

D1. BADANIE HISTEREZY FERROELEKTRYCZNEJ

tekst opracowała: Bożena Janowska-Dmoch; uzupełnienia: Marek Pękała

Ferroelektryki należą do dielektryków, czyli substancji o bardzo małym lub zerowym przewodnictwie elektrycznym. Dielektryki umieszczone w zewnętrznym polu elektrycznym polaryzują się. To znaczy, że dipole elektryczne zostają uporządkowane, a na powierzchni prostopadłej do linii sił pola pojawia się ładunek elektryczny. Gęstość powierzchniowa tego ładunku jest miarą polaryzacji P dielektryka, przy czym $P = |\vec{P}| = \sigma = \frac{q}{S}$. Polaryzacja danej substancji jest równa średniemu momentowi dipolowemu jednostki objętości tej substancji.

Wyróżniamy następujące rodzaje polaryzacji:

- elektronową,
- jonową,
- orientacyjną.

Polaryzacja elektronowa występuje w atomach lub jonach wtedy, gdy środek ciężkości chmury elektronowej przemieszcza się względem jądra pod wpływem pola elektrycznego.

W **polaryzacji jonowej** pole elektryczne powoduje przesunięcia względem siebie jonów dodatnich i ujemnych danej substancji.

Polaryzacja orientacyjna powstaje w dielektrykach, których molekuly mają trwałe momenty dipolowe. Przy braku pola momenty dipolowe wskutek drgań termicznych są zorientowane w sposób przypadkowy, a więc wypadkowy moment dipolowy próbki jest równy zero. Po przyłożeniu pola elektrycznego próbka uzyskuje moment dipolowy równoległy do kierunku pola. Całkowita polaryzacja dielektryka jest sumą polaryzacji elektronowej, jonowej i orientacyjnej.

Niektóre kryształy posiadają wypadkowy moment dipolowy różny od zera nawet przy braku zewnętrznego pola elektrycznego. Nazywamy je **spolaryzowanymi spontanicznie**. Należą do nich ferroelektryki, czyli substancje, które wykazują polaryzację spontaniczną, **ale tylko w pewnym przedziale temperatur**. Temperaturę, w której zanika polaryzacja spontaniczna nazywamy temperaturą Curie i oznaczamy T_C . Powyżej temperatury T_C ruchy cieplne niszczą uporządkowanie dipoli. W ferroelektrykach występuje więc przejście fazowe od fazy uporządkowanej, czyli polarnej, do nieuporządkowanej, czyli niepolarnej, nazywanej również dielektryczną. Poniżej temperatury T_C w nieobecności zewnętrznego pola ferroelektryk dzieli się na obszary zwane **domenami**. Chociaż w pojedynczej domenie polaryzacja spontaniczna ma określony kierunek, to wypadkowy moment dipolowy kryształu wielodomenowego jest równy zero. Po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego do kryształu następuje przeorientowanie polaryzacji w domenach objawiające się pojawieniem wypadkowej polaryzacji próbki z tym, że **polaryzacja nie jest liniową funkcją natężenia pola**. W ferroelektrykach występuje zjawisko histerezy, tzn. polaryzacja P próbki wywołana przyłożonym polem elektrycznym E zależy od wartości polaryzacji, jaka poprzedzała dany stan, czyli od historii próbki.

W słabych polach polaryzacja zależy liniowo od natężenia pola elektrycznego, co widać na początkowym odcinku krzywej OA . Przy pewnym natężeniu pola (punkt A na rysunku) wszystkie domeny są zorientowane wzdłuż pola i kryształ staje się jednodomenowy. Stan ten nazywamy nasyceniem. Odpowiada mu **polaryzacja nasycenia P_{max}** . Fragment krzywej OA nazywa się krzywą pierwotną.

Przy dalszym zwiększaniu natężenia pola polaryzacja kryształu jednodomenowego tylko nieznacznie rośnie w wyniku polaryzacji indukowanej.

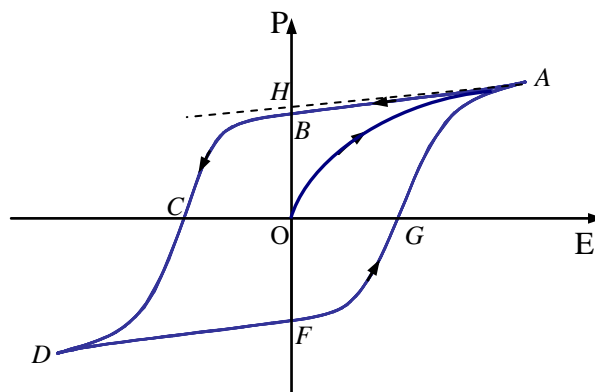
Gdy natężenie pola elektrycznego maleje, polaryzacja zmienia się po krzywej AB , leżącej powyżej OA . W zerowym polu polaryzacja próbki nie znika, lecz jest równa odcinkowi OB i nazywa się polaryzacją pozostałą lub resztkową. Po zmianie kierunku pola elektrycznego polaryzacja stopniowo maleje. Natężenie pola elektrycznego, przy którym polaryzacja próbki spada do zera (odcinek OC) nazywamy **połem koercji E_C** .

Gdy poprowadzimy styczną do krzywej w punkcie A , to punkt przecięcia stycznej z osią P wyznacza odcinek OH reprezentujący **polaryzację spontaniczną P_s** kryształu. Często polaryzacja resztkowa (OB) jest równa polaryzacji spontanicznej (OH).

Zwiększanie pola elektrycznego poza C doprowadza próbkę do stanu nasycenia D , ale z przeciwnym zwrotem polaryzacji niż w A .

Dalsze zmiany pola elektrycznego przeprowadzają próbkę ze stanu nasycenia D poprzez punkty F i G do próbki do stanu nasycenia A .

Ferroelektryki, ze względu na dużą przenikalność dielektryczną, stosuje się powszechnie do produkcji kondensatorów. Znalazły również zastosowanie w detektorach ciepła (ferroelektryki mają także własności piroelektryczne), a także w elektroakustycznych przetwornikach dźwięku (ferroelektryki mają także własności piezoelektryczne). W ostatnich latach powstały ferroelektryczne pamięci RAM (FRAM), w których wykorzystano trwałą polaryzację ferroelektryka i możliwość jej zmiany pod wpływem pola elektrycznego.



Pętla histerezy

Cel

Celem ćwiczenia jest zbadanie własności ferroelektrycznych kryształu siarczanu trójglicyny:

- zależności polaryzacji spontanicznej od temperatury,
- zależności pola koercji od temperatury,
- wyznaczenie temperatury Curie.

Wymagania

Dielektryki polarne i niepolarne, dielektryk w polu elektrycznym, wektor natężenia pola elektrycznego, wektor indukcji elektrycznej, wektor polaryzacji, przenikalność dielektryczna, pojemność elektryczna kondensatorów, rodzaje polaryzacji dielektryków. Własności ferroelektryków, struktura domenowa, temperatura Curie, ferroelektryczna pętla histerezy, ruchy domen, polaryzacja spontaniczna i pole koercji. Mostek pojemnościowy.

Literatura

Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz.III, Elektryczność i magnetyzm, PWN.

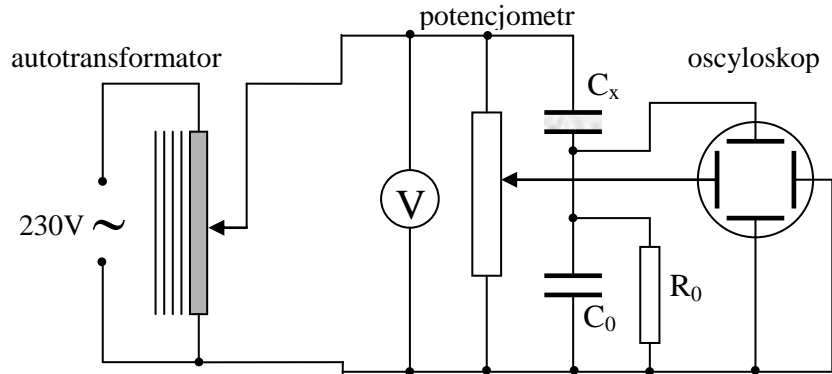
G.A Smoleński, N.N. Krajnik, Ferroelektryki i antyferroelektryki, PWN.

T. Krajewski, Zagadnienia fizyki dielektryków,

WKŁ. K. Zboiński, Laboratorium z fizyki, Liber,

Opis układu

Do badania zjawiska histerezy wykorzystano w ćwiczeniu układ mostkowy opracowany przez Sawyera i Towera.



Schemat układu Sawyer'a i Towera

Układ ten składa się z autotransformatora zasilanego zmiennym napięciem sieci. Napięcie z autotransformatora jest podane na połączone ze sobą równolegle - woltomierz, dzielnik pojemnościowy i dzielnik oporowy (potencjometr). Dzielnik pojemnościowy stanowią połączone ze sobą szeregowo kondensator ferroelektryczny o pojemności C_x i kondensator dekadowy o pojemności C_0 . Napięcie z kondensatora C_0 jest podane na pionowe okładki oscyloskopu i przetwornika analogowo-cyfrowego sprzężonego z komputerem. Napięcie z dzielnika oporowego jest podane na poziome okładki oscyloskopu (i komputera). (Równolegle do kondensatora C_0 jest włączony regulowany opornik R_0 , pozwalający na kompensację strat kondensatora ferroelektrycznego.) Gdy oscyloskop (przetwornik) pracuje w modzie XY na ekranie obserwujemy złożenie periodycznie zmieniających się wartości napięć (drgań) pochodzących z kondensatora C_0 i z dzielnika oporowego. Drgania te są przyłożone w kierunkach wzajemnie prostopadłych i nałożenie ich daje charakterystyczny kształt pętli histerezy. Wybrane punkty histerezy mierzymy przy użyciu kursorów na ekranie komputera. Kondensator ferroelektryczny jest zanurzony w kąpeli termostatowanej, sterowanej regulatorem temperatury. Kondensatorem ferroelektrycznym jest płytka płaskorównoległa wycięta prostopadle do osi ferroelektrycznej z kryształu siarczanu trójglicyny $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$. Okładkami kondensatora są warstwy pasty srebrowej, nałożone bezpośrednio na płaskie powierzchnie kryształu. Siarczan trójglicyny w temperaturze pokojowej jest w stanie ferroelektrycznym. Ma strukturę krystaliczną jednoskośną i dzieli się na domeny o antyrównoległym ułożeniu momentów dipolowych. Powyżej temperatury Curie kryształ pozostaje jednoskośny, ale pojawia się środek symetrii i wtedy komórka elementarna nie ma momentu dipolowego, czyli kryształ przechodzi w stan paraelektryczny. Przemiana fazowa jest związana z uporządkowaniem protonów w wiązaniach wodorowych leżących wzdłuż osi Z kryształu.

Pole powierzchni objęte pętlą histerezy jest równe pracy wykonanej przez pole E na dokonanie pełnego cyklu spolaryzowania i przepolaryzowania jednostki objętości ferroelektryka. Praca ta zamienia się w ciepło, charakteryzuje więc straty energii przy kolejnych zmianach polaryzacji próbki. Wraz ze wzrostem temperatury kryształu pole powierzchni objętej pętlą histerezy maleje, bo chaos termiczny w coraz większym stopniu zaburza uporządkowanie próbki.

Wyprowadzenie wzorów

Gdy do kondensatorów połączonych szeregowo przyłożone jest napięcie U , to na okładkach każdego z kondensatorów gromadzi się **taki sam** ładunek. Ładunek, który znajduje się na okładkach kondensatora o pojemności C_x ma wartość $q_x = C_x \cdot U_x$, gdzie U_x jest równe napięciu panującemu między okładkami kondensatora C_x . Korzystając z równości ładunków na obu kondensatorach, czyli $q_x = q_0 \Rightarrow C_x U_x = C_0 U_0$, zapiszemy napięcie na kondensatorze C_0 jako: $U_0 = \frac{C_x}{C_0} U_x$. Napięcie przyłożone U musi być równe sumie napięć na obu kondensatorach, więc

$$U = U_x + U_0 = U_x + \frac{C_x}{C_0} U_x = U_x \left(1 + \frac{C_x}{C_0} \right).$$

Ponieważ $C_x \ll C_0$ (czyli pojemność kondensatora ferroelektrycznego jest znacznie mniejsza niż kondensatora C_0), praktycznie **całe napięcie podane z transformatora panuje między okładkami kondensatora C_x**

$$U_x \cong U.$$

Znając grubość d badanego kryształu i przyłożone napięcie U można znaleźć natężenie pola elektrycznego, w którym ten kryształ się znajduje

$$E = \frac{U}{d}.$$

W naszym układzie doświadczalnym część napięcia z autotransformatora, poprzez dzielnik oporowy, jest podana na okładki odchylenia poziomego oscyloskopu XX'. Wychylenie wiązki elektronów w kierunku X na ekranie oscyloskopu (lub komputera) jest w fazie z natężeniem pola, w którym w danej chwili znajduje się badany kryształ ferroelektryczny i jest do niego wprost proporcjonalne. A więc **oś X** na ekranie odzwierciedla przyłożone pole elektryczne. Mierzmy wzdłuż niej odcinek X_{max} , który jest odległością pomiędzy punktami A i D histerezy oraz odcinek X_c odpowiadający odległości między punktami C i G. Z odczytanego na mierniku napięcia skutecznego U_{sk} obliczamy maksymalne pole elektryczne E_{max} faktycznie przyłożone do próbki. Jednocześnie porównując wartość X_{max} z X_c otrzymamy pole koercji E_c :

$$E_{max} = \frac{U_{max}}{d} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{sk}}{d} \qquad E_c = E_{max} \frac{X_c}{X_{max}},$$

gdzie $U_{max} = \sqrt{2} \cdot U_{sk}$ jest **amplitudą** przyłożonego napięcia na próbce, zaś U_{sk} jest napięciem skutecznym wskazanym przez woltomierz.

Na okładki odchylenia pionowego YY' oscyloskopu i przetwornika jest podane napięcie U_0 występujące na kondensatorze C_0 . Wartość napięcia U_0 jest proporcjonalna do ładunku q_0 zgromadzonego w kondensatorze C_0 i jednocześnie do ładunku q_x zgromadzonego w kondensatorze C_x . Wiemy, że ładunek w kondensatorze C_x jest proporcjonalny do modułu wektora indukcji elektrycznej \vec{D} w ferroelektryku $q = |\vec{D}| \cdot S$, a wektor indukcji elektrycznej w kryształach jest równy

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \Rightarrow \quad \vec{P} = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 \vec{E},$$

gdzie \vec{P} jest wektorem polaryzacji dielektryka. Stała dielektryczna ferroelektryka jest rzędu tysięcy, czyli $\varepsilon \gg 1$, a wtedy indukcja elektryczna próżni jest znacznie mniejsza od polaryzacji dielektryka ($\varepsilon_0 \vec{E} \ll \vec{P}$), czyli $\vec{D} \cong \vec{P}$. Konkludując w przedstawionym układzie

$$|\vec{P}| \sim q_x = C_0 U_0$$

Obserwowana na ekranie oscyloskopu (lub komputera) krzywa przedstawia zależność ładunku w kondensatorze ferroelektrycznym od natężenia zewnętrznego pola elektrycznego. W chwili, gdy natężenie pola elektrycznego jest równe zero $\vec{E} = 0$, indukcja elektryczna jest równa **polaryzacji** zwanej polaryzacją resztkową (punkt B) próbki $\vec{D} = \vec{P}_r$ i jednocześnie

$$|\vec{D}| = \frac{q_x}{S} = |\vec{P}_r|, \text{ a stąd}$$

$$P_r = P_s = \left. \frac{C_0 U_0}{S} \right|_{E=0}.$$

W naszym przypadku polaryzacja resztkowa P_r jest równa polaryzacji spontanicznej P_s (punkt H).

Na ekranie mierzymy odcinek Y_s odpowiadający współrzędnej Y-owej punktu B (ale B = H) i wyznaczamy napięcie U_0 (na kondensatorze C_0) jako

$$U_0 = n_y \cdot Y_s,$$

gdzie n_y jest aktualnie stosowanym dzielnikiem osi Y, tzn wskazuje ile razy napięcie zbierane na kondensatorze zostało zmniejszone przed podaniem go na przetwornik. Polaryzację spontaniczną próbki znajdujemy ze wzoru:

$$P_s = \frac{n_y \cdot Y_s \cdot C_0}{S}.$$

Z rozważań termodynamicznych dla kryształu siarczanu trójglicyny, w którym zachodzi przejście fazowe drugiego rodzaju (np. G.A Smoleński, N.N. Krajnik, Ferroelektryki i antyferroelektryki) wynika, że nieznacznie poniżej temperatury przejścia fazowego T_C kwadrat polaryzacji spontanicznej P_s^2 jest liniową funkcją temperatury. Zależność tę można zapisać wzorem:

$$P_s^2 = A - BT$$

gdzie A i B są współczynnikami prostej. Zależność tę wykorzystamy do wyznaczenia temperatury Curie T_C siarczanu trój glicyny, powyżej której $P_s = 0$.

Wielkością charakteryzującą dany ferroelektryk jest tzw. przenikalność w stanie nasycenia ε_{\max} , którą obliczamy (przy założeniu $\varepsilon_0 \vec{E} \ll \vec{P}$) ze wzoru,

$$\varepsilon_{\max} = \frac{P_{\max}}{\varepsilon_0 E_{\max}}$$

gdzie $P_{\max} = \frac{n_y \cdot Y_{\max} \cdot C_0}{S}$.

Wykonanie ćwiczenia

Wyniki wszystkich pomiarów muszą być zapisane w sprawozdaniu, opatrzone odpowiednimi jednostkami i podpisane przez asystenta.



Uwaga: włączenia napięcia zasilania i dobór parametrów układu zapewniających właściwy kształt pętli histerezy dokonuje asystent.

- a) Na protokóle notujemy wartości: pojemności C_0 ustawionej na kondensatorze dekadowym, powierzchni i grubości badanej płytki krystalicznej. Notujemy również wybraną przez asystenta wartość napięcia U_{sk} wskazaną przez woltomierz.

Propozycja zapisu wyników:

| Pojemność C_0 [jednostka] $\Delta C_0 = \dots\dots$ | Powierzchnia płytki S [jednostka] $\Delta S = \dots\dots$ | Grubość płytki d [jednostka] $\Delta d = \dots\dots$ | Napięcie U_{sk} [jednostka] $\Delta U_{sk} = \dots\dots$ |
|---|---|--|--|
| | | | |

- b) Uruchamiamy komputer i otwieramy program PicoScope. Z menu programu wybieramy pozycję View i spośród możliwych opcji wybieramy New XY Scope. Maksymalizujemy ekran.
- c) Skręcamy pokrętkę autotransformatora do zera i wyłączamy go wyłącznikiem. Przy wyłączonym autotransformatorze ustawiamy położenie plamki na środek ekranu (punkt o współrzędnych 1250mV; 1250mV), korzystając z pokręteł przesuwu umieszczonych na dzielniku przetwornika analogowo-cyfrowego.
- d) Włączamy autotransformator i na woltomierzu ustawiamy wartość napięcia U_{sk} ustaloną wcześniej przez asystenta.
- e) Naciskamy przycisk **STOP** w lewym dolnym rogu ekranu. Pętla histerezy widoczna na ekranie zostaje zamrożona. Możemy ją skopiować i zarejestrować w dołączonym programie *CorelDraw*. Wykorzystując ekran komputera dokonujemy pomiarów położenia istotnych punktów histerezy w następujący sposób:

Pomiar X_{\max} – Ustawiamy kursor za pomocą myszki w najdalszym od środka punkcie po lewej stronie histerezy i naciskając lewy klawisz myszki rysujemy **linię pionową** przechodzącą przez dany punkt. Po zwolnieniu klawisza na ekranie pojawia się linia przerywana, której położenie możemy korygować z klawiatury klawiszami kursorów  . Położenie linii jest wyświetlane na ekranie w miliwoltach $x = \dots\text{mV}$. Niepewność pomiarowa Δx jest równa zmianie położenia linii przerywanej po jednokrotnym naciśnięciu klawisza kierunkowego. Następnie ustawiamy kursor w najdalszym od środka punkcie po prawej stronie i rysujemy linię

pionową. Po zwolnieniu klawisza pojawia się druga linia przerywana, a na ekranie wyświetla się jej położenie $o = \dots \text{mV}$ oraz odległość między liniami $x_o = \dots \text{mV}$. Wyznaczamy niepewność pomiarową Δo tak samo jak

$$\Delta x. \text{ Mierzona wartość } X_{\max} = \frac{1}{2} x_o, \text{ zaś } \Delta X_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}.$$

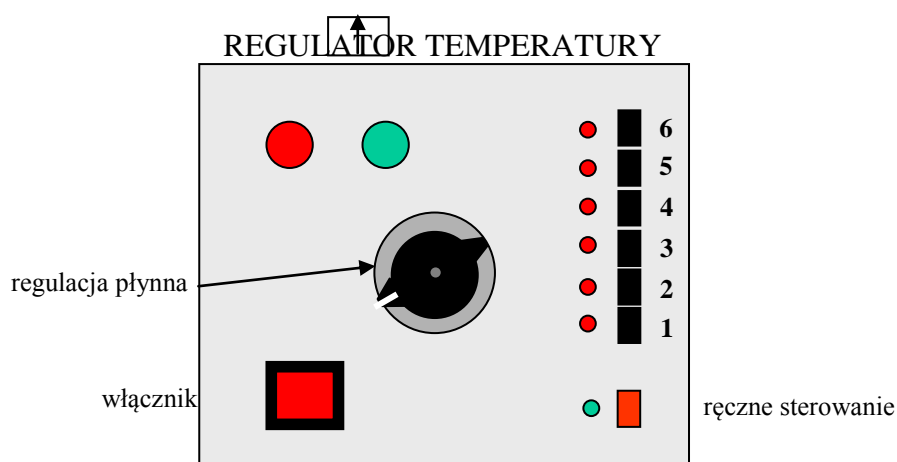
Pomiar X_C – Pomiar pola koercji dokonujemy w analogiczny sposób jak poprzednio rysując linie przerywane w punktach, w których histereza przecina się z osią X (linia pozioma 1250 mV) Mierzona wartość X_c jest połową odległości między liniami x_o : $X_c = \frac{1}{2} x_o$. Niepewność pomiarową ΔX_c

$$\text{tak samo jak wyżej } \Delta X_c = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}.$$

Pomiar Y_{\max} – Pomiar maksymalnej wartości polaryzacji Y_{\max} wykonujemy analogicznie jak w przypadku pomiaru pól, tylko rysując linie poziome i mierząc odległość między nimi. Niepewności pomiarowe wyznaczamy tak jak poprzednio. Mierzona wartość $Y_{\max} = \frac{1}{2} x_o$, zaś $\Delta Y_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}$.

Pomiar Y_s – Polaryzacja spontaniczna i reszkowa w przypadku mierzonej próbki są identyczne i są wyznaczone tak jak poprzednio. Linie poziome rysujemy przez punkty przecięcia histerezy z osią Y (oś Y o współrzędnej 1250 mV). Wyznaczamy niepewność pomiarową jak poprzednio. Mierzona wartość $Y_s = \frac{1}{2} x_o$, zaś $\Delta Y_s = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}$.

- f) W lewym dolnym rogu ekranu naciskamy przycisk **GO** i wznawiamy przemiatając pętlę histerezy.
- g) Włączamy regulator temperatury, pokrętkę regulacji płynnej ustawiamy w lewym skrajnym położeniu i naciskamy klawisz **1** (najniższy z sześciu).
- h) Włączamy chłodzenie termostatu odkręcając kran. Silnik i grzałkę termostatu włączamy ustawiając pokrętkę, znajdujące się na szczycie termostatu, na pozycję H2.



Proces grzania jest sygnalizowany świeceniem czerwonej diody. Czekamy ok. 5 min. do ustabilizowania się temperatury i zapalenia się zielonej diody.

- i) Odczytujemy aktualną temperaturę próbki i wykonujemy pomiary nowej pętli histerezy (powtarzamy punkty e), f), g)) z tym, że zaraz po zatrzymaniu histerezy (STOP) można nacisnąć klawisz **2** i uruchomić grzanie kąpieli do nowej temperatury. Również kopiujemy histerezę do *CorelDraw* jako kolejny wykres na tej samej stronie.

- j) Powtarzamy punkt i) kolejno naciskając klawisze **3**,...,**6**. Dalszy wzrost temperatury kąpieli uzyskamy, gdy przy wciśniętym klawiszu **6** obrócimy nieco pokrętło regulacji płynnej. Powyżej 40°C pomiary wykonujemy co 1°C , a powyżej 46°C co $0,5^{\circ}\text{C}$ do zaniku pętli histerezy.

Propozycja zapisu wyników:

| Dzielnik przetw. | | Temp. próbki T (jedn.) ΔT (jedn.) | X_{max} (jedn.) | X_C (jedn.) | Y_{max} (jedn.) | Y_s (jedn.) |
|------------------|-------|---|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| n_x | n_y | | ΔX_{max} (jedn.) | ΔX_C (jedn.) | ΔY_{max} (jedn.) | ΔY_s (jedn.) |
| | | | | | | |

gdzie ΔT jest błędem systematycznym wynikającym z dokładności przyrządu. Błędy ΔX_{max} , ΔX_C , ΔY_s obliczamy metodą różniczki zupełnej, uwzględniając błędy Δo i Δx .

- k) Drukujemy z *CorelDraw* wiązkę krzywych histerezy, która dołączamy do sprawozdania.

Opracowanie wyników

Obliczamy wartość pola maksymalnego E_{max} ze zmierzonego X_{max} i odczytanego napięcia U_{sk} na mierniku.

Dla każdej temperatury obliczamy wartości pola koercji E_C , polaryzacji nasycenia P_{max} i przenikalności ε_{max} .

Niepewności pomiarowe ΔE_C , ΔP_N i $\Delta \varepsilon_{max}$ wyznaczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.

Sporządzamy wykresy polaryzacji nasycenia P_{max} i pola koercji E_C w funkcji temperatury. Na wykresach zaznaczamy niepewności pomiarowe ΔE_C i ΔP_N .

Temperaturową zależność przenikalności należy przedstawić w tabeli lub na wykresie.

Dla temperatur $T \geq 46^{\circ}\text{C}$ obliczamy wartości kwadratów polaryzacji nasycenia P_N^2 .

Sporządzamy wykres kwadratu polaryzacji nasycenia P_N^2 od temperatury.

Ekstrapolując przy pomocy prostej wykres P_N^2 do wartości $P_N^2 = 0$ odczytujemy temperaturę Curie $T_C \pm \Delta T_C$ dla siarczanu trójglicyny.

Wykorzystując metodę regresji liniowej znajdujemy współczynniki A i B oraz temperaturę Curie $T_C \pm \Delta T_C$ dla siarczanu trójglicyny i porównujemy z wartością $T_C \pm \Delta T_C$ uzyskaną metodą graficzną.

Powyższa metoda wyznaczenia temperatury Curie przy pomocy kwadratu polaryzacji nasycenia P_{max}^2 jest zwykle wystarczająco dokładna, choć formalnie należałoby wykorzystać kwadraty polaryzacji spontanicznej P_S^2 . W przypadku prawie kwadratowego kształtu pętli histerezy wartości P_S wyznaczone przez ekstrapolację prostoliniowego fragmentu krzywej AB są tylko nieznacznie mniejsze od P_N .

We wnioskach spróbujmy przedstawić:

- o czym świadczy otrzymany wykres zależności polaryzacji nasycenia od temperatury.
- o czym świadczy otrzymany wykres zależności pola koercji od temperatury.
- jak zmienia się ε_{\max} wraz ze wzrostem temperatury?

porównanie wyznaczonej temperatury Curie z danymi literaturowymi.

- ocenę, czy w granicach błędów doświadczalnych wykresy polaryzacji nasycenia i pola koercji od temperatury są porównywalne z cytowanymi poniżej pomiarami wykonanymi przez J. Stankowską (*Acta Physica Polonica* 31, 527 (1967))

porównanie wyznaczonej temperatury Curie z danymi literaturowymi,

jak na otrzymane wyniki może wpłynąć wykorzystanie wartości polaryzacji P_N zamiast P_S .

| Polaryzacja spontaniczna P_s [mC/m ²] | |
|--|------|
| 20 | 26,1 |
| 25 | 24,5 |
| 30 | 23,2 |
| 35 | 20,6 |
| 38 | 18,0 |
| 40 | 17,4 |
| 42 | 15,4 |
| 43 | 14,4 |
| 44 | 13,3 |
| 45 | 11,8 |
| 46 | 10,5 |
| 47 | 8,3 |
| 48 | 4,3 |
| 48,5 | 3,5 |
| 48,8 | 1,9 |
| 49 | 0,7 |
| 49,2 | 0 |

| Pole koercji E_C [kV/m] | |
|------------------------------|------|
| 20 | 32,6 |
| 25 | 29,0 |
| 30 | 22,6 |
| 35 | 20,2 |
| 38 | 15,0 |
| 40 | 12,5 |
| 42 | 9,1 |
| 43 | 8,0 |
| 44 | 6,5 |
| 45 | 3,7 |
| 46 | 3,3 |
| 47 | 0 |
| 47,5 | 0 |