

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ MECHATRONIKI

Rozprawa doktorska

mgr inż. Oleg Petruk

Metoda kompensacji niezrównoważenia hallotronów
cienkowarstwowych
z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej

Promotor

dr hab. inż. Roman Szewczyk, prof. PW

Promotor pomocniczy

dr inż. Olga Iwasińska-Kowalska

WARSZAWA 2019

Podziękowania

Pragnę podziękować Promotorowi za poświęcony czas i ogromną pomoc dzięki którym możliwe było napisanie tej pracy.

Dziękuję Promotorowi pomocniczemu za cenne uwagi, sugestie oraz zaangażowanie.

Dziękuję Dyrekcji Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP: prof. nzw. dr inż. Piotrowi Szykarczykowi i prof. nzw. dr inż. Stanisławowi Kaczanowskiemu oraz Kierownikowi Ośrodka Układów Pomiarowych mgr. inż. Wojciechowi Winiarskiemu za wsparcie i sprzyjające warunki.

Dziękuję Dyrektorowi Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej prof. dr hab. inż. Adamowi Woźniakowi za wsparcie i cenne uwagi.

Streszczenie

Celem pracy było opracowanie nowych metod kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego z cienkowarstwowych sensorów Halla (hallotronów), z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej.

Napięcie niezrównoważenia sygnału wyjściowego w hallotronach wynika z niejednorodności materiału lub asymetrii kształtu sensora. Przy znacznych wartościach napięcia niezrównoważenia, jego dryft temperaturowy istotnie wpływa na właściwości użytkowe sensora. Dlatego stosowane powszechnie metody kompensacji napięcia niezrównoważenia, wykorzystujące głównie rozwiązania z zakresu elektroniki analogowej, są nieskuteczne i nie zapewniają wymaganej stabilności wskazań hallotyonu.

Rozwiązaniem tego problemu jest przeprowadzenie korekty kształtu sensora przez usunięcie wybranego obszaru elementu sensorowego, np. przez wypalenie go laserem, analogicznie do rozwiązania szeroko stosowanego w technologii produkcji i korekcji laserowej rezystorów precyzyjnych. Zastosowanie laserowej korekcji kształtu sensorów Halla wymaga wyznaczenia obszaru korekcyjnego na podstawie wyników procesu optymalizacji wykorzystującego przekształcenie odwrotne tomografii rezystancyjnej.

Alternatywnym rozwiązaniem problemu kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego z hallotyonu jest wybór miejsca pomiaru sygnału. Dlatego zaproponowano metodę polegającą na doborze połączeń elektrod grzebieniowych z wykorzystaniem analizy wyników pomiarów metodą tomografii rezystancyjnej.

W celu praktycznego zaimplementowania opracowanych w ramach pracy metod kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego z hallotyonu cienkowarstwowego zaproponowano układ hallotyonu w kształcie krzyża z elektrodami grzebieniowymi. Zaproponowano także wytyczne do modyfikacji kształtu hallotyonu tak, aby zapewnić stabilność jego struktury. Opracowano także oryginalne stanowisko do tomografii rezystancyjnej hallotronów cienkowarstwowych z elektrodami grzebieniowymi.

Zaproponowane w pracy dwie metody kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego z hallotyonu cienkowarstwowego wykorzystują przekształcenie tomograficzne. Przekształcenie to zrealizowano z wykorzystaniem otwartego oprogramowania Elmer FEM, Salome oraz Octave.

W ramach pracy, we współpracy z Instytutem Technologii Materiałów Elektronicznych ITME, przeprowadzono weryfikację opracowanych metod kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego z cienkowarstwowych hallotronów grafenowych. Weryfikacja pierwszej z metod obejmowała analizy numerycznych modeli struktur hallotronowych z nieciągłościami pod kątem możliwości laserowej korekcji hallotronów rzeczywistych. Natomiast druga z metod została zweryfikowana eksperymentalnie w warunkach małoseryjnej produkcji hallotronów.

Opracowane w ramach pracy metody umożliwiły kompensację napięcia niezrównoważenia cienkowarstwowych, grafenowych sensorów hallotronowych do poziomu poniżej dziesięciu procent wartości początkowej. W połączeniu z zaproponowanymi w pracy wytycznymi w zakresie modyfikacji kształtu grafenowych sensorów hallotronowych zaproponowane rozwiązania otworzyły możliwość praktycznego wdrożenia hallotronów grafenowych opracowanych w ITME do produkcji przekładników prądowych oferowanych przez firmę LUMEL S.A.

Słowo kluczowe: hallotron, tomografia rezystancyjna

Abstract

The aim of this thesis was to develop new methods of offset compensation of the output signal from thin-film Hall Effect sensors, using resistive tomography.

The offset voltage of the output signal in the Hall Effect sensors results from the inhomogeneity of the material or the asymmetry of the shape of the sensor. With significant offset voltage values, its temperature drift significantly affects the functional properties of the sensor. Therefore, the commonly used methods of offset voltage compensation, mainly using solutions in the field of analog electronics, are ineffective and do not provide the required stability of Hall Effect sensor indications.

The solution to this problem is to correct the shape of the sensor by removing the selected area of the sensor element, eg by burning it out with a laser, analogously to the solutions widely used in the production technology and laser correction of precision resistors. Utilization of laser correction of the shape of Hall Effect sensors requires the determination of the correction area based on the results of the optimization process using the reverse transformation of the resistive tomography.

An alternative solution to the problem of compensating the offset voltage of the output signal from the Hall Effect sensor is the selection of the signal measurement connectors location. Therefore, a method was proposed based on the selection of comb electrode connections using the analysis of resistance tomography measurement results.

In order to practically implement the methods of compensating the offset voltage of the output signal from the thin-film Hall Effect sensor developed within the framework of the work, a cross-shaped Hall Effect sensor system with comb electrodes was proposed. Recommendations were also proposed to modify the shape of the Hall Effect sensor so as to ensure the stability of its structure. An original test stand for resistive tomography of thin-film Hall Effect sensors with comb electrodes was also developed.

The two methods proposed in this thesis to compensate the voltage offset of the output signal from the thin-film Hall Effect sensor are utilizing tomographic transformation. This transformation was implemented using the open software Elmer FEM, Salome and Octave.

As part of the work, in cooperation with the Institute of Electronic Materials Technology ITME, the methods of compensating the voltage offset of the output signal from thin-film graphene Hall Effect sensors were verified. The verification of the first method

included the analysis of numerical models of Hall Effect sensor structures with discontinuities in terms of the possibility of laser correction of real Hall Effect sensors. The second method was verified experimentally in conditions of small scale production of Hall Effect sensors.

Methods developed for this thesis allowed compensating the voltage offset of thin-film graphene Hall Effect sensors to less than ten percent of the initial value. In combination with the proposed guidelines for the modification of the shape of graphene Hall Effect sensors, the proposed solutions have opened up the possibility of practical implementation of graphene Hall Effect sensors developed in ITME for the production of current transformers offered by LUMEL S.A.

Keywords: Hall sensor, resistivity tomography

Spis treści

1. Wstęp	13
2. Cel i zakres pracy.....	15
3. Przegląd stanu wiedzy w zakresie techniki hallotronowej.....	17
3.1. Zasada działania hallotronów	17
3.2. Kształty sensorów hallotronowych	25
3.3. Technologie wytwarzania hallotronów	26
3.4. Hallotроны do pomiarów trójosiowych.....	30
3.5. Źródła napięcia niezrównoważenia w sygnale wyjściowym hallotyonu i metody jego kompensacji.....	33
3.6. Scalone przetworniki hallotronowe.....	40
4. Grafen w sensorach hallotronowych.....	41
5. Przegląd stanu wiedzy w zakresie tomografii rezystancyjnej	45
5.1. Istota pomiarów tomograficznych.....	45
5.2. Tomografia rezystancyjna	48
5.3. Przekształcenie proste w modelowaniu hallotronów cienkowarstwowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych.....	51
6. Koncepcja zaproponowanej metody kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotyonu z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej	55
7. Przedmiot badań – hallotron cienkowarstwowy.....	56
8. Modelowanie hallotyonu z użyciem metody elementów skończonych	61
8.1. Modele geometryczne wybranych struktur hallotronowych	61
8.2. Generowanie siatek na podstawie modeli geometrycznych	65
8.3. Wyniki modelowania	67
8.4. Podsumowanie wyników modelowania	72
9. Korekcja hallotyonu z użyciem tomografii rezystancyjnej	74

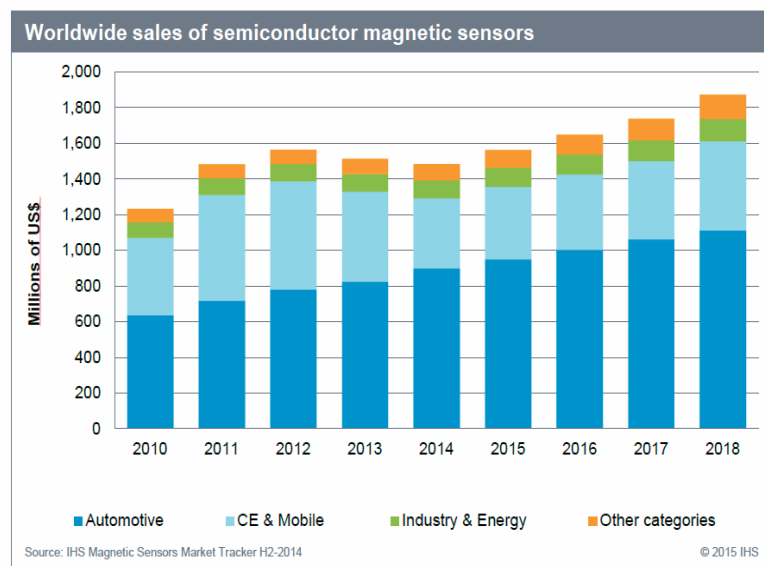
9.1. Opracowane stanowisko pomiarowe tomografu rezystancyjnego	74
9.2. Implementacja przekształcenia tomograficznego z użyciem otwartego oprogramowania.....	78
9.3. Funkcja celu	80
9.4. Modelowanie nieciągłości w hallotronie	82
9.5. Tomograficzne wyznaczenie wady równoważnej i możliwość korekcji napięcia niezrównoważenia hallotronu	86
9.6. Analiza dokładności odwzorowania nieciągłości struktury cienkowarstwowej w wyniku tomograficznego przekształcenia odwrotnego	90
10. Tomograficzna metoda kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotronu z użyciem połączeń elektrod grzebieniowych.....	93
10.1. Koncepcja metody.....	93
10.2. Metodyka kompensacji napięcia niezrównoważenia przy wykorzystaniu metody komutacyjnej.....	93
10.3. Weryfikacja zaproponowanej metody.....	95
11. Wytyczne do przemysłowego zastosowania metod kompensacji napięcia niezrównoważenia	98
12. Zastosowanie kompensacji w hallotronie do przekładnika prądu stałego.....	99
13. Podsumowanie i wnioski	100
14. Kierunki dalszych prac	102
15. Bibliografia	103

Wykaz najważniejszych oznaczeń

B (T)	- indukcja magnetyczna
H (A/m)	- natężenie pola magnetycznego
μ_0 (T·m/A)	- stała magnetyczna
μ_r	- przenikalność względna magnetyczna materiału
n (1/cm ³)	- koncentracja nośników
μ (m/V·s)	- ruchliwość nośników
σ (1/Ωm)	- przewodność materiału
σ_0 (1/Ωm)	- przewodność właściwa materiału
φ (V)	- potencjał elektryczny
e (C)	- ładunek elementarny
I (A)	- prąd zasilania hallotronu
j (A/m ²)	- objętościowa gęstość prądu elektrycznego
U_H (V)	- napięcie Halla
R_H (1/m ³ C)	- współczynnik Halla
S_A (V/T)	- czułość absolutna hallotronu
S_I (V/AT)	- czułość hallotronu w odniesieniu do prądu zasilania
S_U (V/VT)	- czułość hallotronu w odniesieniu do napięcia zasilania
U_n (V)	- napięcie niezrównoważenia hallotronu
G	- bezwymiarowy współczynnik kształtu hallotronu
R_{we} (Ω)	- rezystancja wejściowa
R_{wy} (Ω)	- rezystancja wyjściowa
αU_H (%/°K)	- współczynnik temperaturowy czułości hallotronu
αR_{we} (%/°K)	- współczynnik temperaturowy rezystancji wejściowej

1. Wstęp

Hallotrony są najpowszechniej stosowanymi czujnikami pola magnetycznego. Znalazły one zastosowanie w szeroko rozumianej automatyce przemysłowej (jako detektory obecności obiektu [1], detektory położenia [2], etc.), miernictwie elektrycznym (w magnetometrach, przekładnikach prądowych i napięciowych) oraz w branży motoryzacyjnej [3] (jako detektory obrotu [4] oraz detektory krańcowe [5]). Wartość rynku czujników pola magnetycznego wynosi aktualnie ponad 1,6 miliarda USD [6] i ciągle rośnie. Atrakcyjność hallotronów wynika z ich parametrów użytkowych i stosunkowo niskiej ceny pojedynczego czujnika przy produkcji masowej. Uzysk produkcyjny w wytwarzaniu podzespołów półprzewodnikowych stanowi od 10 do 90% [7]. W zależności od technologii i masowości produkcji oraz ewentualnych dołączonych certyfikatów, cena pojedynczego czujnika zawiera się w przedziale od 1 USD do ponad 1000 USD.



Rys. 1.1. Dynamika wzrostu rynku półprzewodnikowych czujników pola magnetycznego [8]

Zastosowanie nowo opracowywanych materiałów do produkcji hallotronów spowodowało znaczne polepszenie ich parametrów użytkowych. Obiecującą technologią produkcji hallotronów jest technologia cienkowarstwowa, w szczególności wykorzystanie grafenu epitaksjalnego [9]. Jednak zastosowanie technologii grafenowej wiąże się z obecnością nieciągłości w materiale sensora. Nieciągłości te powodują znaczącą asymetrię kształtu sensora, co skutkuje wzrostem wartości napięcia niezrównoważenia w jego sygnale wyjściowym. W rezultacie konieczne jest prowadzenie procesu selekcji i odrzucenie

hallotronów wykazujących zbyt duże napięcie niezrównoważenia. Prowadzenie selekcji zmniejsza uzysk produkcyjny oraz zwiększa cenę jednostkową gotowego sensora.

Znane są metody kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotronu polegające na zastosowaniu sumującego układu elektronicznego, równoważenie za pomocą układów dzielnika napięcia, układy dynamicznej kompensacji napięcia niezrównoważenia oraz układy kompensacji cyfrowej. Należy jednak podkreślić, że przy znacznych wartościach napięcia niezrównoważenia, jego dryft temperaturowy istotnie wpływa na właściwości użytkowe czujnika. Dlatego stosowane powszechnie metody kompensacji napięcia niezrównoważenia stosują głównie rozwiązania z zakresu elektroniki analogowej, są nieskuteczne i nie zapewniają wymaganej stabilności wskazań hallotronu.

Rozwiązaniem tego problemu jest przeprowadzenie korekty kształtu sensora przez usunięcie wybranego obszaru elementu sensorowego, np. przez wypalenie go laserem, analogicznie do rozwiązania szeroko stosowanego w technologii produkcji i korekcji laserowej rezystorów precyzyjnych [10]. Jednak do tej pory zastosowanie laserowej korekcji kształtu sensorów Halla było ograniczone ze względu na brak metody wyznaczenia obszaru korekcyjnego. Dopiero zaproponowane w niniejszej pracy metody, bazujące na tomografii rezystancyjnej, umożliwiają skuteczne rozwiązanie problemu minimalizacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotronów cienkowarstwowych wykonanych z grafenu.

Praca częściowo powstała w ramach realizacji projektu GRAF-TECH/NCBR/12/14/2013 „Grafenowe czujniki pola magnetycznego do zastosowań przemysłowych”.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest opracowanie nowej metody kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotronów cienkowarstwowych. W ramach pracy skoncentrowano się zarówno na metodzie tomograficznej, która umożliwi wyznaczenie obszarów korekcyjnych (np. do korekcji laserowej), jak i na metodzie wyboru połączeń elektrod grzebieniowych w specjalnie zaprojektowanym hallotronie.

W pracy analizowano wybrane warianty geometrii hallotronów w kształcie krzyża, wykonane z materiałów cienkowarstwowych, w szczególności z grafenu. Hallotроны grafenowe cechują się znaczną czułością pomiarową, jednak nieciągłości materiału skutkują znacznym napięciem niezrównoważenia sygnału pomiarowego, co stanowi istotną barierę w ich zastosowaniach przemysłowych. Celem analiz było dobranie układu geometrii pozwalającego na minimalizację napięć niezrównoważenia i zjawisk termicznych.

W ramach pracy zostały zrealizowane następujące zadania:

- opracowano model sensora Halla w kształcie krzyża z elektrodami grzebieniowymi, umożliwiającymi realizację badań z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej. Kształt hallotronu zmodyfikowano tak, aby uniknąć zjawiska lokalnego nagrzewania się materiału w narożnikach krzyża. Celem optymalizacji jest zapewnienie stabilności struktury hallotronu cienkowarstwowego w trakcie pracy, co umożliwi realizację pomiarów tomograficznych w powtarzalnych warunkach,

- opracowano i wykonano sterowany komputerowo tomograf rezystancyjny umożliwiający automatyczne pomiary tomograficzne sensorów Halla,

- opracowano i zaimplementowano (z wykorzystaniem otwartego oprogramowania) metodę wyznaczenia obszarów korekcyjnych na powierzchni hallotronów cienkowarstwowych metodą tomografii rezystancyjnej. Usunięcie materiału z obszaru korekcyjnego ma na celu zmniejszenie napięcia niezrównoważenia powstałego w efekcie niejednorodności warstwy grafenu,

- opracowano i zaimplementowano metodę kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotronu przez wybór (z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej) kombinacji połączeń elektrod grzebieniowych w zaproponowanej strukturze hallotronu,

- w odniesieniu do metody wyznaczenia obszarów korekcyjnych przeprowadzono weryfikację na podstawie modeli numerycznych hallotronów z nieciągłościami modelowymi w celu sprawdzenia właściwości użytkowych metody,

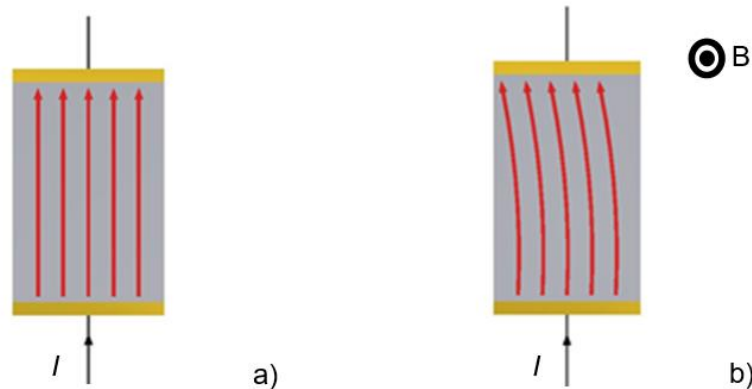
- w odniesieniu do metody kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotyonu przez wybór kombinacji połączeń elektrod grzebieniowych przeprowadzono weryfikację eksperymentalną metody na modelach hallotronów grafenowych i określono parametry metody w odniesieniu do rzeczywistego procesu produkcji hallotronów.

Należy podkreślić, że znaczne wartości napięcia niezrównoważenia sygnału pomiarowego z cienkowarstwowych (w tym grafenowych) sensorów hallotronowych są istotną barierą w ich wdrożeniu w przemyśle. Opracowane przez autora metody umożliwią praktyczne wykorzystanie polskich hallotronów grafenowych między innymi w produkcji przekładników stałoprądowych w firmie LUMEL S.A.

3. Przegląd stanu wiedzy w zakresie techniki hallotronowej

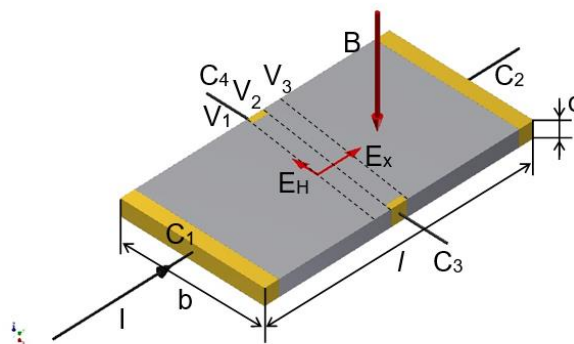
3.1. Zasada działania hallotronów

Efekt Halla jest zjawiskiem fizycznym opisanym przez Edwina Halla w 1879 roku [11]. Zjawisko to opisuje działanie pola magnetycznego na przepływ prądu elektrycznego i wynika z działania siły Lorentza na nośniki ładunku, jak przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Zjawisko Halla w płytce prostopadłościennej: a) przepływ prądu I przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, b) przepływ prądu I w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Kolorem szarym zaznaczono przewodnik, zaś kolorem żółtym elektrody

Dla zobrazowania zjawiska na rysunku 3.2. przedstawiono przepływ prądu elektrycznego I w przewodniku o kształcie płytki prostopadłościennej o grubości d , szerokości b oraz długości l .



Rys. 3.2. Zjawisko Halla w płytce prostopadłościennej: V_1, V_2, V_3 – linie ekwipotencjalne; C_1, C_2 – elektrody zasilające; C_3, C_4 – elektrody pomiarowe, E_H – wektor poprzecznego pola elektrycznego, E_x – wektor pola elektrycznego w kierunku zgodnym z przepływem prądu

Przyjmując założenie, że w płytce półprzewodnikowej nośnikami ładunku są elektrony, a pole magnetyczne o indukcji \vec{B} jest skierowane prostopadle do płaszczyzny płytki, wskutek działania siły Lorentza \vec{F} tory ładunków ulegają zmianie i gromadzą się przy jednym boku przewodnika [12]:

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.1)$$

przy czym: e – ładunek elementarny, \vec{E} – wektor natężenia pola elektrycznego, \vec{v} – wektor prędkości ładunku elementarnego, \vec{B} – wektor indukcji pola magnetycznego.

Po osiągnięciu równowagi, składowa poprzeczna siły Lorentza równoważy się z siłą elektromotoryczną, która działa w kierunku odwrotnym [13]:

$$eE_H = ev_x B_z \quad (3.2)$$

przy czym: E_H – natężenie pola elektrycznego w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu prądu, v_x – składowa wektora \vec{v} w kierunku prostopadłym do przepływu prądu, B_z – składowa wektora \vec{B} prostopadła do płaszczyzny płytki, e - ładunek elektronu.

Podstawiając do zależności 3.2 wartość poprzecznego pola elektrycznego przez:

$$E_H = \frac{U_H}{b} \quad (3.3)$$

(przy czym: U_H – różnica potencjału na bokach płytki pomiędzy punktami C_3 i C_4 , b - szerokość płytki),

otrzymujemy równanie postaci:

$$U_H = v_x B_z b \quad (3.4)$$

Składowa v_x prędkości ładunku ma postać:

$$v_x = \mu E_x \quad (3.5)$$

przy czym: μ - ruchliwość ładunków elementarnych w materiale, E_x natężenie pola elektrycznego w kierunku zgodnym z przepływem prądu.

Prąd \vec{I} płynący w przewodniku można przedstawić jako:

$$\vec{I} = \vec{j} \cdot S = \vec{E}_x \cdot e \cdot n \cdot \mu \cdot b \cdot d \quad (3.6)$$

przy czym: \vec{j} - objętościowa gęstość prądu elektrycznego, S – przekrój poprzeczny płytki, n – koncentracja nośników ładunku, d – grubość płytki, zaś b – szerokość płytki.

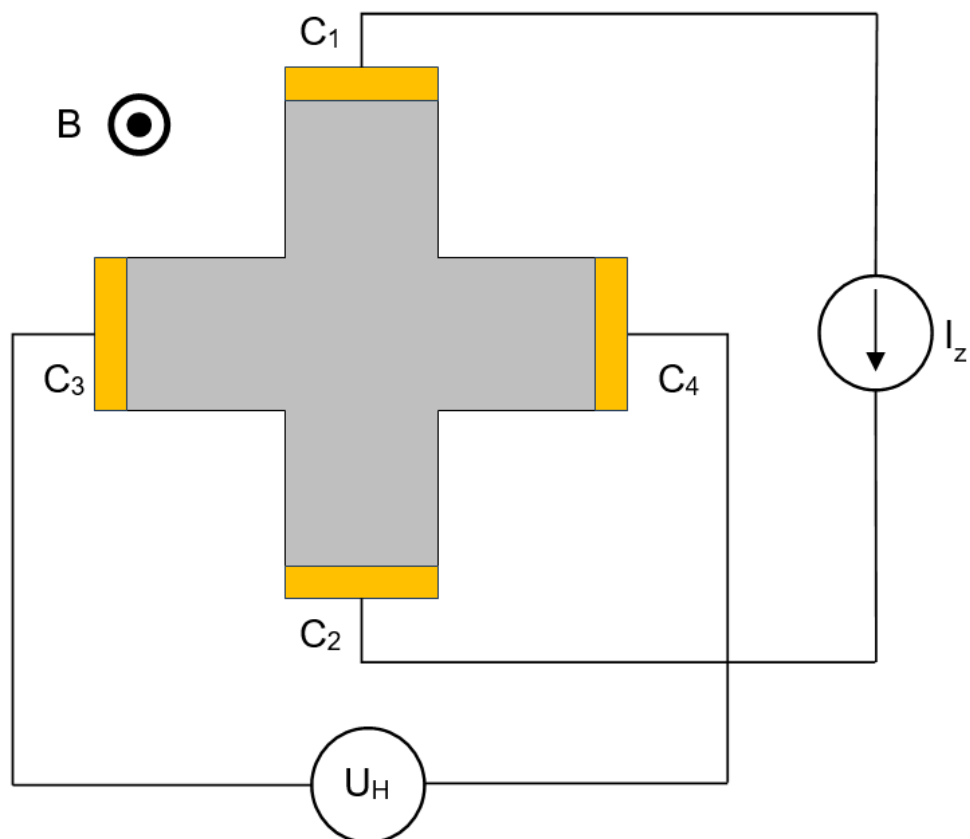
Podstawiając zależności 3.5 oraz 3.6 do zależności 3.4 otrzymujemy zależność opisującą napięcie Halla U_H :

$$U_H = \frac{1}{en} \cdot \frac{iB_z}{d} = R_H \cdot \frac{iB_z}{d} \quad (3.7)$$

przy czym B_z to wartość składowej indukcji magnetycznej \vec{B} działającej w kierunku prostopadłym do powierzchni płytki sensora Halla. Wyrażenie R_H nazywano współczynnikiem Halla [15]. Jest to parametr materiałowy, który zależy od koncentracji nośników większościowych.

Czujnik pola magnetycznego pracujący z zastosowaniem zjawiska Halla nazywany jest hallotronem lub czujnikiem Halla. Hallotrony znalazły szerokie zastosowanie w technice i przemyśle ze względu na stosunkowo prostą budowę, atrakcyjne parametry oraz niezawodność.

Najczęściej stosowane w praktyce hallotrony wykonywane są z materiału półprzewodnikowego w postaci płytki lub cienkiej warstwy. Geometria struktury hallotronowej zależy od rodzaju hallotronu i oczekiwanych parametrów [16]. Stosowane kształty opisanych w literaturze hallotronów planarnych zamieszczono w rozdziale 3.2. Najczęściej jest to płytka prostopadłościenna lub krzyż. W celu doprowadzenia prądu zasilania i odbioru sygnału na powierzchni struktury wykonywane są metaliczne elektrody. Na rysunku 3.3 przedstawiono schematycznie budowę typowego czujnika Halla.



Rys. 3.3. Schemat budowy struktury hallotronowej: C_1 i C_2 elektrody prądowe, C_3 i C_4 elektrody napięciowe (Halla). Półprzewodnik zaznaczony jest kolorem szarym, a elektrody metalowe zaznaczono kolorem żółtym

Elektrody oznaczone symbolami C_1 i C_2 są elektrodami prądowymi, przez które płynie prąd zasilania hallotronu I . Elektrody oznaczone symbolami C_3 i C_4 są elektrodami napięciowymi. Na tych elektrodach przeprowadza się pomiar napięcia wyjściowego hallotronu U_H , na które składa się napięcie Halla oraz napięcie niezrównoważenia hallotronu.

Po zasileniu hallotronu i poddaniu go działaniu pola magnetycznego B prostopadłego do powierzchni sensora, na elektrodach napięciowych pojawia się napięcie Halla. W przypadku idealnej struktury hallotronowej jest to jedyne napięcie, jakie pojawia się na elektrodach napięciowych. Przez strukturę idealną należy rozumieć taką, w której w nieobecności pola magnetycznego, elektrody napięciowe po obu stronach struktury leżą na tych samych liniach ekwipotencjalnych. W rezultacie przy braku pola magnetycznego nie występuje na nich różnica potencjału, zwana napięciem niezrównoważenia hallotronu. Napięcie

niezrównoważenia pojawia się w strukturach, których wymiary geometryczne odbiegają od założonych lub występuje niejednorodność elektryczna półprzewodnika.

Czujniki Halla charakteryzowane są przez parametry użytkowe. Wśród tych parametrów, oprócz napięcia niezrównoważenia, należy wyróżnić: czułość, rezystancję wejściową i wyjściową, liniowość, prąd zasilania oraz charakterystyki szumowe.

Czułość hallotronu jest parametrem określającym jego wrażliwość na pole magnetyczne. Parametr ten zależy od materiału, z jakiego został wykonany hallotron, temperatury, prądu (napięcia) zasilania oraz grubości warstwy półprzewodnika. Czułość absolutna S_A (wyrażona w V/T) dana jest następującą zależnością:

$$S_A = \frac{U_H}{B} = G \frac{R_H}{nqd} I \quad (3.8)$$

przy czym: G – bezwymiarowy współczynnik kształtu [17,18],
 I – prąd zasilania.

Wyróżnia się także czułość hallotronu w odniesieniu do prądu zasilania S_I (V/AT) wyrażoną zależnością:

$$S_I = \frac{S_A}{I} = G \frac{R_H}{d} \quad (3.9)$$

oraz czułość w odniesieniu do napięcia zasilania S_U (V/VT):

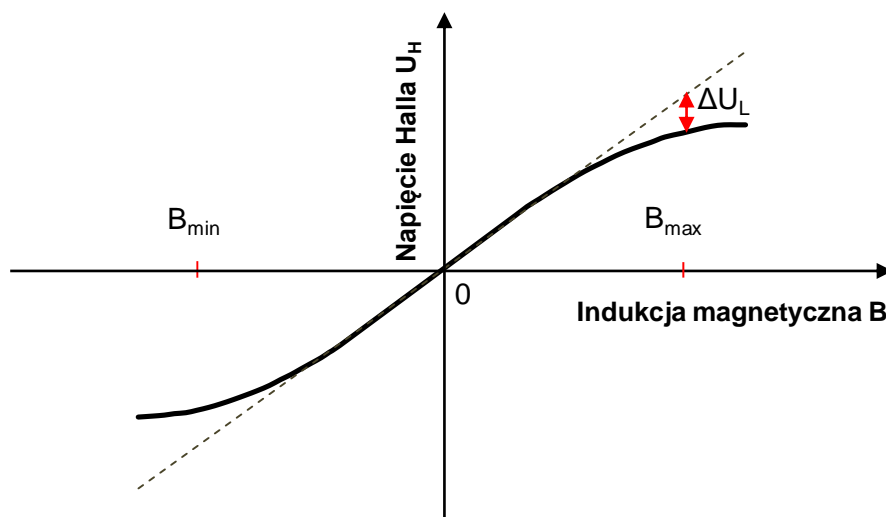
$$S_U = \frac{S_A}{U} = G \frac{b}{l} \mu \quad (3.10)$$

przy czym: U – napięcie zasilania.

W rzeczywistym czujniku Halla przy załączonym zasilaniu i braku oddziaływania pola magnetycznego można zaobserwować napięcie na zaciskach wyjściowych, nazywane napięciem niezrównoważenia U_n . W rozdziale 3.5 opisano przyczyny powstawania napięcia niezrównoważenia. Praktyczną miarą napięcia niezrównoważenia jest jego ekwiwalent magnetyczny B_n wyrażany w jednostkach indukcji magnetycznej (Teslach - T):

$$B_n = \frac{U_n}{S_A} \quad (3.11)$$

W hallotronie sygnał wyjściowy jest generowany tylko gdy hallotron jest zasilany. Przy spełnieniu warunku, że napięcie wyjściowe jest o wiele mniejsze od napięcia zasilania $U_{wy} \ll U$, hallotроны zazwyczaj posiadają liniową zależność napięcia wyjściowego od mierzonego pola magnetycznego, co jest przedstawione na rysunku 3.4.

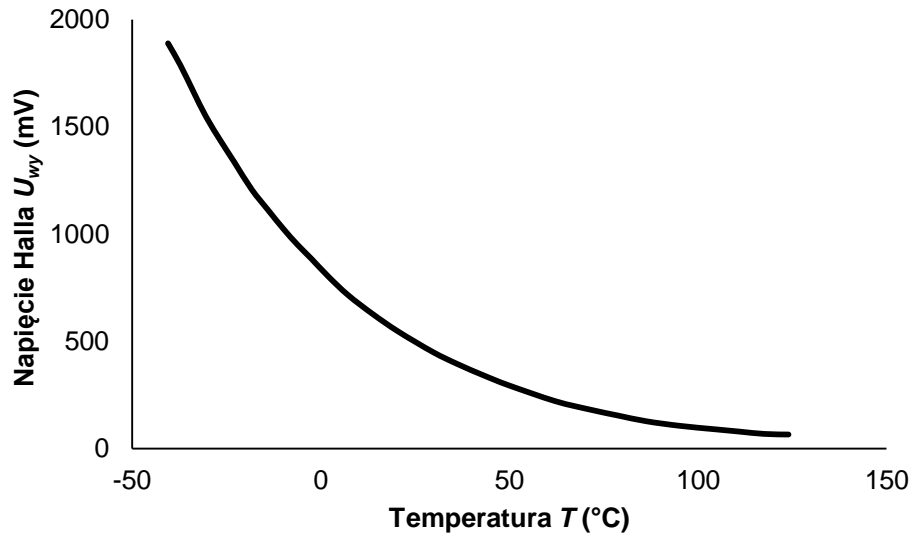


Rys. 3.4. Charakterystyka statyczna czujnika Halla. Wykres zależności napięcia Halla od indukcji magnetycznej $U_H(B)$ z zaznaczeniem maksymalnego błędu liniowości ΔU_L

Typowo błąd liniowości ΔU_L nie przekracza wartości 1% zakresu pomiarowego. Na liniowość charakterystyki wpływa geometria struktury, wartość mierzonego pola magnetycznego oraz rezystancja obciążenia.

Rezystancja wejściowa R_{we} oraz wyjściowa R_{wy} są rezystancjami pomiędzy odpowiednio zaciskami wejściowymi i wyjściowymi hallotronu. Zależą one bezpośrednio od parametrów materiału półprzewodnikowego oraz geometrii struktury. Typowe wartości tych rezystancji mieszczą się w granicach od pojedynczych ohmów do kilku kiloohmów.

Koncentracja nośników n w materiale półprzewodnikowym bezpośrednio zależy od temperatury i ma wpływ na czułość hallotronu. Zależność czułości od temperatury ma charakter nieliniowy, co jest przedstawione na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Zależność napięcia wyjściowego U_{wy} od temperatury T hallotronu [19]. Prąd zasilania $I = 5$ mA, a indukcja pola magnetycznego $B = 50$ mT

W notach katalogowych współczynnik temperaturowy czułości αV_H zazwyczaj jest podawany jest jako wartość średnia temperatury z zakresu pracy hallotronu [19]:

$$\alpha V_H = \frac{1}{V_H(T_1)} \cdot \frac{V_H(T_3) - V_H(T_2)}{T_3 - T_2} \cdot 100\% \quad (3.12)$$

przy czym: $V_H(T_1)$, $V_H(T_2)$, $V_H(T_3)$ - wartość napięcia Halla odpowiednio przy temperaturze: T_1 - w środku jej zakresu zmian, T_2 - na początku zakresu, T_3 - na końcu zakresu.

Rezystancje wejściowa R_{we} oraz wyjściowa R_{wy} również są zależne od temperatury T . Współczynnik temperaturowy rezystancji αR_{we} jest podawany, jako wartość średnia w zakresie temperaturowym [19]:

$$\alpha R_{we} = \frac{1}{R_{we}(T_1)} \cdot \frac{R_{we}(T_3) - R_{we}(T_2)}{T_3 - T_2} \cdot 100\% \quad (3.13)$$

przy czym: $R_{we}(T_1)$, $R_{we}(T_2)$, $R_{we}(T_3)$ - wartość rezystancji wejściowej odpowiednio przy temperaturze T_1 - w środku zakresu, T_2 - na początku zakresu, T_3 - na końcu zakresu.

Dominującymi składowymi szumu sygnału wyjściowego hallotronu jest szum termiczny (Jonsona) oraz szum różowy [20]. Podobnie jak w przypadku napięcia niezrównoważenia wprowadza się ekwiwalent magnetyczny szumu (zależność 3.14). Wartość ekwiwalentu magnetycznego szumu $S_{NB}(f)$ definiuje minimalne natężenie pola magnetycznego, które jest możliwe do zmierzenia przez sensor [21].

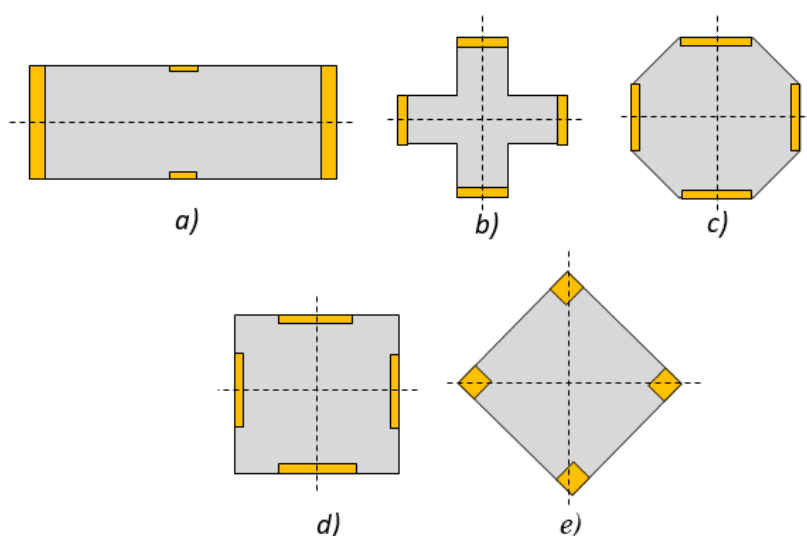
$$S_{NB}(f) = \frac{S_{NV}(f)}{S_A^2} \quad (3.14)$$

przy czym: $S_{NV}(f)$ - gęstość widmowa szumu, S_A - czułość absolutna hallotronu.

3.2. Kształty sensorów hallotronowych

Kształt sensora hallotronowego ma bezpośredni wpływ na parametry użytkowe hallotyonu, jak jego czułość, kształt charakterystyki oraz zakres pomiarowy [22-24].

Pierwsze konstrukcje hallotyonu, zwłaszcza hallotyonu lite, wykonywano w formie prostopadłościanu (rysunek 3.6.a). Podyktowane to było możliwościami technologicznymi [25]. Rozpływ prądu w przypadku prostopadłościanu jest równomierny w całym przekroju. Ze względu na przepływ prądu w pobliżu kontaktów pomiarowych hallotyonu w kształcie prostokąta są bardziej narażone na napięcie niezrównoważenia wywołane efektami termoelektrycznymi.



Rys. 3.6. Typowe geometrie struktur Halla: a) struktura prostokątna, b) struktura krzyżowa, c) struktura ośmiokątna, d) struktura kwadratowa, e) struktura rombowa

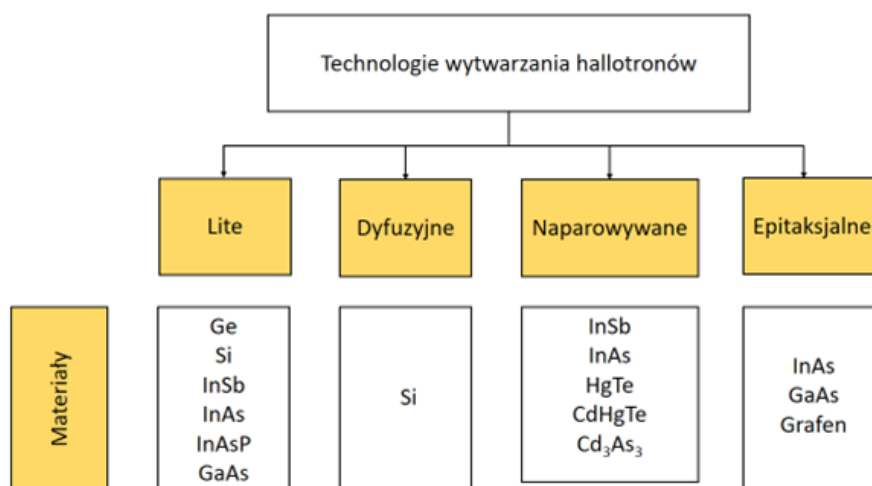
Ze względu na potrzebę zastosowania zaawansowanych technik kompensacji napięcia niezrównoważenia, wśród obecnie stosowanych dominują hallotyonu o konstrukcjach symetrycznych, w których pola kontaktowe znajdują się w obszarach najdalej odległych od osi symetrii. Z przedstawionych na rys 3.6 warunek ten spełniają rozwiązania typu b) w formie krzyża, c) ośmiokąta, e) rombu [26-28]. W rozdziale 7 przeprowadzono analizę numeryczną kształtu hallotyonu o takiej właściwości .

3.3. Technologie wytwarzania hallotronów

Technologia wykonywania hallotronu powinna być dobrana do jego przeznaczenia i oczekiwanych właściwości. Tradycyjnie materiałem używanym do produkcji hallotronów są półprzewodniki typu *n*. Materiały te odznaczają się większą ruchliwością nośników niż półprzewodniki typu *p*.

Początkowo czujniki Halla wytwarzane były w postaci litej struktury półprzewodnikowej z monokryształów germanu (Ge) oraz krzemu (Si). Wraz z rozwojem półprzewodników o wysokiej ruchliwości rynek hallotronów zdominowały czujniki wytwarzane z antymonku indu (InSb), arsenku indu (InAs) oraz arsenku galu (GaAs).

Ze względu na technologię wytwarzania hallotrony dzielone są na lite, dyfuzyjne, naparowywane oraz epitaksjalne. Podział hallotronów ze względu na zastosowaną technologię wytwarzania podano na rysunku 3.7.

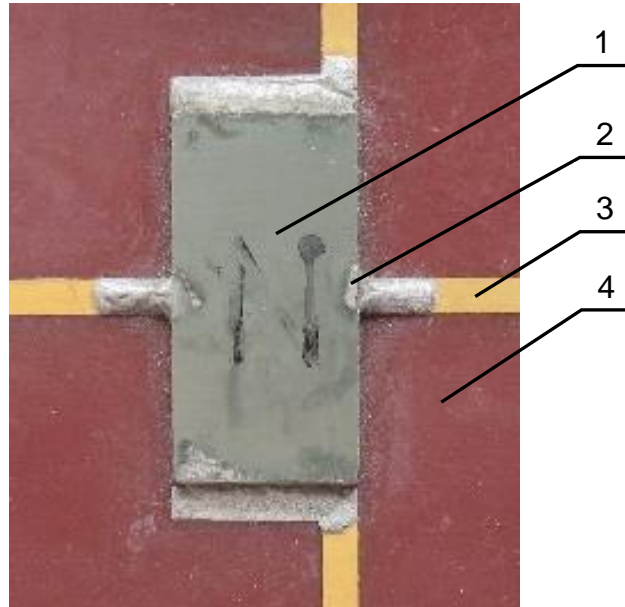


Rys. 3.7. Technologie wytwarzania hallotronów

Produkcja hallotronu **litego** obejmuje takie procesy jak:

- uzyskanie płytek półprzewodnika,
- obróbka powierzchni płytek,
- wykonanie kontaktów metalicznych,
- hermetyzacja.

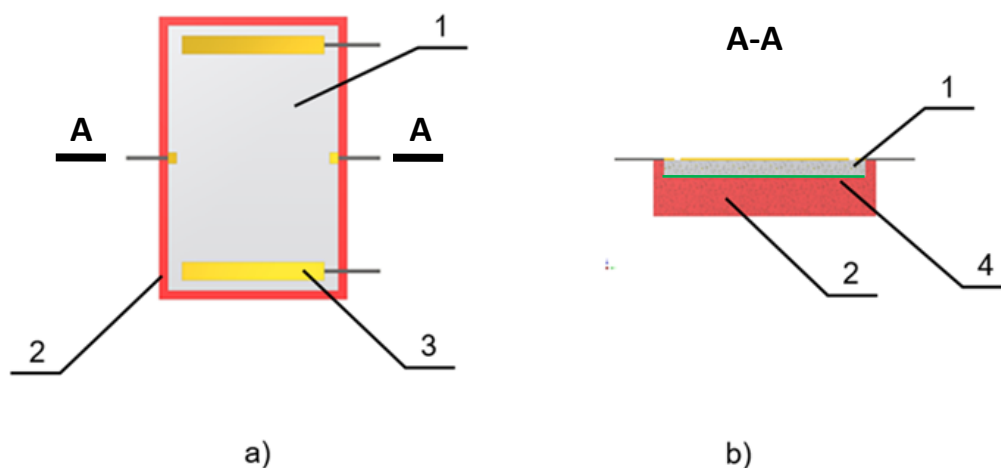
Płytki półprzewodnikowe wykonuje się tradycyjnymi technikami mechanicznymi np. przez cięcie piłą diamentową. Natomiast strukturę hallotronową z płytki półprzewodnika kształtowano przez wykrawanie magnetostrykcyjne lub litografię optyczną [29]. Przykład hallotronu wykonanego w technologii litej pokazano na rysunku 3.8.



Rys. 3.8. Lity hallotron germanowy [30]: 1) płytka germanowa, 2) kontakt lutowany, 3) ścieżka doprowadzająca, 4) podłoże

Technologia hallotronów litych sięga lat 50. (wg poradni PWN zapis z kropką jest poprawny, z zapisem końcówki "-ch" nie, acz to tylko moja wskazówka) XX wieku. Jest to najstarsza technologia produkcji czujników Halla. Obecnie nie jest stosowana, ze względu na małą powtarzalność uzyskiwanych elementów oraz wysokie koszty ich produkcji.

Technologia **dyfuzyjna** wykonywania hallotronów została zapożyczona z technologii produkcji tranzystorów [31]. W przypadku hallotronów polega ona na wytworzeniu złącza p-n na podłożu o przewodnictwie p. Wykorzystanie technologii dyfuzyjnej pozwala na wytworzenie hallotronu (rys 3.9) o warstwie czynnej rozmiaru nawet kilku mikrometrów. Do wykonania hallotronów technologią dyfuzyjną stosowano krzem, german oraz arsenek galu. Jednak istotnym problemem ograniczającym wykorzystanie hallotronów wykonanych w tej technologii jest prąd wsteczny oraz depolaryzacja złącza p-n prądem sterowania [32].



Rys. 3.9. Hallotron dyfuzyjny: a) struktura objętościowa, b) widok przekroju struktury. 1) warstwa czynna hallotronu w postaci półprzewodnika typu n, 2) warstwa podłożowa typu p, 3) kontakt elektryczny, 4) warstwa zaporowa w postaci złącza p-n

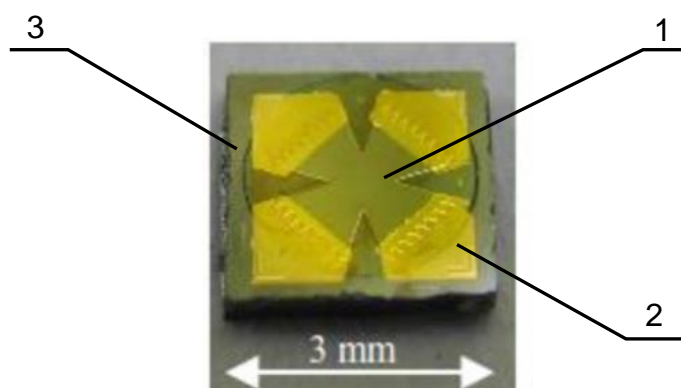
Technologia hallotronów naporowywanych polega na naporowaniu próżniowym cienkiej warstwy materiału półprzewodnikowego na podłoże izolujące. Wykorzystanie tej technologii umożliwia wykonanie sensora hallotronowego z szerokiej gamy materiałów półprzewodnikowych. Właściwości hallotronów naporowywanych są zależne od parametrów procesu naporowywania i nie są jednoznacznie określone przez zastosowany materiał [33].

W produkcji hallotronów naporowywanych należy wyróżnić dwa kluczowe etapy:

- naporowywanie warstwy półprzewodnikowej,
- naporowywanie elektrod.

Naporowywanie warstwy półprzewodnikowej odbywa się przez naporowywanie magnetronowe (ang. Sputter Deposition) lub naporowywanie próżniowe (ang. Vacuum Deposition) [31].

Technikami PVD uzyskane są warstwy od 500 nm do 5 μm . Technologia hallotronów naporowywanych jest nierozłącznie powiązana z litografią optyczną. Ze względu na to możliwa jest względnie tania produkcja masowa o dużej powtarzalności parametrów. Przykładowy hallotron naporowywany pokazano na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Hallotron naparowywany [34]: 1) warstwa półprzewodnika, 2) kontakt metaliczny, 3) podłoże

Warstwy półprzewodnikowe wytworzone przez naparowywanie nie są monokrystaliczne. Z tego względu, hallotроны wytworzone tymi technologiami mają nieco gorsze parametry niż czujniki Halla wytworzone z materiałów litych o tym samym składzie [35].

Technologia **epitaksjalna** polega na krystalizacji materiału półprzewodnikowego z fazy gazowej na podłożu o zbliżonej sieci krystalicznej. Pozwala to na uzyskiwanie bardzo cienkich warstw o strukturze monokryształu [36].

Możliwość wykonania cienkich warstw monokrystalicznych jest szczególnie istotna z punktu widzenia produkcji hallotronów z materiałów o wysokiej ruchliwości nośników, czyli takich jak antymonek indu (InSb) oraz arsenek indu (InAs) [37]. W przypadku krzemu technologia epitaksjalna umożliwia przede wszystkim wykonanie układów scalonych obejmujących tranzystory, rezystory oraz strukturę hallotronową na jednym podłożu, w trakcie jednego procesu technologicznego.

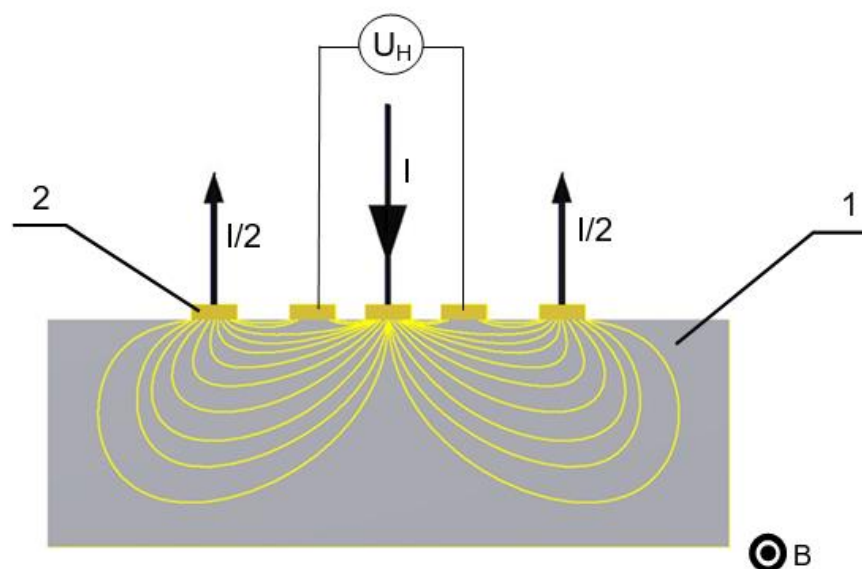
W technologii epitaksjalnej bardzo ważna jest wysoka jakość podłoża, ponieważ defekty struktury krystalicznej są przenoszone na strukturę warstwy nanoszonej [38]. Współcześnie typowe hallotроны produkowane na skalę masową wykonywane są z krzemu (Si), arsenku galu (GaAs), arsenku indu (InAs) oraz antymonku indu (InSb) [39, 44].

3.4. Hallotrony do pomiarów trójosiowych

Oprócz opisanego w rozdziale 3.2 typowego układu pracy sensora Halla istnieją inne rozwiązania (budowy?) hallotronów, przeznaczone do specyficznych zadań pomiarowych. Są to:

- hallotrony pionowe (ang. Vertical Hall-effect sensor) [40],
- hallotrony trójosiowe (ang. 3d Hall sensor) [41, 42].

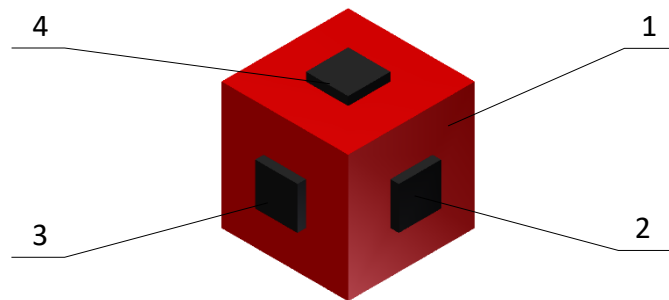
W roku 1984 R. S. Popović zaproponował rozwiązanie budowy hallotronu, który reaguje na składową indukcji pola magnetycznego działającą w płaszczyźnie czujnika (tzw. hallotron pionowy). Hallotron pionowy wykorzystuje geometryczne przekształcenie typowego czujnika Halla. Został on tak skonstruowany, by wszystkie elektrody były umieszczone na powierzchni struktury, jak podano na rysunku 3.11. Taki hallotron posiada 3 elektrody zasilające oraz 2 elektrody pomiarowe.



Rys. 3.11. Hallotron pionowy: 1) półprzewodnik, 2) kontakt metaliczny

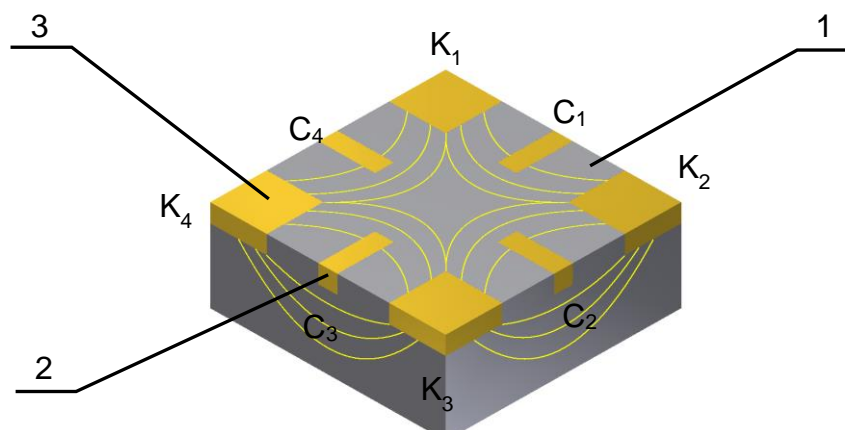
Zaproponowany przez Popovica hallotron został wykonany w technologii CMOS. Czuły obszar struktury półprzewodnikowej ograniczono za pośrednictwem dyfuzji (ang. deep diffusion) [43]. Osiągnięto czułość 450 V/AT. Pionowy czujnik hala znalazł szerokie praktyczne zastosowanie w przemyśle, o czym świadczy dostępność handlowych czujników w ofercie takich producentów jak Infineon oraz Allegro [44, 45].

Hallotrony z zastosowaniem struktur płaskich są czułe na pole magnetyczne prostopadłe do powierzchni czujnika zatem pomiar wszystkich składowych wektora natężenia pola magnetycznego B wymaga trzech sensorów umieszczonych w płaszczyznach prostopadłych do wektorów tworzących bazę ortogonalną, co przedstawiono na rysunku 3.12. Takie rozwiązanie charakteryzuje się trudnością precyzyjnego ustawienia czujników składowych [46] oraz względnie dużymi wymiarami [47].



Rys. 3.12. Sonda pola magnetycznego oparta na konwencjonalnych czujnikach Halla: 1) ramka ortogonalna, 2-4) niezależne hallotrony do pomiaru składowej wektora pola magnetycznego w osiach: X, Y, Z

Opracowanie pionowego czujnika Halla umożliwiło skonstruowanie sondy trójosiowej ze strukturami umieszczonymi na jednym podłożu. W roku 2000 Schott zaproponował, przedstawiony na rysunku 3.13, hallotron do pomiaru indukcji pola magnetycznego w trzech osiach, zawierający tylko 8 kontaktów [48]. Dostępne są również sondy bazujące na jednym podłożu, zawierającym podwójny pionowy czujnik Halla do pomiaru w dwóch osiach oraz jeden typowy (poziomy) czujnik Halla [49, 50].



Rys. 3.13. Trójosiowa sonda pola magnetycznego w wykonana na jednym podłożu: 1) warstwa półprzewodnika, 2) elektroda prądowa, 3) elektroda napięciowa. C_{1-4} - kontakty napięciowe, K_{1-4} – kontakty prądowe

3.5. Źródła napięcia nierównoważenia w sygnale wyjściowym hallotronu i metody jego kompensacji

Nowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne czujników hallotronowych, rozwijane na świecie w ostatnich latach, służą ograniczeniu niepewności pomiaru. Jednym z głównych jej źródeł w czujnikach Halla jest napięcie nierównoważenia.

Sygnał wyjściowy U_{wy} rzeczywistego czujnika Halla jest sumą napięć powstałych w wyniku efektu Halla oraz innych zjawisk fizycznych określony równaniem:

$$U_{wy} = U_H + U_n \quad (3.15)$$

gdzie: U_H jest napięciem Halla, a U_n - napięciem nierównoważenia.

Występowanie napięcia nierównoważenia U_n jest zjawiskiem niepożądanym, prowadzącym do pogorszenia właściwości użytkowych hallotronu oraz wzrostu niepewności pomiaru pola magnetycznego. Napięcie nierównoważenia można zaobserwować podczas przepływu prądu zasilania I przez hallotron, przy zerowej indukcji mierzonego pola magnetycznego B .

Najważniejszymi składowymi napięcia nierównoważenia U_n w hallotronach są:

- napięcie wynikające z rezystancyjnej asymetrii hallotronu [51],
- napięcie termoelektryczne [52].

Napięcie ohmowe asymetrii hallotronu U_{Ohm} jest napięciem, które powstaje na rezystancji wzdłużnej między powierzchniami ekwipotencjalnymi, na których znajdują się kontakty napięciowe. Wartość tego napięcia można wyrazić zależnością:

$$U_{Ohm} = r_0 \cdot I \quad (3.16)$$

gdzie: r_0 to współczynnik asymetrii hallotronu [53], a I - prąd zasilania hallotronu.

Powstanie napięcia ohmowego asymetrii może być spowodowane następującymi czynnikami [52-53]:

- niedokładnością wykonania założonych parametrów geometrycznych sensora,
- umieszczeniem elektrod na powierzchniach nieekwipotencjalnych,
- defektami struktury sensora hallotronowego,
- niejednorodnością rezystywności sensora hallotronowego,
- naprężeniami mechanicznymi.

Napięcie termoelektryczne niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotronu jest spowodowane różnicą temperatury pomiędzy zaciskami napięciowymi. Może ono wynikać z nierównomiernego nagrzewaniu się struktury półprzewodnikowej wskutek niesymetrycznego rozptyłu prądów. Napięcie termoelektryczne niezrównoważenia U_T określone jest następującą zależnością:

$$U_T = k_T \cdot I^2 \quad (3.17)$$

Przy czym: k_T – współczynnik napięcia termoelektrycznego, I – wartość prądu zasilania.

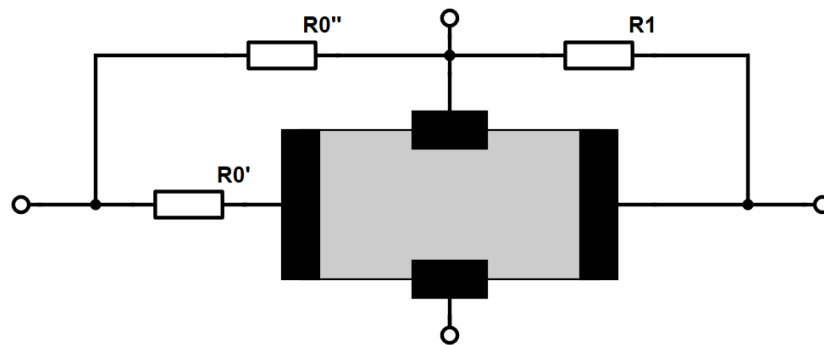
W praktyce największy udział w napięciu niezrównoważenia ma napięcie ohmowe asymetrii, natomiast napięcie termoelektryczne U_T niezrównoważenia osiąga znaczne wartości w przypadku niepoprawnego wykonania elektrod hallotronu [29].

Istnieje kilka sposobów zmniejszenia napięcia niezrównoważenia U_n w hallotronach. Wybór konkretnej metody kompensacji zależy od jego wartości i przyczyny powstawania. Wśród stosowanych w praktyce metod można wyróżnić metody, które bazują na zastosowaniu:

- rezystorów równoważących,
- mechanicznej korekty struktury,
- dodatkowego układu elektronicznego i ewentualnej kompensacji programowej.

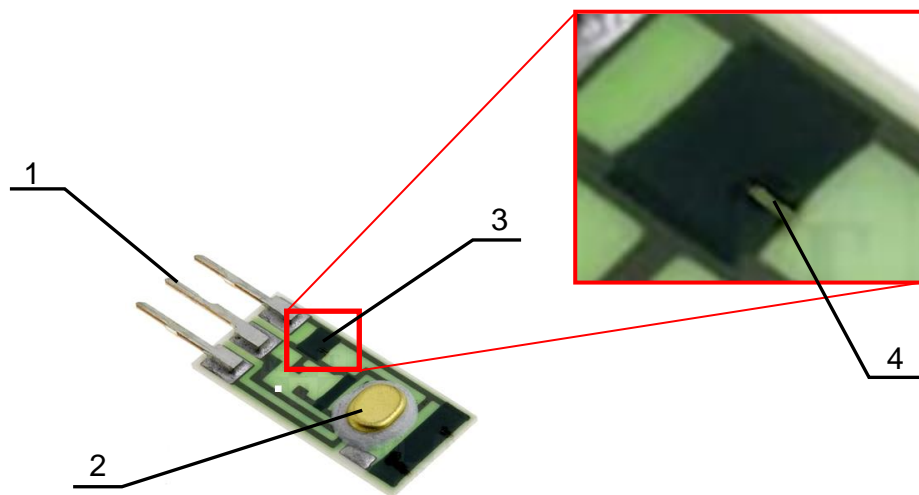
Wprowadzenie w obwód zasilania hallotronu dodatkowych rezystorów kompensujących wpiętych równolegle do przepływu prądu zasilania przedstawiono na rysunku 3.14. Zastosowanie takich rezystorów prowadzi do zmniejszenia czułości hallotronu przy identycznych danych warunkach zasilania. Ponadto w celu zapewnienia poprawnej pracy w

szerokim zakresie temperatury stosowane w układzie rezystory powinny mieć zbliżone współczynniki temperaturowe.



Rys. 3.14. Układ kompensacji napięcia niezrównoważenia [33]

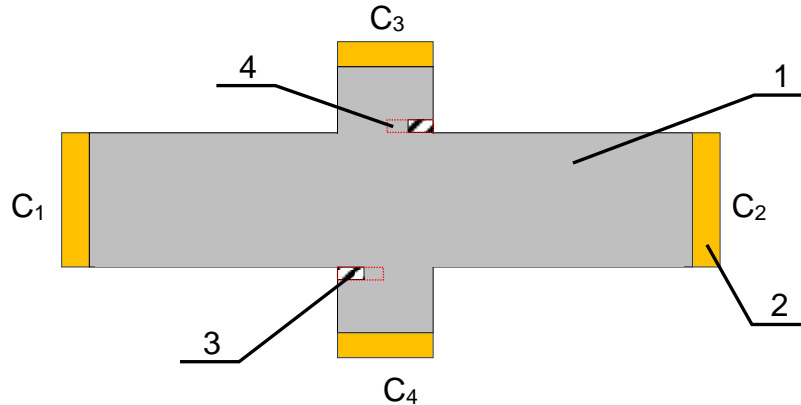
Zastosowanie rezystorów równoważących jest względnie prostą metoda kompensacji napięcia niezrównoważenia. Metoda polega na prowadzeniu dodatkowych rezystancji pomiędzy zaciski hallotronu, co przedstawiono na rysunku 3.15. Omawiany układ kompensacji jest wzorowany na układach mostkowych.



Rys. 3.15. Hallotron Honeywell z układem kompensacji [54]. Wykonanie w postaci układu grubowarstwowego: 1) wyprowadzenia, 2) pokrywka zabezpieczająca strukturę hallotronowej, 3) rezystory równoważące docinane laserowo, 4) obszar korekcji rezystora równoważącego

Mechaniczną metodę korekcji napięcia asymetrii stosuje się na etapie produkcji hallotronu. Polega ona na nieznacznej zmianie zarysu struktury hallotronowej w

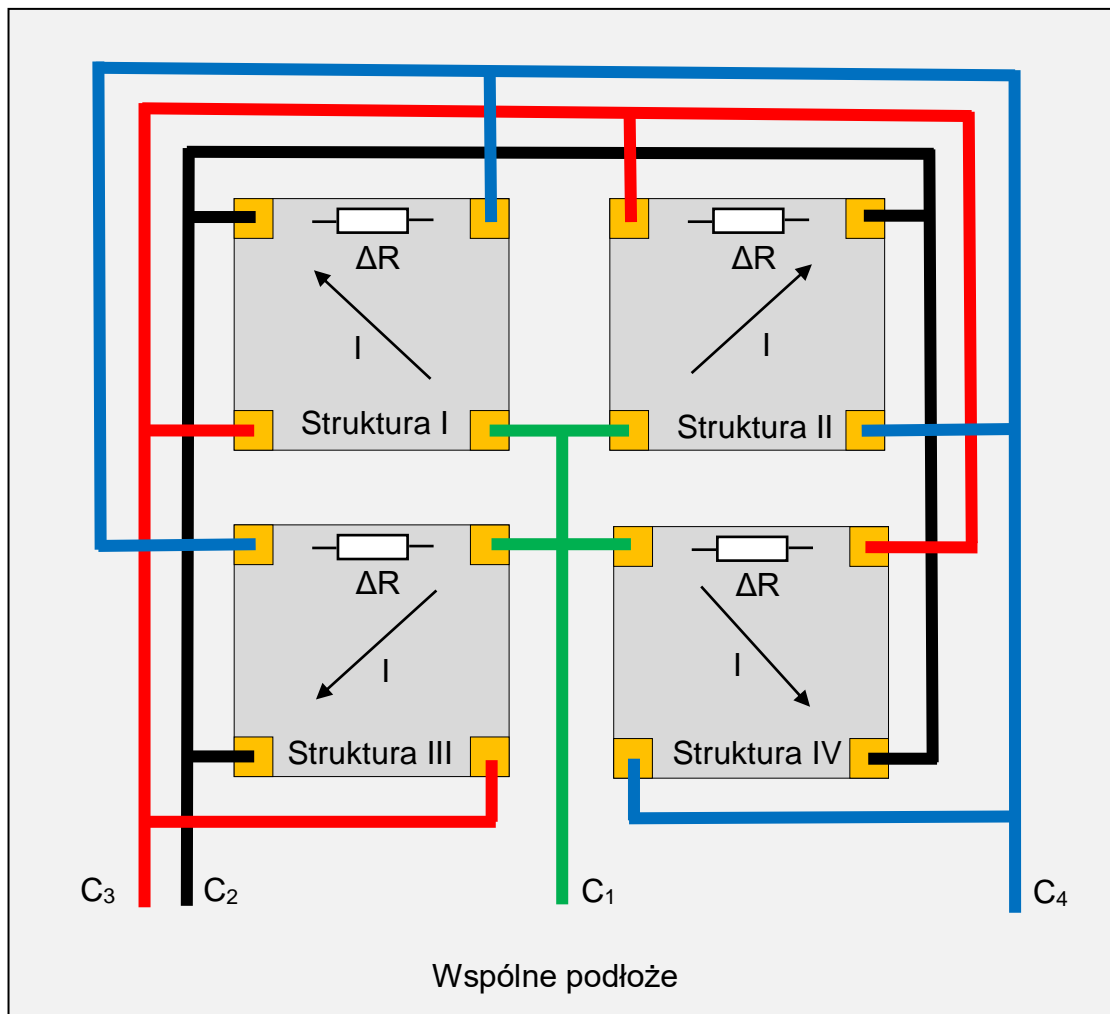
odpowiednim miejscu, najczęściej w pobliżu kontaktów napięciowych. Przykład takiej kompensacji przedstawiono na rysunku 3.16.



Rys. 3.16. Korekcja napięcia niezrównoważenia hallotronu przez korektę mechaniczną w pobliżu elektrod: 1) obszar półprzewodnika, 2) kontakt metaliczny, 3) obszar usuniętego półprzewodnika podczas korekcji, 4) zakres obszaru korekcji. C_1 , C_2 – kontakty prądowe; C_3 , C_4 – kontakty napięciowe

Korektę przeprowadza się przez usunięcie materiału półprzewodnikowego za pomocą narzędzia mechanicznego lub lasera – analogicznie do korekcji laserowej rezystorów. Usunięcie materiału ze struktury powoduje zmianę rozkładu potencjału na powierzchni hallotronu [55].

Redukcję napięcia niezrównoważenia można osiągnąć przez odpowiednie podłączenie ze sobą kilku struktur Halla. Aby osiągnąć zmniejszenie napięcia niezrównoważenia, poszczególne struktury podłączane są równolegle, przy czym przepływ prądu I w każdej kolejnej strukturze powinien być obrócony o 90° w odniesieniu do poprzedniej (kierunek oznaczono strzałką rys. 3.17). Schemat takiego układu połączeń pokazano barwnymi liniami na rysunku 3.17. Podłączenie struktur hallotronowych w takiej konfiguracji prowadzi do kompensacji wspólnego napięcia niezrównoważenia oraz do uśredniania napięcia na zaciskach wyjściowych [56].

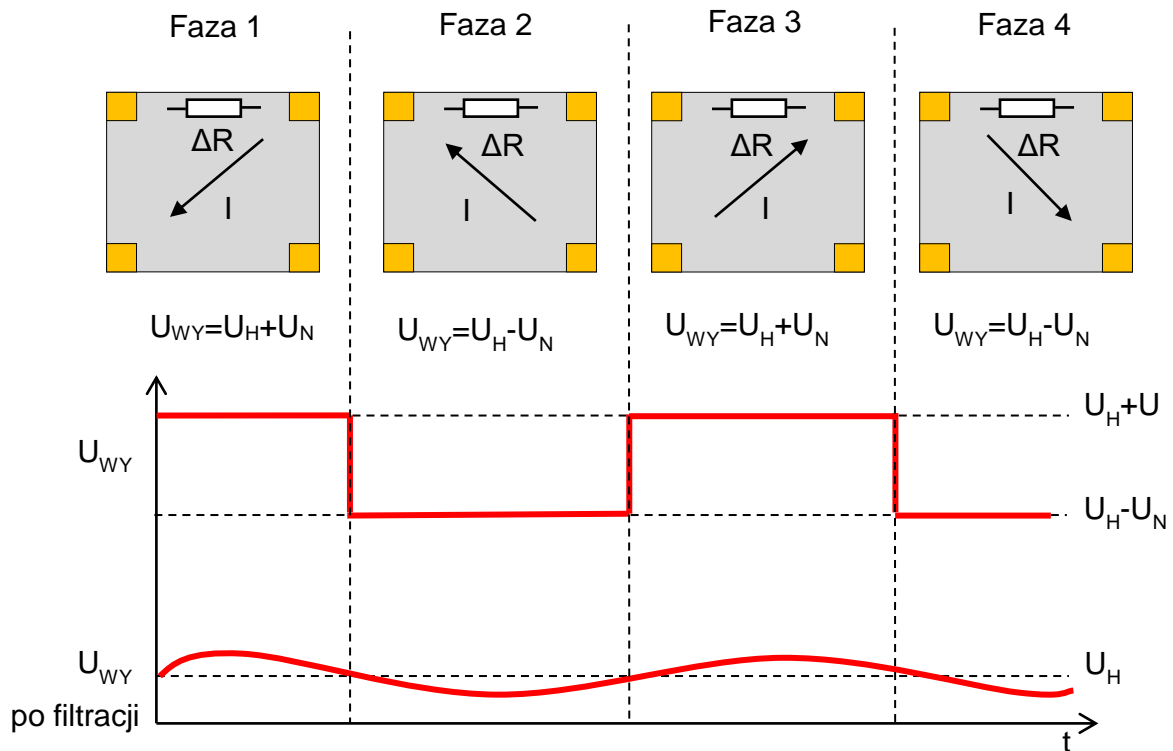


Rys. 3.17. Schemat metody kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotronu wykorzystujący równoległe połączenie struktur hallotronowych z zachowaniem ortogonalności przepływu prądu zasilania. C_1 , C_2 – kontakty; C_3 , C_4 – kontakty napięciowe. Kontakty o jednakowych indeksach są fizycznie połączone

Zwiększenie liczby połączonych struktur dodatkowo zmniejsza szумы w sygnale wyjściowym układu hallotronów, lecz równocześnie zwiększa powierzchnię czujnika. Należy zwrócić uwagę, że przy równoległym podłączeniu zapotrzebowanie na prąd zasilania I rośnie proporcjonalnie do sumarycznej liczby połączonych hallotronów. Ponadto metoda ta może być zastosowana jedynie w hallotronach wykonanych na wspólnym podłożu, gdzie źródło napięcia niezrównoważenia U_n ma zbliżony charakter (np. naprężenia mechaniczne, temperatura) oraz amplitudę.

Stosowanym praktycznie rozwiązaniem problemu napięcia niezrównoważenia jest zastosowanie metody zamiany kierunków prądu zasilania hallotronu (ang. spinning current

metod). Jest to metodą dynamicznej kompensacji napięcia niezrównoważenia. Metoda ta polega na cyklicznej zmianie elektrod pomiarowych i zasilających hallotronu, co przedstawiono na rysunku 3.18 [57].

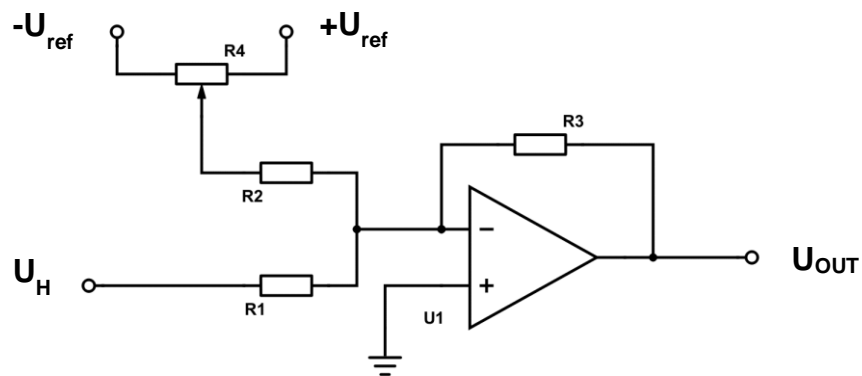


Rys. 3.18. Sposób zasilania struktury półprzewodnikowej hallotronowej i napięcie niezrównoważenia sygnału wyjściowego w metodzie dynamicznej kompensacji napięcia niezrównoważenia

Metoda zamiany kierunków prądu zasilania hallotronu jest podobna do metody z równoległym połączeniem kilku struktur, przy czym równoległe połączenie struktur jest zastąpione przełączaniem zasilania w jednej strukturze przez układ elektroniczny. W poszczególnych fazach pracy pary zacisków wejściowych i wyjściowych są zamieniane miejscami tak, by w kolejnej fazie przepływ prądu został obrócony o 90° . W wyniku takiego zasilania napięcie niezrównoważenia występujące na zaciskach wejściowych na przemian zmienia znak. Uzyskany sygnał pomiarowy jest wzmacniany oraz uśredniany. W zależności od typu struktury hallotronowej stosuje się 2-, 4-, 6- fazową dynamiczną kompensację napięcia niezrównoważenia, z czego najbardziej popularny jest układ 4-fazowy [58-60].

Zastosowanie metody zamiany kierunków prądu zasilania hallotronu wymaga od struktury hallotronowej symetrii. Prawidłowo zastosowana metoda umożliwia zmniejszenie napięcia niezrównoważenia o około dwa rzędy wielkości. W rezultacie sygnał wyjściowy z hallotronu staje się także jest mniej wrażliwy na zmiany temperatury [37].

Układ kompensacji może być wykonany w postaci niezależnego układu dla już wyprodukowanego hallotronu lub jako integralna część hallotronu, w postaci układu scalonego. Hallotrony produkowane masowo najczęściej posiadają wbudowany układ elektroniczny kompensacyjny. Jednym z najprostszych ideowo rozwiązań układu kompensacji elektronicznej jest zastosowanie sumatora napięcia, przedstawionego na rysunku 3.19 [61].



Rys. 3.19. Układ sumatora napięcia, jako elektronicznego układu kompensacji.

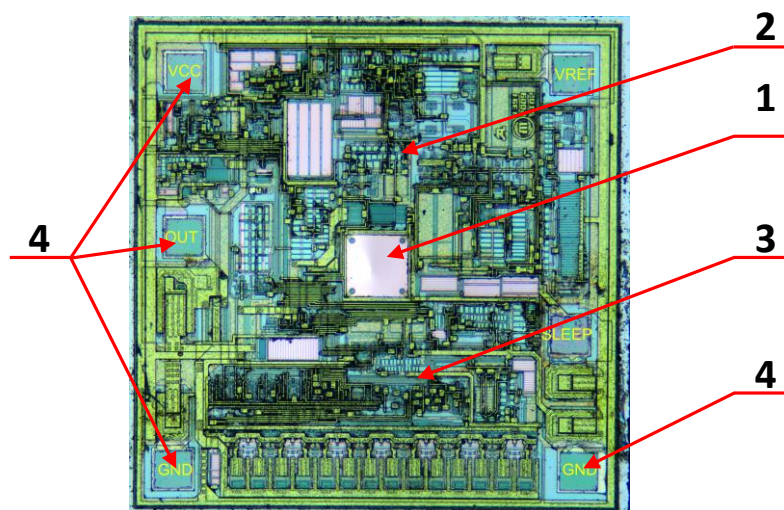
Korekta następuje przez regulację potencjometru $R4$ podłączonego do symetrycznego napięcia odniesienia U_{ref}

3.6. Scalone przetworniki hallotronowe

Nowoczesne czujniki oprócz struktury hallotronowej zawierają szereg układów współpracujących, które poprawiają ich właściwości użytkowe, szczególnie w zakresie redukcji dryftu temperaturowego. Zintegrowane układy hallotronowe są wyposażone w:

- precyzyjne, skompensowane źródło zasilania,
- układ dynamicznej kompensacji napięcia niezrównoważenia,
- czujnik temperatury,
- cyfrowe lub analogowe układy filtrujące,
- mikrokontroler zapewniający korekcję nieliniowości charakterystyki.

Szczególną rolę w kompensacji napięcia niezrównoważenia w scalonych układach hallotronowych odgrywają mikrokontrolery. Za ich pomocą możliwa jest zaawansowana korekta charakterystyki, uwzględniająca wpływ temperatury, napięcia zasilania oraz innych czynników, które mogą zakłócać pomiar [62].



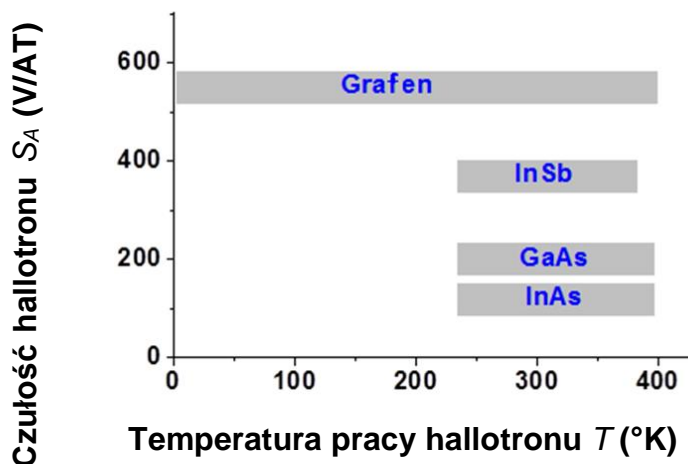
Rys 3.20. Układ scalonego hallotronu Allegro 1391 [63]: 1 - sensor hallotronowy, 2 - układ przetwarzania analogowego, 3 – cyfrowy układ sterowania, 4 – pola kontaktowe

W układach hallotronowych stosowane są omówione technologie, konstrukcje oraz techniki pomiaru i kompensacji napięć niezrównoważenia. Wszystkie te działania mają na celu osiągnięcie możliwie najlepszych właściwości pomiarowych, w tym niepewności pomiaru i czułości. Parametry te zależą od użytego materiału i technologii. Jednym z nowych, obiecujących materiałów jest grafen.

4. Grafen w sensorach hallotronowych

Grafen jest krystaliczną odmianą alotropową węgla o grubości pojedynczej warstwy atomowej. Może być on traktowany jako struktura dwuwymiarowa. Atomy węgla w tej strukturze są rozmieszczone w charakterystycznym heksagonalnym układzie i połączone stabilnymi wiązaniami atomowymi typu sp² [64].

Grafen jest pierwszym otrzymanym materiałem dwuwymiarowym. Opis teoretyczny grafenu został sformułowany już w latach 50. dwudziestego wieku [65], jednak po raz pierwszy materiał ten udało się wytworzyć dopiero w roku 2004 [66]. Andriej Gejm i Konstantin Nowosiołow z Uniwersytetu w Manchesterze, którzy jako pierwsi wytworzyli i eksperymentalnie zweryfikowali parametry struktury grafenowej, zostali za swoje odkrycie uhonorowani Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki w 2010 roku [67]. Obok ważnych z praktycznego punktu widzenia właściwości mechanicznych [68] i cieplnych [69], grafen wykazuje także bardzo dobre właściwości elektryczne. Wysoka ruchliwość nośników ładunku elektrycznego w grafenie (przeciętnie około 2 000 - 5 000 cm²/V·s [70], najwyższa odnotowana wartość ponad 200 000 cm²/V·s [71]) sprawia, że stanowi on dobry materiał do produkcji przetworników pola magnetycznego działających z wykorzystaniem zjawiska Halla. W przypadku hallotronów grafenowych należy spodziewać się wysokiej czułości, przekraczającej wartości odnotowywane dla najlepszych dotychczas stosowanych materiałów takich jak: arsenek indu (InAs) [72], arsenek galu (GaAs) [73], antymonek indu (InSb) [74]. Ponadto hallotроны grafenowe mogą pracować w niskiej temperaturze, co jest ważne z punktu widzenia zastosowań w technice kriogenicznej. Zakres czułości hallotronów w odniesieniu do materiałów, z których są one wykonywane zebrano na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Zestawienie czułości hallotronów wykonanych z materiałów półprzewodnikowych i grafenu oraz możliwe zakresy pracy sensorów

Wysoka czułość hallotronów wykonanych z grafenu wynika nie tylko z wysokiej ruchliwości nośników ładunku. Grafen stwarza możliwość uzyskania bardzo małej grubości warstwy sensora, co powoduje wzrost czułości określonej parametrem S_A , opisanym zależnością 3.8.

Jednak, jak wykazują wyniki eksperymentalne, właściwości hallotronów grafenowych są w dużym stopniu zależne od technologii wytwarzania i podłoża, na którym zostały wykonane. Obecnie liczne, wiodące na świecie zespoły prowadzą badania nad możliwościami zastosowania grafenu w technice hallotronowej. Jako podłoża stosowane są w szczególności:

- warstwy wytwarzane na folii miedzianej z przeniesieniem na podłoże z dwutlenku krzemu (SiO_2) [75],
- grafen epitaksjalny wytwarzany na węglu krzemu (SiC) [76],
- grafen wytwarzany na platynie i przenoszony na podłoże z dwutlenku krzemu (SiO_2) [77],
- epitaksjalny grafen sublimowany na węglu krzemu (SiC) [78],
- grafen mechanicznie eksfoliowany i umieszczony na heksagonalnym azotku boru (hBN) [79].

W tabeli 4.1 zebrano dwa najważniejsze parametry funkcjonalne hallotronów grafenowych wykonanych na różnych podłożach. W tabeli uwzględniono czułość S_I sensorów

oraz widmową gęstość mocy szumów P_f sensora, determinującą możliwą do uzyskania rozdzielczość pomiaru.

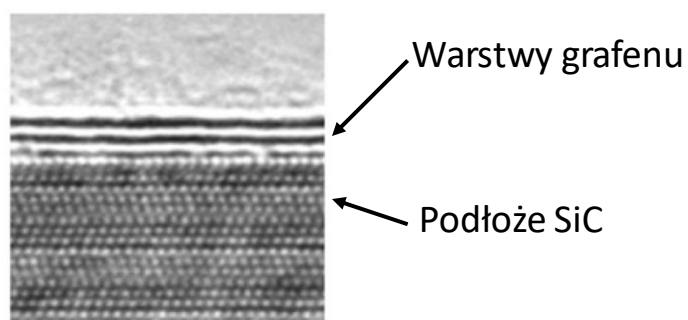
Tabela 4.1. Podstawowe parametry hallotronów grafenowych wykonanych z wykorzystaniem różnych podłoży i technologii

Technologia wykonania	Czułość prądowa hallotronu S_I (V/AT)	Widmowa gęstość mocy szumów P_f (T/Hz^{0.5})
Grafen wytwarzany na miedzi przenoszony na SiO ₂	310	$43 \cdot 10^{-6}$
Grafen epitaksjalny wytwarzany na SiC	790	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Grafen wytwarzany na platynie przenoszony na SiO ₂	800	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Epitaksjalny grafen sublimowany na SiC	1022	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Grafen mechanicznie eksfoliowany i umieszczony na hBN	5700	$50 \cdot 10^{-9}$

Technologia grafenowa jest nową technologią, więc towarzyszą jej problemy związane zarówno z wytwarzaniem grafenu jak i z wykonywaniem z niego przyrządów. W odniesieniu do produkcji hallotronów ważnymi zagadnieniami są:

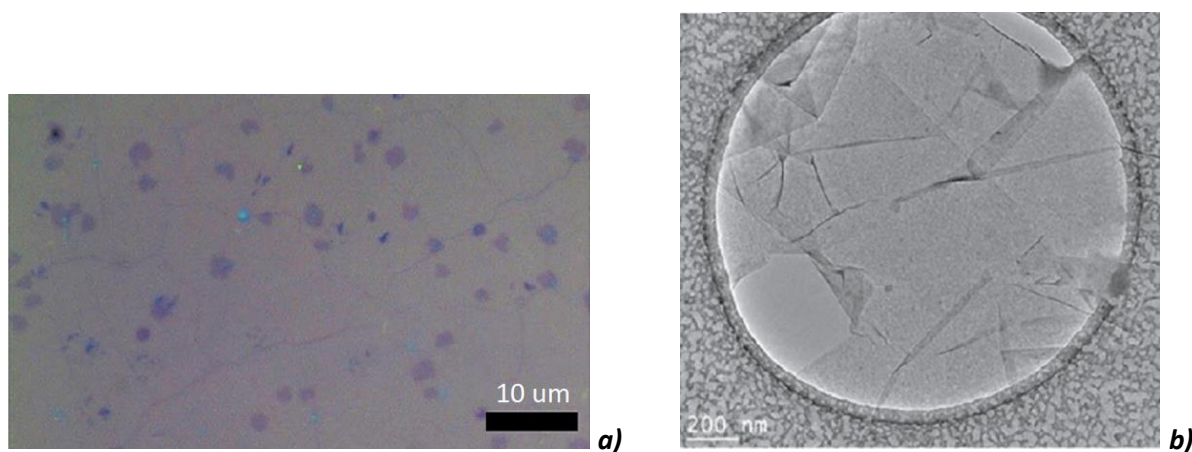
- jednorodność warstw grafenu,
- dokładność kształtowania struktur hallotronu metodą litografii,
- wykonanie kontaktów zapewniających adhezję i kontakt ohmowy,
- zabezpieczenie struktur przed wpływem otoczenia, zwłaszcza wilgoci,
- zapewnienie stałości parametrów warstwy grafenowej w czasie.

Do seryjnej produkcji hallotronów najbardziej korzystne właściwości ma grafen epitaksjalny, wytwarzany na podłożu z węgliku krzemu (SiC) [80], którego przykładowe zdjęcie w przekroju przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Przekrój warstwy grafenu epitaksjalnego na podłożu z SiC. Zdjęcie z mikroskopu sił atomowych [81]

Na rysunku 4.3 przedstawiono wyniki badania jednorodności warstwy grafenu wytwarzanego na folii miedzianej oraz na węglu krzemu (SiC).



Rys. 4.3. Wyniki badania jednorodności warstwy grafenu wytwarzanego na a) folii miedzianej [82], b) na węglu krzemu (SiC) [83]

Pomimo, że warstwy grafenu na powierzchni węgla krzemu (SiC) są dużo bardziej jednorodne niż warstwy grafenu uzyskiwanego na folii miedzianej, znaczna wartość napięcia niezrównoważenia U_N w hallotronach grafenowych wynika przede wszystkim z morfologii podłoża, mianowicie tarasów związanych z warstwami struktury krystalicznej węgla krzemu uwidacznianych w procesie wytwarzania grafenu [84] oraz z nieciągłości (w tym pęknięć) grafenu powstających w procesach litograficznych [85].

5. Przegląd stanu wiedzy w zakresie tomografii rezystancyjnej

5.1. Istota pomiarów tomograficznych

Istotą pomiarów tomograficznych jest uzyskanie wyższego rzędu modelu obiektu (na przykład modelu trójwymiarowego 3D) na podstawie pomiarów niższego rzędu, zwanych projekcjami (na przykład obrazowania dwuwymiarowego 2D lub pomiarów skalarnych). W przypadku, gdy tomografia prowadzi do uzyskania modelu trójwymiarowego, umożliwia ona wyznaczenie przestrzennego rozkładu parametrów wewnątrz obiektu, przez co często lokowana jest w obszarze badań nieniszczących [86].

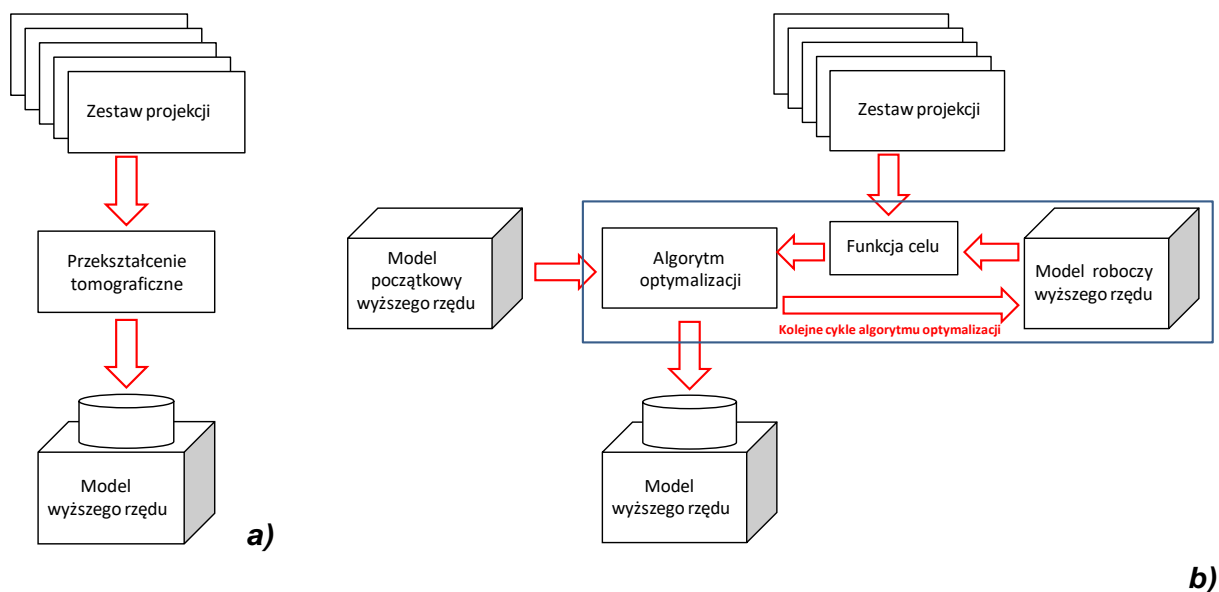
W zależności od wykorzystywanego zjawiska fizycznego wyróżnia się następujące techniki tomograficzne:

- rentgenowską [87],
- rezonansu magnetycznego [88],
- emisyjną pozytonową [89],
- ultrasonograficzną [90],
- optyczną dyfuzyjną [91],
- wiropądową [92],
- rezystancyjną [93],
- impedancyjną [94],
- pojemnościową i inne [95].

Dla praktycznego użycia tomografii kluczowe jest zastosowanie przekształcenia tomograficznego umożliwiającego integrację informacji zawartej w projekcjach do postaci modelu obiektu. Przekształcenie tomograficzne może być zrealizowane przez:

- przekształcenie bezpośrednie,
- wyznaczenie rozkładu przestrzennego parametrów z użyciem metod optymalizacji ciągłej,
- wyznaczenie rozkładu przestrzennego parametrów przez optymalizacyjne dopasowanie wybranych cech obiektu do wyników uzyskanych z rejestracji projekcji.

Schematy przepływu informacji w dwóch alternatywnych rozwiązaniach przekształcenia tomograficznego zebrano na rysunku 5.1.

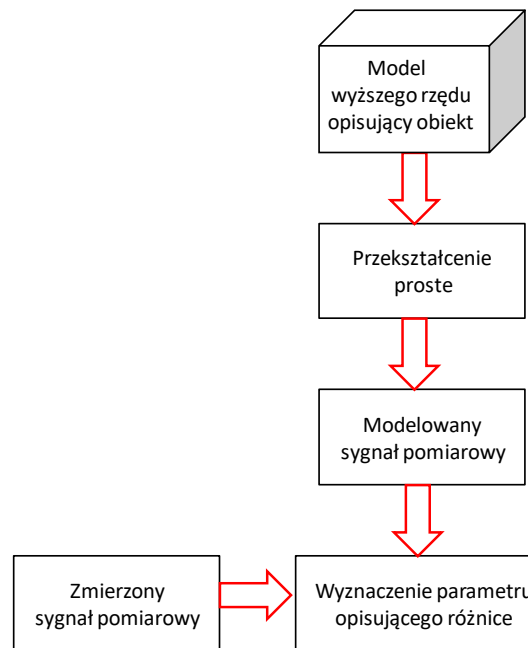


Rys. 5.1. Wyznaczenie modelu wyższego rzędu na podstawie projekcji: a) metodami analitycznymi (np. metodą sumacyjną z filtrowaniem), b) przez wyznaczenie modelu metodą optymalizacyjną

W przypadku tomografii rentgenowskiej, w której przekształcenie tomograficzne polega na złożeniu serii płaskich obrazów w trójwymiarowy model obiektu, istnieje możliwość zastosowania metody sumacyjnej [96]. Metoda ta umożliwia bezpośrednią integrację projekcji, jednak wyznaczenie specyficznych cech modelu obiektu, takich jak na przykład granica materiał-powietrze w obiektach o złożonej geometrii, wymaga zastosowania dodatkowych algorytmów określających wartości graniczne sygnału [97].

Należy jednak podkreślić, że w przypadku metod tomograficznych, w których seria projekcji skalarnych lub wektorowych jest przekształcana w trójwymiarowy model obiektu, nie ma możliwości zastosowania metod analitycznych. Przykłady takich metod to między innymi tomografia rezystancyjna i tomografia wiroprądowa, w których model obiektu odtwarzany jest na podstawie odpowiednio skalarnych pomiarów rezystancji [98] i wektorowych pomiarów impedancji cewki detekcyjnej [99]. W przypadku tych metod niezbędne jest zastosowanie metod iteracyjnych, umożliwiających identyfikację modelu badanego obiektu z wykorzystaniem algorytmów optymalizacji.

W metodach iteracyjnych najczęściej stosowane są gradientowe metody optymalizacji, w szczególności metody quasi-Newtonowskie [100]. Schemat działania iteracyjnego przekształcenia tomograficznego podano na rysunku 5.1 b). Kluczowym elementem przekształcenia tomograficznego wykorzystującego metody iteracyjne jest przekształcenie proste, umożliwiające zamodelowanie sygnału pomiarowego odpowiadającego danemu modelowi obiektu. Przekształcenie to jest kluczowym elementem funkcji celu, której schemat blokowy podano na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Schemat wyznaczenia funkcji celu w przekształceniu tomograficznym

Parametr opisujący różnicę pomiędzy modelowym sygnałem pomiarowym a zmierzonym sygnałem pomiarowym najczęściej wyznaczany jest przez sumę kwadratów różnic pomiędzy wartościami tych sygnałów [101]. Natomiast przekształcenie proste w pomiarach tomograficznych najczęściej realizowane jest za pomocą metody elementów skończonych (ang. finite elements metod) [102] lub metody elementów brzegowych [103].

Przykładem systemów tomograficznych, w których realizacja przekształcenia tomograficznego, zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 5.1 b, jest tomografia wiroprądowa [104]. W przypadku tego przekształcenia sygnał pomiarowy z cewki detekcyjnej porównywany jest z sygnałem wyznaczanym z modelownia metodą elementów skończonych, w którym kształt przedmiotu opisany może być jako rozkład przestrzenny względnej przenikalności magnetycznej μ oraz rezystywności ρ . Warto jednak podkreślić, że w nowo opracowywanych tomografach wiroprądowych, w celu przyspieszenia obliczeń,

obiekt modelowany opisywany jest przez spodziewany kształt obiektu wraz modelowaną nieciągłością. W takim przypadku realizacja przekształcenia tomograficznego sprowadza się do określenia położenia i kształtu nieciągłości, a nie wyznaczenia pełnego rozkładu przestrzennego względnej przenikalności magnetycznej μ oraz rezystywności ρ . Znacząco zmniejsza to złożoność obliczeniową przekształcenia tomograficznego, co ma szczególne znaczenie w zastosowaniach przemysłowych.

W ciągu ostatnich lat można zaobserwować znaczący rozwój otwartego oprogramowania (na licencji „open-source”) przeznaczonego do modelowania metodą elementów skończonych. Przykładem takiego oprogramowania jest oprogramowanie ELMER FEM rozwijane przede wszystkim przez zespół z IT Center for Science w Finlandii. Oprogramowanie ELMER FEM umożliwia modelowanie układów magnetostatycznych [105], magnetodynamicznych [106], elektrycznych [107], mikrofalowych [108] i mechanicznych. Ze względu na otwartą licencję, rozwiązania opracowane z wykorzystaniem oprogramowania ELMER FEM mogą być wykorzystywane zarówno do celów badawczych jak i komercyjnych, co jest szczególnie ważne z punktu widzenia ewentualnych wdrożeń przemysłowych.

5.2. Tomografia rezystancyjna

Istotą tomografii rezystancyjnej jest zobrazowanie przestrzennego rozkładu rezystywności materiału badanego elementu, a w rezultacie uzyskanie informacji o jego strukturze wewnętrznej. W tomografii rezystancyjnej pomiar rezystancji realizowany jest metodą pośrednią [109] przez pomiar napięcia pomiędzy elektrodami na brzegu obszaru badanego w warunkach przepływu określonego prądu.

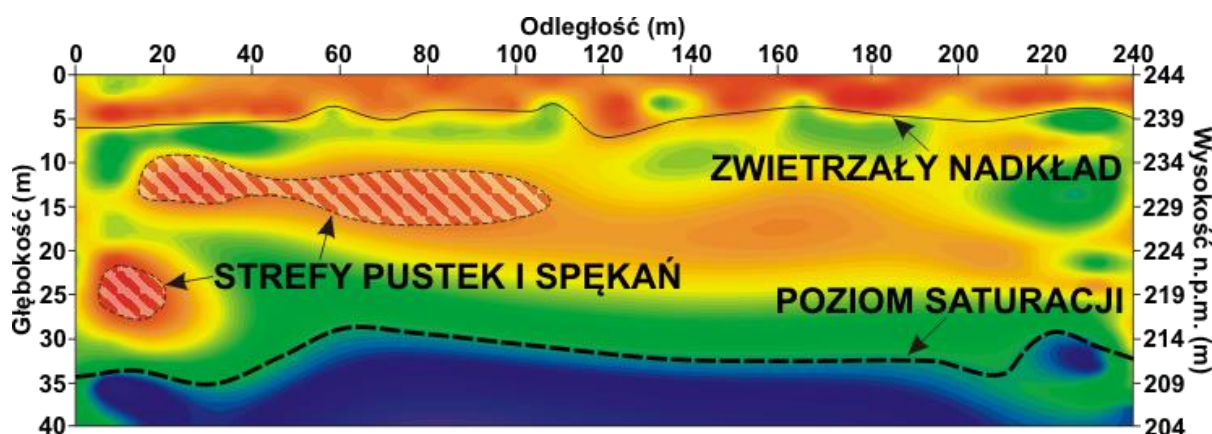
Tomografia rezystancyjna to przykład tomografii, w której przekształcenie tomograficzne prowadzące do odwzorowania rozkładu rezystywności wewnątrz badanego obiektu możliwe jest jedynie na drodze metody iteracyjnej przedstawionej na rysunku 5.1b. Dlatego tomografia ta wymaga przekształcenia prostego z zastosowaniem metody elementów skończonych lub metody elementów brzegowych.

Tomografię rezystancyjną po raz pierwszy wykorzystano w badaniach geofizycznych gruntu. Pierwsze rezystancyjne pomiary geologiczne wykonano w 1911 roku. Zostały one opisane przez braci Schlumberger [110]. Do końca lat siedemdziesiątych systemy do pomiarów geologicznych zawierały: źródło prądu, galwanometr, mostek rezystancyjny oraz

kilka elektrod pomiarowych. W roku 1966 Keller i Frischknecht zaproponowali interpretacje pomiarów rezystancyjnych przez stosunkowo prosty model analityczny [111].

Intensywny rozwój technik tomograficznych, w tym tomografii rezystancyjnej, nastąpił wraz z rozwojem techniki komputerowej, umożliwiającej przeprowadzenie obliczeń numerycznych i praktyczne wykorzystanie metody elementów skończonych [112, 113]. Pierwsze przekształcenia tomograficzne były zastosowane w diagnostyce medycznej na obrazach rentgenowskich wykorzystując algorytm projekcji wstecznej [114]. Zastosowany algorytm znalazł zastosowanie również w tomografii rezystancyjnej do rekonstrukcji obrazów 2-wymiarowych [115] oraz 3-wymiarowych [116].

Pierwszy przyrząd do praktycznych zastosowań tomografii rezystancyjnej został zaproponowany przez Ramirez [117]. Urządzenie zawierało 20 elektrod pomiarowych oraz komputerowy system akwizycji i przetwarzania danych.



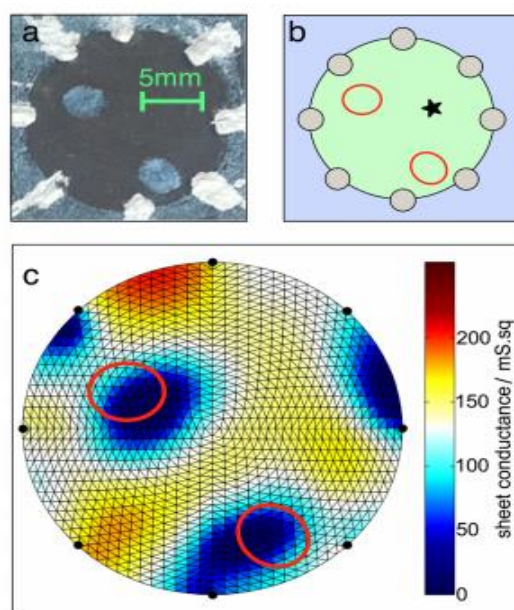
Rys. 5.3. Obraz uzyskany przy pomocy tomografii rezystancyjnej w rejonie historycznej działalności górniczej [118]

Na dużą skalę tomografia rezystancyjna jest stosowana w pomiarach geologicznych do oszacowania składu gruntu oraz określenia zawartości wody, co przedstawiono na rysunku 5.3 [118]. Współczesne tomografy rezystancyjne do pomiarów geologicznych mogą zawierać do tysiąca elektrod pomiarowych [119] i obejmują obszar setek metrów kwadratowych [120].

Tomografia rezystancyjna jest również stosowana w tomografii procesowej, do obrazowania przepływów wielofazowych [121] oraz w zastosowaniach medycznych [122]. W eksperymentach naukowych stosowano tomografię rezystancyjną do obrazowania rozkładu

konduktancji w cienkich warstwach tlenków metali (rysunek 5.3) [123] i kompozytów zawierających nanorurki węglowe [124]. Równocześnie w odniesieniu do tomografii rezystancyjnej intensywnie rozwijana jest otwarta biblioteka „EIDORS” [125], umożliwiającą realizację przekształcenia prostego i odwrotnego z użyciem metody elementów skończonych.

Na rysunku 5.4 przedstawiono przykładowy wynik działania przekształcenia tomograficznego dwuwymiarowego zastosowanego do wyznaczenia rozkładu rezystywności próbki cienkowarstwowej [123]. Układ elektrod umieszczonych na okręgu umożliwił wyznaczenie obszarów nieciągłości cienkiej warstwy rezystancyjnej.



Rys. 5.4. Tomografia rezystancyjna cienkich warstw: a) badana próbka cienkowarstwowa wraz z kołowym układem elektrod, b) model schematyczny elementu cienkowarstwowego wraz zaznaczonymi nieciągłościami, c) obraz rozkładu konduktancji wyznaczony w wyniku przekształcenia tomograficznego [123]

5.3. Przekształcenie proste w modelowaniu hallotronów cienkowarstwowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych

W modelowaniu sensorów hallotronowych kluczową rolę ma rozkład rezystywności. W związku z powyższym należy rozważyć uproszczone równania Maxwella do opisanie przepływu prądu w hallotronie:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (5.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5.2)$$

gdzie: \vec{D} – wektor indukcji elektrycznej, ρ – objętościowa gęstość ładunków elektrycznych, \vec{H} – wektor natężenia pola magnetycznego, \vec{J} – objętościowa gęstość prądu elektrycznego.

Z równań (5.1) oraz (5.2) można wyprowadzić zależność na ciągłość przepływu ładunku:

$$\partial \rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5.3)$$

Prawo Ohma dla materiałów przewodzących określa zależność pomiędzy gęstością prądu w przewodniku a polem elektrycznym powodującym przepływ prądu. Zatem gęstość prądu można wyrazić przez:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5.4)$$

gdzie: σ – przewodność właściwa materiału, \vec{E} - wektor natężenia pola elektrycznego.

Natomiast pole elektryczne \vec{E} można wyrazić za pomocą równania:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (5.5)$$

gdzie: $\nabla \varphi$ – gradient potencjału elektrycznego.

Po podstawieniu zależności (8.5) do (8.4) prawo Ohma przyjmuje formę wektorową:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla \varphi \quad (5.6)$$

Modyfikując równanie ciągłości (8.3) z uwzględnieniem (8.6) oraz, że $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ otrzymuje się:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \varphi = 0 \quad (5.7)$$

Otrzymana zależność (5.7) jest nazywana równaniem Poissona. Rozwiązaniem równania jest rozkład potencjału w strukturze hallotronowej.

Efekt Halla w przewodniku wynika z działania siły Lorentza (5.8) na poruszający się ładunek.

$$F = q(E + (v \times B)) \quad (5.8)$$

W modelowaniu metodą elementów skończonych uwzględnienie efektu Halla jest możliwe przez przedstawienie konduktancji z równania (5.7) jako tensora anizotropowego [126].

$$\sigma = en(\mu^{-1} + \mathbf{H})^{-1} \quad (5.9)$$

gdzie:

$$\mu = \mu \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

przy czym: μ – ruchliwość nośników.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & -H_z & H_y \\ H_z & 0 & -H_x \\ -H_y & H_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

gdzie: H_x, H_y, H_z – składowe natężenia pola magnetycznego odpowiednio w osiach x, y, z.

Po podstawieniu do (5.9) zależności (5.10) oraz (5.11), zakładając że $H_y=H_x=0$, otrzymuje się zależność na tensor przewodności σ :

$$\sigma(H_z, \mu) = \frac{\sigma_0}{1+(\mu H_z)} \begin{bmatrix} 1 & -\mu H_z & 0 \\ \mu H_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

przy czym: σ_0 – przewodność właściwa.

Zatem wprowadzając do parametrów modelu jako przewodność zależność (5.12) w postaci tensora, można zamodelować zjawisko Halla w hallotronie za pomocą metody elementów skończonych.

Do sformułowania równania różniczkowego potrzebnego do obliczenia rozkładu mocy wydzielanej na powierzchni struktury hallotronowej należy obustronnie pomnożyć wprowadzone równanie (5.6) przez $\nabla\varphi$. Po czym przyjmuje ono następującą postać:

$$p = \nabla\varphi \cdot \sigma \nabla\varphi, \quad (5.13)$$

Wyliczenie potencjału elektrycznego φ wymaga zdefiniowania warunków brzegowych Dirichleta lub Neumanna. Warunek Dirichleta określa wartość potencjału na wybranych brzegach, natomiast warunek Neumanna określa wartość prądu na brzegach.

$$\vec{I} = \sigma \nabla\varphi \cdot \vec{n}, \quad (5.14)$$

gdzie: \vec{n} - wektor normalny do wybranego brzegu.

W przeprowadzonych symulacjach ze względu na zasilanie napięciowe struktur hallotronowych zdefiniowano warunki brzegowe Dirichleta.

Na bazie podanych powyżej zależności modelowanie cienkowarstwowych układów hallotronowych możemy zrealizować stosując:

- metodę analityczną,
- metodę elementów skończonych (ang. finite elements method),
- metodę różnic skończonych (ang. finite differences method).

W modelowaniu obiektów o skomplikowanej geometrii wyznaczenie modelu analitycznego jest zagadnieniem złożonym i często nie posiada rozwiązania. W tym przypadku dużo skuteczniejszym narzędziem do modelowania jest metoda elementów skończonych (MES) (ang. FEM – finite element method) [127].

Aktualnie na rynku dominują trzy programy do implementacji metody elementów skończonych w modelowaniu zjawisk fizycznych:

- Ansys firmy ANSYS, Inc.,
- Comsol firmy COMSOL, Inc.,
- Simulation Mechanical firmy Autodesk.

Jednak w pracy zdecydowano się wykorzystać otwarte oprogramowanie do modelowania metodą elementów skończonych. Związane jest to z koniecznością uniknięcia wysokich opłat licencyjnych w przypadku komercyjnego wdrożenia opracowanych w ramach pracy rozwiązań.

W niniejszej pracy:

- modele geometryczne modelowanych układów hallotronowych opracowano z wykorzystaniem oprogramowania SALOME [128],
- dyskretyzację modelu do postaci siatki zrealizowano z użyciem oprogramowania NETGEN [129]
- sformułowania warunków brzegowych i nadania wartości parametrom, opisanie modelowanych zjawisk fizycznych za pośrednictwem równań różniczkowych i rozwiązania tych równań dokonano z użyciem oprogramowania ELMER FEM [130],
- wyniki wizualizowano i przeanalizowano za pomocą oprogramowania PARAVIEW [131].

6. Koncepcja zaproponowanej metody kompensacji napięcia nieznaczności hallotronu z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej

Metody kompensacji napięcia nieznaczności hallotronu polegające na zastosowaniu dodatkowego układu elektronicznego przetwarzania sygnału pomiarowego są nieskuteczne przy znacznych wartościach tego napięcia. W takim przypadku niezbędne jest przeprowadzenie korekcji struktury czujnika przez usunięcie wybranego obszaru, np. wypalenie laserem. Jest to proces analogiczny do powszechnie stosowanej w przemyśle laserowej korekcji wartości rezystorów precyzyjnych.

Proponowana metoda kompensacji hallotronów przez korekcję struktury sensora składa się w dwóch etapów. Pierwszy z nich obejmuje określenie lokalizacji uszkodzeń struktury hallotronu za pomocą tomografii rezystancyjnej. W drugim etapie wykonywana jest symetryczna korekta struktury za pomocą lasera, co można uznać za typowy element procesu produkcyjnego, skutecznie obniżający napięcie nieznaczności w sygnale wyjściowym w hallotronie.

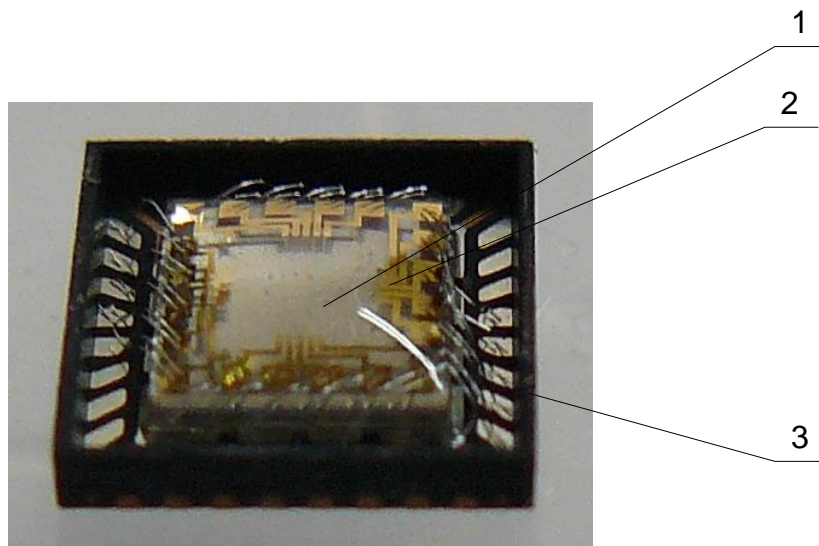
W pracy zaproponowano rozwiązanie umożliwiające realizację pomiarów tomograficznych przestrzennego rozkładu rezystancji hallotronu przez cykl pomiarów z użyciem specjalnego układu elektrod grzebieniowych [132]. Cykl pomiarowy rezystancji pomiędzy elektrodami realizowany jest z zastosowaniem opracowanego w ramach pracy, sterowanego cyfrowo stanowiska pomiarowego. Przekształcenie proste realizowane jest z metodą elementów skończonych w otwartym oprogramowaniu ELMER FEM. Natomiast metodę wyznaczenia funkcji celu i cały proces optymalizacji w przekształceniu tomograficznym zaimplementowano z użyciem oprogramowania OCTAVE.

Aby zwiększyć efektywność obliczeniową realizacji przekształcenia tomograficznego zastosowano rozwiązanie, w którym obszary nieciągłości struktury hallotronu opisywane są przez nieciągłości w kształcie okręgów. Umożliwia to nie tylko lokalizację punktów, w których należy dokonać korekcji struktury hallotronu, lecz także dobór parametrów wiązki lasera korygującego [133].

Koncepcja zaproponowanego rozwiązania wiąże się z tezą niniejszej rozprawy doktorskiej: „Korekcja z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej umożliwia obniżenie napięcia nieznaczności sygnału pomiarowego z hallotronów cienkowarstwowych”.

7. Przedmiot badań – hallotron cienkowarstwowy

Przedmiotem badań niniejszej pracy jest hallotron cienkowarstwowy. Hallotron ten wyprodukowano z grafenu epitaksjalnego wychodowanego na podłożu z węgliku krzemu (SiC). Rozważana struktura, której przykładową realizację pokazano na rysunku 7.1, ma kształt krzyża równoramiennego w celu zapewnienia symetrii w czterech osiach.



Rys. 7.1. Hallotron grafenowy. Struktura sensora umieszczona w obudowie QFN32: 1) struktura grafenowa, 2) elektrody grzebieniowe, 3) obudowa QFN

Podczas realizacji projektu GRAF-TECH/NCBR/12/14/2013, którego autor był wykonawcą, skoncentrowano się na grafenie epitaksjalnym uzyskiwanym na węgliku krzemu, występującym w dwóch postaciach:

- warstwy pojedynczej,
- quasi swobodnej warstwy podwójnej.

Wyniki pomiarów czułości S_I dla hallotronów wykonanych z grafenu w postaci warstwy pojedynczej na stronie krzemowej półizolacyjnego węgliku krzemu 4H-(0001) przekraczały 1200 V/AT (maksymalna zmierzona wartość to 3000 V/AT), co w momencie publikacji było jedną z najwyższych spotykanych czułości podanych w literaturze [134]. Jednak ze względu na zmienność w czasie parametrów elektrycznych grafenu w postaci pojedynczej warstwy, wykonanie z niego hallotronów do zastosowań przemysłowych jest nieuzasadnione.

Hallotrony wykonane z grafenu w postaci quasi swobodnej warstwy podwójnej, mimo wyraźnie niższej czułości (ok. 80 V/AT), mają stabilne w czasie parametry. Prototypy hallotronów grafenowych do zastosowań przemysłowych wykonanych z zastosowaniem tego materiału zaprezentowano w pracy [135].

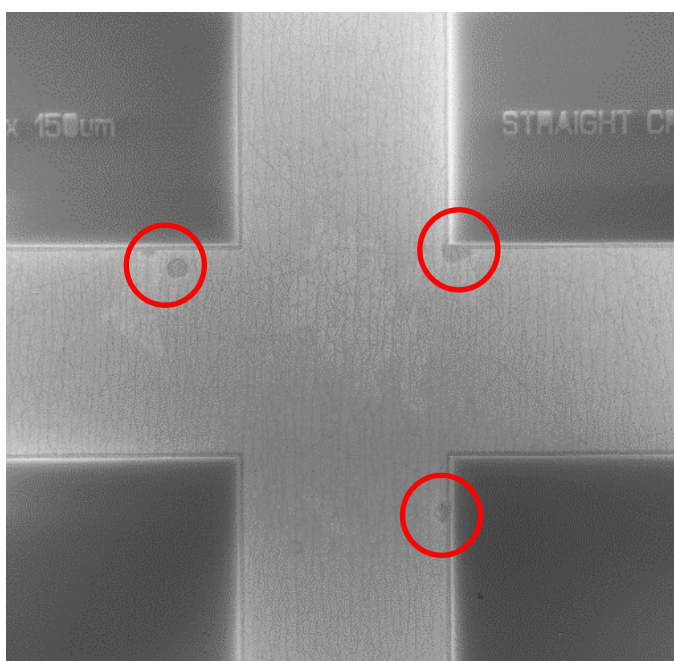
W tabeli 9.1 zebrano wartości parametrów hallotronów wykonanych w ramach projektu GRAF-TECH/NCBR/12/14/2013. Opracowane w ramach projektu hallotrony cechują się względnie wysoką czułością S_A , co umożliwia ich zastosowanie w wielu aplikacjach przemysłowych, np. takich jak przekładniki prądowe [136]. Jednak badania wykazały znaczące wartości napięcia niezrównoważenia U_n sygnału wyjściowego z hallotronów.

Tabela 9.1. Parametry opracowanych w ITME hallotronów grafenowych (badania w ramach projektu GRAF-TECH/NCBR/12/14/2013)

Parametr	Jednostka	Warunki pomiaru	Min.	Typ.	Max.
Czułość S_A	V/AT	$I_z = 1 mA$	30	50	100
Zakres pomiarowy Z	T	$I_z = 1 mA$	-0,5		0,5
Napięcie niezrównoważenia U_n	mV	$I_z = 1 mA$	0,1	2	100
Rezystancja wejściowa R_{we}	Ω	$B = 0 mT,$ $I_z = 1 mA$	500	700	2000
Rezystancja wyjściowa R_{wy}	Ω	$B = 0 mT,$ $I_z = 1 mA$	500	700	2000
Współczynnik temp. czułości αV_H	$\%/^{\circ}C$	$B = 10 mT,$ $I_z = 1 mA T=0-$ $60^{\circ}C$		0,11	
Współczynnik temp. rezystancji wejściowej αR_{we}	$\%/^{\circ}C$	$B = 0 mT,$ $I_c = 1mA$ $T=od 0 do60^{\circ}C$		0,16	

Jednym z ograniczeń stosowania grafenu epitaksjalnego w technice hallotronowej jest występowanie znaczącego napięcia niezrównoważenia w wykonanych egzemplarzach czujników. Występowania defektów struktury grafenu zostało potwierdzone badaniami struktur hallotronowych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych za pomocą mikroskopu elektronowego.

Otrzymane wyniki świadczą o występowaniu nieciągłości warstwy grafenowej w strukturze czujnika. Zaobserwowano, że są to pojedyncze obszary przeważnie przy obrzeżach warstwy grafenowej, co przedstawiono na rysunku 7.2.

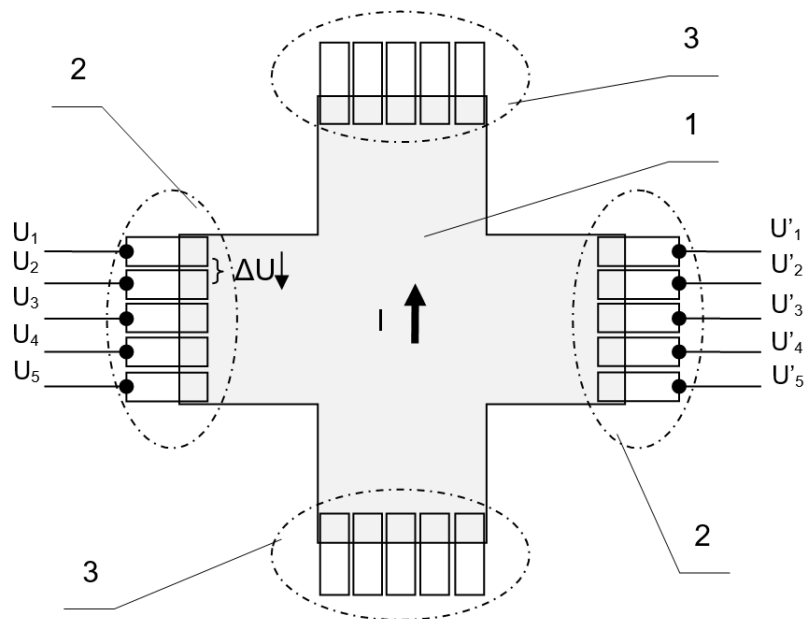


Rys. 7.2. Grafenowa struktura hallotronowa. Na czerwono zaznaczono obszary nieciągłości. Zdjęcie z mikroskopu elektronowego (zdjęcie wykorzystano za zgodą ITME)

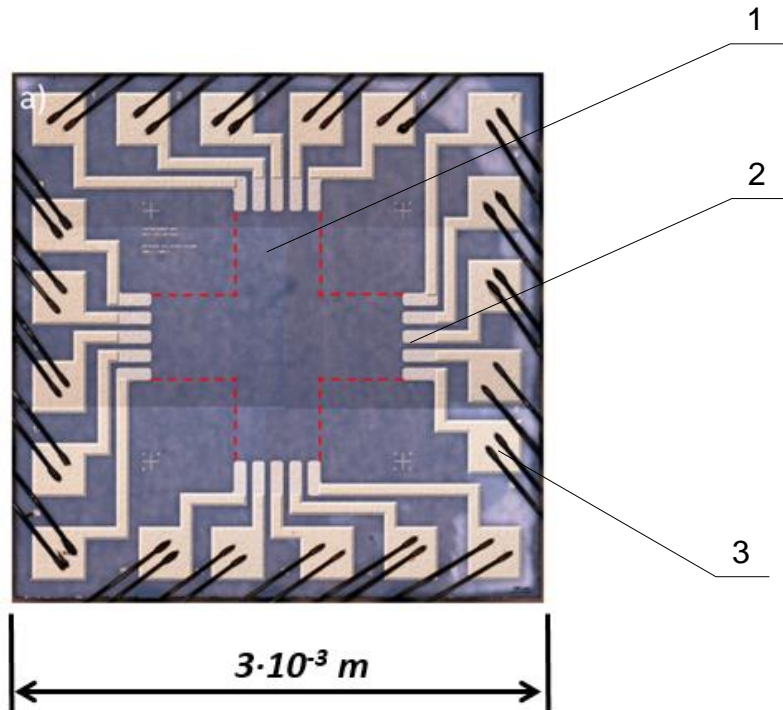
Występowanie nieciągłości struktury hallotronu wykonanego z grafenu powoduje pogorszenie jego parametrów, a nawet konieczność odrzucenia hallotronu jako elementu wadliwego. Obecność wadliwych egzemplarzy zmniejsza uzysk produkcyjny oraz zwiększa cenę jednostkową gotowego produktu. Znacząca wartość napięcia niezrównoważenia U_n w opracowanych hallotronach ogranicza możliwość kompensacji dryftu temperaturowego sensora, ponieważ dryft temperaturowy napięcia niezrównoważenia U_n ma dominujący udział w dryfcie temperaturowym sygnału wyjściowego hallotronu. W rezultacie uzyskane wyniki

wskazują na potrzebę podjęcia badań nad metodami kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotronu nie tylko za pomocą elektronicznego układu współpracującego z sensorem hallotronowym, lecz także przez fizyczną korekcję struktury sensora. Umożliwi to znacząca minimalizację jego dryftu temperaturowego, a w rezultacie poprawę charakterystyk użytkowych.

W celu umożliwienia implementacji opracowanej metody kompensacji zaproponowano nowy układ hallotronu dostosowany do tomografii rezystancyjnej. Nową propozycją jest wprowadzenie wielu wyprowadzeń, w rezultacie czego można uzyskać informację o powierzchniowym rozkładzie napięcia. Od liczby wyprowadzeń zależy rozdzielność przekształcenia tomograficznego. Ze względów technologicznych wytworzono 5 kontaktów na jednym ramieniu hallotronu. Zaproponowany nowy układ hallotronu posiada 20 kontaktów prądowo-napięciowych, co schematycznie przedstawiono na rysunku 7.3. Natomiast na rysunku 7.4 przedstawiono zdjęcie hallotronu wykonane z użyciem mikroskopu optycznego.



Rys. 7.3. Układ hallotronu do kompensacji napięcia niezrównoważenia z zastosowaniem metody komutacyjnej: 1) struktura hallotronowa, 2) grzebieniowe elektrody napięciowe, 3) grzebieniowe elektrody prądowe



Rys. 7.4. Zaproponowany układ hallotronu grafenowego do badań tomograficznych. Zdjęcie z mikroskopu optycznego: 1) struktura grafenowa (na czerwono zaznaczono granice obszaru pokrytego grafenem), 2) elektrody grzebieniowe, 3) bondowanie (zdjęcie wykorzystano za zgodą ITME)

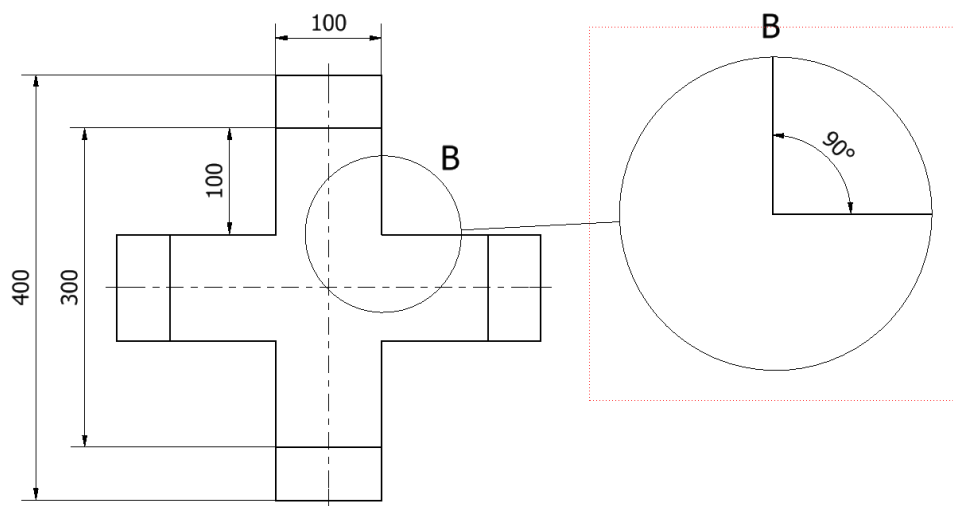
Ponadto badania hallotronów grafenowych wykazały, że powszechnie stosowany w sensorach grubowarstwowych, krzyżowy kształt struktury sensora hallotronowego (przedstawiony na rysunku 8.1) nie może być stosowany w sensorach cienkowarstwowych, w tym sensorach hallotronowych. Naroża sensora ulegają erozji w trakcie eksploatacji, co prowadzi do dryftu czasowego charakterystyki sensora. W związku z powyższym konieczna jest weryfikacja i modyfikacja kształtu sensorów hallotronowych wykonywanych z grafenu.

8. Modelowanie hallotronu z użyciem metody elementów skończonych

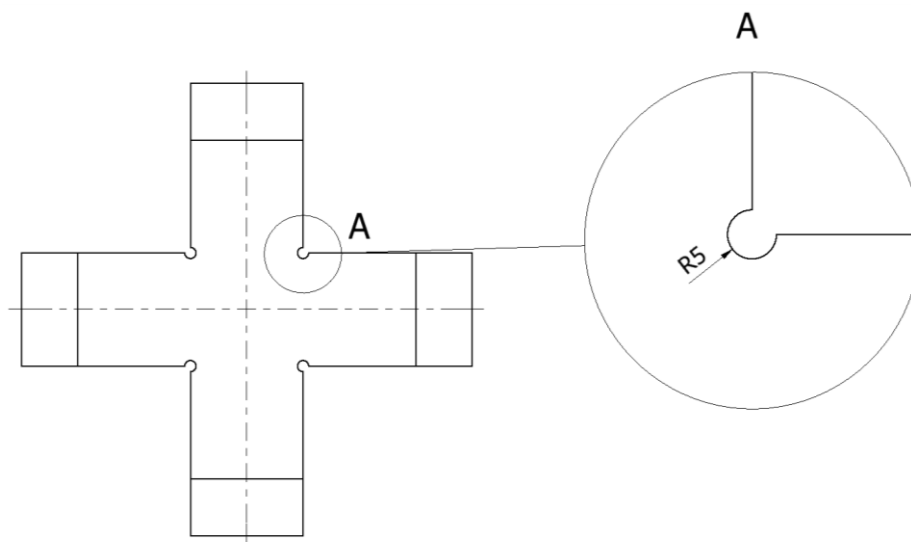
Geometria struktury hallotronowej ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia właściwości funkcjonalnych sensora Halla. Przez odpowiednie ukształtowanie geometrii hallotronu można zmniejszyć wpływ lokalnego nagrzewania się oraz odpowiednio ukształtować profil rozkładu gęstości prądu, a w rezultacie zmniejszyć podatność na wpływ zjawiska termoelektrycznego i degradację struktury cienkowarstwowej [137]. Dlatego w pracy przeprowadzono modelowanie zjawisk zachodzących w hallotronie, w odniesieniu do struktur o różnej geometrii, jako działanie mające na celu zmniejszenie wpływu czynników powodujących napięcie niezrównoważenia. Na podstawie wyników symulacji przeprowadzono analizę i dobór kształtu hallotronu cienkowarstwowego, będącego przedmiotem dalszych badań. Wynikiem prac jest zapewnienie stabilności struktur w odniesieniu do wymiarów geometrycznych badanych hallotronów, zmniejszenie napięcia niezrównoważenia oraz jego dryfu czasowego.

8.1. Modele geometryczne wybranych struktur hallotronowych

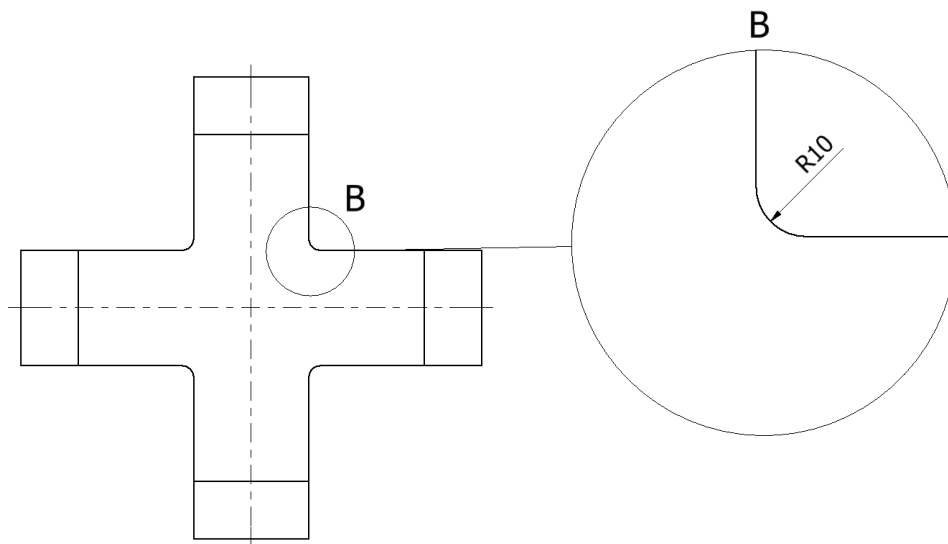
Modele geometryczne symulowanych struktur hallotronowych zostały zaprojektowane w środowisku Salome 7. Zaproponowano sześć różnych struktur. Zaproponowano modyfikacje kształtu krzyża równoramiennego polegające przede wszystkim na zmianie promieni lub faz naroży w przecięciu belek krzyża. Rysunki od 8.1 do 8.6 przedstawiają modelowane kształty struktur hallotronowych. Dla czytelności schematów tylko na pierwszym rysunku 8.1 podano wymiary gabarytowe w mikrometrach i są one takie same dla wszystkich struktur. Wymiary charakterystyczne na rysunkach pozostałych typów struktur podano także w mikrometrach.



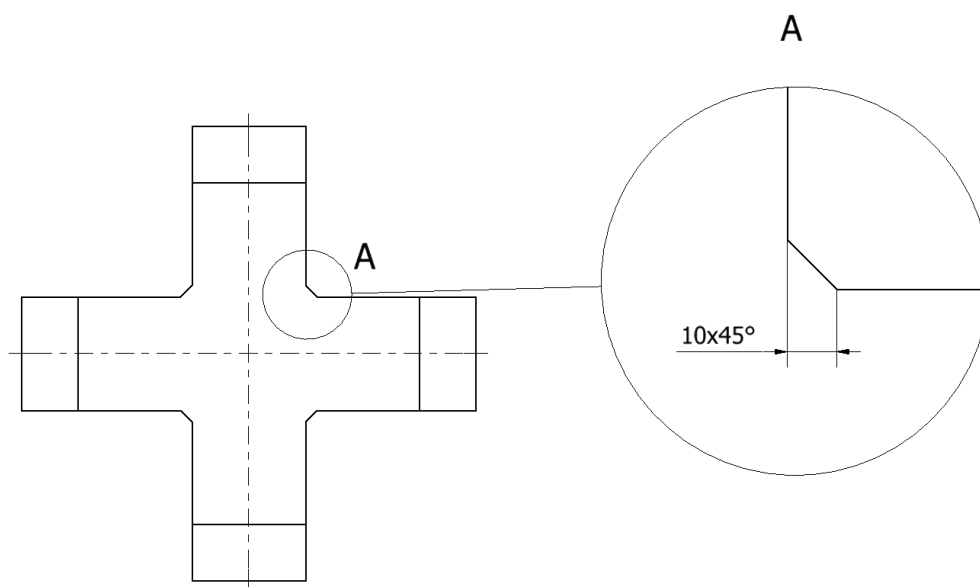
Rys. 8.1. Struktura hallotronowa nr 1: Krzyż równoramienny



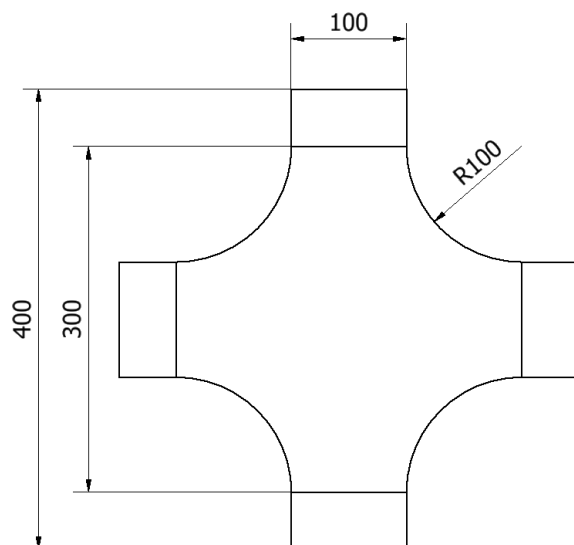
Rys. 8.2. Struktura hallotronowa nr 2: Krzyż równoramienny z wycięciami o promieniu $R=5\ \mu\text{m}$ w miejscu przecięcia się belek



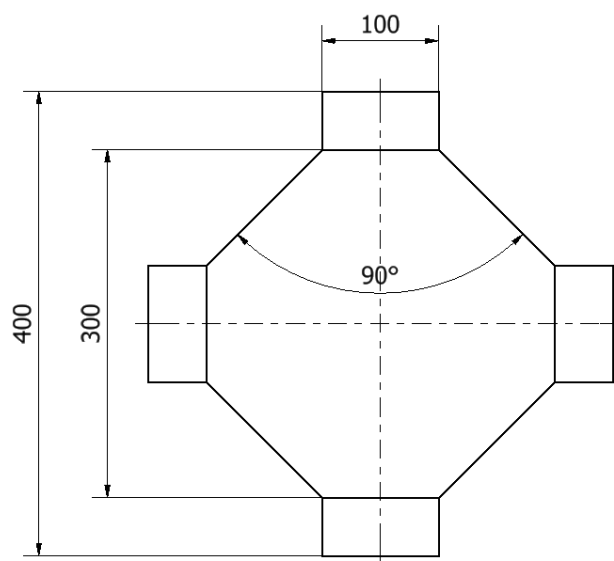
Rys. 8.3. Struktura hallotronowa nr 3: Krzyż równoramienny z modyfikacją w postaci fazy o promieniu $R=10\ \mu\text{m}$ (dużo mniejszym od długości ramienia) w miejscu przecięcia się belek



Rys. 8.4. Struktura hallotronowa nr 4: Krzyż równoramienny z modyfikacją w postaci fazy $10\ \mu\text{m}$ o kącie 45° w miejscu przecięcia się belek



Rys. 8.5. Struktura hallotronowa nr 5: Krzyż równoramienny promieniem zaokrąglenia równym długością krawędzi ramienia $R = 100 \mu\text{m}$ w przecięciach ramion



Rys. 8.6. Struktura hallotronowa nr 6: Romb z powiększonymi kontaktami prostokątnymi w narożach

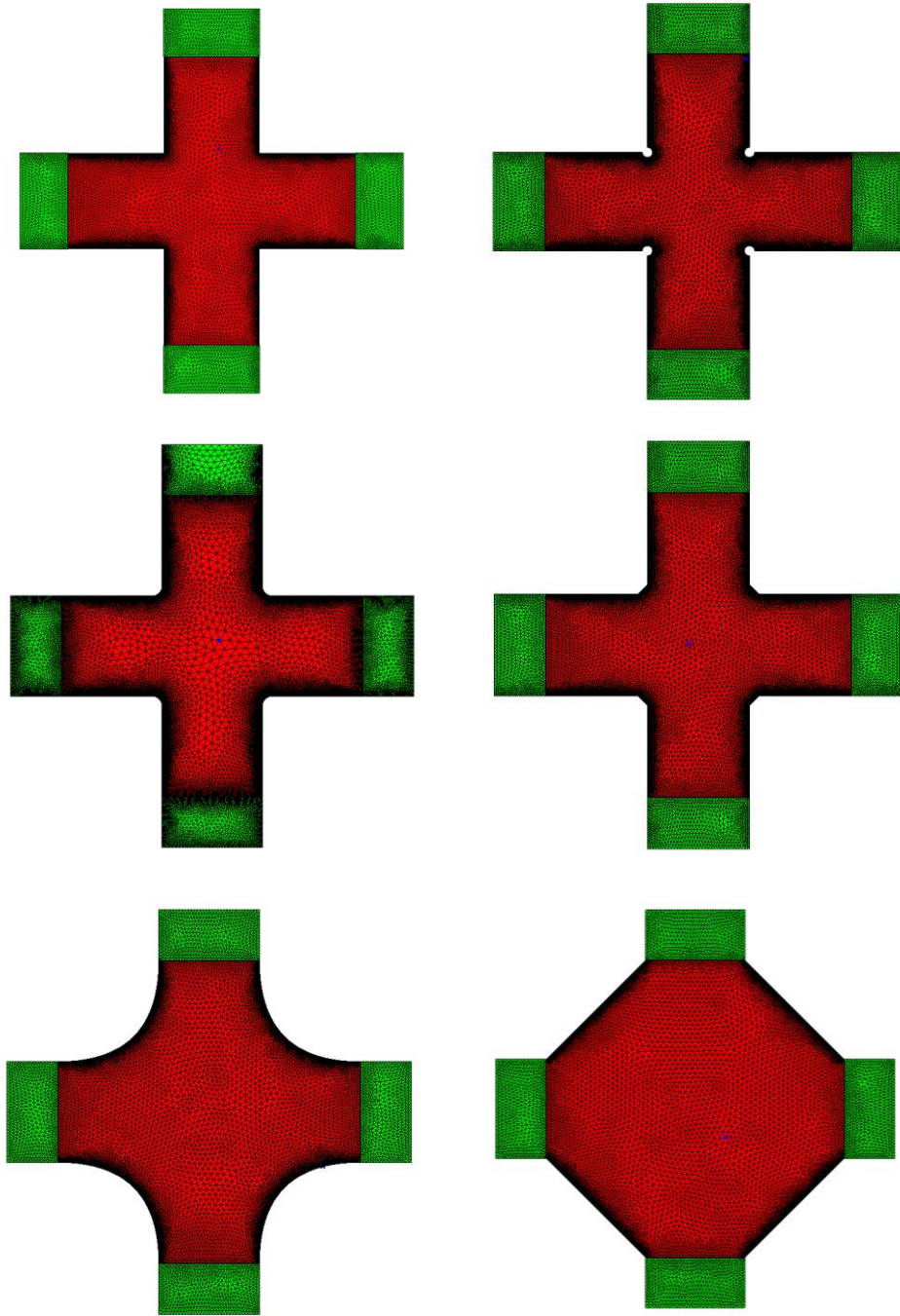
8.2. Generowanie siatek na podstawie modeli geometrycznych

Siatki modeli struktur hallotronowych zostały opracowane za pomocą otwartego oprogramowania Netgen 5.3 z użyciem OpenCascade. Siatki wygenerowano z czworoscianów z wykorzystaniem triangulacji Delunaya [138]. W tym przypadku gęstość siatki zwiększa się adaptacyjnie wraz ze zmniejszaniem się promienia krzywizny krawędzi w okolicy danego elementu modelowanego obiektu. W rezultacie umożliwia to zwiększenie rozdzielczości wyznaczenia rozkładów prądu w hallotronie w punktach, gdzie gradienty gęstości prądu są największe.

W pracy przyjęto następujące założenia do generacji siatki w programie Netgen:

- wysokość maksymalna elementu czworocianowego: 100 μm ,
- wysokość minimalna elementu czworocianowego: 0 μm ,
- szczegółowość: bardzo dokładna,
- gradacja elementów siatki: 0.3,
- krok optymalizacji powierzchniowej: 1.

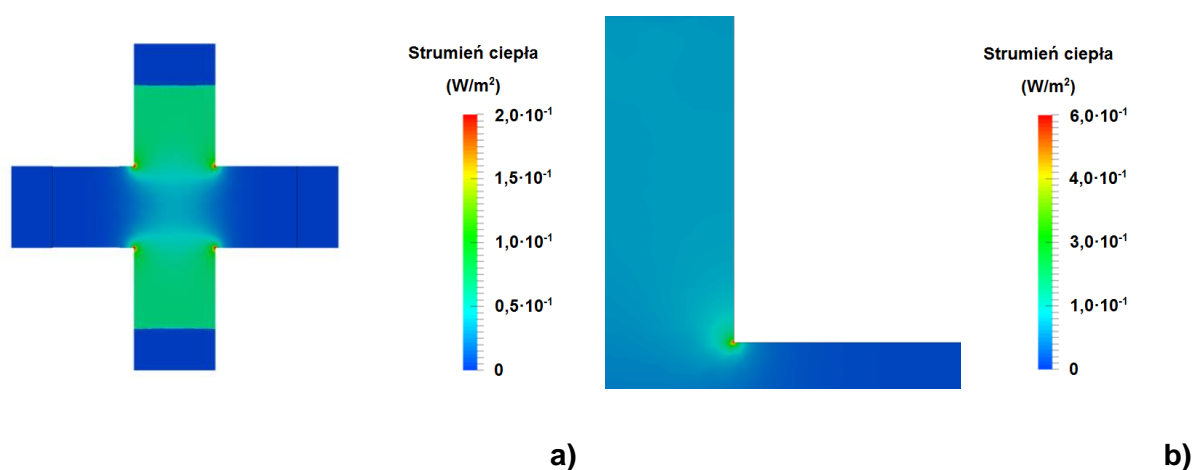
Wyniki generacji siatek trójwymiarowych przedstawiono na rysunku 8.7. Na rysunku kolorem czerwonym zaznaczono obszary materiału cienkowarstwowego czujnika Halla, natomiast kolorem zielonym zaznaczono kontakty metalizowane. Ze względu na symetrię układu hallotronu grubość modelowanego sensora Halla może być przyjęta arbitralnie. Powinna być ona jednak uwzględniona przy wyznaczaniu wartości rzeczywistego prądu zasilającego hallotron.



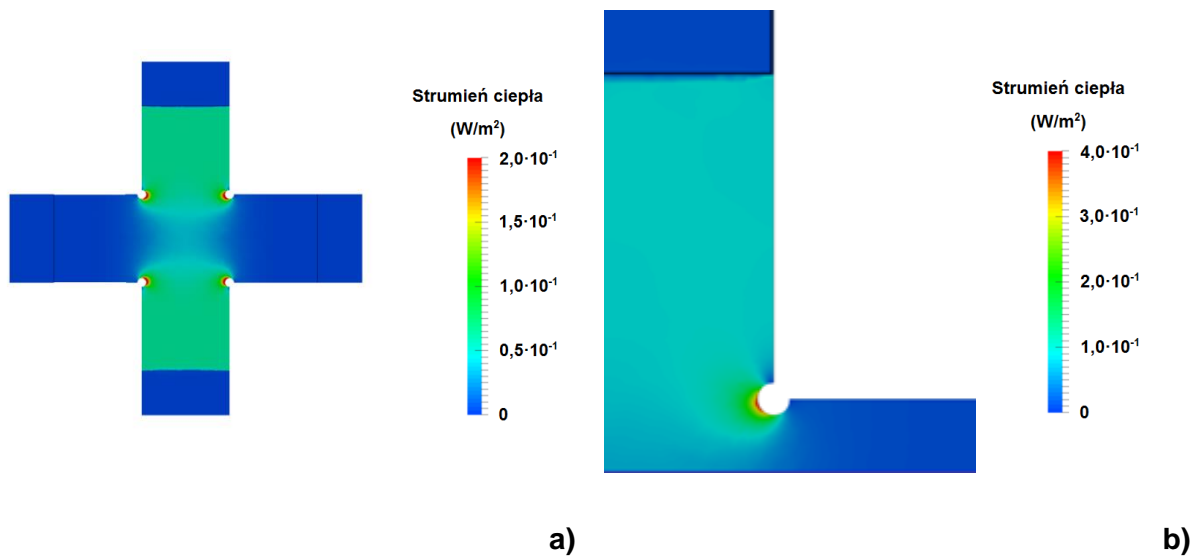
Rys. 8.7. Modele wybranych struktur hallotronowych po generacji siatek (na czerwono zaznaczono obszary półprzewodnika, kolorem zielonym zaznaczono kontakty metaliczne)

8.3. Wyniki modelowania

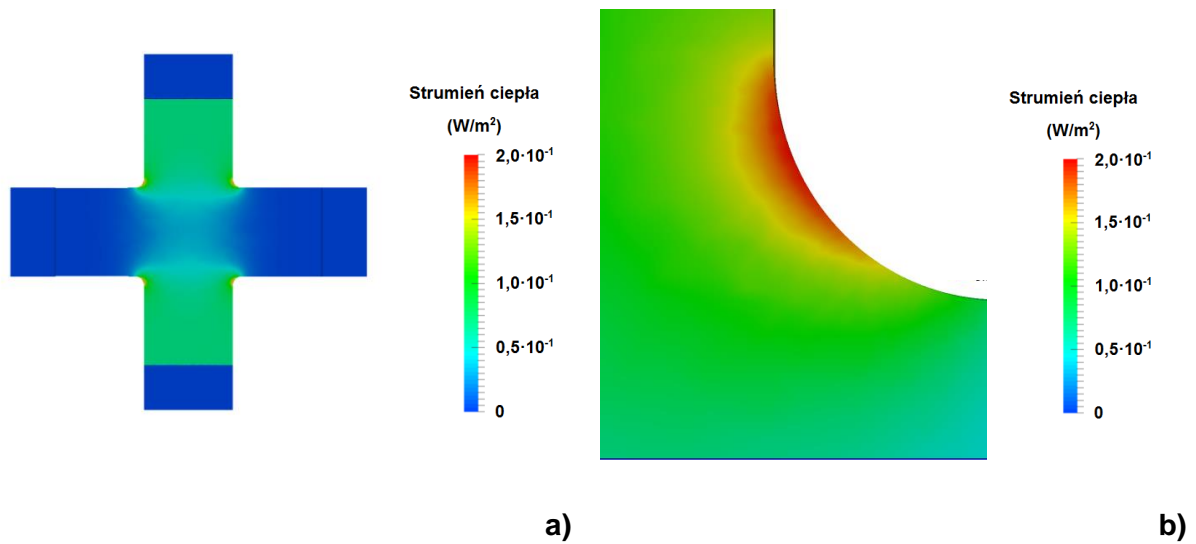
Odpowiednie zaprojektowanie geometrii struktury grafenowej hallotronowej pozwala ograniczyć występowanie zjawisk termoelektrycznych i związanej z nimi generacji napięcia niezrównoważenia w sygnale wyjściowym hallotronu oraz ograniczyć wpływ ewentualnej erozji cienkiej warstwy sensora hallotronowego, powodowanej nadmiernym lokalnym wydzieleniem się ciepła podczas przepływu prądu zasilającego. Dlatego przeprowadzono modelowanie przestrzennego rozkładu wydzielanej mocy na powierzchni zaproponowanych kształtów struktur hallotronowych. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunkach 8.8-8.13. Podczas modelowania nie uwzględniono wpływu zewnętrznego pola magnetycznego. W celu zobrazowania różnic pomiędzy poszczególnymi strukturami na rysunkach 8.8a-8.13a zastosowano jednakową skalę barwną. Na rysunkach 8.8b-8.13b skala barwna dobrana do rysunków każdej ze struktur indywidualnie tak, by pokryć zakres występujących wartości wydzielanej mocy.



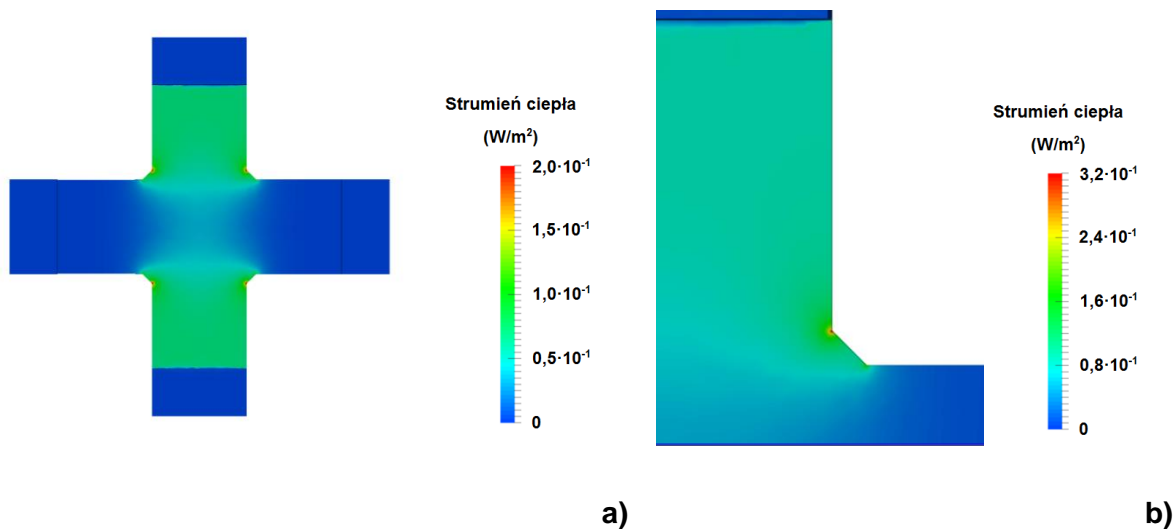
Rys. 8.8. Modelowanie przestrzennego rozkładu wydzielanej mocy. Struktura nr 1: a) zobrazowanie rozkładu mocy w całej strukturze, b) fragment struktury z widocznym najbardziej grzejącym się obszarem



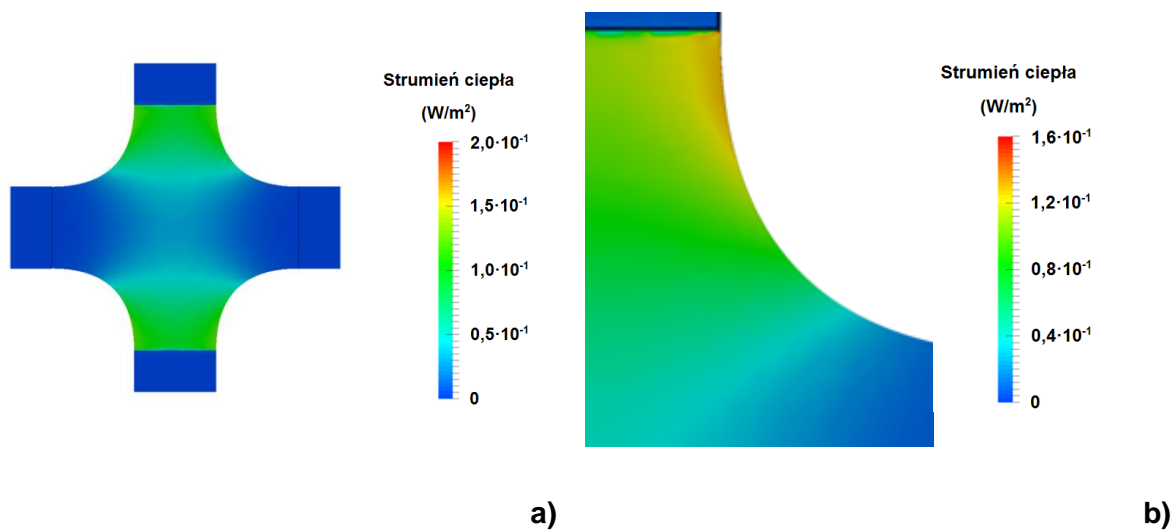
Rys. 8.9. Modelowanie przestrzennego rozkładu wydzielanej mocy. Struktura nr 2: a) zobrazowanie rozkładu mocy w całej strukturze, b) fragment struktury z widocznym najbardziej grzejącym się obszarem



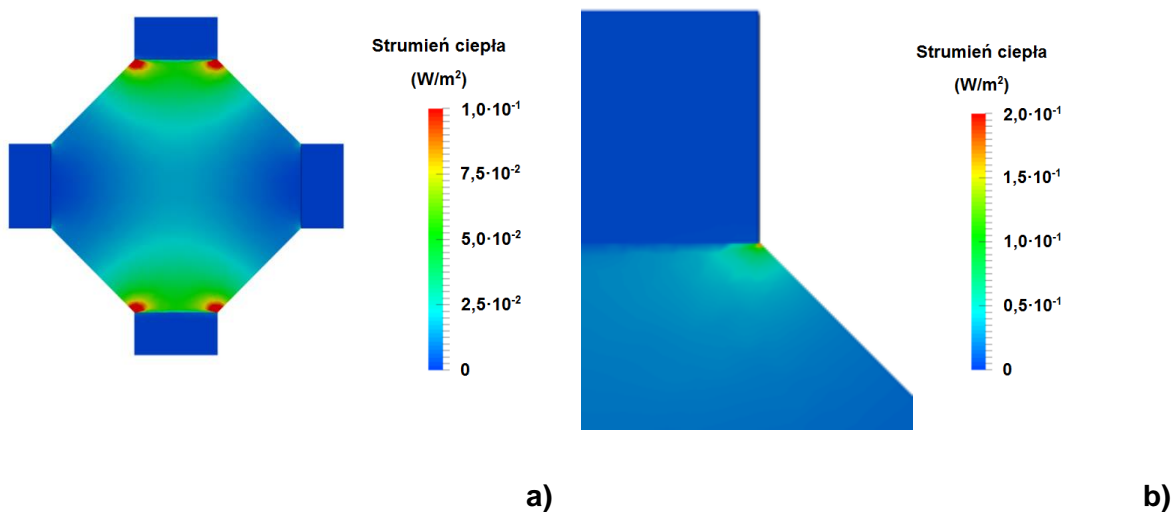
Rys. 8.10. Modelowanie przestrzennego rozkładu wydzielanej mocy. Struktura nr 3: a) zobrazowanie rozkładu mocy w całej strukturze, b) fragment struktury z widocznym najbardziej grzejącym się obszarem



Rys. 8.11. Modelowanie przestrzennego rozkładu wydzielanej mocy. Struktura nr 4: a) zobrazowanie rozkładu mocy w całej strukturze, b) fragment struktury z widocznym najbardziej grzejącym się obszarem

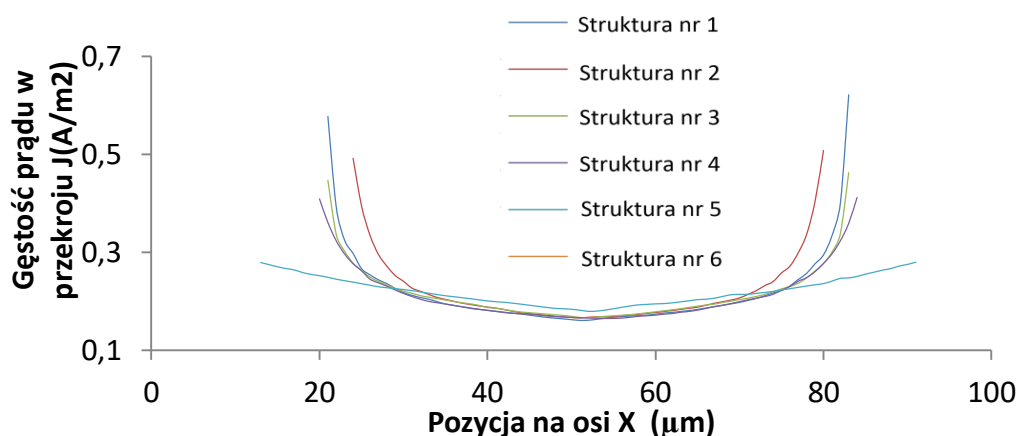


Rys. 8.12. Modelowanie przestrzennego rozkładu wydzielanej mocy. Struktura nr 5: a) zobrazowanie rozkładu mocy w całej strukturze, b) fragment struktury z widocznym najbardziej grzejącym się obszarem



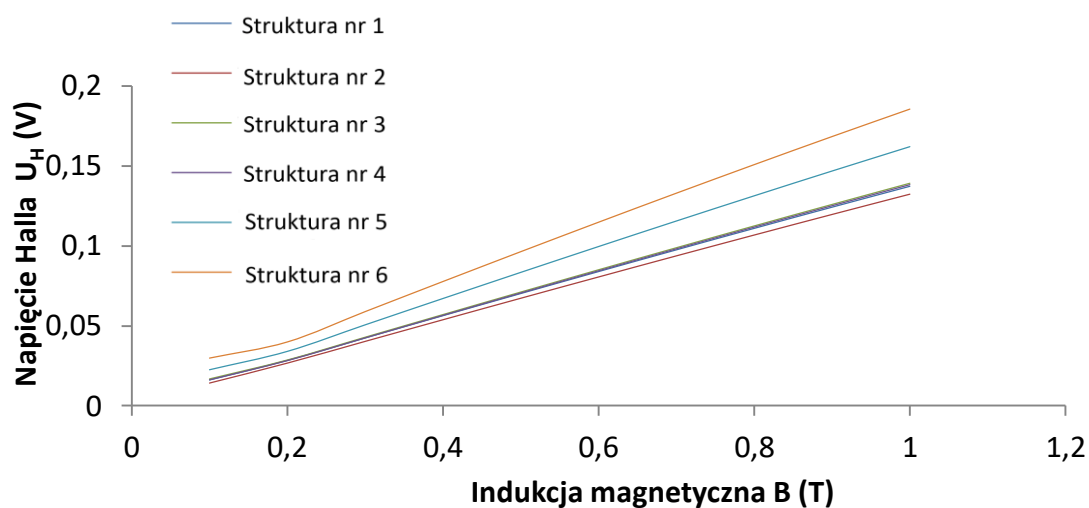
Rys. 8.13. Modelowanie przestrzennego rozkładu wydzielanej mocy. Struktura nr 6: a) zobrazowanie rozkładu mocy w całej strukturze, b) fragment struktury z widocznym najbardziej grzejącym się obszarem

Na rysunku 8.14 przedstawiono rozkłady gęstości prądu w przekrojach prostopadłych do kierunku przepływu prądu, wykonane w miejscach o najwyższych wartościach gęstości prądu. Z uzyskanych wykresów wynika, że gęstość prądu w hallotronie w kształcie krzyża jest silnie niejednorodna, skutkuje to lokalnym zwiększonym nagrzewaniem się struktury sensora.



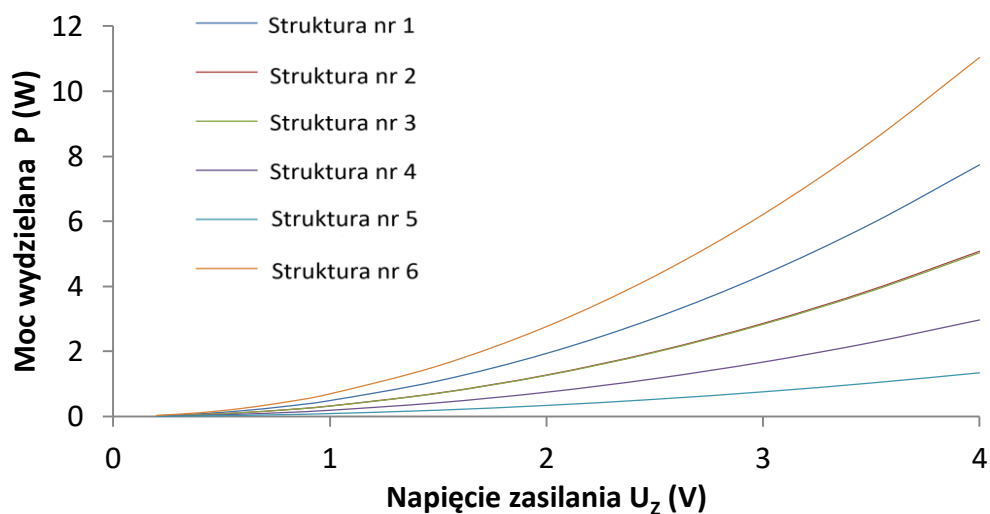
Rys. 8.14. Rozkład wartości prądu w przekroju wzdłuż osi X w punkcie o największej emisji energii cieplnej dla każdej ze struktur

W odniesieniu do kształtów struktur przedstawionych na rysunkach 8.1-8.6 wyznaczono charakterystyki czułości sensorów hallotronowych. Charakterystyki te przedstawiono na rysunku 8.15. Modelowanie przeprowadzono przy założeniu, że mierzone pole magnetyczne jest zadawane w kierunku prostopadłym do powierzchni hallotronu i zmienia się w przedziale od 0 do 1T (w odniesieniu do przenikalności magnetycznej próżni).



Rys. 8.15. Charakterystyki zależności napięcia Halla od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego dla każdej ze struktur

Przeprowadzono także modelowanie wartości wydzielanej mocy na powierzchni hallotronu w funkcji napięcia zasilania. Wyniki tego modelowania podano na rysunku 8.16.



Rys. 8.16. Moc wydzielana przez strukturę hallotronową w funkcji napięcia zasilania dla każdej ze struktur

8.4. Podsumowanie wyników modelowania

Wyniki zrealizowanego modelowania potwierdzają, że możliwe jest takie ukształtowanie struktury hallotronowej, przy którym rozkład ciepła wydzielanego na powierzchni hallotronu jest względnie jednorodny, a zjawisko występowania lokalnych obszarów nagrzewania tzw. „hot point” jest ograniczone. Jest to szczególnie ważne w odniesieniu do stabilności napięcia niezrównoważenia hallotronu, na którą znaczący wpływ ma erozja termiczna struktury hallotronowej.

Wyniki analizy czułości oraz mocy wydzielanej na powierzchni hallotronów o zmodyfikowanym kształcie zebrano w tabeli 8.1. Należy stwierdzić, że czułość struktur zmodyfikowanych względem struktury będącej krzyżem równoramiennym (struktura nr 1) ulega niewielkiemu zmniejszeniu, spowodowanemu zwiększeniem powierzchni hallotronu. Dlatego rozwiązaniem optymalnym jest struktura nr 5, która jest kompromisem pomiędzy czułością sensora a jednorodnością rozplywu prądu w strukturze (przedstawioną na rysunku 8.12).

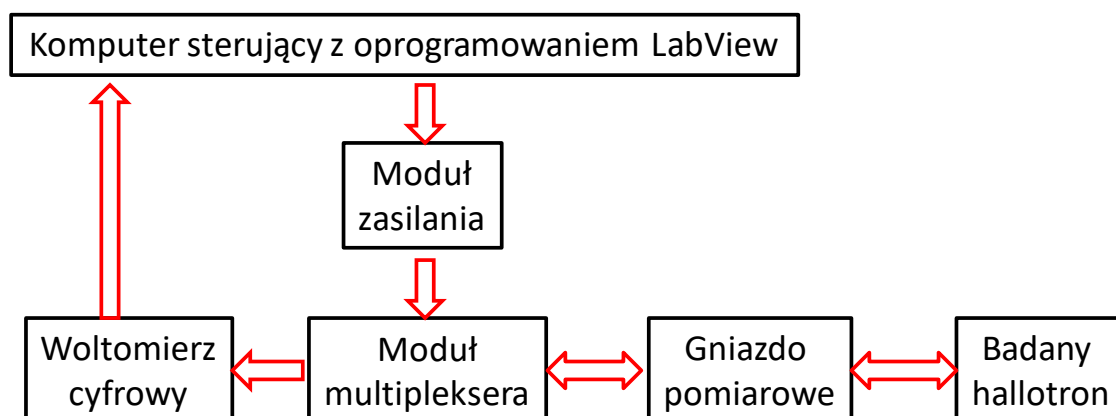
Tabela 8.1. Parametry funkcjonalne hallotronów o zmodyfikowanym kształcie otrzymane hallotronów otrzymane w wyniku modelowania. (Parametry podano dla napięcia zasilania $U_z=1V$ i pola mierzonego $B = 0.1 T$)

	Moc wydzielana (mW)	Prąd zasilania (mA)	Czułość (V/AT)
Struktura nr 1	0,33	1,83	74,8
Struktura nr 2	0,32	1,75	75,3
Struktura nr 3	0,33	1,86	74,4
Struktura nr 4	0,34	1,87	73,8
Struktura nr 5	0,39	2,30	70,2
Struktura nr 6	0,5	3,04	60,9

9. Korekcja hallotronu z użyciem tomografii rezystancyjnej

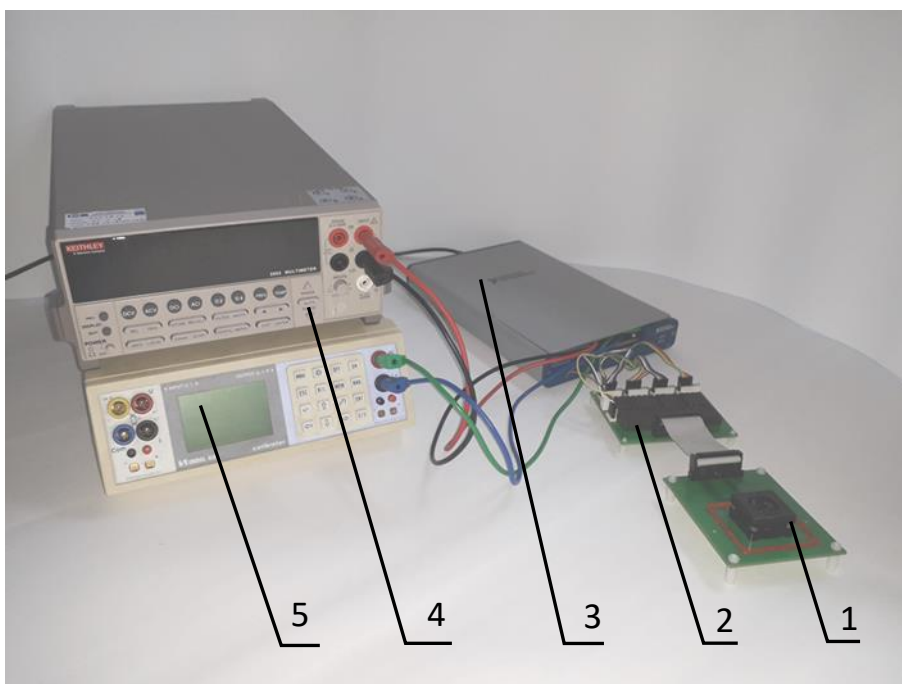
9.1. Opracowane stanowisko pomiarowe tomografu rezystancyjnego

W ramach pracy opracowano układ tomografu rezystancyjnego, umożliwiającego pomiary napięć i prądów na zaciskach hallotronu z elektrodami grzebieniowymi [139], przedstawionego na rysunku 7.4. Należy podkreślić, że układ takiego tomografu rezystancyjnego do pomiarów tomograficznych hallotronów nie był do tej pory prezentowany w literaturze. Schemat blokowy opracowanego tomografu przedstawiono na rysunku 9.1. Opracowany system składa się z czterech modułów: zasilania, multipleksera, woltomierza precyzyjnego i komputera sterującego. Dodatkowo tomograf wyposażony jest w gniazdo pomiarowe dostosowane do hallotronów w obudowie QFN32.



Rys. 9.1. Schemat blokowy opracowanego tomografu rezystancyjnego

Konstrukcja mechaniczna gniazda pomiarowego oraz moduł multipleksera zostały zaprojektowane i wykonane na potrzeby pracy. Podstawowym podzespołem gniazda pomiarowego jest samozaciskowe gniazdo stykowe, dedykowane do elementów w obudowach QFN32. Moduł multipleksera składa się z zestawu miniaturowych przekaźników elektromechanicznych. Wybór przekaźników elektromechanicznych jako elementów przełączających został przeprowadzony ze względu na ich małą rezystancję styków. Komputer sterujący wyposażono w kartę sterowania i akwizycji danych NI USB-6341 firmy National Instruments. Natomiast jako zasilacz prądowy zastosowano precyzyjny kalibrator prądowy INMEL 60, woltomierz cyfrowy – Keithley model 2002. Widok opracowanego tomografu przedstawiono na rysunku 9.2.

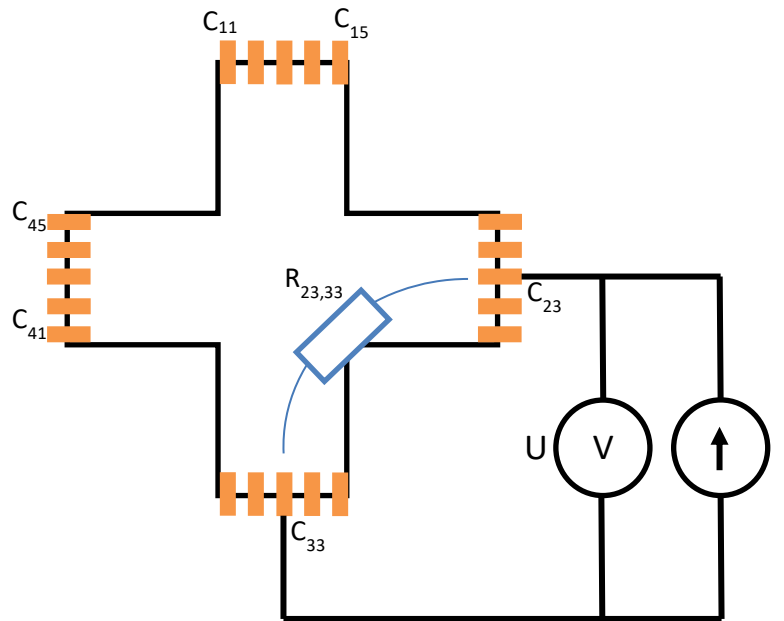


Rys. 9.2. Kluczowe elementy opracowanego tomografu rezystancyjnego: 1) gniazdo pomiarowe QFN32, 2) opracowany multiplekser, 3) elektroniczna karta sterowania i akwizycji danych, 4) woltomierz cyfrowy , 5) precyzyjny kalibrator prądowy

Na potrzeby pracy zaimplementowano możliwość pracy tomografu w dwóch trybach:

- rezystancyjnym,
- napięciowym.

W trybie rezystancyjnym realizowany jest pomiar rezystancji pomiędzy poszczególnymi parami zacisków napięciowo-prądowych, co przedstawiono na rysunku 9.3. W tomografie zaimplementowano algorytm pomiarowy, w którym występuje każda możliwa kombinacja połączenia zacisków w celu osiągnięcia maksymalnej liczby danych pomiarowych. Pomiar rezystancji wykonywano metodą techniczną.

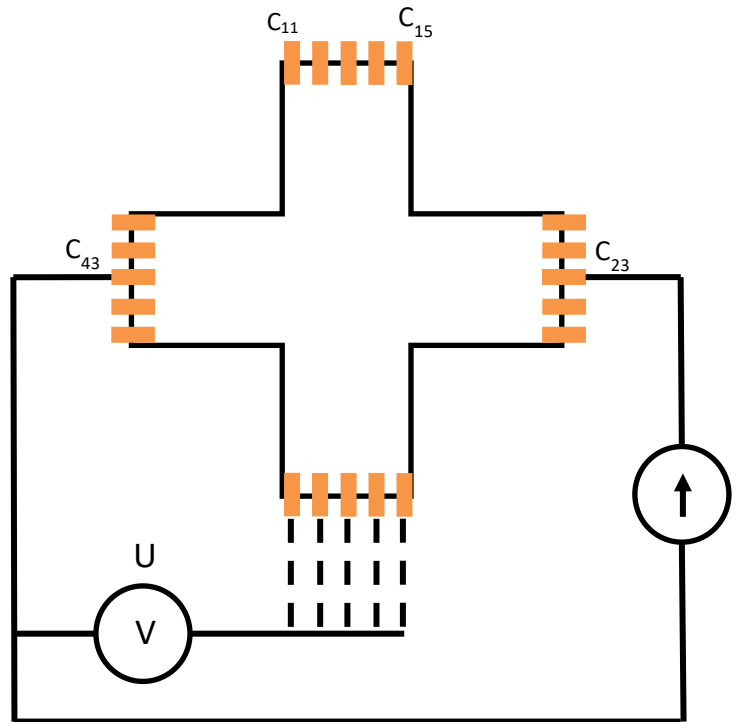


Rys. 9.3. Pojedynczy pomiar w trybie pomiaru rezystancji metodą techniczną

W wyniku pomiaru przy użyciu tomografu w trybie rezystancyjnym otrzymuje się macierz rezystancji określoną zależnością:

$$R_H = \begin{matrix} & C_{11} & C_{12} & \dots & C_{mn} \\ \begin{matrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{mn} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & R_{11,12} & \dots & R_{11,mn} \\ R_{12,11} & 0 & \dots & R_{12,mn} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ R_{mn,11} & R_{mn,12} & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9.1)$$

Tryb napięciowy odwzorowuje typową pracę hallotronu. W tym trybie w jednej z belek struktury hallotronowej jest wymuszany przepływ prądu o zadanym natężeniu, natomiast pomiarowi podlega rozkład potencjału na kontaktach belki prostopadłej, co przedstawiono na rysunku 9.4.



Rys. 9.4. Pojedynczy pomiar w trybie pomiaru napięcia przy przepływie prądu

W wyniku pomiarów uzyskiwana jest macierz rozkładu potencjału na poszczególnych zaciskach hallotronu z elektrodami grzebieniowymi:

$$R_H = \begin{matrix} & C_{11} & C_{12} & \dots & C_{mn} \\ \begin{matrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \dots \\ C_{mn} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & R_{11,12} & \dots & R_{11,mn} \\ R_{12,11} & 0 & \dots & R_{12,mn} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ R_{mn,11} & R_{mn,12} & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9.2)$$

W opracowanym stanowisku można uzyskać dane o przestrzennym rozkładzie rezystancji w postaci tabel i te wyniki są analizowane w programie umożliwiającym przekształcenia tomograficzne.

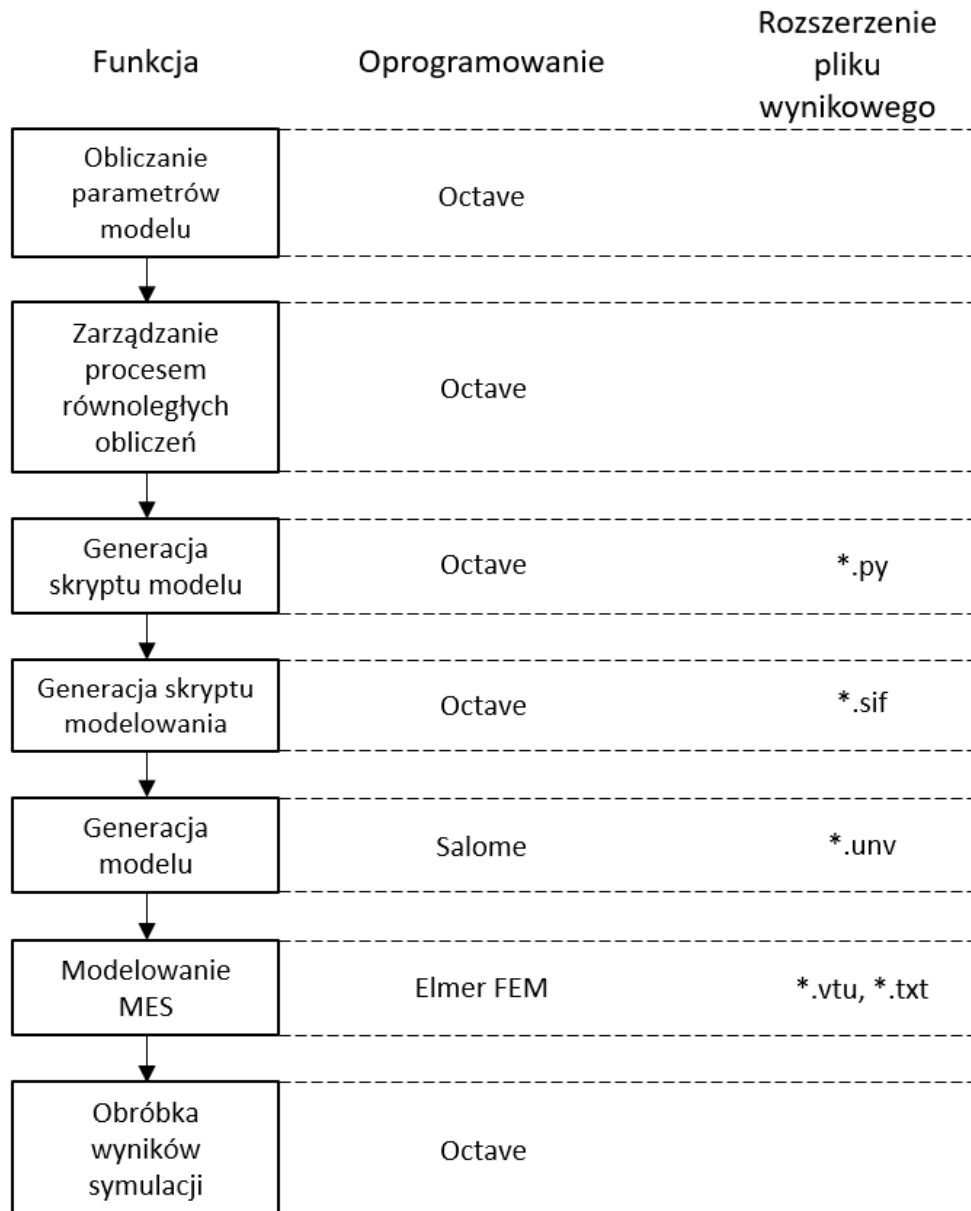
9.2. Implementacja przekształcenia tomograficznego z użyciem otwartego oprogramowania

Realizacja zaproponowanej metody kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotronów wymagała opracowania oprogramowania, które umożliwi:

- wstępne przygotowanie danych,
- realizację przekształcenia odwrotnego tomografii rezystancyjnej i wyznaczenie obszarów korekcyjnych,
- modelowanie właściwości użytkowych hallotronu po usunięciu obszaru korekcyjnego,
- oszacowanie oczekiwanego stopnia redukcji napięcia niezrównoważenia po korekcji.

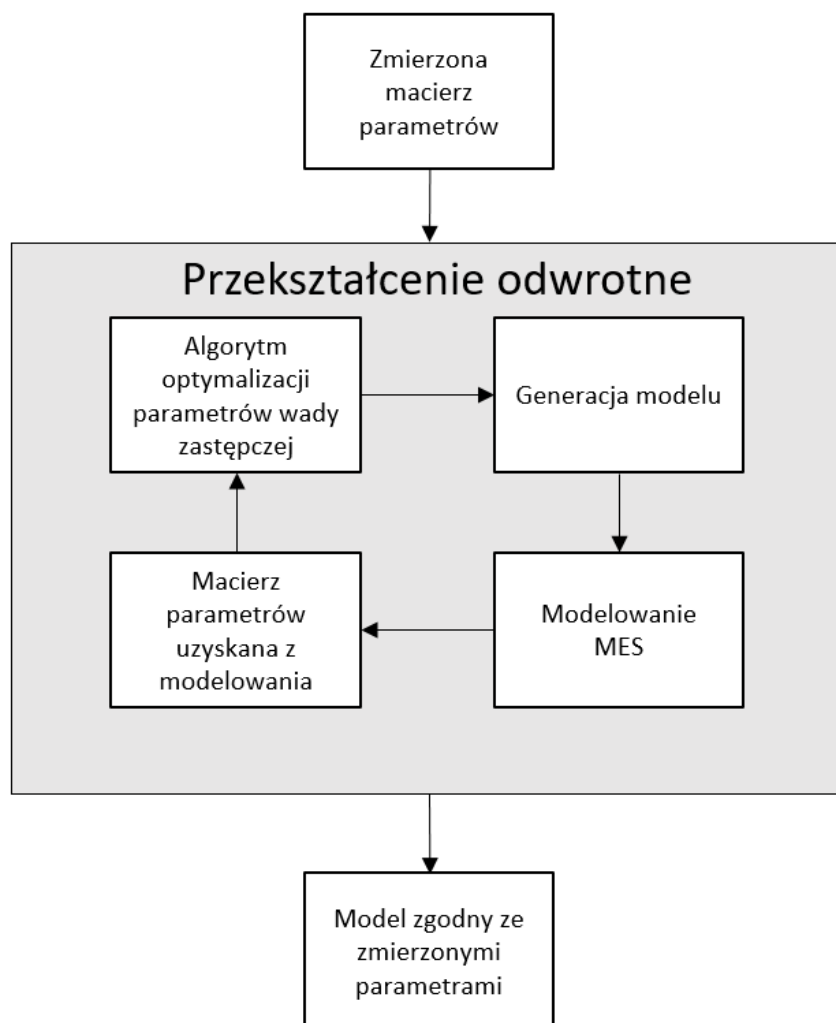
Zarządzanie procesem równoważenia obliczeń na potrzeby korekcji hallotronów zrealizowano z użyciem środowiska oprogramowania Octave [140], które jest otwartym odpowiednikiem oprogramowania Matlab. W wyniku podziału pełnionych funkcji w opracowanym oprogramowaniu zostały wydzielone moduły: akwizycji i interfejsu, przekształcenia prostego oraz przekształcenia odwrotnego.

Przeływ informacji i implementację programową modułu przekształcenia prostego podano na rysunku 9.5. Moduł ten zapewnia generację modelu i realizację modelowania, jak również umożliwia realizację obliczeń równoległych. Tomograficzne przekształcenie proste na bazie metody elementów skończonych zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania ELMER FEM. Modele numeryczne hallotronów i siatki elementów czworosiennych wykonano z wykorzystaniem programu Salome v7.7, zawierającego w sobie implementację oprogramowania Netgen 5.3.



Rys. 9.5. Przepływ informacji i implementacja modułu przekształcenia prostego

W przekształceniu tomograficznym odwrotnym zastosowano optymalizację iteracyjną, w której w kolejnych krokach przekształcenia są wyznaczane parametry opisujące wadę zastępczą. Schemat blokowy przekształcenia tomograficznego odwrotnego podano na rysunku 9.6. Ze względu na zastosowanie w przekształceniu prostym modelowania metodą elementów skończonych (MES), nie jest możliwe obliczenie pochodnych funkcji optymalizowanej [141, 142]. Dlatego do realizacji procesu optymalizacji zastosowano algorytm Nelder-Meada [143], który nie wymaga wyznaczania pochodnej funkcji optymalizowanej.



Rys. 9.6. Algorytm przekształcenia odwrotnego w tomografii rezystancyjnej na potrzeby wyznaczenia obszarów kompensacji hallotronów cienkowarstwowych

9.3. Funkcja celu

Problem przekształcenia odwrotnego, który bazuje na technikach optymalizacyjnych, polega na poszukiwaniu minimum funkcji wielu zmiennych. Wymaga to sformułowania funkcji celu [144], której zmiennymi w danym przypadku są parametry wady równoważnej, będącej obszarem umożliwiającym kompensację napięcia niezrównoważenia hallotronu. W ramach pracy zdefiniowano funkcję celu dla dwóch przypadków:

- trybu rezystancyjnego tomografu,
- oraz trybu napięciowego.

Dla trybu rezystancyjnego funkcje celu określono jako:

$$f(x_0, y_0, r) = \sum (\mathbf{R}_{pom} - \mathbf{R}_{sym}(x_0, y_0, r))^2 \quad (8.3)$$

gdzie: \mathbf{R}_{pom} – macierz rezystancji pomiędzy poszczególnymi kontaktami zmierzonych tomografem, \mathbf{R}_{sym} – macierz rezystancji pomiędzy poszczególnymi kontaktami otrzymanych w poszczególnych iteracjach rekonstrukcji, x_0, y_0 – współrzędne środka wady równoważnej, r - promień wady równoważnej.

Dla trybu napięciowego funkcję celu określono jako:

$$f(x_0, y_0, r) = \sum (\mathbf{U}_{pom} - \mathbf{U}_{sym}(x_0, y_0, r))^2 \quad (8.4)$$

gdzie: \mathbf{U}_{pom} – macierz napięć pomiędzy poszczególnymi kontaktami zmierzonych tomografem, \mathbf{U}_{sym} – macierz napięć pomiędzy poszczególnymi kontaktami otrzymanych w poszczególnych iteracjach rekonstrukcji, x_0 i y_0 – współrzędne środka wady równoważnej, r - promień wady równoważnej.

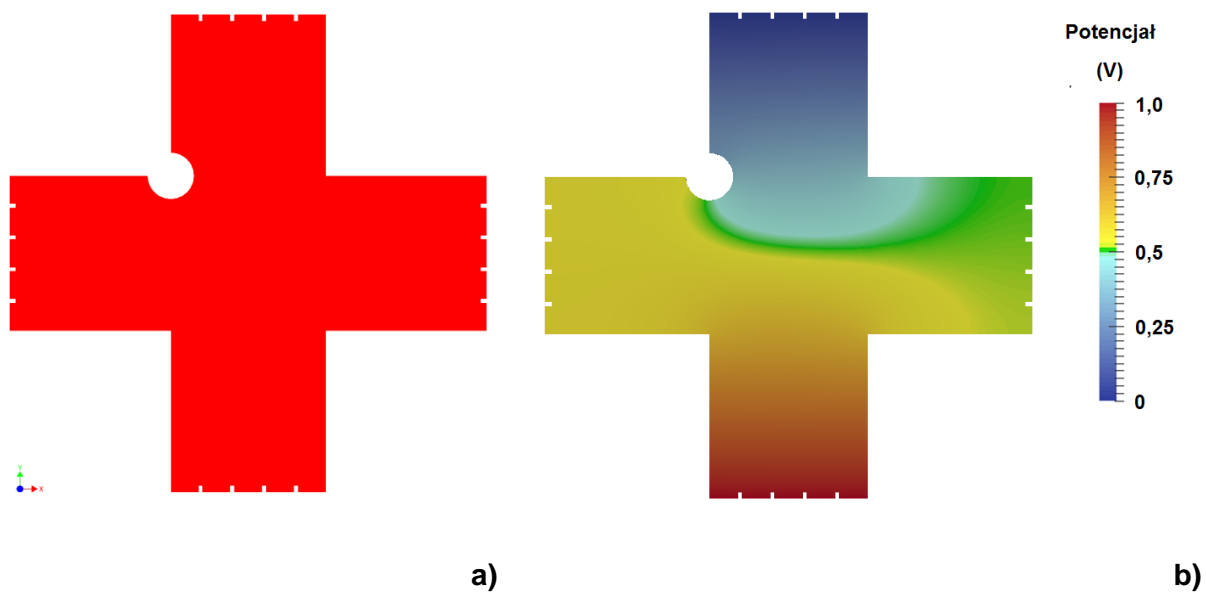
9.4. Modelowanie nieciągłości w hallotronie

W celu weryfikacji zaproponowanej metody kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotronów cienkowarstwowych został zaproponowany zestaw 5 fantomów numerycznych. Każdy z zaproponowanych fantomów zawiera wadę lub zbiór wad, które reprezentują nieciągłości i mogą występować w strukturze rzeczywistego, cienkowarstwowego sensora hallotronowego. Modele umożliwiają weryfikację efektywności algorytmu generacji wady równoważnej, a następnie wyznaczania na jej podstawie obszaru korekcyjnego i przeprowadzenia samej korekcji.

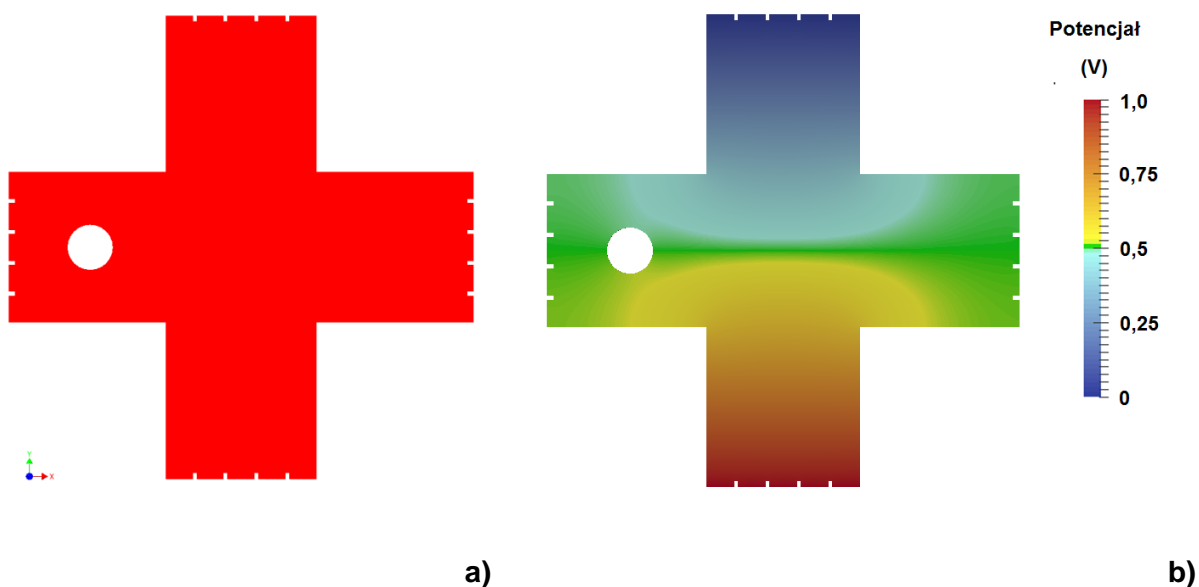
W pracy wykorzystano następujące fantomy wad:

- nr 1: struktura hallotronowa z wadą w postaci wyciętego koła w jednym z naroży wewnętrznych (rysunek 9.10).
- nr 2: struktura hallotronowa z wadą w postaci wyciętego koła w belce poziomej hallotronu (rysunek 9.11).
- nr 3: struktura hallotronowa z wadą w postaci wyciętego „zębka” w belce poziomej (rysunek 9.12).
- nr 4: struktura hallotronowa z wadą złożoną w postaci nieregularnych obszarów nieciągłości (rysunek 9.13).
- nr 5: struktura hallotronowa z wadą złożoną w postaci licznych wycięć o kształcie koła (rysunek 9.14).

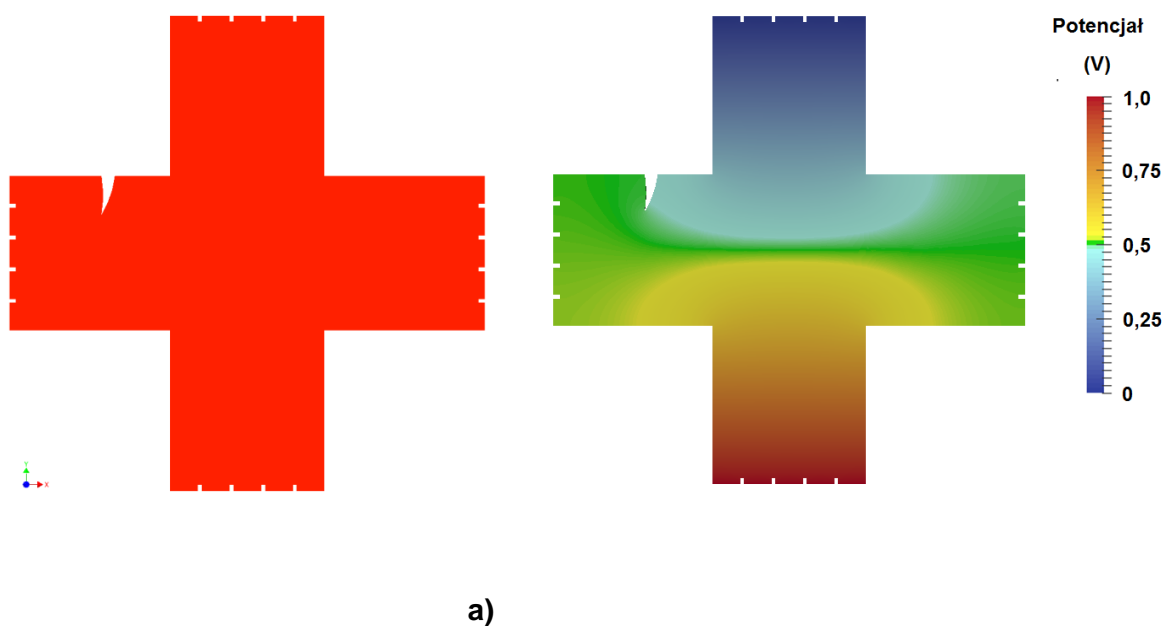
Wejściowa geometria do fantomów to krzyż równoramienny o wymiarach belki $300\mu\text{m} \times 900\mu\text{m}$. Założono, że wszystkie fantomy są wykonane z materiału o jednakowej rezystywności. Natomiast wady zamodelowano jako obszary bez materiału przewodzącego. W rezultacie wady modelowe odwzorowują uszkodzenia, które mogą powstać w strukturze sensora cienkowarstwowego podczas procesu produkcji. Z wykorzystaniem metody elementów skończonych zamodelowano przepływ prądu przez poszczególne struktury, a w rezultacie otrzymano zestaw rozkładów napięcia na belkach struktury.



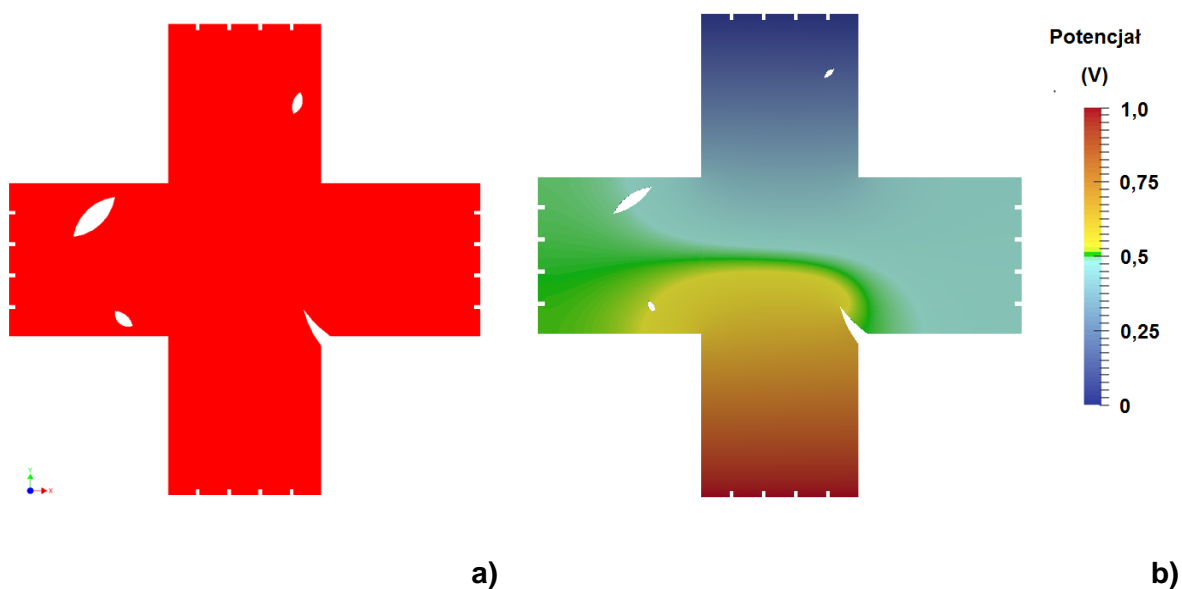
Rys. 9.10. Fantom nr 1. Wada w postaci wyciętego koła w narożu: a) model geometryczny struktury hallotronowej, b) rozkład napięcia w strukturze hallotronu



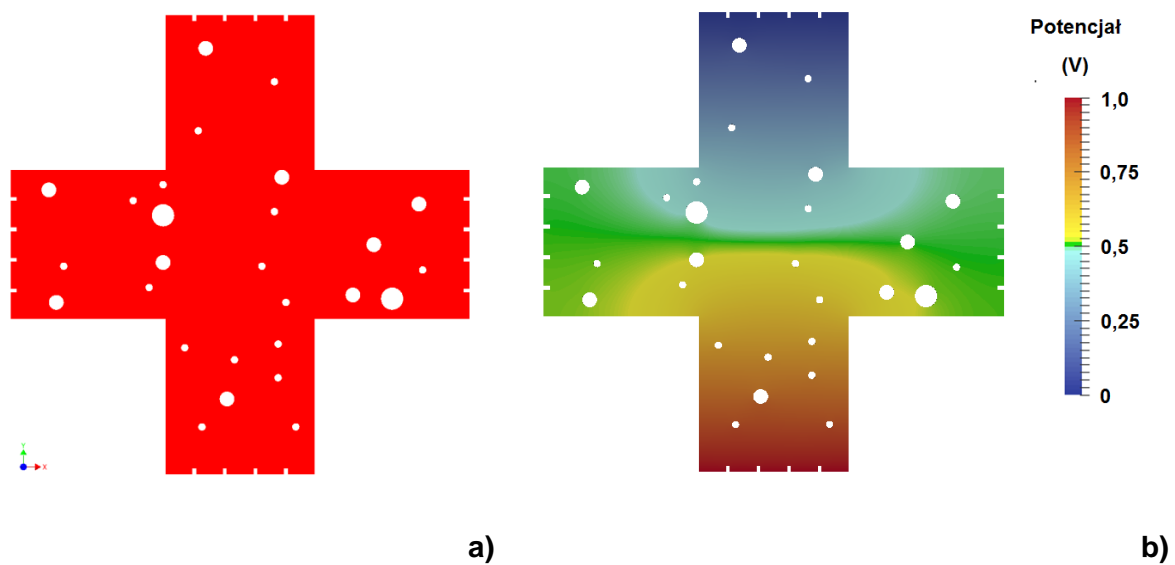
Rys. 9.11. Fantom nr 2. Wada w postaci wyciętego koła w środku ramienia: a) model geometryczny struktury hallotronowej, b) rozkład napięcia w strukturze hallotronu



Rys. 9.12. Fantom nr 3. Wada w postaci wyciętego „zębka” w środku ramienia: a) model geometryczny struktury hallotronowej, b) rozkład napięcia w strukturze hallotronu



Rys. 9.13. Fantom nr 4. Wada złożona w postaci wyciętych kształtów nieregularnych: a) model geometryczny struktury hallotronowej, b) rozkład napięcia w strukturze hallotronu

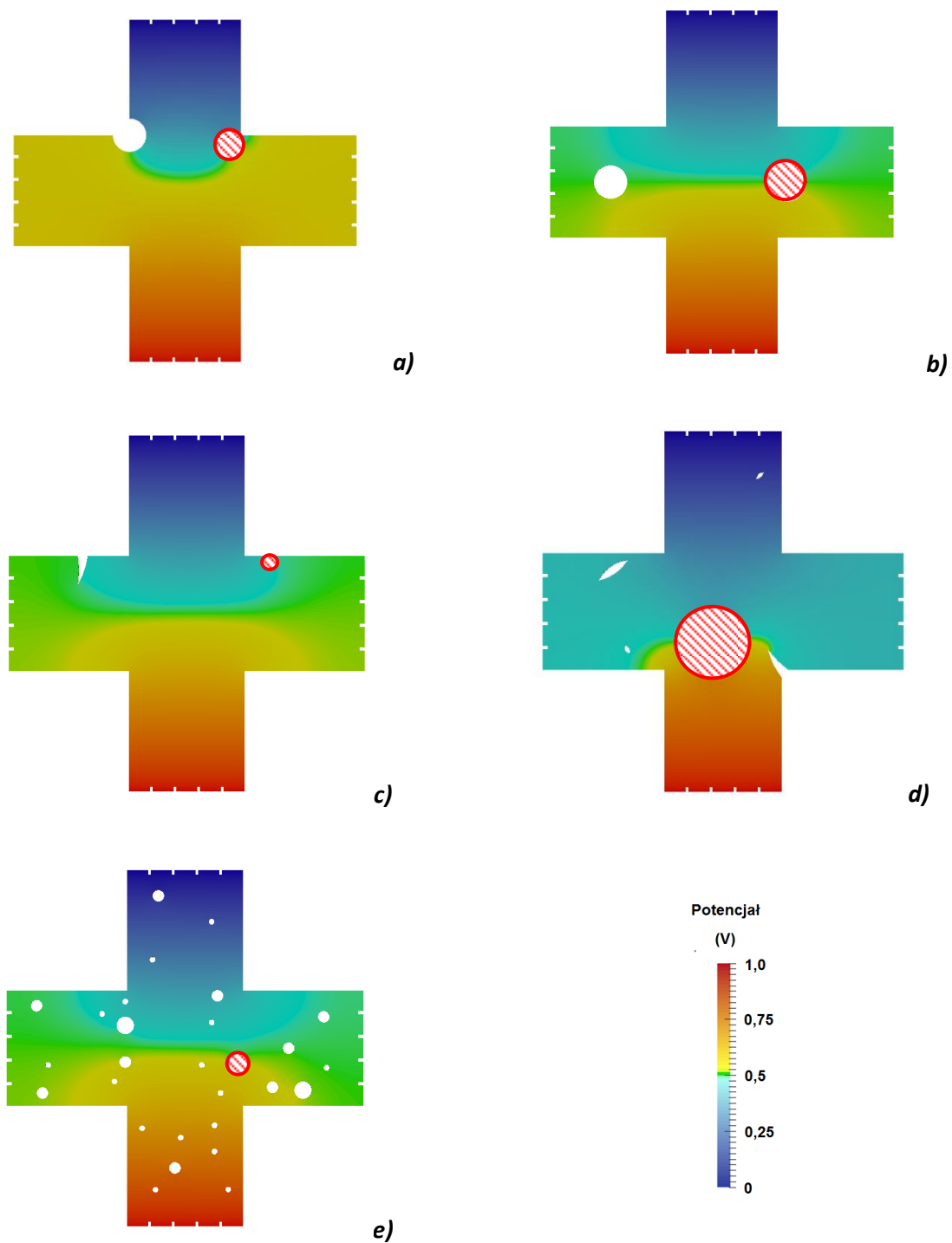


Rys. 9.14. Fantom nr 5. Wada złożona w postaci licznych wycięć w kształcie koła: a) model geometryczny struktury hallotronowej, b) rozkład napięcia w strukturze hallotronu

9.5. Tomograficzne wyznaczenie wady równoważnej i możliwość korekcji napięcia niezrównoważenia hallotronu

Zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 5 i przedstawioną na rysunku 5.1b, dla każdego z fantomów sensorów hallotronowych wyznaczono wady równoważne, które powodują taki sam rozkład napięcia niezrównoważenia na elektrodach pomiarowych hallotronu, jak w przypadku wad modelowych fantomu. Przyjęto, że wady równoważne mają kształt koła i są opisane przez trzy parametry: położenie x i y oraz promień wady r . Parametry wad modelowych wyznaczono w procesie przekształcenia tomograficznego odwrotnego z wykorzystaniem iteracyjnej optymalizacji metodą Nelder-Meada opisaną w rozdziale 9.2.

Otrzymane w wyniku przekształcenia tomograficznego odwrotnego parametry wady równoważnej posłużyły do wyznaczenia obszaru korekcyjnego. Obszar korekcyjny został wyznaczony jako odbicie wady równoważnej względem pionowej osi symetrii hallotronu. Po zamodelowaniu korekcji wyznaczono rozkład potencjału na powierzchni struktur oraz napięcie niezrównoważenia po korekcji. Wyniki modelowania obrazujące rezultaty korekcji napięcia niezrównoważenia fantomów zebrano na rysunku 9.15.



Rys. 9.15. Rezultaty korekcji napięcia niezrównoważenia hallotronu przez wykonanie wady równoważnej wyznaczonej na drodze tomograficznego przekształcenia odwrotnego: a) fantom 1, b) fantom 2, c) fantom 3, d) fantom 4, e) fantom 5. Obszar korekcyjny zaznaczono kolorem czerwonym

Do ilościowej oceny jakości korekcji zaproponowano parametr n , opisujący procentową redukcję napięcia niezrównoważenia hallotronu:

$$n = \frac{U_{n1} - U_{n2}}{U_{n1}} \cdot 100\% \quad (9.5)$$

gdzie: U_{n1} – napięcie niezrównoważenia przed korekcją, U_{n2} – napięcie niezrównoważenia po korekcji na bazie wyznaczonej wady równoważnej. Wyznaczono również bezwzględną różnicę napięcia niezrównoważenia przed i po korekcji:

$$\Delta = U_{n1} - U_{n2} \quad (9.6)$$

Zestawienie uzyskanych wyników podano w tabeli 9.1. Analiza wyników wskazuje, że w przypadku hallotronów z wadami struktury, które mają regularny kształt i są skupione w jednym miejscu, można uzyskać znaczącą redukcję napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego z hallotronu. W przypadku wady kołowej, zamodelowanej w fantomie nr 1, napięcie niezrównoważenia zredukowano o 96%. Jednakże korekcja struktur z zamodelowanymi wadami rozproszonym, jak na przykład wady zamodelowane w fantomach 4 i 5, skutkowałą znacznie mniejszą redukcją napięcia niezrównoważenia.

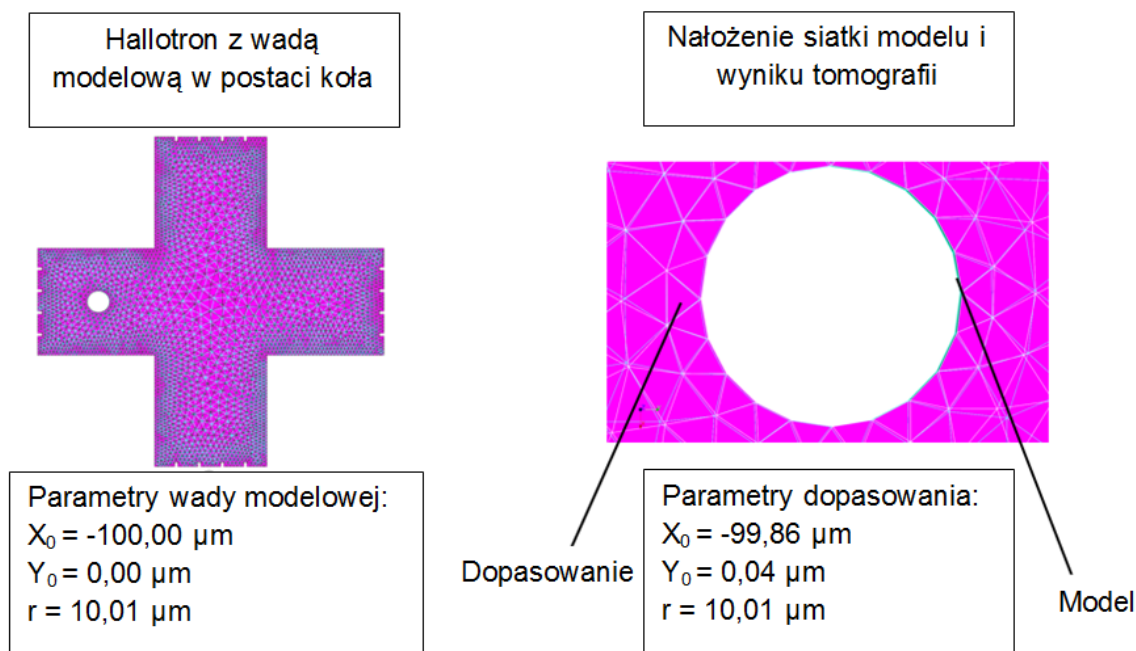
Tabela 9.1. Wyniki kompensacji

		Numer fantomu				
		1	2	3	4	5
Parametry	Napięcie niezrównoważenia przed korekcją U_{n1} (mV)	33,70	$6,91 \cdot 10^{-3}$	5,84	30,20	4,36
	Napięcie niezrównoważenia po korekcji U_{n2} (mV)	1,53	$-2,44 \cdot 10^{-3}$	$7,58 \cdot 10^{-1}$	27,60	6,49
	Stopień redukcji n (%)	95	65	87	9	-49
	Różnica napięcia niezrównoważenia Δ (mV)	32,2	$9,35 \cdot 10^{-3}$	5,08	2,60	-2,13

9.6. Analiza dokładności odwzorowania nieciągłości struktury cienkowarstwowej w wyniku tomograficznego przekształcenia odwrotnego

W celu weryfikacji powtarzalności uzyskiwanych wyników celu tomograficznego przekształcenia odwrotnego wielokrotnie powtórzono proces wyznaczenia parametrów wady równoważnej dla modelowej wady prostej kształcie koła. Wada modelowa została zamodelowana jako koło o promieniu $r = 10 \mu\text{m}$ i współrzędnych środka $(-100 \mu\text{m}; 0 \mu\text{m})$.

Otrzymane wyniki, przedstawione na rysunku 9.16, wykazują dobre dopasowanie wady równoważnej do wady modelowej. Odchylenie średnie kwadratowe wartości promienia r i współrzędnych x, y wyznaczonej wady równoważnej nie przekraczają $1 \mu\text{m}$.



Rys. 9.16. Zobrazowanie dokładności odwzorowania wad prostych przy użyciu przekształcenia odwrotnego tomografii rezystancyjnej

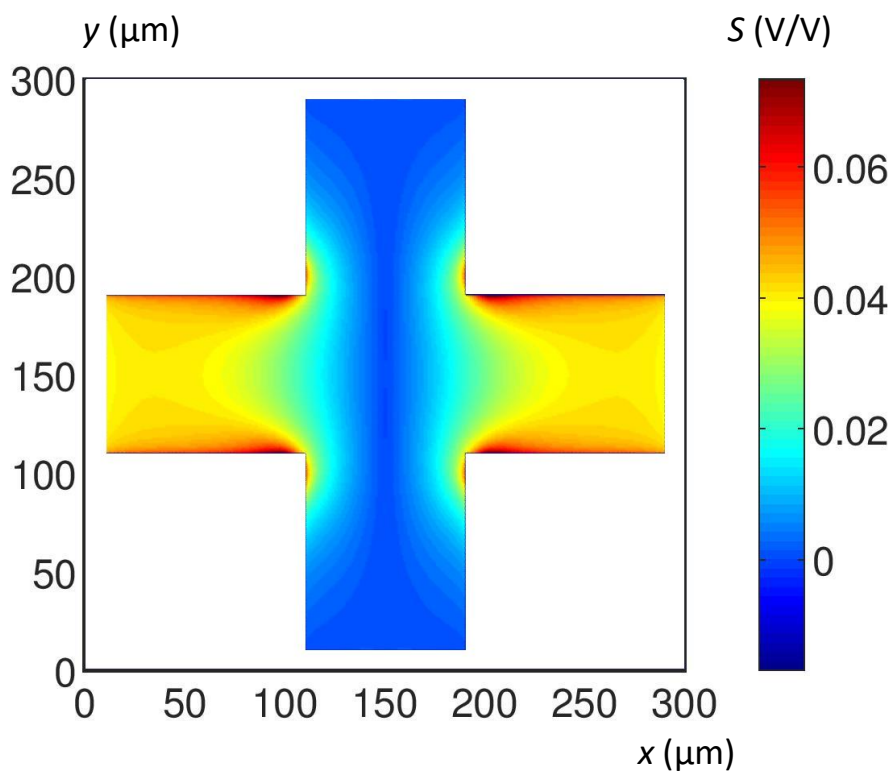
W tomografii rezystancyjnej rozdzielczość pomiarów jest zależna od geometrii obiektu badanego. Szczególnie ważna jest odległość od elektrod do wady czy innego zaburzenia [145]. W odróżnieniu od geologicznych aplikacji tomografii rezystancyjnej, gdzie rozkład elektrod na powierzchni jest równomierny, w opracowanym rozwiązaniu rozłożenie elektrod wynika wprost ze stosowanych geometrii hallotronów. Z tego względu narzucone rozmieszczenie elektrod nie jest optymalne dla zastosowań tomograficznych i prowadzi do znacznych zmian czułości pomiaru na powierzchni badanej struktury.

Do określenia rozdzielczości wprowadzono parametr czułości S przekształcenia tomograficznego, zdefiniowany jako stosunek napięcia niezrównoważenia dla wady o promieniu $r = 10 \mu\text{m}$ i współrzędnych środka promienia x, y do napięcia zasilania U_z :

$$S(x, y) = \frac{U_n(x, y, r)}{U_z} \quad (9.7)$$

gdzie: $U_n(r, x, y)$ – wartość napięcia niezrównoważenia dla parametrów x, y, r .

Wyniki rozkładu czułości przekształcenia tomograficznego S podano na rysunku 9.17.



Rys. 9.17. Rozkład czułości przekształcenia tomograficznego S na powierzchni cienkowarstwowego hallotronu w kształcie krzyża równoramiennego

Z otrzymanych wyników modelowania wynikają następujące wnioski:

- rozkład czułości przekształcenia tomograficznego S jest niejednorodny w obszarze powierzchni hallotronu,
- czułość przekształcenia tomograficznego S maleje wraz z odległością od elektrod pomiarowych,
- czułość przekształcenia tomograficznego S przy brzegach struktury hallotronowej jest najwyższa,
- uzyskany rozkład czułości przekształcenia tomograficznego S mieścił w zakresie od 0 do 0,25 V/V.

10. Tomograficzna metoda kompensacji napięcia nierównoważenia hallotronu z użyciem połączeń elektrod grzebieniowych

10.1. Koncepcja metody

W ramach pracy zaproponowano drugą metodę kompensacji napięcia nierównoważenia sygnału wyjściowego z cienkowarstwowego sensora hallotronowego, nie wymagającą korekty struktury sensora. Metoda ta, zwana dalej metodą komutacyjną, polega na wyborze kombinacji elektrod wykorzystywanych do pomiaru sygnału wyjściowego z hallotronu[146]. Do implementacji metody użyto opracowany hallotron z elektrodami grzebieniowymi oraz tomograf rezystancyjny. Omawiany układ hallotronu przedstawiono na rysunku 7.3 w rozdziale 7.

Podczas przepływu prądu w hallotronie powstaje rozkład potencjału uzależniony od kształtu sensora oraz występujących w nim nieciągłości. Dlatego można zmodyfikować miejsce pomiaru sygnału wyjściowego hallotronu tak, aby odbywał się na obszarach struktury o zbliżonym potencjale elektrycznym. W tym celu, w odniesieniu do hallotronu o zaproponowanym układzie elektrod, można wybroru wybrać taką kombinację połączenia elektrod pomiarowych, przy której mierzona różnica potencjałów jest najmniejsza (przy braku zewnętrznego pola magnetycznego).

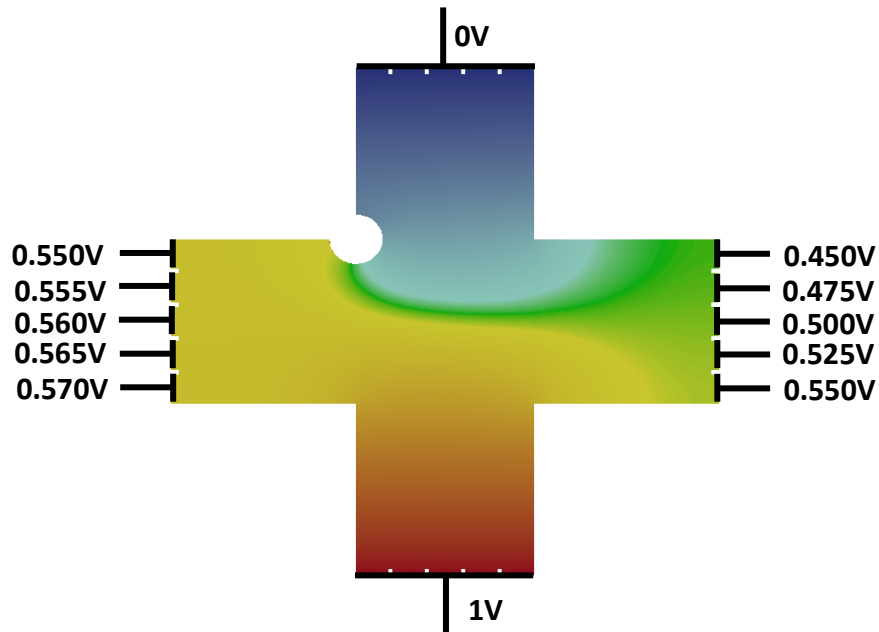
Zaproponowane w pracy rozwiązanie zostało praktycznie zweryfikowane na eksperymentalnej linii produkcyjnej w Instytucie Technologii Materiałów Elektronowych ITME w trakcie produkcji hallotronów grafenowych dla firmy LUMEL SA, wytwarzanych na potrzeby przekładników prądowych w ramach projektu GRAFMAG.

10.2. Metodyka kompensacji napięcia nierównoważenia przy wykorzystaniu metody komutacyjnej

W celu realizacji omawianej metody minimalizacji napięcia nierównoważenia zaproponowano procedurę obejmującą:

- 1) tomograficzne wyznaczenie rozkładu potencjału na elektrodach grzebieniowych dla wady równoważnej (zgodnie z algorytmem podanym w rozdziale 9.1),
- 2) dobór połączeń elektrod pomiarowych, dla których różnica potencjałów jest minimalna,
- 3) wykonanie połączeń elektrod.

Przykładowy rozkład potencjału na kontaktach grzebieniowych hallotronu wyznaczony na podstawie przekształcenia prostego z uwzględnieniem wady równoważnej w kształcie koła podano na rysunku 10.1



Rys. 10.1. Rozkład potencjału na kontaktach grzebieniowych hallotronu: wada równoważna w kształcie koła o średnicy 20 μm

Ze względu na brak wiedzy o rzeczywistym rozkładzie nieciągłości struktury hallotronu, kombinację połączeń elektrod można wyznaczyć na podstawie przekształcenia tomograficznego. Skutecznym rozwiązaniem zagadnienia jest obliczenie wartości napięcia niezrównoważenia dla wszystkich możliwych kombinacji połączeń elektrod oraz wybór połączenia o jego najmniejszej wartości. Wyznaczenie średniego potencjału V wybranej grupy n kontaktów jest możliwe za pomocą przybliżonej zależności:

$$V = \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{n} \quad (10.1)$$

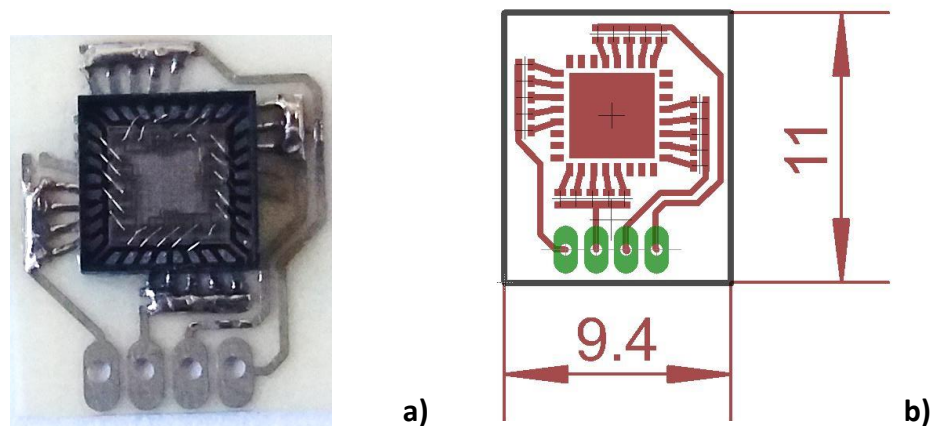
gdzie: V_i – potencjał i -tego kontaktu, n – liczba kontaktów.

W zastosowaniu praktycznym minimalizacja napięcia niezrównoważenia sprowadza się do wyboru kombinacji połączeń kontaktów, przy której różnica potencjałów na kontaktach pomiarowych mieści się w wymaganych granicach tolerancji:

$$|V_L - V_P| < U_{lim} \quad (10.2)$$

gdzie: V_L - potencjał kombinacji połączeń lewej grupy kontaktów pomiarowych, V_P - potencjał kombinacji połączeń prawej grupy kontaktów pomiarowych, U_{lim} - tolerancja napięcia niezrównoważenia.

Wykonywanie połączeń między kontaktami elektrod grzebieniowych hallotronu powinno się odbywać w procesie montażu drutowego (ang. bonding). Na potrzeby pracy zwarcie poszczególnych elektrod wybranego zestawu połączeń zostały wykonane na specjalnej podstawie przez zlutowanie wybranych ścieżek, co przedstawiono na rysunku 10.2.



Rys. 10.2. Wykonanie połączenia wybranych kontaktów grzebieniowych przez lutowanie na specjalnie wykonanej podstawie: a) hallotron na podstawie, b) podstawa.

10.3. Weryfikacja zaproponowanej metody

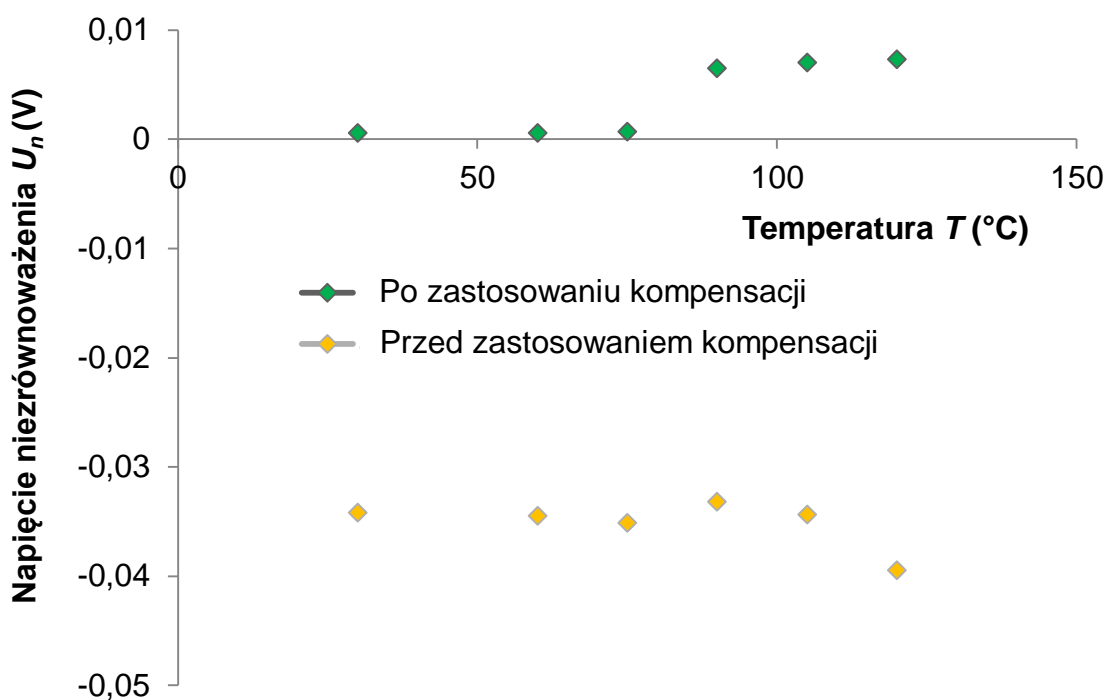
W celu weryfikacji zaproponowanej metody przeprowadzono kompensację napięcia niezrównoważenia na zestawie grafenowych czujników hallotronowych. Zestaw eksperymentalny zawierał 7 hallotronów wykonanych z grafenu dwuwarstwowego na podłożu z węgliku krzemu (SiC). Po optymalizacji połączeń uzyskano znaczącą redukcję

napięcia resztkowego. W większości przypadków zredukowano go do mniej niż 10% od wartości początkowej. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 10.1.

Tabela 10.1. Wyniki weryfikacji opracowanej metody kompensacji napięcia niezrównoważenia przez zastosowanie elektrod grzebieniowych

Nr sensora	Napięcie niezrównoważenia przed korekcją U_{n1} (mV)	Napięcie niezrównoważenia po korekcji U_{n2} (mV)	Redukcja napięcia (%)
1	25	0,7	97
2	37	0,6	84
3	580	188	68
4	94	9,6	90
5	78	28	64
6	69	0,7	99
7	88	5,8	93

Dodatkowo, w celu weryfikacji skuteczności metody komutacyjnej, przeprowadzono badania wpływu temperatury na napięcie niezrównoważenia wybranych hallotronów. Eksperyment wykonano przed oraz po zwarcu połączeń grzebieniowych. Uzyskane podczas badań temperaturowych wyniki przedstawiono na rysunku 10.3.



Rys. 10.3. Zależność napięcia niezrównoważenia od temperatury przy zastosowaniu metody kompensacji napięcia niezrównoważenia za pomocą elektrod grzebieniowych. Próbka nr 2

Uzyskane wyniki potwierdzają, że po kompensacji napięcia niezrównoważenia za pomocą zaproponowanej metody, napięcie niezrównoważenia zostaje zredukowane w szerokim zakresie temperatur. Dodatkowo, z zastosowaniem zaproponowanej metody, jest możliwe przeprowadzenie kompensacji napięcia niezrównoważenia bez ingerencji w strukturę czujnika, nawet po inkapsulacji sensora w obudowie.

Wyniki przedstawione w tabelach 9.1 i 10.1 dowodzą tezy niniejszej rozprawy dokorskiej: „Korekcja z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej umożliwia obniżenie napięcia niezrównoważenia sygnału pomiarowego z hallotronów cienkowarstwowych”.

11. Wytyczne do przemysłowego zastosowania metod kompensacji napięcia niezrównoważenia

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano wytyczne do zastosowania opracowanych metod kompensacji napięcia niezrównoważenia w hallotronach w warunkach przemysłowych.

Określono następujące wytyczne technologiczne:

- Zastosowanie metod jest szczególnie wskazane przy produkcji hallotronów cienkowarstwowych, w tym wykonanych z materiałów dwuwymiarowych np. grafenu.
- Wdrożenie metod jest uzasadnione w przypadku produkcji jednostkowej i małoseryjnej, gdzie cena pojedynczego czujnika jest względnie wysoka oraz wymagany jest wysoki uzysk produkcyjny.
- Z założenia zaproponowane metody kompensacji są metodami korekcji zgrubnej i stanowią dobre przygotowanie struktury hallotronowej do zastosowania dynamicznej metody kompensacji oraz jej uzupełnienie.
- Zaproponowane metody kompensacji nie pogarszają właściwości temperaturowych hallotyonu ze względu na brak wprowadzenia dodatkowych materiałów.
- W celu minimalizacji niezbędnego wyposażenia, jako alternatywę do kompensacji przez korekcję, można zastosować kompensację przez komutację.

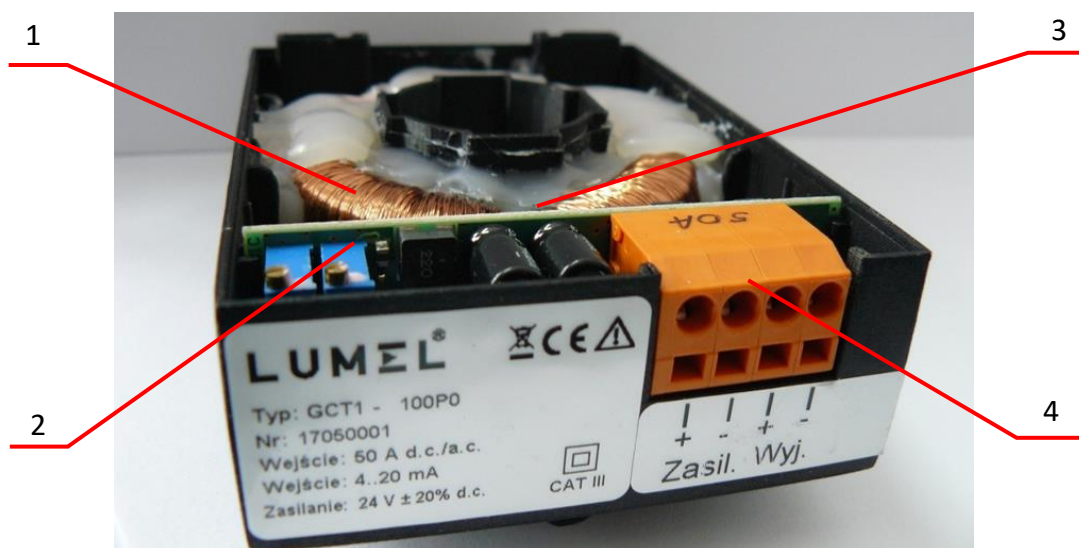
Określono także następujące graniczenia opracowanych rozwiązań:

- Zastosowanie opracowanych metod kompensacji wymaga zastosowania zmodyfikowanej struktury czujnika, w którym kontakty elektryczne są zwielokrotnione.
- Stosowanie metod jest ograniczone przede wszystkim do struktur hallotronowych, które posiadają pojedyncze nieciągłości warstwy sensora.
- Ze względu na rozdzielczość metod efektywna kompensacja napięć niezrównoważenia jest ograniczona do pojedynczych miliwoltów, co jest jednak wystarczające do zastosowań przemysłowych.

12. Zastosowanie kompensacji w hallotronie do przekładnika prądu stałego

Część pracy realizowano w ramach grantu GRAF-TECH/NCBR/12/14/2013, w którym jednym z rezultatów jest wdrożenie przekładnika prądu stałego wykorzystującego hallotron grafenowy. Przekładnik do pomiaru prądu stałego z takim hallotrohem, przedstawiony na rysunku 12.1, został wdrożony w firmie LUMEL SA. Opracowane w ramach pracy nowe metody kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego z hallotronów umożliwiły wdrożenie sensorów hallotronowych w przekładniku prądu stałego, ponieważ przy realizacji przekładnika w układzie kompensacyjnym (ang. Closed loop current sensor) niezwykle istotne jest zastosowanie hallotronu z jak najmniejszym napięciem niezrównoważenia.

Korzyści płynące ze stosowania przekładników prądu stałego wykorzystujących hallotrony to: bezinwazyjny pomiar prądów stałych (bez potrzeby przerywania obwodu pomiarowego), izolacja galwaniczna pomiędzy obwodem wejściowym i wyjściowym, niewielkie gabaryty i masa, duża przeciążalność prądowa, zestandaryzowane sygnały wyjściowe.



Rys. 12.1. Model przekładnika prądowego Lumel GTC1-100P0 z hallotrohem grafenowym [147] : 1) koncentrator magnetyczny z uzwojeniem wtórnym, 2) elektroniczny układ przetwarzający, 3) hallotron grafenowy umieszczony w szczelinie koncentratora, 4) złącze

13. Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy opracowano dwie metody kompensacji napięcia niezrównoważenia hallotronów cienkowarstwowych z użyciem tomografii rezystancyjnej. Pierwsza z nich polega na tomograficznym wyznaczeniu wady równoważnej, będącej okręgiem i wykonaniu symetrycznej korekty struktury. Druga metoda umożliwia kompensację napięcia niezrównoważenia przez dobór odpowiedniej konfiguracji połączeń grzebieniowych kontaktów elektrycznych.

W celu zaimplementowania zaproponowanych przez autora metod kompensacji bazujących na tomografii rezystancyjnej opracowano nowy układ hallotyonu o odpowiednio dobranej geometrii czujnika i ze zmodyfikowanym układem kontaktów elektrycznych w postaci grzebieni. Opracowane modele hallotronów umieszczono w przemysłowych obudowach QFN32.

Opracowano nowatorskie stanowisko do tomografii rezystancyjnej hallotronów – tomograf rezystancyjny. Stanowisko umożliwia badanie w trybie automatycznym miniaturowych struktur hallotronowych z wyprowadzeniami grzebieniowymi.

Opracowano algorytmy, które realizują zaproponowane przekształcenie proste i odwrotne do wyznaczenia wady równoważnej i obszaru korekcyjnego. Do tego celu użyto otwartego oprogramowania ELMER FEM, Salome oraz Octave.

W ramach pracy przeprowadzono analizę wpływu kształtu struktur hallotronowych na ich parametry. Analizę przeprowadzono na podstawie symulacji numerycznych wykonanych przy użyciu metody elementów skończonych. Otrzymane wyniki analizy wykazały możliwość modyfikacji kształtów struktur hallotronowych, przy których rozkład ciepła wydzielanego na powierzchni hallotyonu jest względnie jednorodny, a zjawisko występowania lokalnych obszarów nagrzewania jest ograniczone. Jest to szczególnie ważne w odniesieniu do stabilności napięcia niezrównoważenia hallotyonu, na którą znaczący wpływ ma erozja termiczna struktury hallotronowej.

Przeprowadzono walidację opracowanych metod wykorzystując wzorce numeryczne (w przypadku metody z korekcją kształtu struktury) oraz hallotrony grafenowe (dla metody wykorzystującej dobór odpowiedniej konfiguracji połączeń grzebieniowych). Uzyskano redukcję napięcia niezrównoważenia w zakresie od 50% do 99%. Potwierdzono także kilkukrotne zmniejszenie dryfu temperaturowego sygnału wyjściowego na przykładzie grafenowych czujników Halla. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano

wytyczne do zastosowania opracowanych metod kompensacji napięcia niezrównoważenia w hallotronach w warunkach przemysłowych. Zaproponowane rozwiązania otworzyły możliwość praktycznego wdrożenia hallotronów grafenowych opracowanych w ITME do produkcji przekładników prądowych oferowanych przez firmę LUMEL S.A.



Rys. 13.1. Zestaw hallotronów grafenowych opracowanych w ITME w ramach projektu GRAF-TECH/NCBR/12/14/2013

Opracowane przez autora metody umożliwiają kompensację napięcia niezrównoważenia cienkowarstwowych struktur hallotronowych. W efekcie kompensacji istotnemu ograniczeniu ulegnie dryf temperaturowy sygnału wyjściowego czujników Halla oraz zmniejszy się liczba elementów odrzucanych na etapie produkcji. Zaproponowane metody kompensacji napięcia niezrównoważenia znajdą zastosowanie jako metody niezależne oraz uzupełniające do kompensacji dynamicznej w przypadku występowania napięcia niezrównoważenia o znacznych wartościach. Przydatność metody potwierdzono w odniesieniu do polskich hallotronów grafenowych (rysunek 13.1), co umożliwiło ich implementację w przekładniku prądu stałego.

14. Kierunki dalszych prac

Praca w przyszłości może być kontynuowana w zakresie rozbudowy o tradycyjne przekształcenie tomograficzne w celu określenia rozkładu rezystywności materiału. Ważnym kierunkiem przyszłych prac jest również optymalizacja kształtu obszarów korekcyjnych pod kątem większej redukcji napięcia niezrównoważenia oraz kształtowania charakterystyk i parametrów hallotronów. Planowana jest implementacja stanowiska do automatycznej korekcji laserowej oraz weryfikacja doświadczalna metod dla hallotronów cienkwarstwowych i grubowarstwowych.

15. Bibliografia

1. “DRV5033 Digital-Omnipolar-Switch Hall Effect Sensor”, [<http://www.ti.com/product/DRV5033/datasheet/abstract#SLIS1505692>].
2. J. Kim, S. Choi, K. Cho and K. Nam "Position Estimation Using Linear Hall Sensors for Permanent Magnet Linear Motor Systems" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 12, (2016), 7644-7652.
3. M. Motz, D. Draxelmayr, T. Werth and E. Katzmaier "A programmable Hall sensor for camshaft applications" *Proceedings of IEEE Sensors*, vol.3, (2004), 1438-1441.
4. “RMB29AC01SS1 – Analogue sine/cosine encoder” [<https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FData-sheet-RMB29AC01SS1-Analogue-sine-cosine-encoder.pdf>].
5. „Magnetic Proximity Sensors (Hall Effect). MP1005-MP1007 Sensors” [<http://switches-sensors.zf.com/us/wp-content/uploads/sites/7/2015/01/Magnetic-Proximity-Sensor-MP1005-MP1007.pdf>].
6. R. Dixon „Magnetic Sensors Market Tracker” [<https://technology.ihs.com/api/binary/527049?attachment=true>].
7. V. Mosser, A. Kerlain, Y. Haddab, R. Morton and M.J. Brophy, "Ensuring high yield and good reliability for mass-produced high-performance Hall effect sensors” *2006 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology*, (2006).
8. “Magnetic Field Sensors Market by Type, Technology, Applications, and Geography—Forecasts & Analysis to 2013–2020”, *Markets and Markets Report*, (2014).
9. O. Petruk, T. Ciuk at al. “Sensitivity and offset voltage testing in the hall-effect sensors made of graphene”, *Recent Advances in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, vol. 267, (2014), 631–640.
10. M. Alafogianni, · R. Penlington, · M, Birkett „Resistor trimming geometry; past, present and future”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK*, 104 (2016), 012002.
11. E. Hall „On a New Action of the Magnet on Electric Currents”, *American Journal of Mathematics*, 2(3), (1879), 287-292.
12. H. A. Lorentz “Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern”, *Collected Papers. Springer, Dordrecht*, (1895).

13. J. A. Blackburn „Modern Instrumentation for Scientists and Engineers”, *Springer Science & Business Media*, (2001).
14. S. Tumanski „Handbook of Magnetic Measurements”, *CRC Press*, (2011).
15. G. Meijer „Smart Sensor Systems”, *John Wiley & Sons*, (2008).
16. M. A. Paun, J. M. Sallese and M. Kayal "Hall effect sensors performance investigation using three-dimensional simulations" *Proceedings of the 18th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2011*, (2011), 450-455.
17. N. Jankovic, S. Aleksic, D. Pantic “Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices”; *Proceedings of the Small Systems Simulation Symposium 2012*; Nis, (2012).
18. U. Ausserlechner, „ A method to compute the Hall-geometry factor at weak magnetic field in closed analytical form”, *Electrical Engineering*, 98, (2016), 189–206.
19. “HW-322B ” [<https://www.akm.com/akm/en/file/datasheet/HW-322B.pdf>]
20. M. Demierre, S. Pesenti, J. Frounchi, P. A. Besse, R. S. Popovic, “Reference magnetic actuator for self-calibration of a very small Hall sensor array”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 97–98, (2002), 39-46.
21. R. S. Popović, “Hall-effect devices”, *CRC Press*, 2003.
22. M. A. Paun, J. M. Sallese and M. Kayal, “Geometry influence on the Hall effect devices performance”, *UPB Scientific Bulletin, Series A: Applied Mathematics and Physics*, 72(4), (2010), 257-271.
23. M. A. Paun, J. M. Sallese and M. Kayal, “Comparative study on the performance of five different Hall effect devices”. *Sensors*, 13(2), (2013), 2093-2112.
24. M. Crescentini, M. Biondi, A. Romani, M. Tartagni, E. Sangiorgi, „Optimum Design Rules for CMOS Hall Sensors”, *Sensors*, 17(4), (2017), 765.
25. Z. Kruszewski, „Technologia kontaktów w Hallotronach”, *Przegląd elektroniki*, 3, (1962).
26. J. Przybytek, V. Mosser, Y. Haddab "LF noise in cross Hall effect devices: geometrical study" *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, (2003).
27. D. Zhang, M. Wang and K. Sun, "Low Frequency Noise Characterization and Signal-to-Noise Ratio Optimization for Silicon Hall Cross Sensors," *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 3(4), (2015), 365 - 370.
28. U. Ausserlechner , "Limits of offset cancellation by the principle of spinning current Hall probe," *Proceedings of IEEE Sensors, 2004*, 3, (2004), 1117-1120.
29. A. Kobus, J. Tuszyński „Hallotrony i gaussotrony”, *WNT*, 1966.

30. "Hall effect wafer of n-doped germanium with potentiometer for zero calibration; Unilab 091 603/4", [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hall_effect_wafer_n-doped_germanium.jpg].
31. A. Kobus, J. Tuszyński, Z. L. Warsza „Technika Hallotronowa”, *WNT*, 1980.
32. T. Janicki, A. Kobus, „Hall generator with variable active-layer thickness”, *Electronics Letters*, 3(8), (1967), 373.
33. W. Gariat, J. Rauluszkiewicz, „Hallotrony”, *PWN*, 1961.
34. J. Jankowski, S. El-Ahmar, M. Oszwaldowski, “Hall Sensors for Extreme Temperatures”, *Sensors*, 11(1), (2011), 876-885.
35. D. M. Mattox, “Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing”, *William Andrew*, 2010.
36. M. A. Herman, W. Richter, H. Sitter, „Epitaxy. Physical Principles and Technical Implementation”, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2004.
37. E. Ramsden, “Hall-Effect Sensors: Theory and Application”, *Elsevier*, 2011.
38. Wai-Kai Chen, „The VLSI Handbook”, *CRC Press*, 2016.
39. “ASAHI Hall Elements 2015-16”. [<https://www.akm.com/file.jsp?id=192871>].
40. R. S. Popovic, "The vertical hall-effect device", *IEEE Electron Device Letters*, 5(9), (1984), 357 - 358.
41. L. Sileo, M.T.Todaro, V.Tasco, M.De Vittorio, A.Passaseo “Fully integrated three-axis Hall magnetic sensor based on micromachined structures”, *Microelectronic Engineering*, 87(5–8), (2010), 1217-1219.
42. F. Burger, P. A. Besse, R. S. Popovic, “New fully integrated 3-D silicon Hall sensor for precise angular-position measurements”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 67(1–3), (1998), 72-76.
43. J. Pimbley „Advanced CMOS Process Technology”, *Academic Press*, 1989.
44. “TLV493D-A1B6 3D Magnetic Sensor”, [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLV493D-A1B6-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462525dbac40152a6b85c760e80].
45. “A1266 Micropower Ultrasensitive 3D Hall-Effect Switch”, [<https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A1266-Datasheet.ashx?la=en&hash=4F932C5894F89182825F7B957B0E1D4AD4FD0DB4>].
46. M. C. Musardo, T. Corwin, D. Harder, P. He, A. Kitegi, W. Licciardi, G. Rakowsky, T. Tanabe, “3d hall probe calibration system at insertion device magnetic measurement facility at BNL”, *Proceedings of PAC2013*, (2013), 1169-1171.

47. "HE444 Ultra Stable 3D Hall Sensor", [<http://www.asensor.eu/productdata/Datasheet-HE444X.pdf>].
48. Ch. Schott, J.-M Waser, R.S Popovic "Single-chip 3-D silicon Hall sensor", *Sensors and Actuators A: Physical*, 82(10), (2000), 167-173.
49. Senis AG, "Hall Probe C for F3A Magnetic Field Transducers", [<http://c1940652.r52.cf0.rackcdn.com/57961d4eb8d39a2071000b70/hall-probe-c-for-f3a-mft-datasheet.pdf>].
50. P. Kejik, E. Schurig, F. Bergsma and R. S. Popovic, "First fully CMOS-integrated 3D Hall probe," *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05*, 1, (2005), 317-320.
51. A. Kobus „Analiza asymetrii wtórnej w hallotronach germanowych”, *Archiwum Elektrotechniki*, 14, (1965), 149.
52. A. A. Bellekom, „Origins of offset in conventional and spinning-current Hall plates”, rozprawa doktorska, *Dept. Elect. Eng., Delft Univ. of Technology, Delft, Netherlands*, 1998.
53. A. Kobus, J. Tuszyński, Z. Warsza “Technika hallotronowa”, *WNT*, (1980).
54. “HONEYWELL 91SS12-2”, [https://static3.tme.eu//products_pics/e/e/c/eec2e51556a916b9ebdb7e8ba2cc7441/481132.jpg].
55. C. Wood, O. Tischler, and G. F. Schroeder “Reduction of Misalignment Voltage in Hall Crystals”, *Review of Scientific Instruments*, 32, (1961), 209.
56. R. Bate, et al. „Hall effect generator”, Patent: US 4141026 A, (1979).
57. A. Bilotti, G. Monreal and R. Vig, "Monolithic magnetic Hall sensor using dynamic quadrature offset cancellation" *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 32(6), (1997), 829-836.
58. V. Mosser, N. Matringe and Y. Haddab, "A Spinning Current Circuit for Hall Measurements Down to the Nanotesla Range," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(4), (2017), 637-650.
59. S. Bellekom, „CMOS versus bipolar Hall plates regarding offset correction”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 76(1–3), (1999), 178-182.
60. U. Ausserlechner, “Hall Effect Devices with Three Terminals: Their Magnetic Sensitivity and Offset Cancellation Scheme”, *Journal of Sensors*, 2016, (2016), 5625607

61. „EQ-950L. Programmable Linear Hall ICs with Fast Response”, [https://www.akm.com/akm/en/product/datasheet1/?partno=EQ-950L].
62. „TLE4997. Programmable Linear Hall Sensor”, [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE4997E2-DS-v02_09-EN.pdf?fileId=db3a30431ce5fb52011d3e4c832a2594].
63. „Allegro 1391 Hall Effect Sensor”, [http://vintagetardown.com/die-photo/allegro-1391-hall-effect-sensor]
64. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov „Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films”, *Science*, 306(5696), (2004), 666-669.
65. J. C. Slonczewski, P. R. Weiss, “Band Structure of Graphite,” *Physical Review*, 109(2), (1958), 272-279.
66. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov, “Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films” *Science*, 306(5696), (2004), 666-669.
67. Nobel Media AB 2018, „The Nobel Prize in Physics 2010”, NobelPrize.org.. Mon. 10 Dec 2018. [https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/].
68. D. G. Papageorgiou, I. A. Kinloch, R. J. Young, „Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites”, *Progress in Materials Science*, 90, (2017), 75-127.
69. E. Pop, V. Varshney, A. Roy, „Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications”, *MRS Bulletin*, 37(12), (2012), 1273-1281.
70. K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov, A. K. Geim, „Two-dimensional atomic crystals”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), (2005), 10451-10453.
71. S. V. Morozov, K. S. Novoselov, M. I. Katsnelson, F. Schedin, D. C. Elias, J. A. Jaszczak, and A. K. Geim, „Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer”, *Phys. Rev. Lett* vol. 100, (2008), 016602.
72. I. Shibusaki et al., "High sensitive thin film InAs Hall element by MBE (for magnetic sensors)," *TRANSDUCERS '91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers, San Francisco, CA, USA*, (1991), 1069-1072.
73. A. Mohades-Kassai and H. R. Soufi, "Design and fabrication of high accuracy GaAs Hall effect sensor grown by molecular beam epitaxy," *ICM 2000. Proceedings of the 12th International Conference on Microelectronics. (IEEE Cat. No.00EX453), Tehran, Iran*, (2000), 345-348.

74. T. Berus, M. Oszwaldowski, J. Grabowski, „High quality Hall sensors made of heavily doped n-InSb epitaxial films”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 116(1), (2004), 75-78.
75. C.-C. Tang, M.-Y. Li, L. J. Li, C. C. Chi, and J. C. Chen, “Characteristics of a sensitive micro-Hall probe fabricated on chemical vapor deposited graphene over the temperature range from liquid-helium to room temperature” *Appl. Phys. Lett.*, 99, (2011), 112107.
76. V. Panchal, K. Cedergren, R. Yakimova, A. Tzalenchuk, S. Kubatkin, and O. Kazakova, “Small epitaxial graphene devices for magnetosensing applications”, *J. Appl. Phys.*, 111, (2012), 07E509.
77. H. Xu, L. Huang, Z. Zhang, B. Chen, H. Zhong, and L.-M. Peng, “Flicker noise and magnetic resolution of graphene hall sensors at low frequency”, *Appl. Phys. Lett.*, 103, (2013), 112405.
78. R. K. Rajkumar, A. Asenjo, V. Panchal, A. Manzin, O. Iglesias-Freire, and O. Kazakova “Magnetic scanning gate microscopy of graphene Hall devices”, *J. Appl. Phys.*, 115, (2014), 172606.
79. J. Dauber, A. A. Sagade, M. Oellers, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Neumaier, and Ch. Stampfer “Ultra-sensitive Hall sensors based on graphene encapsulated in hexagonal boron nitride”, *Appl. Phys. Lett.*, 106, (2015), 193501.
80. T. Ciuk, W. Strupinski, „Statistics of epitaxial graphene for Hall effect sensors”, *Carbon*, 93, (2015), 1042-1049.
81. W. Norimatsu, M. Kusunoki, „Growth of graphene from SiC{0001} surfaces and its mechanisms”, *Semicond. Sci. Technol.*, 29, (2014), 064009.
82. L. Kiyeol, Y. Jongpil, „Significantly improved thickness uniformity of graphene monolayers grown by chemical vapor deposition by texture and morphology control of the copper foil substrate”, *Carbon*, 100, (2016), 441-449.
83. H. A. Alsalman, et al., „Synthesis of large area AB stacked bilayer graphene by SiC epitaxy and transfer”, *Nano Futures*, 2(3), (2018).
84. T. Ciuk, S. Cakmakyapan, E. Ozbay, P. Caban, K. Grodecki, A. Krajewska, et al., „Step-edge-induced resistance anisotropy in quasi-free-standing bilayer chemical vapor deposition graphene on SiC”, *J. Appl. Phys.*, 116, (2014), 123708.
85. A. Merrell, F. Liu „Graphene processing using electron beam assisted metal deposition and masked chemical vapor deposition growth”, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 34, (2016), 041230.

86. W. T. Smolik „Rekonstrukcja obrazów w elektronicznej tomografii pojemnościowej”. *Zeszyt "Elektronika" nr 188, OWPW*, (2013).
87. R. Cierniak „X-Ray Computed Tomography in Biomedical Engineering”, *Springer Science & Business Media*, (2011).
88. J.W. Hennel, „Podstawy teoretyczne tomografii magnetyczno-rezonansowej”, *Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu*, (1999).
89. R. Bailey „Positron Emission Tomography: Basic Sciences”, *Springer Science & Business Media*, (2005).
90. K. Schabowicz, „Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(2), (2013), 295-303.
91. A. Milstein, S. Oh, K. Webb, C. Bouman, Q. Zhang, D. Boas, R. Millane „Fluorescence optical diffusion tomography” *Applied Optics*, 42(16), (2003), 3081-3094.
92. M. Soleimani, W. R. B. Lionheart, A. J. Peyton, Xiandong Ma and S. R. Hignson, "A three-dimensional inverse finite-element method applied to experimental eddy-current imaging data", *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(5), (2006), 1560-1567.
93. S. R. Aw, R. A. Rahim, M. H. F. Rahiman, F. R. M. Yunus, C. L. Goh, “A review of the application of conducting vessel walls”, *Powder Technology*, 254, (2014), 256-264.
94. D. Holder, „Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications”, *CRC Press*, (2004).
95. F. Wang, Q. Marashdeh, L. Fan, W. Warsito „Electrical capacitance volume tomography: design and applications”, *IEEE Sensors Journal*, 7(4), (2010), 525-535.
96. Y. Long, J. A. Fessler, J. M. Balter, "3D Forward and Back-Projection for X-Ray CT Using Separable Footprints", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 29(11), 2010, 1839-1850.
97. T. Kowaluk, A. Woźniak, “Accuracy of x-ray computed tomography for dimensional metrology with employment of a new threshold selection method”, *Journal of X-Ray Science and Technology*, 1(9), (2018), 1-9.
98. G. J. Gallo, E. T. Thostenson, „Spatial damage detection in electrically anisotropic fiber-reinforced composites using carbon nanotube networks”, *Composite Structures*, 141, (2016), 14-23.
99. P. Nowak, M. Nowicki, A. Juś, R. Szewczyk, “Utilization of Eddy Current Tomography in Automotive Industry”, *Acta Physica Polonica A*, 131, (2017), 1168-1170.

- 100.** S. R. Arridge, M. Schweiger, "A gradient-based optimisation scheme for optical tomography", *Opt. Express*, 2, (1998), 213-226.
- 101.** P. Nowak, et al. "Discrete inverse transformation for eddy current tomography", *Acta Physica Polonica A*, 133(3), (2018), 701-703.
- 102.** Y. Ma, H. Wang, L. Xu, C. Jiang, "Simulation study of the electrode array used in an ERT system", *Chemical Engineering Science*, 52(13), (1997), 2197-2203.
- 103.** T. E. Dyhoum, D. Lesnic, R. G. Aykroyd. "Solving the complete-electrode direct model of ERT using the boundary element method and the method of fundamental solutions." *Electronic Journal of Boundary Elements*, 12(3), (2014).
- 104.** M. Soleimani, W. R. B. Lionheart, A. J. Peyton, "Image Reconstruction for High-Contrast Conductivity Imaging in Mutual Induction Tomography for Industrial Applications", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(5), (2007), 2024-2032.
- 105.** M. Nowicki, R. Szewczyk, "Modelling of the magnetovision image with the finite element method." *PROCEEDINGS of the 20th International conference on Applied Physics Of Condensed Matter (APCOM2014)*, (2014).
- 106.** P. Nowak, "Validation of finite element method solver for utilization in eddy current tomography", *Advanced Mechatronics Solutions*, (2016), 173-179.
- 107.** P. Ponomarev, et al. "Multi-slice 2.5 D modelling and validation of skewed electrical machines using open-source tools". *Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2016 IEEE Conference*, (2016), 1.
- 108.** J. Szalatkiewicz, R. Szewczyk, M. Kalinowski, J. Kataja, P. Råback, J. Ruokolainen, M. Kachniarz, "Open source ELMER software based FEM modeling of waveguides and resonant cavities for microwave heating and drying devices", *Archives of Electrical Engineering*, 66(4), (2017), 745-750.
- 109.** J. E. Choi, M. Takei, D.H. Doh, "Fabrication of microchannel with 60 electrodes and resistance measurement", *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3), (2010), 178-183.
- 110.** C. Schlumberger, "Etude sur la prospection électrique du sous-sol", Gauthier-Villars, (1920).
- 111.** G. Keller, F. Frischknecht, „Electrical Methods in Geophysical Prospecting”, *Pergamon Press, Oxford*, (1966).

112. Y. Sasaki, „Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data”, *Geophysics*, 54, (1989), 254-262.
113. Y. Sasaki, „3D resistivity inversion using the finite element method”, *Geophysics*, 59, (1994), 1839-1848.
114. N. Hounsfield „Computerized transverse axial scanning (tomography): I. Description of system”, *The British journal of radiology*, 46, (1973), 1016-1022.
115. R. J. Lytle, K. A. Dines „An impedance camera: A system for determining the spatial variation of electrical conductivity”, *Lawrence Livermore National Laboratory UCRL*, 52413, (1978).
116. A. Wexler, B. Fry, M. Neuman “Impedance-computed tomography algorithm and system”, *Applied optics*, 24(23), (1986), 3985.
117. A. Ramirez, et al. „Monitoring an underground steam injection process using electrical resistance tomography”, *Water Resources Research*, 29, (1993), 73–87.
118. “Badania elektrooporowe”, [<http://geospectrum.pl/pl/zastosowania/gornictwo-i-geologia/>].
119. W. Daily at al. “Electrical Resistance Tomography—Theory and Practice”, *Soc. Exploration Geophysics: Near Surface Geophysics (Investigations in Geophysics No. 13)*, (2005), 525-550.
120. „Electrical Resistivity Tomography (ERT)”, [<http://apexgeoservices.ie/ert/>].
121. A. Dupre, G. Ricciardi, S. Bourennane, S. Mylvaganam “Identification of flow regimes using raw EIT measurements”, *WCIPT8 - 8th World congress on industrial process tomography*, (2016).
122. A. Samore “Algorithms and Numerical Methods for Electrical Brain Imaging”, *Dissertation thesis, Alma Mater Studiorum Università di Bologna*, 2017.
123. A. Cultrera , L. Callegaro "Electrical Resistance Tomography on thin films: Sharp conductive profiles", *2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), Turin*, (2015), 297-301.
124. K.J. Loh at al. “Carbon Nanotube Sensing Skins for Spatial Strain and Impact Damage Identification”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 28(1), (2009), 9-25.
125. A. Adler, W. Lionheart “Uses and abuses of EIDORS: an extensible software base for EIT”, *Physiological Measurement*, 27(5), (2006), 25-42.
126. J. Sun, J. Kosel “Finite-Element Modelling and Analysis of Hall Effect and Extraordinary Magnetoresistance Effect”, *Finite Element Analysis - New Trends and Developments*, (2012), 201–224.

127. A. S. Holland, G. K. Reeves, M. Bhaskaran and S. Sriram, "Analytical and Finite-Element Modeling of a Cross Kelvin Resistor Test Structure for Low Specific Contact Resistivity," *IEEE Transactions on Electron Devices*, 56(10), (2009), 2250-2254.
128. "SALOME: An Open-source Simulation Platform Integrating ParaView". The Kitware Blog. 2016-04-28. Retrieved 2017-12-22.
129. J. Schöberl, "NETGEN - An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules", *Computing and Visualization in Science*, 1(1), (1997), 41-52.
130. „Elmer – Finite Element Solver for Multiphysical Problems.” [<http://www.csc.fi/elmer>].
131. A. Henderson, ParaView Guide, „A Parallel Visualization Application”, Kitware Inc., 2007.
132. O. Petruk et al. “Implementation of Conductance Tomography in Detection of the Hall Sensors Inhomogeneity”, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 131, (2017), 1186.
133. G. Kalita, L. Qi, Y. Namba, K. Wakita, M. Umeno, „Femtosecond laser induced micropatterning of graphene film”, *Materials Letters*, 65(11), (2011), 1569-1572.
134. O. Petruk, et al. „Sensitivity and offset voltage testing in the hall-effect sensors made of graphene”, *Recent Advances in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, (2014), 631-640.
135. T. Ciuk, O. Petruk et al. “Low-noise epitaxial graphene on SiC Hall effect element for commercial Applications”, *Appl. Phys. Lett.*, 108, (2016), 223504.
136. O. Petruk, et al. "Application of graphene and newly developed amorphous alloys in current transformers for railway applications" *Czasopismo Techniczne*, 1(2), (2016), 131-137.
137. A. Kozłowska, G. Gawlik, R. Szewczyk, A. Piatkowska, and A. Krajewska, "Infrared Thermal Emission from Joule-Heated Graphene with Defects," *Asia Communications and Photonics Conference 2014, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2014)*, (2014), ATh4B.2.
138. B. Delaunay, "Sur la sphère vide". *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Classe des sciences mathématiques et naturelles*, 6, (1934), 793–800.
139. M. Kachniarz, O. Petruk, R. Szewczyk, "Methodology of Reduction of the Offset Voltage in Hall-Effect Sensors", *Proceedings of Challenges in Automation Robotics and Measurement Techniques*, (2016), 763-770.

- 140.** J. W. Eaton, D. Bateman, S. Hauberg, R. Wehbring (2017). GNU Octave version 4.4.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations. [<https://www.gnu.org/software/octave/doc/v4.4.1/>].
- 141.** C. Audet, M. Kokkolaras “Blackbox and derivative-free optimization: theory, algorithms and applications”, *Optimization and Engineering*, 17(1), (2016), 1.
- 142.** A. R. Conn, K. Scheinberg, L. N. Vicente “Introduction to Derivative-Free Optimization”, *MOS-SIAM Series on Optimization*, (2009).
- 143.** J. Nelder, R. Mead "A simplex method for function minimization", *Computer Journal*, 7, (1965), 308–313 .
- 144.** P. Zegarmistrz “Numeryczne algorytmy tomografii rezystancji siatek rezystorów”, *Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie*, (2013).
- 145.** G. A. Oldenborger, P. S. Routh, M. D. Knoll; „Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors”, *Geophysical Journal International*, 163(1), (2005), 1–9.
- 146.** O. Petruk, T. Ciuk, R. Szewczyk i inni: „Hallowron z kompensacją offsetu”, zgłoszenie patentowe P.414129 w dniu 2015-09-24.
- 147.** „Lumel. Przetwornik prądu stałego i przemiennego. [<https://www.lumel.com.pl/katalog/produkt/przetwornik-pradu-stalego-i-przemienne-t23ct>].