

**АНАЛИЗ НА МЕТОДИТЕ ЗА ИЗЧИСЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ  
ПАРАМЕТРИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВИ МАТЕРИАЛИ****Гергана Миронова***Технически университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, Габрово, България,  
Кореспондиращ автор: g.mironova@tugab.bg***ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING ELECTRICAL  
PARAMETERS ON SEMICONDUCTOR MATERIALS****Gergana Mironova***Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria  
Corresponding author: g.mironova@tugab.bg***Abstract**

*The Van der Pauw method is a universal and accurate tool for measuring the electrical parameters of various materials, including resistivity and charge carrier mobility. This article considers the application of the method to the characterization of semiconductors, thin films and nanomaterials, which find wide application in electronics and optoelectronics. The technique is used to determine important parameters such as the concentration of charge carriers and their mobility in the context of the development of Hall sensors, semiconductor devices and spin electronic components. In addition, the method allows measuring the electrical properties of exotic materials such as quantum structures and high-temperature superconductors, which opens up new opportunities for innovation in the field of new technologies. Compared to other measurement techniques, the advantages of the method are presented, such as the accuracy and the possibility of use in different shapes and sizes of materials. The results of the study underline the key role of the Van der Pauw method in modern materials science and electronics, as well as in the field of renewable energy systems.*

**Keywords:** Van der Pauw, semiconductors, electrical parameters, Hall element, sensorics.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

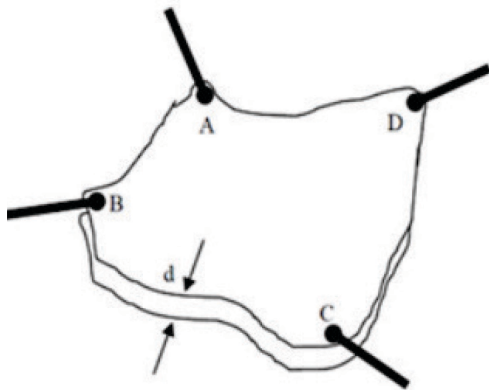
Настоящата статия има за цел да изследва и сравни различните математически методи за определяне на параметрите на елемент на Хол, като акцентира върху техните предимства и недостатъци. Подобен анализ е необходим, тъй като оптималният избор на метод не само повишава точността на измерванията, но и намалява времето и сложността на процеса на калибриране и настройка. По този начин, изследването предоставя основа за по-добро разбиране и приложение на тези методи в различни области на електрониката и автоматизацията.

**ИЗЛОЖЕНИЕ**

Анализът и определянето на параметрите на електронните компоненти са от съществено значение за създаването на прецизни и ефективни електронни схеми и устройства. Един от важните елементи, използвани в съвременната електроника, е елементът на Хол, който се отличава със своята способност да преобразува магнитни полета в електрически сигнали. Това го прави изключително подходящ за различни приложения като измерване на магнитни полета, определяне на позиция и скорост, както и за сензорни системи в автомобилната и индустриалната електроника. За да се гарантира точността и

надеждността на елементите на Хол, е необходимо да се определят техните основни параметри, като чувствителност, линейност, температурна стабилност и честотна характеристика. В тази връзка, използването на подходящи математически методи за анализ на тези параметри е от първостепенно значение. Съществуват различни математически подходи, като методи на най-малките квадрати, регресионен анализ и статистически оценки, които могат да бъдат използвани за точното определяне на параметрите на елементите на Хол[1]. Изборът на подходящ метод зависи от редица фактори, включително наличните експериментални данни, условията на работа и изискваната точност[2].

Принципът на методът на Ван дер Пау се основава на измерване на съпротивленията в тънък плосък образец с четири контакта, разположени по краищата на образца[3].



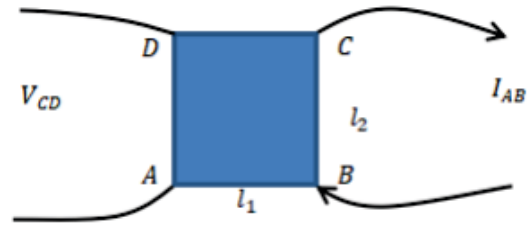
Фиг. 1. Прототип на елемент на Хол

Прототипът трябва да бъде:

1. Плосък и тънък - дебелината му трябва да бъде малка спрямо другите размери.
2. Без дупки - образецът трябва да е без дупки или разрези.
3. Със симетрично разположени контакти - четирите контакта трябва да са разположени на периметъра на образца, като не е задължително да бъдат на еднакво разстояние един от друг.

За осъществяването на методологията е необходимо да бъдат измерени напре-

жението и тока през противоположни двойки контакти - едното измерване е на тока между два противоположни контакта (например А и В), като се измерва напрежението между другите два контакта (С и D).



Фиг. 2. Симетрично разположени контакти

За прецизно определяне на специфичното съпротивление  $\rho$  на веществото е необходимо да се извърши второ измерване на електрическите параметри на пластината [4,5]. При това измерване токът трябва да преминава през алтернативна двойка противоположни контакти (например В и С), докато напрежението се измерва между останалите два контакта (D и А)

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln(2)} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (1)$$

Където:

$d$  – дебелината на образца

$R_1 = R_{AB, CD}$

$R_2 = R_{BC, DA}$

$f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$  – корекционна функция, зависеща

от отношението на двете съпротивления.

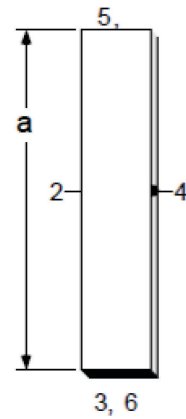
Корекционната функция  $f(x)$  може да се определи числено или да се вземе от предварително изготвени таблици.

Подходът на Ван дер Пау предлага както предимства, така и ограничения при изчисляването на параметри на Хол елементи. Методът позволява прецизно измерване на съпротивлението на материали дори когато контактите не са разположени симетрично и е приложим за материали с произволна форма, стига да са спазени изискванията за разположение на контактите и дебелина.

Основните ограничения на този метод включват сложността на точното измерване на напрежението и тока, които трябва да бъдат прецизно определени, за да се избегнат грешки. Неправилното разположение на контактите може да доведе до значителни отклонения в измерванията, което влияе на изчисленията на съпротивлението [6]. При измерване на специфичното съпротивление по метода на Ван дер Пау е важно да се обърне внимание на дебелината на материала, която трябва да бъде възможно най-тънка, за да се намали влиянието на дебелината върху резултата от измерването. Същевременно, при измерване на еквивалентното съпротивление, е препоръчително да се увеличи контактната площ, за да се намали влиянието на реалния размер на контактите върху резултата. Съпротивлението на проводниците също трябва да се вземе предвид при изчисляването на специфичното съпротивление на материала, което ще подобри точността на измерването по метода на Ван дер Пау. Въпреки това, методът остава основополагащ за разработването и характеризирането на полупроводникови материали, използвани в различни електронни устройства, включително Хол сензори.

Методът на Ван дер Пау е само един от подходите за изчисляване на електрическите параметри на Хол елементи. Познаването на различни техники дава възможност за избор на оптимален метод за изчисление на характеристиките, съобразен със специфичните свойства на пластините, изискваната точност и наличното оборудване.

Метод на правоъгълната лента – Van method – В този метод образецът има правоъгълна форма и четири контакта се разполагат на краищата му. За разлика от метода на Ван дер Пау, при който формата може да бъде произволна, тук контактите са разположени точно на противоположните краища на правоъгълния образец.



Фиг. 3. Разположение на контактите на правоъгълен образец

При използването на метода на правоъгълната лента (Van Method) за определяне на напрежението на Хол, формулата за Хол напрежението  $U_H$  е:

$$U_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot d}, \quad (2)$$

Където:

$I$  – токът преминаващ през лентата,

$B$  – магнитната индукция (магнитното поле),

$n$  - концентрацията на носители на заряд (брой на заряди на единица обем),

$q$  - зарядът на носителите (за електрони  $q = 1,6 \times 10^{-19}$ ,

$d$  - дебелината на правоъгълната лента

Формула е валидна при условие, че дебелината  $d$  е значително по-малка от дължината и ширината на лентата, което осигурява равномерно разпределение на тока и минимизира допълнителните ефекти от краищата.

Методът е лесноосъществим за изпълнение и анализ. Позволява директно измерване на напрежението и съпротивлението. Точността на получените данни зависи от геометрията на образца, което може да е предизвикателство при неиделни или повредени образци.

При използването на метода на кръговия диск (Circular Disc Method) [7] се използва кръгъл образец от изследвания материал, върху който са разположени четири контакта, равномерно разпределени по периферията на диска.

Измерванията на ефекта на Хол се осъществяват чрез подаване на ток между два от контактите и измерване на напрежението на Хол между останалите два. Този подход осигурява висока симетрия на измерванията, което повишава точността на резултатите при изчисленията. Основните недостатъци на метода се състоят в сложната подготовка на кръговия образец и значителното влияние дори на минимални отклонения в разположението на контактите върху точността на резултатите

Специфичното съпротивление в този метод се изразява чрез:

$$\rho = \frac{2 \pi t}{\ln(2)} \cdot R_s \quad (3)$$

Където:

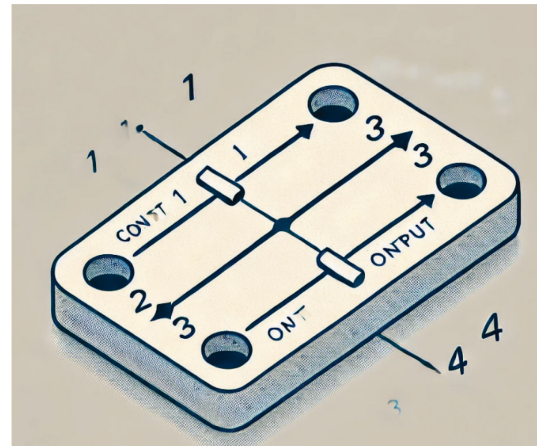
$t$  – дебелината на диска

$R_s$  - измереното съпротивление на образца (sheet resistance)

$$\ln(2) = 0.693$$

Тази формула е приложима, когато дискът е достатъчно тънък и измерванията са проведени при равномерно магнитно поле и приложен ток.

Методът на многоконтактните структури (Multi-Contact Structures) се използва за прецизно измерване на Хол напрежението и специфичното съпротивление, като се използват повече от четири контакта върху Хол елемента [8,9]. Това позволява по-точно измерване и по-малко влияние от контактните съпротивления и геометричните ефекти. Този метод често се използва за изследване на нееднородности в материала. Позволява се определяне на разпределението на подвижността на токоносителите и тяхната концентрация по повърхността на образца, но интерпретацията на резултатите е сложна и са необходими множество измервания.



Фиг. 4. Разположение на контактите на многоконтактна структура

На изводи 1 и 3 се подават противоположни токове за осигуряване на равномерно разпределение на тока през елемента. Измерването на напрежението на Хол се извършва между друга двойка контакти (напр. 2 и 4), които са перпендикулярни на линията на тока. Тази многоконтактна структура намалява влиянието на контактните съпротивления и помага за по-точни измервания, като същевременно подобрява надеждността на данните за Хол напрежението и специфичното съпротивление.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всеки от тези методи има своите предимства и недостатъци, и изборът на подходящ метод зависи от конкретния материал, геометрията на образца, наличното оборудване и необходимата точност на измерванията.

*Благодарности:* The studies were carried out with the financial support of the CoC “Quasar” - project №BG05M2OP001-1.002-0006

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.V. Lozanova, Ch.S. Roumenin, A three-point-probe method for measuring resistivity and the Hall coefficient using Hall devices with minimal design complexity, Measurement, Volume 43, Issue 3, 2010, Pages 385-391, ISSN 0263-2241,

- <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.12.006>
- [2] B. I. Evstatiev, D. V. Kiriakov and I. H. Beloiev, "A different approach for measurement of hysteresis losses in magnetic cores," *2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Constanta, Romania, 2017, pp. 138-140, doi: 10.1109/SIITME.2017.8259876
- [3] Jeffrey Lindemuth, *Hall Effect Measurement Handbook*
- [4] Oliveira, F.S., Cipriano, R.B., da Silva, F.T. et al. Simple analytical method for determining electrical resistivity and sheet resistance using the van der Pauw procedure. *Sci Rep* 10, 16379 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72097-1>
- [5] Yihui Geng, *Mathematical analysis of Van der Pauw's method for measuring resistivity*, IOP Publishing, Volume 2321, 012027, <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2321/1/012027>
- [6] Rasool Baghbani; Masoomeh Ashoorirad, Optimization of the Van Der Pauw Method for Measuring the Electrical Properties Spectrum of Biological Solutions, *EEE Transactions on Instrumentation and Measurement* ( Volume: 71), DOI: 10.1109/TIM.2022.3156210
- [7] Dorel Homentcovschi, Romeo Bercia, Bruce T. Murray, Analysis of a Hall-Corbino disk plate having a point current source at the center, *Solid-State Electronics*, Volume 186, 2021, 108179, ISSN 0038-1101, 10.1109/TIM.2022.3156210
- [8] Changdong Chen; Sujuan Hu; Zihao Chen; Yue Shen; Chenning Liu; Qian Wu, *IEEE Electron Device Letters* ( Volume: 41), DOI: 10.1109/LED.2019.2959832
- [9] Hector Castro; Jose Galvis; Sonia Castro, Automated Setup for Van Der Pauw Hall Measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* ( Volume: 60), DOI: 10.1109/TIM.2010.2048961