

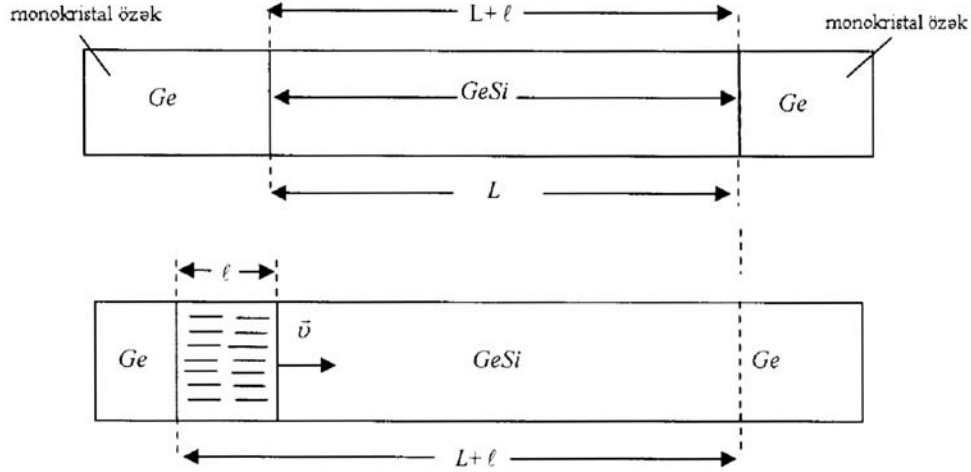
**BİNAR BƏRK MƏHLULLARIN MONOKRİSTALLARININ
ZONA ƏRİTMƏ YOLU İLƏ ALINMASINDA TƏRKİB
HAMARLANMASININ YENİ TƏTBİQ ÜSULU****V.İ.TAHİROV*, Ə.F.QULİYEV, Z.Y.HƏSƏNOV,
Ü.V.TAHİROV, N.F.QƏHRƏMANOV*****Bakı Dövlət Universiteti, Sumqayıt Dövlət Universiteti
n_gahramanov@mail.ru**

Yeni üsulla alınmış xəlitə ardıcıl olaraq istiqamətlənmiş kristallizasiyaya və zona əritməyə uğradılır. Elə etmək olar ki, xəlitənin uclarından heç olmasa birində ikinci komponentin konsentrasiyası sıfırdan başlayaraq tədricən artsın. Belə olduqda həmin uca tərkibi 100% olan komponentin monokristal özəyini əlavə etməklə zona əritmə yolu ilə binar bərk məhlulun monokristalını yetişdirmək olar.

Zonanın ön cəbhəsi sona çatdığı andan başlayaraq istiqamətlənmiş kristallizasiya rejimi başlayır və paylanma əmsali (k) vahiddən böyük olduqda ($k > 1$) bu hissədə ikinci komponentin konsentrasiyası tədricən sıfıra qədər azalır. Bu son ucu monokristal özəyi ilə yenidən təmasa gətirərək xəlitəni yenidən (əks istiqamətdə) zona əritməyə uğratmaq olar. Burada yenidən monokristal alınacaq və tərkib müəyyən mənada hamarlanmış olacaq. Hazırkı işdə tərkib hamarlanması $Ge - Si$ bərk məhlullarında (Ge tərəfdə) həyata keçirilmişdir. Tərkibin paylanma qanunu kəsilməzlik tənliyinin həllindən əldə edilir. Alınan monokristallar varizionalı quruluşların düzəldilməsində tətbiq edilə bilər.

Məlumdur ki, binar bərk məhlulların bircins tərkib paylanmasına malik polikristal xəlitələrini almaq üçün zona əritmə üsulundan istifadə edilir. Bunun üçün hər hansı üsulla (əsasən, kəskin soyutmaq yolu ilə) alınmış binar bərk məhlul xəlitəsi bir ucundan başlayaraq zona əritmə yolu ilə yenidən kristallaşmaya uğradılır. Ərimiş zona xəlitənin sonuna çatdıqdan sonra o, əks istiqamətdə hərəkət etdirilərək xəlitənin əvvəlki ucuna doğru sonadək çatdırılır. Lazım gəldikdə bu proses bir neçə dəfə (cüt sayda) təkrar etdirilir. Bu zaman xəlitənin əsas hissəsində tərkib müntəzəm paylanmış olur. Bu əməliyyat zona əritməklə tərkibin hamarlanması üsulu adlanır. Bu üsulu binar bərk məhlulların monokristallarını zona əritmə yolu ilə alarkən tətbiq etdikdə monokristallıq [2] pozulduğu üçün nəticə uğursuz olur. Ancaq hazırkı işdə bu uğursuzluğun aradan qaldırılma yolu tapılmışdı. İstiqamətlənmiş kristallizasiya ilə alınmış xəlitəni bir dəfə zona əritmə üsuluna uğratdıqda onda tərkibin paylanması [1]-də verilmişdir. Burada sonuncu l uzunluğundakı məsafədə ikinci komponentin konsentrasiyası tədricən azalaraq sıfıra çatır. Buradan isə aydın olur ki, əgər xəlitənin bu ucunu birinci komponentdən (baxdığımız halda Ge -dən) düzəldilmiş monokristal özəklə kontakta gətirib zona əritməni əks istiqamətdə davam etdirsək, biz tərkib paylanması hamarlanmış monokristal yetişdirə bilərik. Burada yenə də ilkin əridilmiş zonanı monokristal özək üzərində yaratmaq lazımdır. Təcrübənin sxemi şəkil 1-də göstərilmişdir. Zona əritməni ikinci dəfə əks istiqamətdə davam etdirmək üçün hesablamada birinci prosesdəki tərkib paylanmasını «tərsinə çevirmək» lazımdır.

Xəlitə boyunca tərkibin dəyişməsinə [1] istifadə etmək üçün onu əks istiqamətə çevirməliyik, bunun üçün birinci və ikinci mərhələnin yerini dəyişmək, vt -nin əvəzinə $(L + \ell - vt)$ yazmaq, y dəyişənini isə belə ifadə etmək lazımdır:



Şəkil 1. Zona əritməklə $Ge - Si$ bərk məhlul monokristallarında tərkib hamarlanmasının təmin olunmasının sxemi.

$$y = \frac{k}{\ell}((L + \ell) - vt), \quad t = \frac{L + \ell}{v} - \frac{\ell}{kv}y \quad dt = -\frac{\ell}{kv}dy \quad (1)$$

Burada L -xəlitənin uzunluğu, ℓ -ərimiş zonanın eni, k - ikinci komponentin birində paylanma əmsali, v - zonanın hərəkət sürəti, t -zamandır (yerdəyişmə $x = vt$ -dir). Bunları nəzərə alsaq, xəlitə boyunca tərkib paylanmasını bu şəkildə yazarıq:

$$C_1(t) = \begin{cases} 0,88C_0k \cdot \left(\frac{vt}{\ell}\right)^{k-1}, & 0 \leq t \leq t_1 = \frac{\ell}{v} \\ kC_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \{y^5 - 5y^4 + 5 \cdot 4y^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3y^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2y - \\ - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-y)\}, & t_1 \leq t \leq t_2 = \frac{L + 2\ell}{v} \end{cases} \quad (2)$$

Burada y -in yerinə onun (1)-dəki ifadəsini yazmaq lazımdır.

Zona əritmə üçün kəsilməzlik tənliyi belə ifadə olunur [3]:

$$\dot{C}_3(t) + \frac{kv}{\ell}C_3(t) = \frac{v}{\ell}C_1(t) \quad (3)$$

Burada C - ikinci komponentin konsentrasiyasıdır, 1,2 və 3 indeksləri parametrlərin uyğun olaraq xəlitəyə, kristallaşan hissəyə və əridilmiş zonaya aid olduğunu göstərir. (3)-ün ümumi həllini də yazaq:

$$C_3(t) = \exp\left(-\int \frac{kv}{\ell} dt\right) \left\{ \int \frac{v}{\ell} C_1(t) \exp\left(\int \frac{kv}{\ell} dt\right) dt + A \right\} \quad (4)$$

A - inteqrallama sabitidir.

Əvvəl birinci mərhələ üçün alınan monokristal boyunca ikinci komponentin konsentrasiyasının dəyişmə qanununu tapaq.

Kəsilməzlik tənliyinin ümumi həllində $C_1(t)$ -nin yerinə onun (2)-də birinci interval üçün verilmiş qiymətini yazıb, inteqralı həll edək:

$$C_0(t) = \exp\left(-\frac{k\nu}{\ell}t\right) \left\{ \int \frac{\nu}{\ell} \cdot 0,88C_0 k \left(\frac{\nu t}{\ell}\right)^{k-1} \exp\left(\frac{k\nu t}{\ell}\right) dt + A \right\} \quad (3)$$

$k = 6$ qiyməti üçün buradakı inteqralı həll edib alarıq:

$$C_0(t) = 0,88C_0 \cdot \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \{x^5 - 5x^4 + 5 \cdot 4x^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2x - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1\} + A' \exp(-x) \quad (4)$$

Burada x dəyişəni t vasitəsilə belə ifadə olunur:

$$x = \frac{k\nu}{\ell}t \quad (5)$$

Başlanğıc əridilmiş zonada ikinci komponentin konsentrasiyası sifıra bərabərdir. Onda $t = 0$ ($x = 0$)-da (4)-dən A' -ni belə taparıq:

$$A' = 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,88C_0 \cdot \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \quad (6)$$

(6)-ni (5)-də yerinə yazsaq:

$$C_0(t) = 0,88C_0 \cdot \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \{x^5 - 5x^4 + 5 \cdot 4x^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2x - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-x)\}, \quad 0 \leq t \leq t_1 = \frac{L}{\nu} \quad (7)$$

İkinci mərhələ üçün kəsilməzlik tənliyinin həllini tapmaqdan ötrü (3)-də $C_1(t)$ -nin yerinə onun (2)-dəki ikinci intervala uyğun qiymətini yazmalıyıq:

$$C_3(t) = \exp\left(-\frac{k\nu}{\ell}t\right) \left\{ \int \frac{\nu}{\ell} k C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} [y^5 - 5y^4 + 5 \cdot 4y^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3y^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2y - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-y)] \exp\left(\frac{k\nu t}{\ell}\right) dt + A' \right\} \quad (8)$$

İnteqralları həll etmək üçün (1)-dən istifadə edib (8)-də t -ni y dəyişəni ilə (bax: (1)) əvəz edək. Onda:

$$dt = -\frac{\ell}{k\nu} dy, \quad \exp\left(\frac{k\nu t}{\ell}\right) = \exp\left(\frac{k(L+\ell)}{\ell}\right) \exp(-y) \quad (9)$$

alarıq. (9)-u (8)-də nəzərə alsaq:

$$C_3(t) = \exp\left(-\frac{k\nu}{\ell}t\right) \left\{ C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \exp\left(\frac{k(L+\ell)}{\ell}\right) \int [-y^5 + 5y^4 - 5 \cdot 4y^3 + 5 \cdot 4 \cdot 3y^2 - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2y + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-y)] \exp(-y) dt + A' \right\} \quad (10)$$

İnteqralları açıqdan sonra (10) -u bu şəkildə alarıq:

$$C_a(t) = \exp\left(-\frac{k\nu}{\ell}t\right) \left\{ C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \exp\left(\frac{k(L+\ell)}{\ell}\right) [y^5 - 20y^3 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2y - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \exp(-y)] \exp(-y) + A' \right\} = C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} [y^5 + 5 \cdot 4y^3 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2y - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \exp(-y)] + A' \exp\left(-\frac{k(L+\ell)}{\ell} + y\right) \quad (11)$$

A' inteqrallama sabitini tapmaq üçün hər iki mərhələyə aid olan həlləri $t = t_1 = \frac{\ell}{\nu}$

anında üst-üstə salmalıyıq. $t = t_1 = \frac{\ell}{\nu}$ olduqda:

$$y_1 = \frac{k}{\ell}(L + \ell - \nu t_1) = \frac{k}{\ell}\left(L + \ell - \nu \frac{\ell}{\nu}\right) = k \frac{L}{\ell} \quad \text{və} \quad x = x_1 = \frac{k\nu}{\ell} t_1 = k \frac{\nu}{\ell} \cdot \frac{\ell}{\nu} = k$$

alarıq. x_1 -i (7)-də, y_1 -i isə (11)-də yerinə yazaq:

$$C_3(t_1) = 0,88C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \{k^5 - 5 \cdot 4k^4 + 5 \cdot 4k^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3k^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2k - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-k)\} \quad (12)$$

$$C_3(t_1) = C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \left[\left(k \frac{L}{\ell}\right)^5 + 5 \cdot 4 \left(k \frac{L}{\ell}\right)^3 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \left(k \frac{L}{\ell}\right) - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \exp\left(-k \frac{L}{\ell}\right) \right] + A' \exp\left(-\frac{k(L+\ell)}{\ell} + \left(-k \frac{L}{\ell}\right)\right) \quad (13)$$

Son iki ifadənin sağ tərəflərini bərabərləşdirib A' -i tapaq:

$$A' \exp(-k) = 0,88C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \{k^5 - 5 \cdot 4k^4 + 5 \cdot 4k^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3k^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2k - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-k)\} - C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \left[\left(k \frac{L}{\ell}\right)^5 + 5 \cdot 4 \left(k \frac{L}{\ell}\right)^3 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \left(k \frac{L}{\ell}\right) - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \exp\left(-k \frac{L}{\ell}\right) \right] \quad (14)$$

Buradan A' -in ifadəsini belə alarıq:

$$A' = C_0 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \{0,88[k^5 - 5 \cdot 4k^4 + 5 \cdot 4k^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3k^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2k - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-k)] - \left[\left(k \frac{L}{\ell}\right)^5 + 5 \cdot 4 \left(k \frac{L}{\ell}\right)^3 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \left(k \frac{L}{\ell}\right) - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \exp\left(-k \frac{L}{\ell}\right) \right]\} \exp(k) \quad (15)$$

A' -in (15) qiymətini (11)-də yerinə yazmaq lazımdır.

(7) və (11)-i nəzərə alsaq, yetişdirilmiş monokristal boyunca ikinci komponentin konsentrasiyasının dəyişmə qanununu belə yazarıq:

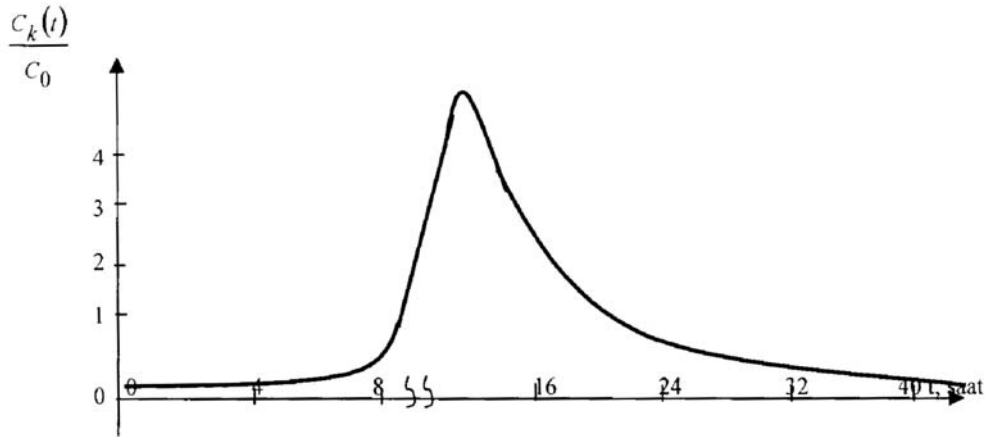
$$\frac{C_2(t)}{C_0} = \frac{kC_3(t)}{C_0} = \begin{cases} k \cdot 0,88 \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} \{x^5 - 5x^4 + 5 \cdot 4x^3 - 5 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2x - \\ - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \exp(-x)\}, & x = \frac{k\ell t}{L}, 0 \leq t \leq t_1 = \frac{L}{k\ell} \\ k \cdot \left(\frac{\ell}{kL}\right)^{k-1} [y^5 + 5 \cdot 4y^3 + 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2y - 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \exp(-y)] + \\ + \frac{A''}{C_0} k \cdot \exp\left(-k \frac{(L+\ell)}{\ell} y\right), & t_1 \leq t \leq \frac{L+\ell}{\ell} = t_2 \\ y = k \left(\frac{L+\ell - \ell t}{\ell}\right) \end{cases} \quad (16)$$

$k = 6$, $\ell = 16 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$, $\nu = 2 \frac{\text{mm}}{\text{saat}}$ qiymətləri üçün ikinci komponentin

konsentrasiyasının yetişdirilmiş monokristal boyunca (16)-dan hesablanmış dəyişmə qanunu şəkil 2-də və cədvəl 1-də verilmişdir.

Göründüyü kimi, alınmış monokristal boyunca ikinci komponentin konsentrasiyası sıfırdan başlayaraq əvvəl tədricən, sonra isə daha kəskin artır, maksimumdan keçir, tədricən azalır və asimptotik olaraq sıfıra yaxınlaşır. Konsentrasiyanın başlanğıcda dəyişməsindən aydın olur ki, zonanı əks istiqamətdə yönəldərkən ilkin əridilmiş zonanı tamamilə monokristal özəyində deyil, onun yarısını xəlitənin üzərinə sürüşdürmək daha da əlverişli ola bilər.

Tərkibin şəkil 2-də göstərilmiş paylanması varizionalı quruluşların düzəldilməsi üçün böyük uğurla istifadə edilə bilər.



Şəkil 2. İkinci komponentin konsentrasiyasının alınmış monokristal boyunca (16)-dan hesablanmış dəyişmə qanunu.

Cədvəl 1

Kristal boyunca ikinci komponentin (3.97)-dən hesablanmış dəyişmə qanunu

t , saat	$\frac{C_k(t)}{C_0}$	t , saat	$\frac{C_k(t)}{C_0}$
0	0	28	0,4852086
1	0,000000	29	0,4106739
2	0,0000001	30	0,3456284
3	0,0000012	31	0,2891324
4	0,0000060	32	0,2403102
5	0,0000211	33	0,1983487
6	0,0000587	34	0,1624943
7	0,0001382	35	0,1320513
8	0,0002888	36	0,1063790
9	2,6296531	37	0,0848898
10	3,6102450	38	0,0670470
11	3,8332455	39	0,0523619
12	3,7182975	40	0,0403921
13	3,4623606	41	0,0307390
14	3,1572614	42	0,0230454
15	2,8452187	43	0,0169932
16	2,5450707	44	0,0123014
17	2,2646624	45	0,0087233
18	2,0066962	46	0,0060446
19	1,7714938	47	0,0040809
20	1,5583002	48	0,0026755
21	1,3652978	49	0,0016969
22	1,1928956	50	0,0010369
23	1,0378650	51	0,0006078
24	0,8994019	52	0,0003404
25	0,7761552	53	0,0001816
26	0,6668394	54	0,0000922
27	0,5702388	57	0,0000057

ƏDƏBİYYAT

1. Tahirov V.İ., İbrahimova A.R., Tahirov Ü.V., Cəfərov T.Q., Qəhrəmanov N.F. Zona əritmə yolu ilə hazırlanmış qidalandırıcının tətbiqi ilə binar bərk məhlulların monokristallarının alınma üsulu // BDU "Elmi Xəbərlər", Fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, Bakı, 2004, №2, s. 88-94.
2. Тагиров В.И., Тагиров Э.В., Гахраманов Н.Ф. Физика полупроводников. Баку-Сумгаит: СДУ, 2007, 311 с.
3. Тагиров В.И. Полупроводниковые твердые растворы *Ge-Si*. Баку: Элм, 1983, 270 с.

**НОВЫЙ ВАРИАНТ ВЫРАВНИВАНИЯ СОСТАВА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ
МОНОКРИСТАЛЛОВ БИНАРНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
ЗОННОЙ ПЛАВКОЙ**

В.И. ТАГИРОВ, А.Ф.ГУЛИЕВ, З.Я.ГАСАНОВ, Н.Ф.ГАХРАМАНОВ

РЕЗЮМЕ

Слитки твердых растворов получают последовательным применением направленной кристаллизации и зонной плавки. При этом можно изготовить такие слитки, в которых хотя бы в одном из концов концентрация одной из компонент будет постепенно увеличиваться, начиная от нуля. Приводя этот конец в контакт с моно-

кристаллической затравкой, компоненты со 100%-ным содержанием можно выращивать монокристаллы бинарных твердых растворов зонной плавкой. С момента, когда передний край расплавленной зоны доходит до другого конца слитка, режим изменяется и процесс продолжается направленной кристаллизацией. Если коэффициент распределения (k) второй компоненты больше единицы ($k > 1$), ее концентрация с этого момента будет постепенно уменьшаться, стремясь к нулю в конце слитка. Приводя в контакт этот конец с монокристаллической затравкой, можно снова подвергать слиток зонной плавке в обратном направлении и выращивать монокристаллы. При этом распределение состава будет в определенном смысле выравниваться. В настоящей работе процесс осуществлен на системе $Ge - Si$ (со стороны германия).

Распределение состава установлено решением уравнения непрерывности. Полученные монокристаллы могут быть использованы для изготовления варизонных структур.

SMOOTHING UP OF THE CONTENT DISTRIBUTION IN SINGLE CRYSTALS GROWN BY ZONE MELTING

V.I. TAHIROV, A.F.GULIYEV, Z.Y.HASANOV, N.F.GAHRAMANOV

SUMMARY

The ingots are prepared successively using Bridgman and zone melting methods. Thus, one can make such ingots in which concentration of the second component from one of the two ends will increase gradually from zero. Providing this end with contact with a single crystal seed of the component with 100% content one can grow binary solid solution single crystals by zone melting. When the front boundary of the zone comes to the other end of the ingot the crystallization regime is changed and the second component concentration begins to decrease approaching to zero if distribution coefficient (k) is more than unit ($k > 1$). Providing this end to contact with another seed crystal one can grow a single crystal by zone melting with the opposite direction. Thus, the content distribution will be smoothing.

The method is applied to $Ge - Si$ system (with Ge rich side).

Content distribution is determined by solving the continuity equation. The grown single crystals can be used for the construction of vary-zone structures.