

MÜXTƏLİF MƏSAMƏ MORFOLOGİYASINA MALİK OLAN MƏSAMƏLİ SİLİSIUM TƏBƏQƏLƏRİNDƏ TENZOREZİSTİV EFFEKT

H.Ə. HƏSƏNOV

MTN-in H. Əliyev adına Akademiyası

Elastiki əyilmə deformasiyasının müxtəlif morfolojiyalı və məsamələr ətrafında fərqli yoxsullaşma oblastlarına malik olan məsaməli silisium (MS) təbəqələrinin elektrik xassələrinə təsiri tədqiq edilmişdir. *p*- və *n*-tip keçiriciliyə malik olan silisium səthində anod elektrokimyəvi aşılma metodu vasitəsilə formalaşdırılmış MS nümunələrin məsaməliliyi 5-68% olmuşdur. Deformasiya zamanı MS-in elektrik keçiriciliyinin dəyişilmə xarakterinin məsaməli materialın struktur xüsusiyyətlərindən asılı olması müəyyən edilmişdir. Alınmış nəticələr MS-də yükdaşınması prosesini təsvir edən müxtəlif fiziki modellər vasitəsilə əsaslandırılmışdır.

GİRİŞ

Məsaməli silisium (MS) müasir elektronikanın perspektivli materiallarından sayılır. MS-in heteroepitaksiyada bufer təbəqəsi, yarımkeçirici cihazların aktiv elementləri, ultrasəs elektronikasının tərkib elementləri qismində tətbiq imkanları onun mexaniki xassələrinin tədqiqini zəruri edir. MS-in mexaniki xassələri haqqında informasiya kifayət qədər məhduddur, tenzorezistiv effekt barədə isə ümumiyyətlə, informasiya yoxdur.

Təqdim olunmuş işdə məqsəd - müxtəlif morfolojiyalı və məsaməliliyə malik olan MS təbəqələrində tenzorezistiv effektin kompleks tədqiqidir.

Məlumdur ki, MS-in məsaməliliyi 3%-dən 95%-ə qədər olan geniş intervalda dəyişə bilər. MS-lə aparılan istənilən tədqiqatın mürəkkəbliyi, onun struktur parametrlərinin daim nəzarət altında saxlanması ilə bağlıdır. [1] işində göstərilmişdir ki, məsaməlilikdən, məsamə morfolojiyasından və məsamə ətrafında yoxsullaşmış oblastların yaranma mexanizmindən asılı olaraq, MS-i elektrik xassələrinə görə 4 qrupa bölmək olar. Qruplar materialın elektrik keçiriciliyinin qiymətini, onun temperatur və işıqlanmadan asılılığını müəyyən edən yükdaşıyıcıların dreyf mexanizminə görə bir-birindən fərqlənir. 1-ci qrupa aid olan MS-də (MS1) məsaməlilik az, yoxsullaşmış oblastlar olmadığına görə, yükdaşıyıcıların dreyfi monokristal matris boyunca həyata keçirilir və effektiv mühitlər nəzəriyyəsi çərçivəsində «silisium+məsamələr» modeli vasitəsilə təsvir edilir. 2-ci qrupa aid olan MS (MS2) üçün böyük olmayan məsaməlilik və yoxsullaşmış oblastların mövcudluğu xarakterikdir. Yükdaşıyıcıların monokristal matrisin yoxsullaşmamış oblastları boyunca baş verən dreyfi effektiv mühitlər nəzəriyyəsi çərçivəsində « silisium+məsamələr+(yoxsullaşmış oblastlar)» modeli vasitəsilə təsvir olunur. Məsaməliliyi 50%-dən böyük olmayan 3-cü qrupa aid olan MS-də (MS3) yoxsullaşma məsamələrarası fəzanı tam əhatə etdiyindən, yükdaşıyıcıların yoxsullaşmış monokristal matris boyunca yerinə yetirilən dreyfi güclü kompensə olunmuş nizamsız kiçik miqyaslı fluktuasiyalara malik olan yarımkeçiricilər nəzəriyyəsinin köməyi ilə izah olunur. 4-cü qrupa aid olan MS (MS4) yüksək məsaməlilik və materialda monokristal matrisdəki silisium nanokristallitlərini örtən elektrokimyəvi reaksiya məhsullarının olması ilə xarakterizə edilir. Anodlaşma şəraitindən asılı olan örtüyün tərkibi amorf hidrogenləşdirilmiş silisium α -Si:H fazasından müxtəlif SiO_x fazalarına qədər dəyişə bilər. Bu halda yükdaşıyıcıların dreyfi ya kifayət qədər aşağıomlu α -Si:H fazası boyunca, ya da nanokristallitlər arasında sıçrayışlarla həyata keçirilir.

2-5 sayılı işlərdə göstərilmişdir ki, müxtəlif qruplara məxsus olan MS 450-500°S-də təsirsiz mühitdə aparılmış ter-

modəmləmə və 2MeV enerjili elektronlarla şüalanma kimi xarici təsirlərə fərqli reaksiya verirlər. Tədqiqat zamanı məqsədimiz iki əsas məsələnin həllinə yönəldilmişdir. Əvvəla, bütün qruplara aid olan MS-də tenzorezistiv effektin hesablanması zəruri idi. İkincisi, alınmış nəticələrin [1] işində təklif olunmuş model çərçivəsində izah olunması mühüm əhəmiyyət kəsb edirdi. Bu baxımdan ölçmələr MS-li silisiumda, həm də onun formalaşdırıldığı müvafiq kristalloqrafik orientasiyaya malik olan monokristal silisiumda da paralel olaraq yerinə yetirildi.

EKSPERİMENT

Məsaməli təbəqələr Unno-Imayi maye kontakt metodu vasitəsilə elektrokimyəvi anod aşılmasının köməyi ilə alınmışdır [6]. Silisiuma vurulan aşqarın keçiricilik tipinin, elektrolitin tərkibinin, anodlaşma şəraitinin variasiyaları ilə [1] işində təklif olunmuş təsnifatın bütün qruplarına aid olan və məsaməlilikləri 5-68% intervalında dəyişən MS nümunələrinin alınması mümkün oldu. Anodlaşma cərəyanının *j* sıxlığı və elektrokimyəvi emalın *t* müddəti 1-ci cədvəldə verilmişdir. MS1, MS2, MS3, MS4 alınması üçün monokristal silisium altlığın xüsusi müqaviməti müvafiq olaraq, 0,01; 4,5; 0,01; 0,01 və 0,03 Om·sm olmuşdur. MS səthindəki amorflaşmış təbəqə plazmakimyəvi aşılama metodları ilə ləğv edilmişdir. Nümunələrin məsaməliliyi qravimetrik metodla təyin edilmişdir. Alınmış məsaməli təbəqələrin qalınlığı 40-120mkm olmuşdur. Rentgen difraktometriyası metodu vasitəsilə MS4 nümunələrində tərkibinə görə amorf silisiuma bənzərən elektrokimyəvi reaksiya məhsullarının olması aşkara çıxarıldı.

MS/MK ikitəbəqəli strukturları və ilkin monokristal silisium altlıqdan 20×5mm² ölçülü sınaq təbəqələri kəsilmiş və uzun tərəf monosilisiumun baza kəsiyinə paralel götürülmüşdür. Termovakuum tozlanması metodu ilə MS və MK səthinə yapışdırılmış alüminium kontaktlar 10dəq. müddətində 300°S-də termik təsirə məruz qalmışlar. Yay poladından hazırlanmış lövhəyə yapışdırılan test strukturlarının bir ucu tərپənməz bərkidilmiş, digər ucuna isə sıxılma və dartılma deformasiyası yaradan əyilmə təsiri edilmişdir. Nümunənin uzun tərəfi polad lövhənin oxu boyunca yönəlir.

Nisbi deformasiya

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \cdot \frac{ah}{L^3} \cdot c \quad (1)$$

düsturuna əsasən təyin olunur. Burada, *a*-nümunənin mərkəzindən polad altlığın sərbəst ucuna qədər olan məsafə, *h*-

altlığın qalınlığı, L -altlığın uzunluğu, c - əyilmənin şaquli istiqamətdə ədədi qiymətidir. MS-in dartılması və sıxılması ilə müşayiət olunan əyilmə deformasiyasında 1-ci halda $\varepsilon > 0$, 2-ci halda isə $\varepsilon < 0$ olur. Məlumdur ki [7], zəif bir-

cins əyilmədə (elatiki deformasiya) tədqiq olunan nümunənin bütün həcm elementləri monosilium altlığın kəsiyinin baş kristalloqrafik oxu istiqamətində deformasiyaya uğrayacaqlar.

Cədvəl 1.

Məsaməli təbəqələrin alınma şəraiti və parametrləri

MS qrupu	Altlıq	Alınma şəraiti	$P, \%$	dMS
MS1	$n^+ - Si <Sb>, (111)$	$j=10mA/sm^2, t=40$ dəq. HF-in 48%-li su məhlulu	23	48
MS2	$n - Si <P>, (100)$	$j=10mA/sm^2, t=30$ dəq. HF-in 48%-li su məhlulu	5	100
MS3	$p^+ - Si <Sb>, (111)$	$j=10mA/sm^2, t=40$ dəq. HF-in 48%-li su məhlulu	20	42
MS4	$p^+ - Si , (111)$	$j=50mA/sm^2, t=10-60$ dəq. HF-in 48%-li su məhlulu: İzotropil spirti	48-60	72-121

Eksperimentdə deformasiyanın $\varepsilon \pm 1 \cdot 10^{-3}$ qiymətləri tətbiq olunmuşdur. Bu faktor MS nümunəsinin məxsusi mexaniki deformasiyasının bir tərtib yüksəltdiyindən [8], sonuncunu eksperimental nəticələri təhlil edərkən nəzərə almamaq mümkündür. Test strukturlarının elektrik keçiriciliyi həm qaranlıqda, həm də spektrin görünən oblastında əlavə işıqlanma şəraitində ölçülmüşdür. Deformasiyaetdirici qüvvənin təsiri kəsildikdən sonra bütün nümunələrdə elektrik keçiriciliyi öz ilkin- deformasiyaya qədər olan qiymətini bərpa etmişdir. Deməli, deformasiya elastikidir. MS nümunələrində dəfələrlə aparılmış ölçmələrin nəticələrinin üst-üstə düşməsi verilmiş deformasiya intervalında strukturun sabit qalmasını sübut edir. Tenzorezistiv effektin kəmiyyətə xarakterizə olunması üçün müqavimətin nisbi dəyişməsi ($\Delta R/R_0$) və tenzohəssaslıq əmsalından ($K_T = \Delta R/(R_0 \cdot \varepsilon)$) istifadə edilmişdir. Burada, R_0 - nümunənin ilkin vəziyyətdəki elektrik müqaviməti, ΔR -isə deformasiya zamanı elektrik müqavimətinin dəyişməsidir.

[1] işində təklif olunmuş təsnifata görə qrupların müqavimətləri bir-birindən kəskin fərqləndiyindən, bu qruplara aid olan MS-in elektrik keçiriciliyi müxtəlif üsullarla təyin edilmişdir [3].

ALINMIŞ NƏTİCƏLƏR

n -tip monokristal silisiumda tenzorezistiv effektin ölçmələri göstərdi ki, nümunənin dartılması ilə müşayiət olunan əyilmə deformasiyasında elektrik keçiriciliyi azalır; nümunə sıxıldıqda isə artır. p -tip keçiriciliyə malik olan monokristal silisiumda əks mənzərə müşahidə olunur. Silisium tenzorezistorlar üçün bu hal yaxşı məlumdur [9] və elektron və deşik tip keçiriciliyə malik olan silisiumda tenzohəssaslıq əmsalının, müvafiq olaraq, mənfi və müsbət qiymətlərinə uyğun gəlir. Deformasiyanın maksimal qiymətində monosilium və MS/MK (monokristal silisium) strukturu müqavimətlərinin nisbi dəyişməsi 2-ci cədvəldə göstərilmişdir.

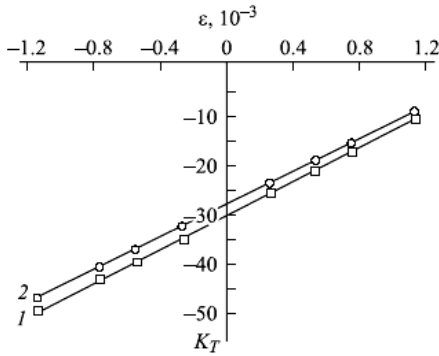
Cədvəl 2.

Deformasiyanın müxtəlif qruplara aid olan MS-lərin və müvafiq monokristal altlığın müqavimətlərinin nisbi dəyişməsinə təsiri

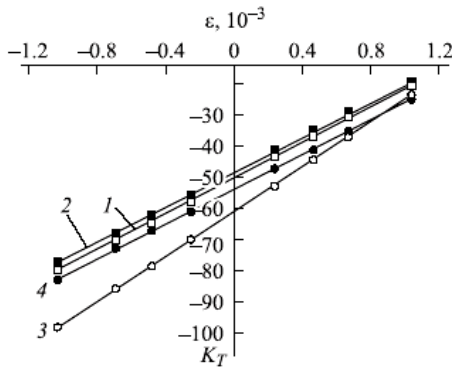
Material	Deformasiya $\varepsilon \approx 10^{-3}$			
	Qaranlıqda		İşıqlanma	
	$(\Delta R/R_0)$ Sıxılma	$(\Delta R/R_0)$ Dartılma	$(\Delta R/R_0)$ Sıxılma	$(\Delta R/R_0)$ Dartılma
MS1 $n^+ - Si <Sb>, (111)$	0.050 0.046	-0.012 -0.007	0.051 0.044	-0.011 -0.008
MS2 $n^+ - Si <P>, (100)$	0.098 0.076	-0.019 -0.019	0.082 0.079	-0.025 -0.017
MS3 $p^+ - Si , (111)$	0.048 -0.032	-0.010 -0.100	-0.035 -0.030	0.120 0.100
MS4	Tenzorezistiv effekt baş vermir			

Cədvəlin təhlilindən görünür ki, MK-ya nisbətən MS-də dəyişmənin xarakteri barədə proqnoz vermək daha çətindir və qaranlıq şəraitində MS1-MS3 nümunələrində, aşqarın növündən asılı olmayaraq, əyilmə deformasiyasında məsaməli təbəqənin sıxılması nəticəsində müqavimət artır, dartılması nəticəsində isə əksinə-azalır. Eksperimentin dəqiqliyi hüdudunda MS4 nümunələrində tenzorezistiv effektin meydana çıxması faktını xüsusi qeyd etmək

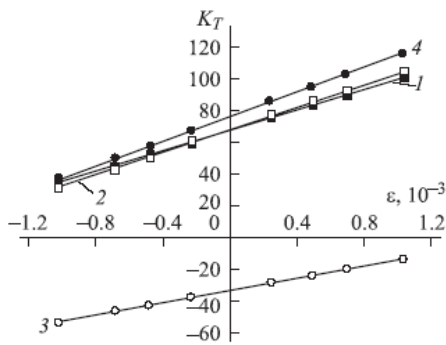
lazımdır. MS1-MS3 nümunələrində K_T əmsalının qiyməti qaranlıqda mənfi olmaqla yanaşı ε -dan asılı olur. MS1, MS2, MS3 nümunələri üçün qaranlıqda və əlavə işıqlanma şəraitində tenzohəssaslıq əmsalının deformasiyadan asılılığı müvafiq olaraq, 1-3-cü şəkillərdə göstərilmişdir. Müqayisə üçün MK-nın analoji asılılığı da bu şəkillərdə verilmişdir.



Şəkl.1. MS1-də və ilkin n^+ -Si<Sb> silisiumda K_T tenzohəssaslıq əmsalının deformasiyadan asılılığı. 1- məsaməli silisium, 2- ilkin monokristal silisium.



Şəkl.2. MS1-də (3,4) və ilkin silisiumda (1,2) K_T tenzohəssaslıq əmsalının deformasiyadan asılılığı. 1,3-qaranlıq şəraitdə; 2,4- əlavə işıqlanma rejimində.



Şəkl.3. MS3-də (3,4) və ilkin silisiumda (1,2) K_T tenzohəssaslıq əmsalının deformasiyadan asılılığı. 1,3-qaranlıq şəraitdə; 2,4- əlavə işıqlanma rejimində.

ALINMIŞ NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ

Deformasiya zamanı MS1-də müqavimətin nisbi dəyişməsi 5%-dən böyük olmamışdır (Çədvəl.2) və monokristal silisiumun analoji parametri ilə, demək olar ki, eynidir. Əlavə işıqlanma tenzoeffektə təsir etmir. MS1 və stibiumla güclü aşqarlanmış ilkin monokristal silisiumun tenzorezistiv xassələrinin bənzərliyini (Şəkl.1) MS1-də yoxsullaşmış oblastların olmaması ilə izah etmək olar. Bu halda məsaməli materialın xüsusi müqaviməti, effektiv mühitlər nəzəriyyəsinə görə,

$$\rho_{MS} = \rho_{MK} \frac{1+P}{1-P} \quad (2)$$

düsturuna əsasən təyin olunur. Burada, ρ_{MK} , ρ_{MS} - müvafiq olaraq, ilkin MK-nın və məsaməli təbəqənin xüsusi müqavimətləridir. Elastiki deformasiya MS-in P məsaməliliyinə təsir etmədiyindən, (2) düsturuna əsasən, MS1-in və ilkin MK-nın elektrik xassələrinin dəyişməsi eyni xarakterlidir.

MS2 təbəqələri qaranlıqda ilkin MK-ya nisbətən daha böyük tenzohəssaslığa malikdirlər (Şəkl.2-də 1 və 3 xətləri). Əlavə işıqlanma rejimində MS2-nin tenzohəssaslığı müntəzəm azalaraq, ilkin MK-nın tenzohəssaslığı səviyyəsinə düşür. İlkin MK-da tenzohəssaslıq əmsalının əlavə işıqlanmadan elə bir güclü asılılığı müşahidə olunmamışdır. Eksperimental faktlar toplusunu məsamələr ətrafında yaranan yoxsullaşmış oblastların olması ilə izah etmək olar. Yoxsullaşmış oblastları nəzərə aldıqda, məsaməli materialın xüsusi müqavimətini effektiv mühitlər nəzəriyyəsinin köməyiylə aşağıdakı düstur vasitəsilə təyin etmək olar:

$$\rho_{MS} = \rho_{MK} \cdot \frac{1+P^*}{1-P^*} \quad (3)$$

Burada, P^* - həm məsamə fəzasını, həm də məsaməətrafi yoxsullaşmış oblastı nəzərə alan effektiv məsaməlilikdir. MS2-də MK-ya nisbətən tenzohəssaslıq əmsalının böyük olması yoxsullaşmış oblastların töhfəsi ilə bağlıdır. Əlavə işıqlanma zamanı K_T -in azalaraq MK-nın analoji parametrinə yaxınlanması yoxsullaşmış oblastlarda yükdaşıyıcıların miqdarının artması nəticəsində effektiv məsaməliliyin azalması ilə əlaqədardır.

Əlavə işıqlanma zamanı MS3-də tenzohəssaslıq əmsalının işarəsinin «+»-dən «-»-yə dəyişməsi hadisəsi müşahidə olunmuşdur. Bundan əlavə, əlavə işıqlanma zamanı məsaməli strukturun tenzohəssaslıq əmsalının qiyməti MK-nın analoji parametrinin yaxın olur. Bu faktı belə izah etmək olar: məlumdur ki [1], $p^+ - Si(B)$ səthində formalaşdırılmış azməsaməli silisiumda keçiriciliyin effektiv elektron tipi mövcuddur. MS3-ün monokristal matrisində dəşik konsentrasiyası kəskin azaldığından, materialın keçiriciliyi məxsusi keçiriciliyə yaxınlaşır. Qeyd olunan fakt qaranlıqda tenzohəssaslıq əmsalının mənfi olmasını izah edir. İşıqlanma MS3-də dəşiklərin konsentrasiyasını kəskin artırır və keçiricilik dəşik tip olur. Termoehtq ölçmələri bu faktı sübut edir. Nəticədə K_T əmsalı p-tip silisium tenzorezistorlar üçün xarakterik olan müsbət qiymət alır.

Aparılmış tədqiqatlar MS4 təbəqələrində, hətta maksimal deformasiyada da, eksperimentin dəqiqliyi hüdudunda tenzorezistiv effektin olmamasını aşkara çıxardı. Bu fakt yükdaşıyıcıların dreyfinin silisium nanokristallitlərini bürüyən örtük boyunca həyata keçirilməsi modeli çərçivəsində əsaslandırılır [1,3].

YEKUN

Beləliklə, elastiki deformasiyanın müxtəlif qruplara aid olan MS-lərdə elektrik keçiriciliyinə təsirinin tədqiqinə həsr olunmuş eksperimentlər toplusu qrupların deformasiyaya fərqli reaksiya verməsini göstərdi. Qrupların deformasiyaya reaksiyasının yükdaşıyıcıların nəqlinin [1] işində təsvir olunmuş model əsasında izah oluna bilməsini xüsusi qeyd etmək lazımdır.

- [1] *H.Ə. Həsənov, R.Ş. Rəhimov.* Bakı, Bakı Universitetinin Xəbərləri, fizika-riyaziyyat elmlər seriyası, 2008, №1, səh.134-140.
- [2] *H.Ə. Həsənov.* Fizika, 2007, XIII cild, №5, səh.88-92.
- [3] *H.Ə. Həsənov.* Bakı, «AzTU-nun mətbəəsi», Azərbaycan Texniki Universiteti, «Elmi əsərlər», Fundamental elmlər, 2007, VI cild(24), №4, səh.25-29.
- [4] *H.Ə. Həsənov.* Fizika, 2008, XIV cild, №1, səh.22-26.
- [5] *H.A.Hasanov, M.I. Murquzov, R.Sh. Rahimov.* Volt-ampere characteristic of test structures with thick layers of porous silicon. Materialı pyatoy mejdunarodnoy nauçno-texniçeskoy konferensii «Aktualniye problemi fiziki» posvəşşennoy 85-letiyu Qeydara Aliyeva, Bakı, «VIP TREYD LTD» MMC nəşriyyatı, 2008, səh.244-246.
- [6] *H.Ə. Həsənov, A.Y. Həşimova.* Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, Bakı, «VIP TREYD LTD» MMC nəşriyyatı, 2007, №2, səh. 34-50.
- [7] *E.V. Kuçis.* Qalvanomaqnitniye effekti i metodu ix issledovaniya. M., Radio i svyaz, 1990, 245s. (Rusca)
- [8] *H.Ə. Həsənov, M.I. Murquzov, R.Ş. Rəhimov.* Məsaməli silisium (MS) səthində formalaşdırılmış alüminium təbəqələrin strukturunun tədqiqi. S. Hacıyevin 80 illik yubileyinə həsr olunmuş «Fizikanın müasir problemləri» II Respublika konfransının materialları, Bakı, «Bakı Universiteti» nəşriyyatı, noyabr, 2008, səh.26-29.
- [9] *H.A. Hasanov.* Fizika, 2008, XIV cild, №4, səh.31-33.

H.A. Hasanov

TENSORESISTIVE EFFECT IN POROUS SILICON FILMS WITH DIFFERENT MORPHOLOGY

The influence of bending elastic deformation on the electrical conductivity of porous silicon with different pore morphology and different properties of depleted regions around the pores is investigated. Porous layers with the porosity of 5-68% are obtained by the method of anodic electrochemical pickling on silicon plates of p- and n-types of conductivity. It is shown that the character of observable conductivity changes of porous silicon at deformation depends on structure peculiarities of porous material. Different physical models of carrier transfer in porous silicon are used for the explanation of obtained results.

Г.А. Гасанов

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В СЛОЯХ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ

Исследовано влияние упругой деформации изгиба на электропроводность пористого кремния с различной морфологией пор и с различными свойствами обедненных областей вокруг пор. Пористые слои были сформированы методом анодного электрохимического травления на кремниевых пластинах р- и п-типа проводимости и обладали пористостью 5-68%. Показано, что характер наблюдаемых изменений электропроводности пористого кремния при деформации зависит от особенностей структуры пористого материала. Для объяснения полученных результатов используются различные физические модели переноса носителей заряда в пористом кремнии.

Received: 02.10.2009