^n k_i d_i \quad (2)$$

$(cp)_i$ 和 k_i 代表对应的多层结构中的第 i 层的单位体积热容和热导.在用有限元方法解上述微分方程时所用边界条件是引线与衬底相连处的温度与环境温度一致.表 1 是模拟时各材料的热学参数.

1.2 模拟结果与讨论

图 2 探测单元的平面图,利用有限元模拟时探测单元分为 3 个区域,区域 1 包括 Si₃N₄ 支撑层,VO₂

表 1 各材料的热学参数

Table 1 Thermal constants of materials

	$\rho (\times 10^3 \text{ Kg/m}^3)$	$c (\text{J/KgK})$	$K (\text{W/mK})$
Si ₃ N ₄	2.40	691	1.0 [3]
VO ₂	4.34	465	22 [5]
Al	2.7	908	237
Ni/Cr (20% Cr)	8.41	466	13

敏感膜, Si₃N₄ 吸收层,区域 2 包括 Si₃N₄ 支撑层,VO₂ 敏感膜,电极, Si₃N₄ 吸收层,区域 3 包括 Si₃N₄ 支撑臂和引线.探测单元在红外辐射下,温度随时间上升符合规律 $\Delta T = \Delta T_s (1 - e^{-t/\tau})$,动态模拟可以给出各时刻下像元的温度分布情况,温度分布经过一定时间后达到稳定.热时间常数 τ 定义为当单元温升达到平衡值的 $(1 - 1/e)$ 时所需要的时间.

我们首先对 50 μm × 50 μm 的像元性能进行了分析.模拟时辐射功率取 100 W/m²,红外吸收 η 取 85%,辐射系数 $\epsilon = 80%$,空气热导系数 $h = 35 \text{ W/m}^2 \text{ K}^{[6]}$,环境温度 $T_0 = 300 \text{ K}$,吸收层 Si₃N₄ 的厚度取 0.05 μm.图 3 是在红外辐射下像元达到热平衡后的温度分布情况.可以看出微桥悬空结构起了很好的隔热作用,桥面的温度分布比较均匀.表 2 和表 3 分别是对 50 μm × 50 μm 像元的模拟结果.我们在不同

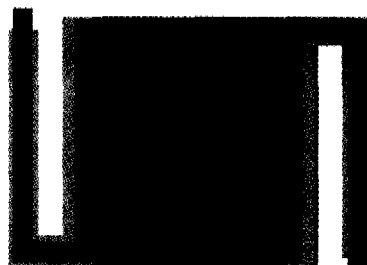


图 2 模拟示意图
Fig. 2 Planform of Simulation element

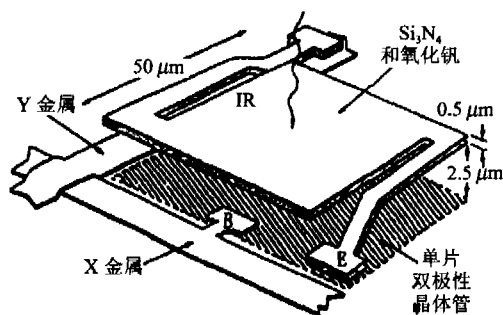


图 1 典型的微辐射热计结构图
Fig. 1 Schematic of micro-bridge structure

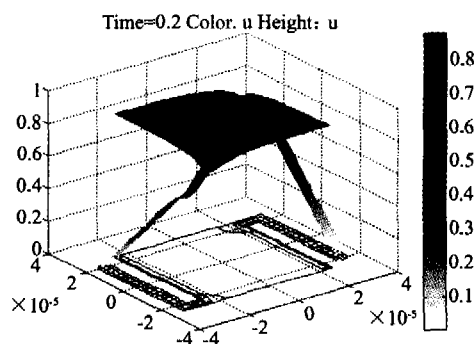


图 3 微桥结构探测单元的温度分布
Fig. 3 Temperature distribution of detector with microbridge structure

支撑层厚度,支撑臂的宽度,敏感膜的厚度,引线的宽度和厚度条件下对像元的温度分布进行了计算,同时也分析了真空封装对红外响应的影响。

从表 2 的模拟结果看出对于采用 Al 作为引线的探测器,引线的宽度和厚度对提高像元的温度升高幅度起着决定的作用。

从表 2 和表 3 的模拟结果可以看到引线的材料对温升有非常大的影响。由于 Al 的热导率很大,因此不利于提高像元的温度,如果采用 NiCr 或其他热导率较低的材料,可以大大提高像元的温度,因此引线材料的选择是非常重要的。其次是真空封装,当降低支撑层的厚度和支撑臂的宽度,温升幅度较大的情况下,真空封装对于进一步提高红外响应的效果越明显。对于选用 NiCr 引线的像元,当支撑层厚度为 $0.5\mu\text{m}$,支撑臂宽度 $3\mu\text{m}$,温升从没有真空封装的 1.0998K 增加真空封装的 2.0585K ,几乎提高了 1 倍。也就是说相当于面对一个 10nW 的入射红外辐射能引起的温度变化是 0.082K 。当像元电阻为 $100\text{k}\Omega$,偏置电流 $100\mu\text{A}$,敏感膜的电阻温度系数 $3\%/K$ 时,电压响应约 $2.5 \times 10^6\text{V/W}$ 。

表 2 采用 Al 引线的 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 像元中心区域的温升幅度和热时间常数

Table 2 Temperature change and thermal time constants of $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ pixel with Al down-lead

引线厚度 (μm)	支撑层厚度 (μm)	支撑臂宽度 (μm)	VO_2 膜厚度 (μm)	引线宽度 (μm)	温升 (K)		热时间常数 (ms)	
					空气	真空	空气	真空
0.1	1	5	0.2	2	0.1088	0.1142	2.6	3.0
	1	5	0.1	2	0.1147	0.1206	2.6	3.0
	0.5	5	0.1	2	0.1236	0.1304	2.0	2.4
	0.5	5	0.05	2	0.1314	0.1390	1.8	1.9
	0.5	3	0.05	2	0.1356	0.1433	2.0	2.0
	0.5	3	0.05	1	0.2401	0.2662	3.0	3.0
0.05	0.5	3	0.05	1	0.3792	0.4498	4.3	5.2

表 3 采用 NiCr 引线的 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 像元中心区域的温升幅度和热时间常数

Table 3 Temperature change and thermal time constants of $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ pixel with NiCr down-lead

引线厚度 (μm)	支撑层厚度 (μm)	支撑臂宽度 (μm)	VO_2 膜厚度 (μm)	引线宽度 (μm)	温升 (K)		热时间常数 (ms)	
					空气	真空	空气	真空
0.1	1	5	0.2	2	0.3943	0.4972	13	15
	1	5	0.1	2	0.5005	0.6445	13	16
	1	5	0.05	2	0.5119	0.6620	13	16
	0.5	5	0.05	2	0.6326	0.8794	10	14
	0.5	3	0.05	2	0.7786	1.1826	10	16
	0.5	3	0.05	1	0.9794	1.6728	12	20
0.05	0.5	3	0.05	1	1.0998	2.0585	13	25

对于微/纳米尺度器件,通常都会存在微尺度效应问题。在辐射表面间距离近似等于或小于满足维恩位移定律的最大单色辐出度波长时,会存在近场辐射,但有研究结果显示^[7]当夹层厚度小于 300nm 时,辐射热流有明显增强的迹象。而在 $2\mu\text{m}$ 时,热辐射没有明显加强。另外 Raytheon Systems Company 制作的非制冷红外焦平面阵列器件,单元红外信号响应可以大于 $2.5 \times 10^7\text{V/W}$,比我们模拟的电压响应高。他们采用的是 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 像元尺寸, $0.5\mu\text{m}$ 厚的 Si_3N_4 做为微桥结构的支撑,空腔是 $2\mu\text{m}$ 的结构^[3]。可以看出在微测辐射热计中像元的辐射热交换并没有明显的加强。薄膜厚度的降低会导致薄膜热导率减小,这有利于提高探测单元的红外响应。由于没有查到 Al, NiCr 薄膜的热导率,我们模拟时所采用的是体材料参数,因此模拟结果有点偏差。

由于多层结构的厚度越小,热容和热导就越小,越有利于提高探测器的响应灵敏度,当然降低支撑层的厚度、宽度都是有利于提高像元的温度,但支撑层的厚度、宽度太小会降低微桥结构的牢固程度,因此在制造探测器时还要兼顾探测器的热学性能与机械性能,选取合适的像元结构参数。另外减小敏感膜的厚度,可以使像元的温升提高,同样敏感膜的厚度越小,薄膜的均匀性越难控制。

我们同时还分析了支撑臂的长度,支撑层上与敏感膜形成欧姆接触的引线的长度对像元温度红外响应的影响。表 4 和表 5 分别是模拟的结果。模拟参数:真空封装,支撑层厚度为 $0.5\mu\text{m}$,支撑臂宽度为 $3\mu\text{m}$,NiCr 引线宽 $1\mu\text{m}$ 、厚 $0.1\mu\text{m}$, VO_x 薄膜厚 $0.1\mu\text{m}$ 。模拟结果显示支撑臂越长,温升越大。对于 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 的像元支撑臂的长度增加 $20\mu\text{m}$,温升可以提高约 50% 左右(见表 4)。图 4 是采用短引线的探测单元示意图。表 5 反映了支撑层上与敏感膜形成欧姆接触的引线的长度对像元温度红外响应的影响。降低引线的长度可以提高温升,但由于引线缩短的幅度相对于整个引线来说不大,因此对温升的提高幅度不是很大。

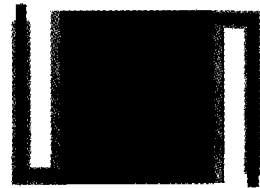


图 4 采用短引线的探测单元示意图

Fig. 4 Schematic of detector pixel with shorten down-lead

表 4 支撑臂长度的影响

Table 4 Influence of leg length on temperature changes and thermal time constants

支撑臂的长度 (μm)	80	50	30
温升 (K)	2.525	1.6728	1.0353
热时间常数 (ms)	32	20	12

表 5 引线长度的的影响

Table 5 Influence of down-lead length on temperature changes and thermal time constants

引线长度 (μm)	温升 (K)	热时间常数 (ms)
50 + 48	1.6728	20
50 + 20	1.7729	21
50 + 10	1.7845	22

为了提高占空因数,实现大规模的焦平面阵列和探测器的小型化,像元尺寸随着技术的发展越做越小,但这样对加工制造设备和工艺的要求越高.表 6 显示在支撑层 $0.5\mu\text{m}$ 厚,支撑臂 $3\mu\text{m}$ 宽,支撑臂 $50\mu\text{m}$ 长, $1\mu\text{m}$ 宽, $0.1\mu\text{m}$ 厚的 NiCr 引线, $0.05\mu\text{m}$ 厚 VO_x 薄膜的结构参数下,不同尺寸的像元温升情况.

对于某一像元尺寸,支撑臂越长,温升越高.对于同样的支撑臂,从表 6 的模拟结果看,并不是像元尺寸越大,温升越高.当像元尺寸缩小到 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 时,温升下降得很多.因此在探测率没有明显下降的情况下实现器件的小型化还需要进一步降低支撑臂和引线的热导.我们发现 $50\mu\text{m}$ 的支撑臂对于 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 来说太短,提高支撑臂长度,可以提高它的温升.

以上所有的模拟结果显示,探测器的温升提高,它对红外辐射响应的热时间常数也增加了,也就是说探测器的响应率提高,是要以增加响应时间为代价的.进行真空封装的目的是要消除空气的传热作用,但对于 Al 引线,其热导率较大,热量主要是通过 Al 引线向衬底传递,空气的传热相对于 Al 引线处于次要地位.另外引线的宽度越大,引线在像元的热损失中起的作用就越大,因此即使进行真空封装,温升的变化幅度也不大,相对地热时间常数变化也不太大.但从表 3 中也可以看出,采用了 $1\mu\text{m}$ 宽的 NiCr 引线,在真空环境下,温升提高了 1 倍,同时热时间常数也大幅度的提高.

表 6 不同尺寸像元的热响应情况

Table 6 Temperature changes and thermal time constants of pixels of different sizes

单元尺寸 ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	100×100	50×50	30×30
温升 (K)	0.9794	1.6728	0.6756
热时间常数 (ms)	11	20	9.5

2 平板空腔结构

2.1 模型

微测辐射热计采用图 1 所示的微桥结构可以取得最佳的隔热效果,但制作工艺比较难.

平板空腔结构相对来说要容易一些,华中理工大学采用这种结构制备的氧化钒红外探测器电压响应为 $10^4 \text{V/W}^{[8]}$.图 5 是平板空腔结构的俯视图和侧面图.我们做模拟时考虑空腔深 $2.5\mu\text{m}$,吸收层覆盖整个支撑面,这样在模拟时除了 NiCr 引线区域,其余部分的红外吸收系数取 85%,另外模拟时的其他参数与桥式结构一致,真空封装,支撑层厚度为 $0.5\mu\text{m}$,NiCr 引线宽 $1\mu\text{m}$,厚 $0.1\mu\text{m}$, VO_x 敏感膜厚 $0.05\mu\text{m}$,大小 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$.

2.2 模拟结果与讨论

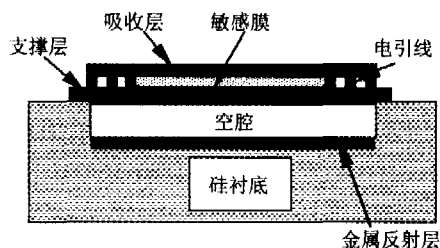


图 5a 平板空腔结构侧面图

Fig. 5a Side elevation of detector with a cavum structure

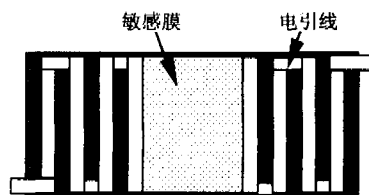


图 5b 平板空腔结构俯视图

Fig. 5b Planform of detector with a cavum structure

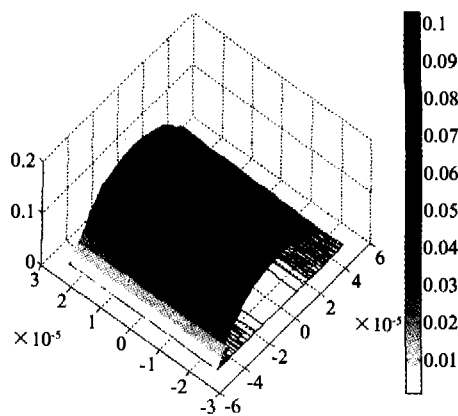


图 6 平板结构探测单元的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of detector with cavum structure

图 6 是探测单元达到热稳定后的温度分布图. 平板结构上的敏感膜温度分布远不如微桥结构的分布均匀. 表 7 是对于不同尺寸支撑层的像元中心温度升高的模拟结果. 平板空腔结构虽然比微桥结构坚固, 工艺生产中成品率高, 但对红外辐射的响应效果比微桥结构差得多. 同样在像元电阻为 $100\text{k}\Omega$, 偏置电流 $100\mu\text{A}$, 敏感膜的电阻温度系数 $3\%/K$ 的情况下, 0.1045K 的温升对应的电压响应低于 $1 \times 10^5\text{V/W}$.

3 结论

利用有限元方法对微桥结构的微测辐射热计的红外热响应进行了定量分析, 模拟结果显示探测器的电引线的材料选取对像元的温度变化有着非常大的影响. 真空封装对于进一步提高红外响应的效果也很明显. 当然降低支撑层、引线的厚度和宽度, 都是有利于提高像元的温度, 但支撑层的厚度太小会降低微桥结构的牢固程度, 引线太薄太细容易断条, 因此在制造探测器时还要兼顾探测器的热学性能与机械性能, 选取合适的像元结构参数. 另外减小敏感膜的厚度, 也可以使像元的温升提高, 同样敏感膜的厚度越小, 薄膜的均匀性越难控制. 在像元的温升提高的情况下, 像元对红外辐射响应的热时间常数都响应地有所增加.

考虑到微桥结构工艺的难度, 作为比较, 对工艺上相对容易的平板空腔结构的微测辐射热计也做了模拟计算, 计算结果显示敏感膜的温度分布不如微桥结构均匀, 温度升高幅度也低于微桥结构.

REFERENCES

- [1] Tissot J L. IR detection with uncooled sensors[J]. *Infrared physics & technology*, 2004, **46**:147—135.
- [2] SU Ji-Ru, WEI Jian-Hua, ZHUANG Ji-Sheng. Prospects of the uncooled thermal imaging technology in the 21st century [J]. *Infrared and Laser Engineering* (苏吉儒, 魏建华, 庄继胜. 通向 21 世纪的非致冷热成像技术. 红外与激光工程), 1999, **28**(3):41—45.
- [3] Radford W, Wyles R, Wyles J, et al. Microbolometer uncooled infrared camera with 20mK NETD[J]. *SPIE*, 1998, **3436**:636—646.
- [4] Ploss B, Lienhard D, Sieber F. Thermal simulation of micromachined bridges for integrated pyroelectric sensor arrays [J]. *Microelectronic Engineering*, 1995, **29**:75—78.
- [5] LIU Shao-Bo, LIU Mei-Dong, ZENG Yi-Ke, et al. Progress in research on detecting materials used in uncooled thermoelectric type infrared focal plane arrays[J]. *Materials Letters* (刘少波, 刘美冬, 曾亦可, 等. 非致冷红外焦平面阵列用探测材料的研究进展. 材料导报), 2000, **14**(10):39—42.
- [6] Dillner U, Kessler E, Poser S, et al. Low power consumption thermal gas-flow sensor based on thermopiles of highly effective thermoelectric materials[J]. *Sensors and Actuators A*, 1997, **60**:1—4.
- [7] HAN Mao-Hua, LIANG Xin-Gang. Comparison of heat conduction and thermal radiation by microscale gas gaps[J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (韩茂华, 梁新刚. 微结构气体夹层的导热和辐射比较, 工程热物理学报), 2004, **25**(6):1016—1018.
- [8] WANG Hong-Chen, YI Xin-Jian, CHEN Si-Hai, et al. Fabrication of 128-element uncooled Vx thermal IR detectors[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王宏臣, 易新建, 陈四海, 等. 128 元非致冷氧化钒红外探测器的制作, 红外与毫米波学报), 2004, **23**(2):99—102.

表 7 平板结构探测单元中心温度变化和热时间常数

Table 7 Temperature changes and thermal time constants of pixel with cavum structure

支撑层尺寸($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	100 × 50	84 × 50
中心区域温升(K)	0.1045	0.065
热时间常数(ms)	1.3	1.0