

İrSi-Si ƏSASINDA MİKROXSEMLƏRDƏ RADİASIYA EFFEKTLƏRİ

E.Ə. KƏRİMOV

Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

Bakı, Azadlıq pr. 16/21, AZ 1010, Azərbaycan

e-mail: E.Kerimov.fizik@mail.ru

Müəyyən edilmişdir ki, əks gərginliyin artması və inteqral mikrosxemlərin elementlərinin formalaşdığı altlıqda və ya epitaksial təbəqədə aşqarların konsentrasiyasının azalması ilə onların həssas elementində seçilmiş yükün kritik Q_{kr} qiyməti artır. Bu effektlər sxemin ayrı-ayrı elementlərində kifayət qədər yüksək sıxlıqlı elektron-deşik cütlərinin olduğu lokal oblastların əmələ gəlməsi ilə əlaqədardır.

Açar sözlər: kosmik şüalanma, inteqral mikrosxemlər, ionlaşma itkiləri, tormozlanma yolu, özək, lokal oblastlar.

UOT: 621.383.5

PACS: 73.40.Ns, 73.40.Sx

Müasir inteqral mikrosxemlərin (İMS), xüsusən də böyük inteqrasiya dərəcəsinə malik sxemlərin ölçülərinin çox kiçik olmasını nəzərə alaraq, sxemin bir elementində İMS-nin fəaliyyəti ilə bağlı yük daşıyıcıların konsentrasiyasından nəzərəcarpacaq dərəcədə artıq konsentrasiyaya malik qeyri-tarazlıqda olan yükdaşıyıcıların meydana gəlməsi, sxemin işləmə qabiliyyətinin sıradan çıxması ilə nəticələnə bilər. Bu özünü daha çox rəqəmsal İMS-in müəyyən bir özəyinin məntiqi halının dəyişməsində göstərir ki, nəticədə sxemin fəaliyyətində qısa müddətli fasilələr baş verir. Belə fasilələr adətən tək fasilələr adlanır (TF). Lakin, bir sıra hallarda yüklənmiş yüksək enerjili zərrəciklərin təsiri bir çox İMS-də dönməyən imtinalar yarada bilər. Yüksək enerjili yüklənmiş tək zərrəciklərin İMS-in elementlərinə təsiri zamanı baş verən prosesləri nəzərdən keçirək.

İMS-in strukturundan keçən yüklənmiş zərrəcik öz enerjisini materialın tormozlama qabiliyyətindən asılı olaraq itirir və (dE/dx) -a düşür. Materialın tormozlama qabiliyyətinin qiyməti, həmçinin uyğun materialda zərrəciyin vahid qaçış yolunun uzunluğunda zərrəciyin enerji itkisini təyin etdiyindən, enerjinin xətti ötürülməsi (EXÖ) adlandırılır. Bu zaman zərrəciyin kütləsinin artması və enerjisinin azalması ilə EXÖ artır. Lakin, EXÖ-nün enerjiddən asılı olması qeyri-monotondur və kifayət qədər kiçik enerjilərdə maksimuma malikdir. Belə ki, a – hissəciklər üçün EXÖ-nün maksimal qiyməti $\sim 1\text{MeV}$ -a uyğun gəlir, $\sim 355\text{keV/mkm}$ təşkil edir. Yarımkəçirici materialdan keçərkən, yüklü zərrəcik düzxətli olan hərəkəti yolunda (trek) enerji ayrılmasına uyğun olan konsentrasiyalarda qeyri-tarazlıqda olan elektron-deşik cütləri yaradır. Bu zaman silisiumda bir zərrəcikdən trekin oxu boyunca udulan enerji dozası protonlar üçün 10^6 rad, ağır yüklü zərrəciklər üçün isə məsələn, ^{56}Fe üçün isə $10^8\div 10^9$ rad qiymətini ala bilər. Zərrəcik keçdikdən sonra, elektron-deşik plazması pikosaniyə zamanı müddətində 1000A° radiusa malik silindrik formalı oblastın daxilində termallaşır. Plazmada elektron-deşik cütlərinin konsentrasiyası $10^{18}\div 10^{19}\text{sm}^{-3}$ və daha böyük qiymət alır ki, bu da İMS-in yaradılmasında istifadə olunan altlıqlarda və epitaksial təbəqələrdə əsas yük daşıyıcıların konsentrasiyasından kifayət qədər böyük olur [1].

Zərrəcik İMS-in strukturunun əsas elementlərin-

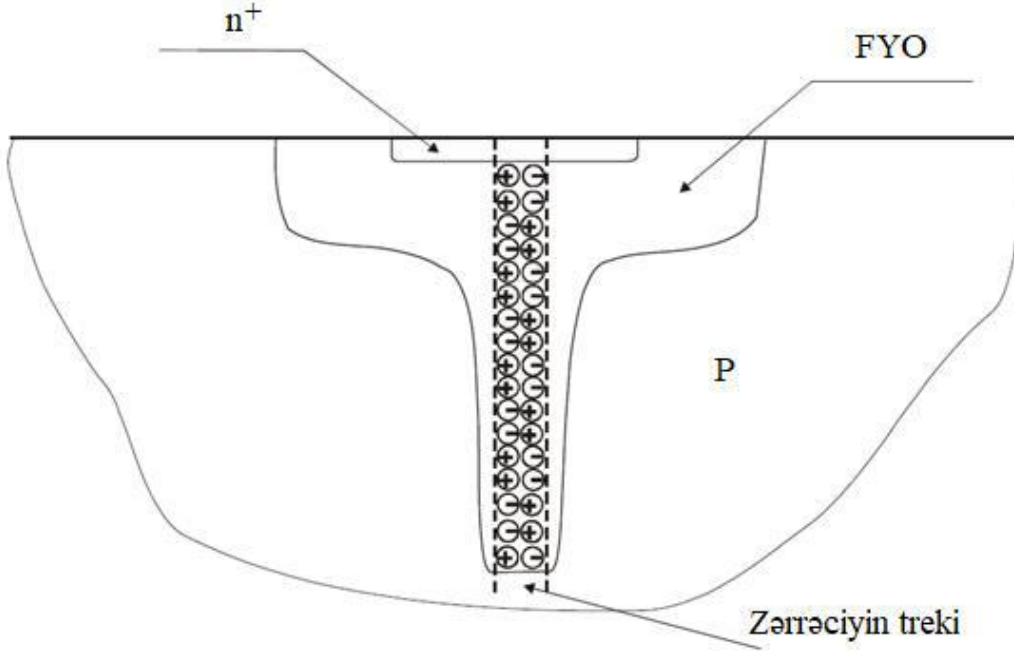
dən biri olan $p-n$ keçidindən keçərsə, keçidin fəza yükü oblastında (FYO) generasiya olunmuş yük daşıyıcıların toplanması baş verir. Əgər $p-n$ keçidə qovuşan hər hansı bir oblastın (məsələn, altlıqın) ölçüsü onda yerləşən yük daşıyıcıların diffuziya uzunluğundan böyük olarsa, diffuziya uzunluğu ilə şərtlənən impuls cərəyanı axacaqdır.

Yalnız, qamma şüalanma zamanı inteqral sxemin bütün həcmi boyu cütlərin bərabər generasiyası halı istisna təşkil edir ki, bu zaman radiasiya cərəyanına əlavəni $p-n$ keçidin bütün səthi verir, tək yüklənmiş zərrəciyin təsiri zamanı yük daşıyıcıların toplanması $p-n$ keçidin tam sahəsindən deyil, yüklənmiş zərrəciyin treki ilə kəşif hissəsində baş verir. Lakin, praktikada belə modeldən çıxış etdikdə, cərəyanların qiyməti müşahidə olunmalı qiymətlərdən nəzərəcarpacaq dərəcədə yüksək olur. Hesablama və nəzəri verilənlərin belə fərqlənməsinə səbəb yüklənmiş zərrəciyin trekində elektron-deşik cütlərinin yüksək konsentrasiyasının olmasıdır ki, bu da trek oblastında altlıqda ekvipotensial səthlərin “asilmasına” gətirir (bu effekt şəkil 1-də əks sürüşmüş n^+p keçidi üçün sxematik olaraq verilmişdir). Bu effektə adətən yük qıfının yaranması effekti deyilir [2].

İlkin olaraq keçiddə lokallaşmış elektrik sahəsi yüklü zərrəciyin keçdiyi zaman trekdə yerləşən yük daşıyıcıların yüksək konsentrasiyası nəticəsində altlığa daşır. Termallaşmadan sonra qeyri-tarazlıqda olan yük daşıyıcıları trekin oxundan ambipolyar diffuziya səbəbindən radial istiqamətdə və elektrik sahəsində dreyf nəticəsində ox istiqamətdə axır. Beləliklə, qeyri-əsas yük daşıyıcıları (baxılan halda elektronlar) n^+ oblastına tərəf dreyf edir, əsas yük daşıyıcıları (baxılan halda deşiklər) isə diffuziya hesabına trekin oxuna perpendikulyar istiqamətdə yerlərini dəyişir. Bu zaman trekdə elektroneytrallığın saxlanması üçün elektronlar da silindrin yan xarici səthinə doğru deşikləri müşayət edirlər kimi yerlərini dəyişməlidirlər. Əks halda elektronlar və deşiklərin fəza ayrılması belə ayrılmanın yaranmasına mane olan sahələrin yaranmasına gətirib çıxarar. Silindrin hər-hansı bir hissəsindən ayrılması elə həmin oblastdan deşiklərin ayrılması ilə müşayət olunacaqdır. Əvvəlcə bu hadisə qıfın aşağı hissəsində başlayır və proses yuxarıya doğru yerini dəyişir, yəni keçidin fəza yükü oblastının bərpası baş verir. Qıfın

mövcud olduğu müddət qeyri-əsas yük daşıyıcıların dreyf zamanı ilə təyin olunduğundan, ondan daşıyıcıların toplanması yalnız FYO keçiddən toplanan yük da-

şıyıcıların yaranan cərəyandan nəzərəcarpacaq dərəcə-də böyük olan kifayət qədər qısa müddətli (10^{-8} - 10^{-10}) cərəyan impulsu verir [3].



Şəkil 1. Ağır yüklü zərrəciyin keçdiyi zaman n^+ - p keçidinin həcmi yükünün “asıma” effekti.

Təklənmiş yüklü zərrəciyin təsiri altında rəqəmsal İMS-in fəaliyyətində baş verən pozulmaları toplanan yüklərin qiyməti ilə qiymətləndirmək daha əlverişli olardı. Belə ki, yük daşıyıcıların yaşama müddətindən daha kiçik olan enerji ayrılması zamanı sxemin yalançı işə düşməsi İMS-nin həssas elementində seçilmiş yükün kritik Q_{kr} qiyməti ilə xarakterizə olunur. Bu zaman:

$$Q_{kr} = \Delta V_{küy} \cdot C_{ef} , \quad (1)$$

burada, $\Delta V_{küy}$ – özəyin küyə davamlığı yəni, küyün gərginliyinin minimal qiyməti – sxemi digər məntiqi hala çevirmək qabiliyyəti; C_{ef} – İMS elementinin tutumunun effektiv qiymətidir.

Beləliklə, Q_{kr} -in qiymətini sxemin elementinin topladığı yükün Q_s qiyməti ilə müqayisə edərək sxemin yalançı fəaliyyətə başlamasının mümkünlüyü haqqında nəticəyə gəlik. $Q_s \geq Q_{kr}$ olduğu zaman sxemin fəaliyyətinin birdəfəlik dayanması baş verir. Deməli, İMS-dən yüklü zərrəciyin keçməsi ilə şərtlənən toplanmış yükün qiymətini təyin etmək mümkün olur.

Yükün toplanmasının digər bir modelinə nəzər salaq. Yükün toplandığı və yüklü zərrəciyin p - n keçidinə perpendikulyar istiqamətlənmiş trek hissəsinin ümumi uzunluğu L_s -dir. Yüklü zərrəciyin treki boyu elektron-deşik cütlərinin $N_0(z)$ xətti sıxlığı mövcuddur. Z koordinatı trekin oxu ilə üst-üstə düşür. $N_0(z)$ trekdə EXÖ ilə əlaqəlidir:

$$N_0(z) = \frac{1}{E_C} \frac{dE}{dx}(z) , \quad (2)$$

burada, E_C – elektron deşik cütünün yaranması enerji-

sidir. Bir qayda olaraq, z -in böyüməsi yəni, zərrəciyin nümunənin dərinliyinə nüfuz etməsi ilə EXÖ-nün (dE/dx) qiyməti artır belə ki, zərrəciyin enerjisi tədricən zəifləyir.

Q_s aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$Q_s = q \int_0^{L_t} N_0(z) \cdot dz = q \cdot \bar{N}_0 \cdot L_s , \quad (3)$$

burada, \bar{N}_0 – elektron-deşik cütlərinin L_s intervalında $\frac{1}{E_C} \left(\frac{dE}{dx} \right)$ -ə bərabər olan xətti sıxlığının orta qiymətidir. L_s kəmiyyəti iki hissədən ibarətdir: FYO və qıf, yəni:

$$L_s = \bar{v}_{q,\partial} \cdot \tau + E_{FYO} , \quad (4)$$

burada, $v_{q,\partial}$ - qıf daxilində qeyri-əsas yük daşıyıcıların orta dreyf sürəti; τ – qıfın oxu boyunca qeyri-əsas yük daşıyıcıların dreyf müddəti; E_{FYO} - p - n keçidin fəza yükü oblastının enidir.

Öz növbəsində:

$$\bar{v}_{q,\partial} = \bar{\mu}_{q,\partial} \cdot \bar{E} = \bar{\mu}_{q,\partial} \cdot \frac{U + \varphi_k}{L_s} = \frac{U_0}{L_s} \bar{\mu}_{q,\partial} , \quad (5)$$

burada, $\bar{\mu}_{q,\partial}$ - qeyri-əsas yük daşıyıcıların yürüklüyünün orta qiyməti; \bar{E} - qıf daxilində sahənin intensivliyinin orta qiyməti; U - p - n keçidinə tətbiq olunmuş əks gərginliyin qiyməti; φ_k - p - n keçiddə kontakt potensial fərqi.

(5) ifadəsini (4) bərabərliyində nəzərə alsaq:

$$L_s = 0,5 \cdot \left[E_{FYO} + \left(E_{FYO}^2 + 4 \cdot \overline{\mu_{q,\varepsilon}} \cdot U_0 \tau \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (6)$$

$L_s \gg E_{FYO}$ olduğu şərt daxilində (6) bərabərliyi sadələşdir:

$$L_s = \left(\overline{\mu_{q,\varepsilon}} \cdot U_0 \tau \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

τ – kəmiyyətini, qıfdan qeyri-əsas və əsas yük daşıyıcıların kənarlaşması eyni bir zaman müddəti ilə təyin olunduğundan, əsas yük daşıyıcıların ambipolyar diffuziya hesabına trekin oxuna perpendikulyar istiqamətdə, yəni silindrin radiusu boyunca qıfdan hərəkəti prosesinin analizindən təyin edək. Qıf daxilində yük daşıyıcıların radius boyunca diffuziya hesabına xətti sıxlığının N dəyişməsi əsas yük daşıyıcıların selinin $I_{\varepsilon,d}$ sıxlığı ilə əlaqədardır. Belə ki, kəsilməzlik tənliyindən bilirik ki, əsas yük daşıyıcıların trek oxundan r – radiusu boyunca axması, onların əsas yük daşıyıcıların konsentrasiyasının altılıqda aşqarların N_n konsentrasiyasına bərabər olduğu qıfın silindrik hissəsinin xarici səthində də uyğun hərəkətinə gətirir.

Belə olan halda:

$$\frac{dN}{dt} = -2\pi r(t) I_{\varepsilon,d}. \quad (8)$$

Öz növbəsində $r(t)$ kəmiyyəti ambipolyar diffuziya hesabına əsas yük daşıyıcıların t zaman müddətində yerlərini dəyişdikləri silindrin oxundan olan məsafə ilə təyin olunur, yəni:

$$r(t) = 2(D_a t)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

burada, D_a – ambipolyar diffuziya əmsalıdır. Əsas yük daşıyıcılar selinin sıxlığının qiyməti isə əsas yük daşıyıcıların tarazlıq konsentrasiyası və onların ambipolyar diffuziya hesabına $v_{\varepsilon,d}$ hərəkət sürəti ilə təyin olunur:

$$I_{\varepsilon,d} = N_n \cdot v_{\varepsilon,d} \quad (10)$$

(9) və (10) ifadələrini (8) bərabərliyində nəzərə alsaq ayrılan dəyişənli differensial tənlik alarıq:

$$\frac{dN}{dt} = -4\pi N_n v_{\varepsilon,d} (D_a t)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Differensial tənliyin həllindən sonra $N=N_0$ və $t=0$ başlanğıc şərtlərində:

$$N(t) = N_0 - \frac{8}{3} \pi N_n v_{\varepsilon,d} (D_a)^{\frac{1}{2}} t^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$t=\tau$ olduğu zaman $N(t)=0$ olacaqdır. Buradan τ təyin oluna bilər:

$$\tau = \left(\frac{3N_0}{8\pi N_n v_{\varepsilon,d} D_a^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

$V_{\varepsilon,d}$ – kəmiyyəti kimi əsas yük daşıyıcıların ambipolyar diffuziya hesabına yer dəyişməsinin orta sürətini götürə bilərik:

$$V_{\varepsilon,d} = \frac{r(\tau)}{\tau} = 2 \sqrt{\frac{D_a}{\tau}}. \quad (14)$$

(14) ifadəsi (13)-də nəzərə alındıqda τ -nın dəqiq qiyməti təyin olunur:

$$\tau = \left(\frac{3N_0}{16\pi N_n D_a} \right). \quad (15)$$

İndi isə (15) ifadəsindən τ - nun qiymətini (6) və (7) bərabərliklərində nəzərə alsaq L_s üçün son ifadəni təyin edə bilərik. Xüsusi olaraq (15) ifadəsi (7)-də nəzərə alındıqda:

$$L_s = \left(\frac{3N_0 \overline{\mu_{q,\varepsilon}} V_0}{16\pi N_n D_a} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Ümumi halda N_0 kəmiyyəti trekin oxu boyunca dəyişir. Ona görə də, (16) bərabərliyində kəmiyyətin $\overline{N_0}$ orta qiymətindən istifadə olunmalıdır. Bu halda Q_s kəmiyyəti aşağıdakı ifadə ilə təyin olunacaqdır:

$$Q_s = q \left(\frac{3\overline{\mu_{q,\varepsilon}} V_0}{16\pi N_n D_a} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (\overline{N_0})^{\frac{3}{2}}. \quad (17)$$

NƏTİCƏ

Beləliklə deyə bilərik ki, Q_s – kəmiyyəti p - n keçidinə tətbiq olunmuş əks gərginliyin artması və inteqral mikrosxemlərin elementlərinin formalaşdığı altılıqda və ya epitaksial təbəqədə aşqarların konsentrasiyasının azalması ilə artır.

- [1] Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов, МГИЭМ, М., 1999.
- [2] Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. Радиационная стойкость биполярных транзисторов, МГИЭМ, М., 2000.

- [3] Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборах, МИЭМ, М., 2001.

Е.Ә. КӘРІМОВ

Е.А. Kerimov

RADIATION EFFECTS IN IrSi-Si CHIPS

It is established that the critical value of the selected charge in the sensitive elements of the microcircuits increases with an increase in the reverse voltage and with a decrease in the concentration of impurities on the substrate elements of integrated circuits. In the epitaxial layer, these effects are associated with the appearance of local regions with an exceptionally high density of electron-hole pairs in individual elements of the circuit.

Э.А. Керимов

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МИКРОСХЕМАХ НА ОСНОВЕ IrSi-Si

Установлено, критическая величина выбранного заряда в чувствительных элементах микросхем растет с увеличением обратного напряжения и с уменьшением концентрации примесей на подложке элементов интегральных микросхем. В эпитаксиальном слое эти эффекты связаны с появлением в отдельных элементах схемы локальных областей с исключительно высокой плотностью электронно-дырочных пар.

Qəbul olunma tarixi: 03.02.2021