

## $p^+$ - Si ƏSASINDA YARADILMIŞ MEZOMƏSAMƏLİ SİLİSIUMDA YÜKDAŞIYICILARIN DAŞINMASI PROSESLƏRİ

H.Ə. HƏSƏNOV

MTN-in H. Əliyev adına Akademiyası

$p^+$ - Si əsasında yaradılmış və məsaməliliyi böyük olmayan (16÷30%) mezoməsaməli silisiumun elektrik xassələri eksperimental tədqiq edilmişdir. Alınmış nəticələr 30÷50% məsaməlilik intervalında ümumiləşdirilmişdir. Məsaməli silisium təbəqəsinin altlığa nəzərən keçiricilik tipinin dəyişməsi effekti aşkar edilmişdir. Eksperimentin nəticələri aşqar atomlarının (bor) hidrogenlə passivləşdirilməsi modelinin köməyi ilə izah olunmuşdur. Məsaməli silisiumun elektrik xassələrinin tədqiqi zamanı istifadə olunan digər modellərin üstün cəhətləri və çatışmazlıqları araşdırılmışdır.

$p$  - silisium altlığında formalaşdırılmış mezoməsaməli strukturlu məsaməli silisium (MS) bir sıra özəl xassələrə malik olduğundan, onun tədqiq edilməsinə çoxlu sayda işlər həsr olunmuşdur [1,2,3,4,5,6]. Verilmiş MS məsamələrinin eninə ölçüləri 1nm-dan onlarla nm-ya qədər dəyişən inkişaf etmiş sistemdir.  $p^+$ - Si əsasında yaradılmış mezoməsaməli nümunələr  $p^-$ - Si altlıqlı mezo- və mikroməsaməli nümunələrə nisbətən daha böyük elektrik keçiriciliyinə malik olduqlarından, elektrolüminessensiya yuvacıqlarının hazırlanması üçün perspektivli materiallar sayılırlar. Mezoməsaməli silisiumun strukturu ədədi qiyməti 15÷60% intervalında dəyişən məsaməlilik göstəricisindən asılıdır.  $p^+$ - Si əsasında yaradılmış mezoməsaməli silisiumun elektrofiziki xarakteristikalarını təyin edərkən əsas çətinliklər, birincisi, MS təbəqələrinin yüksəkəməli olması, ikincisi, strukturun metal və monokristallik altlıqla sərhədlərində eksperimentin nəticələrində parametrləri nəzərə alınmalı olan düzləndirici keçidlərin mövcudluğudur.

Birinci mərhələdə məsaməliliyi böyük olmayan (16÷30%), sonra isə 30÷50% məsaməlilik intervalında  $p^+$ - Si əsasında yaradılmış mezoməsaməli silisiumun elektrik xassələri eksperimental tədqiq edilmişdir.

Böyük olmayan məsaməliliyə malik olan MS nümunələri ҚДБ-0,03 (111) altlığında elektrokimyəvi aşılama metodu ilə plavik turşusunun 48%-li su məhlulunda

$10 \frac{mA}{sm^2}$  və  $15 \frac{mA}{sm^2}$  anodlaşma cərəyanı sıxlığında alınmışlar.

Anodlaşma 10÷60 dəqiqə müddətində aparıldıqda, MS təbəqələrinin qalınlığı 15mkm-dan 60mkm-ya qədər artır. Nümunələrin çəki məsaməliliyi 16÷30% təşkil edir. Analoji anod emalı rejimində plazmakimyəvi metodla formalaşdırılmış «şahid» nümunələrin amorflaşmış səth təbəqəsi (AST) tamamilə ləğv edilmişdir. Beləliklə, aparılmış tədqiqatlar həm elektrofiziki parametrləri, həm də MS səthindəki amorf təbəqəni qiymətləndirməyə imkan verir. Termovakuum tozlanması metodu ilə MS və monokristallik silisiumun səthinə çəkilmiş alüminium kontakt təbəqəsi 20 dəqiqə müddətində 300°S-də təsirsiz qaz mühitində saxlanılmışdır. Çoxtəbəqəli, ölçüləri 5×5mm<sup>2</sup> Al-Məs.Silisium-Monosilisium-Al test strukturları hazırlanmışdır. MS təbəqələrinin böyük fəthəssaslığını nəzərə alaraq, bütün ölçmələr qararıqlıqda aparılmışdır.

MS təbəqələrinin mühüm özəlliyi onun altlığa nəzərən keçiricilik tipinin dəyişməsidir. Termozond metodu vasitəsilə aparılan ölçmələr göstərir ki, MS təbəqələr effektiv elektron keçiriciliyinə malikdirlər. Yalnız anod emalı

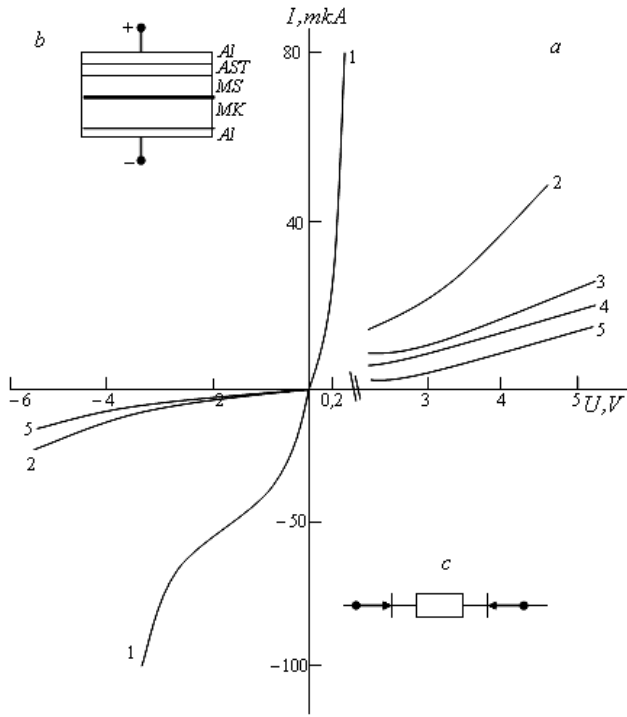
müddəti 20 dəqiqə və anod cərəyanı sıxlığı  $5 \frac{mA}{sm^2}$  olan

rejimdə alınan nümunələr dəşik keçiriciliyinə malik olurlar. Məhz bu cür aşağıməli nümunələrdə Holl effektinin ölçülməsi mümkün oldu. Ölçmələr dəşiklərin konsentrasiyasının başlanğıc altlığa nəzərən 1-2 tərtib az olmasını aşqara çıxardı.

Anod emalı zamanı MS təbəqələrinin keçiricilik tipinin dəyişməsi faktının ədəbiyyatda praktiki olaraq əksini tapmamasını qeyd etmək lazımdır. Bu bərdə təkcə [11] sayılı işdə ötəri məlumatlar vardır. Effekti aşağıdakı kimi izah etmək olar. «Yumşaq» rejimdə alınan MS-in monokristallik matrisində elektrokimyəvi aşılama zamanı yükdaşıyıcıların konsentrasiyası azalır. Yeri gəlmişkən, Holl effektinin ölçmələrinin nəticələri konsentrasiyanın azalması faktını təsdiq edir. MS-də dəşiklərin konsentrasiyası çox sürətlə azaldığından, material məxsusi keçiricilik halına keçir( $p \approx n$ ). Bu halda termo ehq-in işarəsi daha mütəhərrik zərrəciklərin işarəsi ilə müəyyən olunur. Silisiumda elektronların yüyürlüyü dəşiklərin yüyürlüyündən çox olduğundan, MS nümunələrində effektiv elektron keçiriciliyi meydana çıxır.

Al-Məs.Silisium-Monosilisium-Al strukturunun elektrik parametrlərinin təyin olunması volt-ampere xarakteristikasının ölçülməsi və təhlili əsasında yerinə yetirilmişdir. 1 sayılı şəkildə bir nümunənin misalında 120÷300K temperatur intervalında tipik VAX göstərilmişdir. Silisium altlığa verilən müsbət potensial düz sürüşməyə uyğun gəlir. Otaq temperaturunda düzləndirmə əmsalı birdən böyük, 1V sürüşmə zamanı isə 1,3÷1200-ə bərabər olmuşdur.  $p$ -Si altlığında MS üçün bənzər VAX digər işlərdə də (məsələn, [7,8,9,10]) qeyd edilmişdir. Ancaq uzun müddət aparılan elektrokimyəvi emal zamanı (40÷60 dəq.) və amorf səth təbəqəsi (AST) ləğv edilmədikdə düzləndirmə əmsalı 1-dən kiçik olur. Bundan əlavə, 25÷40 dəqiqə müddətində formalaşan AST-li MS-də düzləndirmə əmsalı 210K temperaturundan aşağı temperaturalarda 1-dən kiçik olur. Bu fakt, bir tərəfdən, AST-in strukturundan yükdaşınması prosesinə güclü təsir etməsi və Al/MS kontaktında Şottki çəpərini dəyişməsinə dəlalət edir, digər tərəfdən, strukturda bir-birinə qarşı qoşulmuş iki düzləndirici keçidin olmasından xəbər verir.

Alınmış VAX-ların tədqiqi üçün 1c sayılı şəkildə göstərilmiş ekvivalent sxemdən istifadə edilmişdir. Ekvivalent sxem iki ardıcıl birləşdirilmiş dioddan və müqavimətdən ibarətdir. Dioddan biri MS/MK (monokristallik silisium), digəri isə Al/MS keçidlərinə uyğundur. MS/MK keçidinə müsbət gərginlik verdikdə o, düz istiqamətdə qoşulur.



Şəkl.1(a). Tədqiq olunan strukturlarda VAX-ın temperatur asılılıqları. MS-  $j_a = 10 \frac{mA}{cm^2}$ ; cərəyan sıxlığında və  $t_a=600s$ an müddətində formalaşmış və amorf təbəqə ləğv edilməyib. 1-293K, 2- 205K, 3- 160K, 4-137K, 5- 120K. b) Strukturun düz istiqamətdə qoşulması. c) Strukturun ekvivalent elektrik sxemi.

Keçidin VAX-ı

$$I = j_s \cdot S \cdot \exp\left(\frac{qU_1}{nkT}\right) \quad (1)$$

düsturu ilə təsvir olunur. MS-in VAX-ı

$$I = \frac{U_2}{R} = \frac{SU_2}{r} \quad (2)$$

düsturuna əsasən təyin olunur. Belə şəraitdə Şottki çəpəri tərs istiqamətdə qoşulmuşdur və generasiya-rekombinasiya mexanizmində onun VAX-ı

$$I = S\beta^{-\frac{1}{2}} \cdot (\phi_0 + U_3)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

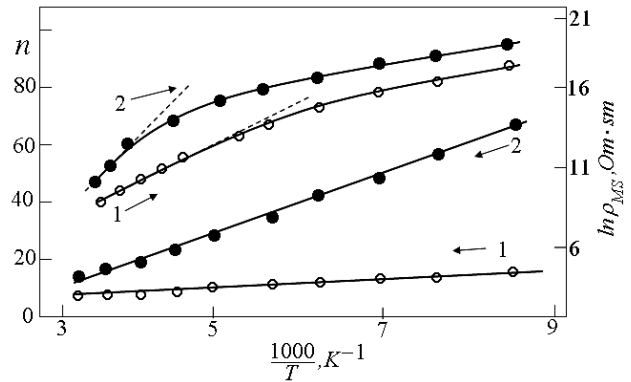
düsturu ilə müəyyən olunur. (1) və (2) düsturlarında aşağıdakı işarələrdən istifadə edilmişdir:  $I$ - strukturun keçən cərəyan,  $j_s$  - doyma cərəyanının sıxlığı,  $q$ - elektronun yükü,  $n$ -MS/MK heteroqecidində cərəyan keçiriciliyi əmsali,  $U_1$  - heteroqeciddə gərginlik düşgüsü,  $U_2$  - MS təbəqəsindəki gərginlik düşgüsü,  $U_3$  - Al/MS kontaktındakı gərginlik düşgüsü,  $R$ -MS təbəqəsinin müqaviməti,  $r=RS$ ,  $\beta$  - aşqar atomların konsentrasiyası, MS-in dielektrik nüfuzluluğu, yükdaşıyıcıların yaşama müddətindən asılı olan əmsaldır. Al/MS kontaktı omik hesab olunur və aktiv müqavimət MS təbəqəsinin müqavimətinə (plazmakimyəvi aşılarmaya məruz qalmamış nümunələr üçün) və ya MS

təbəqəsi ilə AST-nin birgə müqavimətinə bərabərdir. Nəzərə alınmışdır ki, təbəqənin müqaviməti dar sürüşmələr intervalında sabitdir, lakin xarici gərginliyin artması zamanı dəyişir. (1)-(3) düsturlarından alınır ki, struktura verilən  $U$  gərginliyi

$$U = \left(\frac{nkT}{q}\right) \cdot \ln\left(\frac{I}{S}\right) + r\left(\frac{I}{S}\right) + \beta\left(\frac{I}{S}\right) - \alpha \quad (4)$$

düsturu vasitəsilə təyin olunur. Burada,

$$\alpha = \left(\frac{nkT}{q}\right) \cdot \ln J_s + \phi_0. \quad (5)$$



Şəkl.2. AST ləğv edilmiş iki nümunədə xüsusi müqavimət və cərəyan keçiriciliyi əmsalının tipik temperatur asılılıqları.

Verilmiş halda funksional  $i$ -yə görə 1-dən  $s$ -ə qədər olan cəmi bərabər olur:

$$\Phi = \sum_{i=1}^s \left( U_i - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_i}{S}\right) - r\left(\frac{I_i}{S}\right) - \beta\left(\frac{I_i}{S}\right)^2 + \alpha \right)^2 \quad (6)$$

Burada,  $s$ -VAX üzərindəki eksperimental nöqtələrin sayıdır.

VAX-ın nəzəri və eksperimental qiymətlərinin üst-üstə düşdüyü ən yaxşı şərt nəzəri qiymətlərin eksperimental qiymətlərdən meyl etməsinin kvadratından tərtib olunan funksionalın minimum olmasıdır. Funksional minimumunun zəruri şərtindən

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial \beta} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

dörd xətti tənlikdən ibarət sistem alınır. Sistemi həll etməklə  $(r, \beta, n, \alpha)$  kəmiyyətləri təyin olunur. Bu kəmiyyətlərdən  $r$  və  $n$  birbaşa fiziki mənaya malikdirlər. MS-in xüsusi müqaviməti

$$\rho_{MS} = \frac{r}{d_{MS}} \quad (8)$$

düsturuna əsasən təyin olunur. Hesablamaların aparılması üçün VAX-ın düz budağında eksperimental və nəzəri

asilılıqların müqayisəsindən MS-in  $\rho$  xüsusi müqaviməti, MS/MK keçidində  $n$  cərəyan keçiriciliyi əmsalını təyin etməyə imkan verən POR proqramı hazırlanmışdır. Adı çəkilən proqram vasitəsilə eksperimental nəticələrin təhlili göstərir ki, nəzəri və eksperimental asılılıqlar yaxşı uyğunlaşır və xəta 4%-dən böyük olmur.

AST-siz təbəqələrin təhlili göstərir ki, 15÷60 dəqiqə müddətində formalaşmış MS-in xüsusi müqaviməti otaq temperaturunda, 2V-a qədər sürüşmələrdə  $(1,4\div 8,4)\cdot 10^5 \text{Om}\cdot\text{sm}$ -ə bərabər olub, elektrokimyəvi emal müddətindən zəif asıdır. Kiçik emal müddətində  $\rho_{MS}$  zalır və 10 dəqiqə anodlaşma müddətində  $5\cdot 10^3 \text{Om}\cdot\text{sm}$ -ə bərabər olur. MS təbəqədə nazik dielektrik qat yaradan AST, xüsusi müqaviməti 1÷2 tərtib artırır. AST-in müqaviməti anod emalı müddətindən asılı olub, 10 Kom-dan 40Mom-a qədər dəyişir.

Böyük sürüşmələr oblastunda VAX-ın təhlili göstərdi ki, tədqiq olunmuş MS nümunələrinin xüsusi müqaviməti identik nümunələrin kiçik sürüşmələr oblastundakı xüsusi müqavimətindən bir tərtib az olur. Bu fakt böyük sahələr oblastundakı xarici sürüşmələrin artması ilə azalmağa doğru gedən MS təbəqəsi müqavimətinin qeyri-xətti xarakterinə dəlalət edir.  $p$ -Si əsasında MS təbəqəsinin müqavimət modullaşması Pul-Frenkel modeli əsasında [4] sayılı işdə, fəza yükləri ilə məhdudlaşmış cərəyanlar nəzəriyyəsinə əsasən ətraflı izah edilmişdir. Birinci halda keçiriciliyin qeyri-xətti xarakteri

$$\sigma_F = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{F}{F_0}\right)^{-\frac{1}{2}}; F_0^{\frac{1}{2}} = \frac{\left(\frac{kT}{q}\right)}{\left(\frac{q}{\pi\epsilon\epsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

düsturu ilə müəyyən olunur. Burada,  $F$ -xarici elektrik sahəsidir. İkinci halda cərəyanın gərginlikdən qeyri-xətti asılılığı

$$I = \frac{\gamma(T)U^n}{d_{nk}^m} \quad (10)$$

düsturu vasitəsilə təsvir olunur. Burada,  $\gamma(T)$  -daşıyıcıların yüyrüklüyünün dəyişməsinə xarakterizə edən və temperaturdan asılı olan əmsaldır. 2 sayılı şəkildə temperaturun otaq temperaturundan 120 K-ə qədər azalması zamanı  $n$  əmsalının və MS-in xüsusi müqavimətinin tipik dəyişmələri göstərilmişdir. Şəkildən görünür ki, 300÷200K temperatur intervalında xüsusi müqavimətin dəyişməsi aktivləşmiş xarakter daşıyır:

$$\rho_{MS} \sim \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right). \quad (11)$$

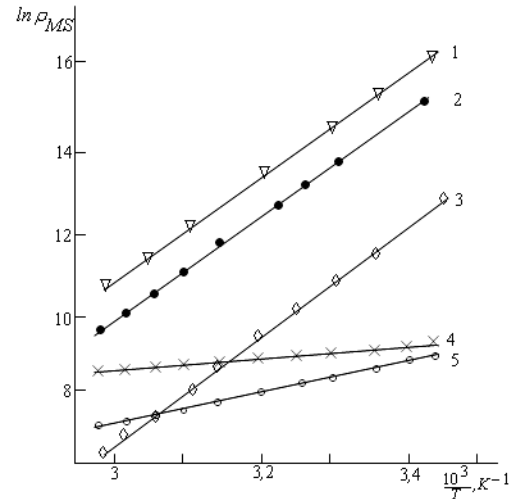
Bu düsturda  $E_a$  aktivləşmə enerjisi 200÷800MeV intervalında dəyişir. 3 sayılı şəkildə bir neçə nümunə üçün 295÷340K temperatur intervalında  $\rho_{MS}$ -in temperatur asılılıqları təsvir olunmuşdur. Asılılıq əyriləri keçiriciliyin aktivləşmiş xarakterini təsdiq edir. Aktivləşmə enerjisi üçün alınan nəzəri qiymətlər əzməsaməli MS nümunələri üçün [12, 13, 14] sayılı işlərdə alınan nəticələrlə yaxşı uyğunlaşır.

$\rho_{MS}(T)$ -nin müşahidə olunan aktivləşmiş xarakteri yüksək məsaməli ( $P>50\%$ ) MS-də Meyer-Neydel qaydalarını ödəmir.

AST ləğv edilmiş MS-də  $n$  cərəyan keçiriciliyi əmsalı 1,9÷8,3, AST-li MS-də isə 1÷2,9 intervalında dəyişir.  $n$  təbiiq olunan gərginlikdən asılı olur və gərginlik, 1,5V-dən 7V-ya qədər artanda, 2÷3 dəfə artır. Temperatur aşağı düşdükdə  $n$ -in anomol yüksək qiymətlərə qədər artması müşahidə olunur (şək.2). Bu hadisənin səbəbi dəyişmənin silisium altlıqdan MS-yə injeksiyasının yüksək səviyyəsi ola bilər. Belə injeksiya MS təbəqəsinin müqavimətini modullaşdırır, sərhəddə lokal hallar və MS sahəsində qeyri-bircinsliliklər yaradır.

Tədqiq olunan nümunələrdə lokal elektrik sahəsinin yaranması qeyri-adi hadisələr kateqoriyasına aiddir. MS səthindəki müxtəlif kontaktlar arasında qiyməti 10÷100mV intervalında dəyişən və işıqlanmadan güclü asılı olan e.h.q. yaranır. [3] sayılı işdə bənzər hadisəni müəllif materialın qeyri-bircins strukturuna mikrosahələrərin əlavə qoşulması ilə izah edir.

Alınmış eksperimental nəticələr aşağıda göstərilmiş model çərçivəsində təsvir oluna bilər.  $p^+$ -Si əsasında az məsaməli mezoməsaməli silisiumda məsamələr arasındakı arakəsmə 5nm-dan böyük ölçüyə malikdirlər. Bu cür kristallitlərdə kvant ölçü effekti olmur və yükdaşıyıcıların daşınması klassik elektrodinamika qanunlarına uyğun olaraq baş verir. Eyni zamanda silisium kristallik matrisində Fermi səviyyəsi qadağan olunmuş zonanın ortasına düşdükdə, yükdaşıyıcıların məxsusi keçiricilik halına gətirib çıxara bilən yoxsullaşması həyata keçir. Əzməsaməli nümunələrdə məsamələrin səth boyunca qeyri-bərabər paylanması nəticəsində dərəcələri müxtəlif olan yoxsullaşmış oblastlar yaranır. Məsaməlilik göstəricisi artıqca MS məxsusi keçiricilik halına daha da yaxınlaşır.



Şək.3. Otaq temperaturu oblastunda tədqiq olunan MS təbəqələri keçiriciliyinin aktivləşmiş xarakteri.

1-  $j = 10 \frac{\text{mA}}{\text{sm}^2}; t_a = 20$  dəq. 2-  $j = 15 \frac{\text{mA}}{\text{sm}^2}; t_a = 10$  dəq.

3-  $j = 10 \frac{\text{mA}}{\text{sm}^2}; t_a = 60$  dəq. 4-  $j = 10 \frac{\text{mA}}{\text{sm}^2}; t_a = 10$  dəq.

5-  $j = 15 \frac{\text{mA}}{\text{sm}^2}; t_a = 20$  dəq.

$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$  asılılığının parametrləri belədir:

- 1-  $\sigma_0=3 \cdot 10^{10} \text{Om}^{-1} \text{sm}^{-1}$ ;  $E_a=0.8 \text{ eV}$ ,
- 2-  $\sigma_0=4 \cdot 10^{10} \text{Om}^{-1} \text{sm}^{-1}$ ;  $E_a=0.7 \text{ eV}$ ,
- 3-  $\sigma_0=2 \cdot 10^9 \text{Om}^{-1} \text{sm}^{-1}$ ;  $E_a=0.8 \text{ eV}$ ,
- 4-  $\sigma_0=2 \cdot 10^{-2} \text{Om}^{-1} \text{sm}^{-1}$ ;  $E_a=0.3 \text{ eV}$ ,
- 5-  $\sigma_0=1 \cdot 10^{-1} \text{Om}^{-1} \text{sm}^{-1}$ ;  $E_a=0.4 \text{ eV}$ .

Yoxsullaşma effekti MS-in xüsusi müqavimətinin kifa-yət qədər yüksək qiymətlərini izah edir ( $10^5$ - $10^6 \text{Om} \cdot \text{sm}$ ). Belə sistemdəki daşınma prosesləri valent və keçiricilik zonalarının potensial relyefinin fluktuasiyalarına malik olan qeyri-bircins yarımkəçiricilər modeli çərçivəsində izah edilə bilər [15].

$p^+$ -Si əsasında formalaşdırılmış azməsaməli mezoməsa-məli silisiumda məsamələr arasındakı arakəsmənin de-şiklər tərəfindən yoxsullaşdırılması mülahizəsi hazırda ədəbiyyatda ciddi müzakirə olunur, ancaq hələlik konkret nəticə yoxdur. Təklif edilən hipotezlərdən 4-ü öz təsdiqini daha çox tapır. Bunlardan birincisi aşqar atomların (bor) hidrogenlə passivləşdirilməsi metodudur. Təqdim olunmuş işdə, [3, 4] sayılı işlərdə məhz bu model tətbiq olunmuşdur. Mezoməsaməli silisium halında anodlaşmanın hətta azacıq müddəti hidrogen atomlarının arakəsmələrə daxil olaraq Si-H-B neytral kompleksini yaratmasına kifayət edir. Belə yanaşma yüksək passivləşmə səviyyəsi, termik emal zamanı MS-in keçiriciliyinin dəyişməsinə yaxşı izah etsə də, bəzi MS təbəqələrinin infraqırmızı bu-raxma spektrində,  $1900 \text{sm}^{-1}$  oblastında, Si-H-B neytral kompleksinin xarakterik udulma pikinin olmaması bu metodun əleyhinədir. MS/MK ikitəbəqəli strukturunda belə pik müşahidə olunmuş və MS təbəqəni altlıqdan ayır-dıqda yaranan istilik və ya deformasiya zərbəsi nəticəsində aşqar atom-hidrogen kompleksi məhv edilmişdir. Son illərdə aşqar atomlarının elektrik xassələrini fəallıqdan məhrum edən ionlaşma enerjisinin artması effekti əsasında yaradılan model intensiv tətbiq olunur. Ölçüsü  $A$  olan sferik nanozərrəcikdə yükdaşıyıcısının aşqar atomundan qopması üçün lazım olan  $E_b$  enerjisi

$$E_b = \left( \frac{1}{\epsilon_{mdn}} + \frac{1,44}{\epsilon_{sdn}} \right) \cdot \left( \frac{e^2}{A} \right) \quad (12)$$

düsturuna əsasən təyin olunur. Burada,  $\epsilon_{sdn}$  - silisium monokristallitlərinin dielektrik nüfuzluluğu,  $\epsilon_{mdn}$  - ətraf mühitin dielektrik nüfuzluluğudur. Belə yanaşma [16] say-lı işin müəllifləri tərəfindən  $p^+$ -Si əsasında mezoməsaməli silisiumda elektrik keçiriciliyinin məsamələri dielektrik nüfuzluluğu artan mühitlərlə doldurulmuşda (vakuum üçün 1-dən etanol üçün 24-ə qədər) böyüməsini izah etmək üçün tətbiq edilmişdir. Quptanın işlərində [17] elektron

paramaqnit rezonansının tədqiqi sayəsində aşqar bor atomlarının MS-də elektrik fəallığını itirməsinin başqa bir səbəbi də təklif olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, məsamə yaranması prosesini müşayiət edən mexaniki gərginliklər aşqar bor atomlarını düyünlərə fəzadan çıxararaq, on-ları passiv hala salmağa qadirdirlər. Aşqar bor atomları-  
nın MS-də passivləşməsinin dördüncü hipotezi aşqar atomların elektrik fəallığına kristallitlərin səthinin təsiri ilə əsaslandırılır.

18 sayılı işdə göstərilmişdir ki, elektrokimyəvi emal zamanı bor atomları məsamə səthinə yaxın yerləşdikdə (1-3 atom təbəqələri) silisiumun lokal aşılması dayanır. Səthə Bor radiusundan yaxın məsafədə yerləşən aşqar atomları akseptor xassələrini itirirlər. Baxılan 4 hipotezin hər birinin həm müsbət, həm də mənfi cəhətləri vardır və çox güman ki, MS-də yoxsullaşma yarıdan universal va-hid səbəb axtarmaq mənasızdır. MS-in struktur xarakte-ristikaları rəngarəng olduğundan, yoxsullaşmanı bir səbəb və ya bir neçə səbəbin birlikdə yaratması mümkündür.

Sonrakı eksperimentlər göstərdi ki, azməsaməli ( $P < 30\%$ ) silisium strukturları üçün nəzərdə tutulan ikiçəpərli model daha böyük məsaməliliklərdə də ( $P < 50\%$ ) mezoməsaməli silisiumun xassələrini təsvir edə bilər. Tədqiq olunan  $3 \div 11 \text{mkm}$  qalınlıqlı MS nümunələri plavik turşusunun 40%-li su məhlulu və izopropil spirtinin 1:1 nisbətindəki qarışığında alınmışdır. (111) oriyentasiyalı КДБ-0,03, КДБ-1 markalı silisium altlıqlardan istifadə edilmişdir. Nümunələrin məsaməliliyi 30-50% təşkil edir. MS səthinə ölçüləri  $1 \times 1 \text{mm}^2$  olan alüminium və indium kontaktlar çəkilib. In/MS/MK/Al və Al/MS/MK/Al struk-turlarının VAX-ı qaranlıq şəraitdə  $295 \div 350 \text{K}$  temperatur intervalında çəkilmişdir. VAX qeyri-xəttiliyi və qeyri-sim-metrikliyi ilə xarakterizə olunur; düzləndirmə əmsalı (MS-dəki + müsbət sürüşmə kimi götürülür) eyni strukturun müxtəlif metallarla kontaktında vahiddən kiçik və ya bö-yük qiymətlər ala bilər. Kox-Strek metodunun ölçmələri ilə indium və alüminium kontaktların omik olmaması isbat edilmişdir. İkiçəpərli model və POR kompüter proqramı-nın tətbiqi göstərdi ki, nəzəri və eksperimental asılılıqda-r arasındakı fərq 10%-i aşmır. Müxtəlif metallar üçün VAX-ın fərqli görünüşü olsa da, eyni MS təbəqəli In/MS/MK/Al və Al/MS/MK/Al strukturların xüsusi müqavimətləri eyni qiymətə malik olur. Bu fakt seçilmiş modelin düzgünlüyü-nə və  $\rho_{MS}$  qiymətlərinin həqiqiliyinə dəlalət edir. Verilmiş eksperimentdə MS təbəqələrinin xüsusi müqaviməti  $10^5$ - $10^7 \text{Om} \cdot \text{sm}$  təşkil edir.  $\rho_{MS}$ -in temperatur asılılığı və  $320 \div 680 \text{meV}$  intervalında qiymətləndirilən aktivləşmə enerjisi aktivləşmiş xarakterə malikdirlər. Azməsaməli mezoməsaməli silisium halında olduğu kimi,  $\rho_{MS}(T)$  asılı-lığının da aktivləşmiş xarakteri yüksək məsaməli silisium üçün Meyer-Neldel qaydasından fərqlənir.

[1] R.C.Anderson, R.S.Muller, C.W. Tobias. *Investigations of the electrical properties of porous silicon // J. Electrochem. Soc.*- 1991.- V.138.- P.3406-3411.  
[2] L.A.Balagurov, D.G.Yarkin, E.A. Petrova. *Electronic transport in porous silicon of low porosity made on a p+ substrate // Mater. Sc. and Engin.*- 2000.- V.B69-70.- P.127-131.  
[3] C. Cadet, D. Deresmes, D. Vuillaume et al. *Appl. Phys.Lett.*- 1994.- V.64.- P.2827-2829.

[4] M. Ben-Chorin, F. Muller, F. Koch. *Phys. Rev. B.*- 1994.- V.49.- P.2981-2984.  
[5] J.J. Mares, J. Kristofik, J. Pangras et al. *Appl. Phys. Lett.*- 1993.- V.63.- P.180-182.  
[6] J.T.Lue, C.S.Chang, C.Y. Chen et al. *Thin Sol. Films.*- 1999.- V.399.- P.294-298.  
[7] Д.Г. Яркин ФТП.- 1999.- Т.33.- С.211-214.  
[8] M.Ben-Chorin, A.Kux, I.Schechter. *Appl. Phys. Lett.*- 1994.- V.64.- P.481-483.

**Н.Ә. НӘСӘНОВ**

- [9] *A.B.Жерздев, В.Х.Кудоярова, А.В.Медведев и др.* Письма в ЖТФ.- 1993.- Т.19, вып.23.- С.87-90.
- [10] *E.C.Yen, J.H.Chan, T.H. Shien et al.* Phys. Stat. Sol. (a).- 1998.- V.165.- P.63-65.
- [11] *J.I.Pankove, P.J.Zanzucchi, C.W. Magee et al.* Appl. Phys. Lett.- 1985.- V.46.- P.421-423.
- [12] *V.Lehmann, F.Hofmann, F. Muller et al.* Thin Sol. Films.- 1995.- V.255.- P.20-22.
- [13] *A.Diligenti, A.Nannini, G. Pennelli et al.* Appl. Phys. Lett.- 1996.- V.68.- P.687- 689.
- [14] *R.Schwarz, F.Wang, M.Ben-Chorin et al.* Thin Sol. Films.- 1995.- V.255.- P.23-26.
- [15] *Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос.* Электронные свойства легированных полупроводников.- М.: Наука, 1979.- 416с.
- [16] *V.Yu. Timoshenko, V.Lysenko, Th. Dittrich et al.* Phys. Stat.Sol (a).- 2000.- V.182.- P.163-168.
- [17] *C.L. Gupta.* J. Appl. Phys.- 1994.- V.76.- P.4800-4804.
- [18] *G.Polisski, D.Kovalev, G.Dollinger et al.* Physica B.- 1999.- V.273-274.- P.951-954.

**Н.А. Hasanov**

**TRANSITION OF CHARGE CARRIERS CHARGEHOLDERS IN MEZOPOROUS SILICON MADE ON BASE OF  $p^+$ -Si**

In this article the electrical properties of mezoporous silicon which is made on the base of  $p^+$ -Si and having not broad porosity (16÷30%), were researched experimentally. Acquired results have been summarized between 30-50% interval of porosity. The change effect of conductivity type relative to base has been detected. The results of experiment were explained by passivation model of admixture atoms with hydrogen. The advantages and areas of improvement of other models used to study electrical properties of porous silicon were analyzed.

**Г.А. Гасанов**

**ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МЕЗОПОРИСТОМ КРЕМНИИ НА ОСНОВЕ  $p^+$ -Si**

Приведены результаты экспериментального исследования электрических свойств мезопористого кремния на основе  $p^+$ -Si подложек на слоях с невысокой пористостью (16-30%), а затем эти результаты были распространены на диапазон пористости 30-50%. Важная особенность изучаемых слоев ПК заключалась в смене типа проводимости по сравнению с исходной подложкой. Результаты экспериментов обоснованы на основе модели пассивации примесных атомов (бор) водородом. Анализированы преимущества и недостатки других моделей, применяемых при изучении электрических свойств пористого кремния.

*Received: 15.11.07*