

TETRAEDRİK FORMALI QIZIL NANOHISSƏCİYİNİN ELEKTRON QURULUŞUNUN RİYAZİ MODELƏŞDİRİLMƏSİ VƏ XASSƏLƏRİ

ARZUMAN Q. HƏSƏNOV

Azərbaycan Respublikası Silahlı Qüvvələrinin Hərbi Akademiyası,

E-mail: gasqhapk@gmail.com, Tel.: +994707157236

Tetraedrik formalı Au_{20} qızıl nanohissəciyinin xassələri qurulmuş vizual modelləri əsasında Genişlənmiş Hükkel metodu tətbiq etməklə öyrənilmişdir. Mexaniki, energetik, maqnit və optik parametrlərinin bəzi qiymətləri hesablanmışdır. Hesablamaların nəticələri göstərir ki, Au_{20} tetraedrik qızıl nanohissəciyinin elektrik və optik xassələri kürə formalı qızıl nanohissəciyinin xassələrindən fərqlənir [1, 2]. Hər iki formalı qızıl Au_{20} nanohissəciklərinin mexaniki xassələri təxminən eynidir və paramaqnitdir.

Açar sözlər: Tetraedrik formalı qızıl nanohissəciyi, riyazi model, Genişlənmiş Hükkel metodu.

PACS: 81.07,-b; 07.05.Tp; 03.67.LX

GİRİŞ.

Metal tərkibli nanohissəciklərin xassələrinin kvantmexaniki metodlar ilə öyrənilməsinin böyük əhəmiyyəti vardır. İşdə sferik formalı qızıl və gümüş nanohissəciklərdən fərqli olaraq, tetraedrik formalı qızıl nanohissəciyinin modelləşdirilməsinə və xassələrinin öyrənilməsinə baxılmışdır [1, 2]. Bunun üçün əvvəlcə onun vizual modelinin qurulmasına baxılmışdır.

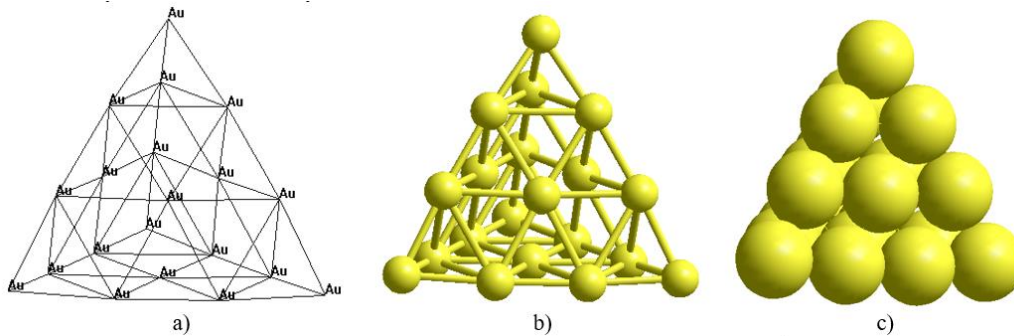
Au_n nanohissəciyinin vizual modelinin qurulması üçün ondakı atomların sayını təyin edək. Məlumdur ki, qızıl atomunun atom kütləsi

$M=196.96655$ q/mol=0.19696655 kq/mol, sıxlığı $\rho = 19.32$ q/sm³ = 19320 kq/m³ və Avoqadro ədədi $N_A = 6.0221415 \cdot 10^{23}$ 1/mol və nanohissəciyin ölçüsü $D=865$ nm olarsa, bu qiymətləri [3]-də verilən düsturda nəzərə alaraq

$$N = \frac{\pi \rho D^3}{6 \cdot M} \cdot N_A = \frac{3.14159265 \cdot 19320 \cdot (0.864 \cdot 10^{-9})^3}{6 \cdot 0.19696655} \cdot 6,0221415 \cdot 10^{23} = 20.017625 \approx 20.$$

Onda, Au_n nanohissəciyi üçün atomların sayı $N \approx 20$ alınır. Beləliklə, ölçüsü $D=0.865$ olan tetraedrik qızıl nanohissəciyindəki atomların sayı $0/N \approx 20$ olar.

Qızıl atomları arasındakı rabitənin metalliki olmasını nəzərə alaraq 20 sayda qızıl atomlarının əmələ gətirdiyi dayanıqlı nanoquruluşun vizual modelini qurmaq olar:



Şəkil 1. Tetraedrik qızıl nanohissəciyinin vizual modelləri: a) - xətlə, b) - xətt və kürələrlə, c)- kürələrlə

NƏZƏRİ METODOLOGİYA.

Tetraedrik formalı qızıl nanohissəciyinin xassələri Genişlənmiş Hükkel metodu tətbiq etməklə öyrənilmişdir. Genişlənmiş Hükkel metodu molekulyar orbitallar metodunun sadə yarım-empirik variantıdır [4, 5]. Valent elektronlar yaxınlaşmasına əsasən U_i molekulyar orbitalları valent elektronların həm π -, həm də σ -elektronların atom orbitallarının xətti kombinasiyası şəklində axtarılır:

$$U_i = \sum_{q=1}^n c_{qi} \cdot \chi_q \quad (1)$$

burada χ_q - atom orbitallarıdır və onlar məlum hesab olunurlar. Atom orbitalları olaraq Qauss funksiyalarından istifadə olunmuşdur [6]:

$$\chi_{nlm}(\mu, r, \theta, \varphi) = \left[\frac{2^{2n} (n-1)!}{(2n-1)!} \sqrt{\frac{(2\mu)^{2n+1}}{\pi}} \right]^{1/2} r^{n-1} e^{-\mu r^2} Y_{lm}(\theta, \varphi) \quad (2)$$

Burada μ - variasiya parametridir, r, θ, φ – elektronun sferik koordinatlarıdır, $Y_m(\theta, \varphi)$ - kompleks sferik funksiyalardır, m - bazis funksiyaları kimi seçilən atom orbitallarının sayıdır, c_{qi} - naməlum əmsallarının qiymətləri molekulyar orbitallar metodunun

$$\sum_q (H_{pq} - \varepsilon_i S_{pq}) c_{qi} = 0 \quad (3)$$

tənlikləri həll olunaraq tapılır.

Burada H_{pq} - effektiv Hamilton operatorunun matris elementləridir və Volsberq-Helmhols yaxınlaşmaları əsasında qiymətləndirilir, S_{pq} - örtmə inteqrallarıdır və Qaus funksiyaları bazisində hesablanır.

Au₂₀ ÜÇÜN KOMPÜTER HESABLAMALARI.

Au₂₀ üçün qurulmuş vizual modellər əsasında kompüterdə ε_i orbital enerjilərin qiymətləri hesablanır. Bu qiymətlər əsasında nanohissəciyin bir sıra xassələri tədqiq oluna bilər. Nanohissəciyin elektronları ən aşağı

enerji səviyyəsindən başlayaraq iki-iki səviyyələrdə yerləşdirilir və elektronlar tərəfindən tutulmuş ən yuxarı $\varepsilon_{HOMO} = -11.408870$ eV və ən aşağı boş $\varepsilon_{LUMO} = -8.440102$ eV molekulyar orbitallara uyğun enerjilər, ionlaşma potensialı $I_p = -\varepsilon_{HOMO} = 11.408870$ eV, tam elektron enerjisi $E_{nh} = \sum_i \varepsilon_i = -120.3316984$ a.v., qadağan olunmuş zonanın eni $E_g = \varepsilon_{LUMO} - \varepsilon_{HOMO} = 2,968768$ eV, möhkəmlik $\eta = \frac{E_g}{2} = 1,484384$, şüalandıracağı fotonun dalğa uzunluğu $\lambda = \frac{c \cdot h}{1.6 \cdot E_g} 10^{28} = 418,734$ nm və stabil-lik parametri $\Delta E = E_{nh} - \sum_A E_A = -1,543232276$ a.v müəyyən olunur. Burada $E_A = -5,939423304$ a.v. qızıl atomunun sərbəst halda tam elektron enerjiləridir. $\Delta E > 0$ olduqda material qeyri stabil, $\Delta E < 0$ olduqda, material stabil hesab olunur. Nəticələr cədvəl 1-də verilmişdir. Mötərizə daxilində verilmiş qiymətlər həmin kəmiyyətlərin təcrübi qiymətləridir.

Cədvəl 1.

Au₂₀ üçün energetik parametrlərin kompüterdə hesablanmış qiymətləri

N	Nano-hissəcik	ε_{HOMO}	ε_{LUMO}	Tam enerji E (a.v.)	Stabiləşmə enerjisi ΔE ΔE (a.v.)	İonlaşma potensialı I_p (eV)	Qadağan olunmuş zonanın eni E_g (eV)	Möhkəmlik parametri η (eV)	Şüalanan fotonun dalğa uzunluğu λ (nm)
1	Au ₂₀	-11,40887	-8,440101	-120,3316984	-1,543232276	11,40887	2,968769 (3.0)	1,4844	418,734

Au₂₀ NANOHISSƏCİYİNİN MEXANİKİ PARAMETRLƏRİNİN HESABLANMASI.

Nanohissəciyin mexaniki xassələrinin öyrənilməsində Yunq və möhkəmlik modullarının qiymətlərinin hesablanması vacib məsələdir. Yunq modulunun qiyməti

$$Y = \frac{F}{S} = \frac{E_b}{r \cdot S}, \quad F \approx \frac{E_b}{r}, \quad E_b = [\Delta E] \quad (4)$$

$$k = \frac{Y \cdot S}{D}, \quad \sigma = Y \cdot \frac{r}{D}, \quad G = \frac{Y}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad K = \frac{Y}{3 \cdot (1 - 2\nu)}, \quad HN = G \cdot A \cdot e^{-B \cdot T} \quad (5)$$

düsturlarından istifadə etmək olar. Burada ν Puasson əmsalı, A sabit kəmiyyət olub nanohissəciklər üçün müəyyən təcrübi faktlar əsasında təyin olunur. [9] - da

düsturu vasitəsilə hesablanma bilər. Burada Y - Yunq modulu, F - nanohissəciyi parçalamaq üçün qüvvənin qiyməti, E_b - nanohissəciyin rabitə enerjisi, S - nanohissəciyin diametral en kəsiyinin sahəsi, r - atomlararası rabitənin uzunluğudur. Nanohissəciyin k sərtlik əmsalının [7], σ deformasiya, G sürüşmə, K - həcmi elastiki və HN möhkəmlik modullarının qiymətlərinin hesablanması üçün isə [8-10] -də verilən

verilmiş ölçüləri 22 nm olan qızıl ($Y=100$ GPa, $G=34.01$ GPa, $HN=1.72$ GPa) nanohissəcikləri üçün Yunq, sürüşmə və möhkəmlik modullarının qiymətlərinə görə A sabitinin qiymətini təyin edə bilərik:

$$A = \frac{HN \cdot e^{B \cdot T}}{G} = \frac{1.72 \cdot e^{2.204 \cdot 10^{-3} \cdot 300}}{34.01} = \frac{1.72 \cdot 1.93711548}{34.01} = \frac{3.33183862}{34.01} = 0.09796644.$$

A -nın qiyməti tetraedrik qızıl nanohissəciyi üçün 0.09796644. B eksponensial parametrinin qiyməti bütün nanohissəciklər üçün $B=2.204 \cdot 10^{-3} 1/K$, $T=300^\circ K$.

Cədvəl 1-dəki qiymətlərə əsasən Au₂₀ nanohissəciklərinin mexaniki parametrlərinin - k sərtlik əmsalının, σ deformasiya, Y Yunq, G sürüşmə, K həcmi elastiki və HN möhkəmlik modullarının qiymətlərini hesablamaq olar.

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 3.14159265 \cdot \left(\frac{0.865 \cdot 10^{-9}}{2}\right)^2 = 5.873 \cdot 10^{-19} m^2$$

Bunun üçün Au₂₀ nanohissəciyin rabitə enerjisinin $E_b = 1.54323225$ a.v. = $6.719 \cdot 10^{-18}$ J, atomlararası rabitə uzunluğunun $r = 0.2718 \cdot 10^{-9} m$ və nanohissəciyin ölçüsünü $D \approx 0.865 \cdot 10^{-9} m$, diametral en kəsiyinin sahəsini

$$və \quad F = \frac{E_b}{r} = \frac{1.54323225 \text{ a.v.}}{0.2718 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \frac{6.719 \cdot 10^{-18} \text{ j}}{0.2718 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 2.472 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

nanohissəciyi parçalama qüvvəsinin, $\nu = 0.47$ Puasson əmsalının və $A = 0.09796644$ qiymətlərini (4) - (5) düsturlarında nəzərə alıb onların qiymətlərini hesablamaq olar:

$$Y = \frac{F}{S} = \frac{2.472 \cdot 10^{-8} \text{ N}}{5.873 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2} = 42.07 \cdot 10^9 \text{ Pa},$$

$$k = Y \cdot \frac{S}{D} = 42.07 \cdot 10^9 \cdot \frac{5.873 \cdot 10^{-19}}{0.885 \cdot 10^{-9}} = 28.582 \text{ N/m},$$

$$\sigma = Y \cdot \frac{r}{D} = 42.07 \cdot 10^9 \cdot \frac{0.2718 \cdot 10^{-9}}{0.865 \cdot 10^{-9}} = 13.22 \cdot 10^9 \text{ Pa},$$

$$G = \frac{Y}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{42.07 \cdot 10^9 \text{ Pa}}{2 \cdot (1 + 0.47)} = \frac{42.07 \cdot 10^9 \text{ Pa}}{2.94} = 14.31 \cdot 10^9 \text{ Pa},$$

$$K = \frac{Y}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} = \frac{42.07 \cdot 10^9 \text{ Pa}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot 0.47)} = \frac{42.07 \cdot 10^9 \text{ Pa}}{0.18} = 233.7 \cdot 10^9 \text{ Pa},$$

$$HN = G \cdot A \cdot e^{-B \cdot T} = 14.34 \cdot 10^9 \cdot 0.09796644 \cdot e^{-2.204 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = 0.72371 \cdot 10^9 \text{ P}.$$

Nəticələr cədvəl 2-də verilmişdir. Mötərizə daxilində verilmiş qiymətlər həmin kəmiyyətlərin təcrübi qiymətləridir.

Cədvəl 2.

Au₂₀ üçün mexaniki parametrlərinin hesablanmış qiymətləri

Nömrəsi	Nano-hissəcik	Sərtlilik əmsalı N/m	Deformasiya modulu (GPa)	Sürüşmə modulu (GPa)	Həcmi elastiki modul (GPa)	Yunq modulu (GPa)	Möhkəmlik modulu (GPa)
1	Au ₂₀	28.582	13.22	14.31	233.7	42,07	0.72371 (0.216)

Au₂₀ ÜÇÜN MAQNİT PARAMETRLƏRİNİN HESABLANMASI.

Nanohissəciyin maqnit xassəsini müəyyənləşdirmək üçün əvvəlcə onun maqnit doyması qiymətini bilmək lazımdır. Nanohissəciyin maqnit doymasını təyin etmək üçün

$$M_s = M_{sb} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot d}{D}\right)^3 \quad (6)$$

düsturundan istifadə etmək olar [11]. Burada M_{sb} həcmi materialın maqnit doymasını xarakterizə edir və ölçü vahidi $A \cdot m^2/kg$. D - kürə formalı təsəvvür edilən nanohissəciyin ölçüsü, d - səth qabığının qalınlığıdır. D olaraq həmin nanohissəciyi təşkil edən atomların yerləşdiyi kürənin r_h radiusu ilə təyin oluna bilər. $d < 2 \cdot r_h$, M_s - nanohissəciyin maqnit doyması olub ölçü vahidi $A \cdot m^2/kg$. Nanohissəciyin maqnit doyması məlum olduqda, onun öz-özünə maqnitlənməsini hesablamaq üçün

$$M_{sp} = M_s \cdot \left(1 - 0.3 \cdot \left(\frac{T}{T_c}\right)^{1.2}\right) \quad (7)$$

düsturundan istifadə etmək olar. Burada T - nanohissəciyin temperaturu, T_c - həcmi materialın Küri temperaturudur. T_c maqnit materiallar üçün keçid temperaturdur, M_{sp} - nanohissəciyin öz-özünə maqnitlənməsi, ölçü vahidi $A \cdot m^2/kg$. T_c temperaturundan böyük qiymətlərdə nizamlı maqnit domenlər əmələ gəlmədiyinə görə, öz-özünə maqnitlənmə əmələ gəlmir [11]. Nanohissəcik üçün digər əhəmiyyətli maqnit kəmiyyətlərdən biri maqnit qabiliyyətidir. Bu adsız kəmiyyət olub materialın fundamental xassəsini xarakterizə edir. Materialın maqnit sahəsində necə maqnitlənməsini xarakterizə edir. Nanohissəciyin maqnit qabiliyyəti onun V həcmdən, T temperaturundan, həmçinin M_{sp} öz-özünə maqnitlənməsindən asılı olaraq aşağıdakı kimi təyin oluna bilər [11]:

$$\chi = M_{sp}^2 \cdot \left(\frac{\mu_0 \cdot V}{3 \cdot k_0 \cdot T}\right) \quad (8)$$

Burada χ - nanohissəciyin maqnit qabiliyyəti, V - nanohissəciyin həcmi, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ vakuumda materialın maqnit nüfuzluğu, $k_0 = 1.38065 \cdot 10^{-23} \text{ j/K}$ Bolsman sabitidir. Nanohissəciyin maqnit xassəsindən asılı olaraq χ maqnit qabiliyyətinin ala biləcəyi qiymətlər cədvəl 3-də verilmişdir:

Cədvəl 3.

χ maqnit qabiliyyətinin qiymətləri

N	Maqnit qabiliyyəti	Maqnit xassəsi olmayan		Maqnit xassəli	
		Diamaqnit	Paramaqnit	Superparamaqnit	Ferromaqnit
1	χ	$-10^{-3} \div -10^{-6}$	$10^{-6} \div 10^{-3}$	5000	$10^3 \div 10^6$

M_s nanohissəciyin maqnit doyması və χ maqnit qabiliyyətinin qiymətləri məlum olduqda onun maqnit momentini m_0 (ölçü vahidi $A \cdot m^2$) və nüfuzluğunu μ (ölçü vahidi N/A^2) hesablamaq olar:

$$m_0 = M_s \cdot V \quad (9)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \quad (10)$$

Au_{20} qızıl nanohissəciyi üçün maqnit parametrlərinin - M_s maqnit doyması, M_{sp} öz-özünə maqnitlənmə, χ maqnit qabiliyyəti, m_0 maqnit momentinin və μ maqnit nüfuzluğunun qiymətlərini hesablamaq olar. Bunun üçün

$T_c = 300K$, $T = 4.2 K$, $M_{sb} = 1.2 \text{ emu/g} = 9.6183 \cdot 10^3 \text{ A/m}$, $d = 0.04992 \cdot 10^{-9}m$ qiymətləri (6) - (10) düsturlarında nəzərə alıb onların qiymətlərini hesablamaq olar:

$$M_s = 9.6183 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 0.04992 \cdot 10^{-9}}{0.865 \cdot 10^{-9}}\right)^3 = 6657.225 \text{ A/m},$$

$$M_{sp} = 6657.225 \cdot \left(1 - 0.3 \left(\frac{4.2}{300}\right)^{1.2}\right) = 6645.319 \text{ A/m},$$

$$\chi = 6645.319^2 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 3.38881 \cdot 10^{-28}}{3 \cdot 1.38065 \cdot 10^{-23} \cdot 4.2} = 1.081 \cdot 10^{-4},$$

$$m_0 = 6657.2249 \cdot 3.38881 \cdot 10^{-28} = 2.256 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot m^2,$$

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot (1 + 1.081 \cdot 10^{-4}) = 1.257 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2.$$

Nəticələr cədvəl 4-də verilmişdir.

Cədvəl 4.

Au_{20} qızıl nanohissəciyi üçün maqnit parametrlərinin hesablanmış qiymətləri

№	Nano-hissəcik	Maqnit doyması $M_s \text{ A} \cdot m^2/kg$	Öz-özünə maqnitlənmə $M_{sp} \text{ A} \cdot m^2/kg$	Maqnit momenti ($A \cdot m^2$)	Maqnit nüfuzluğu (N/A^2)	Maqnit qabiliyyəti χ
1	Au_{20}	0.831	0.829	$2.256 \cdot 10^{-24}$	$1.257 \cdot 10^{-6}$	$1.081 \cdot 10^{-4}$

NƏTİCƏ.

Tetraedrik qızıl nanohissəciyinin elektron quruluşu genişlənmiş Hükkel metodu istifadə etməklə öyrənilmişdir. Qurulmuş vizual modelləri əsasında kompüter hesablamaları aparılmışdır. Tetraedrik qızıl nanohissəciyinin orbital enerjiləri, ionlaşma potensialı, tam elektron enerjisinin qiymətləri, mexaniki, elektrik, maqnit və optik parametrlərinin bəzi qiymətləri hesablanmışdır. Nəticələr göstərir ki, Au_{20} nanohissəciyi yumşaq, elektrofil və stabil, yarım keçirici material ($E_g=2\text{ş}968768\text{eV}$) olub, şüalandıracağı fotonun dalğa

uzunluğu $\lambda=0.419\text{mkm}$. Alınmış nəticələr göstərir ki, tetraedrik Au_{20} nanohissəciyinin elektrik və optik xassələri kürə formalı qızıl nanohissəciyinin xassələrindən fərqlidir [1, 2]. Bu isə nanohissəciyin xassələrinin ondakı atomların sayı, ölçüsü və formasından asılı olduğunu göstərir. Mexaniki parametrlərinin hesablanmış qiymətlərinə əsasən onun mexaniki xassələri də təqribən həcmi qızıl materiallarının mexaniki xassəsi kimidir. Maqnit parametrlərinin hesablanmış qiymətlərinə əsasən tetraedrik formalı Au_{20} nanohissəciyinin paramaqnit xassəyə malik olduğunu söyləmək olar.

- [1] A.G. Gasanov, F.G. Pashaev. Romanian Journal of Information Science and Technology, 2016, vol.19, N 4, p. 331-337.
- [2] A. Q. Həsənov. AJP Fizika, 2019, Series: Az, vol. XXV, Number 03, s.43-46.
- [3] X. Liu. Extinction coefficient of gold nanoparticles with different sizes and different capping ligands. X.Liu, M. Atwater, J. Wang, O. Huo. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2007. v. 58, № 1, p. 3-7.
- [4] A.C. Федоров, П.Б. Сорокин и др. Новосибирск, 2006, с 3-7.
- [5] Г.А. Щембелов и др. Квантовохимические методы расчета молекул. М., Химия, 1980, 255с.
- [6] В.И. Минкин, Б.Я. Симкин, Р.М. Миняев. Теория строения молекул, Ростов-на - Дону: Феникс, 2010, 560 с.
- [7] Упругие и прочностные характеристики материалов - Доктор Лом. 07.06.2018, <http://doctorlom.com/item318.html>
- [8] A.G. Gasanov, A.A. Bairamov. Physics of the Solid State, 2019. vol. 61, N. 1, p. 208-213.
- [9] Dan Guo, Guoxin Xie and Jianbin Luo. J. Phys. D: Appl. Phys. 47, 2014, 013001, pp. 25.
- [10] Т.П. Черняева, В.М. Грицина, Е.А. Михайлов, А.В. Остапо. Вопросы атомной науки и техники. 2009. №4-2. Серия: Физика

- радиационных повреждений и радиационное материаловедение (94), с. 206-217.
- [11] *Kai Wu*. Magnetic Nanoparticles in Nanomedicine. *Kai Wu, Diqing Su, Jinming*

Liu et al. University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota 55455, USA, November 4, 2018, 67 p.

G. Gasanov Arzuman

MATHEMATICAL MODELING OF THE ELECTRONIC STRUCTURE OF TETRAHEDRAL GOLD NANOPARTICLES AND ITS PROPERTIES

The electric and optical properties of Au₂₀ gold nano-particles of tetrahedral form are studied by Hukkel method. It is shown that electric and optical properties of gold tetrahedral nano-particles differ from ones of spherical form [1,2]. The mechanical properties of both forms of Au₂₀ gold nano-particles are practically similar and coincide with paramagnetic properties.

Г. Гасанов Арзуман

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ ТЕТРАЭДРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА И ЕЁ СВОЙСТВА

Методом Хьюккеля изучены электрические и оптические свойства наночастиц золота Au₂₀ тетраэдрической формы. Показано, что электрические и оптические свойства тетраэдрических наночастиц золота отличаются от наночастиц золота сферической формы [1, 2]. Механические свойства обеих форм наночастиц золота Au₂₀ практически одинаковы и совпадают со свойствами парамагнетика.

Qəbul olunma tarixi: 18.03.2020