

MƏSAMƏLİ SİLİSIUMUN ELEKTRİK XASSƏLƏRİNİN TƏSNİFATI

R.Ş.RƏHİMOV, H.Ə.HƏSƏNOV

Bakı Dövlət Universiteti, MTN-in H.Əliyev adına Akademiyası

Məqalə fərqli məsamə morfoloqiyası və məsaməlilik dərəcələrinə malik olan məsaməli silisium qruplarının sistemləşdirilməsinə həsr olunmuşdur. Məsaməli silisiumun elektrik xassələrinin təklif olunmuş təsnifatına əsasən məsaməli silisium strukturları 4 qrupa bölünür. Məsaməli silisiumun xassələrini əks etdirən cədvəl tərtib olunmuşdur.

Ekspərimental hadisələr məsaməli silisiumda yük daşınması prosesinin rəngarəngliyindən xəbər verir. Yuk daşınması prosesi məsaməlilik dərəcəsi, məsamənin morfoloqiyası, yoxsullaşma prosesi, həcmdə elektrokimyəvi reaksiya məhsullarının olmasından və i.a. asılıdır. Məsaməli materialda məsamələr arasındakı məsafə daşıyıcıların dreyfinə təsir edə biləcək qədər geniş intervalda dəyişməyə qadirdir. Məsamələr arasındakı arakəsmə adi həndəsi modelin hesabına bilər (Şəx.1). Məsaməli silisiuma (MS) silisium daxilindəki kvadratın təpələrində yerləşmiş, radiusu R olan silindrik məsamələr toplusu kimi baxılırsa, onda P məsaməliliyi məsamələrin ümumi həcmdəki pay nisbətində bərabər olur və aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$P = \frac{V_{mes.}}{V} = \frac{S_{mes.}}{S} = \frac{\pi R^2}{(2R + \delta)^2}. \quad (1)$$

Burada, $V_{mes.}$, $S_{mes.}$ - məsamələrin V həcmində (S səthində) tutduqları həcm (sahə), δ - məsamələr arasındakı ən qısa məsafədir. (1) düsturundan δ kəmiyyətinin məsaməlilik və məsamənin radiusundan asılılığı düsturu alınır:

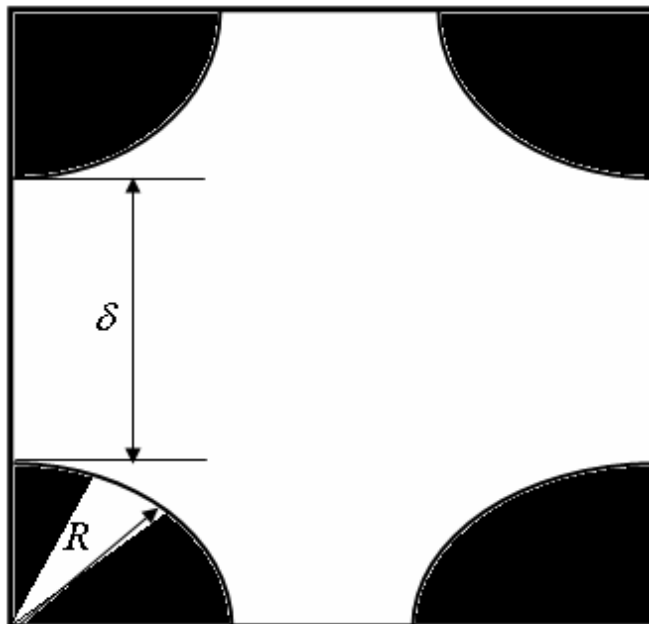
$$\delta = \frac{R \cdot \left(\pi^{\frac{1}{2}} - 2P^{\frac{1}{2}} \right)}{P^{\frac{1}{2}}}. \quad (2)$$

Bu düsturun köməyiylə alınmış nəticələr orta və böyük P -lər üçün 1 saylı işdə təsvir edilmiş qrafik asılılıqlara uyğun gəlir. (2) düsturu əsasında aparılmış hesablamalar göstərir ki, məsaməliliyi 5%, məsamələrinin eninə ölçüsü 1,6 $m\mu m$ olan makroməsaməli silisiumda δ kəmiyyəti 5 $m\mu m$ -dan böyük olduğu halda, məsaməliliyi 30%, məsamələrinin eninə ölçüsü 10 nm olan mezoməsaməli silisiumda bu parametrlər 7 nm -a bərabərdir. Yüksək məsaməli silisiumda materialın strukturu ciddi dəyişikliklərə məruz qaldığından, bu halda 1 saylı şəkildə göstərilmiş hən-

dəsi modelin tətbiqi qeyri-mümkün olur. Verilmiş halda ayrı-ayrı silisium nanokristallitləri onları örtən elektrokimyəvi reaksiya məhsulları ilə bir-birindən izolə olunmuşlar. Məhz bu fakt MS-in elektrik xassələrinin rəngarəngliyinə aydınlıq gətirir və eksperimental faktların sistemləşdirilməsini tələb edir.

Elektrik xassələrinə görə məsaməli materialın 4 qrupa ayrılması təklif edilir.

I qrupa yoxsullaşmış oblastı olmayan və ya çox zəif olan məsaməli materiallar daxil edilir. Stibiumla güclü legirə olunan silisium lövhədə formalaşdırılmış və məsaməliliyi $8 \div 27\%$ olan MS I qrupa aid edilir. I qrup MS-də Holl effektinin ölçmələri başlanğıc silisiuma nəzərən monokristallik matrisdə elektronların konsentrasiyasının dəyişilmədiyini göstərir. MS-in xüsusi müqaviməti başlanğıc silisium altlığın xüsusi müqavimətindən $1,2 \div 1,7$ dəfə çoxdur. Müqavimətin bu qiyməti «silisium-hava» modelində effektiv mühitlər nəzəriyyəsi çərçivəsində aparılmış hesablamalarla uyğunluq təşkil edir. Başqa qrupların məsaməli təbəqələrindən fərqli olaraq, I qrup MS-ləri rütubətliyin dəyişməsinə və polyar molekulların mövcudluğuna həssas deyillər.

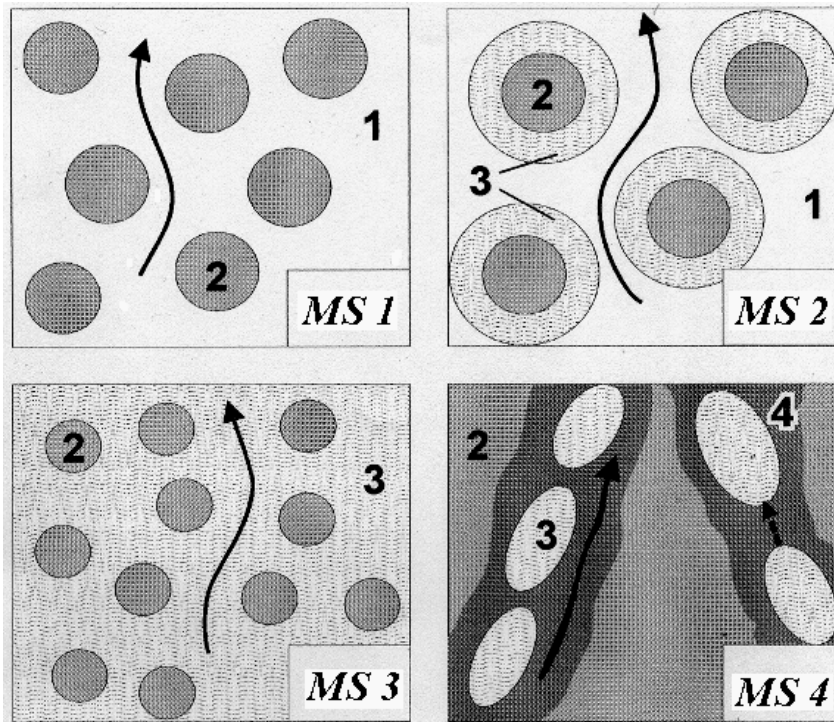


Şəkil.1 Məsamələr arasındakı məsafənin məsamənin radiusu və məsaməlilik dərəcəsindən asılılıq düsturunu çıxarmaq üçün təklif olunan həndəsi model.

II qrupa daxil olan məsaməli strukturlarda iri məsamələr arasındakı məsafə böyük olduğundan, məsamələr ətrafındakı yoxsullaşmış oblastlar bütöv örtük yarada bilmirlər. II qrup MS-də Holl ölçmələri göstəridi ki, məsamələr ətrafında elektronların konsentrasiyası azalır. MS-in xüsusi müqavimətinin artması məsaməlilik çəkisində effektiv mühitlər nəzəriyyəsinin nəticələri ilə uyğunlaşmasa da, bu nəzəriyyənin yoxsullaşmış oblastın tutduğu həcmi nəzərə alan variantı ilə uyğunlaşır. II qrupa daxil olan məsaməli strukturların xüsusi müqaviməti

başlangıç silisium altlığın müqavimətindən $1,6 \div 15$ dəfə böyükdür və yüklərin silisium matrisinin aşağıomlu yoxsullaşmamış sahələrində daşınması ilə əlaqələndirilir. Belə morfologiyaya malik olan MS-lər *n*-tip altlıqlarda effektiv formalaşsalar da, *p*-tip altlıqlarda formalaşma bilmələri də istisna deyil.

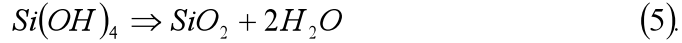
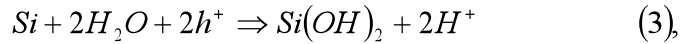
III qrupa güclü inkişaf etmiş xırda məsamələr şəbəkəsinə malik olan və məsaməlilik göstəricisi nisbətən yüksək olmayan ($40 \div 50\%$ -dən az) məsaməli strukturlar aiddir. Qonşu məsamələrin yoxsullaşmış oblastları bir-birini örtüyündən, monokristallik qalıq ya müxtəlif yoxsullaşma dərəcəli oblastlardan ibarət olan mərcanvari struktur, ya da məxsusi keçiriciliyə malik olan silisium olur. Baxılmış hallarla müqayisədə, bu qrupa daxil olan MS-də xüsusi müqavimət kəskin artır ($10^6 \text{ Om} \cdot \text{sm}$), yükdaşıyıcılarının yüksəkəomlu silisium matris boyunca həyata keçirilən dreyfi yüklənmiş divarlardan Kulon itələməsi ilə müşayiət edilir [2]. Elektrik keçiriciliyinin $300 \div 500 \text{ K}$ intervalındakı temperatur asılılığı müxtəlif aktivləşmə enerjilərinə malik olub ($0,32 \div 0,68 \text{ eV}$), aktivləşmə xarakteri daşıyır. Asılılığın belə xarakteri potensial relyefin fluktasiyaları ilə əlaqədardır. *p*-tip altlıqlarda formalaşdırılmış MS-də deşiklərə nisbətən yüksək elektron yüyrüklüyünə malik məxsusi yarımkəçiricilər üçün xarakterik olan effektiv elektron keçiriciliyi üstünlük təşkil edir.



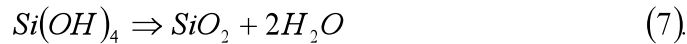
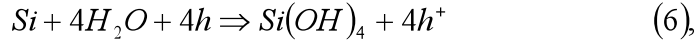
Şəkil 2 Müxtəlif qrupların MS-də yükdaşınması prosesinin sxematik təsviri. 1- başlangıç monokristallik matris, 2- məsamələr, 3-yoxsullaşmış oblastlar, 4- elektrokimyəvi reaksiyaların məhsulları.

IV qrupa strukturu və elektrik keçiriciliyi ciddi dəyişikliklərə məruz qalan yüksək məsaməli (45 ÷ 50%-dən böyük) MS-lər aiddir. MS - mürəkkəb kimyəvi tərkibli məsaməli silisiumda yerləşən, müxtəlif fraktal ölçülərə malik olan silisium nanokristallitlərindən ibarətdir. Ölçüləri onlarla nanometr olan nanokristallitlər silisiumun məhlulda həll olmayan və elektrokimyəvi reaksiyaların təsirinə məruz qalmayan oblastlarıdır. Nanokristallitlərin ölçüləri 4 *nm*-dən kiçik olduqda, yükdaşıyıcıların energetik spektrinin kvantlanmasına və qadağan olunmuş zonanın 1,8 *eV*-dan 2,9 *eV*-a qədər artmasına gətirib çıxaran kvant-ölçü effektləri meydana çıxır. Nəticədə dielektrik nüfuzluluğu azalır [3]. Silisium kristallitlərini elektrokimyəvi reaksiyanın məhsulları mühitində yerləşdirdikdə MS-in xüsusi müqaviməti bizim ölçmələrimizdə $10^9 \text{ Om} \cdot \text{sm}$, 7 saylı işdə isə $10^{12} \text{ Om} \cdot \text{sm}$ alınmışdır.

Otaq temperaturları oblastında qaranlıq keçiriciliyinin temperatur asılılığı aktivləşmə xarakteri daşıyan 4-cü qrup MS nümunələrində aktivləşmə enerjisi ilə eksponentanın əmsalı arasında Meyer-Neldelin iki qaydasına əsasən əlaqə vardır. Ölçü kvantlanmasının qrupun materiallarının elektrik keçiriciliyinin xarakterinə təsiri aşkar edilməmişdir. Səbəb daşıyıcıların dreifinin ən kiçik yüklərdə belə (0,1 *mkm*) kvant konfaynmentinin ölçülərindən (2 ÷ 5 *nm*) xeyli böyük olmasıdır [4]. Silisium nanokristallitləri yoxsullaşmaya məruz qalsalar da ($n = 10^{10} \div 10^{13} \text{ sm}^{-3}$), keçiriciliyin qiymətini daşıyıcıların konsentrasiyası deyil, daşınmanın xarakteri müəyyənləşdirir. Belə strukturun keçiriciliyi elektrokimyəvi reaksiya məhsulları mühitinin xüsusi müqavimətindən güclü asılı olduğundan, ya kristallitləri əhatə edən matris boyunca, ya da kristallitlərarası sıçrayışla (nanokristallitləri əhatə edən mühitin xüsusi müqaviməti çox böyük olduqda) həyata keçirilə bilər. Sonuncu hal elektrokimyəvi reaksiya məhsullarının yüksəkumlu SiO_x oksidlərinə çevrilməsi zamanı baş verə bilər [2]. Silisium nanokristallitləri ətrafında silisium oksidləri örtüyü həm anod elektrokimyəvi emalı, həm də silisiumun əlavə olaraq qismən oksidləşməsi nəticəsində yaranı bilər. Memminq və Şvandt tərəfindən təsvir olunmuş ilk hal [4] plavik turşusunun elektrolitdəki zəif konsentrasiyasına aiddir. Verilmiş şəraitdə elektrokimyəvi və kimyəvi reaksiyalar aşağıdakı kimi yazıla bilər:



Yüksək anod potensiallarında aşağıdakı reaksiyalar ardıcılığı müşahidə oluna bilər:



(3)-(5) və (6)-(7) reaksiyaları nəticəsində MS səthini və məsamələrin daxili divar səthini örtən, ellipsometrik ölçmələr və infraqırmızı udulma spektrində müşahidə edilən [5] SiO_2 nazik təbəqələri yaranır.

Müəyyən edilmişdir ki [5], SiO_2 örtüyünə bürünmüş silisium nanokristallitləri MS-in səthaltı təbəqəsində və ya qalın olmayan təbəqələrdə yaranır. Silisium nanokristallitlərinin oksid təbəqəsi silisiumun təbii şəraitdə qismən oksidləşməsi [6], anod və plazma oksidləşməsi [7], termik emal [8], anod elektrokimyəvi aşılama zamanı işıqlandırma [8], fotooksidləşmə metodlarının [7] tətbiqi nəticəsində yarana bilər. Müəyyən olunmuşdur ki, oksidləşmə prosesi MS-də səth tələlərinin konsentrasiyasını azaltsa da, nanokristallitlərin həcmində yeni tələ səviyyələrinin yaranmasına səbəb olur [5]. 9 saylı işdə məsamə divarlarını örtən elektrokimyəvi reaksiya məhsullarının SiO_2 tərəfindən örtülməsi modelinə baxılmışdır. Belə strukturlarda yük daşınması prosesi nanokristallitlər arasında daşıyıcıların sıçrayışları ilə əlaqədardır. 4-cü qrup MS-də

yükdaşıyıcıların yüyrüklüyü geniş intervalda dəyişir: $10 \div 10^{-5} \frac{sm^2}{V \cdot san}$

[8]. $\alpha - Si:H$ -fazasına yaxın xassəli mühitlərdə yükdaşıyıcıların

yüyrüklüyünün nisbətən yüksək qiymətləri alınır: $10^2 \div 10^{-3} \frac{sm^2}{V \cdot san}$.

Qismən oksidləşmiş nanokristallitləri SiO_2 ilə əhatə olunmuş MS-də [4] yükdaşıyıcıların uçuş müddətinin təyin olunması metodu ilə ölçmələr aparılarkən yüyrüklüyün daha kiçik qiymətləri müşahidə edilmişdir.

Qeyd edək ki, təqdim olunmuş təsnifat bilərəkdən sadələşdirilmişdir. Bir sıra hallarda MS-də yükdaşıyıcılarının daşınmasına müəyyən təsir göstərə bilən MS-in üçkomponentli strukturu (silisium+məsamə+elektrokimyəvi reaksiyanın məhsulları), keçiriciliyin məsamə səthindəki ionların miqdarından asılılığı, materialda tələlərin olması nəzərə alınmamışdır. Bundan əlavə, anod aşılama zamanı qeyri-bircinsliliyi sayəsində MS-də digər qruplara da aid olan lokal oblastların, qalınlığına görə fərqli elektrik xassələrinə malik olan MS təbəqələrinin yaranmasını nəzərə almaq lazımdır. MS-in elektrik xassələrinin təsnifatı 1 saylı cədvəldə göstərilmişdir.

Məlumdur ki, SiC ; $GaAs$ məsaməli materiallarında yükdaşıyıcıların dreyfi MS-də daşınmanın ümumi qanunauyğunluqlarına tabe olur. Eksperimental tədqiqatlar göstərir ki, yalnız Fe və Mn -la güclü legirə olunmuş ($10^{22} sm^{-3}$) amorf silisiumun məsaməli təbəqələri özəl elektrik xassələrinə malikdirlər [10]. Belə materiallarda topoloji nizamsızlıq nəticəsində sərbəst qaçış yolunun uzunluğu az olub, bir neçə atomlararası məsafəyə bərabərdir. Bu, bir tərəfdən, amorf silisiumun eninə ölçülərindən xeyli kiçik, digər tərəfdən, de Broyl dalğasının uzunluğundan xeyli böyükdür ($1nm$). Ona görə də belə obyektlərdə ölçü kvantlanması və sərhədyanı səpilmə effektləri yaranmadığından, MS üçün xarakterik olmayan klassik ölçü hadisələrinin baş verməsinə səbəb olur.

Cədvəl 1

QRUP	Yoxsullaşmış oblastların xassələri	300 K temperaturda keçiriciliyin xarakteri	Keçiriciliyin temperatur asılılığı
1	Yoxsullaşmış oblastlar zəifdir və ya yoxdur.	Silisiyum matris boyunca elektrik keçiriciliyi «Si+hava» modeli çərçivəsində effektiv mühitlər nəzəriyyəsinə uyğundur. $\rho_{MS} / \rho_{MK} \approx 1,2 \div 1,7$	Başlangıç silisiumda olduğu kimi
2	Qonşu məsələlərin yoxsullaşmış oblastları kəşifdir.	Silisiyum matrisin yoxsullaşmamış sahələr boyunca elektrik keçiriciliyi «Si+(hava+ Yoxsullaşmış oblastlar)» modeli çərçivəsində effektiv mühitlər nəzəriyyəsinə uyğundur. $\rho_{MS} / \rho_{MK} \approx 1,6 \div 15$	analoji
3	Yoxsullaşmış oblast məsələlərsiz fəzayı tam doldurur.	Fluktasiya edən potensial relyef modelində yoxsullaşmış silisiyum matris boyunca keçiricilik $\rho_{MS} / \rho_{MK} \approx 10^8$	Keçiriciliyin Meyer-Neldel qaydasına tabe olmayan, müxtəlif aktivləşmə enerjilərinə malik aktivləşmiş xarakteri
4	Yoxsullaşmış, müxtəlif fraktal ölçülü silisiyum nanokristallitləri elektro-kimyəvi reaksiyanın məhsulları ilə əhatə olunmuşlar.	Kristallitlərarası mühit və ya kristallitlərarası sıçrayışlar vasitəsilə elektrik keçiriciliyi $\rho_{MS} / \rho_{MK} \approx 10^{11}$	Keçiriciliyin Meyer-Neldelin 2 qaydası ilə aktivləşmiş xarakteri

ƏDƏBİYYAT

1. Lehmann V., Gosele U. Porous silicon formation: a quantum wire effect // Appl. Phys. Lett.- 1991.- V.58.- P.856-858.
2. Lehmann V., Hofmann F., Muller F. et al. Resistivity of porous silicon: a surface effect // Thin Sol. Films.- 1995.- V.255.- P.20-22.
3. Tsu R., Babic D. Doping of a quantum dot // Appl. Phys. Lett.- 1994.- V.64.- P.1806-1808.
4. Fejfar A., Pelant I., Sipek E. et al. Transport study of self-supporting porous silicon // Appl.Phys. Lett. - 1995.- V.66.- P.1098-1100.
5. Makara V.A., Odarych V.A., Vakulenko O.V. et al. Ellipsometric studies of porous silicon // Thin Sol. Films.- 1999.- V.342.- P.230-237.
6. Dalba G., Daldosso N., Fornasini P. et al. Quantum confinement in porous silicon as a function of size distribution of luminescent sites // Electrochem. Soc. Proc.-1999.- V.99-22.- P.10-21.
7. Grosman A., Chamarro M., Morazzani V. et al. Study of anodic oxidation of porous silicon: relation between growth and physical properties // J. of Lumin.- 1993.- V.57.- P.13-18.
8. Simons A.J. Carrier mobility in porous silicon / In: Properties of porous silicon. Ed. by Canham L., DERA.- 1997.- P.176-184.

9. Morazzani V., Chamarro M., Grosman A. Partial oxidation of porous silicon by thermal process: study of structure and electronic defects // J. of Lumin.- 1993.- V.57.- P.45-49.
10. Башченко С.Н., Блонский И.В., Бродун М.С. и др. Эффект воздействия ультрафиолетового излучения на температурную зависимость фотолюминесценции в пористом кремнии // ЖТФ.- 2001.- Т.71.- С.66-71.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Р.Ш.РАГИМОВ, Г.А.ГАСАНОВ

РЕЗЮМЕ

Статья посвящена актуальной теме полупроводниковой электроники- систематизации различных групп пористого кремния, отличающихся друг от друга по морфологии пор и по степени пористости. По предложенной классификации электрических свойств пористого кремния, структуры можно объединить в 4-х группах. Составлена таблица, отражающая классификацию электрических свойств пористого кремния.

CLASSIFICATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF POROUS SILICON

R.SH.RAGIMOV, Q.A.QASANOV

SUMMARY

This paper is devoted to the urgent problem of semiconductor electronics-systematization of various groups of porous silicones, distinguished on morphology of porosities and degrees of porosity. On the base of classification suggested the electrical properties of porous silicon to be combined with 4 groups. A table reflecting the classification of electrical properties of porous silicon was prepared.