

TERMİK İŞLƏMƏ NƏTİCƏLƏRİNDƏ n-TİP Ge-Si BƏRK
MƏHLULLARI MONOKRİSTALLARINDA
DONOR MƏRKƏZLƏRİNİN YARANMASI

V.İ.TAHİROV*, Z.Y.HƏSƏNOV**,
S.S.LƏTİFOVA**, N.F.QƏHRƏMANOV**

*Bakı Dövlət Universiteti

**Sumqayıt Dövlət Universiteti

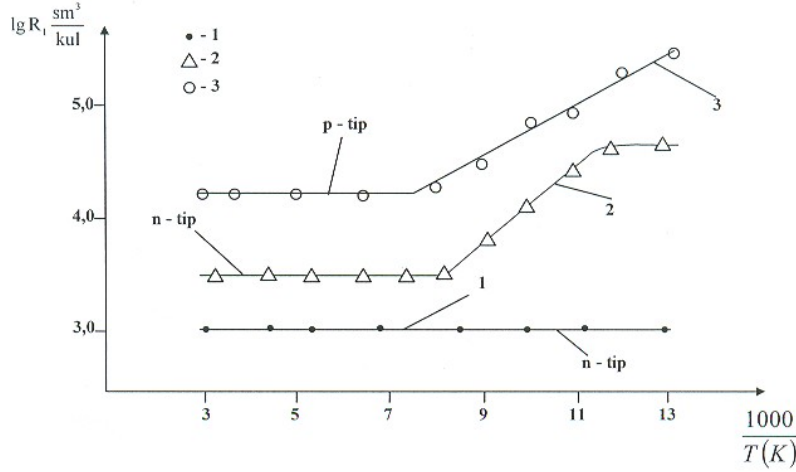
Sürmə ilə aşqarlanmış Ge-Si bərk məhlul monokristalında termik işləmə nəticəsində donor səviyyəsi müşahidə olunmuşdur. Müəyyən olunub ki, bu səviyyə keçirici zonaya yaxın olub enerjisi 0,04 ev tərtibindədir. Donorların aktivləşmə enerjiləri yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının temperatur asılılığına görə təyin olunub. Tədqiq olunan kristalda silisium atomlarının konsentrasiyası 18 at% tərtibində olmuşdur. Müəyyən olunub ki, Ge-Si kristalında donor səviyyəsi Sb mərkəzlərinin tam kompensə olunması və akseptor səviyyələrin termik aktivliyi hesabına yaranır. Aydın olmuşdur ki, termik donor səviyyə ikiqat yüklənmiş vakansiyalar və müsbət yüklənmiş sürmə atomları hesabına yaranır. Yükdaşıyıcıların yürekliyünün temperatur asılılığı təklif olunmuş modelə yaxşı izah olunur.

Biz bundan əvvəlki məqalədə n-tip nümunələrdə termik işləmənin Ge-Si bərk məhlulu kristallarının elektrik xassələrinə təsirinə baxmışıq [1]. Ancaq orada nümunələrin ilkin konsentrasiyaları elə seçilirdi ki, termik işləmədən sonra onlar p-tip keçiriciliyə malik olsun. Burada biz o hallara baxacağıq ki, termik işləmədən sonra nümunə yenə də n-tip keçiriciliyə malik olsun. Təcrübənin aparılması şəraiti [1]-də olduğu kimidir.

Keçiriciliyi n-tip olan nümunələrin termik işləməsi zamanı aşkar olmuşdur ki, kristallarda yeni donor mərkəzləri meydana çıxmışdır. Özü də bu donor səviyyəsi o vaxt müşahidə olunur ki, Sb aşqarının yaratdığı dayaz donor mərkəzləri praktiki olaraq tam kompensasiya olunsun, ancaq yenə də tipi (n-tip) dəyişməz qalsın.

Şəkil 1-də bu cür nümunələrdən birinin termik işləmədən əvvəl (1 əyrisi) və sonra (2,3 əyriləri) Holl əmsalının temperaturdan asılılığı verilmişdir. Termik işləmədən əvvər n-tip nümunədə elektronların konsentrasiyası $n=7,5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ -ə bərabər olmaqla bütün temperatur intervallında sabitdir. Bu onu göstərir ki, ilkin nümunədə n-tip keçiricilik dayaz donor mərkəzlərinin tərəfindən yaradılmışdır, yəni Sb-nun kompensasiya olunmamış mərkəzlərinin konsentrasiyası $7,5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ -dür. Bu kristaldan düzəldilmiş nümunə 850°C-də 1 saat qızdırılıb, kəskin soyulduqdan sonra onun Holl əmsalının temperatur asılılığı şəkildə 2 əyri-

si ilə verilmişdir. Nümunənin keçiriciliyi yenə də n-tip qalmışdır. Aşağı temperatur oblastında temperaturun azalması ilə R artır və nəhayət, doymaya uğrayaraq sabit qalır. Maye azotun qaynama nöqtəsinin yaxınlığında R-in sabit qalması bu hissədə keçiriciliyin Sb-un donor mərkəzləri ilə yarandığını göstərir, ancaq onların konsentrasiyası xeyli kiçilmişdir. R-in müəyyən oblastda artması nümunədə bu oblastda aktiv olan yeni donor mərkəzlərinin yarandığını göstərir. Yuxarı temperaturlarda bu mərkəzlər tam tükənmişdir. Yuxarı və aşağı oblastlarda R-in doyma qiymətinə malik olması, həm dayaz, həm də yeni yaranmış donor mərkəzlərinin konsentrasiyasını təyin etməyə imkan verir.



Şəkil 1. n-tip kristallarda termik işləmədən əvvəl (1) və sonra (2,3) Holl əmsalının temperatur asılılığı

Dayaz aşqarların ümumi konsentrasiyasını n_0 , yeni yaranmış donor mərkəzlərinin ümumi konsentrasiyasını $N_d^{(T)}$ işarə edək (sonuncunu termik işləmə nəticəsində yaranan donor mərkəzləri və ya sadəcə termik donor mərkəzləri adlandıracağıq). Nümunəni 900°S -də 30 dəqiqə qızdırıb kəskin soyutduqdan sonra o, n-tiptən p-tip keçiriciliyinə keçmişdir. Doyma qiymətinə uyğun deşiklərin konsentrasiyası $P_d=4,6 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ -dür. 2 əyrisindən R-in aşağı temperaturlar oblastındakı doyma qiymətinə görə n_0 -ı tapırıq:

$$n_0 = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{eR} = \frac{0,731 \cdot 10^{19}}{1,0 \cdot 10^5} \text{ sm}^{-3} = 7,3 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$$

Yuxarı temperatur oblastında R-in doyma qiymətinə görə $N_d^{(T)} + n_0$ -ı tapırıq:

$$N_d^{(T)} + n_0 = \frac{0,731 \cdot 10^{19}}{2,4 \cdot 10^3} = 0,30 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3} = 3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$$

Buradan

$$N_d^{(T)} = (3 \cdot 10^{15} - 7,3 \cdot 10^{13}) \text{ sm}^{-3} \cong 3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3} \text{ alırıq.}$$

Aydın olur ki, termik donor mərkəzlərinin konsentrasiyası, təcrübə xətası daxilində, Sb-un kompressiya olunmuş konsentrasiyasının $\frac{1}{2}$ -inə bərabərdir. Deməli, Sb-un «yox olmuş» hər iki (hər cüt) donor mərkəzinin hesabına bir yeni (termik) donor mərkəzi yaranmışdır.

2 əyrisindən termik donor mərkəzlərinin aktivləşmə enerjisini tapa bilərik. Göstərmək olar ki, bu halda:

$$n' = \gamma N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_d^{(T)}}{kT}\right) \quad (1)$$

n' parametrini belə təyin etmək olar [2]:

$$n' = \frac{n^2 - nn_0}{(N_d^{(T)} + n_0) - n} \quad (2)$$

Burada n - elektronların konsentrasiyası, $\varepsilon_d^{(T)}$ - termik donor mərkəzinin aktivləşmə enerjisi, γ - səviyyənin cırılma dərəcəsidir. N_c belə ifadə olunur:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi k m_{nd}^* T}{h^2} \right)^{3/2} \quad (3)$$

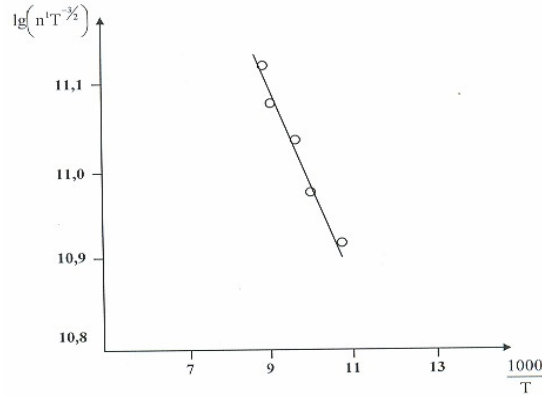
m_{nd}^* - elektronların hal sıxlığına görə hesablanmış effektiv kütləsidir.

(1)-dən alarıq :

$$\lg\left(n'T^{-3/2}\right) = \lg C' - \frac{\varepsilon_d^{(T)}}{k \cdot 10^3} \cdot \frac{10^3}{T} \quad (4)$$

(4) asılılığı şəkil 2-də göstərilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi, bu asılılıq düz xətt verir. Onun meyl bucağına görə termik mərkəzlərin aktivləşmə enerjisi hesablanmışdır:

$$\varepsilon_d^{(T)} \cong 0,04eV$$



Şəkil 2. Şəkil 1-dəki 2 əyrisindən hesablanmış $\lg\left(n'T^{-3/2}\right) - \frac{1000}{T}$ dən asılılığı.

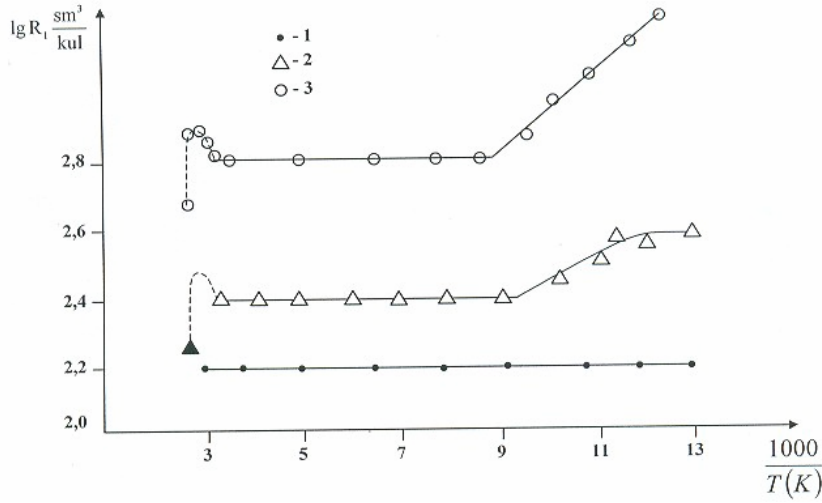
Nümunənin qızdırılıb kəskin soyudulduqdan sonra n -tipə çevrilməsi onu göstərir ki, qızdırma temperaturunda yaranan termik akseptor mərkəzlərinin konsentrasiyası ondakı Sb -un konsentrasiyasından böyükdür.

Keçiriciliyi n -tip olan nümunələr üzərində müşahidə olunan daha da maraqlı nəticələrdən bir qismi şəkil 3-də verilmişdir. Kristal $940^{\circ}S$ -də (əyri 2) və $910^{\circ}S$ -də (əyri 3) bir saat qızdırıldıqdan sonra kəskin soyudulmuşdur. Bu kristalların konsentrasiyası elə seçilmişdir ki, həm onlarda termik donor səviyyəsini aşkar etmək mümkün olsun, həm də onlarda yükdaşıyıcıların ionlaşmış aşqar mərkəzindən səpilməsi nəzərə cəpacaq dərəcədə olsun.

Sonuncu şərtin ödənilməsi Sb -un kristalda konsentrasiyasını mümkün qədər böyük götürməklə əldə edilmişdir ($N_{Sb} \sim 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$).

Termik işləmədən əvvəl və sonrakı kristalların keçiriciliyi n -tip olmuşdur. Hər iki nümunədə termik işləmədən sonra aşağı temperatur oblastında R -in dəyişmə qanunu kristallarda kiçik aktivləşmə enerjisinə malik olan donor tipli aşqar mərkəzlərinin yarandığı müşahidə olunur. 3 əyrisində $T=77K$ -in yaxın ətrafında R -in doymaya uğraması Sb -un mərkəzlərinin bir qisminin kompensasiya olunmamış qaldığını göstərir. Bu, termik donor mərkəzlərinin konsentrasiyasını hesablamağa imkan verir.

Termik donorların konsentrasiyası təqribən Sb -un konsentrasiyasının yarısına bərabərdir. Buradan donor mərkəzlərinin dərinliyi üçün alınan qiymət əvvəl aldığımız qiymətlə üst-üstə düşür.



Şəkil 3. Keçiriciliyi n -tip olan termik işlənmiş (2,3) və işlənməmiş (1) nümunələrdə Holl əmsalının temperatur asılılığı.

Şəkil 3-də yuxarı temperatur oblastında temperatur artırıldıqda R artmağa başlayır. Yəni temperatur artdıqca yükdaşıyıcıların konsentrasiyası azalmağa başlayır. Bu ilk baxışda anlaşılmaz hal kimi görünür. Lakin termik donorların yaranma mexanizmi haqda araşdırmalar onun

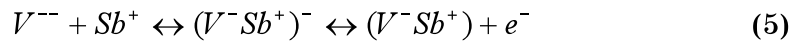
səbəbini başa düşməyə imkan verir. Bunu şərh etməzdən əvvəl, onun başa düşülməsinə kömək edən bir fakta da müraciət edək. Şəkil 4-də şəkil 3-dəki 1 və 2 əyrilərinin xarakterizə etdiyi nümunələrin yükdaşıyıcılarının yürüklüklərinin (μ) temperatur asılılığı uyğun nömrələrlə verilmişdir. Göründüyü kimi, termik işləmədən əvvəl (1 əyrisi) temperaturun artması ilə yürüklük artır. Bu cür asılılıq yükdaşıyıcıların ionlaşmış aşqar mərkəzlərindən səpilmə mexanizmi üçün xarakterikdir. Termik işləmədən sonra (2 əyrisi) yürüklüyün temperatur asılılığı yükdaşıyıcıların kristalın istilik rəqslərindən və xəlitə nizamsızlıqlarından səpilmə mexanizmi ilə xarakterizə olunur. Özü də yuxarı temperatur oblastında yürüklük (kiçik temperaturda) birdən-birə nəzərə çarpacaq dərəcədə azalır və temperaturun sonrakı artması ilə yenidən əvvəlki asılılıq bərpa olunur. Termik işləmə tədqiqatlarından alınan nəticələri araşdırdıqda termik defektlərin yaranma mexanizmi haqda əğlabatən fikir söyləməyə imkan yaranır.

Hər şeydən əvvəl aydın olur ki, birinci və ikinci termik akseptor səviyyələri eyni cür defektlərin iki müxtəlif ionlaşma dərəcəsi ilə bağlıdır. Düşünmək olar ki, bu cür defektlər yüksək temperaturlarda qızdırma nəticəsində kristalda yaranan vakansiyalarla bağlıdır. Doğrudan da, məlumdur ki, *Ge*-da (və *Si*-da) vakansiyalar (vakansiyanı *V* hərfi ilə işarə edəcəyik) növbə ilə bir və iki elektron qəbul edə bilirlər. Bu isə kristalda müxtəlif dərinliyə malik olan iki akseptor səviyyəsinin yaranmasına səbəb olacaq.

Fərz etmək olar ki, termik işləmə nəticəsində yaranan akseptor mərkəzləri məhz vakansiyalarla bağlıdır. Belə olduqda birinci və ikinci termik akseptor mərkəzlərinin konsentrasiyası bir-birinə bərabər olmalıdır. İşdə aparılan hesablamalar təcrübənin xətası daxilində $N_{a_1}^{(T)} = N_{a_2}^{(T)}$ olduğunu göstərir.

Termik donor mərkəzləri kristalın keçiriciliyi *n*-tip olduqda müşahidə olunur. Ancaq yüksək temperaturlarda kristalın tipindən asılı olmayaraq vakansiyalar yaranır.

Ona görə elə termik donor mərkəzlərinin meydana çıxması da vakansiyalarla bağlı olmalıdır. Özü də termik donor mərkəzlərini o vaxt müşahidə etmək mümkün olur ki, vakansiyaların hər biri iki elektronla yüklənmiş olsun. *Sb*-la aşqarlanmış kristalda *Sb* mərkəzləri birqat ionlaşmış müsbət yüklü atom qalıqlarından ibarətdir. İndi təsəvvür edək ki, kristalda olan ikiqat mənfi yüklənmiş vakansiya və birqat müsbət yüklənmiş *Sb* atomu bir-biri ilə rastlaşmışdır. Görəsən bu halda nə baş verər? Aydındır ki, müxtəlif işarəli yüklərə malik olan bu mərkəzlər bir-birini cəzb edəcəkdir. Nəticədə, ikiqat mənfi yüklənmiş vakansiya üstə gəl birqat müsbət yüklü *Sb* atomu kompleksi yaranacaq. Bunu sxematik olaraq belə göstərə bilərik:



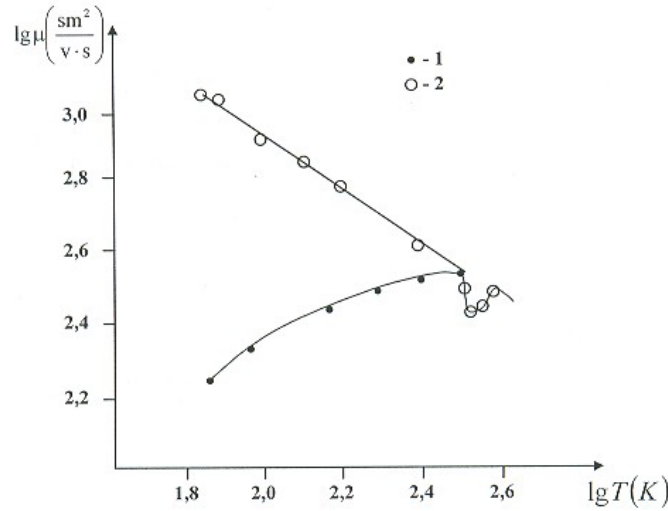
Doğrudan da bu cür sxem müşahidə olunan bütün təcrübə faktları izah etməyə imkan verir. $(V^- Sb^+)$ ion cütü yarandıqdan sonra elektrik yükü baxımından neytral olan ion cütü üçün ikinci elektron, sanki artıqlıq edir (ona ehtiyac qalmır). İon cütünü ikinci elektron asanlıqla

tərk edə bilər. Ona görə də belə kompleksin yaratdığı donor mərkəzinin aktivləşmə enerjisi kiçikdir ($\approx 0,04 eV$).

Bu cür ion kompleksinin yaranması üçün onu təşkil edən komponentlərdən heç olmasa biri kristalda kifayət qədər hərəkət (daha doğrusu, diffuziya) sürətinə malik olmalıdır. *Sb*-un kristalda diffuziya sürəti çox kiçikdir. Ancaq vakansiya (ikiqat ionlaşmış şəkildə belə) kristalda kifayət qədər böyük sürətlə miqrasiya edə bilər. Həm də düşünmək olar ki, *Sb* ionu ilə birləşmək üçün vakansiyanın çox da böyük məsafələrə miqrasiya etməsinə ehtiyac yoxdur. Çünki kristalda qızdırma zamanı vakansiyalar ilk növbədə elə nöqtələrdə yaranır ki, orada müəyyən mexaniki gərginlik mövcud olsun. Belə nöqtələr də əlbəttə ki, *Sb* atomlarının yerləşdiyi düyünlərin yaxın ətrafıdır. Ona görə də yaranmış vakansiyanın *Sb* atomunu «tapması» üçün böyük məsafə qət etməsinə ehtiyac yoxdur.

Termik donorların burada təsvir etdiyimiz yaranma sxemini yükdaşıyıcıların yürüklüyünün temperaturdan asılılıq qanunu da təsdiq edir.

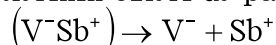
Şəkil 4-də termik işləmədən əvvəl (1 əyrisi) ionlaşmış aşqar mərkəzlərindən (müsbət yüklənmiş *Sb* atomlarından) yükdaşıyıcıların səpilmə payı nəzərə çarpacaq dərəcədədir.



Şəkil 4. Keçiriciliyi *n*-tip olan kristalda termik işləmədən əvvəl (1 əyrisi) və sonra (2 əyrisi) yürüklüyün temperaturdan asılılığı.

Termik işləmədən sonra kristal, demək olar ki, tam kompensasiya olunmuş hala gəlmişdir. Əgər bunun nəticəsində yaranan ion mərkəzləri ayrı-ayrılıqda təsir göstərsə idi, onda ionlaşmış aşqar mərkəzlərində səpilmə daha da böyük olardı və nəticədə yürüklük də xeyli azalardı. Ancaq termik işləmədən sonra *n* tip nümunədə (2 əyrisi) bunun əksi baş vermişdir. Maye azot temperaturunda bu artımın qiyməti daha da böyükdür. Bundan əlavə, şəkil 3-də yuxarı temperatur oblastında *R*-in anomal artımı müşahidə olunan qiymətlərə uyğun temperaturlarda 2 əyrisində (şəkil 4) yürüklüyün nəzərə çarpacaq dərəcədə kiçilməsi və tem-

peraturun sonrakı artması ilə əvvəlki qanunauyğunluğun yenidən bərpa olunması müşahidə olunur. Bunları biz belə izah edə bilərik: azotun qaynama nöqtəsindən temperaturu yüksəltməyə başladığında (şəkil 4, 2 əyrisi) termik donor mərkəzləri tədricən ikinci elektronlarını keçiricilik zonasına verərək, özləri ion cütünə ($V^{-}Sb^{+}$) çevrilir. Mərkəzlər tam tükəndikdən sonra elektronların konsentrasiyası dəyişməz qalır (bu, R -in sabit qiymətinə təsadüf edir). Nəhayət, temperaturun elə qiyməti gəlib çatır ki, neytral ion cütlərinin özləri də parçalanır:



Bu vəziyyətdə artıq V^{-} birqat yüklü vakansiya özünə daha bir elektron birləşdirir. Keçiricilik zonasında sərbəst elektronların konsentrasiyası azaldığı üçün R -in qiyməti artır. Burada ionlaşmış mərkəzlərin konsentrasiyası da artır. Bu isə ionlaşmış aşqar mərkəzlərindən səpilmənin payını artırır. Ona görə də bu temperaturlarda yürüklük nəzərə çarpacaq miqdarda azalır, lakin temperaturun sonrakı artımı istilik rəqslərindən səpilmənin payını artırır. Ona görə də yürüklüyün əvvəlki dəyişmə qanunu bərpa olunur.

Əgər kristalda temperaturun artması ilə məxsusi keçiricilik yaranmasa idi, onda ion cütləri tamamilə parçalanıb qurtardıqdan sonra R -in qiymətində doyma müşahidə olunardı. Lakin məxsusi keçiriciliyin yaranması bu doymanı müşahidə etməyə imkan vermir.

Beləliklə, təklif edilmiş mexanizm termik işləmə nəticəsində alınan bütün təcrübi faktları izah etməyə imkan verir.

ƏDƏBİYYAT

1. Tahirov V.İ., Əliyev V.Q., Qəhrəmanov N.F. və b. Termik işləmə nəticəsində *Ge-Si* bərk məhlullarında yaranan lokal səviyyələri haqqında // Sumqayıt Dövlət Universitetinin Xəbərləri: 2005, c.5, №3, s. 3.
2. Тагиров В.И. Полупроводниковые твердые растворы *Ge-Si*. Издательство «ЭЛМ», Баку, 1983, стр. 208.

ДОНОРНЫЕ ЦЕНТРЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ *Ge-Si-n*- ТИПА, СОЗДАВАЕМЫЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

В.И.ТАГИРОВ, З.Я.ГАСАНОВ, С.С.ЛАТИФОВА, Н.Ф.ГАХРАМАНОВ

РЕЗЮМЕ

В монокристаллах твердых растворов *Ge-Si*, легированных сурьмой, после термической обработки обнаружен донорный уровень, расположенный вблизи дна зоны проводимости на расстоянии 0,04 эВ. Энергия активизации определена из температурной зависимости концентрации носителей тока. Концентрация кремния в кристаллах равнялась 18 ат %. Донорный уровень в кристаллах обнаруживается в том случае, если центры *Sb* практически полностью компенсированы первым и вторым термическими акцепторными уровнями. Из анализа экспериментальных данных сделано заключение о том, что термический донорный уровень образуется комплексом, состоящим из двукратно отрицательно заряженной вакансии и однократно положительно заряженной

сурьмы. Температурная зависимость подвижности носителей тока хорошо согласуется с такой моделью образования термических донорных центров.

DONOR CENTRES IN THERMAL TREATED *n*-TYPE *Ge-Si* SINGLE CRYSTALS

**V.I.TAHIROV, Z.Y.HASANOV,
S.S.LATIFOVA, N.F.QAHRAMANOV**

SUMMARY

A donor level 0,04eV from the minimum of the conduction band has been found in thermal treated *n*- type *Ge-Si* (18 at.% *Si*) single crystals. The level arises in crystals if the concentration of *Sb* is approximately equal to the sum of concentrations of the two thermal acceptor levels.

The mechanism of formation of the thermal level is found: the donor centre consists of a vacancy with double electrons and a *Sb* atom with one positive charge. Such complects create the donor level.

The offered model explains as well the temperature dependence of electron mobility in thermal treated crystals.