

ნანოკომპოზიტური სტრუქტურების ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის განსაზღვრა

ომარ ნაკაშიძე, ლალი კალანდაძე, ნუგზარ ღომიძე

ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

omar.nakashidze@bsu.edu.ge, lali.kalandadze@bsu.edu.ge, gomidze@bsu.edu.ge

რეზიუმე

ნაშრომში განხილულია ϵ_m დიელექტრიკულ შეღწევადობის მატრიცაში ქაოსურად ორიენტირებული ელიფსოიდალური ფორმის ნანონაწილაკებისაგან შედგენილი მრავალკომპონენტიანი ნანოდისპერსული სტრუქტურა. მიღებულია ასეთი სტრუქტურის ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის გამოსათვლელი ფორმულები. ნაჩვენებია, რომ ნაწილაკთა პოლარიზაციის საშუალო მნიშვნელობის გამოთვლა დაიყვანება დეპოლარიზაციის ფაქტორის ეფექტური მნიშვნელობის შემოტანაზე. გამოკვლეულია ერთკომპონენტიანი ნანოსტრუქტურის ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის დამოკიდებულება მის სტრუქტურულ პარამეტრებზე.

საკვანძო სიტყვები: ნანოდისპერსული სტრუქტურა, ეფექტური გარემოს მიახლოება, დეპოლარიზაციის კოეფიციენტი, ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობა

1. შესავალი.

ნანოკომპოზიტური სტრუქტურების ოპტიკური თვისებების აღწერისათვის ფართოდ გამოიყენება ეფექტური გარემოს მეთოდები [1-13]. დღემდე, ეს მეთოდები გამოიყენება ნანოკომპოზიტური სტრუქტურების როგორც ოპტიკური, ასევე, მაგნიტო-ოპტიკური თვისებების აღწერისათვის. მაგრამ, უნდა აღინიშნოს, რომ ექსპერიმენტული მონაცემები და თეორიული შედეგები ყოველთვის არ არის თანხვედრაში [7,8]. ეს ნიშნავს, რომ არსებული თეორია არ არის უნივერსალური და უნდა განვითარდეს ამ მიმართულებით. ამ მიზნით, მოცემულ ნაშრომში განხილულია ϵ_m დიელექტრიკულ შეღწევადობის მატრიცაში ქაოსურად ორიენტირებული ელიფსოიდალური ფორმის ნანო ზომის ნაწილაკებისაგან შედგენილი მრავალკომპონენტიანი ნანოდისპერსული სტრუქტურა. დეპოლარიზაციის ფაქტორის ეფექტური მნიშვნელობის შემოტანით, გამოთვლილია ნანონაწილაკთა პოლარიზაციის საშუალო მნიშვნელობა, რაც წარმოადგენს ნაშრომის სიახლეს ეფექტური გარემოს მიახლოების მოდელისთვის და განაპირობებს ამ მეთოდის დახვეწას და სრულყოფას.

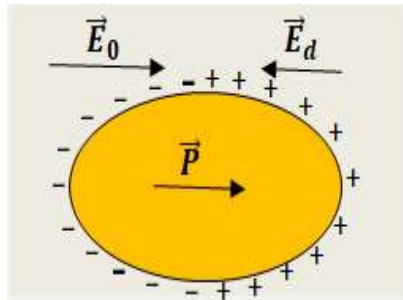
საზოგადოდ, ეფექტური გარემოს მიახლოებაში, ნანოდისპერსიული სტრუქტურა შეიძლება განვიხილოთ როგორც ϵ_{ef} ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე ისეთი ახალი ერთგვაროვანი გარემო, რომელსაც გააჩნია იგივე ოპტიკური თვისებები, როგორც მოცემულ ნანოდისპერსულ სტრუქტურას. რადგანაც ნანონაწილაკების ზომები და მათ შორის მანძილი მცირეა გარემოში სინათლის ტალღის სიგრძეზე, ამიტომ ასეთი გარემოს ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის ϵ_{ef} გამოსათვლელად საკმარისია შემოვიფარგლოთ ელექტროსტატიკური მიახლოებით.

თუ ცნობილია კომპოზიტური გარემოს ცალკეული კომპონენტის ოპტიკური პარამეტრები, მათი კონცენტრაცია და გეომეტრიული ფორმა, ეფექტური გარემოს მოდელის ფარგლებში, შესაძლებელია განისაზღვროს კომპოზიტური გარემოს, როგორც მთლიანის, ეფექტური

ოპტიკური მუდმივები. ამ ამოცანის გადაწყვეტისათვის, პირველ რიგში, უნდა განიხილოს ერთი ნაწილაკის ამოცანა. კერძოდ, გამოვთვალოთ გარე ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსებული, მოცემული ფორმის ნაწილაკის პოლარიზაცია.

დიელექტრიკული ბირთვის პოლარიზაციის კოეფიციენტი

განვიხილოთ შემთხვევა, როცა ნაწილაკებს აქვთ ელიფსოიდის ფორმა. სფერული ფორმის ნაწილაკებისაგან განსხვავებით, ასეთი ნაწილაკებისათვის დამახასიათებელია ფორმის ანიზოტროპულობა. მათი პოლარიზებულობა დამოკიდებულია მათ ფორმაზე, რომელიც განისაზღვრება ელიფსოიდის მთავარი ღერძების შეფარდებით და გარე ელექტროსტატიკურ ველში მათ ორიენტაციაზე.



სურ. 1. პოლარიზებული ელიფსოიდი

როგორც თეორიული გამოთვლები გვიჩვენებს [2, 12], ადგილი აქვს ელიფსოიდის თანაბარ პოლარიზაციას მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა გარე $\vec{E}_0$ ველი მიმართულია ელიფსოიდის რომელიმე ($i = a, b, c$) მთავარი ღერძის მიმართულებით და რომელიმე ამ მიმართულებით ელიფსოიდის დეპოლარიზაციის ველი გამოისახება ფორმულით:

$$\vec{E}_d = -4\pi f_i \vec{P} \quad (1)$$

სადაც, $\vec{P}$ პოლარიზაციის ვექტორია, ხოლო f_i არის ელიფსოიდის ფორმის ანუ დეპოლარიზაციის ფაქტორი. ის დამოკიდებულია ელიფსოიდის მთავარი ღერძების ფარდობაზე და გამოითვლება ინტეგრალით, რომელიც ჯერ კიდევ XIX საუკუნის 50-იან წლებში მიღებულ იქნა დირიხლეს მიერ [2, 12]

$$f_i = \frac{abc}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s+i^2)((s+a^2)(s+b^2)(s+c^2))^{1/2}} \quad (2)$$

დეპოლარიზაციის ფაქტორები f_a , f_b და f_c , აკმაყოფილებენ პირობას:

$$f_a + f_b + f_c = 1 \quad (3)$$

ამასთან, თუ $a < b < c$, მაშინ $f_a > f_b > f_c$.

f_a , f_b და f_c დეპოლარიზაციის ფაქტორების რიცხვითი მნიშვნელობები გამოთვლილი ელიფსოიდის მთავარი ღერძების a/b და b/c ფარდობების სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს მოცემულია ცხრილში 1.

ცხრილი 1. f_a , f_b და f_c მნიშვნელობები a/b და b/c თანაფარდობებისთვის

№	a/b	b/c	f_a	f_b	f_c
1	1/1	1/1	0,333	0,333	0,333
2	1/2	2/3	0,574	0,265	0,161
3	1/4	4/5	0,723	0,158	0,136

4	1/10	1/10	0,901	0,089	0,010
5	1/10	1/1	0,857	0,072	0,072
6	10/1	1/1	0,020	0,490	0,490

გაცილებით მარტივია გამოთვლები სფეროიდის (ბრუნვითი ელიფსოიდის) შემთხვევაში. სფეროიდის ორი მთავარი ეკვატორული ღერძი ტოლია, $b = c \neq a$ და შესაბამისად $f_b = f_c \neq f_a$. ამ შემთხვევაში დეპოლარიზაციის ფაქტორი პოლარული a ღერძის მიმართულებით დაიყვანება შემდეგი სახის ელემენტარულ ინტეგრალზე:

$$f_a = \frac{ab^2}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s + a^2)^{3/2}(s + b^2)} \quad (4)$$

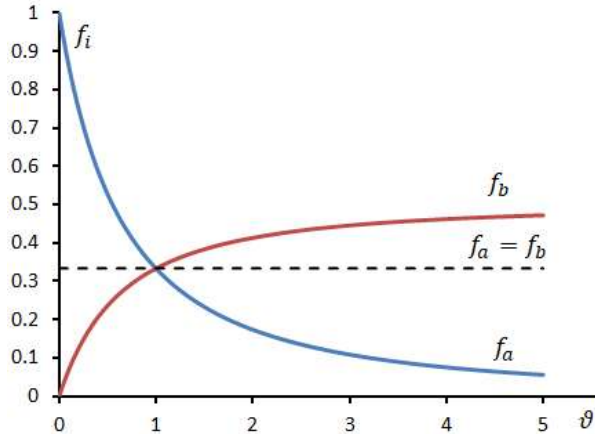
$a < b$ პოლარული ღერძის მიმართ შებრტყელებული სფეროიდის და $a > b$ –პოლარული ღერძის მიმართ გაჭიმული ელიფსოიდის შემთხვევაში, (4) ინტეგრალის ამონახსნი იქნება

$$f_a = \begin{cases} \frac{1}{1-\vartheta^2} \left(1 - \frac{\vartheta}{\sqrt{1-\vartheta^2}} \cdot \arcsin(\sqrt{1-\vartheta^2}) \right) & \text{when } a < b \\ \frac{1}{\vartheta^2-1} \left(\frac{\vartheta}{\sqrt{\vartheta^2-1}} \cdot \ln(\vartheta + \sqrt{\vartheta^2-1}) - 1 \right) & \text{when } a > b \end{cases} \quad (5)$$

სადაც, $\vartheta = \frac{a}{b}$

დეპოლარიზაციის ფაქტორი ეკვატორული ღერძის მიმართ $f_b = f_c = \frac{1}{2}(1 - f_a)$.

f_a და f_b დეპოლარიზაციის ფაქტორების $\vartheta = a/b$ პარამეტრზე დამოკიდებულების გრაფიკები გამოსახულია სურ.2-ზე. როგორც ამ გრაფიკებიდან ჩანს ბრუნვის ღერძის მიმართულებით სფეროიდის ფორმის ფაქტორი იცვლება (0;1), ხოლო მისი მართობული მიმართულებით (0;0,5) შუალედში.



სურ.2. სფეროიდისათვის f_a და f_b დეპოლარიზაციის ფაქტორების დამოკიდებულება ϑ პარამეტრზე

განვიხილოთ შემდეგი პირობები:

1. $a = b = c$, ბირთვის დეპოლარიზაციის ფაქტორები $f_a = f_b = f_c = \frac{1}{3}$;
2. $a \gg b$ –ბრუნვის ღერძის მიმართ ძლიერ გაჭიმული სფეროიდის (ნემსი), ან $a = \infty$ ცილინდრის ფორმის ნაწილაკებისათვის, $\vartheta = \infty$. ბრუნვის ღერძის გასწვრივ ფორმის ფაქტორი $f_a = 0$, ხოლო მისი მართობული მიმართულებით $f_b = \frac{1}{2}$;
3. $a \ll b$ –ძლიერ გაბრტყელებული სფეროიდის (დისკი) ან $a = 0$ სიბრტყის შემთხვევაში, $\vartheta = 0$, ხოლო $f_a = 1$ (დისკის ღერძის, ან სიბრტყის მართობული მიმართულება), ხოლო $f_b = 0$ (დისკის ღერძის მართობული მიმართულებით ან სიბრტყის გასწვრივ).

დავუბრუნდეთ დიელექტრიკული ელიფსოიდის ამოცანას და გამოვთვალოთ $\vec{E}_0$ გარე ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსებული V მოცულობისა და ε დიელექტრიკული შეღწევადობის ბირთვის პოლარიზებულება. ჩავთვალოთ რომ ბირთვის ირგვლივ გარემო ვაკუუმი. ამ შემთხვევაში ნაწილაკზე მოქმედი ლოკალური ველის დამაბულობა, რომელიც გარე $\vec{E}_0$ და დეპოლარიზაციის $\vec{E}_d$ ველების ჯამის ტოლია გამოისახება ფორმულით:

$$\vec{E}_L = \vec{E}_0 - 4\pi f_i \vec{P} \quad (6)$$

თუ დიელექტრიკული ამთვისებლობაა χ , მაშინ

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\chi \quad (7)$$

და

$$\vec{P} = \chi \vec{E}_L \quad (8)$$

6-8 ფორმულებიდან ვღებულობთ

$$\vec{P} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\varepsilon-1}{1+f(\varepsilon-1)} \vec{E}_0. \quad (9)$$

თუ სფეროიდის მოცულობაა V , მაშინ გარე $\vec{E}_0$ ველში ნაწილაკის მიერ შეძენილი დიპოლური მომენტი

$$\vec{P}_0 = \vec{P} \cdot V = \frac{V}{4\pi} \cdot \frac{\varepsilon-1}{1+f(\varepsilon-1)} \vec{E}_0 \quad (10)$$

მაშასადამე, ვაკუუმში V მოცულობისა და ε დიელექტრიკული შეღწევადობის სფეროიდის პოლარიზებულება

$$\beta_i = \frac{\vec{P}_0}{\vec{E}_0} = \frac{V}{4\pi} \frac{\varepsilon-1}{1+f_i(\varepsilon-1)} \quad (11)$$

პოლარიზაციის კოეფიციენტი

$$\alpha_i = \frac{\vec{P}}{\vec{E}_0} = \frac{1}{4\pi} \frac{\varepsilon-1}{1+f_i(\varepsilon-1)} \quad (12)$$

ვთქვათ, ნაწილაკი, დიელექტრიკული შეღწევადობით ε , მოთავსებულია ε_m დიელექტრიკული შეღწევადობის დიელექტრიკში. ამ შემთხვევაში, ამოცანა დაიყვანება ვაკუუმში მოთავსებული $\xi = \varepsilon/\varepsilon_m$ ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის ნაწილაკის პოლარიზაციის კოეფიციენტის განსაზღვრაზე [4].

თუ (12) ფორმულაში ε შევცვლით $\xi = \varepsilon/\varepsilon_m$ ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობით, მივიღებთ, რომელიმე ($i = a, b, c$) მთავარი ღერძის მიმართულებით, ε_m დიელექტრიკული შეღწევადობის მატრიცაში მოთავსებული, ε დიელექტრიკული შეღწევადობისა და V მოცულობის ელიფსოიდის პოლარიზაციის კოეფიციენტის გამოსათვლელ შემდეგ გამოსახულებას

$$\alpha_i = \frac{1}{4\pi} \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + f_i(\varepsilon - \varepsilon_m)}. \quad (13)$$

ნანოკომპოზიტის ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობა

განვიხილოთ მრავალკომპონენტური ნანოკომპოზიტური სტრუქტურა, რომელიც შედგება ε_m შეღწევადობის დიელექტრიკში (მატრიცაში) ქაოსურად განაწილებული ანიზოტროპული ფორმის ნანო ნაწილაკებისაგან (ჩანართები). დავახარისხოთ ნაწილაკები ε_i ($i=1,2,3, \dots, n$) დიელექტრიკული შეღწევადობების მიხედვით. ამ შემთხვევაშიც ამოცანა დაიყვანება ვაკუუმში მოთავსებული $\xi_i = \varepsilon_i/\varepsilon_m$ ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის ნაწილაკთა იგივე ანსამბლის ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის $\xi_{ef} = \varepsilon_{ef}/\varepsilon_m$ განსაზღვრაზე.

ვთქვათ, ნაწილაკებს აქვთ ერთნაირი ელიფსოიდალური ფორმა და ორიენტირებულნი არიან ერთი მიმართულებით, ხოლო გარემოზე მოქმედი გარე $\vec{E}_0$ ველი მიმართულია ელიფსოიდების რომელიმე, მთავარი ღერძის მიმართულებით. მაშინ ადგილი ექნება ნაწილაკების თანაბარ პოლარიზაციას. პოლარიზებული ნაწილაკების მიერ შექმნილი დეპოლარიზაციის ველის $\vec{E}_d$ საშუალო მნიშვნელობის გამოთვლისათვის, როცა ნაწილაკები არიან მათივე ფორმისა და ორიენტაციის ელიფსოიდალურ სიცარიელეში, მივიღებთ[13]:

$$\vec{E}_d = 4\pi f \vec{P} \quad (14)$$

სადაც, f - ველის მიმართულებით ელიფსოიდის დეპოლარიზაციის ფაქტორია.

ნაწილაკებზე მოქმედი ლოკალური $\vec{E}_L$ ველის საშუალო მნიშვნელობა, $\vec{E}_0$ და $\vec{E}_d$ ველების საშუალო მნიშვნელობების ჯამის ტოლია, მიმართულია ელიფსოიდების მთავარი ღერძის მიმართულებით და გამოისახება ფორმულით:

$$\vec{E}_L = \vec{E}_0 + 4\pi f \vec{P} \quad (15)$$

თუ მოცემული გარემოს დიელექტრიკული ამთვისებლობაა χ_{ef} , მაშინ

$$\vec{P} = \chi_{ef} \vec{E}_L \quad (16)$$

და

$$\xi_{ef} = 1 + 4\pi \chi_{ef} \quad (17)$$

ξ_i შეღწევადობის ელიფსოიდალური ნაწილაკების პოლარიზაციის კოეფიციენტი განისაზღვრება (13) ფორმულით

$$\alpha_i = \frac{1}{4\pi} \frac{\xi_i - 1}{1 + f(\xi_i - 1)} \quad (18)$$

სადაც, f ველის მიმართულებით ელიფსოიდის ფორმის ფაქტორია. თუ ε_i ($i=1,2,3, \dots, n$) დიელექტრიკული შეღწევადობების მქონე ნაწილაკების კონცენტრაციებია n_i , მოცულობები - V_i , მაშინ $\vec{E}_L$ ველის მოქმედებით ξ_i შეღწევადობის ნაწილაკების დიპოლური მომენტი $\vec{p}_i = V_i \alpha_i \vec{E}_L$, ხოლო პოლარიზაციის ვექტორი ანუ ერთეულოვან მოცულობაში მოთავსებული ნაწილაკების დიპოლური მომენტების ჯამი:

$$\vec{P} = \sum n_i V_i \alpha_i \cdot \vec{E}_L \quad (19)$$

(15), (16), (17), (18) და (19) ფორმულებიდან ვღებულობთ:

$$\frac{\xi_{ef} - 1}{1 + f(\xi_{ef} - 1)} = \sum q_i \cdot \frac{\xi_i - 1}{1 + f(\xi_i - 1)} \quad (20)$$

სადაც, $q_i = n_i V_i$ არის i კომპონენტის ნაწილაკების მოცულობითი წილი, ანუ მოცულობითი შევსების კოეფიციენტი.

(620)-ში, $\xi_i = \varepsilon_i / \varepsilon_m$ და $\xi_{ef} = \varepsilon_{ef} / \varepsilon_m$ შეცვლით, გარემოს ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის გამოსათვლელი ფორმულა ასე ჩაიწერება:

$$\frac{\varepsilon_{ef} - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + f(\varepsilon_{ef} - \varepsilon_m)} = \sum q_i \cdot \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + f(\varepsilon_i - \varepsilon_m)} \quad (21)$$

(21) წარმოადგენს მაქსველ-გარნეტის ეფექტური გარემოს მოდელის განზოგადებულ ფორმულას მრავალკომპონენტიანი ნანოდისპერსული გარემოსთვის ანიზოტროპული ფორმის შემადგენელი ნაწილაკებით. ერთკომპონენტიანი ნანოკომპოზიტისთვის ვღებულობთ

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_m \left(1 + \frac{q(\varepsilon - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m + f(1 - q)(\varepsilon - \varepsilon_m)} \right) \quad (22)$$

ეფექტური დეპოლარიზაციის ფაქტორი

ქაოსურად ორიენტირებული ელიფსური ფორმის ნაწილაკების, შემთხვევაში უნდა ვისარგებლოთ მთავარი ღერძების მიმართულებით ელიფსოიდის პოლარიზებულობის საშუალო მნიშვნელობით

$$\bar{\alpha}_l = \frac{1}{3} \sum \alpha_i = \frac{1}{3} \sum \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + f_i(\varepsilon - \varepsilon_m)} = \frac{1}{12\pi} \sum \frac{\xi - 1}{1 + f_i(\xi - 1)} \quad (23)$$

ვნახოთ, შეიძლება თუ არა ელიფსოიდის პოლარიზებულობის საშუალო მნიშვნელობის განსაზღვრა ეფექტური ფორმის ფაქტორის f_{ef} -ის შემოტანით. თუ ეს შესაძლებელია, მაშინ f_{ef} მნიშვნელობა უნდა იყოს მოთავსებული $[0;1]$ შუალედში და უნდა შესრულდეს თანაფარდობა

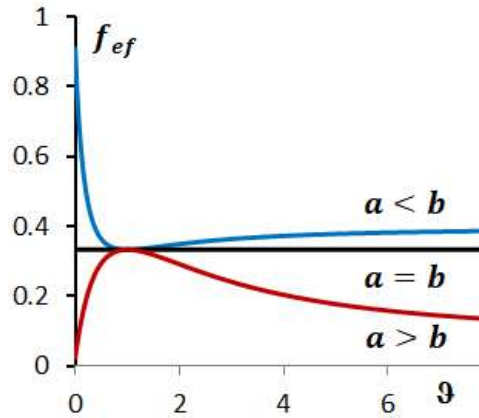
$$\bar{\alpha}_l = \frac{1}{4\pi} \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + f_{ef}(\varepsilon - \varepsilon_m)} = \frac{1}{4\pi} \frac{\xi - 1}{1 + f_{ef}(\xi - 1)} \quad (24)$$

(21) და (22) ფორმულებიდან სფეროიდისათვის ($f_b = f_c \neq f_a$) ვღებულობთ

$$f_{ef} = \frac{1}{\xi - 1} \cdot \left(\frac{3 \cdot (1 + (\xi - 1)f_a)(1 + (\xi - 1)f_b)}{3 + (\xi - 1)(2f_a + f_b)} - 1 \right) \quad (25)$$

მაშასადამე, ეფექტური ფორმის ფაქტორი განისაზღვრება ნაწილაკისა და ნაწილაკის ირგვლივ გარემოს ფარდობითი $\xi = \varepsilon/\varepsilon_m$ დიელექტრიკული შეღწევადობით და დამოკიდებულია სფეროიდის $\vartheta = \frac{a}{b}$ მთავარი ღერძების ფარდობაზე.

სურ. 4-ზე გამოსახულია f_{ef} -ის დამოკიდებულება ξ ფარდობით დიელექტრიკული შეღწევადობაზე, $\vartheta = \frac{a}{b}$ პარამეტრის $a > b$, $a = b$ და $a < b$ მნიშვნელობებისას.



სურ. 4. f_{ef} -ის დამოკიდებულება ξ ფარდობით დიელექტრიკული შეღწევადობაზე

როგორც სურ. 4-დან ჩანს ეფექტური დეოლარიზაციის ფაქტორის მნიშვნელობაც ყოველთვის მოთავსებულია 0-1 შუალედში. ეს გვადლევს იმის მტკიცების საშუალებას, რომ ანიზოტროპული ფორმის ნანონაწილაკების ანსამბლი შეიძლება შეიცვალოს გარე ელექტრული ველის მიმართ ერთნაირად ორიენტირებული f_{ef} დეპოლარიზაციის ფაქტორის მქონე ნანონაწილაკების ანსამბლით. ეფექტური დეოლარიზაციის ფაქტორის შემოტანის შემდეგ (22) ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_m \left(1 + \frac{q(\varepsilon - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m + f_{ef}(1 - q)(\varepsilon - \varepsilon_m)} \right) \quad (26)$$

როგორც (26)-დან q , ε და ε_m პარამეტრების მოცემული მნიშვნელობების დროს, როცა $f_{ef} = 0$

$$\varepsilon_{ef} = q\varepsilon + (1 - q)\varepsilon_m, \quad (27)$$

ხოლო როცა $f_{ef} = 1$ ვღებულობთ

$$\frac{1}{\varepsilon_{ef}} = \frac{q}{\varepsilon} + \frac{1 - q}{\varepsilon_m} \quad (28)$$

(27) და (28) ფორმულებით განისაზღვრება სისტემის ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობები, მისი ნებისმიერი კონფიგურაციისას.

3. შედეგები

მიღებულია მრავალკომპონენტური ელიფსური ფორმის ნანონაწილაკებისაგან შედგენილი დისპერსული სტრუქტურების ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის გამოსათვლელი ფორმულა. ნაჩვენებია, რომ თუ ნაწილაკები ორიენტირებული არიან ქაოსურად, მაშინ სისტემის პოლარიზაციის ვექტორის საშუალო მნიშვნელობის გამოთვლა დაიყვანება ეფექტური ფორმის ფაქტორის f_{ef} შემოტანაზე. აქედან გამომდინარე, ქაოსურად ორიენტირებული ელიფსოიდალური ფორმის ნანონაწილაკების სისტემა შეიძლება შევცვალოთ ერთნაირი ფორმის ნაწილაკების სისტემით, რომელთა ფორმის ფაქტორი f_{ef} -ის ტოლია. მიღებულია მოცემული ნანოკომპოზიტური სისტემის ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობების გამოსათვლელი ფორმულები სისტემის ნებისმიერი კონფიგურაციისათვის.

კვლევა განხორციელდა სსიპ შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [№ FR-24-3101]

გამოყენებული ლიტერატურა:

- [1] Maxwell Garnett, J.C. Colours in metal glasses and in metallic films. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 203 (1904) 385–420.
- [2] Petrov Yu. I. physics of small particles, M., Nauka, 1982, p.360
- [3] [Tuck C. Choy](#), Effective Medium Theory: Principles and Applications (2nd edn); Oxford University Press, (2015)
- [4] Lali Kalandadze, Omar Nakashidze, Influence of the size, shape and concentration of magnetic particles on the optical properties of nano-dispersive structures, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, V. 500, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166355>
- [5] [L. Kalandadze, O. Nakashidze, N. Gomidze and I. Jabnidze, "Theoretical and Experimental Investigation of the Optical Properties of Nano nickel Films," 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers \(CAOL\), Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/CAOL46282.2019.9019538](#)
- [6] Jeeban Kumar Nayak, Partha Roy Chaudhuri, Satyajit Ratha & Mihir Ranjan Sahoo; A comprehensive review on effective medium theories to find effective dielectric constant of composites, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 37:2, (2023) 282–322, DOI: 10.1080/09205071.2022.2135029
- [7] Nakashidze O. and Kalandadze L. Influence of Shape of Magnetic Particles on the Magneto-Optical and optical Properties of the nano-dispersive cobalt. 2016IEEE 7th international conference on Advanced Optoelectronics and Lasers; 2016, pp. 17–20
- [8] Michael Morales-Luna and Gesuri Morales-Luna; Effective medium theory and its limitations for the description of MoO₃ films doped with nanoparticles; J. Phys.: Condensed Matter 35 065001, (2023) DOI 10.1088/1361-648X/aca30d
- [9] Mohamad Yunos, Nurhazirah and Ahmad Khairuddin, Taufiq Khairi and Shafie, Sharidan and Ahmad, Tahir and William, Lionheart; The depolarization factors for ellipsoids and some of their properties. Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences, 15 (6). (2019) pp. 784–789.
- [10] Lali Kalandadze, Omar Nakashidze, Nugzar Gomidze and Izolda Jabnidze; Influence of the size, shape and concentration of magnetic particles on the optical properties of nano nickel films; J. Nanotechnology Perceptions, vol.17; (3), 2021 <https://nano-ntp.com/index.php/nano/article/view/204>

- [11] M S Mirmoosa et al; Dipole polarizability of time-varying particles; New J. Phys. V.24 (2022) 063004 DOI 10.1088/1367-2630/ac6b4c
- [12] Jin Miao; Ming Dong; Ming Ren; Xuezhou Wu; Liangping Shen; Hao Wang; Effect of nanoparticle polarization on relative permittivity of transformer oil-based nanofluids; Journal of Applied Physics 113, 204103 (2013) <https://doi.org/10.1063/1.4807297>
- [13] R. W. Cohen, G. D. Cody, M. D. Coult, and B. Abeles, "Optical properties of Silver and Gold Films," Phys. Rev. B8, 3689-3701 (1973)
- [14] Landau L.D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of continuous media, M., Nauka, 1982, 621s.

Determination of the effective permittivity of nanocomposite structures

Omar Nakashidze, Lali Kalandadze, Nugzar Gomidze

Batumi Shota Rustaveli State University

omar.nakashidze@bsu.edu.ge, lali.kalandadze@bsu.edu.ge, gomidze@bsu.edu.ge

Abstract

This article examines a multicomponent nanodispersed structure consisting of randomly oriented ellipsoidal nanoparticles in a matrix with permittivity ϵ_m . Formulas for calculating the effective permittivity of such a structure are derived. It is shown that calculating the average particle polarization value is reduced to introducing the effective value of the depolarization factor. The dependence of the effective permittivity of a single-component nanostructure on its structural parameters is studied.

Keywords: nanodispersed structure, effective medium approximation, depolarization coefficient, effective permittivity