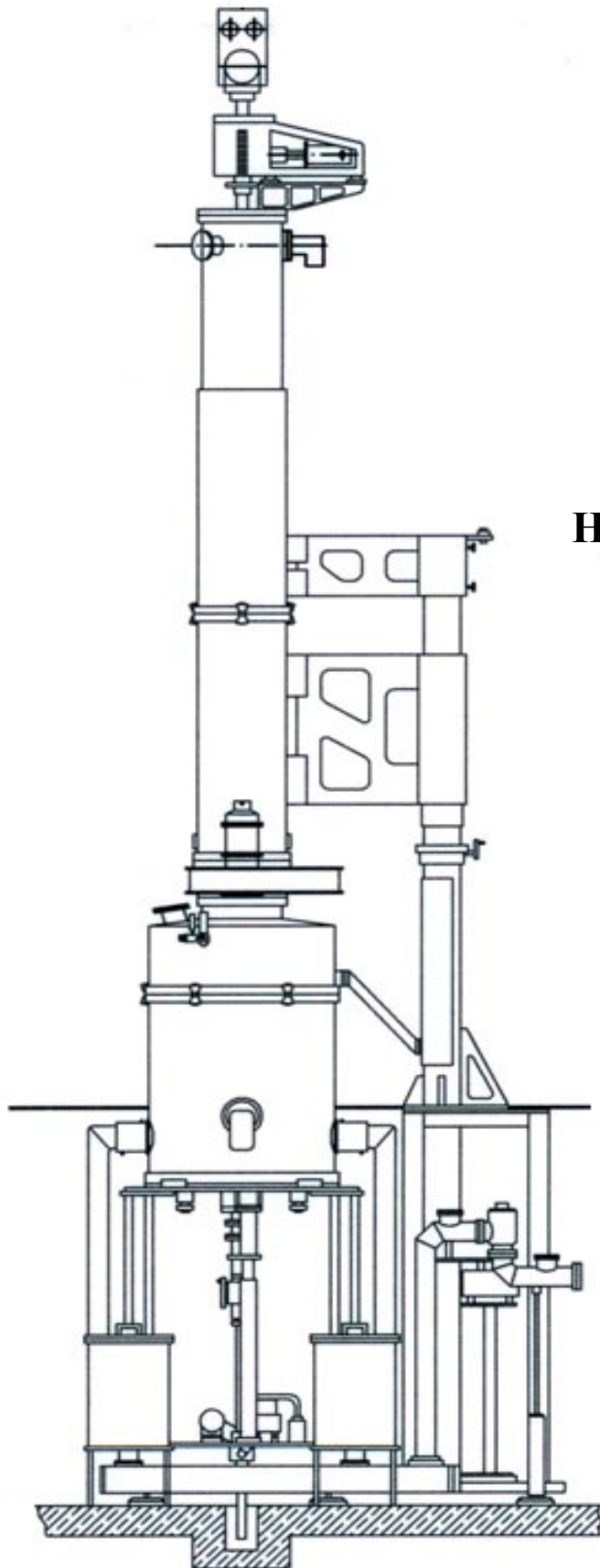


І. Ф. ЧЕРВОНИЙ, Є. Я. ШВЕЦЬ, Р. М. ВОЛЯР
О. П. ГОЛОВКО, С. Г. ЄГОРОВ, Ю. В. ГОЛОВКО

ВИРОБНИЦТВО НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ



**І. Ф. ЧЕРВОНИЙ, Є. Я. ШВЕЦЬ, Р. М. ВОЛЯР
О. П. ГОЛОВКО, С. Г. ЄГОРОВ, Ю. В. ГОЛОВКО**



**ВИРОБНИЦТВО
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Запорізька державна інженерна академія

**І. Ф. ЧЕРВОНИЙ, Є. Я. ШВЕЦЬ, Р. М. ВОЛЯР
О. П. ГОЛОВКО, С. Г. ЄГОРОВ, Ю. В. ГОЛОВКО**

**ВИРОБНИЦТВО
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Затверджено
Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
як підручник
для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямом підготовки «Металургія»*

Запоріжжя
ЗДІА
2012

УДК 621.315

*І.Ф. Червоний, доктор технічних наук, професор, академік АН ВШУ
Є.Я. Швець, кандидат технічних наук, професор
Р.М. Воляр, кандидат технічних наук, доцент
О.П. Головка, кандидат технічних наук, доцент
С.Г. Єгоров, кандидат технічних наук, доцент
Ю.В. Головка, кандидат технічних наук, доцент*

*Рекомендовано до друку:
рішенням вченої ради Запорізької державної інженерної академії
(протокол № 3 від 03.11. 2011 р.)*

Рецензенти:

О. В. Рабинович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії кольорових металів Національної металургійної академії України, (м. Дніпропетровськ)

М. О. Маняк, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кольорових металів Донецького національного технічного університету (м. Донецьк);

І. П. Волчок, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології металів Запорізького Національного технічного університету (м. Запоріжжя).

Червоний І. Ф., Виробництво напівпровідникових матеріалів І. Ф. Червоний, Є. Я. Швець, Р. М. Воляр, О. П. Головка, С. Г. Єгоров, Ю. В. Головка / За ред. доктора технічних наук, професора Червоного І. Ф. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 175 с.

ISBN

У навчальному посібнику викладені основи виробництва елементних напівпровідникових матеріалів і напівпровідникових з'єднань, котрі вирішують найважливіші питання експлуатації машин і механізмів, контролю виробничих процесів, вірошування кристалів та ін. Детально розглянутий фізичні основи та технологічні прийоми обробки початкових матеріалів і виробництва готових продуктів. Підручник призначений для студентів, які навчаються за напрямком підготовки «Металургія» по спеціальності «Металургія кольорових металів».

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України, як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком підготовки «Металургія». Гриф № 1/11-1168

	.....	5
1	.....	7
1.1	.....	8
1.2	.....	10
1.3	.....	17
1.4	.....	23
1.5	.....	32
1.6	.....	37
2	.....	38
2.1	.....	38
2.2	.....
	.....	42
2.3	.....	47
2.4	.....	50
3	.....	51
3.1	.....	51
3.2	.....	52
3.3	.....	57
3.4	.....	60
	
3.5	.....	67
3.6	.....	73
3.7	.....	73
4	.....	75
4.1	.....	75
4.2	.....	76
4.3	.....	87
4.4	.....	102
5	.....	103
5.1	.....	103
5.2	.....	104
5.3	.....	107
5.4	.....	111

5.5	,	.....	114
5.6		.....	122
6		.....	123
7		.....	125
7.1		.....	125
7.2		.....	127
7.3		.....	132
7.4		-	
		.....	141
7.5	,	.....	148
7.6		.....	157
8		.....	166
		.....	172
		Si,	
Ge	GaAs.....	.....	173
		.....	175

,
 . ,
 , ,
 , ,
 ,
 ,
 IV, V, VI
 (,),
 ,
 IV
 .
 , , 50-70-
 . 20 . , ,
 , , ,
 , ..
 -
 (. , , 1873 .),
 (. . , 1874 .),
 (PbS),
 (1900-
 1905 .), ()
 (. . , 1922 .), (.
 , . , . , 1948 .),
 (1959 .),
 (1959-1961 .).
 - (. .
 , . . , . . , . . , . . , . . ,
 . . , . . , . . , . . , . . ,
 . . , . . , . . , . . .).
 :
 ,
 .

70- . 20 .

$10^3 \dots 10^4$

Si

Ge

0,1...45

V

(, As Sb)

III

(B, Al, Ga, In) -

Si

Ge

..

$A^{III}B^V$ (

III

V

) -

b,

(GaAs, InAs, GaP, InP, InSb, AlN, BN ..).

As,

II

IV

$A^{II}B^{VI}$

ZnO, ZnS, CdS, CdSe, ZnSe, HgSe, CdTe, ZnTe, HgTe,

Te,

, As, Sb, Bi Ge, S, Se,

1

,

(

, . .).

1833 .

« »

(100)

1948 .

.1.1.



1.1 –

1.1

GaAs,

Bi₂Te₃

ZnSiP₂.

« » -

« ».

InP

Bi₂Te₃ -

A₂^VB₃^{VI},

ZnSiP₂-

A^{III}B^V,

A^{II}B^{IV}C₂^V . .

Si_{1-x}Ge_x,

InAs

InP -

InAs_{1-x}P_x,

(-)).

InAs_{0,8}P_{0,2}

0,2

0,2

InP

0,2·100 = 20 %

()/In .

$A^{III}B^V, A^{II}B^{VI}$

1.2

,

.1.2, .

,

,

,

12 ;

6

12)

24 ,

(

8

) - 16 .

,

,

,

(

),

.

,

.

,

.

.

1

3

$10^{22} \dots 10^{23}$

,

-

$10^{22} \cdot 10^{23}$

,

,

,

,

,

,

,

,
.
,

.1.3

.. - (IV).

2s 2 .

2 6

0

8

, .
,
0 , ,

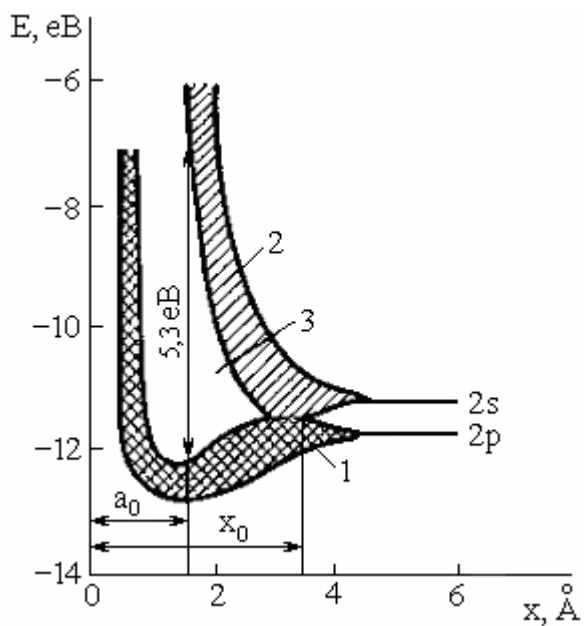
4

(~5,3) 4

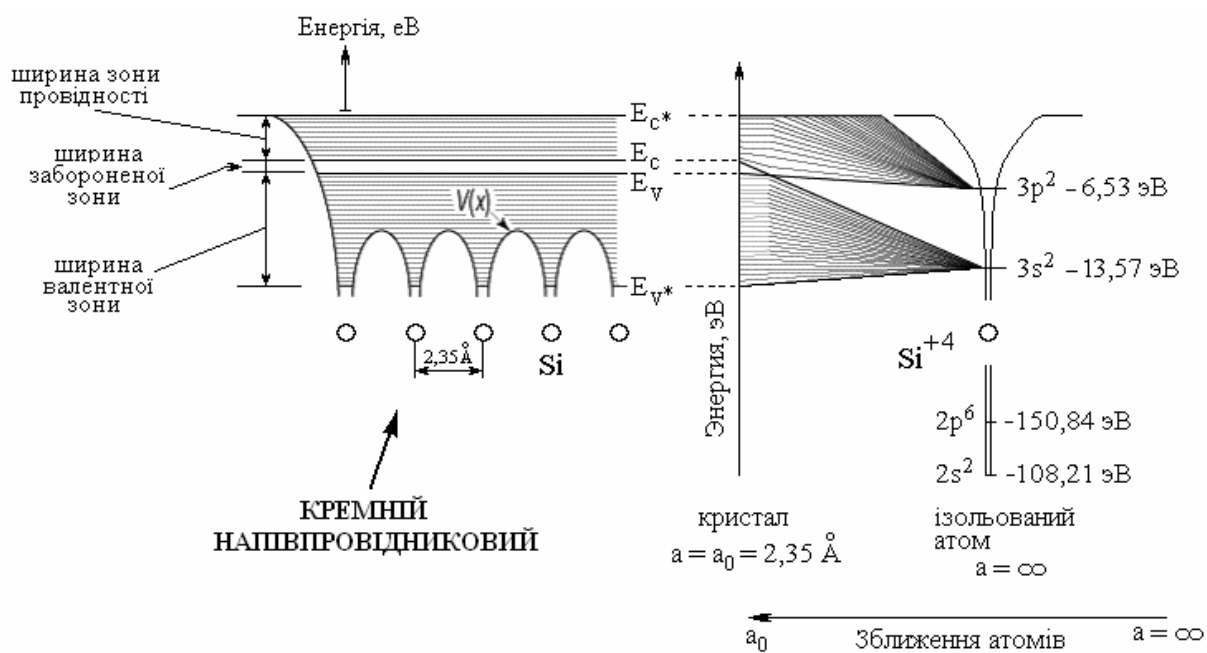
, , .

.1.4.

, : ,



1 – , ; 2 – , ; 3 –
 ; 0 – – ; 0 – –
 ,
 1.3 –
 :

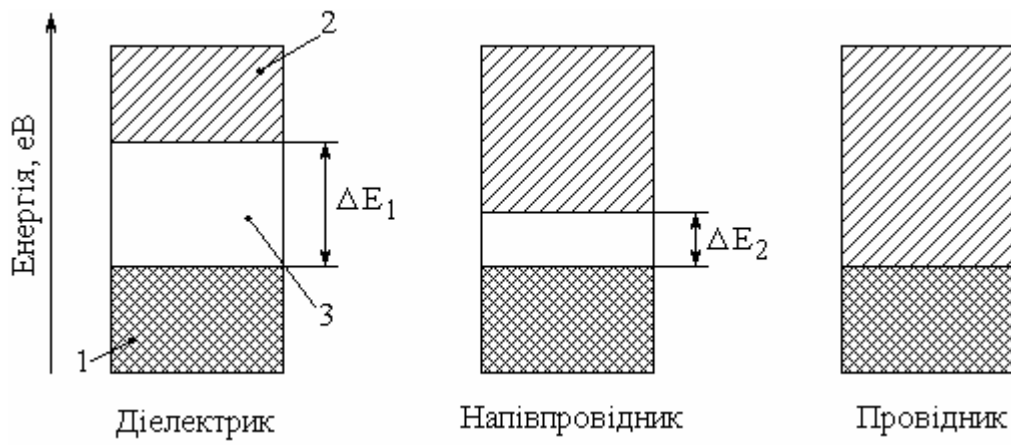


1.4 –

,

,

1.5.



1 –

; 2 –

;

3 –

Δ

1.5 –

:

$10^{-8} \dots 10^{-4}$,

0

$3/2 kT$.

0,04 ,

Δ .

« ».

1.3

m_0

$$\mu = \frac{\bar{v}}{U}, \frac{2}{\dots} \quad (1.2)$$

$$j = en\bar{v}, \text{ A/c}^2, \quad (1.3)$$

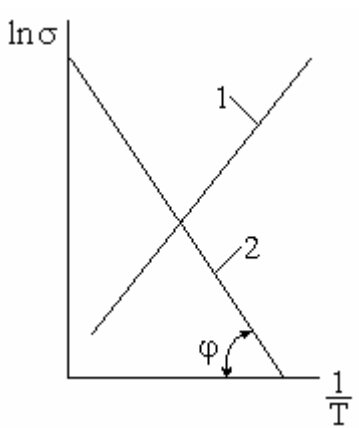
$$\sigma = 1/\rho - \dots \quad (1.4)$$

$$\sigma = en\mu, \dots \quad (1.5)$$

(
)

(1.6, 1)

$$\sigma = \dots \dots \dots (1.6)$$



1 - , 2 -
1.6 -

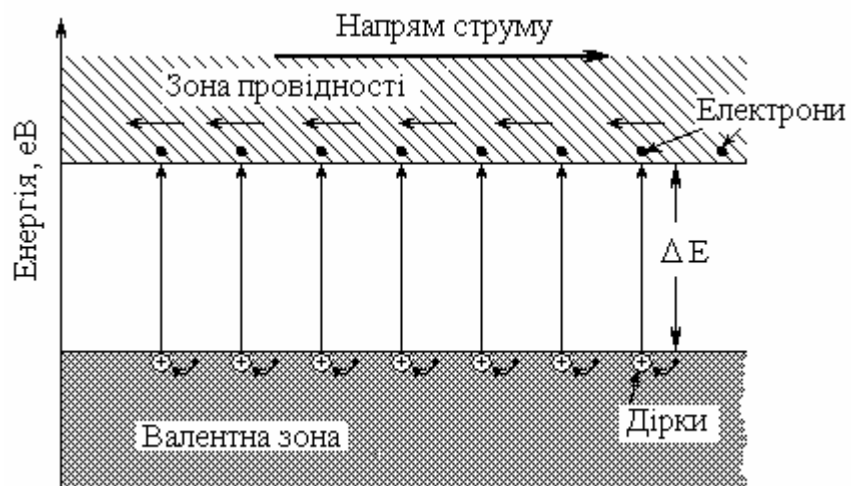
()
 (.1.6, 2).

$$\sigma = B \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (1.7)$$

$0,86 \cdot 10^{-4}$ / ; - ; k - ; - .

(), (,) .

(.1.7).



1.7 –

$$(\Delta = 0,18)$$

:

$$\sigma_n = e\mu_n n ; \quad \sigma_p = e\mu_p p$$

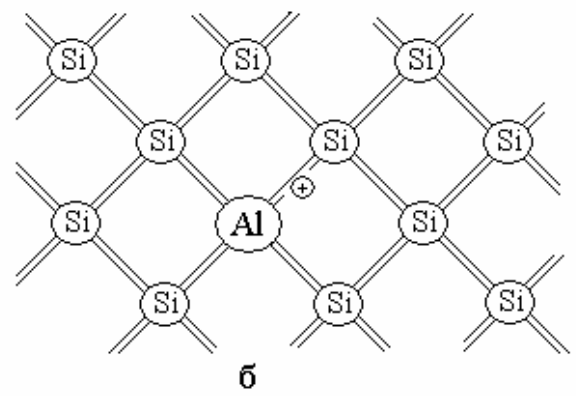
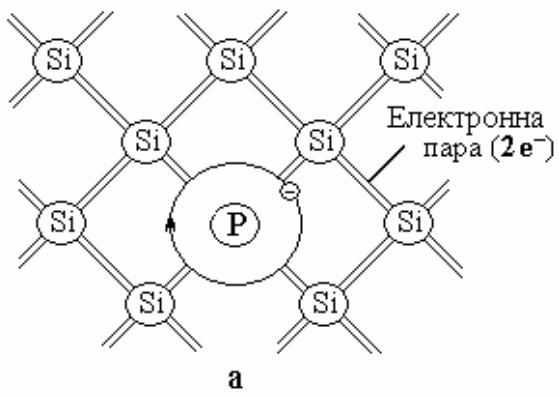
$$\mu_n \quad \mu_p -$$

$$, n \quad p -$$

1.4

V

(.1.8,)



1.8 -

()

()

III

(1.8,).

Γ.

V

VI

$A^{III}B^V$..

, IV - $A^{III}B^V$..

III

- N_D

- N_A ,

$\Delta_D \Delta$ ().

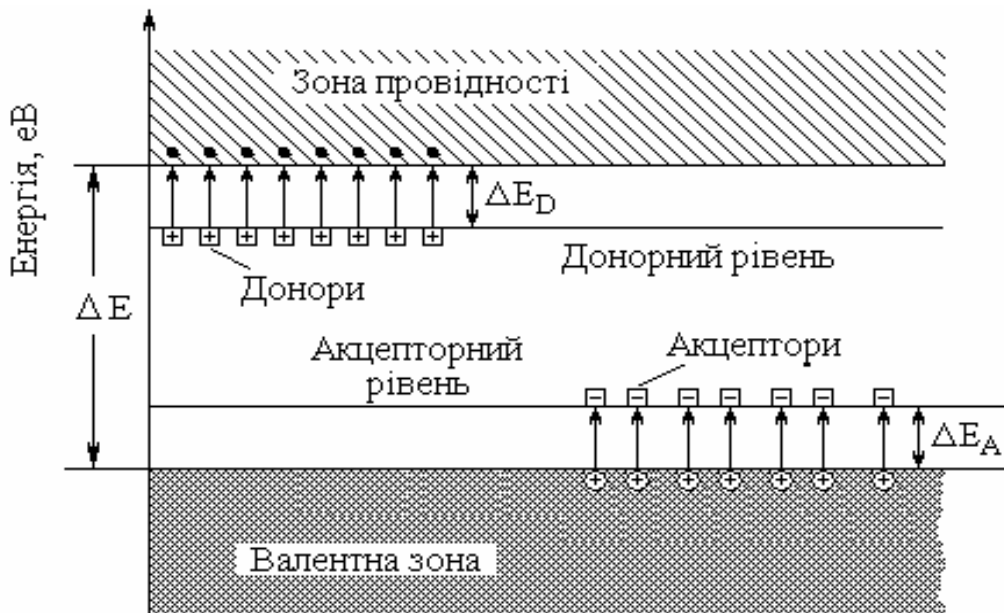
(1.9).

D,

», «».

», ,

(. .1.8)



1.9 –



N_D N^- ; N_D^+ N_A^- ; $-$ $+$ $-$

(1.8) (1.9) , (1.10) -
($-$ $+$).



(1.8) (1.11) (1.10), -

(.1.10).



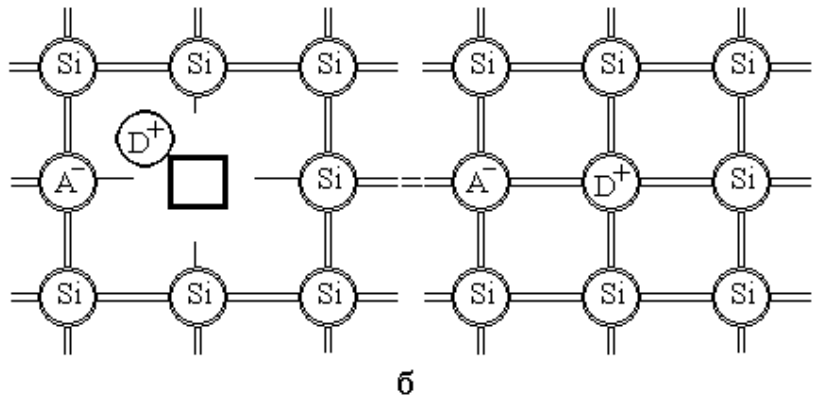
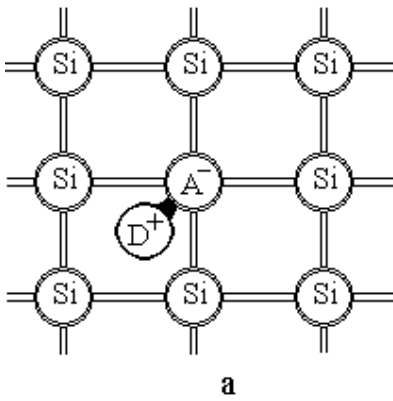
1.10 –

()

(1.11,).

(),

(1.11,).



((DA)

); -

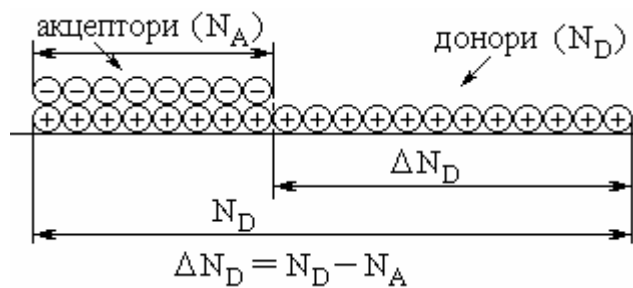
1.11 -

(DA)⁻.



, (, ,
 .)
 .
 ,
 (- ,)
 ,
 .
 - ,
 - ,
 .
 .
 (. .1.11,) ,
 ,
 .
 - , ,
 , ,
 , (0,01) ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ()
 .
 ,
 ,
n- .
 , -
 ,
 - .

.1.12.



1.12 –

n-

N_D

(n-)

N_A

(N_D)

– $\Delta N_D = N_A$)

$$\gamma_D = N_A/N_D$$

.1.12

$$\Delta N = N_A - N_D$$

N .

$$\gamma_A = N_D/N_A.$$

$$\rho_n = \frac{1}{e \cdot \mu_n \cdot \Delta N_D}; \quad \rho_p = \frac{1}{e \cdot \mu_p \cdot \Delta N_A};$$

n- p-

p-n-

p-n-

(

), 1.13.

(p-),

(n-

),

, p-n-

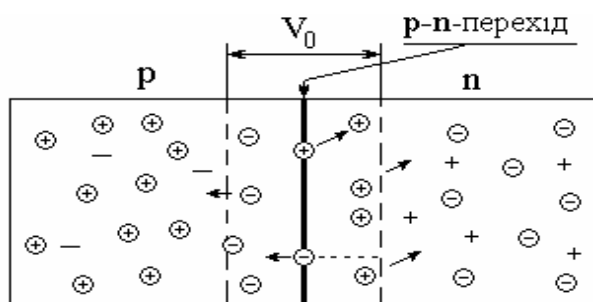
,

n-

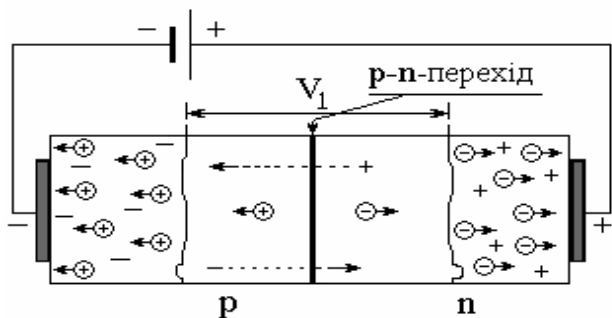
n-

p-

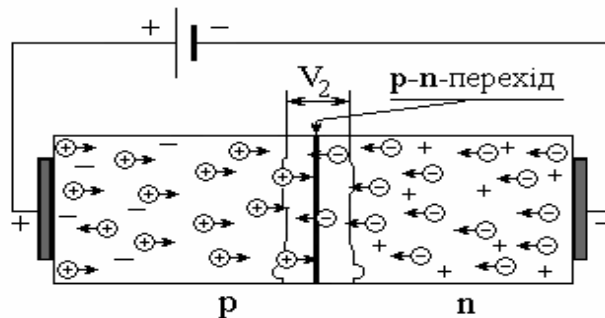
, 1.13, .



а)



б)



в)

1.13 –

p-n-

)

)

)

p-

-

n-

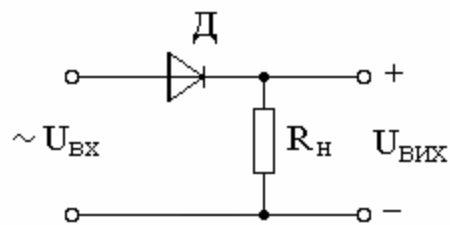
-

V_0 ,

p-

, n-
 - ,
 n- , p-
 , .1.13, .
 , p-n-
 ,
 (() n-
 () p- , p-n-
 ,
).
 n- V_1 () , p-n- p-
 , p- n-
 , p-n-
 , n-
 , p-n- , .1.13, .
 V_2 (p-n- n-
). p-n- n-
 , p-n-
 p-n-

.1.14.



1.14 -

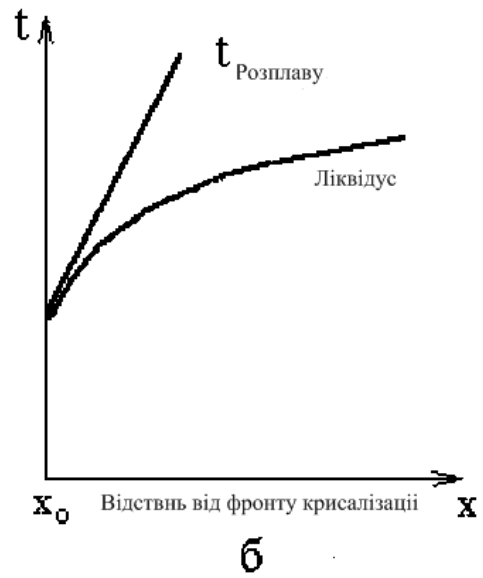
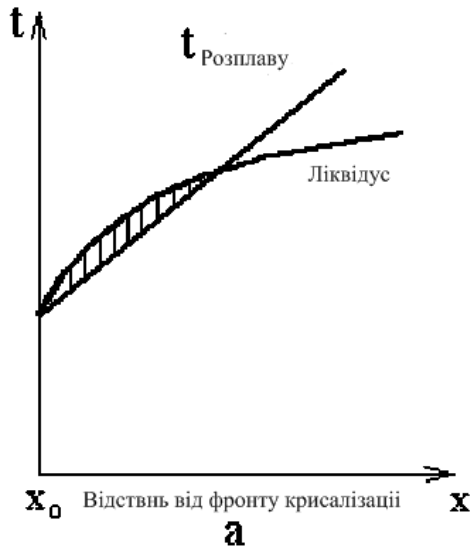
(p-n-)

1.5

(<1)

(. 1.15).

(.1.15,).



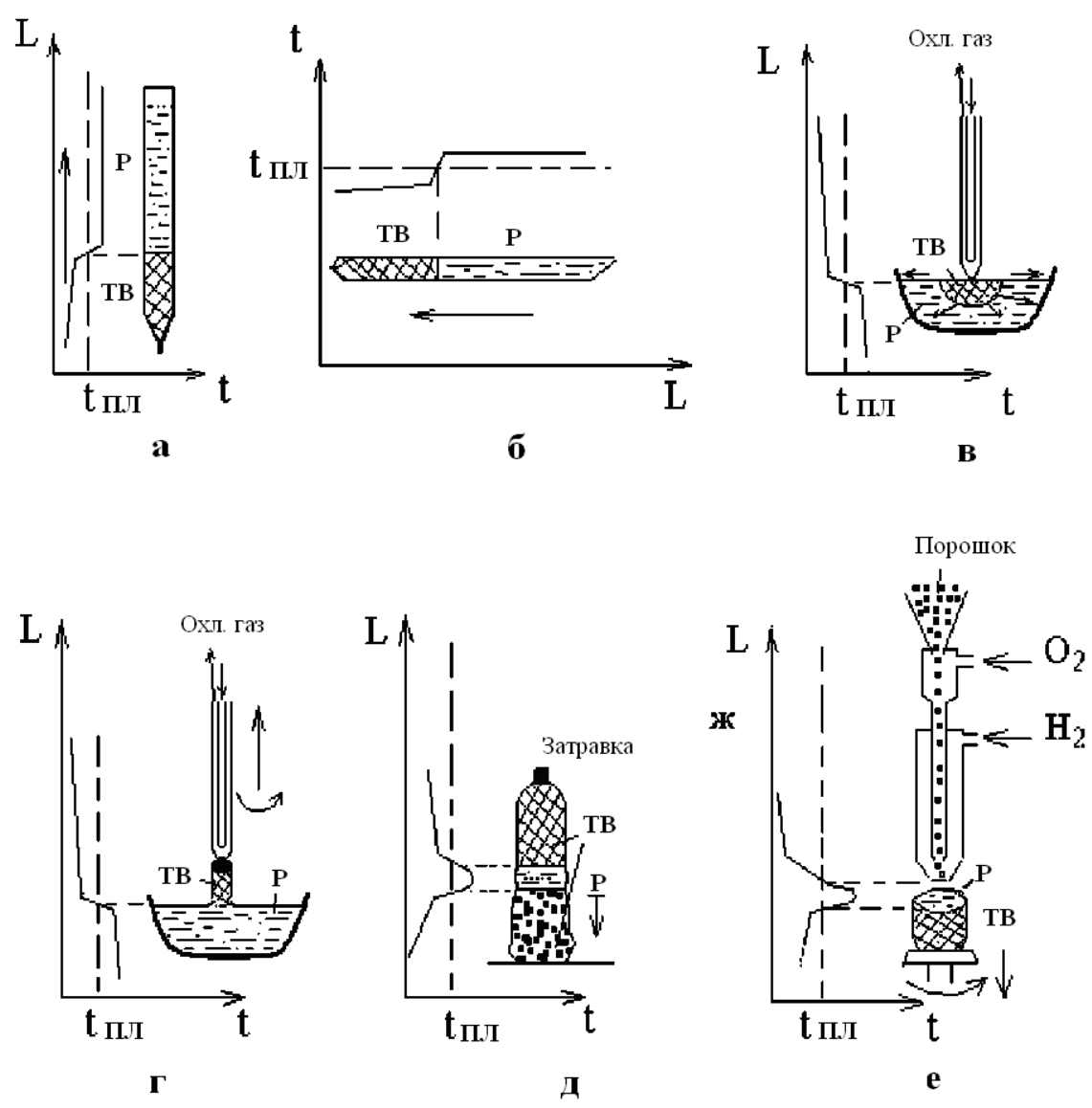
1.15 –

()

()

: ;
 « ’ ».

(.1.16).



1.16 -

()
 (,) ; ()
 « ’ » () () () ;

(. 1.16, ,).

(1924 .)

(. 1.16,),

(1925 .)

(1939 .)

(1926 .)

(. 1.16,).

« »

(1928 .)

(. . 1.16,)

1915 .

(1918 .)

(. 1.16,).

v

« ' » (1952 .)

(. 1.16,)

(.)

()

(1902 .)

1.16,).

(.)

, $1_2 3$ (,), ZrO_2 .

1.6

- 1.
2. ?
3. , ?
4. ?
5. .
6. .
7. .
- 8.
9. ?
10. ?
11. .
12. ?
13. .
14. ?
15. ?
16. ?
17. .
18. .
19. .
20. « ».

2

2.1

(, . .)

, , , . , . , - , . , 4,3 / ³.

()

70°

4,45 / ³.

α- β-

4,81 / ³.

15 %.

) 4,06 / ³.

(

217° ,

684,8° .

185°

12,0 %,

- 25,0 %.

:

,°	200	235	280	350	430	550	684,8
, .	1103	1102	1101	1,0	10	100	760

150°

100°



200°



575°

()

42°

2,12 / ³.

: SeO, SeO₂



3,6...3,9 / ³,

(70 % 20°)

340° ,

317° .



3,6 / ³,

118°



(,)



305 °



196 °



Se SeCl₄. 85 ° 127 ° 25 ° 2,77 / 3.

II

A^{II}B^{VI}.

70 %,

50000 .

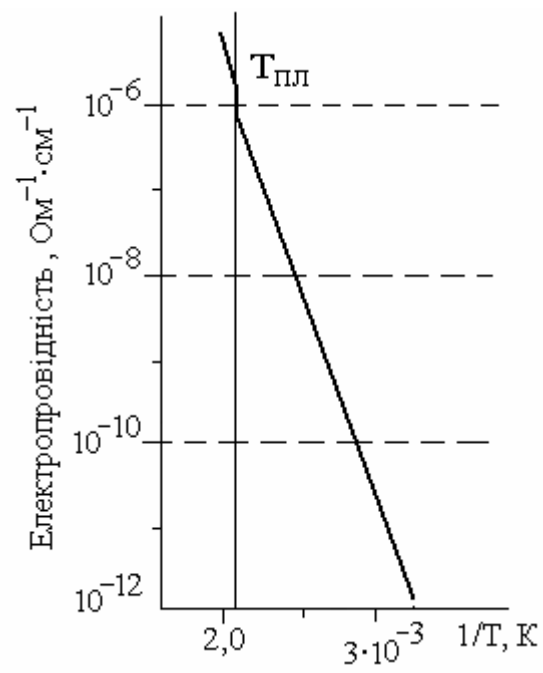
1,8 .

1²/(.).

(10¹² .)

(.)

(.2.1).



2.1 –

2.2

$6 \cdot 10^{-5} \% (\quad)$,

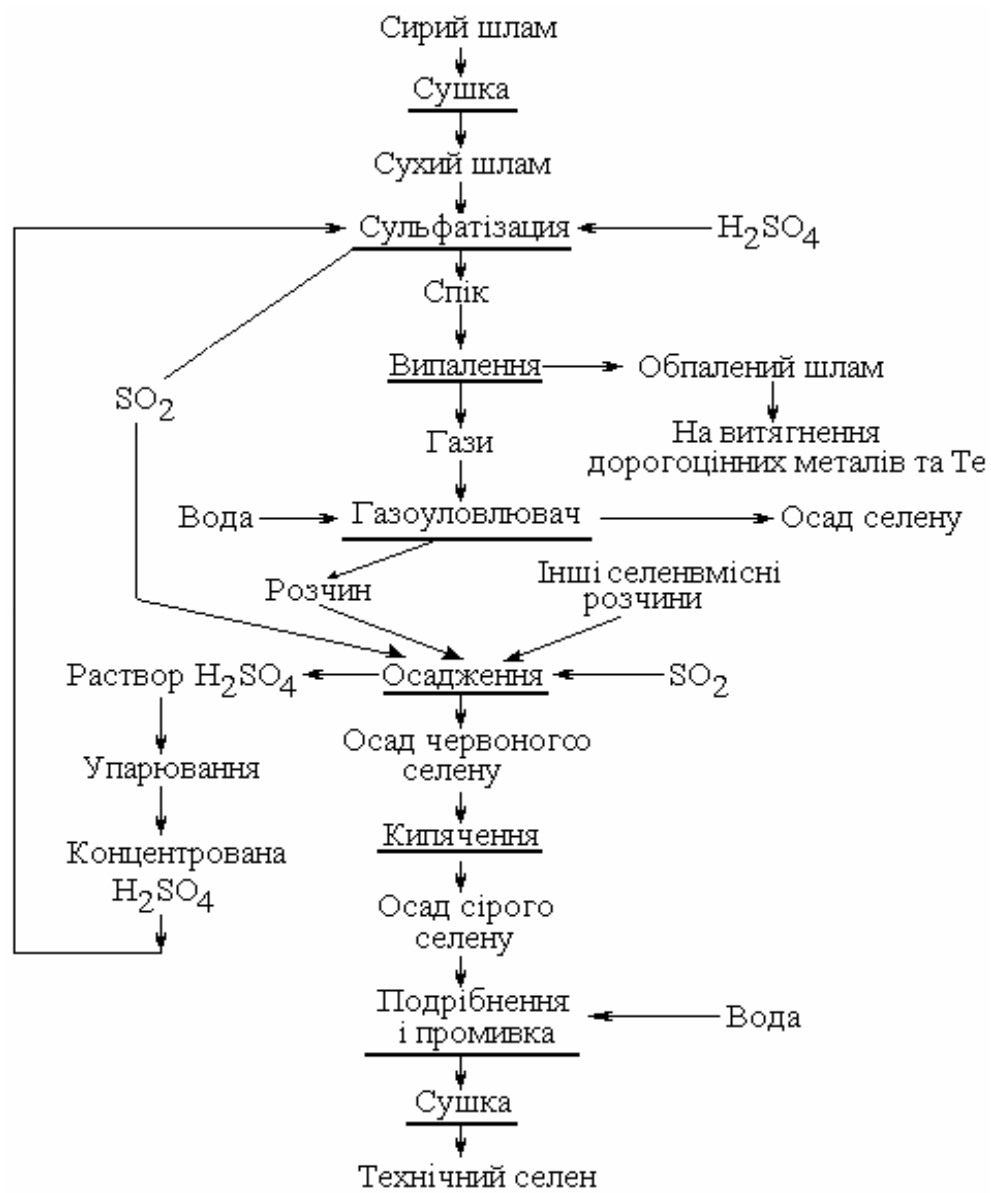
60 %

(2.2)

120...150 °C

5 %.

1:2,2.

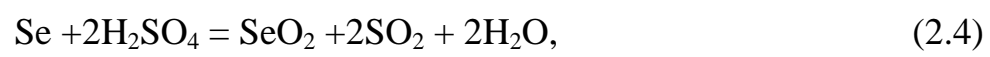
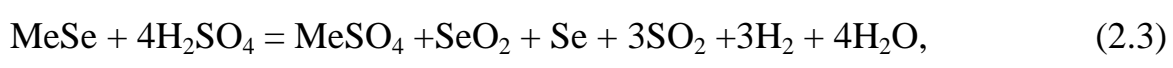


2.2 –

150...230 °

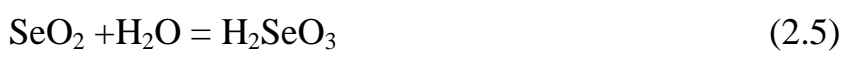
2...5 ,

:



Me -

(2.2), (2.3) (2.4)



425...480 ° ,



15...31 ° ,

5 .

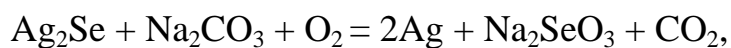
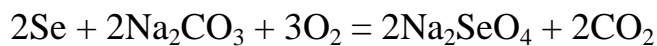
(2.6),

(2.6),

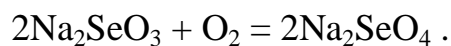
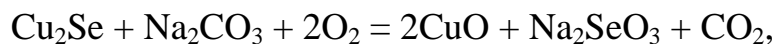
450..500°

25...40

% ().



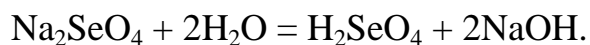
(2.7)



80...90°

Na_2SeO_4

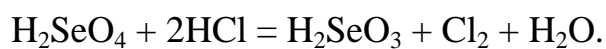
:



(2.8)

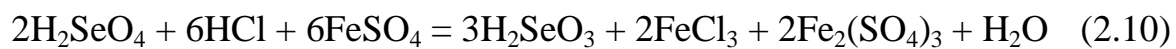
= 3,8.

:



(2.9)

FeSO₄:



2 . ,
[. (2.6)].

, .

,
,

14...20

135...150°

90 %

[. (2.6)].

. , ,

2...5 %-

: , , 3.

80...85 °

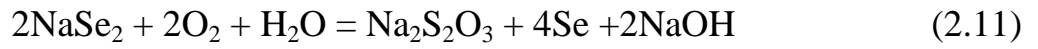
1...2 .

, , ,

Na₂S.

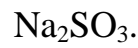
Na₂Se₂,

Na₂TeS₈.



2.3

, 97,5...99,0 % () : $2 \cdot 10^{-2} \dots$
 $5 \cdot 10^{-1}$ % () Fe; $5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ % u b; $1 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-1}$ Hg As;
 $5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-1}$ % S $(1 \dots 5) \cdot 10^{-2}$ % () .

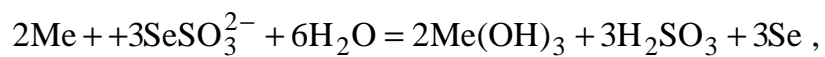
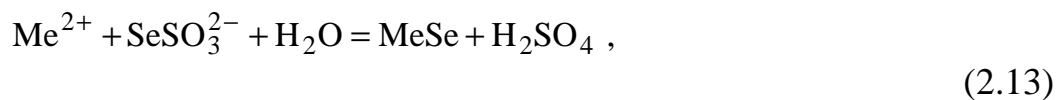


(2.12)

(2.12)

2 .

(98...101°)



Me - , .



.
 65...75 ° , 200...250
 250...300 . . . ,
 60 % ,
 . . . , ,
 .
 , .
 16...18 ° ,
 . ,
 , .
 , 30 / ,
 , .
 65 / .
 40 ° ,
 , - , .
 90...100 ° 7...8 - . 400...500
 . . .
 240...250 ° . ,

250...275 °

400...420 ° ,
3...6 . . .

10...12 .

5

2.4

1.

2.

3.

4.

5.

6.

7.

8.

9.

10.

3

3.1 -

20° 5,6576 Å.
5,35 / ³.
4,7 %, 5,57 / ³,
958,5 ° .
(760 .) 2707 ° .
2...3 - / .
10 - / ,
30 [48% ()]; 50 [70% (-4:
)]; 30 0,6 .
/ . 60...100
700° ,
700°
1000...1100 °
Ge_nH_{2n}+2(GeH₄, Ge₂H₆).

180 ° .

200 °

SO₂ 500 °

109 a / °³ .

1500 °

3.2

),

,

,

,

,

),

).

10,

- 1 10 / .

: 4Ag₂S·GeS₂ [5...7 % () Ge]; Cu₃

(Fe, Ge) Sn [10 % () Ge]; (, Fe)₃ (Fe, Ge, Zn, Sn)·(S·Au)₄ [

7 % () Ge] .

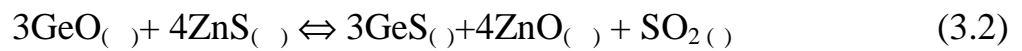
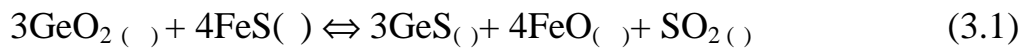
10 100 / 2.

(, . .), (, , . .).
85...88 %, 8...12 % (-) 1...3 %.



(80 %)

(, .),



15...30 % () 50 % ()

: , . . , , ,
 (,)
 [75...100 % ()] , [50...70 %
 ()]
 , [.
 (3.3) (3.4)] ,



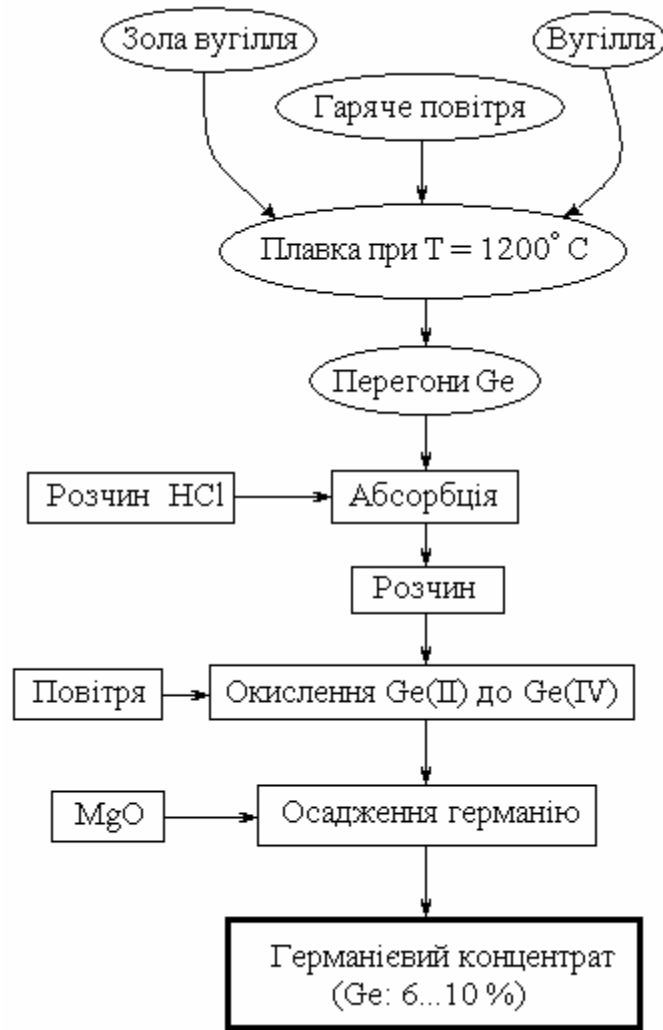
50...80 % () .
 (3.3) (3.4),

:



1000..1100 500...800°
 , 75...85 % () ,
 - . ,
 - , ,

20...25 . %
 (600 °) .
 1180...1260 ° GeO.
 (. 3.1). 10...20



3.1 –

Cl. (II) (IV)
(6...10 % Ge)

20 %

75...90 % ()

80 % ()

(/)

(, .)

3.3



= 8.

25

,	/	7,0	8,5	8,8	9,0	11,5
		35	380	680	1200	4900

9...12-

1 % () Ge,

4...7 % () Ge,

(,)

65...70 °

≈2.

0,1 % () Ge.

450...550 ° .

20...45 % ().

94...97 %.

3...4 / Ge,

450°

10...30 % ()

GeO₂.

.);

).

5...7

%

1



1050 °

300...400 °

95 %.

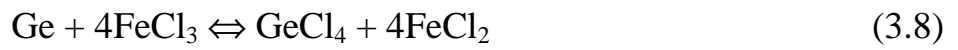
99 %.

4.

94 % ().

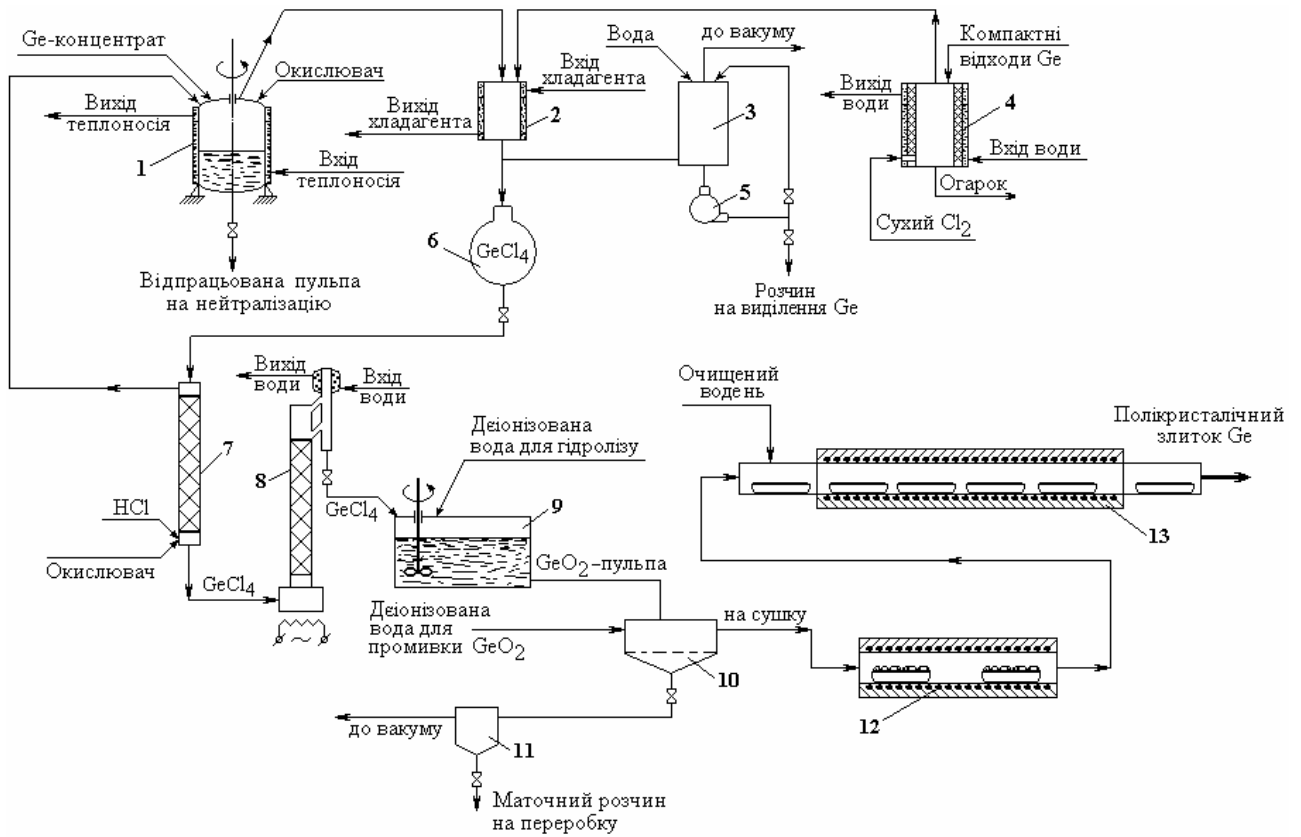
FeCl₃

7...8- .



3.4

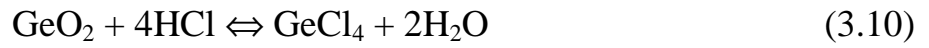
(3.2).



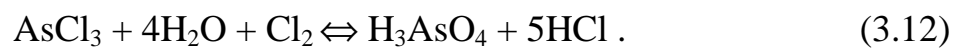
- 1 – , 2 – ,
 3 – , 4 – , 5 –
 , 6 – , 7 –
 , 8 – , 9 – , 10 – , 11 –
 , 12 – , 13 –

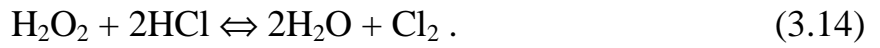
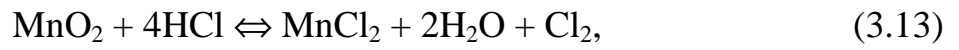
3.2 –

.
 : 6,5 % () As, 0,3 % () Ge.
 S.
 8 % ().
 5 30 % () GeO₂, :



6 - / . ,
 , ,
 . 12- . ,
 [(3.10) (3.11)].
 6 - / .
 , ,
 , ,
 , ,
 , - , AsCl₃
 , - , H₃AsO₄.





(3.7)].

(3.10). [37 % () 1].

7...8 - / .

: = 1:6

[15 % ()],

(3.8)

GeCl_4) 110 ° .

83 ° (

[$1 \cdot 10^{-4}$ 1,0 % ()],

1:1.

9...11-

	Mg	V	Al	As	P	Fe	Cu	Sb
	$2 \cdot 10^2$	$8,8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$	0,7	7	$7,7 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3 \dots 8 \cdot 10^4$

$5 \cdot 10^{-4} \%$ (

1220,
40
20
 $1,75 \cdot 10^4$.
%

3...5 / .

30...50 .

50

4...5

: Fe - $1,7 \cdot 10^{-5} \%$

(); Mn - $4 \cdot 10^{-7}$ %; Al - $1 \cdot 10^{-6}$ %; Ti - $3 \cdot 10^{-7}$ %; Cu - $2,7 \cdot 10^{-5}$ %; Pb - $3 \cdot 10^{-7}$ %; Ni - $8 \cdot 10^{-8}$ %; Zn - $3 \cdot 10^{-6}$ %; As - $1 \cdot 10^{-6}$ %; Si - $3 \cdot 10^{-5}$ % ().

,
 . - ,
 . (,
) .
 7...8- . -
 1:1. ,
 , . ,
 , .

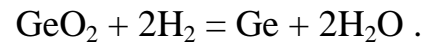
As $5 \cdot 10^{-7}$ % ().

(10) .

1:7. 5,0...5,5- .,

300...500° .

85 % ().



/ . , 650...710° C, 1000° , 1000 900° . 30 . 10 . 70° .

3.5

()

20

8

(),

3...5°

2...8 / .

500...800 / .

1000

40²

1:3,

– 5...6

0,1:1,5.2.

2...4 / ,

5...8.

15...20 %

(50 .).

« . ».

1000 .

50 °

90 %

1200° C

30 .

±0,30 ° .

200 /

12 /

[111],

[100]

[211].

0,5

2,0 /

30...60 /

1...10 /

(1000)

0,02 . . . , (, '),
 (,) ()
 , [111] [110].
 ±(5...6) % ±(6...12) %
 . (1...6)·10³ ².

,
 . ,
 ,
 .
 130 / .
 ,
 ,
 / .
 ,
 ,
 .
 0,33 2,4 / .

1105 . . .
 .
 ,
 8° .
 ,
 ,

3×3

$5 \cdot 10^{1-2}$

(3.3).

4 /

0,02

[111], [100]

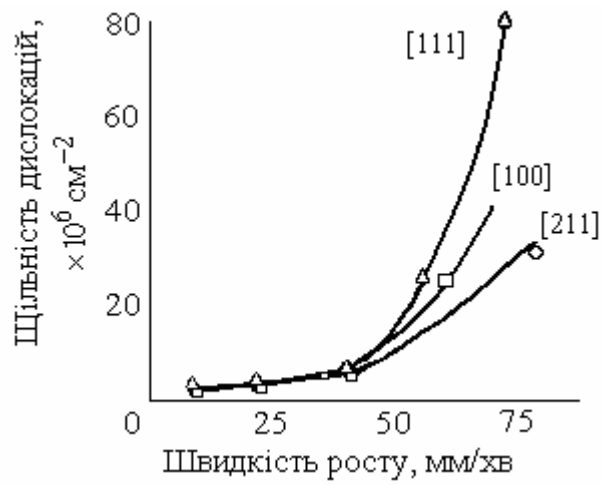
[110].

$(10^1 \dots 10^2$

$3 \cdot 10^3$

$^{-2}$,

).



3.3 -

(±10 %)

(12...15

5...10 %,

).

$6 \cdot 10^{18}$

/ ³

$2 \cdot 10^{14}$ / ³.

$2 \cdot 10^{18}$ / ³.

GeH₄.

Mg₂Ge.

280° ,

$1 \cdot 10^{-7}$

(80°)

p-

$1 \cdot 10^{18}$ / ³ (

)



$$\frac{2}{3} \quad 1 \quad ($$

$$) \quad 1 \cdot 10^{18} \times \frac{2}{3} = 6,6 \cdot 10^{17} / \text{ }^3.$$

3.6

,

(,) ()

() () .

,

.

,

, . -

,

, . -

,

,

(,)

, , .

,

(200 .)

.

,

,

.

3.7

- 1. - .
- 2. - , .

- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.

.

.

.

.

.

,

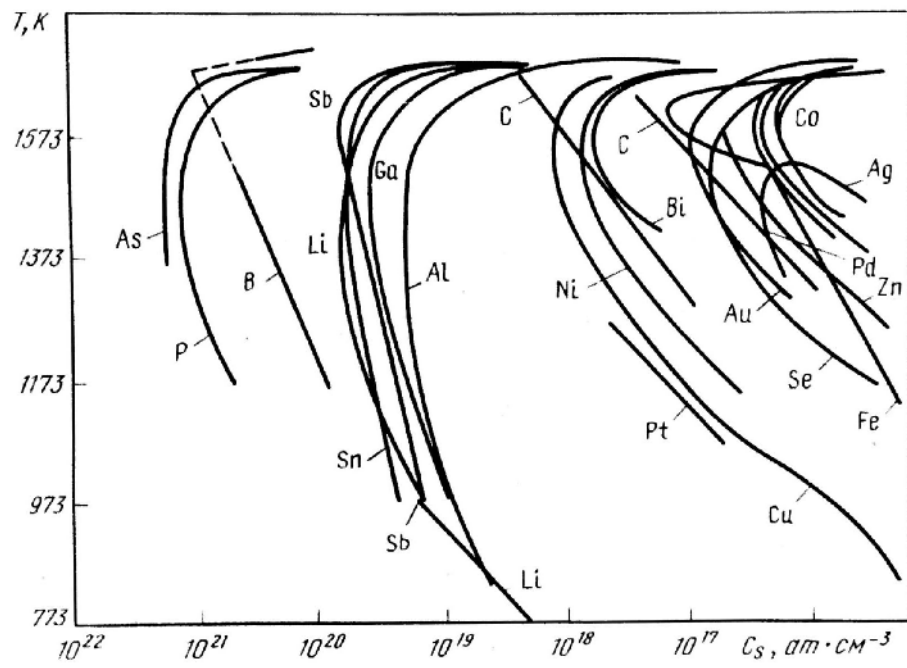
.

?

4.1 -

IV

;
 26,0...29,5 % Si.
 (),
 12 %
 75 % (400.
 . .). , ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 (). 1931 . ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 700 , (111)
 , (100),
 (111).
 (111). >1000
 .
 ,
 ,
 ($\sim 10^5$ $^{-1}$).
 ($> 0,1$ $^{-1}$).
 .4.1.



4.1 -

,

,

:

;

;

;

;

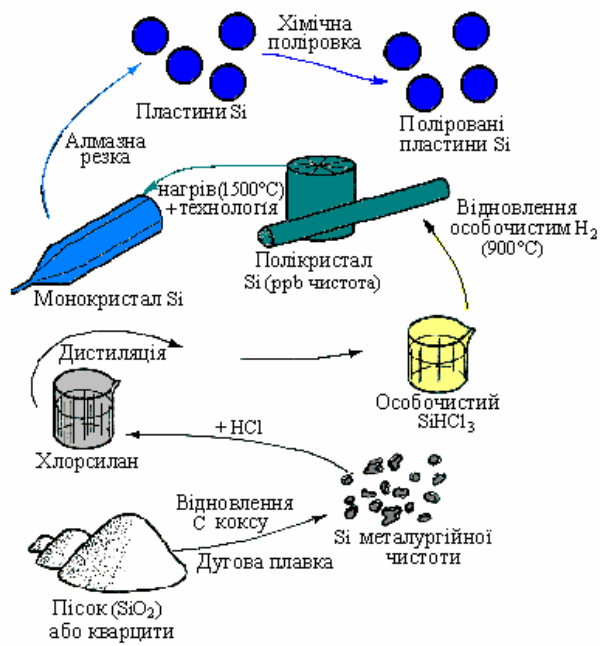
;

();

4.2

4.2.

<110



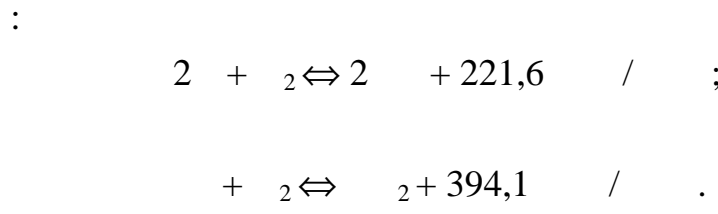
4.2 –

<20

... , 85 %, 45 %.

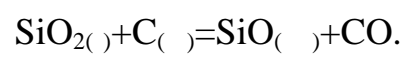
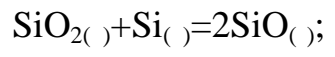
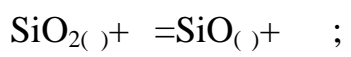
(5), ,

, , .



1933...1953 .

, , ():



2001 : SiO -
45,9 %; SiO_2 - 42,4 %; SiO_2 - 5,1 %; - 6,6 %.

, 1 Si 20...30 .

, ,

80...85 % (20 %)

; ~ 0,5 % 0,2...0,3 %

(1,4...1,8 / ³).

25 %

: Si₂ – 30...50 %; SiC – 8...11 %; Si – 4...6 %; MgO – 0,25...0,35 %; Al₂O₃ – 23...29 %; CaO – 13...24 %; FeO – 0,15...0,22 %.

50...59 % 1, 35...40 % , 29...31 % Mg. 1 Si 2,5...2,6 , 1,2...1,35 , 0,14...0,16 0,2...0,25

2, 3 (.4.1).

4.1 –

	% (),							
	Si	Fe	Al	Ca	Ti	B	P	
		0,5	0,3	0,6	0,03	0,003	0,006	–
00	99,0	0,4	0,4	0,4	–	–	–	1,0
0	98,8	0,5	0,4	0,4	–	–	–	1,2
1	98,0	0,7	0,7	0,6	–	–	–	2,0
2	97,0	1,0	1,2	0,8	–	–	–	3,0
3	96,0	1,5	1,5	1,5	–	–	–	4,0

: 1. 100 %

. 2.

. 3.

250 .

553...623 .

() 563...623 .

(.4.1):



(4.1) (4.2)

(4.2).

(4.3)

623 ,

(4.4)

1273 .

340 .

<60

1,6...0,071 ,

5 %

Si

2,0...1,6 10 % <0,071 .

80, 100, 120 .

1500...2000

().

(5 %), : $l_2 + l_2 = 2 l_1 +$
2530,76 / .

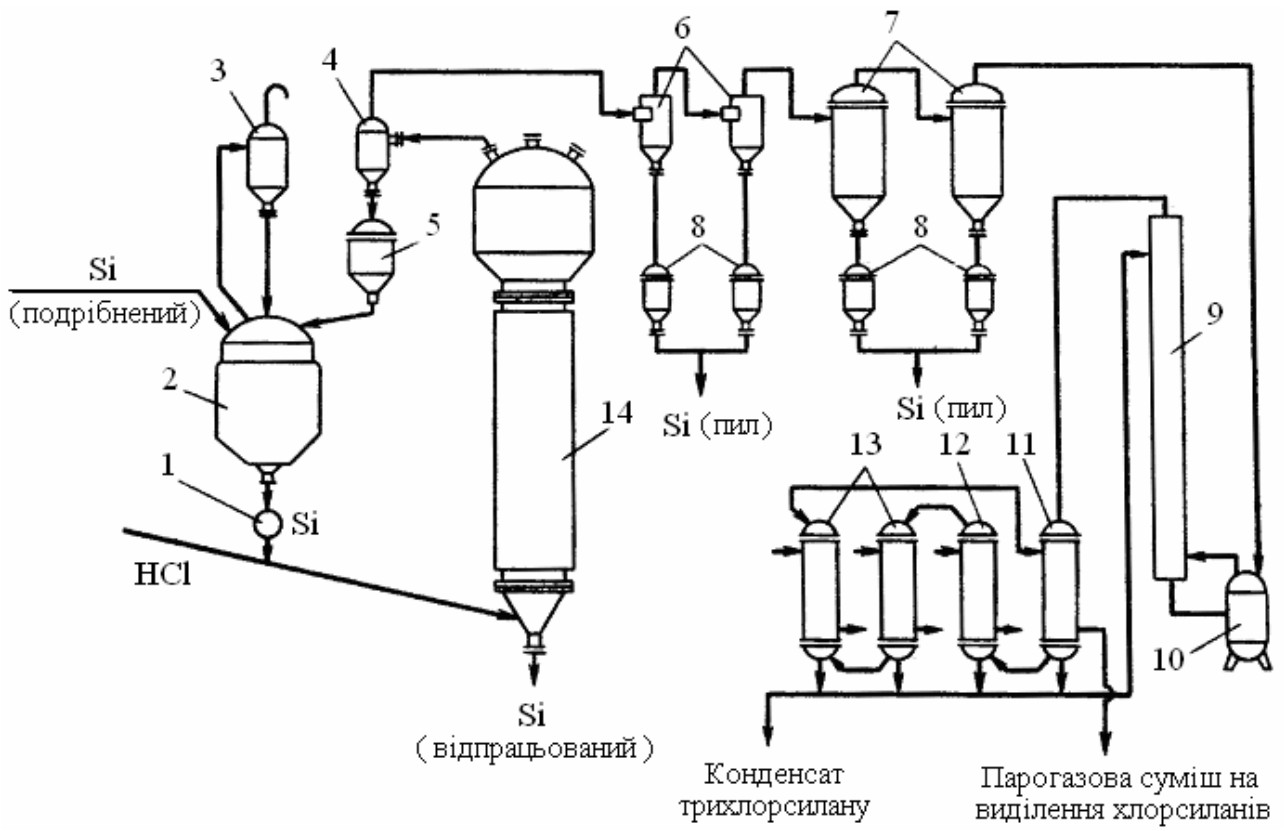
3,04...392 . , 980
304...392 .

(.4.3)

, , , , , 583...593
593...623 . , .

< 25...38 %.

70...80 %



1 – ; 2 – ; 3 – ; 4 –
 ; 5,8 – ; 6 – ; 7 –
 ; 9 – ; 10 – ; 11 –
 ; 12 13 –
 ; 14 –

4.3 -

< 25...38 %.

70...80 %.

.4.4

()

1

4.

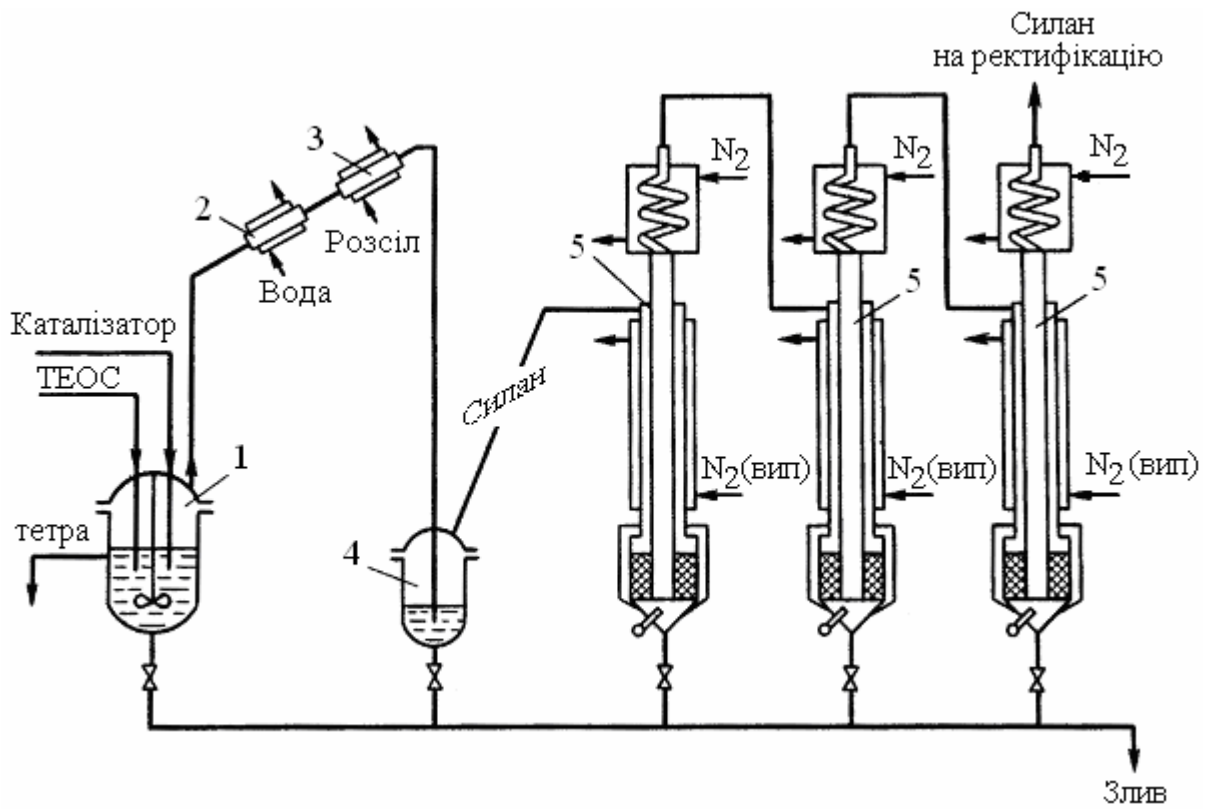
2

3

(263),

5,

400



4.4 -

-

(

).

(, -).

()

(-)

α :

$$\alpha = \frac{y/(1-y)}{x/(1-x)},$$

: x -

(1-) (1-)

1.

$$\alpha = y/x.$$

$$\alpha = \frac{p_1^0/p_2^0}{p_1^0/p_2^0} = \dots$$

$$\alpha : d \ln p / dT = -(\lambda / RT^2),$$

$$\ln(\alpha) = \ln(p_1/p_2) = \ln \alpha = (\lambda_2 - \lambda_1) / RT = \Delta \lambda / RT.$$

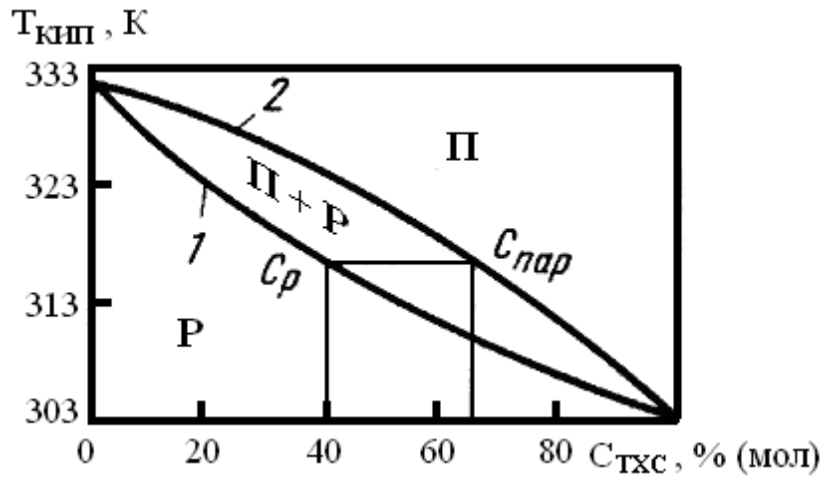
$\lambda_1 -$
()

($\Delta \lambda \rightarrow 0$),

$\ln \alpha$ ($\ln \alpha \rightarrow 0$), a $\alpha \rightarrow 1$.

На

(4.5).



1 - (+) - (+) - ; 2 -

4.5 - () - () :

$i: = \sum i.$, 40 % (=0,4)
 60 % (1- =0,6),
 [~ 65 % (. . 4.5).
 =(65/100) , =(35/100) .
 / =65/35=1,857.

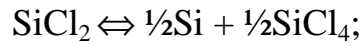
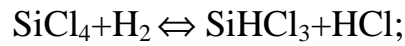
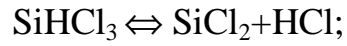
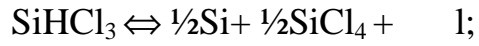
$$p = \frac{0}{0 \cdot (1 -)}$$

$$\alpha = \frac{\cdot (1 -)}{\cdot} = 1,857 \cdot \frac{60}{40} = 2,78.$$

1073...1173 .

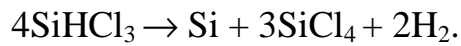
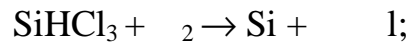
- 1273...1473 .

:



Si-H-Cl,

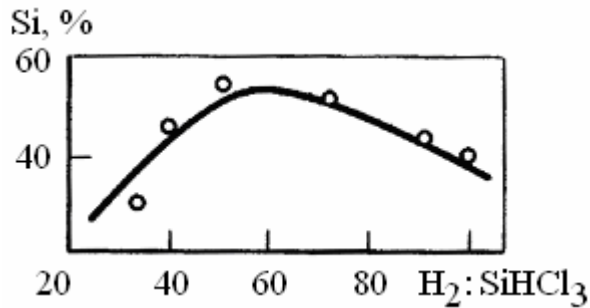
:



$\frac{1}{2}:\text{SiHCl}_3$

1323

.4.6.



4.6 -

$\frac{1}{2} \text{SiHCl}_3$ 1323

60 % $\text{SiHCl}_3=60:1$.

SiHCl_3

$\text{SiHCl}_3 < 15:1$

<1300

$\text{SiHCl}_3=5:1 \div 40:1$

$\text{SiHCl}_3=5:1 \div 10:1$

1300...1500

25...30 %.

()

:

$$R = C \cdot v \left\{ 1 - \frac{2,3v \cdot (T_R/T_0)}{2\pi r h (r - r_0)} \cdot \log \left[\frac{2\pi r k h + v \cdot (T_R/T_0)}{2\pi r_0 k h + (T_R/T_0)} \right] \right\}$$

: R -

, r- / ; α -

; C -

/³; v -

, / ; $k \approx 3,5$

r_0 r -

, ; h -

, ; T_R -

, .

SiCl_2 ,

1,

(1/).

4.3

(.4.7)

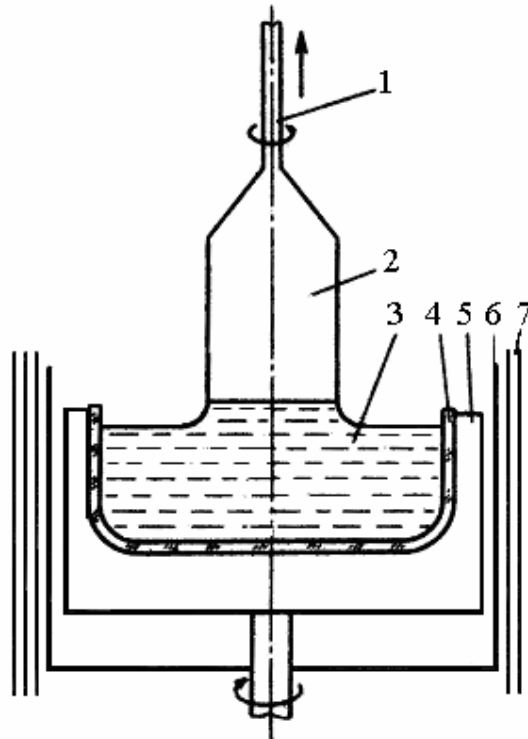
90%

, 85%

(,)

(99,995%).

()



1 -

, 2 -

, 3 -

, 4 -

, 5 -

, 6 -

, 7 -

4.7 -

(111).
)

(111)).

$$L \frac{dm}{dt} + k_1 A_1 \frac{dT}{dx_1} = k_2 A_2 \frac{dT}{dx_2}, \quad (4.5)$$

L - ; dm/dt -

; k₁, k₂ -
; dT/dx₁, dT/dx₂ -

1 2

; 1, 2 -

1 2.

(4.5)

:

$$v_{\max} = \frac{k}{L} \cdot \frac{dT}{dx},$$

v_{\max} -

; ρ -

30...50 %

G_r (/)

:

$$G_r = \Delta / \Delta r = (T -) / r$$

r -

, .

()

(), / :

$$G = \Delta_x / \Delta x = (x_1 - x_2) / (x_2 - x_1),$$

-

x_1 x_2

, .

$$k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \cdot e^{-\frac{v}{D}}}, \quad (4.6)$$

k_0 - ; v -
 , / ; δ - , ; D -
 , $^2/$.

(4.6), (4.6) ,
 k.

$$\delta = 1,6D^{1/3} \cdot v^{1/6} \cdot \omega^{-1/2}, \quad (4.7)$$

ω - , $^{-1}$; v - ,
 , $^2/$.

$$K = \alpha F / (v \cdot s), \quad (4.8)$$

α - , / ; F - ,
 , ²; s - , / .
²; V - , / .

$$(4.7) \quad (4.8),$$

$$(3.6),$$

k .

$$k = C / (C - w \cdot t_1 / V)$$

t_1 - ,

, / ³;
 , ; V -

, ³; w -

, / .

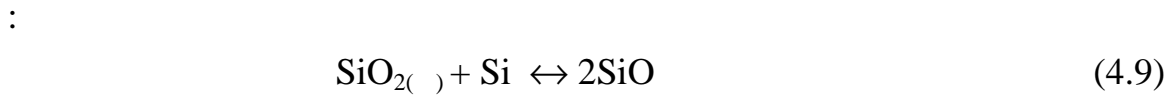
$2 \cdot 10^{18}$

-3 ,

(7...9) · 10¹⁷ (9...10) · 10¹⁷ ⁻³. : (5...7) · 10¹⁷,

95 % , 1270 , ,

1170 - 2,4 · 10¹⁷ ⁻³, 1270 - 5,2 · 10¹⁷ ⁻³, 1370 - 1,1 · 10¹⁸ ⁻³, 1470 - 1,9 · 10¹⁸ ⁻³, - 5,2 · 10¹⁸ ⁻³.



~ 2300 , : ΔZ=117100-50,9 , ΔZ , ~6 / (²) ~0,007 2 / (²) , ~152 . ,

3,5 · 10¹⁷ ⁻³ 8 · 10¹⁷ ⁻³, 1470 5 · 10¹⁶ ⁻³.

-n-

(τ . , 20 / , 60)

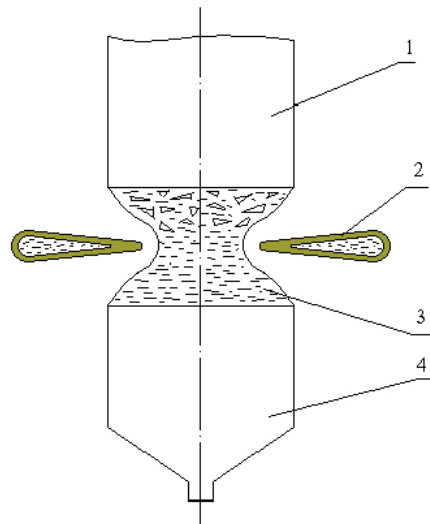
$1 \cdot 10^{16}$ $7,5 \cdot 10^{17}$ $^{-3}$.

($(1...2) \cdot 10^{16}$ $^{-3}$), ,

$(2...7) \cdot 10^{16}$ $^{-3}$.

Keck P.H. Golay M.J.E. 1953 .

. 4.8.



1 – ; 2 – ; 3 – ; 4 –

4.8 –

P :

$$P = \gamma gh,$$

γ — , /³; g —
, /²; h —
(),

, P , :

$$P = \sigma(1/R_1 + 1/R_2),$$

σ —
($\sigma = 0,72$ /); R_1 R_2 —

P

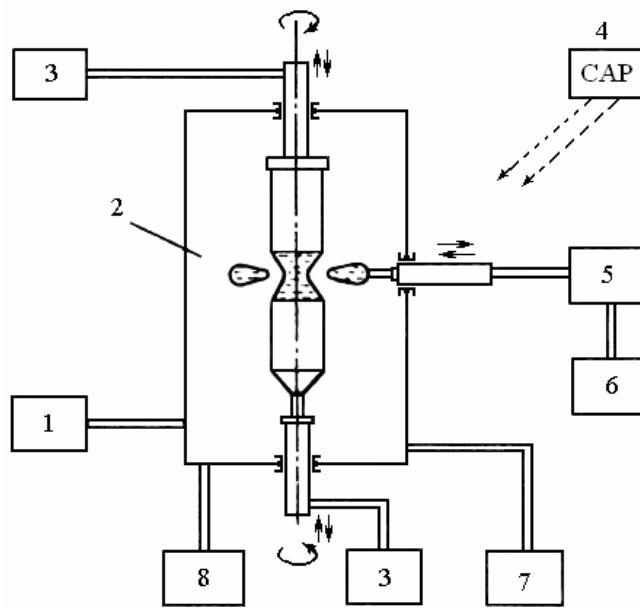
P (P = -P).

:

$$h_{\max} = 2,8 \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma \cdot g}} = 2,8 \sqrt{\frac{0,72}{2530 \cdot 9,81}} = 0,015 = 1,5 \text{ .}$$

1,5

4.9.



1 – ; 2 – ; 3 – ; 4 – ; 5 – ; 6 – ; 7 – ; 8 –
 4.9 –

$$\leq 1,33 \cdot 10^{-3}$$

$$1,72 \cdot 10^5$$

50

()

1,5...5,3 (

).

D, .4.2:

4.2 –

D,	10	20	40	60	80	100	120	140	160
,	0,3	0,8	2,4	4,7	7,6	11,0	15,0	19,8	24,4

() ,

. . . 0,25,

4 .

(10^{-4} %),

$$C = + ,$$

$$C = C \cdot S^n ,$$

$$C = \pm ,$$

– () ,

(« »), –

(« »), – ()
 , S –

(
), n –

$$S = 0,6v^{0,5} \exp(-0,1v) + \frac{\ln[52,8/(f \cdot D)]}{1,8v + 5,6},$$

v – , / , f –
 , D – , ,

, μ – ρ [ρ=1/(μ)], –
]. n-

:

$$n_n = \frac{\ln \frac{\rho (2,8\rho + \rho)}{\rho (2,8\rho + \rho)}}{\ln S},$$

p- :

$$n_p = \frac{\ln \frac{2,8\rho (\rho - \rho)}{\rho (2,8\rho + \rho)}}{\ln S}$$

ρ , ρ – , ρ –
 () .

.
 ;
 ; ()
); ;

(
).

- .

(
) ,

()

,

: « »;

;

(, ,

).

$$\frac{1}{0} = \frac{d^2}{2},$$

: 1 0 -

, / ³; d -

,

,

-

(k₀=0,35)

() .

()

$k < 1$,

$k_0 < 0,1$

[, ($k_0=0,008$) ($k_0=0,0004$)].

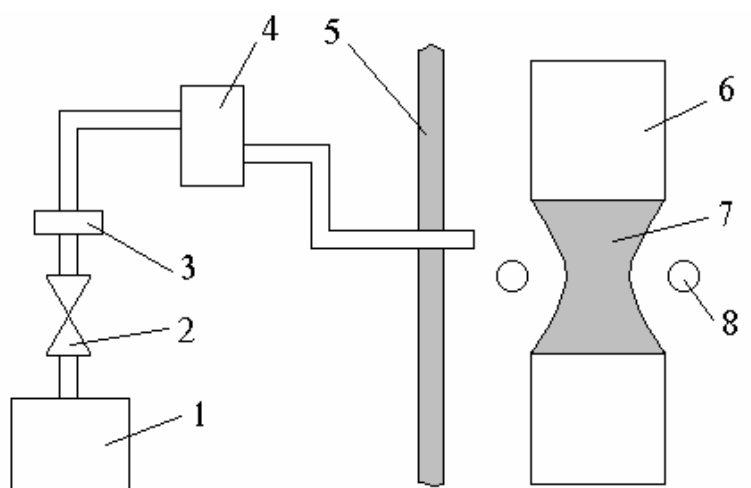
m

:

$$m = \frac{M}{N_A} \cdot \frac{C_1}{k_0} \cdot V,$$

: - ; N_A - ($N = 6,023 \cdot 10^{23}$); 1 -
 , / ³; V - , ³; k_0 -

(4.10).



1 - ; 2 - ; 3 - ; 4 - ; 5 -

; 6 - ; 7 - ; 8 -

4.10 -

(. . . 4.10).

, - .

<5...7 %.

- () ,

(n, γ)

(n=100) .

,
:
:

²⁸Si(92,18 %), ²⁹Si(4,70 %) ³⁰Si(3,12 %)

²⁸Si (n, γ) ²⁹Si δ =0,08δ;

²⁹Si (n, γ) ³⁰Si δ =0,28δ;

³⁰Si (n, γ) ³¹Si (β/2,62) ³¹P δ =0,11δ,

δ = 10⁻²⁴ ; δ - ; 2,62 -
³¹Si, .

, ³⁰Si
³¹Si .

$$N_P = N_{30Si} \cdot \delta \cdot t,$$

N_{30Si} - ³⁰Si 1 ; P -
; t - .

(

).

(

2...3

).

, , ,

,

970...1170

2...4

.

.

,

,

,

,

.

.

<3...5%.

4.4

1. -

.

2. -

,

.

3.

.

4.

.

5.

.

6.

.

7.

,

.

8. -

.

9.

.

10.

,

.

11.

.

12.

,

.

13.

.

14.

.

15.

.

16. -

.

5.1



III V

(15 %)

(,)

(n,)

: GaAs, InP, InAs, InSb,

GaP -

III V

($Ga_xAl_{1-x}As$, $GaAs_xP_{1-x}$, $Ga_xIn_{1-x}P$,

$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$. .),

VI . (, S, Se,)

I-V



NaCl.

(45...60 %).



- CdTe, CdS, ZnTe, ZnSe, ZnO, ZnS.

$A^{II}B^{VI}$

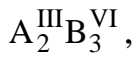
$Cd_xHg_{1-x}Te$, $Cd_xHg_{1-x}Se$, $CdTe_xSe_{1-x}$.



NaCl

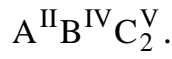
PbS, PbSe, PbTe, SnTe;

$PbSn_{1-x}Te$ $Pb_xSn_{1-x}Se$.



1/3

(: Ga₂Se₃, Ga₂Te₃, In₂Te₃).
VI



III V.

: CdSnAs₂, CdGeAs₂, ZnSnAs₂.

SiC -

IV

: β-SiC (15); α-SiC (-),

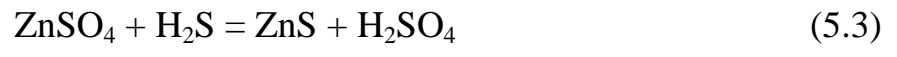
5.2

$$xA^n + yB^m + zC^k + \dots = A_x^n B_y^m C_z^k \dots, \quad (5.1)$$

n, m, k . . . -

; , , z, ... -

), 1000...1100° (30 . ,
 (5.2), ,
 ZnS



1020 °
 (, , , .) ,

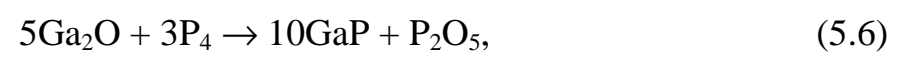


500...900 ° ,



1000 ° .

GaP -
 :



1000...1100 ° .

Ga₂O₃.

:

:

6,48 / ³, 6,06 / ³.
525 °, 712 ° .
(106 .),

() SbH₃.

InSb

(),

(,),

700...800 °

105

5...6 .

8°.

« »

10...20, 20...40

25...30 /

60 %

10...15

15 %

n-

[111], R

.5.1.

1,2 1,9

[211], [311] [511].

30

$1 \cdot 10^6 \text{ }^2 / (\cdot) (77)$.

5.1 – [111]

	k	R		k	R
	2,5103	–		5,7102	~3,85
	6,6104	~1,3		0,16	~ 4
	4,9105	–	,	5,4	–
	1,9106	–		0,1	~3,15
	0,26	3,3		0,35 **	~5,8
	~2,7	~1,3		1,9 *	
	2,4	–		0,47 **	~7,4
	5,2104	–		4,2 *	
	0,1	~1,7		4,0102	–
	1,2102	~1,6		6,0105	–

* {111}; ** {111}

$$5 \cdot 10^5 \frac{100}{2} / (\dots) (\dots 77 \dots).$$

$$8 \cdot 10^5 \frac{2}{2} / (\dots) (\dots 77 \dots).$$

$$10^4 \dots 10^6 \dots^{-2}.$$

[111] [211]
[110] [100],
[111]

« ... ».

[511].

3 / 30...60 / .
10¹...10²

-2.

n-

10¹⁹ -3,

p-

10¹⁸ -3.

5.4

$$\left(1 \cdot 10^{19} \text{ }^{-3} \right),$$

$$\left(\quad \quad \quad \right)$$

(

),

(,)

b .

: 700 °C, 500...600 °C.

500 .

$1 \cdot 10^{-3}$ p . .

0,25...0,3 .

500 °

1050 °

20...30 / .

30 ,

100 .

$1 \cdot 10^{-3}$. .

(,).

0,25

p- [,
 0,5 % ()] n- [,
 0,1 % ()].
 700 ° 10 -
 300 / .
 Bi₂Te₃ - Bi₂Te₃-
 Bi₂Se₃, [80:20 % ()].
 ,
 - [50:50 % ()]
 [40:60 % ()].
 .
 650° , - -
 700° . 30
 , .
 .
 , ,
 20...35 .
 5 / .
 ,
 0,10...0,15 % () .
 - 200 / .
 . 0,3 ,
 400 ° , 4000...7000 / ²
 5 .
 1·10⁻¹...1·10⁻² .c 350° 8...10 .
 , ,
 .
 , , .

5.5

SiC - IV

α -SiC, β -SiC, 2100 °C, (1750°

C).

= 4,3598 Å.

3,166 / ³.

= 3,0806 Å Å

= 15,1174 Å. 3,214 / ³.

()

19 % ()

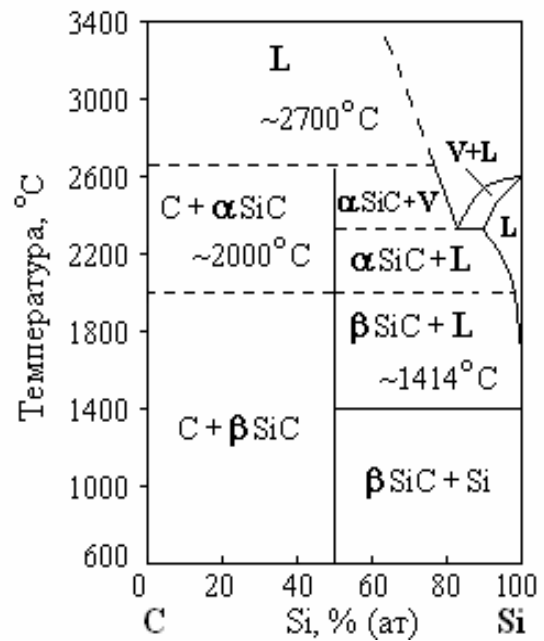
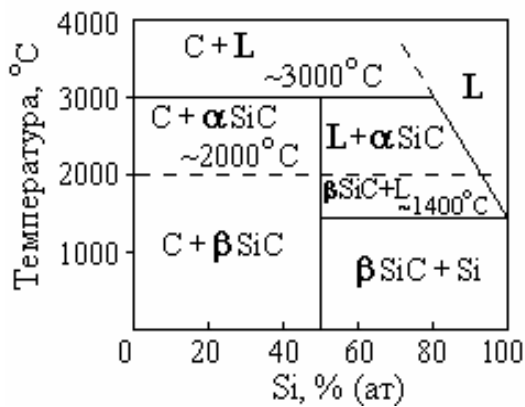
3100°

(5.1,)

300

30 a

1750° (5.1,)



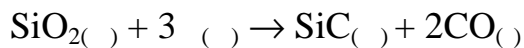
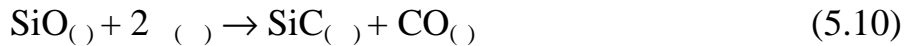
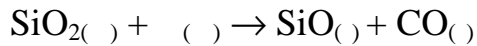
5.1 -

- 300 ()

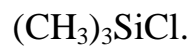
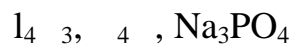
()

Si_2 SiC_2 . 1800 ° Si,
800 °
 (, ,).
 β -
 α -
 2100 ° .
 β -
 α -
 β -
 : 1) ; 2) ; 3)
 -
 1,1:1.
 1450 ° 10^{-4}
 0,5 .
 1700...1800 ° 2-

:



1750...1900 ° 2600 ° 10⁻⁴ 10⁻⁴
 (5.10) 3...4 . . .



5,65315±0,00001 Å.

5,4 / 3,

5,9 / 3.

1237°

1 a .

300 ° .

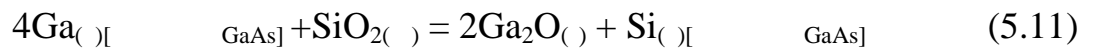
AsH₃.

2·10⁻⁵ / (2.).

1:1:1

60 / (2.),

/(²).



$2 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$

$2 \cdot 10^{17} \text{ a} / \text{cm}^3$

, / ³				
	Na	Cu	Sb	Au
	$1 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$
	$5 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{13}$	$< 5 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{10}$

$A^{III}B^V$.

$5,447 \pm 0,006 \text{ \AA}$.

$4,1 / \text{cm}^3$,

$4,6 / \text{cm}^3$.

1500°

30 a .

$700...800^\circ$.

$1 \cdot 10^{19} / \text{cm}^3$

$A^{III}B^V$,
II VI

p-n-
 $A^{II}B^{VI}$

$A^{II}B^{VI}$

$A^{III}B^V$,

CdTe,

1092°

0,23

$A^{II}B^{VI}$

$A^{II}B^{VI}$

ZnSO₄ [

(5.3)]

Zn(NH₃)₄Cl₂

H₂S.

CdCl₂

CdBr₃,

Cd(NO₃)₂

CdSO₄

(5.3)

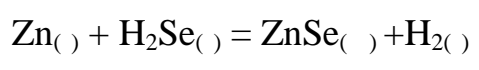
1020 °

$A^{II}B^{VI}$,

,
 90^{3/}
 20^{3/}

700 ° ,
 10 .
 2:H₂Se = 40:1

100^{3/} .



1 / .

50 %.

1·10⁻⁵ , . .

850 ° .

1·10⁻⁵ % () , .



12 , 24 600 ° .
 900 ° 8 1200 ° .

1050 ° ,
 800 ° . 3 .
 0,3 /

: 25 90 , 150
 6,01...0,1 . 300...350
 2/(.) 300 .



() .

(-),



5.6

1.

2.

3.

4.

5.

6.

7.

8.

9.

10.

11.

12.

13.

$A^{II}B^{VI}$.

6

1.

2.

3.

4.

5.

6.

7.

8.

9.

10. ,

11.

, ,

12.

, ,

13.

14.

15.

16.

17.

18. -

19. ,

20.

21.

22. ,

23.

, ,

24.

25.

26.

27.

, II_B^{VI}

28.

29.

-

30.

31.

32.

33.

34.

-

35.

, III_B^{V}

36.

()

37.

,

38.

39.

40.

41.

,

42.

43.

44.

,

45.

()

46.

47.

48.

49.

50.

.

7.1

million) - ; 1 ppm = $1 \cdot 10^{-4}$ % ()
 billion) - ; 1 ppb = $1 \cdot 10^{-7}$ % ().
 ppm ppb
 - 1ppm=1 / , 1ppb=1 / .

(promille) - ; $1\text{‰} = 1 \cdot 10^{-3}$ % ().
 ‰ -

- a / ³. , n p
 , ,
 () a / ³ (N_a^b), : % ()
 a= G_a
 b :

$$G_a = \frac{x_a \cdot \gamma_b}{100}, / ^3 \tag{7.1}$$

b - 1 ³ , , / ³.

: 1 - a $N = 6,023 \cdot 10^{23} = N_A$ ()
) :

$$\begin{aligned} A_a &\rightarrow N_A \\ G_a &\rightarrow n_a \end{aligned}$$

$$n_a = \frac{G_a \cdot N_A}{A_a}, \tag{7.2}$$

$$(7.2) \quad G_a \quad (7.1),$$

b:

$$N_a^b = \frac{x_a \cdot \gamma_b \cdot N_A}{100A_a} = \frac{x_a \cdot \gamma_b \cdot 6,023 \cdot 10^{21}}{100A_a}, \quad / \quad ^3 \quad (7.3)$$

- % ().

$$y_a^b = \frac{100x_a}{x_a + x_b \cdot (A_a / A_b)}, \quad \% \quad () \quad (7.4)$$

A_b -

b.

(y_a^b) ,

am/ $^3 (N_a^b)$

$$y_a^b = \frac{N_a^b \cdot 100}{N_b}, \quad \% \quad () \quad (7.5)$$

N_b -

b.

$$N_b = \frac{N_A \cdot \gamma_b}{A_b} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \gamma_b}{A_b}. \quad (7.6)$$

$5 \cdot 10^{22} / ^3$,

- $4,52 \cdot 10^{22}$

/ 3 .

99,9% ()

; 5N5 - 99,9995% ()

N

100 %

$$k = 1 \cdot 10^{-2}.$$

(7.6)

$$N_{\text{Ge}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 5,57}{72,59} = 4,63 \cdot 10^{22}, \quad / \text{ }^3$$

(7.5)

$$N_{\text{Ge}}^{\text{Sb}} = \frac{4,63 \cdot 10^{22} \cdot 1}{100} = 4,63 \cdot 10^{20}, \quad / \text{ }^3$$

$$4,63 \cdot 10^{20} \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 4,63 \cdot 10^{18} \text{ am/ }^3,$$

$$, \quad , \quad 820 \quad - 1,4 \cdot 10^{19} \quad / \text{ }^3.$$

7.2

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p, \quad -1. \quad -1 \quad (7.7)$$

n p -

N_D

$$N_D \gg N_A, \quad / \quad ^3,$$

:

$$\sigma = en\mu_n, \quad ^{-1} \cdot ^{-1}, \quad (7.8)$$

$$n = N_D - N_A.$$

,

$$N_A \gg N_D, \quad / \quad ^3,$$

$$\sigma = ep\mu_p, \quad ^{-1} \cdot ^{-1} \quad (7.9)$$

$$p = N_A - N_D.$$

,

$$N_D = N_A.$$

, () .

.

.

,

:

$$N_D > N_A \quad N_A > N_D.$$

$$\varepsilon = \frac{N_A}{N_D} \cdot 100 \% \quad (7.10)$$

$$S = 2 \cdot 3,14 \cdot (5,55 \cdot 3,4 + 8,2 \cdot 3,1) = 276 \text{ } ^2.$$

$$40 \text{ } , \quad 500$$

$$L = \frac{500 \cdot 4}{2,32 \cdot 3,14 \cdot 4^2} = 17,2 = 172 \text{ } ,$$

$$t = 172/1,5 = 104 \text{ } .$$

$$20 \text{ } .$$

$$124 \text{ } .$$

$$6,65 \cdot 10^{-2} / (\text{ } ^2 \text{ }) ,$$

$$G = 6,65 \cdot 10^{-2} \cdot 276 \cdot 124 = 2270, \text{ } ,$$

$$5 \cdot 10^{-5} \% ($$

$$G_B = 2279 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{100} = 1,13 \cdot 10^{-2} = \frac{1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{10,81 \cdot 10^3} = 6,3 \cdot 10^{16}, \text{ } .$$

$$N_P^B = N_P^{D_2} = \frac{6,3 \cdot 10^{16} \cdot 2,32}{800} = 1,83 \cdot 10^{14} / \text{ } ^3$$

N_P .

$$N_P^{D1} + N_P^{D2} = 7,7 \cdot 10^{13} + 1,83 \cdot 10^{14} = 2,6 \cdot 10^{14}, \quad / \quad ^3.$$

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{\alpha \cdot t \cdot F}{V}\right),$$

α — , / , $\alpha = 7,2 \cdot 10^{-4}$; t — , ; F — , 2 ; V_P — , 3 .

111 ,

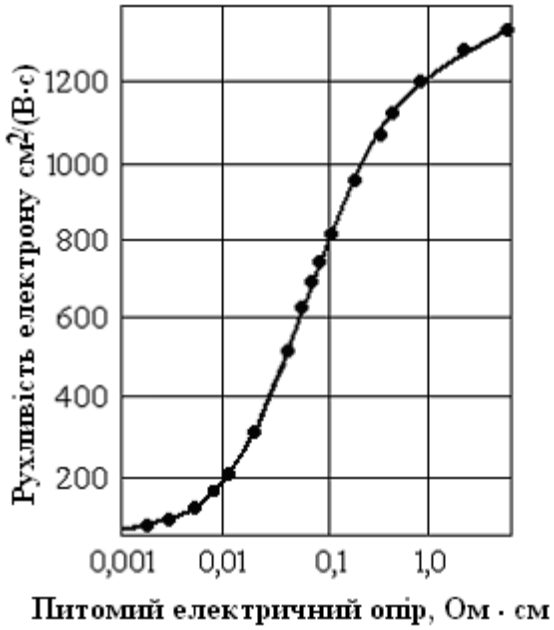
$$F = 0,785 \cdot 11,1^2 = 95 \quad ^2,$$

$$V_P = 800/2,53 = 316 \quad ^3.$$

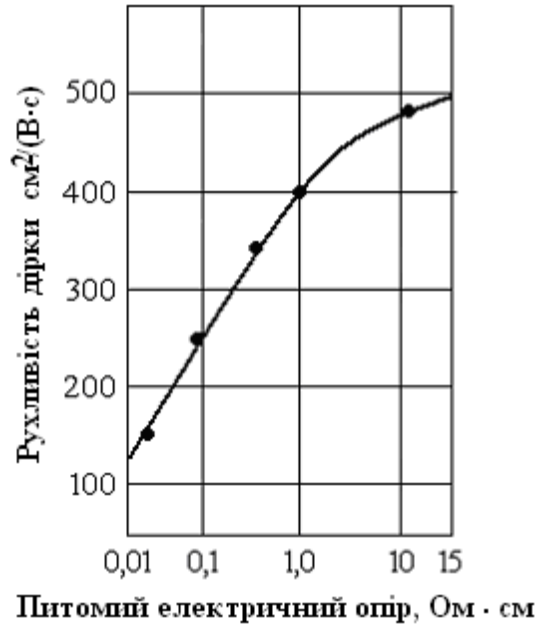
$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 60 \cdot 95}{316}\right) = 0,771.$$

$$N_P^D = \frac{N_P^{D1} + N_P^{D2}}{C/C_0} = \frac{2,6 \cdot 10^{14}}{0,771} = 3,37 \cdot 10^{14}, \quad / \quad ^3$$

. 7.1.



а



б

7.1 –

7.3

« » « » .

(. 7.2),

(–)/

0,05.

$$Bi = \alpha l / \lambda \quad (7.12)$$

α - коэффициент теплоотдачи, l - толщина стенки; $1 - \lambda$ - коэффициент теплопроводности материала стенки, λ - коэффициент теплопроводности теплоносителя.

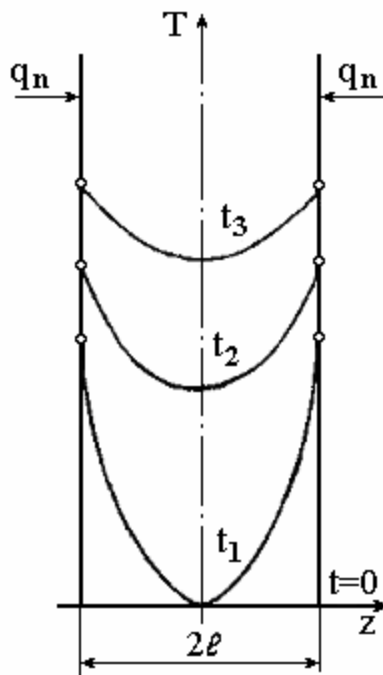
При $Bi > 0,25$ (1/λ) можно пренебречь, тогда $Bi > 0,25$ - «толстая стенка» III.

$$q_n = \alpha (T_\infty - T_0) \quad (7.13)$$

q_n - плотность теплового потока, T_∞ - температура теплоносителя вдали от стенки, T_0 - температура поверхности стенки; z - расстояние от поверхности стенки до точки измерения температуры T .

$$\Theta = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0} = f(Bi, Fo, z/l), \quad (7.14)$$

Θ - безразмерная температура; $0 - T = T_0$ - температура поверхности стенки; $1 - T = T_\infty$ - температура теплоносителя вдали от стенки; t ; z - время и расстояние от поверхности стенки до точки измерения температуры T ; $1 -$ коэффициент теплоотдачи.



7.2 –

$(t_1 < t_2 < t_3)$
z

(7.14) $Fo,$

,

:

$$Fo = a \cdot t / \ell^2 = t / (12 \ell^2 / a) \quad (7.15)$$

t -

, ; -

, $\ell^2 /$

$$= \lambda / (c \cdot \rho) = 10^{-3} \cdot \lambda \cdot M / (c_v \cdot \rho) \quad (7.16)$$

-

, $\ell /$; $v -$

, $\ell / (\cdot)$; $\rho -$, ℓ^3 ;

-

, ℓ .

, v ,

$$v = -R \quad (7.17)$$

R -

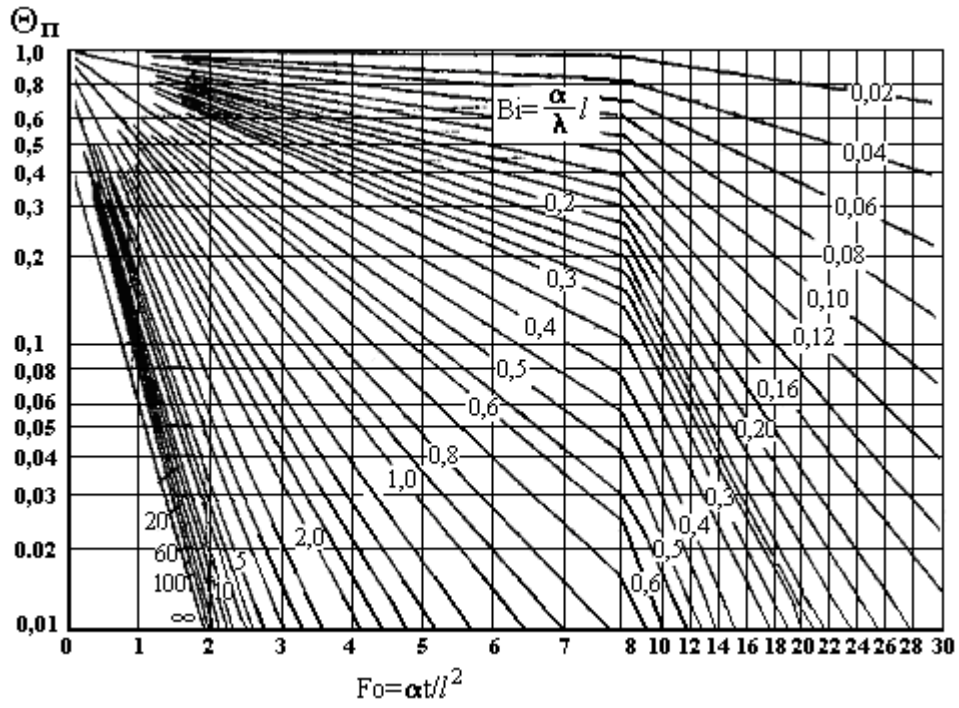
$(R = 8,314 \ell / (\cdot)$.

. 7.2

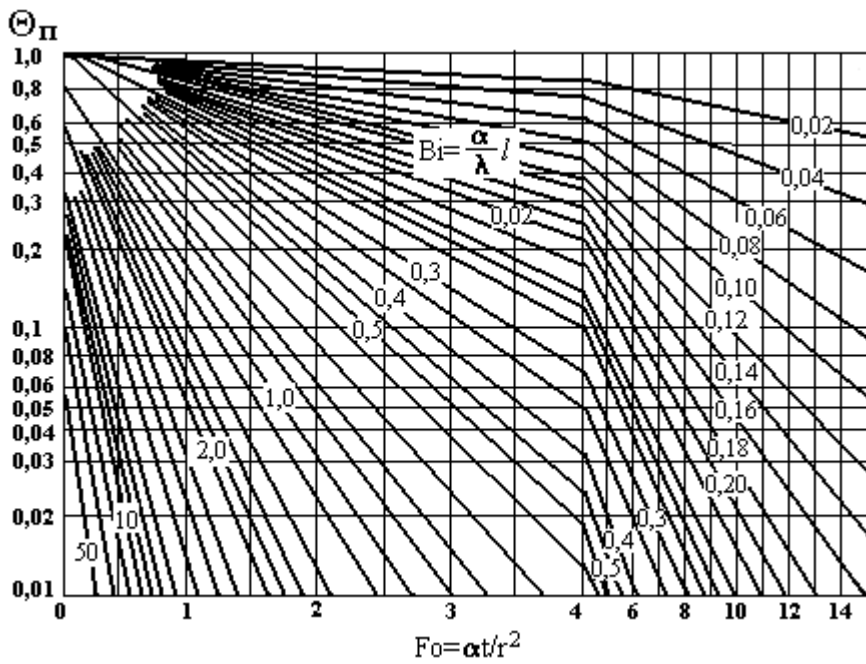
. 7.1

. 7.1

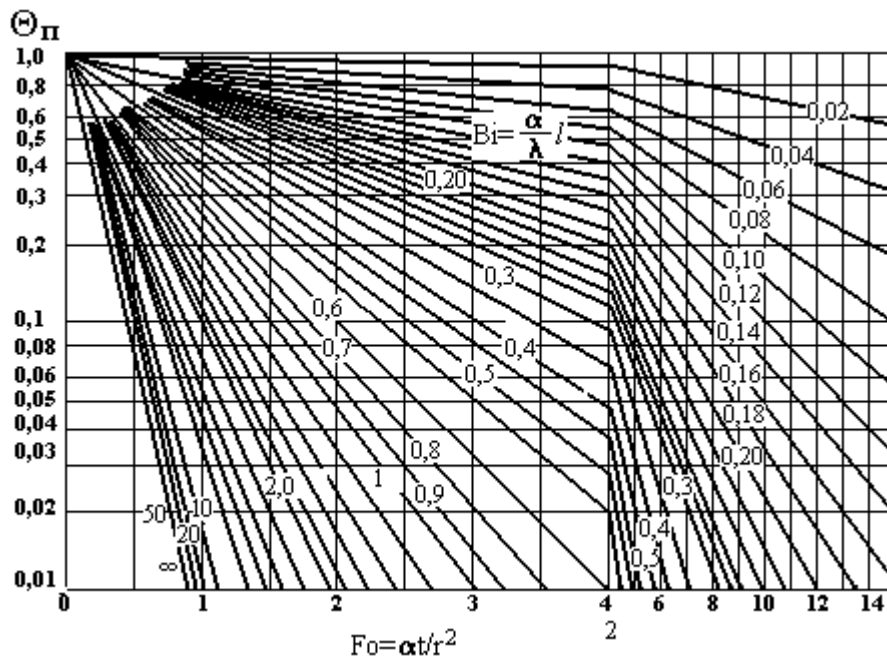
300 .



7.4 -



7.5 -



7.6 -

1.

$$d = 0,1 \quad = 0,75 \quad .$$

$$\cdot \quad \theta_0 = 20^\circ \quad , \quad \theta_\infty = 1300^\circ \quad .$$

$$\rho = 1,8 \cdot 10^3 \quad / \quad ^3 .$$

$$: \quad \lambda = 105,9 -$$

$$0,044 \quad , \quad / (\cdot \cdot) .$$

$$= 1098 + 0,17 \quad / (\cdot \cdot) .$$

$$\alpha = 1500$$

$$/ \quad ^2 \cdot \cdot) .$$

:

1.

$$\theta_0 - \theta_\infty ;$$

2.

$$Bi \quad \lambda$$

;

3.

$$Bi \quad (7.12). \quad Bi > 0,25,$$

« » ;

4.

$$(7.14) \quad \Theta \quad ;$$

5.

$$\cdot 7.7 \quad \Theta = f(Bi, Fo) \quad Fo;$$

6.

;

7.

$$(7.16) \quad ;$$

8.

$$Fo \quad (7.15)$$

$$(t = F \cdot r^2 / a)$$

;

9. $\Theta = f(\text{Bi}, \text{Fo})$ Bi
 Fo Θ ;

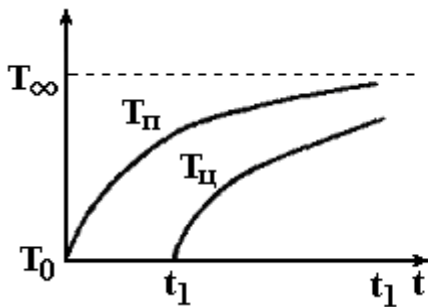
10. $\Theta = (\Theta_\infty - \Theta_0) \cdot \Theta [\dots]$
 (7.14);

11. $\Delta = \dots$

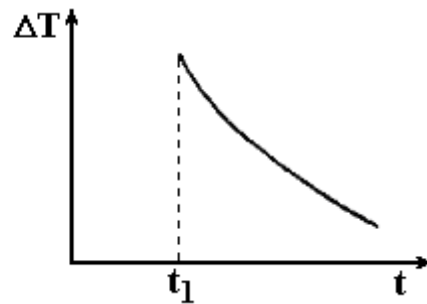
« »

. 7.3.

$\Delta = f(t)$, . 7.8.



7.7 -



7.8 -

Δ

2.

$d = 80$ $h = 20$.

$\alpha = 1500$ / $^2 \cdot \dots$), $\theta_0 = 20^\circ$, $\theta_\infty = 700^\circ$.

1. $\lambda = 109$ / (\dots), $\text{Bi} = 1100 \cdot 1 \cdot 10^{-2} / 109 = 0,1$. (7.12). . 7.1

, « » ,

(7.18).

2. $F = 2\pi r^2 = 2 \cdot 3,14 (4 \cdot 10^{-2})^2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ }^2$.

3. $V = h \cdot 0,5 F = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 1 \cdot 10^{-4}$, 2 .

4. $\theta = (700 + 20) / 2 = 360^\circ = 633$.

5.

. 7.1:

$$= 800 + 0,092 \cdot 633 - 0,15 \cdot 10^8 \cdot 633^{-2} = 881 \text{ / (} \dots \text{)}$$

6.

(7.18)

7.1: $\rho = 2,33 \cdot 10^3 \text{ / } ^3$.

$$t = \frac{881 \cdot 2,33 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{1100 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} \ln \frac{700 - 20}{700 - T} = 18,66 \ln \frac{680}{700 - T},$$

« »

:

°	100	200	300	400	500	600	675
t,	2,3	5,7	9,9	15,3	22,8	35,8	61,6

= f(t).

7.1 –

-	,	$\rho,$ / ³	λ (300), /(. .)	$= +bT+cT^{-2},$ / (.)		
				a	b	$c \cdot 10^{-2}$
Si	28,09	2,33	109	860	0,092	- 0,15
Ge	72,59	5,33	59	340	0,051	- 0,03
l	57,16	2,40	90	841	0,090	- 0,15
AlAs	101,89	3,60	8	370	0,123	-
AlSb	148,74	4,22	56	290	0,113	-
GaP	100,70	4,13	110	423	0,103	-
GaAs	144,64	5,32	54	290	0,087	-
GaSb	191,48	5,62	35	233	0,087	-
InP	145,80	4,79	67	292	0,114	-
InAs	189,74	5,67	28	232	0,088	-
InSb	236,68	5,78	18	209	0,035	-

7.2. –

($\theta_0 = 20^\circ$)

		$\alpha,$ /(² . .)	$\theta_\infty,$ °	d,	h,
1	Si	1000	700	120	0,7
2		1000	650	120	0,002
3		1000	700	100	0,5
4		1000	700	100	0,02
5	Ge	850	600	100	0,8
6		850	650	100	0,05
7		800	650	80	0,5
8		800	700	80	0,008

		$\alpha,$ $/(2 \cdot \dots)$	$\infty,$ $^{\circ}$	d,	h,
9	GaAs	1000	650	50	0,4
10		1000	550	50	0,008
11		1000	600	50	0,02
12		900	600	50	0,6
13	GaP	900	650	45	0,007
14		850	650	45	0,5
15		800	600	45	0,6
16		800	650	45	0,008
17	GaSb	950	500	50	0,4
18		950	500	45	0,3
19		950	400	45	0,003
20		900	600	40	0,4
21	InAs	900	550	38	0,35
22		900	550	38	0,6
23		800	600	50	0,45
24		800	550	45	0,5
25		800	500	45	0,005

7.3 –

« »

	600°	800°	1000°	120°	1270°
$\lambda,$ $/(\cdot \cdot)$	67,5	58,7	49,9	41,1	38,0
$Bi = \alpha \cdot r / \lambda$	$\frac{1500 \cdot 0,05}{67,5} = 1,11$	1,28	1,50	1,82	1,97
$\Theta = \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0}$	$\frac{1300 - 600}{1300 - 20} = 0,55$	0,39	0,23	0,078	0,023
Fo	0,125	0,375	0,531	0,844	1,25
c, $/(\cdot)$	1246,4	1280,4	1314,4	1348,4	1360,3
$\cdot 10^5 =$ $= \lambda \cdot 10^5 / (c \cdot \rho),$ $^3/$	$\frac{67,5 \cdot 10^5}{1246,4 \cdot 1,8 \cdot 10^3} = 3,01$	2,55	2,11	1,69	1,55
$t = \frac{Fo \cdot r^2}{a}, c$	$\frac{0,125 \cdot 0,05^2}{3,01 \cdot 10^{-5}} = 10$	37	63	125	202
Θ	0,80	0,51	0,36	0,16	0,04
$= \infty - (\infty -$ $-) \cdot \Theta, ^{\circ}$	$1300 - (1300 - 20) \cdot 0,80 =$ 276	647	878	1095	1249
$\Delta = - , ^{\circ}$	$600 - 276 = 324$	153	132	105	21

7.4

,
 ,
 ;
 ,
 () .
 ,

$$K_{0,B} = \frac{x_B}{x_{0,B}} \quad (7.19)$$

$$\ln K'_{0,B} = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right) + \ln \gamma_B - \ln \gamma'_B \quad (7.20)$$

ΔH — , / ; T —
 , x_B , ;
 γ , γ — ; R —
 , $R=8,134 \cdot 10^{-3}$ / (·).

(7.20)

,
 .
 . (7.20)

$$m_{A^-} \cdot m_{B^+}$$

$$x_B \quad x_B \quad . \quad (7.20) \quad :$$

$$\ln K'_{0,B} = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_{m,A}} - \frac{1}{T_m} \right) + \ln \gamma_B - \ln \gamma_B \quad (7.21)$$

$x_B \rightarrow 0$ $x_B \rightarrow 0$
 $T \rightarrow T_{m,A}$ $T \rightarrow T_{m,A}$

$$(7.21)$$

$$\ln K'_{0,B} = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_{m,A}} - \frac{1}{T_m} \right) + \frac{-b \cdot T - v}{R \cdot T_{m,A}} \quad (7.22)$$

$$(N)$$

$$x_B = \frac{M_A \cdot N_B}{\rho_B \cdot N_A} \quad (7.23)$$

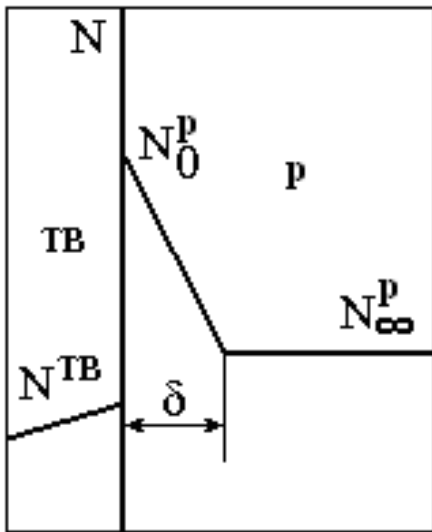
— , / ; N_B —
, / ³; ρ_B — , / ³; N — , N
= $6,02 \cdot 10^{23}$ / .

$$K_{0,B} = \frac{N_B}{N_B} = K'_{0,B} \cdot \frac{\rho_A}{\rho} \quad (7.24)$$

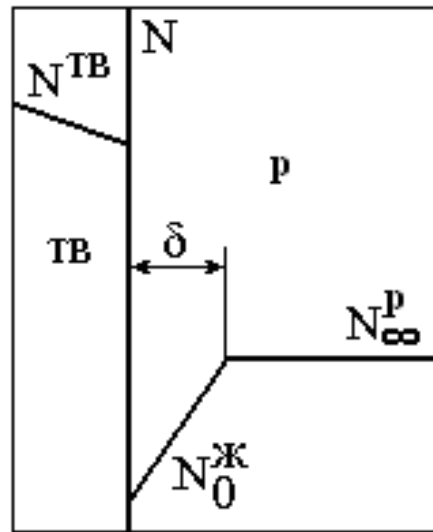
(7.21):

$$\ln K_{0,A}' = \ln \left(\frac{x}{x_0} \right) = \frac{\Delta H_{f,A}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{f,A}} \right) + \ln \gamma_A - \ln \gamma_{A,0} \quad (7.25)$$

$\delta < 1$ ($f > 1$)
 $\delta < 1$
 N_0 , $x \geq \delta$ (7.9).



a



b

7.9 - ,
 : - $0 < 1$; - $K_0 > 1$

$$K_0 = \frac{N}{N_0}$$

$$K = \frac{N}{N_{\infty}}.$$

f β .
 δ .
 D

$$K = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-f/\beta)} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-f \cdot \delta/D)} \quad (7.26)$$

$$\delta = 2,2v^{0,17} D^{0,33} w_k^{-0,5}, \quad (7.27)$$

$$D = 10^{13} \cdot \frac{kT}{B \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}, \quad (7.28)$$

$$f = 1,5 \text{ / .}$$

$$- 40 \text{ / .}$$

1.

(7.22):

$$\rho_{\text{Ge}} = 1210 \text{ ; } \rho_{\text{Ga}} = 303 \text{ ; } \rho_{\text{Ga}} = 5,59 \text{ / ; } \rho = 5,62 \text{ / }^3 \text{ ; } \rho = 5,33 \text{ / }^3 \text{ ; } b = -0,62 \text{ / ; } b = 0 \text{ ; } v = 6,68 \text{ / .}$$

$$\ln K_0' = \frac{5,59}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{1210} - \frac{1}{303} \right) + \frac{-0,62 - 6,68}{8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 1210} = -2,3890,$$

$$K_0' = 9,17 \cdot 10^{-2}.$$

2.

$$\text{ / }^3 \quad (7.24):$$

$$K_0 = 9,17 \cdot 10^{-2} \cdot 5,33 / 5,62 = 8,7 \cdot 10^{-2}.$$

3.

$$v = 1,35 \cdot 10^{-7} \text{ }^2/.$$

$$\eta = 1,35 \cdot 10^{-7} \cdot 5,62 \cdot 10^3 = 7,59 \cdot 10^{-4} \text{ H}\cdot\text{c/ }^2.$$

4.

(7.28):

$$D = \frac{10^{13} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1210}{6 \cdot 3,14 \cdot 7,59 \cdot 10^{-4} \cdot 0,139} = 0,85 \cdot 10^{-4}, \text{ }^2/$$

5.

:

$$\omega = 2\pi n / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 40 / 60 = 4,19, \text{ }^{-1}.$$

6.

(7.27):

$$\delta = 2,2 \cdot (1,35 \cdot 10^{-7/4,19})^{0,5} \cdot 15,9^{-0,33} = 2,2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,4 = 1,58 \cdot 10^{-4}, \quad .$$

8.

(7.26):

$$K = \frac{0,087}{0,087 + 0,913 \exp\left(-\frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,58 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 0,85 \cdot 10^{-8}}\right)} = 0,13.$$

7.4 –

v

b

		ΔH /	$\lambda = 1210$; $\lambda = 58,6$ / (·); $\rho = 5,62$ / 3 ; $v = 1,35 \cdot 10^{-7}$ 2 / ; $= 72,59$ / ; $\rho = 5,33$ / 3 ; $\Delta = 34,8$ /				
			Ge	Si	v , /	, /	$b \cdot 10^3$, /(·)
Li	459	2,89	1	2	52,05	-5,21	0
Cu	1356	13,02	3	4	120,65	-30,80	-3,10
Ag	1234	11,95	5	6	124,48	-23,02	-29,80
Fu	1336	12,69	7	8	98,95	-20,36	-4,52
Zn	693	6,68	9	10	70,24	-2,95	0
Al	932	10,76	11	12	16,41	-22,10	-13,20
Ga	303	5,59	13	14	6,68	-0,62	0
In	430	3,24	15	16	66,82	6,57	2,34
Sn	505	7,08	17	18	30,50	7,03	4,52
Pb	800	4,78	19	-	98,01	36,75	17,08
Sb	904	20,10	20	21	52,12	11,05	8,29
Di	544	11,01	22	23	102,15	23,02	6,24
S	392	1,23	-	24	-	-	-
Se	491	5,3	-	25	-	-	-
Te	723	17,90	-	26	-	-	-
Fe	1808	13,02	-	27	-	-	-
Ni	1728	17,63	28	29	-3,07	0	0

		ΔH			$\lambda = 1688$; $\lambda = 83,7$ / (·); $\rho = 2,53$ / 3 ; $v = 3,48 \cdot 10^{-7}$ 2 / ; $= 28,09$ / ; $\rho = 2,33$ / 3 ; $\Delta = 46,47$ /		
			Ge	Si	v ,	,	$b \cdot 10^3$,
Li	459	2,89	1	2	45,00	-9,72	0
Cu	1356	13,02	3	4	206,08	49,86	-30,09
Ag	1234	11,95	5	6	154,20	-33,11	-31,94
Fu	1336	12,69	7	8	70,41	-81,79	-43,03
Zn	693	6,68	9	10	160,64	17,91	4,77
Al	932	10,76	11	12	62,91	-17,33	-6,11
Ga	303	5,59	13	14	48,78	13,60	3,47
In	430	3,24	15	16	123,22	47,90	14,11
Sn	505	7,08	17	18	64,05	34,09	6,28
Pb	800	4,78	19	-	-	-	-
Sb	904	20,10	20	21	36,75	13,77	6,37
Di	544	11,01	22	23	125,18	62,12	8,62
S	392	1,23	-	24	156,30	0	0
Se	491	5,3	-	25	244,54	0	0
Te	723	17,90	-	26	139,61	0	0
Fe	1808	13,02	-	27	161,06	24,96	-
Ni	1728	17,63	28	29	-	-	-

4.2 —

	\bar{N} ,	f,			\bar{N} ,	f,	
	/ 3	/			/ 3	/	
1	7 17	1,5	0,10	15	4 18	1,8	0,18
2	6 18	0,5	0,10	16	7 19	1,2	0,18
3	4 16	1,8	0,12	17	3 19	1,9	0,12
4	1 17	0,7	0,12	18	5 18	1,2	0,12
5	4 14	1,9	0,13	19	4 16	2,0	0,14
6	5 14	0,8	0,13	20	2 18	1,5	0,15
7	2 15	2,0	0,14	21	7 18	0,5	0,15
8	8 15	0,9	0,14	22	1 17	1,5	0,16
9	2 17	1,5	0,15	23	8 17	0,6	0,16
10	2 16	1,0	0,16	24	4 15	0,7	0,17
11	4 19	1,6	0,16	25	5 14	0,8	0,17
12	5 19	1,0	0,16	26	1 15	0,8	0,18
13	4 20	1,7	0,17	27	2 15	1,0	0,18
14	2 18	1,1	0,17	28	8 14	0,8	0,18
				60			- 120
				- 40			- 55

7.5

,

.

(
)

$$\bar{N} (1+p), \quad \bar{N} \cdot p - \bar{N} .$$

,

$\bar{N} ()$

(/ ³)

,

(),

,

:

$$N () = N_0 \left[1 - (1 - \alpha_0) \exp \left(- \frac{K_0 \cdot f \cdot x}{D} \right) \right], \quad (7.29)$$

f -

, / ; K₀ -

, / ³; D -

²/ ; N₀ -

, / ³.

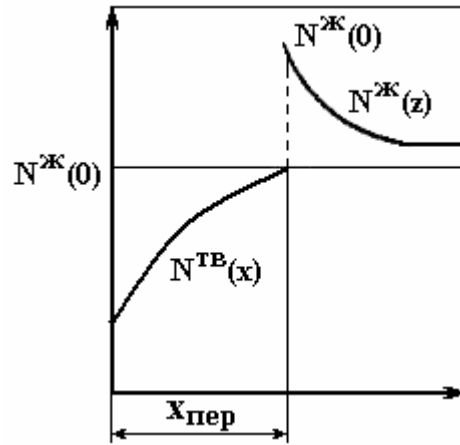
$$\alpha_0 D, \quad (7.29)$$

(7.29)

$$-5 \cdot (10^{-5} - 0,0007)$$

$$N () = N_0$$

(. 7.10).



7.10 – ,

, ()

$$= 5D / (\sigma \cdot f) \quad (7.30)$$

x , F,

:

$$V = F \cdot \quad (7.31)$$

, , (7.30),

($\sigma > 1$ $\sigma < 1$)

D ,

1,5...2

D.

$$N(x) = N_0 = N_0,$$

N_0 -

$$\left(\dots \right)$$

:

$$N(z) = \frac{N_0}{K_0} \left[K_0(1-K_0) \exp\left(-\frac{f \cdot z}{D}\right) \right], \quad (7.32)$$

z -

$z=0,$

$$N(0) = N_0 / \dots$$

$$N(\dots) = N(0) \cdot \dots = N_0.$$

z

$0 < 1,$

$0 > 1.$

$f/D.$

$$z = D \cdot \ln[(1 - \dots)/0,005 \dots] / f$$

$N(z)$

$1,005 N_0,$

$(z=1, \dots)$

$),$

$$f/D = \ln[(1 - K_0)/(0,005 \cdot K_0)] / 1,$$

$N(1)$

$1,005 N_0$

(7.11).

" "

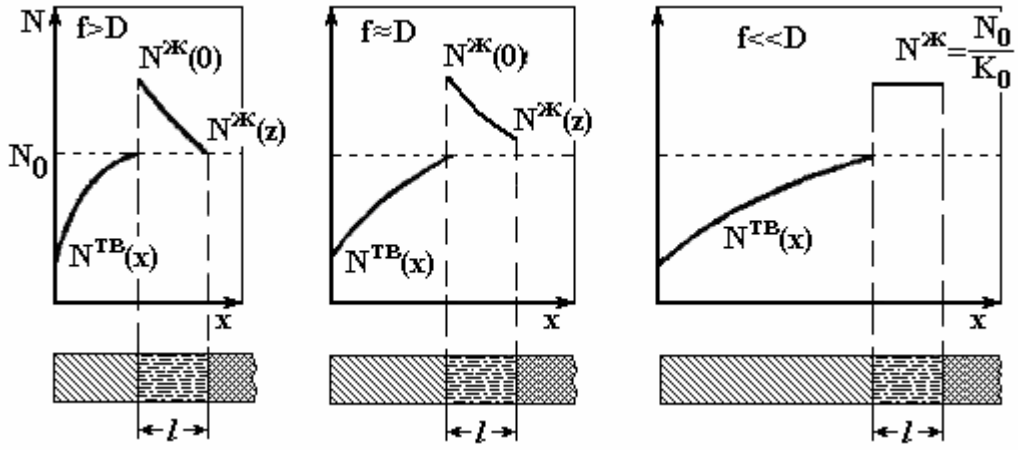
$N(1)/N_0 > 1$

,

.

$f \ll D$

$N_0/K_0.$



7.11 -

f D

(. . 7.12).

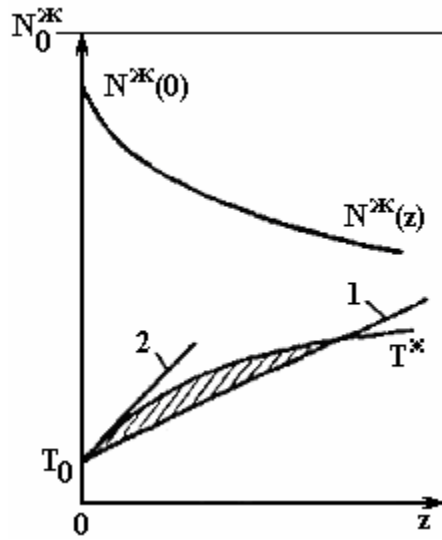
(. .)

" "

G_{\min}

)

(



1- ; 2 -

7.12 –
(* -)

G_{\min} , / ,
,
-

$$G_{\min} = \left(\frac{dT}{dz} \right) \Big|_{z=0} = \frac{[f \cdot m(N - N_0)]_{\max}}{D}, \quad (7.33)$$

f - , / ; m -

T-x (m=dT/dN , \cdot $^3/$); D -

, $^2/$;

N -

N , a / 3 .

(7.33)

$$, \quad (7.33)$$

:

$$G_{\min} = -f \cdot m \cdot N_{\max} (1 - \theta) / (\theta \cdot D). \quad (7.34)$$

; $m > 0$ $\theta > 1$ $m < 0$ $\theta < 1$, f

:

$$N = \frac{\rho \cdot N^A \cdot \Delta H}{M_A \cdot R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right), \quad (7.35)$$

:

$$m_{T \rightarrow T'} = - \frac{\rho \cdot R}{\rho_A \cdot N^A \cdot \Delta H}, \quad (7.36)$$

(,), ; ρ_A -
 , / ³; - , / ; ΔH , -
 / ; N - , $6,02 \cdot 10^{23}$, ⁻¹.

$$\theta > 1, \quad \theta < 1 -$$

, , :

$$N_{\max} = \bar{N} (1 +). \quad (7.37)$$

,

.4.1;

f . 7.6.

1.

, , , ,
 , ,
 ,
 f=1,5 / ,
 - 40 / , d=60 ,
 $\bar{N} = 5 \cdot 10^{17} \cdot 10^{-3}$, = 0,1.

1.

, 4, $\alpha_0=0,087$.

2.

:

$$N_0 = N(0) / \alpha_0 = \bar{N} (1 - \alpha_0) / \alpha_0 = 5 \cdot 10^{17} (1 - 0,1) / 0,087 = 5,6 \cdot 10^{18}, \quad 10^{-3}.$$

3.

,

7.4,

$$D = 0,85 \cdot 10^{-34} \cdot 10^2 / .$$

4.

$$(7.30)$$

:

$$x = \frac{5 \cdot 0,85 \cdot 10^{-4} \cdot 60}{0,087 \cdot 0,16} = 1,95,$$

5.

:

$$F = 3,14 \cdot 32 = 28,26, \quad 10^2.$$

6.

,

,

:

$$V = 28,26 \cdot 1,95 = 55,11 \quad 10^3.$$

7.

$$(7.29)$$

$$N(x) = 5,6 \cdot 10^{18} \left[1 - 0,913 \exp \left(- \frac{0,087 \cdot 0,15}{60 \cdot 0,85 \cdot 10^{-4}} \cdot x \right) \right] = 5,6 \cdot 10^{18} (1 - 0,913 e^{-2,56x}).$$

8.

$$D_p = 20D.$$

$$x = \frac{5 \cdot 20 \cdot 0,85 \cdot 10^{-4} \cdot 60}{0,087 \cdot 0,16} = 39,$$

9.

$$m \quad (5.8):$$

$$m = - \frac{1210^2 \cdot 72,59 \cdot 8,314}{5,62 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 34800} = -7,5 \cdot 10^{-21},$$

10.

(7.37):

$$N_{\max} = 5 \cdot 10^{17} (1 + 0,1) = 5,5 \cdot 10^{17},$$

11.

$$(7.34):$$

$$G_{\min} = - \frac{0,15(-7,5 \cdot 10^{-21}) \cdot 5,5 \cdot 10^{17} (1 - 0,087)}{60 \cdot 0,087 \cdot 0,86 \cdot 10^{-4}} = 1,3,$$

2.

$l=1$

$$f=0,088; 0,175 \quad 0,35 \quad /$$

$$N_0=2 \cdot 10^{18} \quad / \quad ^3$$

1.

7.4,

$\rho=0,087$.

2.

7.4,

$$D = 0,85 \cdot 10^{-4} \quad ^2 /$$

3.

(7.32)

:

$$N(z) = \frac{2 \cdot 10^{18}}{0,087} \left[0,087 + 0,913 \exp \left(- \frac{0,088 \cdot 10^{-1}}{60 \cdot 0,85 \cdot 10^{-4}} \cdot z \right) \right] = 2,3 \cdot 10^{19} (0,087 + 0,913 e^{-1,725z}),$$

$$N(z) = 2,3 \cdot 10^{19} (0,087 + 0,913 e^{-3,43z}), \quad / \quad ^3;$$

$$N(z) = 2,3 \cdot 10^{19} (0,087 + 0,913 e^{-6,86z}), \quad / \quad ^3;$$

$$N(z) \cdot 10^{-19}, \quad / \quad ^3,$$

f z

:

f, /	z,					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,088	2,30	1,69	1,25	0,94	0,73	0,57
0,175	2,30	1,24	0,73	0,47	0,34	0,27
0,350	2,30	0,73	0,34	0,23	0,21	0,20

$$\lg N = f(z)$$

7.6 –

	f, /	f, /	f, /	l,		f, /	f, /	f, /	l,
1	0,20	1,00	5,00	1	15	0,05	0,25	1,20	1
2	0,08	0,40	2,00	2	16	0,04	0,20	1,00	2
3	0,10	0,50	2,50	3	17	0,20	1,00	5,00	3
4	0,06	0,30	1,50	4	18	0,08	0,40	2,00	4
5	0,32	1,60	8,00	5	19	0,07	0,35	1,80	5
6	0,30	1,50	7,50	1	20	0,05	0,25	1,30	1
7	0,02	0,80	4,00	2	21	0,03	0,15	0,70	2
8	0,07	0,35	1,60	3	22	0,30	1,50	7,50	3
9	0,05	0,30	1,50	4	23	0,12	0,60	3,00	4
10	0,07	0,35	1,60	5	24	0,10	0,50	2,50	5
11	0,12	0,60	3,00	1	25	0,12	0,60	3,00	1
12	0,10	0,50	2,50	2	26	0,30	0,30	1,50	2
13	0,04	0,20	1,00	3	27	0,30	1,50	7,50	3
14	0,04	0,20	1,00	4	28	0,20	1,00	5,00	4

7.6

() : F_M

$$N(x) = K \cdot N(t_0) \cdot (1-g)^{K+K-1}; \quad g > 0 \quad (7.38)$$

$N(t_0)$
/ ³; - ; - , ; g -
,
(7.38) - , , $g \cdot V_0 / F$,
 V_0 - , ³; F -
, ². $N(t_0)$
:

$$N(t_0) = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot F}{V_0} \cdot t_0\right), \quad (7.39)$$

$$= k \cdot F / (f \cdot F), \quad (7.40)$$

k - , / ; F - ,
 t_0 - , ; f -
 , / ; N_0 - , / ³.

, 0,01 .
 (k = 0, = 0),
 $N(t_0) = N_0$, (7.38)

$$N(\) = K \cdot N_0 (1-g)^{k-1}. \quad (7.41)$$

(F)
 :

$$N(\) = \frac{K \cdot N_0}{K + K} \left\{ 1 - [1 - (+)] \exp\left(-\frac{+}{\ell} \cdot \right) \right\} \quad (7.42)$$

N_0 -
 , / ³; 1 - , ; -
 , .
 , (6.5)

$$N(\) = N_0 \left[1 - (1 -) \exp\left(-\frac{\cdot}{\ell} \cdot \right) \right]. \quad (7.43)$$

(7.38) (7.41) (7.42) (7.43) ,

$$N(t \geq t_0) / K \cdot N(t_0) = N(x) / (x \cdot N_0)$$

$$N(x) / N_0$$

$$k = \dots$$

$$k = \frac{V_0}{F \cdot t_0} \cdot \ln \frac{N_0}{N(t_0)}, \quad (7.44)$$

$$t_0(\dots)$$

).

$$5 \cdot 10^{-4} / ,$$

$$3 \cdot 10^{-5} / ,$$

$$1 \cdot 10^{-4} / ,$$

$$1,2 \cdot 10^{-4} / ,$$

$$4,1 \cdot 10^{-6} / .$$

k

$$P_{(B)}^0$$

$$B(p_B^0)$$

$$m (m=1, 2, 4)$$

$$j = 3,16 \cdot 10^{-3} \sum_m \frac{m \cdot p_{B,m}^0 \cdot N_A}{(2\pi RT)^{3/2} \cdot M_{B,m}}, \quad / (\dots): \quad (7.45)$$

$$P_{B,m}^0$$

$$m, ; , m$$

$$P_{B,m}^0$$

$$P_{B,m}^0 = P_{(B,m)}^0 \cdot (x_B \cdot \gamma_B)^m, \quad (7.46)$$

$$P_{(B,m)}^0$$

$$m, ; x_B, y_B$$

$$j = 3,16 \cdot 10^{-3} \sum_m \frac{m \cdot p_{(Bm)}^0 \cdot (N_B \cdot \gamma_B)^m}{(\rho_A / \dots)^m \cdot (2\pi R \cdot T \cdot B_m)^{0,5} \cdot (N^A)^{m-1}}, \quad (7.47)$$

ρ_A - , / ³; -
 , / .

(7.45).

, / , :

$$k = 3,16 \cdot 10^{-3} \sum_m \frac{m \cdot p_{(Bm)}^0 \cdot (N_B)^{m-1} \cdot (\gamma_B)^m}{(\rho_A / \dots)^m \cdot (2\pi R \cdot T \cdot B_m)^{0,5} \cdot (N^A)^{m-1}}. \quad (7.48)$$

(7.48) , k [(7.38), (7.39) (7.42)] ,

$m = 1$,

· , V

· k , -

. 7.7. 20

; 21 30 -

, $F = b \cdot l$, b -

; 31 40 -

$F = \pi d \cdot l$. 1...20

$N () / [K \cdot N (t_0)]$;

21...40 - $N () / N_0$

1.

()

[

() ;

()

() $k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ / .

d = 60 ;

d = 80 (

d = 15 ,

l = 10 .,

l = 20

b = 15).

f =

1,5 / .

n = 40 / ;

: n = 3 / ,

n = 0,5 / .

1.

: $\sigma_0 = 0,02$.

2.

$v = 1,35 \cdot 10^{-7}$ /²

$\rho_{Ge} = 5,62 \cdot 10^3$ /³; $\eta = 7,59 \cdot 10^{-4}$ /².

3.

$D_i = 0,211$.

$$D = \frac{10^{13} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1210}{14 \cdot 3,14 \cdot 7,59 \cdot 10^{-4} \cdot 0,211} = 2,37 \cdot 10^{-5}, \text{ /}^2$$

4.

$\omega = 2\pi n / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 40 / 60 = 4,19$ /⁻¹.

5.

$\delta = 2,2(1,35 \cdot 10^{-7})^{0,17} \cdot (2,37 \cdot 10^{-5})^{0,33} \cdot (4,19)^{-0,5=2,2} \cdot 0,68 \cdot 0,001 \cdot 42 \cdot 0,489 = 1,04 \cdot 10^{-2}$.

6.

:

$$K = \frac{0,02}{0,02 + 0,98 \exp\left(-\frac{1,04 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 \cdot 10}{60 \cdot 2,37 \cdot 10^{-5}}\right)} = 0,059.$$

7.

:

$$F = 0,785 \cdot 52 = 19,63 \quad ^2.$$

8.

:

$$F = 0,785(82 - 52) = 30,6 \quad ^2.$$

9

:

$$K = \frac{1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 30,6 \cdot 60}{1,5 \cdot 0,1 \cdot 19,63} = 0,026.$$

10.

(7.38)

:

$$\frac{N(x)}{KN(t_0)} = (1-g)^{0,052+0,016-1} = (1-g)^{-0,916}. \quad (7.49)$$

(7.41) :

$$\frac{N(x)}{KN_0} = (1-g)^{-0,942}. \quad (7.50)$$

:

	g - ,				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
7.49	1	1,227	1,597	2,315	4,368
7.50	1	1,234	1,618	2,371	4,554

<1

>1

2.

$$N_{Sb} = 5 \cdot 10^{18} / \text{ }^3.$$

1. $P_{(Bm)}^0$ m:

$$s_i = 1688 ;$$

$$\lg p^0(Sb_4) = 30,63224 - 8141,417/1688 + 0,0003062 \cdot 1688 -$$

$$- 6,932371 \cdot \lg 1688 = 3,9527; \quad p^0(Sb_4) = 8968,9 .$$

$$\lg p^0(Sb_2) = 34,55655 - 12239,825/1688 + 0,00066724 \cdot 1688 -$$

$$- 7,46810 \cdot \lg 1688 = 4,32974; \quad p^0(Sb_2) = 21364,875 .$$

2. :

$$= 13,77 / ;$$

$$Sb = 6,73 \cdot 10^{-3} / (\cdot);$$

$$\lg \gamma (SB) = (13,77 - 6,73 \cdot 10^{-5} \cdot 1688) / 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 1688 = 0,17;$$

$$\gamma (Sb) = 1,18.$$

3. $\rho_{Si} = 2,53 \text{ / } \text{cm}^3$ $\rho_{Si} = 28,08 \text{ / } \text{cm}^3$

(7.48):

$$= 3,16 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{2 \cdot 21364,875 \cdot 5 \cdot 10^{18} \cdot 1,18^2}{(2,53/28,08)^2 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 8,314 \cdot 1688 \cdot 243,4)^{0,5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}} + \frac{4 \cdot 8968 \cdot (5 \cdot 10^{18})^3 \cdot 1,18^4}{(2,53/28,08)^4 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 8,314 \cdot 1688 \cdot 486,8)^{0,5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}} \right) = 4,15 \cdot 10^{-5} + 2,93 \cdot 10^{-13} = 4,15 \cdot 10^{-5} \text{ / } .$$

$(3 \cdot 10^{-5} \text{ / })$

N_{Sb}

28 %.

:

$= [4,15 \cdot 10^{-4} / (5 \cdot 10^{18})] W_{Sb} = 8,3 \cdot 10^{-24} \cdot N_{Sb} .$

7.7 –

			d ,	d ,	n,	f,	l,	b,
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Ge	P	40	120	40	0,5	–	–
2			45	130		1,0	–	–
3			50	140		1,5	–	–
4			55	150		2,0	–	–
5			60	160		2,5	–	–
6	Ge	As	40	120	40	0,5	–	–
7			45	130		1,0	–	–
8			50	140		1,5	–	–
9			55	150		2,0	–	–
10			60	160		2,5	–	–
11	Si	P	100	270	55	0,5	–	–
12			120	300		0,7	–	–
13			140	350		1,0	–	–
14			150	350		1,2	–	–
15			180	450		1,5	–	–

16	Si	Sb	100	270	55	1,5	–	–
17			120	300		1,2	–	–
18			140	350		1,0	–	–
19			150	350		0,7	–	–
20			180	450		0,5	–	–
21	Ge	P	–	–	–	3,0	70	35
22			–	–		3,5	75	38
23			–	–		4,0	80	40
24			–	–		4,5	85	42
25			–	–		5,0	90	45
26	Ge	As	–	–	–	3,0	70	35
27			–	–		3,5	75	38
28			–	–		4,0	80	40
29			–	–		4,5	85	42
30			–	–		5,0	90	50
31	Si	P	50	–	–	2,0	10	–
32			55	–		1,5	12	–
33			60	–		1,0	14	–
34			65	–		0,7	12	–
35			70	–		0,5	14	–
36	Si	Sb	50	–	–	2,0	10	–
37			55	–		1,5	12	–
38			60	–		1,0	14	–
39			65	–		0,7	12	–
40			70	–		0,5	14	–

/		
1		Sb, , k = 1·10 ⁻² , 1% (.)
2		0,5 40 . ; 1,5 / .
3		d = 0,1 = 0,75 . ρ = 1,8·10 ³ / ³ . 105,9 - 0,044 , /(. .). /(. .).
4		d = 80 h = 20 . α=1500 / ² . .), θ= 20° , ∞ = 700° .
5		1,5 / . f = - 40 / .
6		f=1,5 / , d=60 , - 40 / , $\bar{N} = 5 \cdot 10^{17} \text{ }^{-3}, = 0,1.$
7		f=1,5 / , d=60 , - 40 / , $\bar{N} = 5 \cdot 10^{17} \text{ }^{-3}, = 0,1.$

8		$l=1$. $f=0,088$; $0,175 \quad 0,35 /$. $N_0 = 2 \cdot 10^{18} / ^3$.
9	,	$k = 4,1 \cdot 10^{-5} /$. $d = 60$; $d = 80$. $f = 1,5 /$. $n = 40 /$;
10	,	$k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ $d = 80$. $d = 60$; $f = 1,5 /$. $n = 40 /$;
11	,	$()$ $d = 15$, $l = 10$. $k = 4,1 \cdot 10^{-5} /$. $f = 1,5 /$. $n =$ $3 /$;
12		$()$ $l = 20$, $b = 15$. $k = 4,1 \cdot 10^{-5} /$. $f = 1,5 /$. $n =$ $0,5 /$;
13		$Sb,$, $k = 1 \cdot 10^{-2}$, $1\% ()$

14		$d = 0,1$ $\rho = 1,8 \cdot 10^3 / \text{m}^3$ $\alpha = 1500 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ $\theta_0 = 20^\circ$, $\theta_\infty = 1300^\circ$ $\lambda = 105,9 - 0,044 \cdot \theta$ $\alpha = 1098 + 0,17 \cdot \theta$
15		$d = 60$; $f = 1,5$ / ; $n = 40$ / ; $k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ $d = 80$.
16		$d = 40$. $f = 1,5$ / . $n = 150$. $0,8$, n -
17		$d = 60$; $f = 1,5$ / . $n = 40$ / ; $k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ $d = 80$.
18		$d = 80$ $\alpha = 1500 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$, $\theta_0 = 20^\circ$, $\theta_\infty = 700^\circ$ $h = 20$.
19		$f = 1,5$ / . $- 40$ / .
20		$d = 80$ $\alpha = 1500 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$, $\theta_0 = 20^\circ$, $\theta_\infty = 700^\circ$ $h = 20$.

21		0,5 1,5 / .	40 . ; 150 . , 0,8 , n-
22		1,5 / .	f = - 40 / .
23		n = 40 / ;	d = 60 ; f = 1,5 / . k = 4,1·10 ⁻⁵ d = 80 .
24		n = 40 / ;	d = 60 ; f = 1,5 / . k = 4,1·10 ⁻⁵ d = 80 .
25		Sb,	k = 1·10 ⁻² . 1% (.)
26	¹¹⁸ B ^{VI}	0,175 0,35 / . N ₀ = 2·10 ¹⁸ / ³ .	l=1 . f=0,088;
27		= 700° .	d = 80 α=1500 / ² . .), h = 20 . θ = 20° , ∞
28		0,5 / ;	() l = 20 , b = 15 . k = 4,1·10 ⁻⁵ / . f = 1,5 / . n =

29		<p>() $d = 15$; $l = 10$; $k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ / . $f = 1,5$ / . $n = 3$ / ;</p>
30		<p>$k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ $d = 60$; $d = 80$; $f = 1,5$ / . $n = 40$ / ;</p>
31		<p>$0,8$, $n = 150$; $0,5$; 40 ; $1,5$ / .</p>
32	, III _B ^v	<p>$f = 1,5$ / . $- 40$ / .</p>
33		<p>$l = 1$; $f = 0,088$; $0,175$; $0,35$ / . $N_0 = 2 \cdot 10^{18}$ / ³.</p>
34		<p>() $l = 20$; $b = 15$; $k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ / . $f = 1,5$ / . $n = 0,5$ / ;</p>
35		<p>$d = 80$; $h = 20$; $\alpha = 1500$ / ² . .), $\theta = 20^\circ$, ∞ $= 700^\circ$.</p>

36		<p>()</p> <p>$l = 20$,</p> <p>$b = 15$.</p> <p>$k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ / .</p> <p>$f = 1,5$ / .</p> <p>$n =$</p> <p>0,5 / ;</p>
37		<p>0,8 ,</p> <p>n-</p> <p>150 . ,</p> <p>40 .</p> <p>0,5</p> <p>1,5 / .</p> <p>;</p>
38		<p>()</p> <p>$d = 15$,</p> <p>$l = 10$.</p> <p>$k = 4,1 \cdot 10^{-5}$ / .</p> <p>$f = 1,5$ / .</p> <p>$n =$</p> <p>3 / ;</p>
39		<p>$k = 4,1 \cdot 10^{-5}$</p> <p>$d = 80$.</p> <p>$d = 60$;</p> <p>$f = 1,5$ / .</p> <p>$n = 40$ / ;</p>

1. . // . . ,
. . , . . , . . , . . , . . -
. . , 1992. - 408 .
2. : .
. . , . . , . . , . . ,
. . , . - 2004. - 344 . , .
3. . . . :
. 1972. - 432 .
4. . . -
: . . - . : , 2005. -
80 .
5. . . . ,
, . . : . . : , 1973. 496 .
6. - .
. . , . . , . . : . . :
, 1982. - 352 .
7. . . . :
. « »
. . : , 1970. - 504 . - .
8. . . . ,
. . : . . : . - 1988. 574 .

					Si, Ge	GaAs
		() ,			/ 3 ,	°C
B	A	$E_v + 0,045$	0,88	0,8	$6 \cdot 10^{20}$	1400
l		$E_v + 0,057$	0,126	0,02	$2 \cdot 10^{19}$	1250
Ga		$E_v + 0,065$	0,126	0,003	$1 \cdot 10^{19}$	1250
In		$E_v + 0,16$	0,144	$4 \cdot 10^{-4}$	–	–
Tl	A	$E_v + 0,26$	0,147	10^{-5}	–	–
P		$E - 0,044$	0,11	0,35	$1,3 \cdot 10^{21}$	1200
As		$E - 0,049$	0,119	0,3	$1,8 \cdot 10^{21}$	1200
Sb		$E - 0,039$	0,136	0,023	$6 \cdot 10^{19}$	1350
Bi		$E - 0,069$	0,146	$7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{17}$	1320
		$E - 0,53$	0,126	$8 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{16}$	1320
Fe		$E_v + 0,40$	–	–	–	–
n		$E - 0,53$	0,127	10^{-5}	$3,8 \cdot 10^{16}$	1320
Au	A	$E_v + 0,39$	0,150	$2,5 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{17}$	1300
		$E - 0,30$	–	–	–	–
		$E_v + 0,01$	0,88	10	–	–
l		$E_v + 0,01$	0,126	0,073	$4 \cdot 10^{20}$	700
Ga		$E_v + 0,01$	0,126	0,037	$5 \cdot 10^{20}$	700
In		$E_v + 0,01$	0,144	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{18}$	800
Tl		$E_v + 0,01$	0,147	$4 \cdot 10^{-5}$	–	–
		$E - 0,01$	0,110	0,12	–	–
As		$E - 0,01$	0,118	0,03	$6 \cdot 10^{19}$	800
Sb		$E - 0,01$	0,136	0,003	$5 \cdot 10^{20}$	700
Bi		$E - 0,01$	0,146	$4,5 \cdot 10^{-5}$	–	–
		$E - 0,27$	0,126	$\sim 1 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	870
Fe		$E_v + 0,34$	–	–	–	–
u		$E_v + 0,04$	0,135	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{18}$	750
		$E_v + 0,32$	–	–	–	–
		$E - 0,26$	–	–	–	–
		$E_v + 0,05$	0,150	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{16}$	900
u		$E_v + 0,15$	–	–	–	–
		$E - 0,04$	–	–	–	–
		$E - 0,20$	–	–	–	–

					Si, Ge	GaAs
	-		() -	-	/ 3 ,	°C
Zn	A	$E_v + 0,024$	0,131	0,42	$2 \cdot 10^{20}$	1238
Cd	A	$E_v + 0,021$	0,148	0,02	-	-
		$E - 0,002$	0,117	0,14	$1 \cdot 10^{20}$	1238
Si	A	$E_v + 0,025$	-	-	-	-
			0,122	0,015	$6 \cdot 10^{19}$	1238
Ge	A	$E_v + 0,03$	-	-	-	-
Sn			0,140	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{18}$	1238
S		$E - 0,004$	0,104	0,5	-	-
Se		$E - 0,003$	0,114	0,40	-	-
		$E - 0,003$	0,132	0,046	-	-
		$E_v + 0,37$	0,126	$2,0 \cdot 10^{-3}$	-	-
Fe	A	$E_v + 0,54$	-	-	-	-
Cr	A	$E_v + 0,81$	0,130	$5,8 \cdot 10^{-4}$	-	-
		$E_v + 0,023$	0,135	$2 \cdot 10^{-3}$	-	-
u		$E_v + 0,15$	-	-	-	-
		$E_v + 0,24$	-	-	-	-
		$E_v + 0,51$	-	-	-	-

: 1) ,
. 2) - , - . 3) - , E_v -

*

			(300)	(300)	$\alpha \cdot 10^5$ -1	(300)	$^2/(\cdot)$	$^2/(\cdot)$
Si	1417		0,543072	2,32830	2,4 (300)	1,14	1500 (300)	480 (300)
Ge	937		0,565754	5,32600	5,75 (300)	0,67	4500 (300)	1900 (300)
GaAs	1238		0,56535	5,3161	6,0 (300)	1,43	8500 (300)	450
InAs	943		0,605838	5,667	5,19 (300)	0,356	35 000 (300)	240
GaSb	706		0,609686	5,61220	6 (298 – 873)	0,79	4000 (300)	1400
InSb	525		0,64795	5,775	5,04 (300)	0,18	80 000 (300) 1,2 10^6 (77)	750 9,1 10^3 (77)
GaP	1470		0,54495	4,1297	5,3 (300)	2,26	300 (300)	100
InP	1062		0,586875	4,787	4,75 (300)	1,35	5000 (300)	200
ZnS	1830	(D)	5,4093	4,09	6,14 (300)	3,68	140	-
CdS	1740		5,840	4,825	6,5 (300 – 1100)	2,42 2,53	300 (300)	-
GaSe	1347		0,6050	5,81	-	1,85	500 (300)	-
CdTe	1092		6,482	5,85	4,9 (300)	1,505	4 10^4 (77)	3,8 10^4 (77)
HgTe	670		6,463	8,076	4,0 (300)	-0,15	-	-
ZnSe	1427	(D)	5,6687	5,264	9,44(300 – 1000)	2,8	260	15
ZnTe	1239		6,1033	5,633	9,2 (300)	2,25	100	100
PbS	1114	NaCl	5,935	7,6068	20,3	0,3	614 (293)	800
PbSe	1081		6,1265	8,274	19,4	0,28	3 10^4 (77)	3 10^4 (77)
SnSe	880		a = 4,46 b = 4,14 c = 11,47	6,179	-26,6 () 35,5 (b) 26,7 (c)	0,9 () 1,2 ()	- -	7 10^3 (77) -
PbTe	924	NaCl	6,4603	8,242	19,8	0,32	4 10^4 (77)	3 10^4 (77)
SnTe	805		6,3272	6,445	20,8	0,18	-	1 10^3 (77)

*

:
, ., 1987.

Навчальне видання

Іван Федорович Червоний
доктор технічних наук, професор

Євген Якович Швець
кандидат техн. наук, професор

Роман Миколайович Воляр,
кандидат техн. наук, доцент

Ольга Петрівна Головка,
кандидат техн. наук, доцент

Сергій Геннадійович Єгоров,
кандидат техн. наук, доцент

Юрій Вікторович Головка,
кандидат техн. наук, доцент

ВИРОБНИЦТВО

НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Підручник

Підписано до друку 2012р. Формат 60x84 1,32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 10. Наклад 500 прим.
Видавничий договір №

Запорізької державної інженерної академії
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
Видавничої справи ДК №2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з комп'ютерного оригінал-макету

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
ЗДА, тел. 22-38-240