

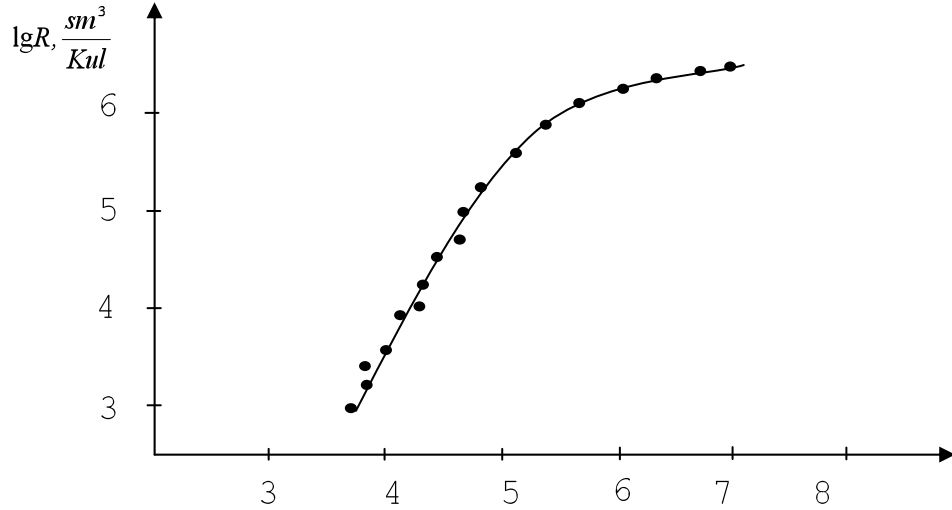
GERMANIUM-SİLİSIUM BƏRK MƏHLULLARINDA  
MİSİN İKİNCİ AKSEPTOR SƏVIYYƏSİV.İ.TAHİROV, Ə.F.QULİYEV, Z.Y.HƏSƏNOV,  
S.S.LƏTİFOVA, N.F.QƏHRƏMANOV  
*Bakı Dövlət Universiteti*

*İşdə Ge – Si (18 at.% Si) bərk məhlullarında misin ikinci akseptor səviyyəsi tədqiq edilmişdir. Misin birinci akseptor səviyyəsinin yaratdığı maneçiliyi aradan qaldırmaq üçün o, kompensasiya edilərək təsirsiz hala gətirilmişdir. Bu məqalədə kristallara əvvəlcədən donor tipli aşqar olan Sb vurulmuşdur. Sb-un kristalda konsentrasiyası elə seçilir ki, o, Cu-un birinci akseptor səviyyəsini kompensasiya etsin, onun (Cu-un) ikinci akseptor səviyyəsi isə boş qalsın. Bu cür ikiqat aşqarlanmış nümunələrdə Holl əmsalının temperatur asılılığı müəyyən neytrallıq tənliyinin həlli əsasında araşdırılmasından Cu-un ikinci akseptor səviyyəsinin aktivləşmə enerjisi təyin edilir. Onun qiyməti tədqiq olunan tərkib üçün 0,40 eV olmuşdur.*

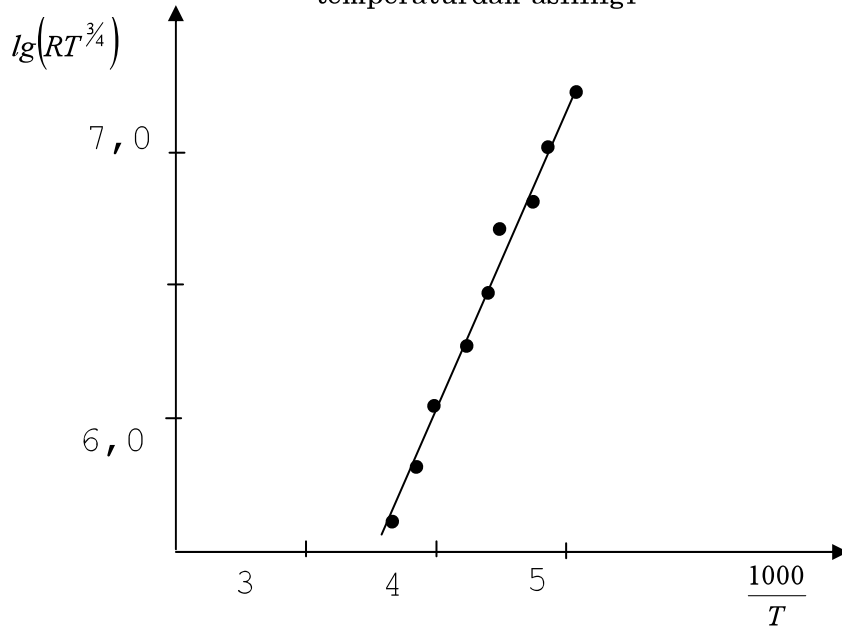
Misin ikinci akseptor səviyyəsi germaniumda qadağan olunmuş zonanın valent zonası tərəfdəki yarısında yerləşir. Onu etibarlı şəkildə müşahidə edə bilmək üçün ondan aşağıda yerləşən akseptor səviyyələrini passiv şəkllə gətirmək lazımdır. Bundan ötrü kristal donor tipli elementlərdən biri ilə aşqarlamaq tələb olunur. Donor mərkəzlərinin konsentrasiyası elə seçilməlidir ki, həm dayaz akseptor səviyyəsi, həm də misin birinci akseptor səviyyəsi kompensasiya olunsun, Cu-un ikinci akseptor səviyyəsi isə tamamilə boş qalsın. Belə olduqda misin ikinci akseptor səviyyəsini asanlıqla müşahidə etmək olar. Hazırki işdə tətbiq edilən kristal yetişdirmə texnologiyası onları istənilən səviyyədə aşqarlamağa imkan verir.

Stibiumla aşqarlanmış  $n$ -tip nümunələrdə elektronların konsentrasiyası Holl əmsalını ölçməklə təyin edilir. Cu-un kristalda həllolmasının qiymətinə görə elə temperatur seçilir ki, həmin temperaturda Cu -u difuziya yolu ilə nümunəyə vurduqda nümunə  $p$ -tipə çevrilsin. Bu zaman elə olmalıdır ki,  $N_{Cu} + N_a \approx N_{Sb}$  ( $N_{Sb}$  -stibiumun,  $N_a$  - dayaz akseptor mərkəzlərinin nümunədəki konsentrasiyasıdır) bərabərliyi (təqribən) ödənilsin. Bu halda alınmış  $p$ -tip nümunədə Cu-un ikinci akseptor səviyyəsi fəal olacaq. Belə nümunələrdən birində Holl əmsalının  $R$  temperatur asılılığı şəkil 1-də göstərilmişdir.

$R$ -in temperatur asılılığından aydındır ki,  $Cu$ -un birinci akseptor səviyyəsinin kompensasiya dərəcəsi yüz faizdən azacıq kiçikdir. Aşağı temperatur oblastında  $R$ -in zəif dəyişməsi məhz  $Cu$ -un birinci akseptor səviyyəsinin kompensasiya olunmamış hissəsi ilə bağlıdır.  $R$ -in yüksək temperatur oblastında kəskin dəyişən xətti hissəsi  $Cu$ -un ikinci akseptor səviyyəsi ilə bağlıdır.  $Cu$ -un ikinci akseptor səviyyəsinin aktivləşmə enerjisini tapmaq üçün kristalın elektrik neytrallığı tənliyindən istifadə etmək lazımdır. Şəkil 1-də verilmiş əyrinin yuxarı temperatur oblastı üçün neytrallıq tənliyini belə yazarıq:



Şəkil 1. Misin ikinci akseptor səviyyəsi fəal olan nümunədə Holl əmsalının temperaturdan asılılığı



Şəkil 2. Şəkil 1-dəki əyriyə görə hesablanmış  $\lg(RT^{3/4}) - \frac{1000}{T}$  asılılığı.

$$N_d + p = (N_{Cu}^I + N_a) + (N_{Cu}^{II} - n_2^{Cu}) \quad (1)$$

Burada sol tərəf vahid həcmdə müsbət yüklərin, sağ tərəf isə mənfi yüklərin cəmidir.  $N_d$ -donor mərkəzlərinin (stibiumun),  $p$ -sərbəstdeşiklərin,  $N_a$ -dayaz akseptor mərkəzlərinin,  $N_{Cu}^I$  -  $Cu$ -un birinci akseptor səviyyəsinin,  $N_{Cu}^{II}$ -onun ikinci akseptor səviyyəsinin konsentrasiyası,  $n_2^{Cu}$  - ikinci akseptor səviyyəsində neytral mərkəzlərin konsentrasiyasıdır. Biz aparılan təcrübi faktlara əsaslanaraq qəbul edirik ki, misin  $Ge$ -da yaratdığı müxtəlif səviyyələrin konsentrasiyası eynidir (yəni onlar müxtəlif ionlaşma dərəcəsinə malik olan eyni  $Cu$  atomları tərəfindən yaradılır). Ona görə bundan sonra, xüsusi ehtiyac olmadıqda  $Cu$ -un müxtəlif səviyyələrinə uyğun gələn konsentrasiyanı eyni cür ( $N_{Cu}$ ) işarə edəcəyik.

Şəkil 1-dən aydın olur ki,  $Cu$ -un birinci akseptor səviyyəsinin  $Sb$  tərəfindən kompensasiya olunmuş hissəsinin konsentrasiyası onun neytral qalmış hissəsinin konsentrasiyasından iki-üç tərtib böyükdür. Ona görə də təcrübə xətası daxilində hesablamalarda  $Cu$ -un birinci akseptor səviyyəsini tam dolmuş qəbul edəcəyik.

(1)-də  $n_{Cu}^{II}$  belə ifadə olunur [1]:

$$n_{Cu}^{II} = \frac{N_{Cu}}{\frac{1}{\gamma_2} \exp\left(\frac{F + \Delta E g - \varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) + 1} \quad (2)$$

Burada  $\gamma_2$ -misin ikinci akseptor səviyyəsinin cırılma dərəcəsi (statistik çəkisi),  $\varepsilon_{Cu}^{II}$ -onun aktivləşmə enerjisidir.

(2)-ni (1)-də yerinə yazaraq:

$$N_d + p = 2N_{Cu} + N_a - \frac{N_{Cu}}{\frac{1}{\gamma_2} \exp\left(\frac{F + \Delta E g - \varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) + 1} \quad (3)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{F + \Delta E g}{kT}\right), \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad (4)$$

olduğunu nəzərə alıb (3)-ün ifadəsini bir qədər dəyişdirək:

$$N_d + p = 2N_{Cu} + N_a - \frac{N_{Cu}}{\frac{N_v}{\gamma_2} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right)}{p} + 1} \quad (5)$$

Burada  $\Delta E g$  - qadağan olunmuş zonanın eni,  $F$  - Fermi səviyyəsi,  $\kappa$  - Bolsman sabiti,  $h$  - Plank sabiti,  $m_p^*$  -deşiklərin kvant səviyyələrinin

sıxlığına görə hesablanmış effektiv kütləsi,  $\varepsilon_{Cu}^{II}$  -  $Cu$  -un ikinci səviyyəsinin aktivləşmə enerjisidir.

(5)-i məxrəcdən qurtarıb  $p$  -nin üstlərinə görə düzək:

$$p^2 + \frac{N_\nu}{\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) p - \frac{N_{Cu}N_\nu}{\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) = 0 \quad (6)$$

(6) kvadrat tənliyinin həllini yazaq:

$$p = -\frac{N_\nu}{2\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) \pm \sqrt{\frac{N_\nu^2}{4\gamma_2^2} \cdot \exp\left(-\frac{2\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) + \frac{N_{Cu}N_\nu}{\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right)} =$$

$$= \frac{N_\nu}{2\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) \left[ -1 \pm \sqrt{1 + \frac{4\gamma_2 N_{Cu}}{N_\nu} \exp\left(\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right)} \right] \quad (7)$$

(7)-dəki mənfəi işarəli həll fiziki məna kəsb etmədiyi üçün o, tənliyin kənar həllidir. Şəkil 1-dəki asılılığın xətti hissəsini əhatə edən temperatur intervalında (7)-dəki kvadrat kök altındakı ikinci hədd vahiddən çox-çox böyükdür:

$$\frac{4\gamma_2 N_{Cu}}{N_\nu} \exp\left(\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) \gg 1 \quad (8)$$

Ona görə də (7)-də iştirak edən hər iki vahidi ata bilərik. Onda  $p$  -nin ifadəsi xeyli sadələşmiş olar:

$$p = \frac{N_\nu}{2\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{kT}\right) \cdot \left(\frac{4\gamma_2 N_{Cu}}{N_\nu}\right)^{1/2} \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{2kT}\right) = \left(\frac{N_{Cu}N_\nu}{\gamma_2}\right)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{2kT}\right) \quad (9)$$

$N_\nu$  -nin (4) ifadəsini burada nəzərə alaq:

$$p = \left[ \frac{N_{Cu}}{\gamma_2} \cdot 2 \left( \frac{2\pi m_p^* k}{h^2} \right)^{3/2} \right]^{1/2} \cdot T^{3/4} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Cu}^{II}}{2kT}\right) \quad (10)$$

Buradan aydındır ki, hər iki tərəfi  $T^{-3/4}$  -ə vurub loqarifmalasaq, aldığımız ifadə düz xətt tənliyi olacaq.

$$\lg\left(pT^{-3/4}\right) = \lg C - \frac{0,4343}{2 \cdot 10^{-3} k} \cdot \varepsilon_{Cu}^{II} \cdot \frac{1000}{T}, \quad C = \left[ \frac{N_{Cu}}{\gamma_2} \cdot \left( \frac{2\pi m_p^* k}{h^2} \right)^{3/2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Bu düz xəttin bucaq əmsalına görə misin ikinci akseptor səviyyəsinin aktivləşmə enerjisini:

$$\varepsilon_{Cu}^{II} = 0,4 \cdot tga \quad (12)$$

düsturu vasitəsilə hesablaya bilərik. Burada  $\alpha$  bucağı  $\lg\left(RT^{3/4}\right) - \frac{1000}{T}$  asılılığının meyl bucağıdır. Şəkil 1-dən hesablanmış bu asılılıq şəkil 2-də göstərilmişdir. Misin ikinci akseptor səviyyəsinin buradan hesablanmış aktivləşmə enerjisi  $\varepsilon_{Cu}^{II} = 0,40\text{eV}$  -a bərabərdir.

#### ƏDƏBİYYAT

1. Тагиров В.И., Тагиров Э.В., Гахраманов Н.Ф. Физика полупроводников. Изд-во СГУ, Баку-Сумгаит, 2007.

#### ВТОРОЙ АКЦЕПТОРНЫЙ УРОВЕНЬ МЕДИ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ *Ge – Si*

В.И.ТАГИРОВ, А.Ф.ГУЛИЕВ,  
У.В.ТАГИРОВ, С.С.ЛЯТИФОВА, Н.Ф.ГАХРАМАНОВ

#### РЕЗЮМЕ

В работе исследовано второе акцепторное состояние меди в твердых растворах *Ge – Si* (18 ат. % *Si*). Как первый, так и второй акцепторные уровни *Cu* находятся в нижней половине запрещенной зоны. Для исключения отрицательного влияния первого акцепторного уровня он компенсировался донорной примесью (сурьмой). С этой целью монокристаллы сперва легировались *Sb* в ходе роста кристалла, затем вырезались образцы в виде параллелепипеда, которые легировались медью методом диффузии. При двойном легировании концентрации примесей выбирались таким образом, чтобы первый акцепторный уровень меди компенсировался полностью, а ее второй акцепторный уровень оставался некомпенсированным. Исследовалась температурная зависимость коэффициента Холла и анализируя ее вместе с решением уравнения нейтральности определялась энергия активации второго акцепторного уровня меди. Она оказалась равной 0,40 эВ для исследованного состава *Ge – Si*.

#### THE SECOND ACCEPTOR LEVEL OF COPPER IN *Ge – Si* ALLOYS

V.I. TAHIROV, A.F. QULIYEV, U.V. TAHIROV, S. S. LATIPOVA N.F. GAHRAMANOV

#### SUMMARY

The second acceptor level of *Cu* in *Ge – Si* (18 at.% *Si*) alloys has been investigated. The first and second acceptor levels of *Cu* are situated in the lower half part of the forbidden zone of the crystal. To prevent the negative influence of the first level on experimental results it must be fully compensated. That is why the grown crystals were double doped with *Sb* and *Cu* successively. The concentration of the impurities were chosen in such a way to compensate the first acceptor level of copper the second one being free. Then temperature dependence of Hall coefficient of the doped crystals was investigated. Analyzing the experimental results together with the solution of the crystal neutrality equation the activation energy of the second acceptor level of *Cu* has been determined which is equal to 0,40 eV.