

基于二极管温变电容特性的温度传感器与结温测量方法

许墨扬, 肖凌峰, 年桂君, 杨智博, 程千顺, 李欣耘

(吉林大学, 吉林 长春 130012)

摘要: 结温与结电容都是二极管的重要参数, 研究二极管器件的结温与结电容特性对提升二极管的性能、器件的封装和应用等有着重要的意义。本文对整流二极管、发光二极管以及不同反向偏压和频率下肖特基二极管的温变电容特性展开了探究, 据此提出了一种环境温度测量的新方法, 并讨论了二极管温变电容特性在测定温度上的实用性。实验还发现 1kHz 和 10kHz 的测量频率下肖特基二极管在升温过程中出现了负电容现象, 提出了负电容还应与温度有关的观点。本文提出的温度测量方法根据半导体芯片加工工艺的不同具有多方面的适用性, 还可用作测量二极管结温的电学参数法。

关键词: 二极管; 结电容; 结温; 负电容

Temperature sensor and junction temperature measurement method based on diode temperature-dependent capacitance characteristics

Xu Moyang, Xiao Lingfeng, Nian Guikun, Yang Zhibo, Cheng Qianshun, Li Xinyun

(Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The junction area of a diode forms a definite junction capacitance when the thermal equilibrium is reached. Junction temperature and junction capacitance are important parameters for the diodes, and in-depth understanding of the junction temperature and junction capacitance characteristics is of great significance to improve the device performance and pursue potential application in different fields. The junction temperature of a diode has a certain functional relationship with the junction capacitance, which is called as the temperature-dependent capacitance. In this study, the temperature-varied capacitance characteristics of rectifier diodes, light-emitting diodes under different reverse biases and frequencies were explored, with which a new method for ambient temperature measurement was proposed, and the feasibility of temperature-dependent capacitance in determining ambient temperature was discussed. It is also found that the Schottky diode had a negative capacitance phenomenon during the heating process at the measurement frequencies of 1kHz and 10kHz, and put forward an idea that the negative

capacitance should also be related to temperature. The proposed temperature measurement method herein may have many applications according to the types of diodes, and can also be used as an electrical parameter method for measuring diode junction temperature.

Keywords: Diode, junction capacitance, junction temperature, negative capacitance

1 传感器设计背景和应用价值

设计背景：随着半导体材料的深入研究以及器件制备工艺的日趋成熟，二极管已广泛应用于照明、通讯、装饰、显示、逻辑电路、高速计算机、检波和混频等诸多领域，同时，在核粒子探测器、压力传感器、声波换能器等仪器的制造等领域也具有重要的应用潜力。我国高度重视半导体行业的发展，实施了包括 863 计划“半导体照明工程”在内的诸多重大项目，半导体器件的性质和寿命等也随之备受关注。

应用价值：结温是二极管的重要参数之一。通过本温度传感器及测温方法，可以实现二极管在任意驱动模式下结温的在线测量，同时该方法兼具辐射、腐蚀环境下的测温功能。

2 创新点与优势

本结温测量方法与属于电学参数法，利用到了二极管电容的温度依变性，其优点在于能够反映二极管在不同驱动模式下的真实结区温度，测量信号频率高抗辐射能力强，且只需要一次定标测量，测量简单便捷等，可与其它常规结温测量方法互为补充验证。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

二极管在低频电压下具有很好的整流特性，但是当电压频率增高时，其整流特性变差，甚至基本上没有整流效应，破坏整流特性的主要因素就是二极管的结电容。目前，对 PN 结型二极管结电容产生的主流观点认为，PN 结电容包括势垒电容和扩散电容两部分。实验发现，PN 结的势垒电容和扩散电容都随外加电压而变化。由 PN 结势垒区的空间电荷数量随外加电压而变化引起的电容效应称为势垒电容，以 C_T 表示。势垒电容是非线性电容。不考虑杂质浓度的限制，在室温及更高的温度区间内杂质将全部电离。此时在耗尽层近似下，可以得到类似于平板电容的势垒电容容值公式^[1]：

$$C_T = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{W}, \quad (1)$$

其中 ϵ_r 为绝缘层的相对介电常数， ϵ_0 为真空中介电常数， A 为 PN 结的面积， W 为 PN

结的势垒宽度。当 PN 结的杂质分布为突变结情况时，

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0(N_A+N_D)(V_D-V)}{qN_A N_D}}, \quad (2)$$

该式在单边突变结的情况下可以简化为：

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0(V_D-V)}{qN_B}}. \quad (3)$$

当 PN 结的杂质分布为线性缓变结情况时，

$$W = \sqrt[3]{\frac{12\epsilon_r\epsilon_0(V_D-V)}{q\alpha_j}}. \quad (4)$$

据此可以分别得出突变结与线性缓变结的二极管势垒电容^[1]，其中 N_D 为均匀施主杂质浓度， N_A 为均匀受主杂质浓度， N_B 为单边突变结中低浓度一侧的杂质浓度， V_D 为接触电势差， V 为外加电压， α_j 为杂质浓度梯度。

需要注意的是，势垒电容公式的导出用到了耗尽层近似，对施加反向偏压的情况该公式是适用的，而在施加正向偏压时势垒电容将会偏大。

由于扩散区的电荷数量随外加电压的变化所产生的电容效应，称为 PN 结的扩散电容，用符号 C_D 表示。低频情况下，在扩散区中积累的少子是按指数形式分布的，由此得到 PN 结的微分扩散电容公式^[1]：

$$C_D = \left[Aq^2 \frac{(n_{P_0}L_n + p_{N_0}L_p)}{k_0T} \right] e^{\frac{qV}{k_0T}}, \quad (5)$$

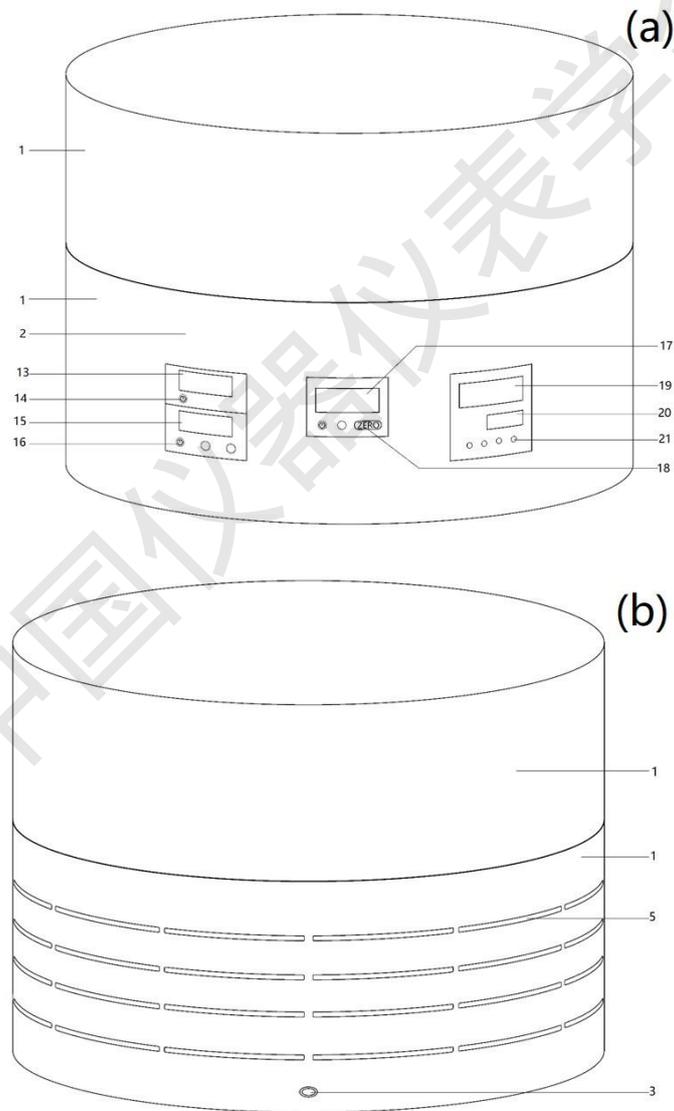
其中 A 为 PN 结的面积， n_{P_0} 为 P 区平衡电子浓度， p_{N_0} 为 N 区平衡空穴浓度， L_n 为电子扩散长度， L_p 为空穴扩散长度， k_0 为玻尔兹曼常数， T 为热力学温度。因为这一公式的导出用到了稳态的浓度分布公式，在高频情况下是不适用的。随着频率的增加，扩散电容的数值将会减小。

利用金属-半导体接触特性制成的 M-S 结型二极管称为肖特基二极管。半导体中施主浓度比金属中电子浓度低几个数量级，所以对于均匀掺杂的半导体，肖特基势垒的空间电荷区宽度和单边突变结 P+N 结的相同，其结电容也可以表示为 PN 结型二极管的势垒电容的形式^[2]。

二极管结区的结面积、耗尽层宽度、接触电势差^[3]和介电常数^[4]等都是温度的函数，因此达到热平衡时二极管的结电容也是温度的函数。实验表明二极管的结电容随温度变化有明显的依变关系，我们称这个关系为二极管的温变电容特性。利用二极管的这一特性可以完成对二极管结温度或环境温度的测量。

3.2 设计方法

基于二极管的温变电容效应测量温度，应先对二极管的电容-温度曲线进行定标，拟合得到二者之间的函数关系式，并划定单调区间为二极管的测温区间。我们使用铂热电阻 Pt100 Ω 作为标准温度传感器对二极管温度传感器进行定标。在进行温度测量时，只需对二极管的电容进行测量，便可得到此时的环境温度。由于单个二极管的容值普遍较小，定标及测量具有一定困难，实验中将多个二极管进行了并联，测量时读取多枚二极管的并联电容，该操作可视为对同一型号二极管的 PN 结面积进行了扩大，在实际生产加工中可通过封装或生产大 PN 结面积的二极管代替此步骤。定标过程的设备结构示意图如图 1 所示，线路简化示意图如图 2 所示^[5]。



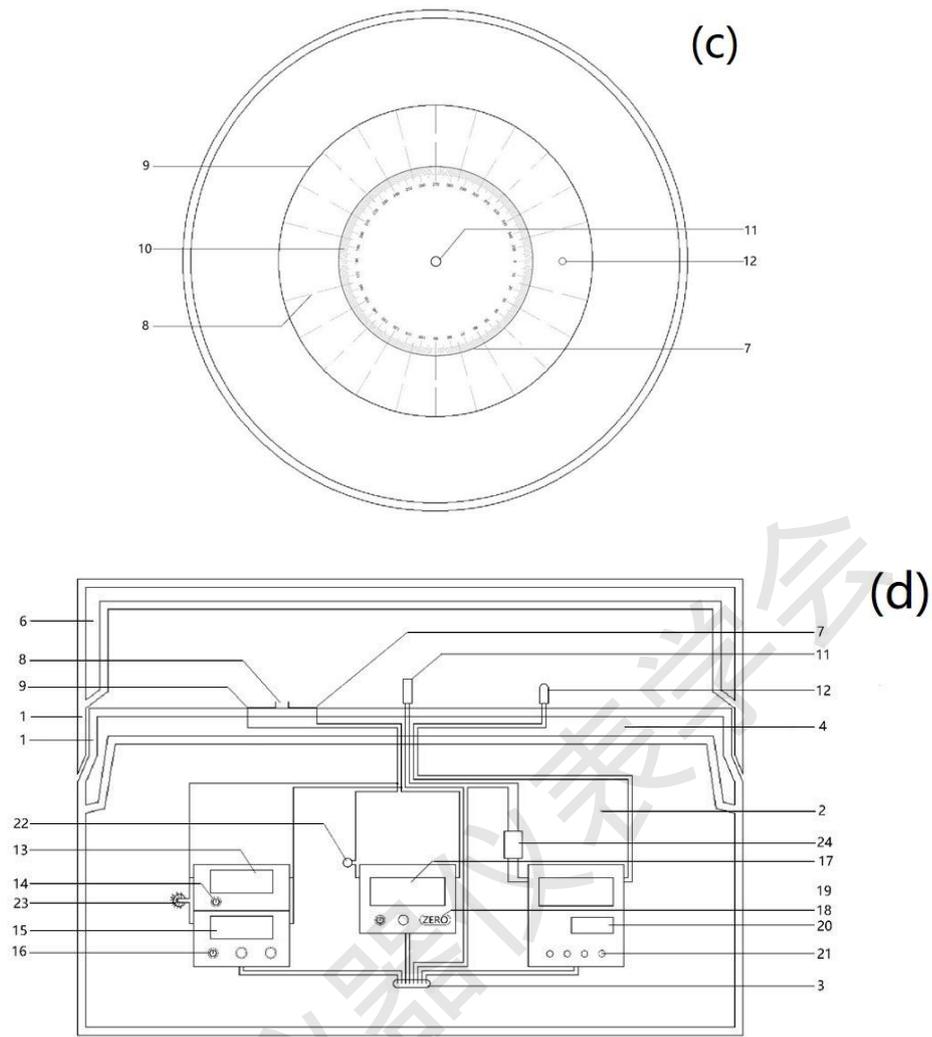


图 1 二极管结温与结电容关系特性的测定仪结构示意图 (a) 整体结构示意 1 (b) 整体结构示意 2 (c) 剖视结构示意图 (d) 内部测试平台俯视示意图

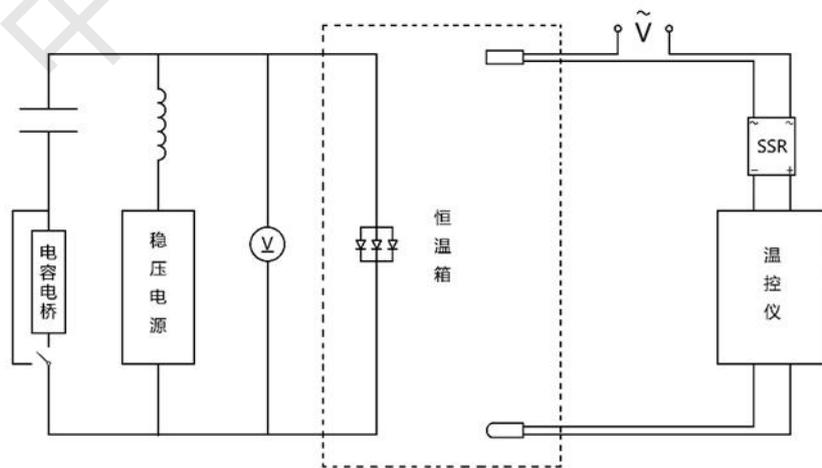


图 2 二极管电容测量线路示意图

二极管结温可在定标后，利用图 3 所示线路进行测量。首先根据电容电桥的测量速度给图中两个双循环时间继电器设置合适的工作周期 T_1 、 T_2 ： T_1 时间内，常开时间继电器（左）保持开路，常闭时间继电器（右）保持通路，二极管在稳压电源施加的正向偏压下保持工作状态，电容电桥不工作； T_2 时间内，常开时间继电器保持通路，常闭时间继电器保持开路，二极管处于 0 偏状态，电容电桥测量二极管 0 偏压下的电容。 T_1 应大于 T_2 ， T_2 应接近电容电桥测量的最短时间。当电容不再发生变化时，使用测温曲线即可读出该正向偏压下二极管的结温。

考虑到二极管的结电容效应主要表现在高频电压下，实验中电容测量涉及到的测量信号频率最低为 1kHz。

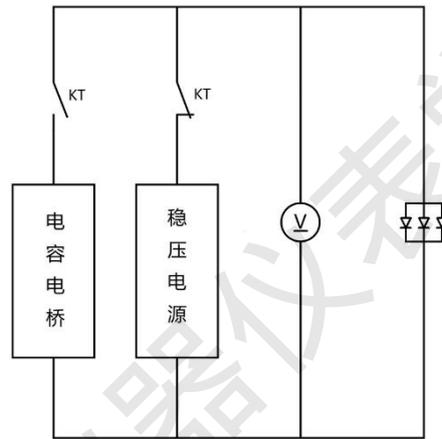


图 3 二极管结温测量线路示意图

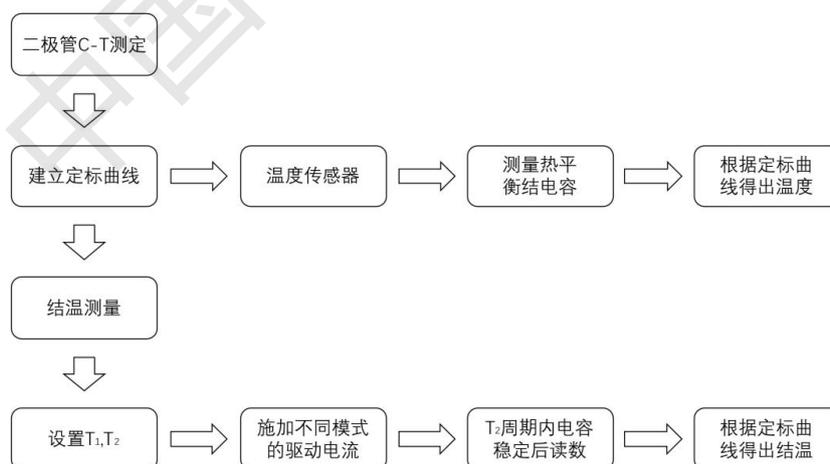


图 4 基于温变电容测量环境温度与结温流程图

3.4 实验验证过程

3.4.1 测温过程示例

以单个二极管结电容相对较大的 1N5819 肖特基二极管为例，使用 40 枚二极管在面包板上并联，在二极管所处偏压为 0V，电容电桥反接，测量信号的频率为 10kHz、峰值电压为 0.3V 的条件下进行实验，得到的多项式拟合测温曲线如图 5 所示：

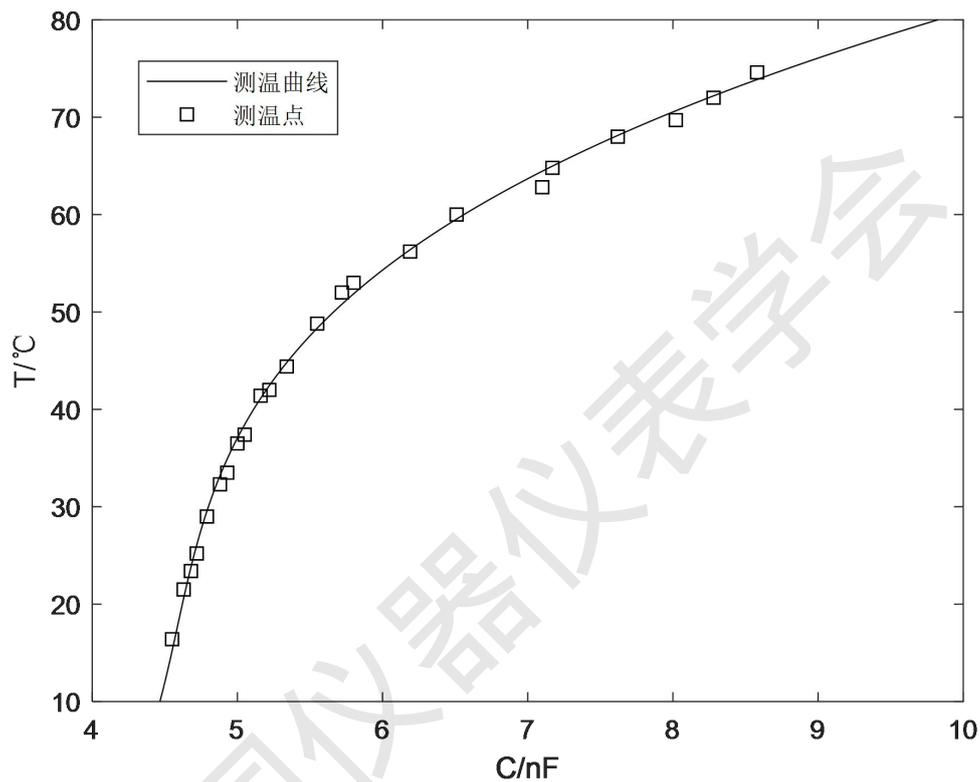


图5 肖特基二极管拟合测温曲线及实际温度测量点

该拟合曲线的决定系数达到了 0.9998，可以认为拟合效果良好。以定标时使用的铂热电阻所测得的温度作为该环境下的相对温度，使用该多项式拟合函数进行多次温度测量，所产生的最大绝对误差为 0.816℃。考虑到高温下肖特基二极管的 C-T 曲线拟合函数会失去单调性，重复性也会变差，我们将该组二极管温度传感器的上限温度设置为 80℃，传感器下限温度受实验条件所限未能做进一步测量，设为 0℃，由此计算得到的仪器精度等级为 1.02 级，满足《GBT 13283-2008 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级》中 1.5 级的标准。

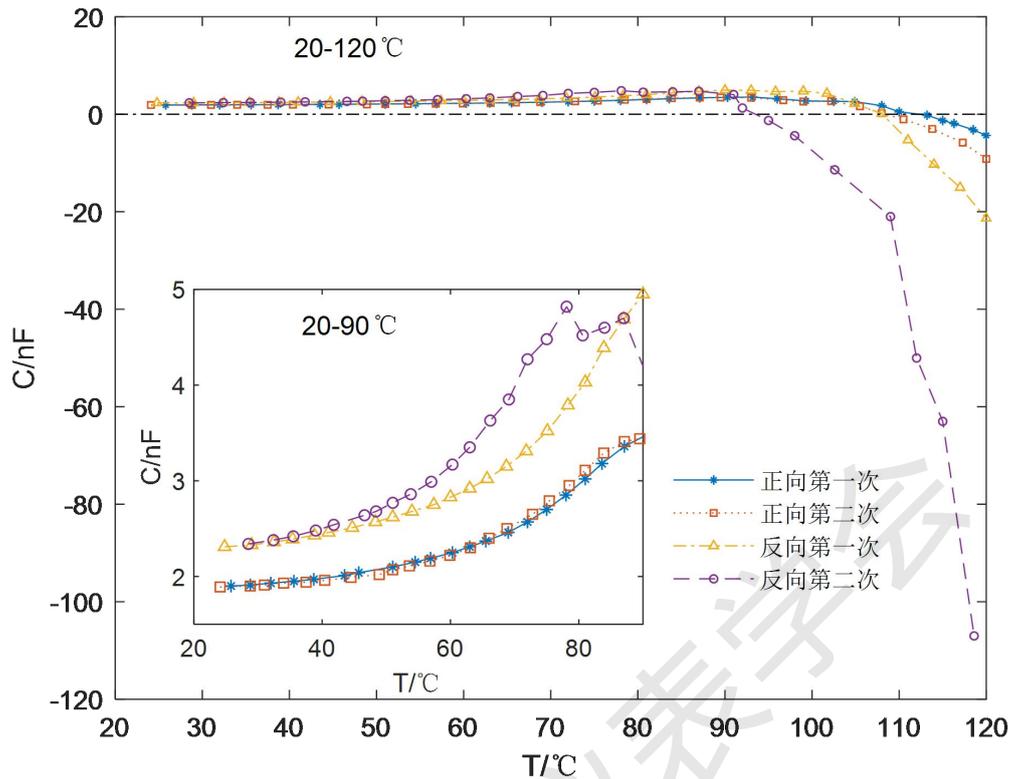


图6 肖特基二极管正反向测量电容各两次升温的C-T曲线

1N5819肖特基二极管在更高温度区间时的C-T曲线如图6所示。由于电容电桥两两表笔间始终有0.05mV的直流电压差，因此正反接测量的电容不同，正向接线时二极管处于0.05mV的反向偏压中。图像显示在超过一定温度后，肖特基二极管的电容不再随温度的升高而增大，而是迅速减小，甚至表现出负电容的特征，故而使用1N5819肖特基二极管进行温度测量时，我们将该组二极管温度传感器的上限温度设置为80°C。

在10kHz测量频率下的四次C-T测量中，肖特基二极管都出现了负电容现象，且在电容电桥反向接线时，也就是对二极管施加0.05mV的正向偏压时，负电容现象出现的温度更低、相同温度下负电容的绝对值更大；同一组二极管在第一次实验冷却后，第二次重复实验时，负电容现象出现的温度更低、相同温度下负电容的绝对值更大。目前，有关二极管中负电容现象的研究通常指出频率越低、正向偏压越大，负电容的绝对值越大，但温度对负电容的贡献却鲜有提及，也没有高温下低压高频的负电容现象报道。以往对负电容现象的解释可以概括为下三类：一是注入的载流子在某些深能级陷阱上被俘获；二是注入的载流子在多个能级上的多次俘获和发射；三是由于高阻器件上某种驰豫造成的电流对于电压的滞后[6]，但至今仍没有关于二极管负电容的定量解释。温度对负电容影响的引入或可对二极管负电容的理论探究提供新的切入点。

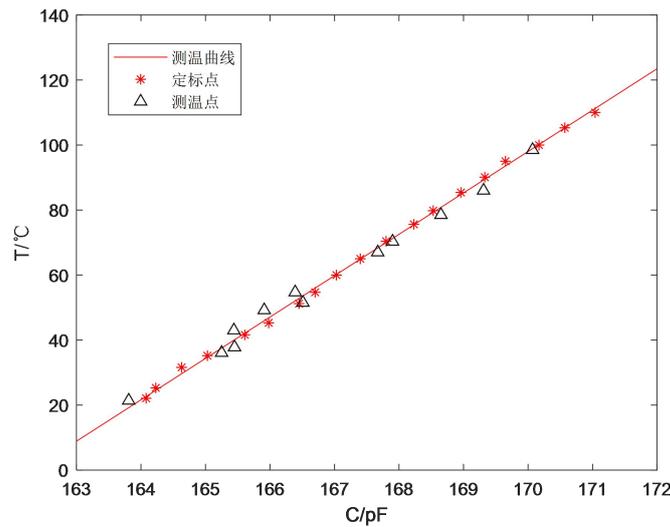


图7 红光LED测温效果示意图

使用 20 枚红光 LED 在面包板上并联，在二极管所处偏压为 0V 的条件下使用 500kHz、1.5Vrms 的测量信号进行实验，得到的拟合测温曲线如图 7 所示。由于发光二极管的 PN 结具有包含发光区、衬底层等的更复杂的分层结构，且寄生电容和边电容等对 LED 表观电容的影响也较大，其电容随温度的依变关系与肖特基二极管有较大差异，呈现明显的线性关系，这为拟合测温曲线带来了极大的便利。但由于发光二极管结电容较小，温度测量受电容测量的限制而误差较大，在多次温度测量中产生的最大绝对误差为 5.217°C，精度较差，仅适用于发光二极管结温测量领域，想要应用在其他温度测量方面还需进一步优化。

3.4.2 不同个数二极管测温

二极管的势垒电容和扩散电容都是面积的一次函数。在一定的实验条件下，PN 结面积更大的二极管，其结电容也会更大。同一电容电桥在测量结电容时的精度是有限的。通过扩大结面积，从而增大二极管结电容，可以在一定程度上降低由电容电桥测量精度不足带来的误差。根据电容器的并联公式，我们将多枚同一型号的二极管进行并联，从而实现对二极管结电容的扩大。在忽略边电容和寄生电容的情况下，这一操作与增大 PN 结的面积是等效的。

以单个二极管结电容相对较大的 1N5819 肖特基二极管为例，分别使用 10 枚、20 枚、30 枚和 40 枚二极管在面包板上并联，在频率为 10kHz、峰值电压为 0.3V 的测量信号下反接进行实验，实验结果如图 8 所示：

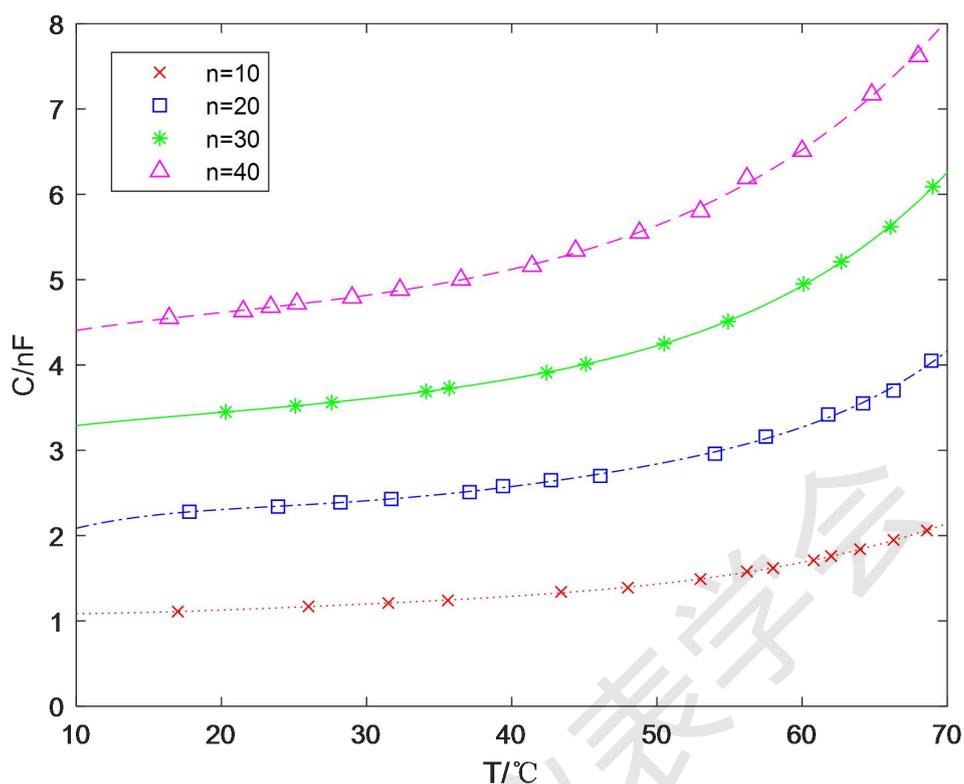


图8 不同个数并联的肖特基二极管的C-T曲线

图像展示了以上四组肖特基二极管的C-T特性曲线，这四条曲线具有较高的平行度。可以看出二极管个数更多的组别中，由温度变化带来的二极管电容的改变更为明显，因此我们认为随着二极管的增多，二极管温度传感器的精度将会提高，精度等级呈下降趋势。下面是以上四组不同二极管个数的精度等级：

表1 不同个数二极管组测温的最大误差和精度等级

二极管个数	10	20	30	40
最大误差/°C	1.384	1.816	0.894	0.816
精度等级	1.74	2.26	1.12	1.02

3.4.3 不同频率下测温

随着频率的变化，二极管的扩散电容将会发生改变。此外，材料的介电常数 ϵ 是频率的函数，因此二极管的电容还与测量频率有关。为了探究频率条件对二极管C-T曲线及温度测量的影响，我们分别在10kHz和1kHz的测量频率下进行了实验，实验条件为40枚肖特基二极管并联，测量信号的峰值电压保持0.3V不变。实验结果如图9所示：

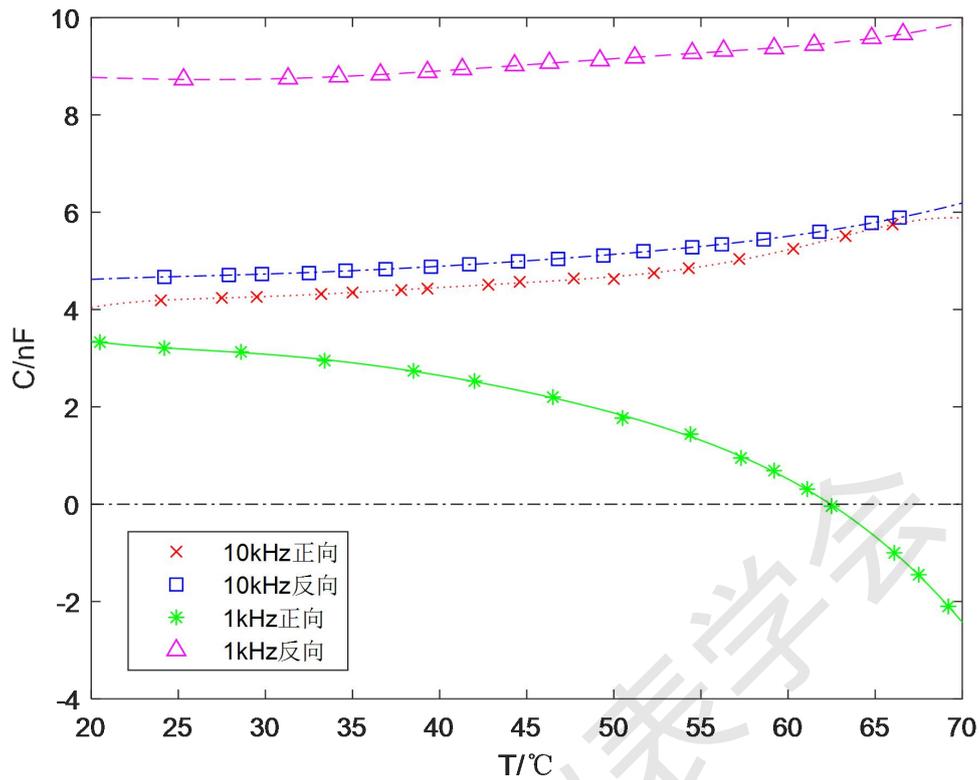


图 9 不同频率下肖特基二极管的 C-T 曲线

数据显示在不同的测量频率下 C-T 曲线形状和单调性都有着明显的区别。正向接线二极管处在 0.5mV 的反向偏压下，此时用 1kHz 的测试频率测量肖特基二极管的电容，发现电容随着温度的升高而逐渐降低，且在 62°C-70°C 的温度区间内电容降低到了负值。但在相同频率反向接线及 10kHz 下，二极管的电容在 20°C-70°C 的温度区间内均保持正值且随温度升高而增大。在相同温度和测量频率下，二极管反接（正向 0.5mV 偏压）的电容更大，且两种接线方向的差值在较低的测量频率下更大，因此推测引起这种差距的主要因素在于少数载流子的积累过程引起的扩散电容，扩散电容在较大的正向偏压和低频的电压下会具有更大的值。扩散电容是温度的函数，其容值满足公式（5），但扩散电容对二极管总电容值的贡献应该是正值，这与实验观察到的负电容现象相违背，说明除了扩散电容机制外，还应该另外对电容有不明贡献的机制存在^[7-10]。

1kHz 下，正向接线时，多次测温的最大误差为 1.590°C，精度等级为 1.99 级；反向接线时，最大误差为 3.378°C，精度等级为 4.22 级。对于温度的测量，本文实验使用的 UTR2811DLCD 数字电桥在高频下测量电容的精度更高，从而测温精度更高。但是由于对于各类二极管而言，频率的改变还会带来 C-T 曲线形状的变化，拟合函数的选取也应当随之调整，从而影响测温精度。

3.4.4 不同偏压下测温

二极管的结电容会随外加电压而变化。为了探究二极管所处偏压的变化是否会导致该二极管 C-T 曲线的改变，以及这种改变对温度传感器精度等级的影响，我们将 40 枚并联肖特基二极管置于不同的偏压下进行了温度传感器的实验。由于 UTR2811DLRCR 数字电桥在施加反向偏压的电路中会发生跳变，该组实验测量使用稳定性相对较低的 MLC500 型电容电感表在 500kHz、1.5Vrms 的测量信号下完成。二极管处于 0.5V、1.0V、1.8V、2.4V、3.8V、5.0V 的反向偏压下时的 C-T 曲线如图 10。由于该测量信号的峰值电压较高，在 0V 及正向偏压下进行测量时，肖特基二极管自热效应明显，对实验影响较大，故未进行 0V 及正向偏压下的实验。

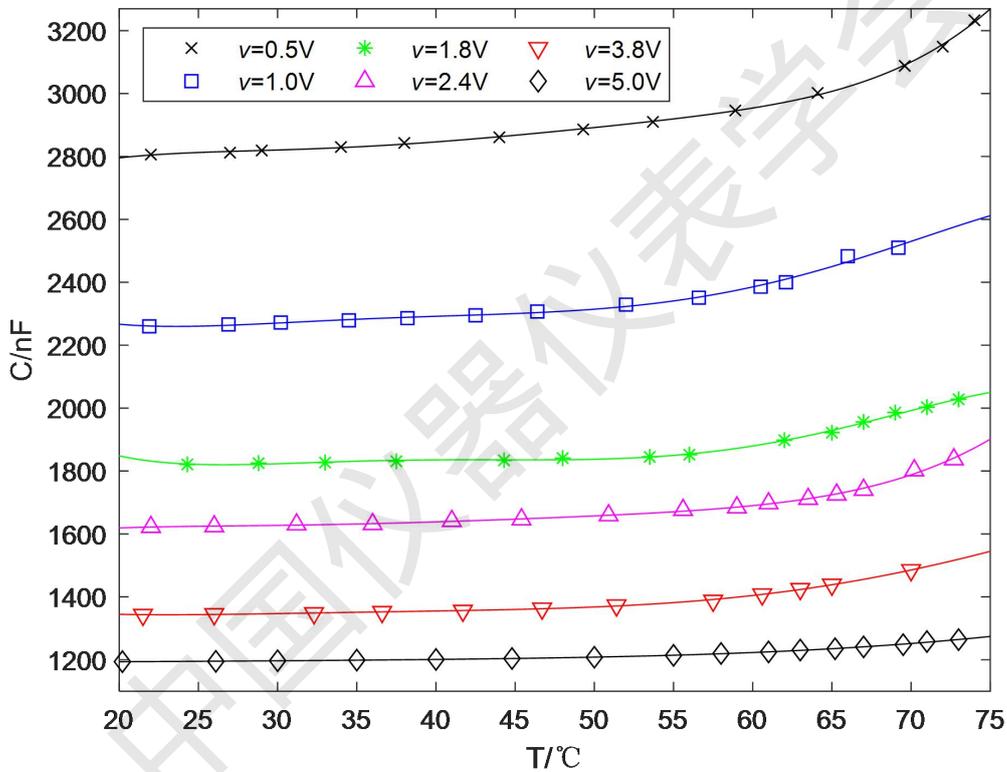


图 10 不同偏压下肖特基二极管的 C-T 曲线

表 2 不同偏压下 40 枚肖特基二极管测温的最大误差和精度等级

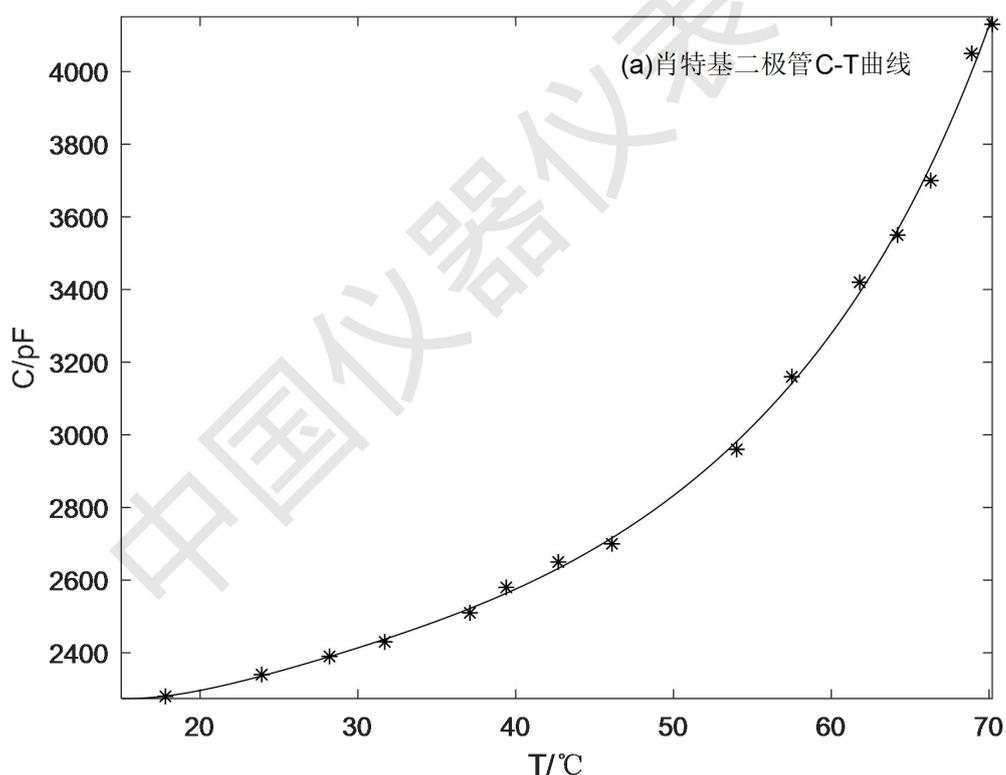
反向偏压/V	0.5	1.0	1.8	2.4	3.8	5.0
最大误差/°C	1.119	0.886	3.478	3.365	1.490	3.188
精度等级	1.39	1.11	4.35	4.21	1.86	3.99

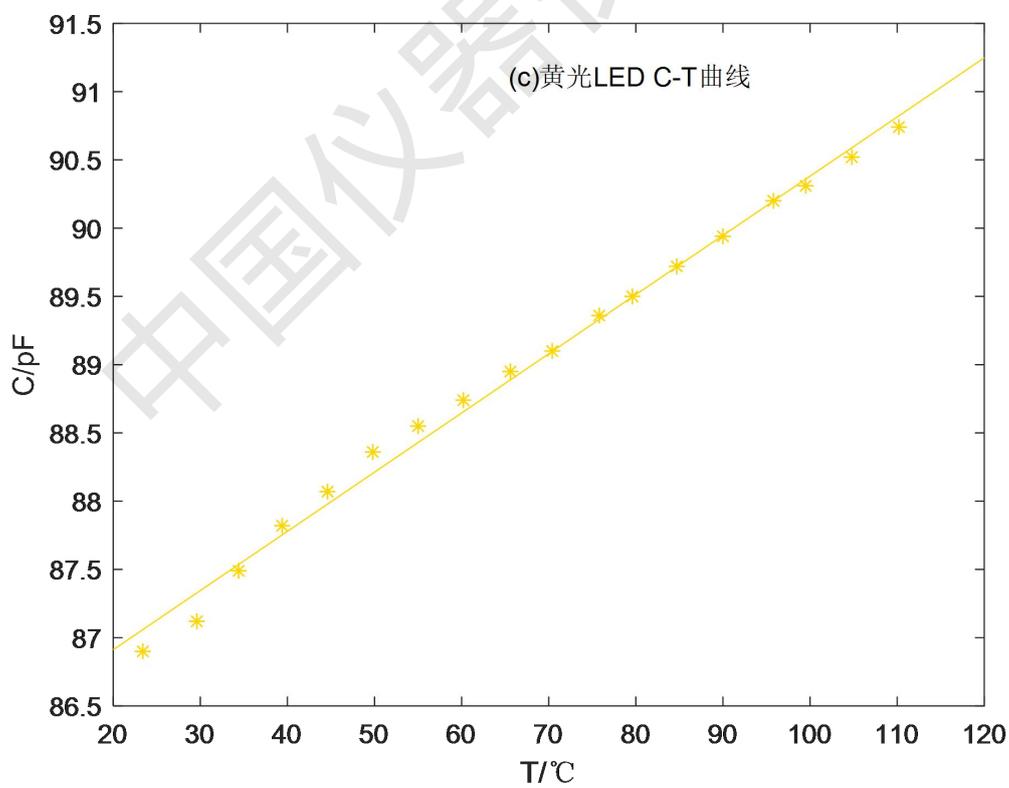
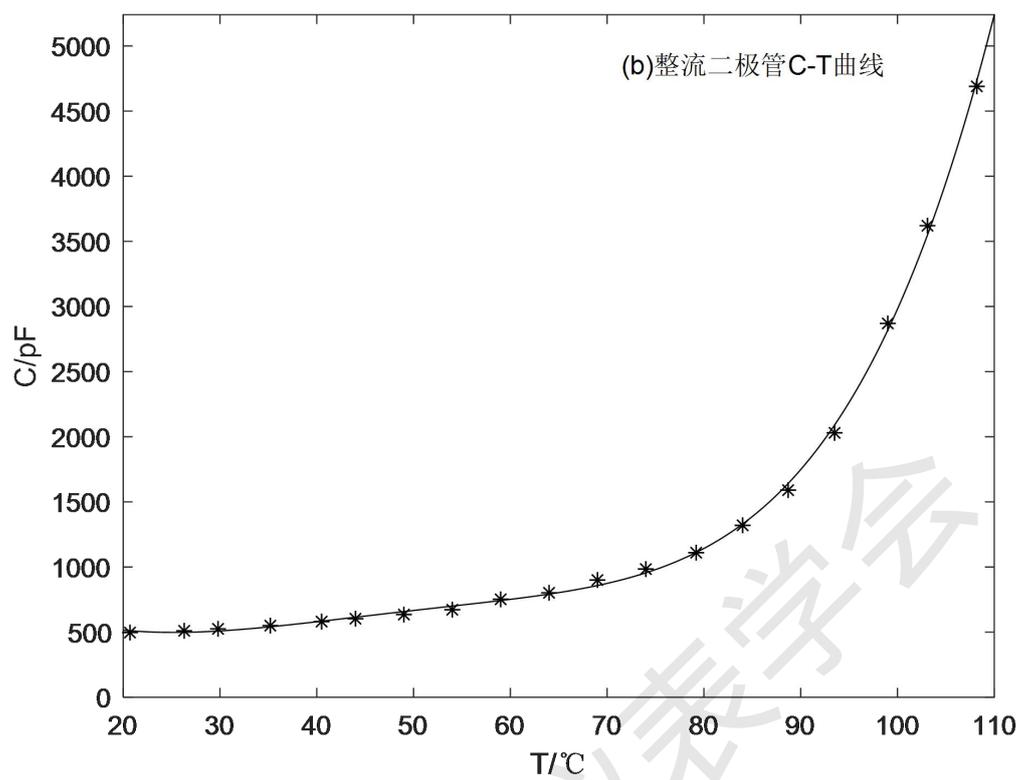
图中显示在较大的反向偏压下二极管的电容较小，电容随温度变化的幅度也随之减小，C-T 曲线趋于平缓，但曲线形状和单调性并无明显变化。由于定标曲线以及温度测量受电容电感表和铂热电阻误差的制约，精度随反向偏压的变化并未呈现出明显的规律性，但总

体仍能保持较高精度。由于二极管所处正向偏压越大时，其结电容越大，温度改变带来的电容的变化越明显，故认为二极管所处正向偏压越大时，温度传感器精度等级越低。然而，当二极管处于较大正向偏压时，其自热效应将会加强，对温度测量带来很大影响。在实际测量应用中，应根据温度传感器对精度的需求、测量时的峰值电压以及辐射干扰的大小，将二极管温度传感器至于合适的反向偏压下进行温度测量。

3.4.4 不同种类二极管的 C-T 测量

为了探究其它二极管的 C-T 特性及其在温度测量方面的适用性，另外选择了其余四种型号的二极管各 20 枚并联进行试验，包括 Si 基 1N4007 整流二极管，黄光发光二极管，绿光发光二极管，红光发光二极管，其 C-T 曲线如图 11 所示。肖特基二极管和整流二极管的电容使用 UTR2811DLCR 数字电桥在 10kHz、0.3V 的测量信号下测得，发光二极管电容使用 MLC500 型电容电感表在 500kHz、1.5Vrms 的测量信号下测得。





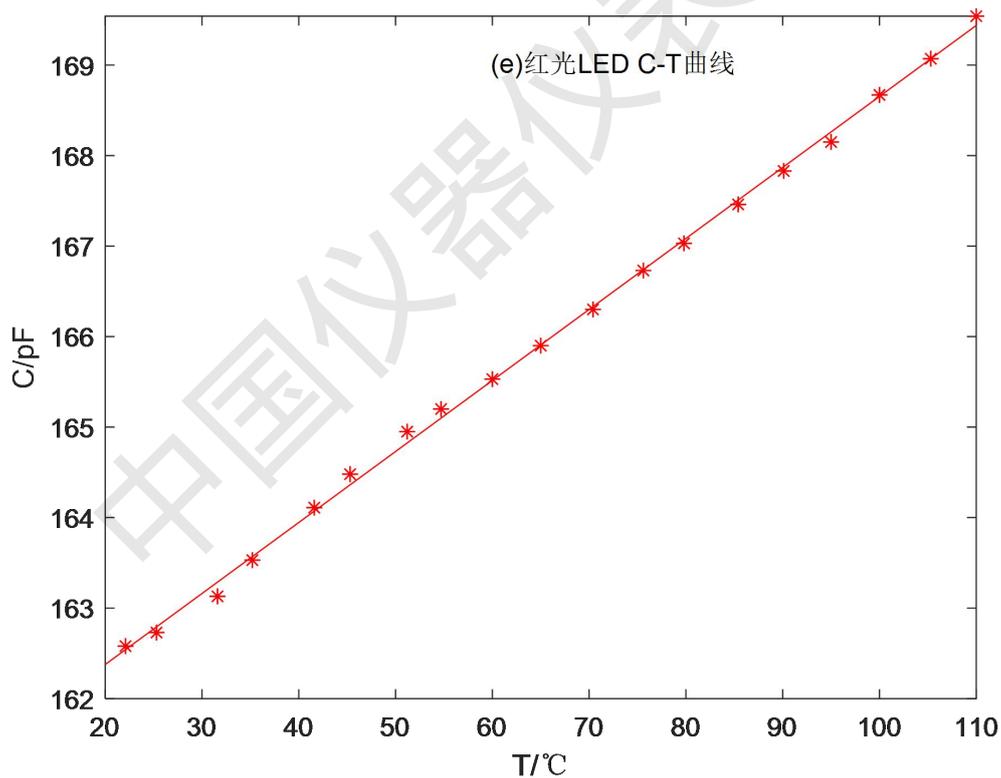
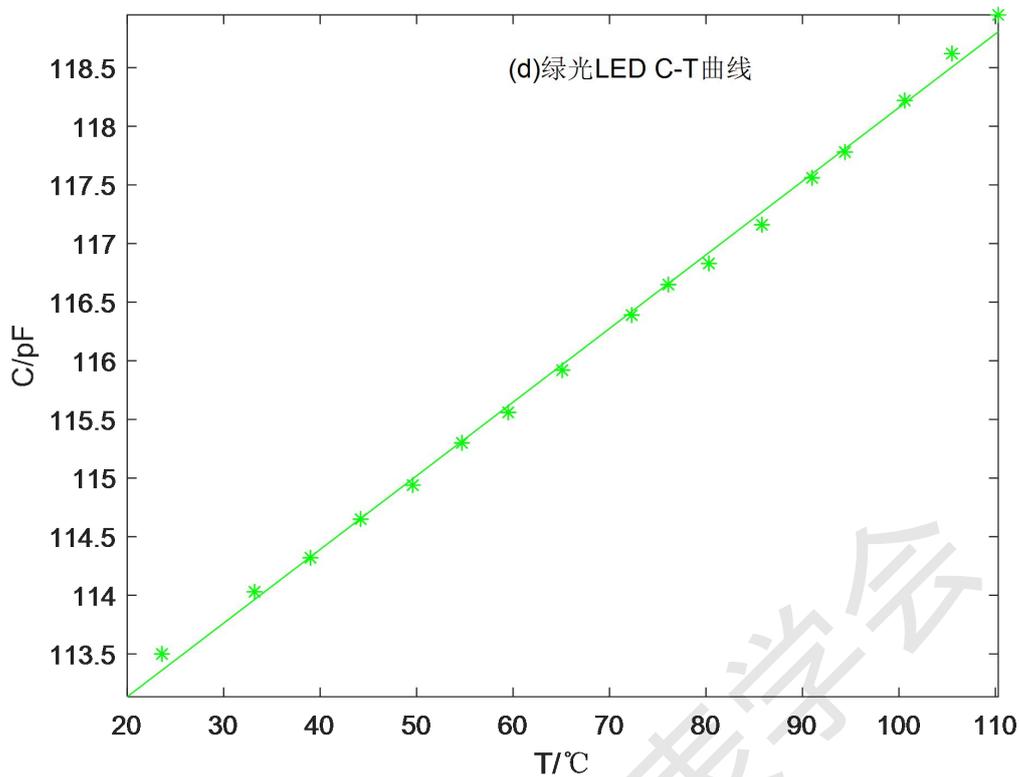


图 11 不同二极管的 C-T 曲线 (a) 肖特基二极管, (b) 整流二极管, (c) 黄光 LED, (d) 绿光 LED, (e) 红光 LED.

不同二极管的 C-T 曲线有较大差异,其中三种不同颜色的发光二极管的 C-T 曲线在 20°C -110°C 内都近似为一条直线。下表为使用上述曲线进行多次测温得到的温度传感器精度数据。

可以看出,使用其它型号的二极管作为温度传感器进行测温仍具有较高的精度。

表 3 20 枚不同种类二极管测温的最大误差和精度等级

二极管种类	n	最大误差/ $^{\circ}\text{C}$	精度等级
肖特基二极管	20	1.816	2.26
整流二极管	20	1.816	1.58
红色 LED	20	5.831	4.86
绿色 LED	20	3.046	2.54
黄色 LED	20	5.428	4.52

1N5819 肖特基二极管具备较大的结电容,因此在实验中测温精度较高,但当使用 10kHz 高频率测量信号测量肖特基二极管结电容时,在更高的温度区间内,肖特基二极管 C-T 曲线的重复性和单调性都会被破坏,这限制了肖特基二极管温度传感器的测温范围和精度等级。1N4007 整流二极管结电容较大, C-T 曲线在实验温度范围内保持单调,通过扩大测温曲线定标的温度区间可以提升其精度等级,在温度测量方面性能优良。实验使用的三种发光二极管的结电容相对较小, C-T 曲线在实验温度范围内保持单调且接近于直线,我们认为电容与温度线性关系的下降来自于面包板温度升高带来的二极管组电容变化,通过并联多枚 LED 芯片或制备结电容更大的发光二极管可以使温度与结电容呈现良好的线性关系,通过扩大测温曲线定标的温度区间可以提升其精度等级,可以使发光二极管具备更优良的测温性能。

参考文献:

- [1] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社,2017
- [2] 孟庆巨,刘海波,孟庆辉. 半导体器件物理[M]. 北京: 科学出版社,2005
- [3] ZHAO Y, WEI A X, LIU J. Junction temperature measurement of light-emitting diodes using temperature-dependent capacitance [J]. Acta Phys. Sinica, 2015, 64 (11) :118501.
- [4] 殷之文. 电介质物理学[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 1989
- [5] 许墨扬,杨智博,肖凌峰,李欣耘,程千顺,年桂君. 一种二极管结温与结电容关系特性的测定仪[P]. 吉林省: CN217213008U,2022-08-16.
- [6] 赵锋. 半导体二极管中负电容的表征和测量 [D]. 天津:天津大学,2003. DOI:10.7666/d.y539137.]
- [7] 曾志斌,朱传云,李乐,赵锋,王存达.GaN 蓝光发光二极管的负电容现象研究[J].光电子·激

光.2004,15 (4) .402-405.doi:10.3321/j.issn:1005-0086.2004.04.006.

- [8] C. D. Wang,C. Y. Zhu,G. Y. Zhang, 等 .Accurate electrical characterization of forward AC behavior of real semiconductor diode: giant negative capacitance and nonlinear interfacial layer[J].IEEE Transactions on Electron Devices.2003,50 (4) .1145-1148.
- [9] X. Wu,E. S. Yang,H. L. Evans.Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces[J].Journal of Applied Physics.1990,68 (6) .2845
- [10] 谭延亮,游开明,袁红志. 发光二极管负电容与复合发光关系[J]. 发光学报,2009,30 (5) :644-648.

中国仪器仪表学会