

Latvijas Universitāte
Fizikas un matemātikas fakultāte
Fizikas maģistra 1.kursa students
Raimonds Narņickis (rn11038)

Nepārtrauktas vides fizikas laboratorija

Darbs nr. 12

Magnētisko īpašību pētīšana magnētiskajiem šķidrumiem

Darba mērķi

- Iepazīties ar magnētisko šķidrumu un tā svarīgāko fizikālo īpašību – magnētismu (superparamagnētismu)
- Dot ieskatu magnētisko šķidrumu pagatavošanā un lietišķajos pielietojumos.
- Izraisīt interesi par magnētisko šķidrumu tematiku, kuras nozīme un aktualitāte aug kopā ar vispārējo tehnikas progresu. Ilustrēt LU FI “Siltuma un pārses” laboratorijas darbības novirzienus.

Darba uzdevumi

1. Veikt LC ģenerators frekvences mērījumus, mēģenei ar magnētisko šķidrumu un sensora spoli atrodoties dažādas intensitātes magnētiskajā laukā H , ko nodrošina solenoīds.
2. Veikt frekvences mērījumu pārrēķinu, kā rezultātā uzzīmēt eksperimentāli iegūtu parauga magnetizācijas līkni $M = M(H)$.
3. Veikt teorētiskās magnetizācijas līknes $M_{teor}(H)$ konstruēšanu, izmantojot Lanževēna funkciju, par variējamiem parametriem atstājot ferodaļiņas vidējo magnētisko diametru d_m un magnētiskās fāzes koncentrāciju φ_m .
4. Uzklāt $M_{teor}(H)$ līkni uz $M = M(H)$ līknes un veikt variējamo parametru d_m un φ_m optimizāciju.
5. Izrēķināt nanodaļiņu tilpuma koncentrāciju φ , atrast attiecību $\frac{\varphi_m}{\varphi}$, no kuras secināt, cik lielai daļai no magnētiskā šķidruma cietās fāzes piemīt feromagnētiskās īpašības.
6. Pieņemot par zināmu daļiņu feromagnētiskā materiāla magnetizācijas atkarību no temperatūras (t.s. piromagnētisko koeficientu) $\frac{1}{M} \frac{\partial M}{\partial T} = 0,003\text{ K}^{-1}$, novērtēt, par cik grādiem ir uzsilis magnētiskais šķidrums mēģenē, sildot solenoīda spoli ar barošanas strāvu 5A (sildot nepārsniedzot $T = 60\text{ °C}$ uz spoles vijumu ārējās virsmas).

Darba piederumi

- Solenoīds, kas karkasa centrā nodrošina magnētiskā lauka intensitāti līdz apmēram $H = 75\text{ (kA/m)}$.
- Solenoīda barošanas avots, kas nodrošina solenoīda tinumiem nepieciešamo līdzstrāvu (0... 5 A), strāvas stipruma mērīšanai izmanto barošanas avota iebūvēto ampērmetru.
- Ar pētāmo magnētisko šķidrumu piepildīta mēģene.
- Mēriekārtas sensors – induktivitātes spole, kas ievietota mēģenē.
- LC kontūra rezonanses frekvences kapacitīvā trīspunkta ģenerators.
- Frekvenčmetrs LC kontūra rezonanses frekvences mērīšanai (izmanto multimetru TENMA 72-7745).
- Temperatūras mēriekārta ar termopāra sensoru (izmanto multimetru TENMA 72-7745)
- 9 V līdzsprieguma adapteris ģenerators barošanai.

Teorijas apskats

Darbā tiek lietots magnētisks šķidrums (ultrastabili koloidāli izšķīdinātas magnētiskās daļiņas nesošajā šķīdumā, ferodaļiņas ir nanometru izmērā). Tas ir pietiekami mazs, lai brauna kustības dēļ nenosēstos, tos pārklāj ar surfaktanta slāni vai arī ap katru daļiņu izveido elektrostatisks dubultslāni. Magnētiskās daļiņas var uzskatīt par viendomēnu, tāpēc to pietiekoši tālu no Kirī punkta raksturo pastāvīgs magnētiskais moments m :

$$m = M_S V$$

M_S - piesātinājuma magnetizācija

V – magnētiskās daļiņas tilpums.

Katram domēnam piemīt konstants magnētiskais moments, kas var būt orientēts dažos virzienos. Bez ārējā magnētiskā lauka, liela daļa magnētiskā šķidruma tilpuma nav makroskopiski magnetizēta, jo daļiņas magnētiskais moments orientēts brīvos virzienos. Ārējais lauks, savukārt, cenšas orientēt daļiņu magnētiskos momentus, kas izveido magnētiskā šķidruma makroskopisku tilpuma magnetizāciju. Magnētiskais šķidrums neuzrāda histerēzi magnetizācijas dinamikā un pakļaujas magnetizācijai (*superparamagnetisms*).

Ja neņem vērā koloidālo daļiņu savstarpējo dipolu mijiedarbību, tad magnētiskā šķidruma magnetizācija M pakļaujas klasiskajam Lanževēna likumam, kas apraksta paramagnētiskas gāzes magnetizāciju :

$$M = M_\infty \left(\coth(\xi) - \frac{1}{\xi} \right)$$

$\xi = \mu_0 \frac{mH}{k_B T}$ - Lanževēna parametrs,

$M_\infty = \varphi_m * M_S$ – piesātinājuma magnetizācija pie $H \rightarrow \infty$

Magnētiskā šķidruma magnētiskā tilpuma koncentrācija φ_m vienmēr ir zemāka par pašu magnētisko daļiņu koncentrāciju φ , to aprēķina pēc raksturīgajiem blīvumiem.

$$\varphi = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_M - \rho_0}$$

ρ – magnētiskā šķidruma blīvums.

ρ_M – magnētiskā materiāla blīvums.

ρ_0 – nesošā šķidruma blīvums.

Ir divi galvenie iemesli, kāpēc $\varphi_m < \varphi$: pirmkārt, katrai daļiņai ir nemagnētisks virsmas slānis, otrkārt, vērā ņemams ferodaļiņu skaits zaudē feromagnētiskās īpašības ferošķidruma pagatavošanas procesā.

Darba dati un to apstrāde

Tabula 1 Pierakstītie dati sākot mērīšanu bez strāvas un palielinot strāvu

| Ejot no apakšas | | | | |
|-------------------|---------|------------------|-----------------|--------------|
| pierakstītie dati | | izrēķinātie dati | | |
| I [A] | f [kHz] | H [k A/m] | ΔL [mH] | M(H) [k A/m] |
| 0.000 | 41.70 | 0.00 | 0.448 | 0.00 |
| 0.500 | 42.46 | 7.21 | 0.372 | 3.49 |
| 0.755 | 42.94 | 10.89 | 0.325 | 5.69 |
| 1.000 | 43.33 | 14.42 | 0.286 | 7.48 |
| 1.500 | 43.96 | 21.63 | 0.223 | 10.37 |
| 2.000 | 44.41 | 28.84 | 0.178 | 12.44 |
| 2.516 | 44.75 | 36.28 | 0.144 | 14.00 |
| 3.000 | 45.02 | 43.26 | 0.117 | 15.23 |
| 3.519 | 45.22 | 50.74 | 0.098 | 16.15 |
| 4.011 | 45.38 | 57.84 | 0.082 | 16.89 |
| 4.500 | 45.51 | 64.89 | 0.069 | 17.48 |
| 5.052 | 45.63 | 72.85 | 0.057 | 18.03 |

Tabula 2 Dati uzsildot magnētisko šķīdumu pie $I = 5 \text{ A}$, tad samazinot strāvu

| Ejot no aukšas | | | | |
|-------------------|---------|------------------|-----------------|--------------|
| pierakstītie dati | | izrēķinātie dati | | |
| I [A] | f [kHz] | H [k A/m] | ΔL [mH] | M(H) [k A/m] |
| 0.000 | 42.48 | 0.00 | 0.370 | 0.00 |
| 0.500 | 42.92 | 7.21 | 0.327 | 2.02 |
| 0.751 | 43.25 | 10.83 | 0.294 | 3.53 |
| 1.000 | 43.54 | 14.42 | 0.265 | 4.86 |
| 1.500 | 44.04 | 21.63 | 0.215 | 7.16 |
| 2.000 | 44.42 | 28.84 | 0.177 | 8.90 |
| 2.516 | 44.70 | 36.28 | 0.149 | 10.19 |
| 3.000 | 44.95 | 43.26 | 0.124 | 11.33 |
| 3.519 | 45.12 | 50.74 | 0.108 | 12.11 |
| 4.011 | 45.28 | 57.84 | 0.092 | 12.85 |
| 4.500 | 45.40 | 64.89 | 0.080 | 13.40 |
| 5.054 | 45.52 | 72.88 | 0.068 | 13.95 |

Tabula 3 Magnētiskā šķīduma parametri

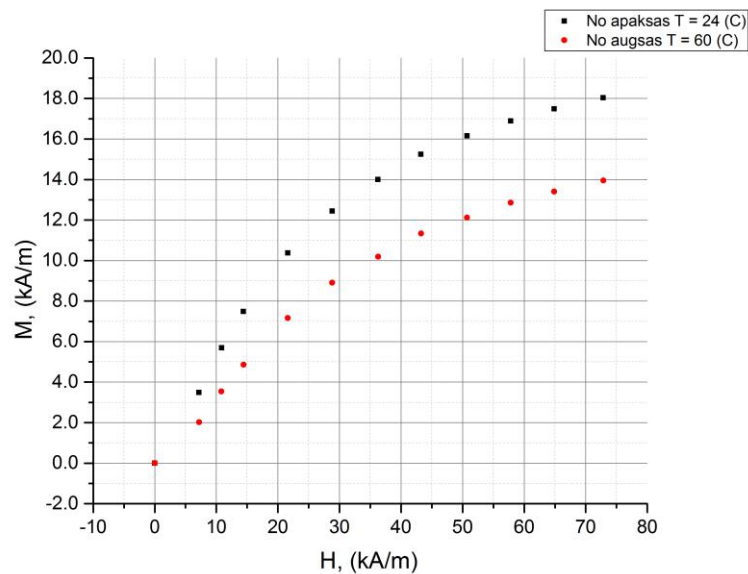
| ρ , g/cm ³ | ρ_0 , g/cm ³ | ρ_M , g/cm ³ | φ |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------|
| 1.06 | 0.85 | 5.25 | 0.048 |

Solenoīda graduācijas formula izmantojot lineāro aproksimāciju

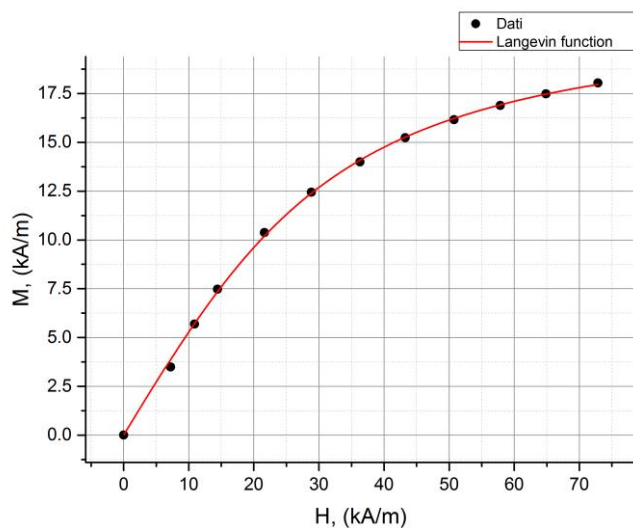
$$H \left[k \frac{A}{m} \right] \approx 14,12 * I[A]$$

$$\Delta L(H) = -2 \frac{\Delta f}{f_0} L_0, \quad \Delta f = f(H) - f_0, \quad L_0 = 2,3 \text{ [mH]}$$

$$M(H) = \frac{\Delta L(0) - \Delta L(H)}{L_0} k, \quad k \approx 106 \left[k \frac{A}{m} \right]$$



Grafiks 1 Melnie dati ņemti no 1. tabulas un sarkanie no 2. tabulas



Grafiks 2 Dati ņemti no 1. tabulas un aproksimēti izmantojot Lanževēna likumu

Dati tika aproksimēti izmantojot *OriginLab* un ar funkciju (pie temperatūras $T = 24$ (C))

$$M = \varphi_m * M_S \left(\text{cth}(\alpha d_M^3 H) - \frac{1}{\alpha d_M^3 H} \right), \alpha = \frac{\mu_0 M_S \pi}{6 k_B T} \approx 7.86 * 10^{19}$$

Tabula 4 Iegūtie parametri aproksimējot datus ar Lanževēna likumu

| | Vērtība | Standartnovirze | r, % |
|-------------|---------|-----------------|-------|
| φ_M | 0.0449 | 3.58E-04 | 0.80% |
| d_M , nm | 9.829 | 0.060 | 0.61% |

Izmantojot 4. tabulas datus var sarēķināt magnētiskā šķīduma tilpuma koncentrāciju attiecībā pret magnētisko daļiņu tilpuma koncentrāciju.

$$\frac{\varphi_M}{\varphi} = 94.1\%$$

Tabula 5 Temperatūras starpības aprēķini izmantojot piromagnētisko koeficientu

| H [k A/m] | M _T (H) [k A/m] | M(H) [k A/m] | ΔM _T [k A/m] | ΔT, C |
|-----------|----------------------------|--------------|-------------------------|-------|
| 7.21 | 2.02 | 3.49 | 1.47 | 242.4 |
| 10.83 | 3.53 | 5.69 | 2.16 | 203.5 |
| 14.42 | 4.86 | 7.48 | 2.62 | 179.2 |
| 21.63 | 7.16 | 10.37 | 3.21 | 149.6 |
| 28.84 | 8.90 | 12.44 | 3.53 | 132.3 |
| 36.28 | 10.19 | 14.00 | 3.81 | 124.6 |
| 43.26 | 11.33 | 15.23 | 3.90 | 114.7 |
| 50.74 | 12.11 | 16.15 | 4.04 | 111.1 |
| 57.84 | 12.85 | 16.89 | 4.04 | 104.8 |
| 64.89 | 13.40 | 17.48 | 4.08 | 101.6 |

$$\frac{1}{M_T} \frac{\Delta M_T}{\Delta T} = \beta = 0.003 \left(\frac{1}{K} \right)$$

$$\Delta T = \frac{1}{\beta} \frac{\Delta M_T}{M_T}$$

Rezultāti

$$\varphi_M = 0.0449 \pm 0.0004, r = 0.80\%$$

$$d_M = 9.829 \pm 0.060 \text{ (nm)}, r = 0.61\%$$

$$\frac{\varphi_M}{\varphi} = 94.1\% \pm 0.7\%$$

Priekš temperatūras starpībām skat. 5. tabulu

Secinājumi

Pēc 2. grafika ir redzams, ka Lanževēna likums labi apraksta eksperimenta datus. Tika atrasts magnētisko daļiņu diametrs un magnētiskā šķidruma tilpuma koncentrācija ar lielu precizitāti (attiecīgi $\varphi_r = 0.80\%$ un $d_r = 0.61\%$) aproksimācijas standartnovirze tika paņemta kā parametru kļūda. Magnētiskā šķidruma tilpuma koncentrācija sanāca mazāka nekā magnētisko daļiņu tilpuma koncentrācijas, kā tas arī sagaidāms no teorijas.

Noteiktās šķidruma temperatūras izmaiņas (skat. 5. tabulu) ievietojot Lanževēna formulā izmantojot $T = \Delta T + T_0$, kur T_0 ir istabas temperatūra un magnētiskā lauka intensitāti H . Pie mazām H vērtībām aprēķinātā magnetizācija bija ļoti tuva M_T , bet palielinoties temperatūrai, no Lanževēna formulas iegūtās vērtības palika lielākas nekā nomērītās (pie magnētiskā lauka intensitāte $H = 64.89 \text{ (k}\frac{\text{A}}{\text{m}}\text{)}$ magnetizācijas starpība ir $2.54 \text{ (k}\frac{\text{A}}{\text{m}}\text{)}$, kas ir apmēram 19% no laboratorijas darbā iegūtās vērtības), tās bija tuvas Lanževēna formulas lineārajā daļā. Tas nozīmē, ka temperatūrai vajag būt lielākai pie lielākām magnētiskā lauka intensitātes vērtībām vai ir novērojams cits efekts, kas samazina magnetizāciju. Darbā izmantotais piromagnētiskais koeficients neņem vērā to, ka šķidrums izplešas pie lielām temperatūrām un rezultātā maina magnētisko daļiņu tilpuma koncentrāciju, kā arī var mainīt piesātinājuma magnetizāciju, jo siltumkustība izraisa magnētiskā momenta virziena maiņu. Spoles nomērītā temperatūra pie lielākās lauka intensitātes bija 60 (C) un darbā temperatūras starpība sanāca $\Delta T = 101.6 \text{ (C)}$ rezultātā temperatūra sanāk apmēram 126 (C), kas ir apmēram divreiz lielāka nekā nomērītā spoles vijumu temperatūra, tas norāda uz to, ka šķidruma temperatūra ir zemāka un lai precīzi novērtētu to vajag ņemt vērā šķidruma termisko izplešanos un to kā izmainās magnētiskais moments atkarībā no temperatūras.

Izmantotā literatūra

1. Laboratorijas darba apraksts
2. A. Kuzubov, O. Ivanova. Magnetic liquids for heat exchange. Journal de Physique III, EDP Sciences, 1994, 4 (1), pp.1-6.