

基于OCTEM的导电材料电阻率 测量计算方法

汪向建^{1,2,3}

¹中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

²中南大学有色资源与地质灾害探测湖南省重点实验室, 湖南 长沙

³中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年4月10日; 发布日期: 2025年4月18日

摘 要

新开发的导电材料亟需掌握其电阻率特性, 但是由于样品数量的稀缺以及拉丝工艺的困难, 采用强迫电流法测量导电材料电阻率时极易造成电路短路。为此, 本文提出了基于等值反磁通瞬变电磁法测量导电材料电阻率方法。首先, 为了避免关断电磁振荡和环境噪声, 提高信噪比, 构建早期和晚期可信时刻线, 采用二次场响应曲线和早晚最可信时刻线的扇形面积作为标本电阻率灵敏系数; 然后, 采用最小二乘拟合方法得到标本电阻率与灵敏系数的逼近函数, 通过逼近函数计算得到样本的电阻率; 最后, 通过铜、铁、铝、钨以及合金导电材料的测试分析结果表明该方法计算得到的电阻率与真实电阻率的RMSE达到了 10^{-9} 量级。

关键词

导电材料, 电阻率, 电阻率测量方法, 等值反磁通瞬变电磁法

Measurement and Calculation Method for the Resistivity of Conductive Materials Based on OCTEM

Xiangjian Wang^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha Hunan

²Key Laboratory of Non-Ferrous and Geological Hazard Detection, Central South University, Changsha Hunan

³School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Apr. 10th, 2025; published: Apr. 18th, 2025

Abstract

Newly developed conductive materials urgently need to be characterized in terms of their resistivity, but due to the scarcity of samples and the difficulty of the drawing process, it is very easy to short-circuit circuits when measuring the resistivity of conductive materials using the forced-current method. For this reason, this paper proposes a method for measuring the resistivity of conductive materials based on the opposing coils transient electromagnetic method. First, in order to avoid turn-off electromagnetic oscillations and environmental noise and to improve the signal-noise ratio, early and late plausible moment lines were constructed, and the sector area of the secondary field response curve and the early and late most plausible moment lines were used as the specimen resistivity sensitivity coefficients; Then, the approximation function of the specimen resistivity to the sensitivity coefficient was obtained using the least squares fitting method, and the resistivity of the sample was calculated from the approximation function; Finally, the results of testing and analysis of copper, iron, aluminum, tungsten, and alloy conductive materials show that the resistivity calculated by this method has an RMSE of 10^{-9} orders of magnitude with respect to the true resistivity.

Keywords

Conductive Material, Resistivity, Resistivity Measurement Methods, Opposing Coils Transient Electromagnetic Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

材料电阻率是表征材料对电流阻碍作用的重要参数,对于深入了解材料的导电性能至关重要。此外,对科研人员和工程师而言,准确的电阻率数据在材料选择、产品设计和科学研究中至关重要,同时也为新材料的开发与应用提供了理论基础。

材料电阻率的测量研究自始以来已经取得了显著进展,测量方法一般分为接触式和非接触式两类。早期主要采用接触式方法,其中伏安法(或称强迫电流法)是最早用于地球物理勘探的技术之一[1]-[3]。尽管该方法操作简单快捷,但精度较低。为了提高测量精度,研究者提出了电桥法。1843年, Sir Charles Wheatstone 发明的惠更斯电桥和 1862 年 William Thomson (Lord Kelvin)发明的开尔文电桥是具有里程碑意义的方法。后者相比前者具有更高的测量精度,但在测量过程中易受到精密检流计指针偏转、接触电阻和引线电阻等因素的影响[4] [5], 并且难以实现自动测量。

除了电桥法, 1861 年 Thomson W 提出的四探针法也是一种广泛应用的接触式电阻率测量技术[6]-[10]。根据测试结构的不同,该方法可细分为直线四探针法、方形四探针法、范德堡法以及改进四探针法[11]。直线四探针法因其原理简单、测量方便而受到青睐,但要求探针间距必须相等,且样品尺寸需大于探针间距[12]。双电测四探针法在排列方式上与常规四探针法相似,但需进行两次测量,其模式可分为 1981 年由 D. S. Perllof 提出的 Perllof 法和 1979 年北京工业大学宿昌厚提出的 Rymaszewski 法[13]。该方法探针间距可不等,有效克服了探针漂移的影响,并能自动修正边界效应[14],但需遵循最低厚度要求并引入厚度修正因子[15]。方形四探针法同样具有厚度和尺寸要求,必须进行厚度修正[16]。1958 年, L. J. Van der Pauw 提出的范德堡法可以对任意形状的样品进行电阻率测量[17],但要求探针与样品的接触面积

小且布置在样品边缘,且样品需具有单连通性和均匀厚度[18]-[20]。改进四探针法包括 1993 年孙以材等提出的改进范德堡四探针法和 2003 年刘新福等提出的改进 Rymaszewski 四探针法,前者测量精度独立于探针漂移,具有良好的重复性,但需在显微镜下观察,限制了其应用[21] [22]。而改进 Rymaszewski 四探针法尽管简化了测量过程,但依然受到探针漂移和厚度的限制[23]。

关于非接触式电阻率测量方法的研究,逐渐受到重视。这类方法主要基于电容耦合、电感耦合或电磁场耦合的原理[24] [25],包括 19 世纪中叶提出的涡流法[26]-[29]、2009 年引入的等离子共振红外法[30]、以及 2014 年提出的微波扫描显微镜探头测试法[31]。然而,这些非接触测量方法通常成本较高,且设备及操作原理复杂,限制了其在实际应用中的普及和实用性[32] [33]。

本文提出了一种基于无接触式原理的新型导电材料电阻率测量方法,结合等值反磁通瞬变电磁测量系统,旨在实现对导电材料样品的高精度和高可靠性电阻率测量。

2. 方法原理

本文研究基于等值反磁通瞬变电磁法(简称 OCTEM),该方法的激发方式为感应式,采用了上、下两个大小相同、平行共轴的线圈如图 1 所示,分别向其通以大小相等、方向相反的电流作为发射源,在双线圈源合成的一次场零磁通的平面上接收标本的纯二次场响应[34]-[36]。

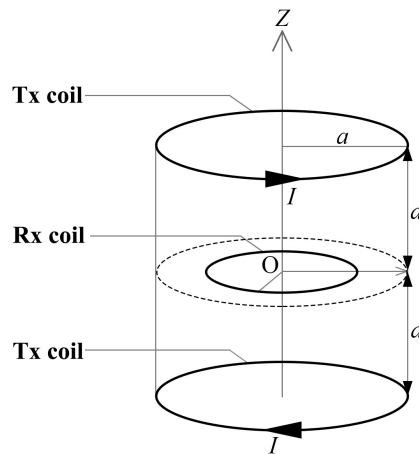


Figure 1. Schematic diagram of the device for the opposing coils transient electromagnetic method
图 1. 等值反磁通瞬变电磁法装置示意图

根据 OCTEM 理论,垂直磁场变化率的表达式为:

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = \frac{\mu_0^2 I a^2 d \sigma^2}{9\sqrt{\pi}} t^{-3} \quad (1)$$

其中 I 为发射电流(单位 A); a 为发射线圈半径(单位 m); σ 为标本电导率(单位 $\Omega \cdot \text{m}$); μ_0 为空气磁导率(单位 H/m); t 为时间(单位 s); d 为等值反磁通发送线圈垂直距离(单位 m),中心回线装置的垂直磁场变化率与标本电导率是平方关系。但是瞬变电磁的早期信号电磁振荡严重,为此构建早期可信时刻线:

$$\text{早期可信时刻线: } f_1(t) = t^{\tan(\alpha+\beta)} \times [-6 \times \log(10) - \log(50) \times \tan(\alpha + \beta)] \quad (2)$$

另外,标本电阻率变化范围大,衰减幅度不同,为了保障测量信号的高信噪比,构建晚期可信时刻线:

$$\text{晚期可信时刻线: } f_2(t) = t^{\tan \alpha} \times [-6 \times \log(10) - \log(50) \times \tan \alpha] \quad (3)$$

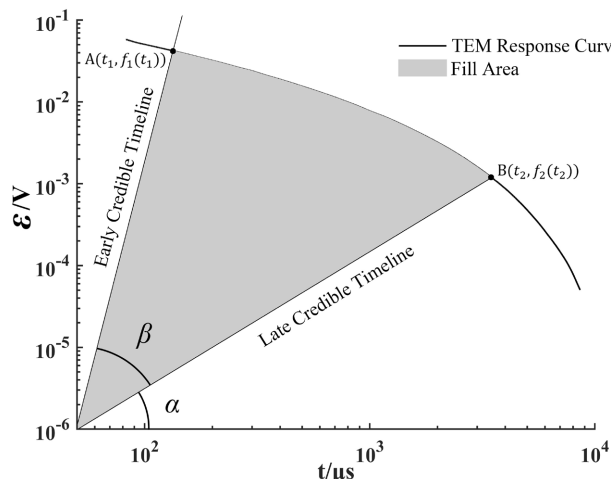


Figure 2. Schematic diagram of the filled region within the confidence interval of the transient electromagnetic response curve of a metallic conducting specimen

图 2. 金属导电标本瞬变电磁响应曲线在可信区间内的填充区域示意图

在双对数坐标下, 金属导电标本瞬变电磁响应曲线如图 2 所示, 联立式(1)、式(2)、式(3), 图 2 中两条直线和金属导电标本瞬变电磁响应曲线的交点 A 和交点 B 满足如下方程:

$$A(t_1, f_1(t_1)): \begin{cases} f_1(t_1) = t_1^{\tan(\alpha+\beta)} \times [-6 \times \log(10) - \log(50) \times \tan(\alpha + \beta)] \\ f_1(t_1) = (n \times S) \times \frac{\mu_0^2 I a^2 d \sigma^2}{9\sqrt{\pi}} t_1^{-3} \end{cases} \quad (4)$$

$$B(t_2, f_2(t_2)): \begin{cases} f_2(t_2) = t_2^{\tan \alpha} \times [-6 \times \log(10) - \log(50) \times \tan \alpha] \\ f_2(t_2) = (n \times S) \times \frac{\mu_0^2 I a^2 d \sigma^2}{9\sqrt{\pi}} t_2^{-3} \end{cases} \quad (5)$$

计算填充区域的“面积”, 定义为该金属导电标本的电阻率灵敏系数 K_ρ , 计算公式为:

$$K_\rho = \frac{1}{2} \tan(\alpha + \beta) \times t_1^2 - \frac{1}{2} \tan(\alpha) \times t_2^2 + (n \times S) \times \int_{t_1}^{t_2} \frac{\mu_0^2 I a^2 d \sigma^2}{9\sqrt{\pi}} t^{-3} dt \quad (6)$$

注意, 此时 t_1 和 t_2 表示双对数坐标系下 A 和 B 两点距离纵坐标轴的距离。

通过计算多种标本的电阻率灵敏系数, 建立电阻率灵敏系数 K_ρ 和电阻率 ρ 的拟合模型, 得到电阻率与其灵敏系数之间的数学关系式:

$$\rho = f(K_\rho) \quad (7)$$

3. 样本响应曲线采集

实验使用尺寸规格一致的六块样本, 包括用作计算逼近函数的四块标本: 铜、铁、铝、钨, 以及用作误差评估的两块合金导电材料标本: Alloy #3、Alloy #5, 规格大小均为 30 mm × 30 mm × 15 mm。

标本瞬变电磁响应数据通过使用 HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统测量获取, 将系统各组件连接良好, 天线水平放置, 选取一块标本置于天线下方, 观测导电标本瞬变电磁响应曲线的具体布置如图 3 所示。

接着依次完成对环境噪声、铜、铁、铝、钨以及导电材料等标本的电磁响应的多次测量, 最终得到七条瞬变电磁响应曲线如图 4 所示。

除去噪声后, 各标本的真实电磁响应曲线如图 5 所示。

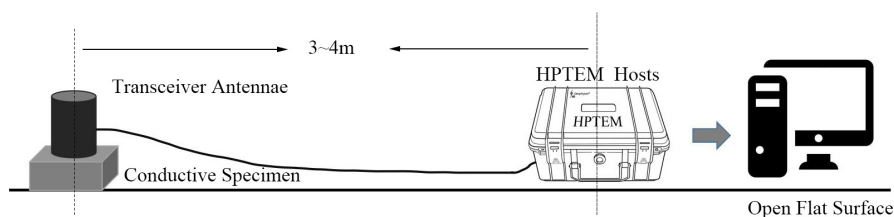


Figure 3. Schematic layout of the observation device

图 3. 观测装置布置示意图

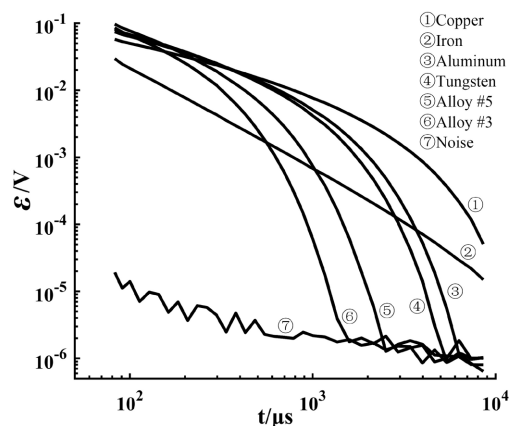


Figure 4. Transient electromagnetic response curves for noise and metal conductive specimens

图 4. 噪声和金属导电标本的瞬变电磁响应曲线图

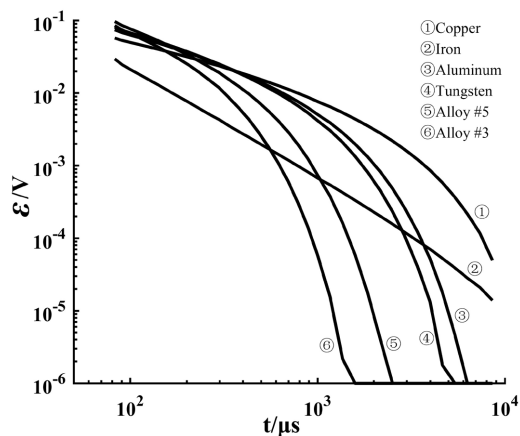


Figure 5. Transient electromagnetic response curves of metal conductive specimens after denoising

图 5. 去噪后的金属导电标本瞬变电磁响应曲线图

根据传统方式估算六块标本的电阻率：

$$\rho = \frac{1.27 \times 10^{-7} S}{\tau} \quad (8)$$

式中 τ 为时间常数， S 为导体截面积，时间常数 τ 估算公式：

$$\tau = \left| \frac{\Delta t}{2.3 \Delta \log(v)} \right| = \left| \frac{t_2 - t_1}{2.3 (\log(v_2) - \log(v_1))} \right| \quad (9)$$

式中 t 为晚期瞬变电磁响应衰减时间， v_1 和 v_2 是在时间 t_1 和 t_2 时刻的瞬变场幅值。传统方法估算得到的

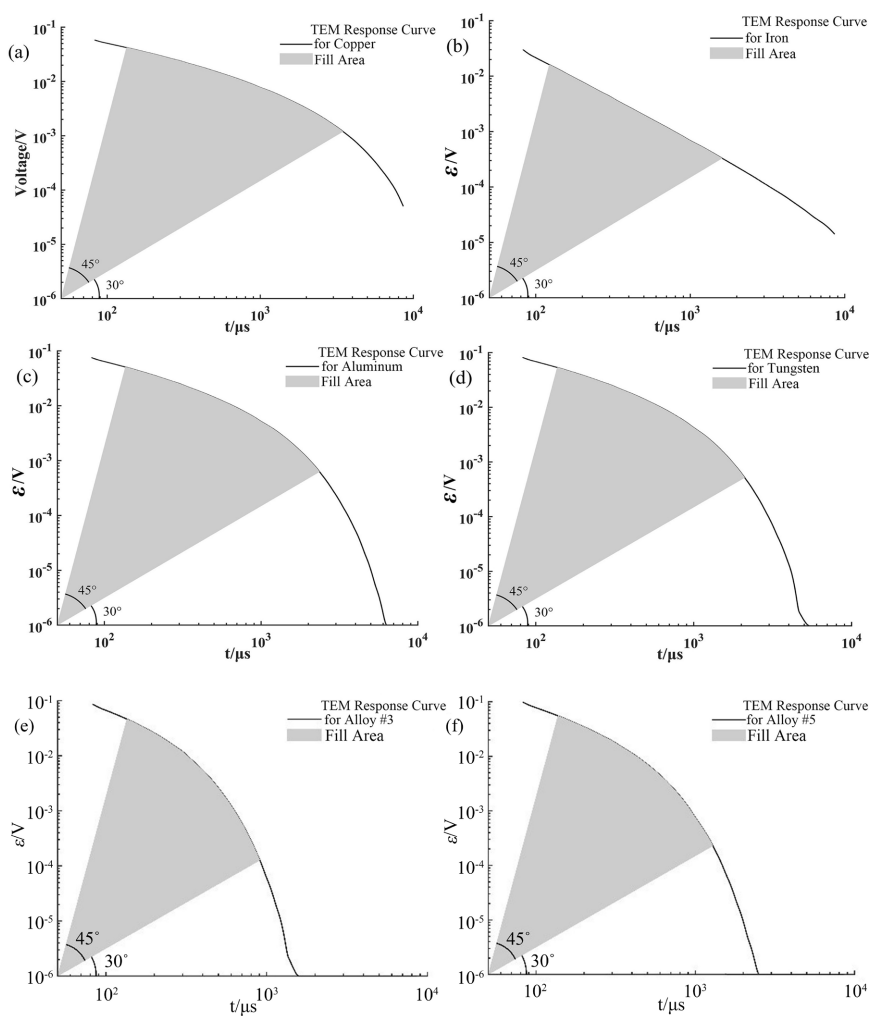
电阻率以及真实电阻率如表 1 所示, 可以看到, 表中铜、铁、铝、钨标本的估算电阻率与真实电阻率较为接近, 电阻率的大小顺序展示得十分明确, 较为准确地估算出了 3 号和 5 号合金的电阻率大小。

Table 1. Table of real and estimated resistivity of specimens

表 1. 标本真实电阻率和估算电阻率表

Specimen Identification	Real Resistivity $\rho/(10^{-8}\Omega\cdot m)$	Estimated resistivity $\rho/(10^{-8}\Omega\cdot m)$
Aluminum (Al)	2.65	3.57
Tungsten (W)	5.6	3.92
Iron (Fe)	10	4.74
Copper (Cu)	1.68	2.66
Alloy #3	—	9.58
Alloy #5	—	6.25

4. 计算应用



(a) Cu; (b) Fe; (c) Al; (d) W; (e) Alloy #3; (f) Alloy #5.

Figure 6. Schematic diagram of metal conductive specimen filling areas

图 6. 6 种金属导电标本填充区域图

对各标本的瞬变电磁响应曲线的初步分析, 设定 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$, 划出各标本的有用信号窗口并填充如图 6 所示。

计算上述各导电标本填充区域的面积, 也即各标本的电阻率灵敏系数, 通过数学积分求和的方法计算得到各标本的电阻率灵敏系数, 将铜、铁、铝、钨四块导电标本作为测试组, 两块合金导电材料标本 Alloy #3、Alloy #5 作为验证组(如表 2 所示)。

Table 2. Specimen grouping and resistivity sensitivity factor table
表 2. 标本分组和电阻率灵敏系数表

Specimen Identification	Resistivity Sensitivity Coefficient	Groups
Aluminum (Al)	2.8885×10^6	Test Group
Tungsten (W)	2.5334×10^6	Test Group
Iron (Fe)	2.1472×10^6	Test Group
Copper (Cu)	3.0405×10^6	Test Group
Alloy #3	2.2136×10^6	Validation Group
Alloy #5	2.5035×10^6	Validation Group

接着, 为构建电阻率和电阻率灵敏系数之间的逼近函数数学表达式, 采用最小二乘方法:

$$\|\delta\|_2^2 = \sum_{i=0}^3 \delta_i^2 = \min \sum_{i=0}^3 [f(K_\rho) - \rho_i]^2 \quad (1)$$

上式的基函数:

$$f(K_\rho) = a \times (K_\rho)^b \quad (2)$$

得到逼近函数表达式:

$$\rho = f(K_\rho) = 4.793 \times 10^{20} \times (K_\rho)^{-4.37} \quad (3)$$

为全面评估逼近函数的逼近效果, 使用误差平方和(Sum of square error, 简称 SSE)、决定系数(R^2)、校正决定系数(Adjusted R^2)、均方根误差(Root Mean Square Error, 简称 RMSE)四个参数作为评价指标(如表 3 所示)。可以看到, 评价指标 R^2 : 0.9976 和 Adjusted R^2 : 0.9952 都趋近 1, 表明逼近函数的拟合效果较好。SSE 和 RMSE 的数值均接近于 0, 表明模型选择与拟合的优异性, 这一结果显示出模型在对数据的解释和预测方面具有较高的准确性与可靠性。

Table 3. Evaluation table of the approximation effect of the test group approximation function
表 3. 测试组逼近函数的逼近效果评价表

Approximation Effect Evaluation Parameters	SSE	R^2	Adjusted R^2	RMSE
Value	7.827×10^{-17}	0.9813	0.972	6.256×10^{-9}

通过上述步骤得到的逼近曲线如图 7 所示, 图中黑色曲线为逼近曲线, 四个黑色雪花为测试组数据 $\{(K_\rho)_i, \rho_i\}, i = 0, 1, 2, 3\}$, 黑色实心圆为验证组通过式(10)计算得到的数据点。

最后, 根据式(10)计算验证组的电阻率, 其中合金导电标本 Alloy #3 电阻率:

$$\rho(\text{Alloy \#3}) = 4.793 \times 10^{20} \times (2.2136 \times 10^6)^{-4.37} = 8.9645 \times 10^{-8} (\Omega \cdot \text{m})$$

合金导电标本 Alloy #5 电阻率:

$$\rho(\text{Alloy \#5}) = 4.793 \times 10^{20} \times (2.5035 \times 10^6)^{-4.37} = 5.2355 \times 10^{-8} (\Omega \cdot \text{m})$$

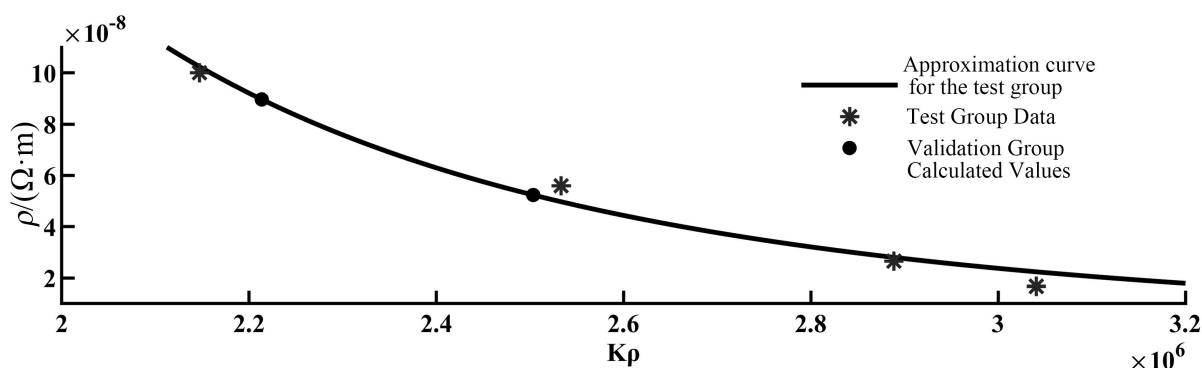


Figure 7. Test and validation group data and approximation curves

图 7. 测试组和验证组数据以及逼近曲线图

将导电标本的真实电阻率和计算得到的预测电阻率进行对比和分析,通过均方根误差评估测量效果,验证组均方根误差计算公式:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^1 \left\{ \rho_{\text{empirical value}, i} - f\left[\left(K_{\rho}\right)_i\right] \right\}^2}{2}} \quad (4)$$

计算得到均方根误差: 8.391×10^{-9} , 而铜、铁、铝、钨四块导电标本的估算电阻率和真实电阻率的均方根误差: 2.8415×10^{-8} , 较验证组均方根误差大。

5. 结论

通过理论公式推导、计算比对以及合金样本电阻率测试分析得出以下结论:

1) 基于 OCTEM 方法二次场响应曲线和早晚最可信时刻线的扇形面积作为标本电阻率灵敏系数,有效提高了直接采用二次场响应计算电阻率的精度和可靠性。

2) 采用最小二乘拟合方法得到标本电阻率与灵敏系数的逼近函数,通过逼近函数计算得到的样本的电阻率与真实电阻率的 RMSE 到了 10^{-9} 量级。

基于 OCTEM 的导电材料电阻率测量装置简易,操作方便,成本低,可满足室内和野外的需求,为新型导电材料的电性特性分析提供了一种新思路。

基金项目

国家重点研发计划资助项目(2022YFC2903404),中国电建基础 Research 计划资助项目(DJ-HXGG-2023-16)。

参考文献

- [1] 何继善. 金属矿电法勘探[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- [2] 何继善. 近区交流电阻率法及其应用[J]. 中国有色金属学报, 1994, 4(4): 1-4.
- [3] 崔益安, 柳建新, 郭友军, 等. 电阻率法在有色金属矿产勘探中的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1): 223-239.
- [4] 杨铁柱, 赖晓磊, 张志强, 等. 基于 LabVIEW 的单臂、双臂电桥仿真实验系统开发[J]. 大学物理, 2017, 36(6): 36-117.

- [5] 隗群梅, 韩立立, 尹教建. 双臂电桥测量接触电阻的研究[J]. 物理实验, 2016, 36(1): 21-23.
- [6] Thomson, W. (1861) On the Measurement of Electrical Resistivity. *Proceedings of the Royal Society*, **11**, 313-328.
- [7] 李世斌, 吕振林, 高积强, 等. 拓扑法计算硅/碳化硅材料的电阻率[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 83-86.
- [8] 李友芬, 黄芝英, 孙根生, 等. La_2O_3 基导电陶瓷室温电阻率的测试与研究[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(3): 138-140.
- [9] 鲁效明. 用两种四探针方法测量硅单晶片边缘电阻率及其结果的比较[J]. 计量技术, 2002(9): 8-10.
- [10] 陈彩云. 光伏用硅片电阻率四探针法测量值不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(10): 109-112.
- [11] 李建昌, 王永, 王丹, 等. 半导体电学特性四探针测试技术的研究现状[J]. 真空, 2011, 48(3): 1-7.
- [12] 姚子祥, 刘洪山. 四探针法测量薄层电阻方法对比[J]. 信息记录材料, 2020, 21(3): 245-246.
- [13] 鲁效明, 宿昌厚. 双位组合四探针法测量硅片电阻率[J]. 微电子学, 1994(3): 60-63.
- [14] 宿昌厚, 鲁效明. 双电测组合四探针法测试半导体电阻率测准条件[J]. 计量技术, 2004(3): 7-9, 27.
- [15] 孙如昊, 刘禹, 刘江, 等. 基于 LabVIEW 和 Arduino 的薄膜电阻率测试系统开发[J]. 自动化仪表, 2019, 40(8): 26-31, 37.
- [16] 王伟. 四探针相关问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [17] Oliveira, F.S., Cipriano, R.B., da Silva, F.T., Romão, E.C. and dos Santos, C.A.M. (2020) Simple Analytical Method for Determining Electrical Resistivity and Sheet Resistance Using the Van Der Pauw Procedure. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 16379. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72097-1>
- [18] 张云龙. 金属网栅透明导电膜导电性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [19] 甄聪棉, 潘成福, 侯登录, 等. 低维半导体器件电阻率的测试理论与实验研究[J]. 物理实验, 2022, 42(7): 22-28.
- [20] Geng, Y. (2022) Mathematical Analysis of Van Der Pauw's Method for Measuring Resistivity. *Journal of Physics: Conference Series*, **2321**, Article ID: 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2321/1/012027>
- [21] 孙以材, 张林在. 用改进的 Van der Pauw 法测定方形微区的方块电阻[J]. 物理学报, 1994, 43(4): 530-539.
- [22] 刘新福, 孙以材, 刘东升. 四探针技术测量薄层电阻的原理及应用[J]. 半导体技术, 2004, 29(7): 48-52.
- [23] 刘新福, 孙以材, 张艳辉, 等. 用改进的 Rymaszewski 公式及方形四探针法测定微区的方块电阻[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2461-2466.
- [24] 吴鹏飞. 基于伪测量值法的硅片薄层电阻率测试系统研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [25] Krupka, J. (2013) Contactless Methods of Conductivity and Sheet Resistance Measurement for Semiconductors, Conductors and Superconductors. *Measurement Science and Technology*, **24**, Article ID: 062001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/6/062001>
- [26] The Japanese Society for Non-Destructive Inspection (1967) Handbook of Non-Destructive Inspection. The Nikkan Kogyo Shinbun, Ltd., 624-625.
- [27] 张起祥, 张晓英. 一种电阻率测量方法[J]. 大学物理, 2003, 22(12): 27-29.
- [28] Wakiwaka, H., Kodani, M., Endo, M. and Takahashi, Y. (2006) Non-contact Measurement of CNT Compounding Ratio in Composite Material by Eddy Current Method. *Sensors and Actuators A: Physical*, **129**, 235-238. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.09.052>
- [29] Qiu, J. and Sullivan, C.R. (2013) High-frequency Resistivity Measurement Method for Multilayer Soft Magnetic Films. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 3581-3590. <https://doi.org/10.1109/tpel.2012.2226477>
- [30] Yashunsky, V., Shimron, S., Lirtsman, V., Weiss, A.M., Melamed-Book, N., Golosovsky, M., et al. (2009) Real-time Monitoring of Transferrin-Induced Endocytic Vesicle Formation by Mid-Infrared Surface Plasmon Resonance. *Biophysical Journal*, **97**, 1003-1012. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.05.052>
- [31] Back, D., Lee, J. and Choi, B. (2014) Diffusion Length and Resistivity Distribution Characteristics of Silicon Wafer by Photoluminescence. *Materials Research Bulletin*, **58**, 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.03.002>
- [32] 李倩文. 基于正则化算法的硅片电阻率测量方法研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- [33] 王梦丹. 具有温度控制的微区电阻率测量装置研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- [34] 席振铎, 龙霞, 周胜, 等. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3428-3435.

-
- [35] 王银, 席振铎, 蒋欢, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在探测岩溶病害中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 360-363.
- [36] 高远. 等值反磁通瞬变电磁法在城镇地质灾害调查中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 152-156.