

物理实验



基于 LED 的光量子理论测量普朗克常量

陈霞 孙太宇 何宇飞 林凡宸 梁晓森 冯列峰

(天津大学理学院物理系物理实验中心, 天津 300354)

摘要 普朗克常量在物理学中具有非常重要的意义, 可根据 LED 的光量子理论, 对普朗克常量进行测量。LED 是一种常见的半导体器件, 其电学特性和光学特性容易受到温度的影响。本文利用自制的可调恒温器对 LED 进行控温, 测量了不同温度下 LED 的阈值电压和峰值波长。实验表明, 随着 LED 温度的升高, 其阈值电压降低, 同时峰值波长红移。基于光量子理论, 进一步对 LED 的阈值电压和峰值波长进行数据处理, 将阈值电压和频率做直线拟合, 从拟合直线的斜率得到普朗克常量。

关键词 普朗克常量; 发光二极管; 伏安特性; 峰值波长

MEASUREMENT OF PLANCK CONSTANT BASED ON LED QUANTUM THEORY

CHEN Xia SUN Taiyu HE Yufei LIN Fanchen LIANG Xiaosen FENG Liefeng

(Department of Physics, Faculty of Science, Tianjin University, Tianjin 300354)

Abstract Planck constant is of great significance in physics. Planck constant can be measured according to LED quantum theory. LED is a common semiconductor device, its electrical and optical characteristics are easily affected by temperature. The threshold voltage and peak wavelength of LED at different temperatures are measured by using a self-made adjustable thermostat to control the temperature of LED. The experimental results show that the threshold voltage of LED decreases and the peak wavelength shifts red with the increase of temperature. Based on the light quantum theory, the threshold voltage and peak wavelength of LED are processed. The threshold voltage and frequency are fitted in a straight line, and Planck constant is obtained from the slope of the fitting line.

Key words Planck constant; light-emitting diode; voltammetric characteristics; peak wavelength

普朗克常量是物理学中极其重要的一个常量, 它是联系物质的粒子性与波动性的重要参数, 是量子世界和可观测量子效应的基本标志。它的精确测定对于质量计量的物理基准建立、量子效应精密测量及早期宇宙大爆炸物理特性研究等都有重要意义^[1]。特别是在第 26 届国际计量大会上, 基于普朗克常量重新定义了质量的单位千克,

标志着国际单位制全面进入量子化时代^[2]。测量普朗克常量的方法主要有: 光电效应方法^[3], 根据爱因斯坦光电效应方程, 通过测量截止电压和入射光频率之间的线性关系来计算普朗克常量; 黑体辐射方法^[4], 根据黑体辐射强度的频率分布, 进行分析后可通过玻耳兹曼常数计算出普朗克常量; 玻尔理论方法^[5], 根据玻尔的氢原子理论, 通

收稿日期: 2022-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12274319, 61804010, 11204209); 天津市自然科学基金面上项目(17JCYBJC16200); 天津大学校级重点教改项目(No. Z202122)。

作者简介: 陈霞, 女, 工程师, 主要从事物理实验教学工作, chenxia1983@tju.edu.cn。

通讯作者: 冯列峰, 男, 副教授, 主要研究方向为半导体光电子器件与物理、2D 材料及器件, fengliefeng@tju.edu.cn。

引文格式: 陈霞, 孙太宇, 何宇飞, 等. 基于 LED 的光量子理论测量普朗克常量[J]. 物理与工程, 2023, 33(5): 41-45.

Cite this article: CHEN X, SUN T Y, HE Y F, et al. Measurement of Planck constant based on LED quantum theory[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(5): 41-45. (in Chinese)

过测量原子跃迁时辐射出光子的波长,并确定光子跃迁前后的能级,即可得出普朗克常量。此外还有:量子霍尔效应方法^[6]、基布尔秤测量方法^[7]、电压天平测量方法^[8]等。其中,利用光电效应测量普朗克常量是大学物理实验中非常经典的方法。但是,光电管中的暗电流等因素会对测量结果产生影响。在文献[9]和文献[10]中,提出了基于LED的伏安特性及光谱特性测量普朗克常量的方法。该方法采用单色LED,元器件容易获得,价格低廉,操作简单方便。通过测量LED的阈值电压和峰值波长,得到普朗克常量。但是结果表明,在LED发光发热的过程中,会导致阈值电压和峰值波长的漂移,造成普朗克常量的测量结果误差较大。这是因为LED属于电致发光器件,与传统光源的发光原理不同,传统光源通过辐射散热,但是LED不能通过这种方式散热,从而导致器件温度容易升高,严重影响LED的光通量、寿命以及可靠性,因此采用LED测量普朗克常量时,考虑温升的影响有着重要的实际意义。

本文中,利用自制的可调恒温器,将不同颜色LED器件封闭其中,在充分考虑温升效应后,详细测量了LED的伏安特性以及光谱特性,并通过拟合数据,精确计算出了普朗克常量。

1 实验原理和装置

发光二极管的核心是PN结,由含有镓、砷等物质的材料制成,是一种非线性元器件,其伏安特性与一般的二极管相似。当对LED外加反向电压时,只有微安量级的反向电流;当反向电压超过击穿电压时,LED被击穿损坏。当LED的外加正向电压低于阈值电压时,LED不导通,几乎没有电流,也不发光;当LED的外加正向电压高于阈值电压时,LED内的电子和空穴复合,同时以辐射光量子的形式释放能量。

根据LED的光量子理论,电子和空穴复合时,电场力对电子做的功 $W=eU_{th}$,辐射出的光量子的能量 $E=h\nu$,在不计能量损失的情况下,电场力对电子做的功全部转化为光量子的能量 $W=E$,由此可得 $h\nu=eU_{th}$,即 $h=eU_{th}/\nu$,其中, e 为电子的电荷量, U_{th} 为LED的阈值电压, h 为普朗克常量, ν 是光量子的频率。再根据光速 c 和波长 λ 、频率 ν 的关系 $c=\lambda\nu$,可得普朗克常量的计算公式为

$$h = \frac{e}{c} \lambda U_{th} \quad (1)$$

由此可见,精确测量出LED的阈值电压 U_{th} 和波长 λ 是计算普朗克常量 h 的关键。但值得注意的是,温度变化会影响LED的伏安特性、波长、光通量、照度、寿命以及可靠性等。在电流一定时,温度越高,LED的电压越低。此外,温度升高还会导致LED发光红移。这些都会影响普朗克常量测量结果的准确性。因此,对于实际工作中的LED器件,必须考虑温度对器件电学和光学特性的影响。测量不同温度下,LED的阈值电压和峰值波长,得出阈值电压和发光频率的线性关系,从拟合直线的斜率计算出普朗克常量。

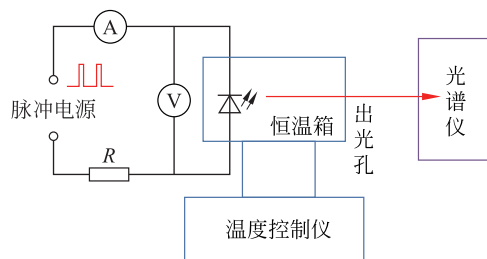


图1 实验装置图

采用单色LED、利利普AG1022信号发生器、固纬GDM-8341数字万用表、港东WGD-5型多功能光栅光谱仪、自制可调恒温器搭建普朗克常量测量装置,如图1所示。实验中选用1W的LED灯珠,蓝光LED的工作电压约为3V,额定电流约为350mA;红光LED的工作电压约为2V,额定电流约为350mA。选用脉冲电源,在较小占空比的脉冲直流驱动下,LED芯片温度无法升高且近似等于温控室温度^[11]。在测量过程中,LED始终置于恒温箱内。将LED的正向电压由零开始缓慢增大,记录相应的电压和电流,可得到不同温度下的LED伏安特性曲线。在伏安特性测量电路中,选用数字万用表的直流电压5V挡,分辨率为0.1mV;直流电流500mA挡,分辨率为0.01mA。光栅光谱仪的波长扫描范围为200.0~800.0nm,扫描间隔0.1nm。在不同温度下测出LED的峰值波长。

本实验的控温装置是利用废旧仪器改造而成的。利用固体导热系数测量仪,设计制作可调恒温器。将实验室淘汰报废的老旧设备进行改造,用于物理实验是非常有意义的。随着科学技术的不断发展,有的仪器设备因性能不良或产品更新换代而被淘汰,有的仪器设备因年久失修零件老

化、到了使用的年限而报废。在教学型实验室中,这些淘汰或报废的仪器数量随着经济社会的发展逐年增多。虽然这类仪器设备被淘汰或报废,但它们在实验教学中仍有余热可以发挥,充分利用这些废旧仪器设备,能够在培养学生的创新精神和创新能力方面起到很大的作用。

固体导热系数测量仪,因仪器达到使用年限,设备老化性能不良,且已有新型智能产品对其更新换代而被淘汰。虽然该仪器已经不能完成原来的实验教学任务,但是仪器中的加热装置仍然是可以使用的。对该设备中的加热装置进行再利用,增加了定制的亚克力板和保温盒,自制了可调恒温器。自制可调恒温器包括上下两部分,上方恒温箱,下方温度控制仪。被测 LED 置于上方恒温箱内,恒温箱内放置温度传感器,通过下方的温度控制仪进行调控,实现恒温条件。在恒温箱侧壁开一小孔,可以通过小孔观察 LED 的发光情况,也可以通过小孔透出的光,用光栅光谱仪测量 LED 的波长。温度控制仪位于恒温箱下方,由定制的亚克力板作为仪器盒,内部置有加热电源、温差电偶等元件,仪器盒正面的面板设置数字温度显示屏。改造完成的自制可调恒温器如图 2 所示,控温方式为铂电阻温度传感器 PID 控温,控温区间为室温约 110.0°C ,控温精度为 0.1°C 。

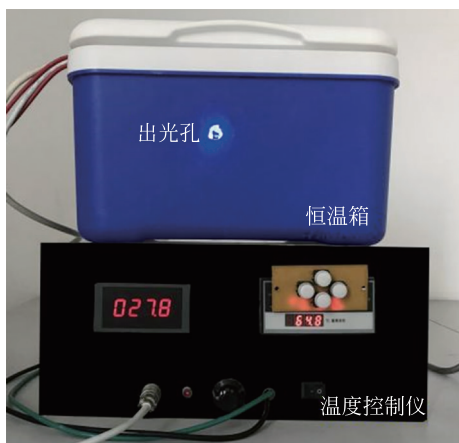


图 2 自制可调恒温器

2 实验结果分析

在本实验中,将 LED 置于自制可调恒温器内控制温度,测量 LED 正向伏安特性。为便于分析,本文以 10.0°C 为间隔,测量了从 $30.0\sim 90.0^{\circ}\text{C}$ 范围内 LED 的电流和电压,绘制出各温度下的伏安

特性曲线簇。图 3(a)是蓝光 LED 在不同温度下的伏安特性曲线。同样的方法,测量了红光 LED 从 $30.0\sim 90.0^{\circ}\text{C}$ 范围内的电流和电压,绘制出各温度下的伏安特性曲线簇。图 3(b)是红光 LED 在不同温度下的伏安特性曲线。

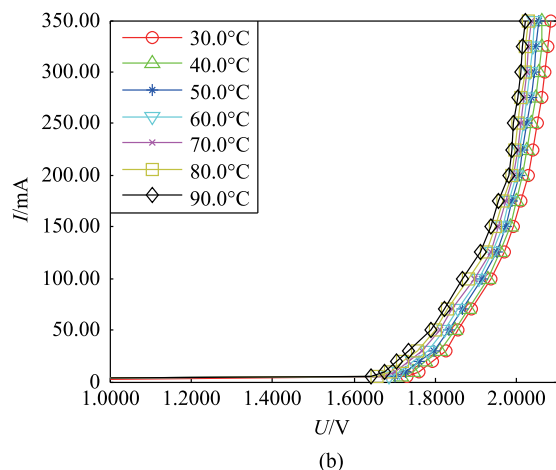
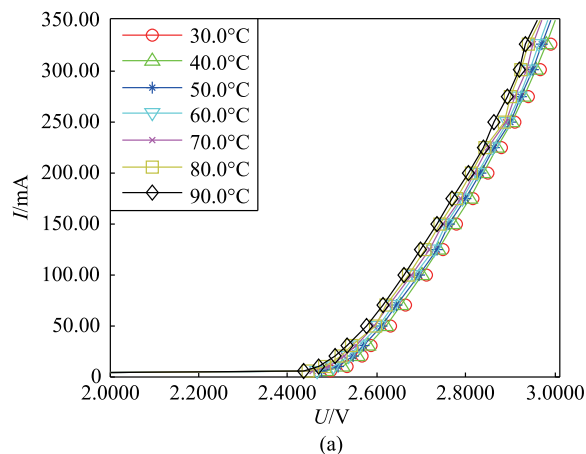


图 3 不同温度下 LED 正向伏安特性曲线

(a) 蓝光 LED 伏安特性曲线; (b) 红光 LED 伏安特性曲线

从图中可以看出,LED 的伏安特性曲线随着温度的升高而向低压偏移,说明阈值电压降低。在不同电流下的电压随温度升高而减小的幅度有所不同,当电流比较小时,电压随温度升高而减小的幅度较小,当电流比较大时,电压随温度升高而减小的幅度较大。这是因为,当 LED 导通后正常发光时其内阻几乎可以忽略不计,并且 $I-U$ 数据具有良好的线性关系,因此利用这段工作区的曲线变化趋势可以确定 LED 正向导通的阈值电压。

选取 LED 伏安曲线工作区的电流和电压数据进行直线拟合,拟合出的直线与横轴的交点即为阈值电压。以蓝光 LED 在温度为 30.0°C 时的伏安特性曲线为例,如图 4 所示。选取电流 $I \geq$

200.00mA 的数据点,对其进行直线拟合,拟合出的直线与横轴的交点即为阈值电压。同样的方法,选取温度为 40.0~90.0℃时蓝光 LED 伏安曲线工作区的电流和电压的数据,分别进行直线拟合,求出相应温度下的阈值电压。表 1 给出了 30.0~90.0℃蓝光 LED 的阈值电压。图 5(a)给出蓝光 LED 阈值电压随温度的变化曲线。从图中可以看出,随着温度的升高,LED 的阈值电压逐渐降低。

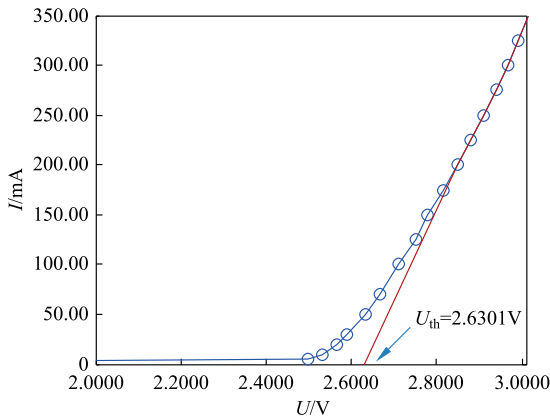


图 4 在 30.0℃下的蓝光 LED 伏安特性曲线

T/℃	蓝光 LED		红光 LED	
	U_{th}/V	λ/nm	U_{th}/V	λ/nm
30.0	2.6301	466.5	1.9526	628.0
40.0	2.6278	467.0	1.9468	629.4
50.0	2.6229	467.6	1.9421	631.0
60.0	2.6206	467.9	1.9405	632.1
70.0	2.6188	468.3	1.9350	633.4
80.0	2.6164	468.7	1.9300	635.0
90.0	2.6115	469.5	1.9237	636.9

用光栅光谱仪测量 LED 的峰值波长。将蓝光 LED 置于自制可调恒温器内,控制温度为 30.0℃,通过恒温箱侧壁的出光孔,观察 LED 的发光情况,用光栅光谱仪进行波长扫描,测量出蓝光 LED 在 30.0℃时的峰值波长。同样的方法,可得到 40.0~90.0℃时蓝光 LED 的峰值波长。表 1 给出了 30.0~90.0℃时蓝光 LED 的峰值波长。图 5(b)给出蓝光 LED 峰值波长随温度的变化曲线。从图中可以看出,随着温度的升高,LED 的峰值波长发生红移。

进一步,选取不同温度下红光 LED 伏安曲线工作区的电流和电压的数据,分别进行直线拟合,

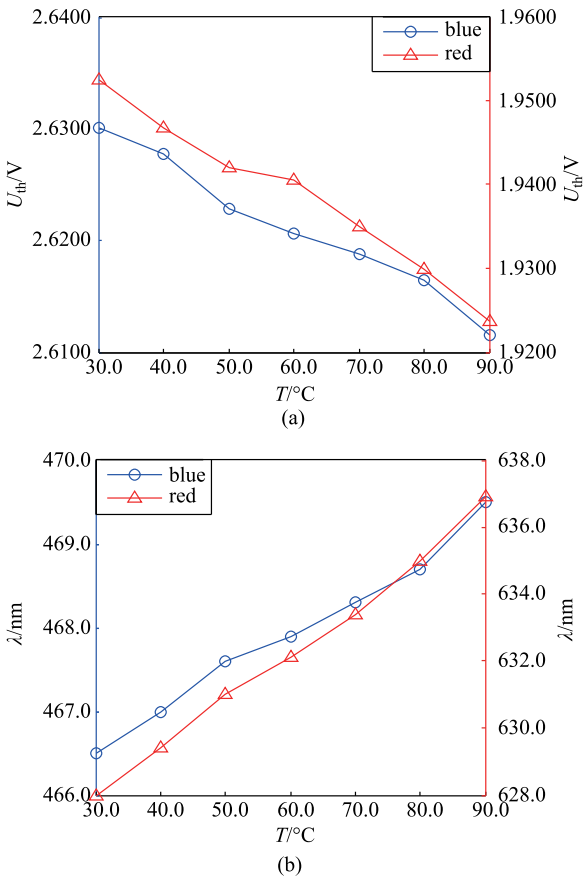


图 5 阈值电压和峰值波长随温度变化曲线
(a) 阈值电压随温度变化曲线; (b) 峰值波长随温度变化曲线

求出相应温度下的阈值电压。表 1 给出了 30.0~90.0℃红光 LED 的阈值电压。图 5(a)给出红光 LED 阈值电压随温度的变化曲线。从图中可以看出,红光 LED 的阈值电压随着温度的升高逐渐降低。用光栅光谱仪测量不同温度下红光 LED 的峰值波长。

表 1 给出了 30.0~90.0℃红光 LED 的峰值波长。图 5(b)给出了红光 LED 峰值波长随温度的变化曲线。从图中可以看出,红光 LED 的峰值波长随着温度的升高发生红移。

根据测量得到的不同温度下的阈值电压,以及不同温度下的峰值波长,将相同温度下的阈值电压和峰值波长一一对应起来。并将波长、频率和光速的关系 $\nu=c/\lambda$,代入公式(1),可得阈值电压和频率呈线性关系,其表达式为

$$U_{th} = \frac{h}{e}\nu \tag{2}$$

将阈值电压 U_{th} 和频率 ν 拟合直线,直线的斜率为 $k=h/e$,即可得出普朗克常量 $h=ke$ 。图 6(a)和图 6(b)分别给出蓝光 LED 和红光 LED 阈值电压

U_{th} 和频率 ν 拟合的直线。蓝光 LED 和红光 LED 直线斜率分别为 4.0884×10^{-15} V/Hz 和 4.0858×10^{-15} V/Hz, 计算得到的普朗克常量 h 的值分别为 6.541×10^{-34} J·s 和 6.537×10^{-34} J·s。当置信概率为 95% 时, 用蓝光 LED 和红光 LED 测量得到的普朗克常量 h 的不确定度分别为 0.002×10^{-34} J·s 和 0.003×10^{-34} J·s, 测量结果可以分别表示为 $h_{\text{蓝}} = (6.541 \pm 0.002) \times 10^{-34}$ J·s 和 $h_{\text{红}} = (6.537 \pm 0.003) \times 10^{-34}$ J·s。普朗克常量的公认值为 $h_0 = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, 可以看出, 本文所采用的方法, 考虑了温度对 LED 器件的影响, 得到的测量结果接近理论值。

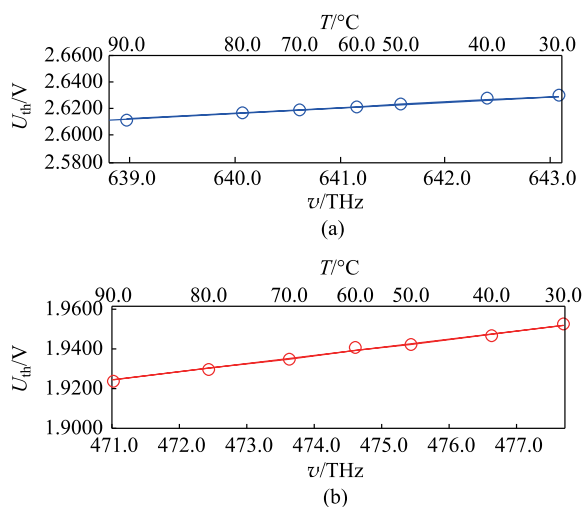


图6 阈值电压与频率的关系曲线
(a) 蓝光 LED 关系曲线; (b) 红光 LED 关系曲线

3 结语

基于 LED 的光量子理论测量了普朗克常量, 考虑温度的变化会造成 LED 的阈值电压和峰值波长漂移, 通过测量不同温度下 LED 的伏安特性曲线, 得出了阈值电压随温度的变化曲线, 以及峰值波长随温度的变化曲线。结果表明, 随着温度的升高, LED 的阈值电压降低, 同时峰值波长红移。对 LED 在不同温度下的阈值电压和频率拟合直线, 从拟合直线的斜率精确得到了普朗克常量。结果表明, 考虑温升对 LED 的阈值电压和峰值波长的影响, 可使普朗克常量的计算结果更加准确。

但值得注意的是, 实验中 LED 的电能并没有完全转化为光能, 总会有部分热能产生, 测量也存

在着一定的误差。

参 考 文 献

- [1] 邓崇林. 以量纲分析重新发现普朗克公式[J]. 物理与工程, 2019, 29(3): 8-18.
DENG C L. Rediscovery of Planck's formula by principles of dimensional analysis[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(3): 8-18. (in Chinese)
- [2] NEWELL B, CABIATI F, FISCHER J, et al. The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI [J]. Metrologia, 2018, 55(1): 13-16.
- [3] 白光富, 袁升, 马泽斌, 等. 光电效应测普朗克常数新数据处理方法[J]. 物理与工程, 2013, 23(3): 4-8.
BAI G F, YUAN S, MA Z B, et al. A new data processing method of Planck constant measurement through photo electric effect[J]. Physics and Engineering, 2013, 23(3): 4-8. (in Chinese)
- [4] 徐代升, 王元樟. 基于图形的黑体辐射三大基本定律关系阐述[J]. 物理与工程, 2012, 22(5): 8-11.
XU D S, WANG Y Z. Describing relationship of three basic laws of black body radiation based on graph[J]. Physics and Engineering, 2012, 22(5): 8-11. (in Chinese)
- [5] DAYWITT C. The Compton radius, the de Broglie radius, the Planck constant, and the Bohr orbits[J]. Progress in Physics, 2011, 2.
- [6] COHEN E R, TAYLOR B N. The 1986 adjustment of the fundamental physical constants[J]. Acta Metrologica Sinica, 1987, 59(4): 1121-1148.
- [7] ROBINSON I A, KIBBLE B P. An initial measurement of Planck's constant using the NPL Mark II watt balance[J]. Metrologia, 2007, 44(6): 427.
- [8] LI S, BING H, LI Z, et al. Precisely measuring the Planck constant by electromechanical balances[J]. Measurement, 2012, 45(1): 1-13.
- [9] 王莹, 陈东生. 利用 LED 的量子特性设计新型普朗克常数测定仪[J]. 大学物理实验, 2012, 25(3): 3.
WANG Y, CHEN D S. Measuring Planck constant using LED[J]. Physical Experiment of College, 2012, 25(3): 3. (in Chinese)
- [10] 林智国, 鲍庆奔, 鲁晓东. 用发光二极管的电致发光过程测普朗克常量[J]. 大学物理实验, 2013, 26(1): 3.
LIN Z G, BAO Q B, LU X D. Measuring Planck constant in electroluminescent process of LED[J]. Physical Experiment of College, 2013, 26(1): 3. (in Chinese)
- [11] 何潜翔, 黄建宇, 陈乾. 功率型 LED 结温测量方法的实验研究[J]. 物理与工程, 2020, 30(4): 112-115.
HE Q X, HUANG J Y, CHEN Q. Experimental study on junction temperature measurement of high-power LED[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(4): 112-115. (in Chinese)